

Министерство науки и высшего образования РФ
Иркутский национальный исследовательский технический университет

АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ

**Сборник статей
XII Международной научно-технической конференции
(Иркутск, 27 мая – 1 июня 2019 г.)**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского национального исследовательского
технического университета
2019**

УДК 629+656 (082)
ББК 39Я45

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ИРНИТУ

Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 27 мая – 1 июня 2019 г.). – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2019. – 458 с.

Представлены статьи, посвященные актуальным вопросам развития авиамашиностроительных технологий и транспортного комплекса. Приводятся обобщения результатов научных исследований, обмена практическим опытом в интересах развития перспективных конструкций и технологий авиамашиностроения, повышения качества транспортного обслуживания.

Редакционная коллегия:

Бобарика И.О. (отв. ред.) – канд. техн. наук, доцент

Беломестных А.С. – канд. техн. наук, доцент

Печатается с файлов, подготовленных авторами

ISBN 978-5-8038-1391-0

© ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ	8
<i>Устройство неразрушающего контроля элементов остекления кабин воздушных судов П.В. Павлов¹, И.Э. Вольф¹, А.А. Балашов², А.О. Евсин²...</i>	<i>8</i>
<i>Результаты исследовательских испытаний имитационной модели динамики полета одновинтового вертолета с бесшарнирным несущим винтом О.А. Лебякина</i>	<i>15</i>
<i>Использование алгоритма чувствительности при анализе колебаний рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей И.Н. Рыжиков, До Мань Тунг.....</i>	<i>20</i>
<i>Обзор видов и характеристик современных авиационных бортовых радиолокационных станций В.А. Ширыкалов.....</i>	<i>25</i>
<i>Низкотемпературное ионно-плазменное азотирование титанового сплава ВТ6 в тлеющем и дуговом разрядах А.А. Николаев, А.Ф. Тагиров</i>	<i>30</i>
<i>Использование пружинно-массовых моделей для анализа колебаний рабочих колес с расстройкой параметров И.Н. Рыжиков, Нгуен Динь Дыонг</i>	<i>37</i>
<i>Совершенствование высокопроизводительных процессов дуговой сварки в защитных газах Е.А. Ямицкова</i>	<i>42</i>
<i>Алгоритмы классификации производственных ситуаций в многомерном признаковом пространстве В.З. Чоккой, Н.С. Бакурова.....</i>	<i>51</i>
<i>Экспериментальные исследования воздействия заготовки на технологическую оснастку при одностороннем магнитно-импульсном нагружении К.Н. Бобин, М.Б. Детинов, Н.В. Курлаев</i>	<i>61</i>
<i>Особенности структуры и формирования математической модели аэродинамики экраноплана на этапе проектирования Е.А. Галушко, С.М. Кривель</i>	<i>68</i>
<i>Комплексная методика оценки продольной статической устойчивости экраноплана в эксплуатационной области углов атаки и отстояний Ю.Ф. Вишивков, С.М. Кривель</i>	<i>75</i>
<i>Разделение параллельных маршрутов зональной навигации В.А. Борсоев¹, С.С. Демин¹, А.В. Прохоров¹, В.Б. Спрысков¹, А.А. Тараканов¹, И.Н. Шестаков²</i>	<i>82</i>
<i>Разработка методики формализованного выбора технологических операций при проектировании технологического процесса изготовления деталей Р.А. Сокольников.....</i>	<i>91</i>

<i>Износ и эрозионная стойкость в газообразном потоке композитных элементов авиационного двигателя А.В. Зинин¹, С.В. Бухаров¹, С.В. Добровольский¹, А.К. Лебедев¹, К.Р. Пятунин²</i>	<i>96</i>
<i>Пространственное армирование прошивкой высокоплотных толстостенных заготовок слоистых композиционных материалов С.В. Бухаров, А.К. Лебедев, А.В. Зинин.....</i>	<i>107</i>
<i>Автоматизированное определение наличия неисправности в узлах трения маслосистемы авиационных двигателей Д30КП по результатам СВЧ-плазменных измерений А.Ю. Ходунаев^{1,2}</i>	<i>115</i>
<i>Координатная модель базирования изделия в технологическом процессе сборки в машиностроении М.В. Сафонов, Р.Х. Ахатов.....</i>	<i>120</i>
<i>Анализ технологии постановки болт-заклепки А.В. Стрельников.....</i>	<i>126</i>
<i>Метод проведения испытаний на герметичность неразъемных и разъемных стыков элементов летательных аппаратов с помощью тепловизора А.В. Ветлугин, И.Н. Зотов.....</i>	<i>131</i>
<i>Моделирование роста поры в пластине с высоким температурным градиентом А.К. Емалетдинов, А.В. Галактионова.....</i>	<i>140</i>
<i>Нелинейные эффекты при зарождении и росте пор в жаропрочных сплавах АД при термомеханической нагрузке А.К. Емалетдинов, А.В. Галактионова.....</i>	<i>146</i>
<i>Моделирование залечивания пор при термомеханической нагрузке поверхности жаропрочных сплавов А.К. Емалетдинов., А.В. Галактионова</i>	<i>154</i>
<i>Проект кондукторов для сверления отверстий по соединению шпангоутов с обшивками по боковым панелям кабины пилотов. С. С. Ляпин</i>	<i>162</i>
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ.....	178
<i>Опыт создания и применения электронно-образовательного ресурса для графических дисциплин О.В. Белокрылова, В.О. Кобелева.....</i>	<i>178</i>
<i>Исследование влияния ориентации инструмента на силы резания при обработке поверхностей сфероцилиндрическими фрезами Б.Б. Пономарев, Нгуен Ши Хьен</i>	<i>183</i>
<i>Изучение влияния корреляции конфигурационных параметров на точность прогнозирования при оценке доли успешныхборок Л.Ф. Хвацевская ..</i>	<i>188</i>
<i>Оценка эффективности повышения производительности алмазного выглаживания торцев диска по параметрам шероховатости Д.Ю. Казимиров, А.В. Проконьева, В.А. Широколов</i>	<i>195</i>

<i>Исследование влияния скорости алмазного выглаживания на опорную способность поверхности фланцев</i> Д.Ю. Казимиров, А.В. Прокопьева, В.С. Елистратов	203
<i>Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств поверхностного слоя штамповой оснастки для горячей гибки</i> Н.С. Улаханов ¹ , У.Л. Мишигдоржийн ¹ , А.Д. Грешилов ¹ , А.Г. Тихонов ²	211
<i>Изучение фазовых превращений в деталях из титанового сплава VT22 при плоском шлифовании</i> Я.И. Солер, Май Динь Ши, Д.Ю. Казимиров	218
<i>Ионное азотирование нержавеющей стали AISI 321 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля</i> Р. К. Вафин, А. В. Асылбаев	222
<i>Трехосевая шпиндельная головка для производства панелей в авиастроении</i> И.Г. Майзель ¹ , В.В. Платонов ²	227
<i>Использование концепции «фабрики будущего» при технологической подготовке производства.</i> И.В. Фокин	234
<i>Технология нанесения покрытий с аморфно-кристаллической структурой из плазмы вакуумного дугового разряда</i> Е.А. Брюханов, Р.Ш. Нагимов, Э.Л. Варданян, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов	239
<i>Повышение износостойкости металлорежущего инструмента, работающего при высоких нагрузках</i> Р.Ш. Нагимов, Э.Л. Варданян, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов	244
<i>Многофункциональное технологическое оборудование на модульном принципе</i> В.Н. Москвитин, Е.В. Зеньков, Е.А. Иванов	251
<i>Анализ эффективности технологической подготовки операции фрезерования кромок на ртк</i> С.Ю. Фалеев, А.С. Беломестных	256
<i>Автоматизированная система валидации измерительных комплексов для машиностроительных предприятий</i> М.Б. Сольский, А.С. Беломестных	263
<i>Система дистанционного мониторинга и управления промышленным роботом kuka kr210 r2700</i> В.А. Фоломеев, А.С. Беломестных	268
<i>Точность обработки при изготовлении радиоэлектронных деталей</i> Ю.И. Карлина ¹ , Д.А. Журавлев ¹ , Д.С. Леонович ¹ , А.Д. Колосов ¹	275
<i>Преимущества внедрения 3D-допусков при конструировании изделий радиоэлектронной промышленности</i> Ю.И. Карлина ¹ , Д.А. Журавлев ¹ , Д.С. Леонович ¹ , А.Д. Колосов ¹	281
<i>Проектирование конструкции термопатрона</i> Д.С. Леонович ¹ , Ю.И. Карлина ¹ , Д.А. Журавлев ¹ , А.С. Суханов ¹	287
<i>Опыт создания и применения электронно-образовательного ресурса для графических дисциплин</i> О.В. Белокрылова, В.О. Кобелева	293

Получение электроэнергии из систем водоснабжения А. Г. Осипов, А. С. Зуев 298

МЕХАНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН 306

Разработка метода управления динамическим состоянием рабочих органов горных машин на основе концепции обратных задач динамики Н.К. Кузнецов¹, И.А. Иов,² Е.С. Долгих¹ 306

Как российские университеты теряют подготовку инженерных кадров П.В. Королев¹, М.М. Ратинер² 313

Особенности формирования динамического состояния вибрационных технологических машин на основе введения дополнительных упругих связей Р.С. Большаков, К.Ч. Выонг 321

О разработке универсального алгоритмического обеспечения исследования свободных колебаний систем взаимосвязанных твердых тел, прикрепленных к стержню А.Д. Мижидон, В.В. Гармаева, А.В. Харахинов 327

Построение шагающей машины с использованием перестраиваемых шарнирных механизмов В.С. Балбаров, Н.М. Рабданова 332

Новые свойства маятника на вращающемся валу механической системы А.И. Артюнин, О.Ю. Суменков 338

О влиянии связности внешних сил на режимы динамического гашения колебаний в технологических и транспортных устройствах С.В. Елисеев¹, Н.К. Кузнецов², А.В. Елисеев³ 347

Анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) под статической нагрузкой волнового торцевого кинематического редуктора М.А. Джасем 353

Обоснование свойств сложных технических систем на основе принципов самоорганизации А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин 360

Создание конструкций манипуляционных систем для защиты струи стали при разливке и определение параметров пневматической системы на машине непрерывного литья заготовок К.Н. Вдовин, Вас. В. Точилкин, В.И. Умнов, Викт. В. Точилкин 368

МЕХАНИКА КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 376

Развитие и эффективное применение экскаваторов при погрузочно-разгрузочных работах А.С. Худченко 376

Применение погрузчиков и эффективность их использования при погрузочно-разгрузочных работах А.С. Худченко, К.А. Сериков 381

<i>Стенд для определения наличия стружки в масле Рещиков С. А., Короташ В. М., Денисов Д. С., Стрельников А. Н., Кокоуров Д. В.</i>	385
<i>Методика расчета рациональных параметров и режимов работы ковшей экскаваторов с активными зубьями Р.Д. Абдурахманов, Ю.И. Чеботарёв</i>	390
<i>Экспериментальное определение эффективности уборки территории цилиндрической щеткой В. Г. Зедгенизов, Л.В. Простакова, С.Н. Сякин</i>	394
<i>Гидростатическая трансмиссия и её применение на строительной технике В.Г. Зедгенизов, В.Н. Ляпина</i>	399
<i>Результаты физического моделирования неисправностей автомобильного электробензонасоса Д.А. Чернышов, А.В Пузаков</i>	405
<i>К вопросу владения индивидуальным транспортом А.Б. Бутузова, Е.А. Потылицын</i>	411
<i>Вопросы реализации эффективной модели формирования транспортных коридоров на территории Республики Саха (Якутия). Т. П. Егорова, А. М. Делахова</i>	416
<i>Применение метода дискретных элементов для решения задачи повышения проходимости автомобильного транспорта Д. С. Тесленко, В. В. Беляков, В. С. Макаров</i>	424
<i>Восстановление дефектных стыков рельсов электродуговой наплавкой Д.А. Неживляк¹, А.Е. Неживляк¹, М.В. Гречнева²</i>	434
<i>Адаптированное обучение геометро-графическим дисциплинам И. И. Кострубова, А. В. Иванов</i>	442
ДАННЫЕ АВТОРОВ	449

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.34

Устройство неразрушающего контроля элементов остекления кабин воздушных судов

П.В. Павлов¹, И.Э. Вольф¹, А.А. Балашов², А.О. Евсин²

1) Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков 54а

2) Научно-исследовательский центр (г. Люберцы, Московская область) Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил Минобороны России, 140003, Московская обл., ул. 3-е Почтовое отделение д.104.

Разработан аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля, принцип действия которого основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения, возможности которого позволяют проводить работы по дефектоскопическому контролю элементов остекления кабин воздушных судов, изготовленных из органического стекла. Проведены натурные испытания разработанного опытного макета прибора в ходе оценки параметров дефекта типа «серебро».

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, остекление, спекл, автотокорреляция, «серебро».*

По данным службы безопасности полетов ВКС МО РФ продолжает увеличиваться число авиационных инцидентов и происшествий по причине разрушения остекления кабин воздушных судов в полете.

В работах [1,2] установлены основные причины снижения прочности элементов остекления от возникновения поверхностных дефектов типа «серебро», что позволило снять ряд вопросов по продлению календарных сроков службы деталям остекления кабин самолетов. Установлена критическая глубина деструктивного слоя, поверхностей остекления из органического стекла при которой достигается наименьшая прочность [3], а так же разработаны методики и способы ремонта и продления ресурса авиационного остекления. Однако, существующие устройства диагностики остекления построены на принципах оптико-визуального контроля, что не позволяет с высокой достоверностью оценить глубину очагов дефектов типа «серебро» и тем самым установить и спрогнозировать предотказное состояние.

Проанализировав принципы построения оптических устройств НК, а также элементную базу источников и приемников когерентного излучения

в широком спектре длин волн выделяет МССОИ в один из перспективных методов НК [4].

На сегодняшний момент можно выделить ряд областей, где МССОИ уже широко применяется в различных сферах диагностики [5-8].

Однако, вопрос о практическом применении МССОИ в задачах дефектоскопического контроля элементов остекления кабин воздушных судов рассмотрен не был. Таким образом, цель работы заключается в оценке потенциальных возможностей МССОИ как инструмента дефектоскопического элементов остекления кабин воздушных судов.

Для решения поставленной цели в работе рассматриваются вопросы по практической реализации специализированного программного обеспечения, предназначенного для управления работой спекл-лазерного дефектоскопа [9] с последующей обработкой и выдачей результатов измерений на основе использования алгоритмов цифровой обработки спекл-картин.

Наиболее сложным этапом в реализации МССОИ является разработка инструмента компьютерной обработки, регистрируемых цифровых спекл-картин. Для разработки специализированного программного обеспечения в качестве инструментов обработки спекл-картин были использованы алгоритмы автокорреляционного анализа.

Сущность метода автокорреляционного анализа заключается в определении параметров зондируемого объекта по анализу параметров функции автокорреляции регистрируемых спекл-картин (ширина и площадь функции автокорреляции):

$$r_{\tau} = \frac{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}}{\sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t)^2} \sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau})^2}}, \quad (1)$$

где x_t – значение яркости пикселя в точке t ; $x_{t+\tau}$ – значение яркости пикселя в точке t , в момент смещения τ ; n – количество пикселей, τ – шаг смещения. Количество смещений соответствует размеру спекл-изображения, ширине в случае если производится смещение вдоль оси ОХ, и высоте в случае смещения по оси ОУ.

Данный метод позволяет в режиме реального времени проводить анализ параметров поверхности деталей, изготовленных из различных материалов, путем сопоставления рассчитанных характеристик с эталонными значениями.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники – полупроводниковые лазеры, матричные фотоприемники, портативные компьютеры – позволило создать два макета мобильных спекл-лазерных дефектоскопа (рис. 1): 1-ый вариант с коммутацией с ЭВМ через шину USB, 2-ой вариант через высокочастотный радиоканал wi-fi.

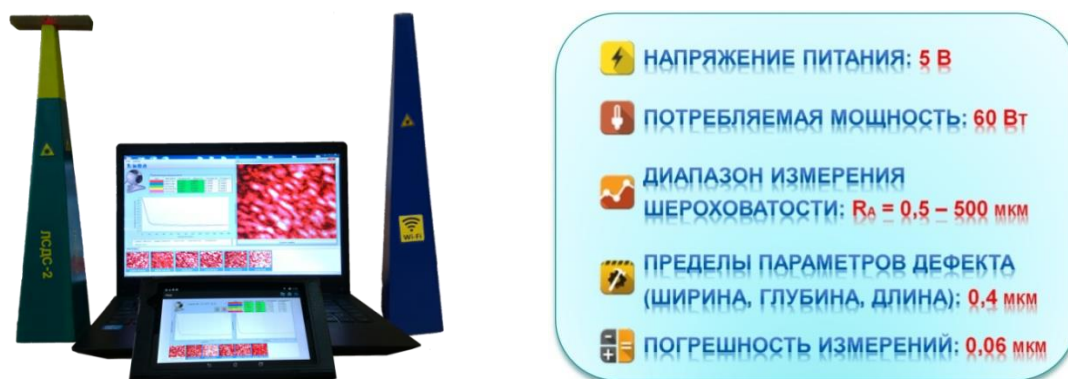


Рис. 1. Внешний вид и характеристики опико-электронного комплекса неразрушающего контроля

Представленный опико-электронный комплекс НК был испытан на этапе дефектоскопического контроля элементов остекления кабин.

Так как глубина дефекта типа «серебро» $>0,1$ мм является критическим значением, следовательно, необходимо, чтобы в эксплуатирующихся авиационных частях имелись устройства, которое бы позволяли определить и своевременно выявить недопустимые дефекты в остеклении, тем самым предотвратить авиационные происшествия, представленные на рис. 2.



Рис. 2. Разрушение остекления фонаря кабины самолета

Диагностика остекления фонаря кабины с помощью данного устройства производится в несколько этапов, на первом этапе осуществляется визуальный осмотр всего фонаря самолёта, в ходе которого обнаруживались очаги образования микротрещин («серебро»). На следующем этапе производится измерение площади очагов дефекта типа «серебро» с последующим поэтапным сканированием и регистрацией спекл-картин от поврежденных участков с помощью спекл-лазерного дефектоскопа (рис. 3).

После сканирования, зарегистрированные спекл-картины сохраняются в памяти ЭВМ, подвергаются обработке с помощью разработанного специализированного программного обеспечения, в ходе которого вычисляются параметры регистрируемых спекл-картин (интервал корреляции,

площадь функции автокорреляции и т.д.), полученных от эталонного образца остекления и с участка остекления с дефектом типа «серебро».



Рис.3. Дефектоскопический контроль остекления фонаря кабины

В результате сравнения полученных данных с эталонными значениями программный модуль принимает решение о состоянии остекления, сигнализируя оператору подсветкой поля «результатов вычислений» – «зеленая заливка» – годен, «красная заливка» – не годен.

Натурные испытания разработанного устройства проводились в два этапа. На первом этапе проведена исследовательская работа по оценке возможности использования спекл-лазерного дефектоскопа на этапе дефектоскопического контроля элемента остекления кабины истребителя.

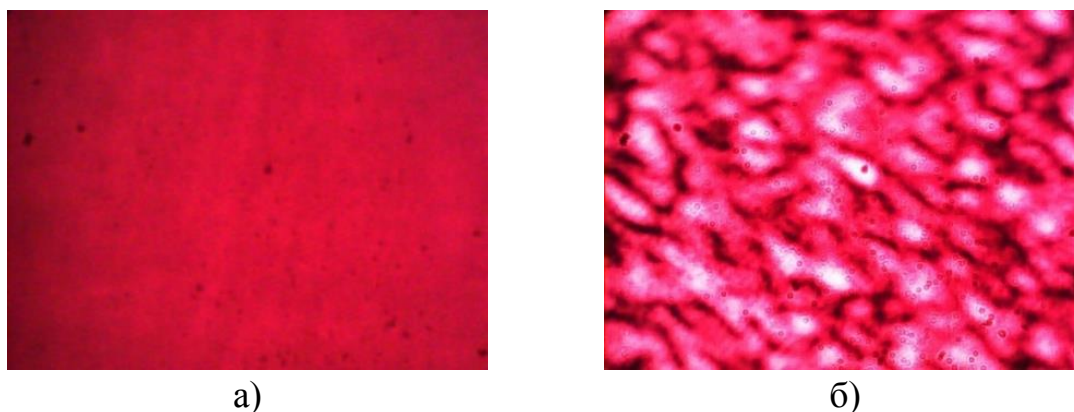


Рис. 4. Спекл-картины, зарегистрированные от поверхности фонаря:
а) – без дефектов, б) – с наличием дефекта типа «серебро»

В ходе эксперимента контролю было подвергнуто два участка остекления: (рис.3) первый неповрежденный участок, а второй с дефектом «серебро». В ходе их зондирования были зарегистрированы спекл-картины, представленные на рис. 4.

После обработки полученных спекл-картин методом автокорреляционного анализа были рассчитаны их параметры, представленные в табл.1:

Таблица 1 – Рассчитанные характеристики спекл-картин

Имя изображения	Интервал автокорреляции	Ширина энергетического спектра
Без дефекта	51,497	1,233
С дефектом	15,617	2,214

В результате эксперимента установлено, что интервал функции автокорреляции спекл-картины с наличием микротрещин меньше, чем у спекл-картины без дефекта «серебро». Таким образом, зная параметры спекл-картин, которые должны получиться от контролируемого участка остекления кабины с известной глубиной деструктивного слоя можно прогнозировать и достоверно производить оценку технического состояния фонаря в процессе эксплуатации.

С целью калибровки разработанного устройства под различные параметры деструктивного слоя было подготовлено 5 образцов авиационного стекла марки СО-120 (рис.6 а.), на поверхности которых были созданы дефекты типа «серебро» с различной глубиной деструктивного слоя.

Подготовка образцов осуществлялась согласно испытаниям проводимых по методике «Руководства по испытаниям противообледенительных жидкостей в части оценки их влияния на элементы конструкции воздушных судов гражданской авиации».

Образцы органического стекла размером (120x20x10) мм подвергались «чистому изгибу» по ГОСТ 4648-90 с созданием на поверхностном слое напряжений от 150 до 675 кгс/см², на растянутую поверхность образца ватным тампоном наносился ацетон, который выдерживался 30 секунд на каждом образце. В результате на поверхности образцов образовывались микротрещины – «серебро». Визуальная оценка состояния поверхностей образцов после испытаний показала, что наибольшее количество микротрещин, образованных на поверхности у 5 образца. Для подтверждения результатов визуального контроля полученные образцы были подвержены зондированию спекл-лазерным дефектоскопом, в ходе которого от каждого образца были зарегистрированы спекл-картины, представленные на рис.6 б) - ж). Далее, с помощью автокорреляционного анализа определена функция автокорреляции каждой спекл-картины и ее площадь, значение которых представлены в таблице 2. Установлено, что чем больше оказывалась величина напряжений в поверхностном слое (глубина деструктивного слоя) на участке образца из органического стекла, тем меньше величина площади функции автокорреляции регистрируемой спекл-картины.

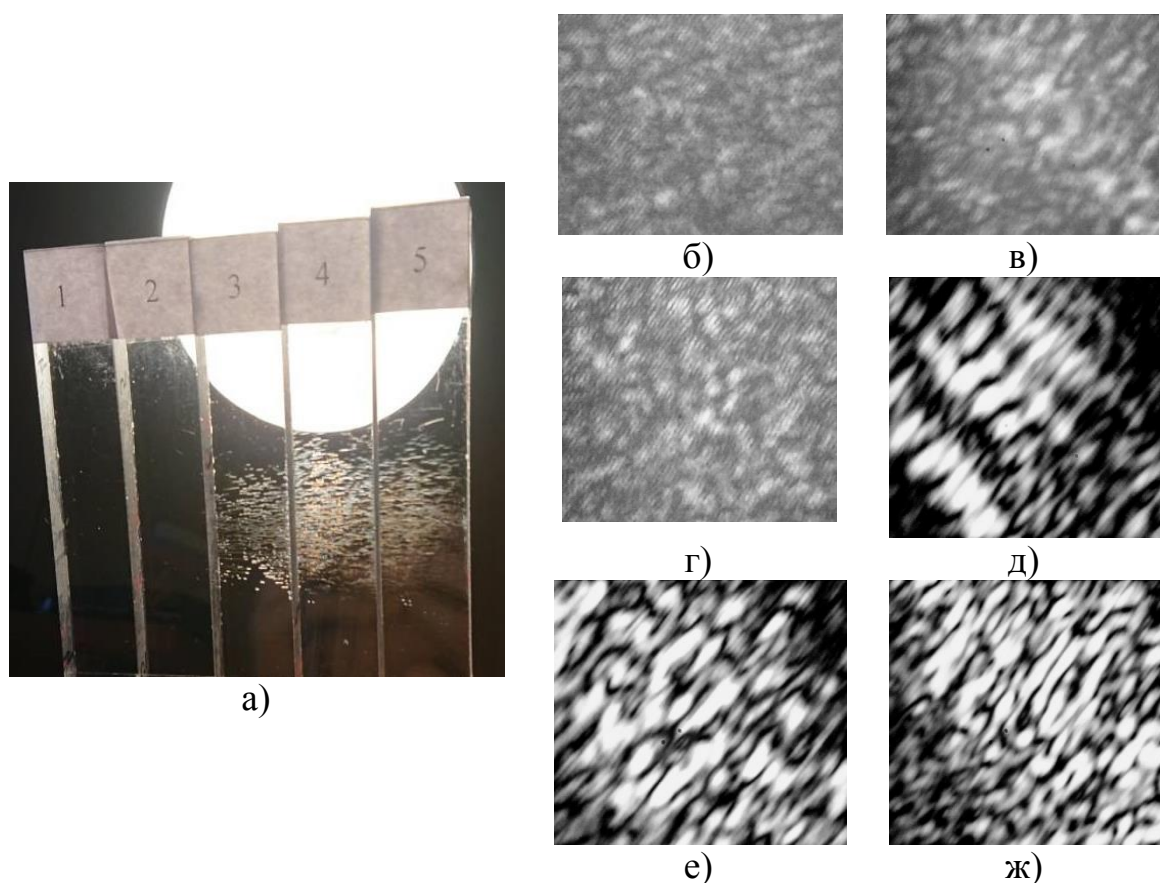


Рис. 6 Образцы остекления марки СО-120 – а) и спекл-картины зарегистрированные спекл-лазерным дефектоскопом от эталонного – б) и образцов находящихся под нагрузкой в 150 кгс/см^2 – в), в 300 кгс/см^2 – г), в 525 кгс/см^2 – д), в 600 кгс/см^2 – е), в 675 кгс/см^2 – ж)

Таблица 2 – Результаты измерений образцов стекла марки СО-120

Номер образца	Время выдержки, с	Величина напряжений в поверхностном слое, кгс/см^2	Площадь функции автокорреляции спекл-картины
0	-	-	35,64
1	30	150	29,95
2		300	28,07
3		525	26,62
4		600	22,53
5		675	20,03

Таким образом, в ходе проведенных исследований, установлено, что разработанное устройство неразрушающего контроля, принцип действия которого основан на использовании МССОИ целесообразно использовать как инструмент дефектоскопического контроля элементов остекления кабин воздушных судов в ходе определения глубины деструктивного слоя дефектов типа

«серебро». Полученные результаты могут быть использованы при обосновании технических требований для разработки перспективных оптико-электронных устройств НК элементов остекления кабин воздушных судов.

Список использованной литературы:

1. Мекалина И. В., Айзатулина М. К., Сентюрин Е. Г., Попов А. А. Особенности влияния атмосферных факторов на авиационные органические стекла // Труды ВИАМ. 2018. №11.
2. Балашов А.А., Акользин С.В., Комаров В.Г. Ускоренные испытания деталей остекления из фтороорганического стекла воздушных судов в условиях субтропического и жаркого тропического климата // Сб. научных статей Всероссийской НПК «Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях». 24-25 ноября 2016 года. ЦНИИ ВВС. Люберцы. С. 241 – 245.
3. Акользин С.В., Фролков А.И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления при ремонте и в эксплуатации // Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 41 – 44.
4. ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
5. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных полей / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. М.: Физматлит, 2009. – 288 с.
6. Владимиров А. П., Каманцев И. С., Ищенко А. В., Горкунов Э. С., Гладковский С. В., Задворкин С. М. Изучение процесса зарождения усталостной трещины по изменению рельефа поверхности образца и ее спекловых изображений // Деформация и разрушение материалов. 2015. №1. С. 21-26.
7. Hayde Peregrina-Barreto, Elizabeth Perez-Corona, Jose Rangel-Magdaleno, Ruben Ramos-Garcia, Roger Chiu, Julio C. Ramirez-San-Juan. Use of kurtosis for locating deep blood vessels in raw speckle imaging using a homogeneity representation. J. Biomed. Opt. 22(6), 066004 (2017).
8. Реконструкция пространственного фазового распределения в дифракционном спекл-поле и восстановление изображения объекта по записи интенсивности / Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо, Л.А. Максимова // Оптика и спектроскопия. 2006. Т.101. №5. С. 861 – 865.
9. Павлов П.В., Вольф И.Э., Москвин Н.В. Применение метода спекл-структур оптического излучения в задачах неразрушающего контроля // Журнал. Воздушно-космические силы. Теория и практика №6 (6). 2018. С. 112 – 122.

Результаты исследовательских испытаний имитационной модели динамики полета одновинтового вертолета с бесшарнирным несущим винтом

О.А. Ледянкина

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Представлены основные результаты исследовательских испытаний имитационной модели динамики полета одновинтового вертолета, построенной на алгоритмах искусственных нейронных сетей. Описаны достигнутые требования к имитационной модели. Показаны результаты сравнения с летными данными прототипа.

Ключевые слова: *вертолет, динамика полета, нейронные сети, испытания.*

Введение. В последние годы получили широкое развитие интеллектуальные цифровые технологии, которые позволяют решить известные задачи более эффективно. Данная тенденция коснулась и авиастроения. В частности, в создании систем интеллектуального управления летательными аппаратами стали применяться алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом следует отметить, возможности ИНС более широки, позволяют решать эффективно и другие задачи. В некоторых конструкторских бюро вертолетной техники были неудачные попытки применения нейронных сетей при имитации динамики полета вертолета. При этом в качестве обучающей выборки, т.е. исходных данных, принимались параметры пространственного положения вертолета, полученные в ходе летных испытаний. Такого рода имитационная модель достаточно хорошо моделировала только те полеты, которые были заложены в обучающую выборку нейронной сети. Это обусловлено одним из главных недостатков ИНС – плохой обусловленностью сети вне диапазона выборки. Очевидно, что путь, когда выборка постоянно дополняется результатами новых полетов, бесперспективен. Это не только снижает вычислительную производительность сети, но и требует выполнения большого количества натурных полетов вертолета, а при выполнении предельных режимов это чревато попаданием в аварийную ситуацию.

Поэтому этот путь не получил должного развития, и большинство производителей тренажеров [1-4] используют метод прямого вычисления или аппроксимации по предварительно вычисленным данным [5-9].

Постановка задачи. В работах автора [10, 11] реализован методика применения искусственных нейронных сетей, который нивелирует их главный недостаток плохую обусловленность вне диапазона обучающей выборки. Эта проблема была решена за счет того, что ИНС имитирует не траекторию полета вертолета в пространстве, а нагрузки создаваемые агрегатами вертолета: несущий и рулевой винты, планер [12]. В этом случае диапазон параметров обучающей выборки сети будет однозначно определен конструктивными и летно-техническими данными вертолета. Применение данного подхода позволило в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева создать программный комплекс имитации динамики полета вертолета [13]. С целью проведения испытаний программный комплекс был интегрирован в исследовательский пилотажный стенд вертолета с бесшарнирным несущим винтом [14, 15].

Программа испытаний. Программа исследовательских испытаний содержит комплекс требований, предъявляемых к современным пилотажным тренажерам в части обеспечения точности и эффективности работы математической модели динамики полета вертолета, а также некоторых сопровождающих систем.

Исследовательские испытания разделяются на несколько стадий:

- оценка программной и эксплуатационной документации;
- испытания отдельных программных компонент;
- испытания функционирования стенда на штатных режимах полета;
- испытания функционирования стенда на нештатных режимах полета и особых случаях.

В ходе испытаний проводится качественная и количественная проверка имитирования полета вертолета.

В части качественных показателей программный комплекс имитации динамики полета вертолета с бесшарнирным несущим винтом должен:

- обеспечить имитацию следующих штатных режимов: стоянка, взлет, набор высоты, горизонтальный полет, снижение, кабрирование и пикирование, виражи;
- полеты на сложный пилотаж: маневр «горка», разворот на горке, форсированные виражи, маневрирование на малой высоте, посадку; полет с большими углами скольжения, выход на большие углы тангажа, авторотация;
- обеспечить имитацию следующих нештатных режимов: вихревое кольцо, самопроизвольное левое вращение, подхват», штопор, земной резонанс;
- корректно имитировать эффекты близости земли (подстилающей поверхности), посадку на наклонную плоскость, учитывать влияние трения полозков о поверхность земли.

К основным количественным показателям следует отнести скорость и точность вычислений:

– концепция создания имитационной модели динамики полета вертолета с применением алгоритмов искусственных нейронных сетей должна обеспечить высокую скорость вычислений модели динамики полета по времени, не менее, чем 100 вычислений в секунду;

– результаты сравнения имитационного моделирования динамики полета с летными данными прототипа вертолета с бесшарнирным несущим винтом на установившихся и неустановившихся режимах полета должны обеспечить среднеквадратичную погрешность не более 10%.

Для выполнения исследовательских испытаний предусмотрены методики и средства их проведения, описанные в соответствующих технологических картах. Пилотирование на стенде осуществлял пилот первого класса, летчик – снайпер С.Я. Степанов.

Основные результаты испытаний. Проведен полный цикл исследовательских испытаний. Требования, определяемые программой испытаний, в полной мере подтверждены. Рассмотрим их более подробно.

Основной целевой задачей применения ИНС при имитации нагружения агрегатов вертолета было достичь высоких скоростей вычислений при минимальных требованиях к вычислительной технике. В частности, применен персональный компьютер с тактовой частотой процессора 2.3 GHz. В этом случае за одну секунду выполнялось 800 вычислений (шагов по времени) имитации нагружения вертолета в полете, что в 8 раз превысило ожидаемый результат. Данный резерв вычислительной мощности был использован для повышения степени детализации в системе визуализации окружающего пространства [16] пилотажного стенда.

Для оценки качественных и количественных характеристик имитационной модели динамики полета было проведено сравнение с летными данными легкого многоцелевого вертолета. К характерным данным можно отнести балансировочные характеристики вертолета по скорости горизонтального полета при изменении центровки x_T . Получено, что качественное влияние скорости полета и изменения центровки практически полностью соответствуют летным данным (ЛД). При этом присутствуют некоторые отклонения по точности в продольном управлении на больших скоростях полета, и в поперечном управлении на малых скоростях. Это в первую очередь обусловлено отличиями конкретной модификации натурального вертолета от типовой идеализированной модели вертолета, которая служила базой при построении имитационной модели динамики полета. Полученный результат говорит о необходимости разработки способа приближения имитационной модели полета к натурным характеристикам конкретной модификации вертолета.

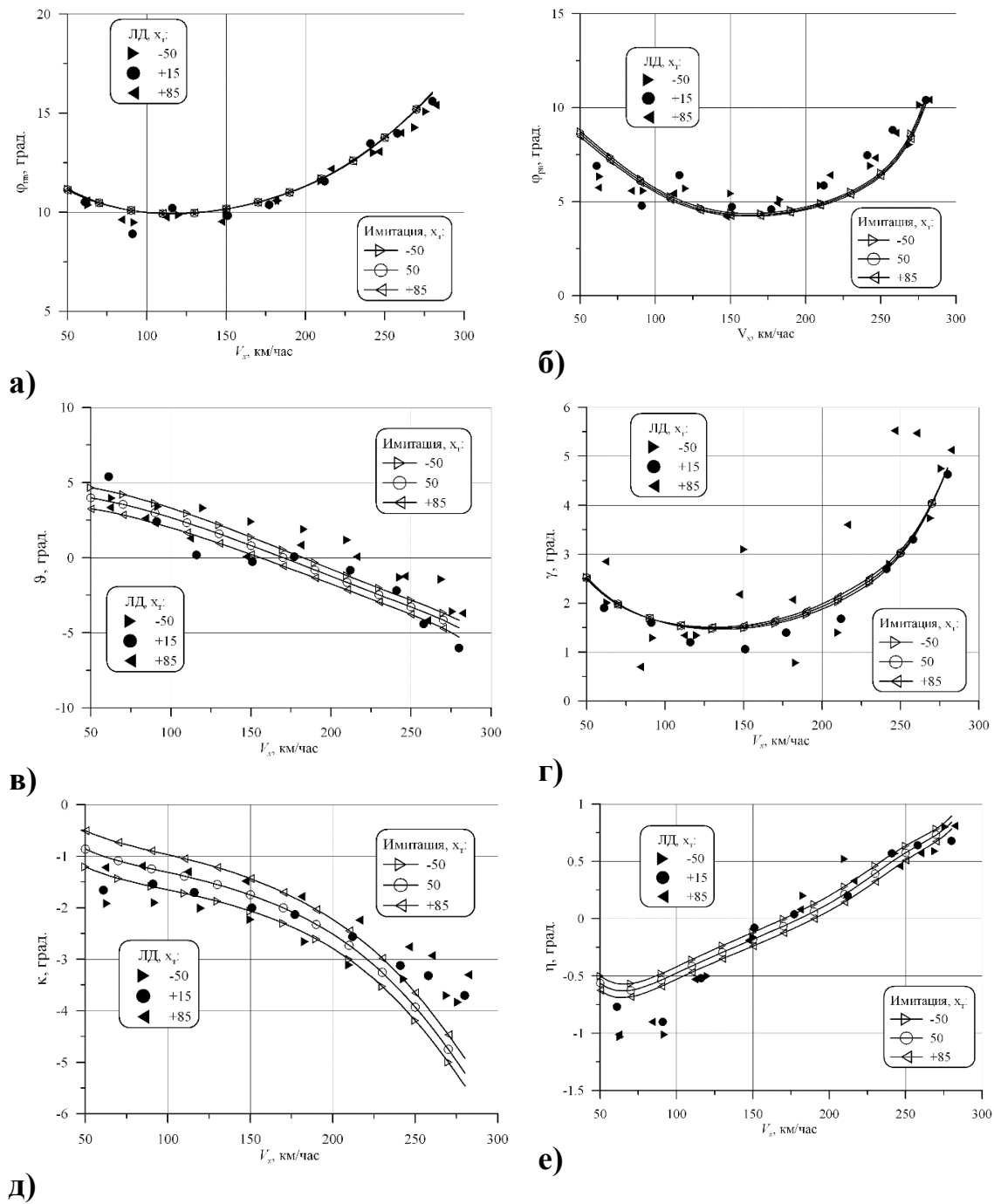


Рис. 1. Интегральные балансировочные характеристики по скорости полета вертолета: а – общий шаг НВ; б – шаг РВ; в – угол тангажа вертолета; г – угол крена вертолета; д – продольный наклон кольца АП; е – поперечный наклон кольца АП

Закключение. Проведены исследовательские испытания имитационной модели динамики полета вертолета, построенной на алгоритмах искусственных нейронных сетей. Результаты испытаний подтвердили эффективность такого пути. Качественные и количественные характеристики модели достаточно близки к реальному вертолету. При этом обнаружена необходимость разработки способа приведения имитационной модели полета к натурным характеристикам конкретной модификации вертолета.

Список использованной литературы:

1. Серёгин Г.Н. Авиационные тренажеры — реальный путь к повышению безопасности полётов. Право и безопасность, Номер 2006. С. 20-21
2. Соловьев Б.А., Рыбкин П.Н. Совершенствование системы подготовки, поддержания и повышения профессиональной квалификации пилотов вертолетов. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2009, № 147, С. 94-103.
3. Пасекунов И.В. Техническая эффективность применения авиационных тренажеров. Вооружение и экономика. 2013, № 4 (25), С. 49-58.
4. Рыбкин П.Н. Оптимальное распределение комплексных лётных тренажёров вертолётов по территории Сибири и Дальнего Востока. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011, № 2-2011, С. 6-9.
5. Рыбкин П.Н. Комплексный летный тренажер с неподвижной кабиной в процессе тренажерной подготовки пилотов гражданских вертолетов. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2011, № 10 (172), С. 129-135.
6. Рыбкин П.Н. Математическая модель несущего винта в составе математической модели летного тренажера вертолета. Полет. Общероссийский научно-технический журнал, 2012, № 12, С. 9-16.
7. Моцарь А.И. "Математическая модель имитации полета вертолета на комплексном авиационном тренажере". Сборник «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии». - Харьков: ХАИ, 2009, С. 5-20.
8. Рыбкин П.Н. Математическая модель двигателя тв3-117вм. Труды МАИ, 2012, № 58 С. 18.
9. Моцарь П.И, Е.Д. Ковалев, Математическая модель работы рулевого винта в имитационной модели динамики полета вертолета на тренажере. Вісті академії інженерних наук України. Машинобудування та прогресивні технології К НТУ «КПІ», 2009, № 1 (38) С. 162-168.
10. Гирфанов А.М., Ледянкина О.А. «применение искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагрузок, создаваемых винтами вертолета», высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 4. С. 14-16.
11. Гирфанов А.М., Ледянкина О.А. «имитационная модель нагружения бесшарнирного несущего винта вертолета», Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 2. С. 29-33.
12. Гирфанов А.М., Ледянкина О.А. «методология применения искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагружения одновинтового вертолета», Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 26-30.

13. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2015663442 Российская Федерация. Программный комплекс имитации динамики полета вертолета/ гирфанова.М. (RU), Михайлов С.А. (RU), ледянкина.А. (RU); заявитель и правообладатель книту-каи (RU)-2015619815; заявл.16.10.2015; опубл. 20.01.2016, Бюл. No1, 2016—1 с.

14. Пат. 176063 Российская Федерация МПК G09B 9/00. Пилотажный стенд вертолета с бесшарнирным несущим винтом / Гирфанов А.М. (RU), Ледянкина О.А. (RU), Михайлов С.А. (RU); заявитель и правообладатель КНИТУ-КАИ (RU) – № 2016151463; заявл. 26.12.2016; опубл. 27.12.2017, Бюл. № 36. – 2 с.

15. Ледянкина О.А., Михайлов С.А. «комплексная модель исследовательского пилотажного стенда вертолета с бесшарнирным несущим винтом», Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 52-56.

16. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2016610832 Российская Федерация. Программный комплекс системы визуализации вертолетного симулятора/ Р.В. Сапронов; заявители и правообладатели КНИТУ-КАИ (RU), Р.В. Сапронов (RU), С.А. Михайлов (RU), А.М. Гирфанов(RU) -2015661566; заявл.25.11.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. No2, 2016—1 с.

УДК 534.1:539.3

Использование алгоритма чувствительности при анализе колебаний рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей

И.Н. Рыжиков, До Мань Тунг

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Особое внимание при оптимальном проектировании на основе численных моделей уделяется вычислению градиентов поведения целевой функции и функций ограничений при вариации переменных проектирования (так называемой чувствительности). Используя функцию чувствительности, проектировщик получает возможность, варьируя переменными проектирования, быстро и эффективно проводить анализ множества вариантов исходной конструкции, не прибегая при этом к трудоемким расчетам каждого из вариантов. В данной статье представлен алгоритм и результаты анализа чувствительности компрессорной лопатки к изменению толщины ее профиля.

Ключевые слова: лопатки, чувствительность, собственные частоты

Для авиационных конструкций в качестве целевой функции может выступать зависимость прочностных или вибрационных характеристик (перемещений, напряжений, частот колебаний) от геометрических или массовых параметров, являющихся переменными проектирования. В качестве примера можно рассмотреть рабочую лопатку ротора газотурбинного двигателя. Благодаря своей консольной конструкции данная деталь ротора подвержена колебаниям, характеристики которых очень чувствительны к изменениям геометрических или массовых параметров. Разработке численных методов анализа динамики и прочности роторов турбомашин посвящено множество работ [1-15]. Разработке методов анализа с использованием алгоритмов расчета чувствительности посвящены работы [3,4,13].

Уравнение динамики в МКЭ в линейной постановке в случае свободных колебаний без демпфирования имеет вид [1]:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0.$$

Решение данного уравнения имеет вид гармонического колебания $\delta = y \cos(\omega t - \beta)$. Подставляя это выражение в уравнение динамики, получим:

$$(\omega^2[M] + [K])\{y\} \cos(\omega t - \beta) = 0$$

или

$$([K] - \lambda[M])\{y\} = 0.$$

Это уравнение имеет смысл при детерминанте, равном нулю

$$\det([K] - \lambda[M]) = 0.$$

Решая данное уравнение в линейной постановке можно определить собственные значения λ , модальные перемещения $\{y\} = \{\delta\}^T = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N\}^T$ (формы колебаний), где N - число степеней свободы системы, и частоты колебаний

$$\{f\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda} = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}^T.$$

Чувствительность собственных значений для свободных колебаний:

$$\frac{d\lambda}{dx_i} = \{y\}^T \left[\frac{d[K]}{dx_i} - \lambda \frac{d[M]}{dx_i} \right] \{y\},$$

где собственный вектор $\{y\}$ нормирован как

$$\{y\}^T [M] \{y\} = -1.$$

Учитывая, что $\lambda = (2\pi f)^2$, получим выражение для вычисления чувствительности частот свободных колебаний

$$\frac{df}{dX_i} = \frac{df}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dX_i} = \frac{1}{4\pi\sqrt{\lambda}} \frac{d\lambda}{dX_i}$$

Чувствительность частоты к изменению толщины конструкций в узлах: $\partial f / \partial b = \sum \sum K_f(i, j)$, $i = 1, NCN$; $j = 1, NE$,

где $K_f(i, j)$ - коэффициент чувствительности частоты f узла i в элементе j ; NCN - число узлов в элементе; NE - число элементов.

Большое абсолютное значение чувствительности частот означает большую интенсивность изменения частоты при изменении толщины, положительная или отрицательная чувствительность означает, что частота

уменьшится или увеличится (тенденция изменения) при изменении толщины конструкции. Можно использовать два метода для прогнозирования тенденции и интенсивности изменения каждой частоты колебания пластины. При первом методе выбирается коэффициент изменения толщины для каждого отдельного узла с соответствующими ожиданиями изменений частоты. При втором методе данный коэффициент выбирается для каждого отдельного сечения.

Изменение частоты по методу чувствительности частот вычисляется по формуле: $\Delta f = \sum \sum \Delta b(i, j) * K_f(i, j)$, $i = 1, NCN$; $j = 1, NE$,

где $\Delta b(i, j)$ - величина изменения толщины узла i в элементе j .

Прогнозирование частот по методу чувствительности:

$$f(b + \Delta b) = f_0 + \Delta f.$$

Изменение частоты:

$$\Delta f = f(b + \Delta b) - f_0,$$

где f_0 – частоты исходной модели.

Проведен анализ собственных частот колебаний лопатки компрессора ГТД с использованием коэффициентов чувствительности. Параметры лопатки: длина $L=0,186$ м; хорда $X_k=0,167$ м; модуль Юнга $E=2,16*10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu=0,3$; плотность $\rho=7,85*10^3$ кг/м³; радиус корневого сечения лопатки $R_0=0,236$ м. Скорость вращения ротора равна 100 1/с.

Конечноэлементная модель лопатки и распределение чувствительности частот в узлах конечноэлементной сетки для первых форм колебаний лопатки изображены на рис. 1. Распределение чувствительностей частот для одного из сечений лопатки изображено на рис. 2.

Проанализирована точность прогноза изменения частот колебаний лопатки при утолщении на 10% по всей поверхности лопатки (табл. 1).

Погрешность прогноза частот по коэффициентам чувствительности невелика по сравнению с расчетом модифицированных моделей, что позволяет использовать коэффициенты чувствительности при оптимальном проектировании лопатки.

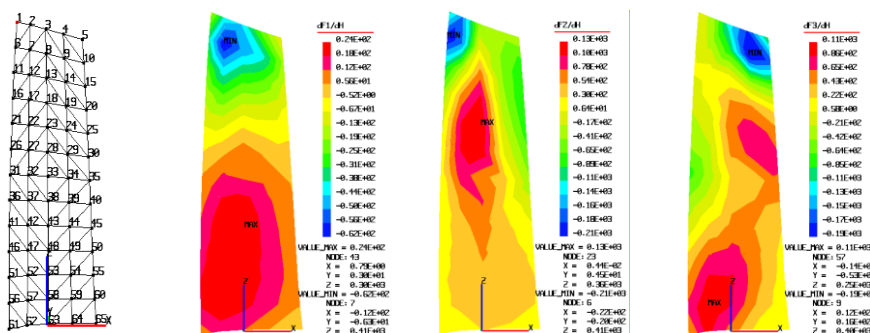


Рис. 1. Конечно-элементная модель и изолинии чувствительности частот для первых форм собственных

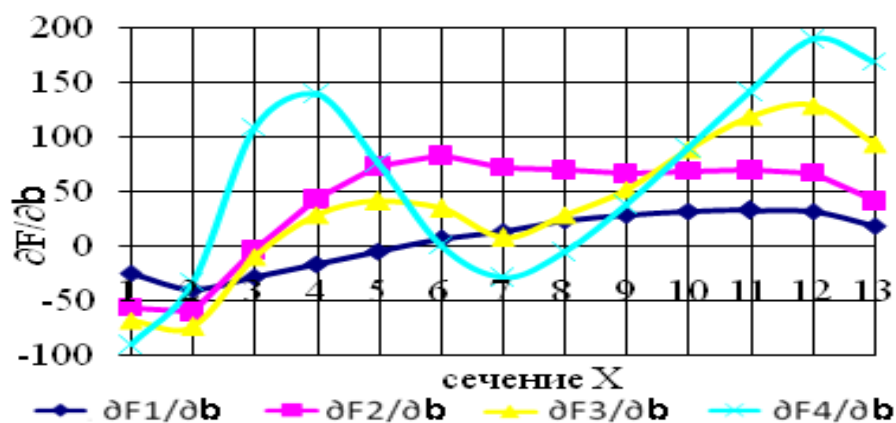


Рис. 2. Распределение чувствительностей частот для сечения лопатки

Таблица 1. Влияние на частоту колебаний утолщения профиля на 10%

Форма	f_0 (Гц)	Утолщение в верхней зоне (узлы 1, 2, 3, 4, 5)		
		МКЭ	Чувств.	Δf (%)
1	282,53	280,96	280,06	-0,32
2	808,81	804,25	803,14	-0,14
3	1122,70	1116,75	1115,89	-0,08
4	1727,45	1719,18	1718,35	-0,05

Выводы

Приведенные результаты расчетов демонстрируют достаточно малую погрешность, что позволяет применять разработанный метод анализа собственных частот колебаний с использованием коэффициентов чувствительности при оптимальном проектировании рабочих лопаток газотурбинных двигателей.

Список использованной литературы:

1. Автоматизация прочностных расчетов турбомашин / Заинчковский К.С., Репецкий О.В., Лопатин А.Б., Маликов В.Ф., Ольшевский А.Г., Персиянов В.В., Рыжиков И.Н./ под ред. О.В. Репецкого, - Иркутск: Иркутское отделение союза НИО, 1990. – 100 с.
2. Борискин О.Ф., Кулибаба В.В., Репецкий О.В. Конечноэлементный анализ колебаний машин. Иркутск: из-во ИГУ, 1989.- 144 с.
3. Нгуен Динь Дыонг, Рыжиков И.Н. Анализ чувствительности колебаний рабочих лопаток газотурбинных двигателей // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №7(66). – С. 40 – 44.
4. Репецкий О.В., Бернд Байроу Применение анализа чувствительности для исследования систем с расстройкой параметров // Байкальский Вестник ДААД. - 2016. - №1. С. 86-98.

5. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н. Анализ тепловых полей и термонапряженного состояния деталей турбин // Вестник стипендиатов ДААД. 2001. № 1. С. 89.
6. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Schmidt R. Исследование влияния различных видов расстройки параметров на колебания и долговечность рабочих колес турбомашин // Вестник Байкальского союза стипендиатов ДААД (Байкальский государственный университет экономики и права). 2010. №1.С. 20-31.
7. Beirow B. Grundlegende Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Verdichterlaufrädern in Integralbauweise. - Cottbus, 2009
8. Beirow B., Kuehhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 141, January, 2019, pp. 11008-11008-8.
9. Bladh J. R. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks - Part I: Theoretical Models/ J. R. Bladh, M. P. Castanier, C. Pierre// Journal of Engineering for Gas turbines and Power. - January 2001. - Vol. 123. - № 8. - P. 89-99.
10. Ewins D. J. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk/ D. J. Ewins, Z. S. Han// Trans. ASME, Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design. - 1984. - Vol 106. - P. 211. 217.
11. Irrtier H Repetckii O V 1998 Vibration and Life Estimation of Rotor Structure IFToMM Conf. on Rotor Dynamics (Darmstadt).
12. Irrtier H. Transient Vibrations of Turbine Blades Due to Passage Through Partial Admission and Nozzle Excitation Resonance / H. Irrtier //Proc. IFToMM Intl. Conf. Rotor Dynamics Tokyo. – 1986. – 30 p.
13. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Dynamics analysis in the design of turbomachinery using sensitivity coefficients. IOP Conf. Series: Journal of Physics, Vol. 944, 2018, 012096. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012096.
14. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Dynamics of gas turbine engines rotors taking into account non-linear effects. Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 8, 2016, pp. 361 365.
15. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Investigation of mistuning impact on vibration of rotor bladed disks. IOP Conf. Series: Journal of Physics, Vol. 944, 2018, 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012097.

Обзор видов и характеристик современных авиационных бортовых радиолокационных станций

В.А. Ширькалов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Проведён обзор и последующий анализ имеющихся бортовых радиолокационных станций, описаны основные тактико-технические характеристики и сведены в единую таблицу. Сделаны выводы о развитии российской авиации, выявлены перспективные бортовые радиолокационные станции, подведёт итог.

Ключевые слова: бортовая радиолокационная станция, самолётостроение, фазированная антенная решётка, отечественные разработки, развитие авиационной техники и технологий.

Одной из важнейших частей современного самолёта является бортовая радиолокационная станция. Она обеспечивает визуальную ориентировку в отсутствие прямой видимости самолёта, позволяет обнаруживать области с активной турбулентной деятельностью, опасные грозовые очаги, а также воздушные, морские и наземные объекты методом радиолокации. В случае необходимости позволяет отслеживать цели и наводить управляемое вооружение.

Существует множество вариантов бортовых радиолокационных станций. В представленной работе будет проведён анализ существующих моделей и сделаны выводы.

Классифицируют БРЛС: [1]

по диапазону работы:

1. L-диапазон (частота: 1–2 ГГц; длина волны: 15—30 см);
2. X-диапазон (частота: 8–12 ГГц; длина волны: 2,5—3,75 см);
3. Ku-диапазон (частота: 12–18 ГГц; длина волны: 1,67—2,5 см);
4. K-диапазон (частота: 18–27 ГГц; длина волны: 1,11—1,67 см);
5. Ka-диапазон (частота: 27–40 ГГц; длина волны: 0,75—1,11 см);

По типу фазированной антенной решётки:

1. пассивная фазированная антенная решётка (ПФАР)
2. активная фазированная антенная решётка (АФАР)

У пассивной ФАР имеется один приёмопередатчик, а у активной приёмопередатчик находится в каждой ячейке, общее количество которых может достигать тысячи. Таким образом при выходе из строя приёмопередатчика у ПФАР радар перестанет функционировать. Если же у АФАР один

из датчиков повредится, то радар продолжит работу. Таким образом система АФАР является более надёжной.

Также АФАР имеет возможность работы в нескольких частотах одновременно, что позволяет одновременно сопровождать десятки целей, производить картографирование и защищаться от вражеских помех.

Следовательно, бортовые радиолокационные системы с АФАР имеют приоритетное отношение в авиационном мире.

Сравнительная характеристика некоторых имеющихся в вооружении радиолокационных станций сведена в таблицу 1.

Таблица 1 – Анализ БРЛС

Название	Основные тактико-технические характеристики	Описание
AN/APG-77 компания Northrop Grumman [2] (Начало эксплуатации: 2005 год)	<ul style="list-style-type: none"> -Дальность обнаружения цели (ЭПР - эффективная площадь рассеяния = 1м²): 201-241км.[3] -Инструментальная дальность: 525 км. -Зона обзора по азимуту/по углу места: ±60°/±60°. -Диаграмма направленности: игольчатая, 1.5°x1.5°. -Время полного обновления информации в режиме "Обзор": 14 секунд. -Количество одновременно сопровождаемых целей: 100. -Количество одновременно обстреливаемых целей: 20. -Наработка на отказ, часов: 800-1000. -Масса: 553,7 кг. 	<p>Разработана для истребителя пятого поколения F-22 Raptor. Способность радара работать в режиме Низкой Вероятности Перехвата делает бесполезными обычные системы СПО/РТР. Радар AN/APG-77 способен осуществлять активный радарный поиск самолета-истребителя, оборудованного аппаратурой СПО/РТР таким образом, чтобы цель не знала, что она облучается.</p>

<p>RBE-2AA французская фирма «Thales» [4]</p> <p>(Начало эксплуатации: 2006 г.)</p>	<p>Диапазон частот: 8-12 ГГц (X-диапазон).</p> <p>Дальность обнаружения воздушных целей (ЭПР = 5м²): 160 км в передней полусфере.</p> <p>Дальность обнаружения наземных целей (ЭПР = 1000 – 3000 м²): 140 – 200 км.</p> <p>-Зона обзора по азимуту/по углу места: ±70°/±70°.</p> <p>Количество одновременно сопровождаемых/атакуемых воздушных целей: 40/4-6.</p> <p>Тип антенны: АФАР</p> <p>Кол-во приёмно-передающих модулей: 1000.</p>	<p>Предназначена для установки на многоцелевой истребитель поколения 4+ «Rafale»</p>
<p>Н010 «Жук-А» корпорация «Фазотрон-НИИР»</p> <p>(Серийное производство: 2010г.) [5]</p>	<p>Диапазон частот: 8-12 ГГц</p> <p>Дальность обнаружения воздушных целей (ЭПР цели = 3м²) в передней и задней полусфере: 148 км и 60 км.</p> <p>Дальность обнаружения наземных целей (ЭПР = 50 – 3000 м²): 60 – 300 км.</p> <p>Количество одновременно сопровождаемых/атакуемых воздушных целей: 30/8</p> <p>Тип антенны: АФАР.</p>	<p>Устанавливается на МиГ-35, серийное производство которого начнётся в 2019 году. [6]</p> <p>Предназначена для круглосуточной работы в простых и сложных метеоусловиях, а также в условиях радиоэлектронного противодействия.</p>

<p>Н035 «Ирбис-Э» ОАО «НИИ приборостроения им. В. В. Тихомирова» [7]</p> <p>(Начало эксплуатации: 2012 г.)</p>	<p>-Диапазон частот: 8-12 ГГц -Дальность обнаружения воздушных целей (ЭПР = 3м²) в передней и задней полусферах: 400 км и 80 км. -Дальность обнаружения наземных целей (ЭПР = 50 - 3000 м²): 150 – 500 км. -Широкий угол обзора по азимуту ($\pm 120^\circ$) -Количество одновременно сопровождаемых/атакуемых воздушных целей: 30/8. -Тип антенны: ПФАР.</p>	<p>Устанавливается на Су-35С. Атака нескольких воздушных и наземных целей, определение государственной принадлежности, картографирование, определение количества воздушных целей и их типа, работа в режиме огибания рельефа, обнаружение метеорообразований на пути следования.</p>
<p>РЛПК «Оса» с ФАР «Скат-μ» ОАО «НИИ приборостроения им. В. В. Тихомирова»</p> <p>(Продемонстрирован: 1998 г.) [8]</p>	<p>-Диапазон частот: X и L – диапазон. -Дальность обнаружения воздушных целей (ЭПР = 3м²) в передней и задней полусферах: 85 км и 40 км. -Дальность захвата цели в режиме дискретного сопровождения: 35-65км. -Зона обзора по азимуту/по углу места: $\pm 60^\circ/\pm 60^\circ$. -Кол-во одновременно сопровождаемых целей: -в режиме дискретного сопровождения/при сканировании: 8/16. -Кол-во одновременно атакуемых целей: 4. Характеристики ФАР «Скат-μ»: Тип ФАР: проходного типа с волноводным питанием. -Кол-во излучателей X-диапазона: 334. -Кол-во излучателей L-диапазона: 6.</p>	<p>Устанавливается на лёгкие истребители типа МиГ-21, МиГ-АТ, Як-130, МиГ-29УБТ и др. В режиме воздух-воздух обеспечивает обнаружение с определением дальности и скорости. В режиме воздух-поверхность обнаруживает морские цели при волнении свыше четырёх баллов, картографирование местности, режим микроплана, сопровождение до двух целей, измерение дальности и скорости цели.</p>

<p>Н036 «Белка» ОАО «НИИ приборостроения им. В. В. Тихомирова»</p> <p>(Начало лётных испытаний: 2011г.) [9]</p>	<p>-Диапазон рабочих частот: 8-12 ГГц;</p> <p>-Дальность обнаружения целей:</p> <p>ЭПР = 3м² – 400 км;</p> <p>ЭПР = 1м² – 300 км;</p> <p>ЭПР = 0,5м² – 240 км;</p> <p>ЭПР = 0,1м² – 165 км;</p> <p>-Угол обзора: ±120°;</p> <p>-Количество одновременно сопровождаемых целей:</p> <p>- воздушных – 30</p> <p>- наземных – 4.</p> <p>-Количество одновременно атакуемых целей: 8.</p> <p>-Тип антенны:</p> <p>- 3 АФАР Х-диапазона;</p> <p>- 2 АФАР L-диапазона.</p>	<p>Разрабатывается специально для перспективного многоцелевого истребителя 5-го поколения Т-50 (Су-57) в рамках проекта «ПАК ФА». Имеет пятиантенную систему с конформными АФАР. В состав входят пять решёток – одна Х-диапазона, размещённая в передней части фюзеляжа, две АФАР бокового обзора и две L-диапазона, расположенные в носках крыла и предназначенные для обнаружения и государственного опознавания целей.</p>
---	---	---

Анализ различных видов бортовых радиолокационных систем показал, что в России достаточно поздно начали уделять внимание созданию активной фазированной антенной решётки, которая на фоне пассивной ФАР имеет ряд преимуществ. Несмотря на это, перспективы на развитие технологий существуют. Такие примеры разрабатываемых БРЛС как «Белка» и «Жук-А» показывают какими высокими тактико-техническими характеристиками могут обладать отечественные разработки.

К сегодняшнему дню в России нет стоящих на вооружении самолётов с АФАР, что является серьёзным отставанием от конкурентов в этой области, но тем не менее мы видим, что ведутся крупные разработки в этой области. Например, «Жук-А» уже в 2019 году будет устанавливаться на серийно выпускаемый лёгкий истребитель поколения «4++» МиГ-35.

Подводя итог, можно сделать вывод, что для развития авиационной техники и технологий требуются сильные специалисты в данной области. А для привлечения внимания необходимы специальные мероприятия, связанные с развитием технологий и инновационных комплексов. Достигнуть сокращения разрыва между Россией и конкурентами в области авиационной промышленности можно государственным финансированием и направлением внимания к данной проблеме посредством средств массовой информации и инфокоммуникационными технологиями.

Список использованной литературы:

1. Бортовые радиолокационные станции России [Электронный ресурс]. Июль, 2017г. – Режим доступа <https://dfnc.ru/aviazcia/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-rossii/> , свободный. – Загл. с экрана.
2. AN/APG-77 [Электронный ресурс]. – Википедия – Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/AN/APG-77> , свободный. – Загл. с экрана.
3. Aviation Week & Space Technology [Электронный ресурс]. – F-22 combat ready, January 8, 2007. – Режим доступа https://www.webcitation.org/6Qpsm5PUo?url=http://www.f22-raptor.com/media/documents/aviation_week_010807.pdf , свободный. Загл. с экрана.
4. Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения [Электронный ресурс]. – Научный вестник МГТУ ГА, 2015. – Режим доступа <https://cyberleninka.ru/article/v/sovremennye-bortovye-radiolokatsionnye-stantsii-i-antennye-reshetki-mnogofunktsionalnyh-aviatsionnyh-kompleksov-voennogo> , свободный. – Загл. с экрана.
5. В России начато серийное производство РЛС "ЖУК-АЭ" [Электронный ресурс]. 18 января, 2010г. – Режим доступа <https://www.aviaport.ru/digest/2010/01/18/188771.html> , свободный. – Загл. с экрана.
6. Серийное производство МиГ-35 начнется в 2019 году [Электронный ресурс]. 27 января, 2017г. – Режим доступа <https://ria.ru/20170127/1486624812.html> , свободный. – Загл. с экрана.
7. Н035 Ирбис [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1319731> , свободный. – Загл. с экрана.
8. Авиационный радиолокационный прицельный комплекс «Оса» [Электронный ресурс]. 15 января, 2017г. – Режим доступа <http://bastion-orp.ru/osa-rlpk/> , свободный. – Загл. с экрана.
9. «Увидеть раньше — значит победить!» // «Взлёт». — 2013. — № 1—2. — С. 52-54.

УДК 621.785.532

Низкотемпературное ионно-плазменное азотирование титанового сплава ВТ6 в тлеющем и дуговом разрядах

А.А. Николаев, А.Ф. Тагиров

Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12

Исследовано влияние низкотемпературного ионно-плазменного азотирования титанового сплава ВТ6 на механические свойства и остаточные напряжения. Получены вольт-амперные характеристики тлеющего и дугового разряда при различных технологических параметрах. Построены

кривые распределения микротвердости по глубине упроченного слоя. Установлено что при азотировании в тлеющем разряде образуются сжимающие остаточные напряжения, а в дуговом разряде растягивающие.

Ключевые слова: *ионно-плазменное азотирование, титановый сплав ВТ6, тлеющий разряд, дуговой разряд.*

Введение: В настоящее время титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов благодаря уникальному сочетанию физико-механических и технологических свойств. Повышенная стойкость титана и его сплавов к ползучести является одним из важных качеств для деталей авиационного двигателя [1,2]. В современных авиационных двигателях 25-30% от всей массы составляют детали из титановых сплавов. Титан является наиболее распространенным материалом для деталей двигателя, которые работают до 593 °С [3]. Несмотря на высокую температуру плавления, высокая растворимость кислорода в титане в твердой фазе ограничивает его применение при высоких температурах [4]. Также их применение ограничено рядом недостатков, связанных со свойствами поверхности титана и его сплавов. Низкая твердость и, как следствие, неудовлетворительная износостойкость поверхности, а также склонность к налипанию, ограничивают применение титановых сплавов для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного трения и износа поверхности. Поэтому необходимо улучшить их функциональные и эксплуатационные свойства, для этого достаточно повысить твердость не всей детали, а лишь ее поверхности.

Для решения этой задачи существует ряд способов. Наиболее распространенным и эффективным являются различные методы модификации поверхности, в частности, азотирование, повышающее твердость и износостойкость поверхностных слоев [6-7].

Использование традиционного азотирования для лопаток компрессора ГТД не представляется возможным, так как обработка ведется при температурах 800-900 °С, что приводит к изменению микроструктуры и геометрии тонкостенных деталей.

Для решения проблемы в данной работе предлагается применять низкотемпературное ионное азотирование, которое обладает следующими преимуществами: регулирование параметров обработки в широком интервале режимов (температуры, давления, плотности ионного тока, энергии частиц); высокий класс чистоты поверхности; высокие эксплуатационные свойства деталей.

Данная работа посвящена исследованию влияния низкотемпературного ионного азотирования титанового сплава марки ВТ6 в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде на механические свойства и остаточные напряжения.

Методика проведения исследования: Исследование выполнялось на примере широко применяемого в авиационной промышленности двухфазного титанового сплава ВТ6. В работе использовались образцы двух типов: пластины размером 80×10×1 мм и в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 5 мм.

Проведена серия экспериментов по низкотемпературному ионному азотированию титанового сплава ВТ6 в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде генерируемый плазменным источником ПИПК и в тлеющем разряде при различных режимах.

Измерения микротвердости по глубине азотированного слоя проводили по методу восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9450-76 с помощью микротвердомера Struers Duramin-1/-2. Глубину упрочненного слоя определяли по кривой распределения твердости до значения твердости исходного материала.

Для определения влияния режимом азотирования на величину остаточных напряжений использовалась методика прецизионного измерения изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Измерение осуществлялось на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-4».

Результаты исследования и их обсуждения:

Основные процессы в тлеющем разряде происходят в катодном темном пространстве. На эту область приходится значительная доля напряжения, называемая катодным падением потенциала: напряженность здесь значительно выше, чем в других частях разряда. В этой области свечение газа слабее, так как энергия электронов значительно выше энергии максимума функции возбуждения. Эта энергия достаточна для того, чтобы вызвать ионизацию газа [8-10].

На рис. 1 представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики при азотировании в тлеющем разряде в среде 15%N₂ + 85%Ar.

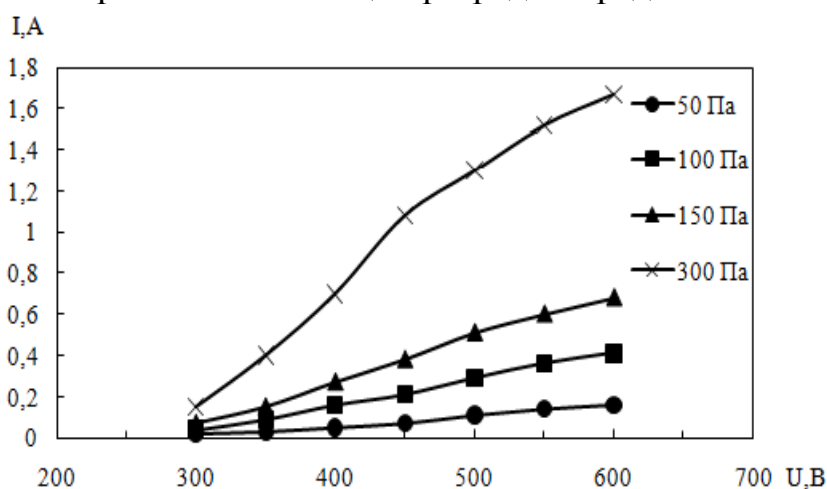


Рис. 1 Вольт-амперные характеристики при азотировании в тлеющем разряде в среде 15%N₂ + 85%Ar

Анализ воль-амперных характеристик показал (рис.1), что увеличение напряжения горения тлеющего разряда приводит к увеличению тока разряда. Это объясняется более высокой способностью электронов к ионизации атомов газа, так как с увеличением напряжения горения разряда электроны приобретают более высокую энергию, необходимую для ионизации газа. С увеличением давления увеличивается число заряженных частиц (положительных ионов), которые, ударяясь о поверхность катода, выбивают большее количество электронов, в связи, с чем ток разряда также увеличивается.

Одним из перспективных способов упрочнения поверхности титана и его сплавов, является способ локального азотирования поверхности, который заключается в химико-термической обработке потоком аргон-азотной плазмы, получаемой с помощью дугового разряда с полым катодом в вакууме.

Дуговые разряды различных видов также могут быть эффективно использованы при создании генераторов плазмы для ионно-плазменной обработки изделий.

Плазменный источник «ПИНК» широко используется для очистки и активации поверхностей перед нанесением покрытий, ионно-плазменного азотирования и при плазменно-ассистированном нанесении покрытий.

На рис. 2 приведены зависимости тока разряда от давления рабочего газа. В качестве рабочего газа использовались аргон, азот и смесь аргона и азота. Напряжение на подложке составляло $U=400\text{В}$, ток накаливаемого катода $I_{\text{н}}=120\text{А}$.

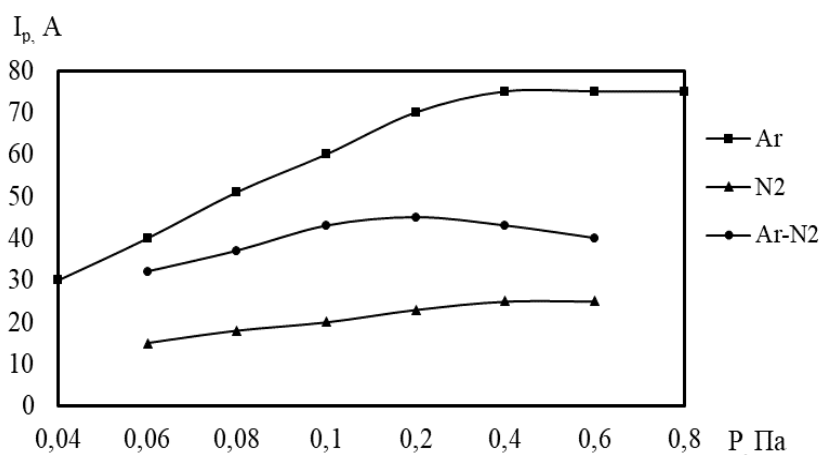


Рис. 2 Зависимости тока разряда от давления рабочего газа ($U=400\text{В}$, $I_{\text{н}}=120\text{А}$)

Анализ зависимости тока разряда от давления рабочего газа показал, что с увеличением давления ток разряда увеличивается. Связано это с тем, что при повышении давления увеличивается количество частиц в камере, соответственно уменьшается длина свободного пробега у электронов и увеличивается число актов ионизации электронами в полым катодом и в полым анодом (вакуумной камере). Величина тока разряда в различных газах

зависит также от вероятности ионизации атомов газа. Так, например, ток разряда в аргоне в 3 раза больше тока разряда в азоте.

На рис. 3 представлены зависимости ионного тока от давления рабочего газа (для аргона, азота, смеси аргона и азота).

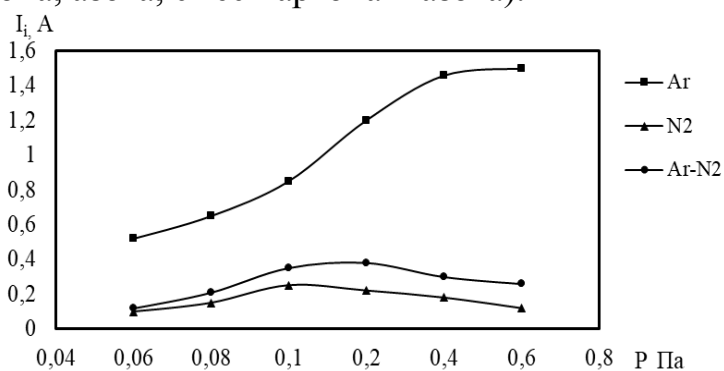


Рис. 3 Зависимости ионного тока от давления рабочего газа ($U=400\text{В}$, $I_{\text{н}}=120\text{А}$)

Ионный ток зависит от тока разряда и поэтому тоже имеет возрастающий характер.

Анализ зависимости (рис. 3) показал, что существует пороговое значение давления рабочего газа, после которого ионный ток уменьшается. Уменьшение ионного тока объясняется снижением ионизирующей способности электронов, эмитированных накальным катодом. Кроме того, с увеличением давления снижается эмиссионная способность термокатода.

После низкотемпературного ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и тлеющем разряде образцы приобрели золотистый оттенок, что свидетельствует о наличии на поверхности тонкого слоя нитрида титана.

Результаты измерения микротвердости поверхности образцов показали, что после азотирования как в несамостоятельном сильноточном разряде, так и в тлеющем разряде микротвердость по сравнению с исходным значением (350 кгс/мм^2) увеличивается. Увеличение микротвердости объясняется образованием на поверхности тонкой нитридной пленки и твердого раствора азота в титане.

Результаты замеров микротвердости по глубине азотированного слоя приведены на рис.4.

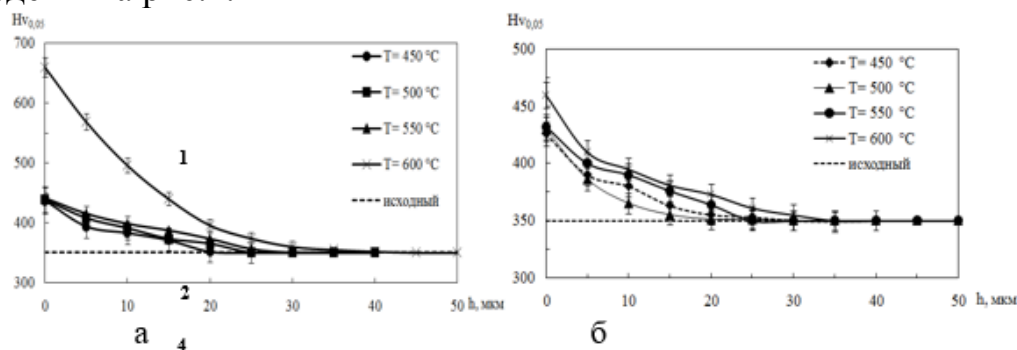


Рис. 4 Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя сплава ВТ6 ($t=1 \text{ ч}$): а) в сильноточном дуговом разряде; б) в тлеющем разряде

Толщина модифицированного слоя определялась по кривой распределения твердости до значения твердости исходного материала. Анализ зависимости (рис.4) показал, что с увеличением температуры обработки толщина упрочненного слоя возрастает. Так после азотирования в плазме дугового разряда при температуре 450°С толщина упрочненного слоя составила ~ 19 мкм, при 500°С ~ 24 мкм, при 550°С ~ 25 мкм, при 600°С ~ 33 мкм. после азотирования в плазме тлеющего разряда при температуре 450°С толщина упрочненного слоя составила ~ 20 мкм, при 500°С ~ 20 мкм, при 550°С ~ 24 мкм, при 600°С ~ 33 мкм

На графиках изменения микротвердости по глубине азотированного слоя видно, что с удалением от поверхности микротвердость на образцах снижается плавно, что свидетельствует о наличии протяженного слоя с повышенной твердостью.

Таким образом, на микротвердость и глубину упрочненного слоя существенное влияние оказывает температура обработки, так как азотирование является термически активируемым диффузионным процессом.

Далее было определено влияние температуры ионного азотирования титанового сплава ВТ-6 на остаточные напряжения в поверхностном слое.

В таблице 1 представлены значения остаточных напряжений после ионного модифицирования.

Таблица 1 – Значения остаточных напряжений на образцах

Температура обработки T, °С	Длительность t, ч	Величины остаточные напряжений $\sigma_{ост}$, кгс/мм ²
		+7,1±1
после обработки в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде		
600	1	+5,7±1
500	1	+4,9±1
450	1	+0,5±1
после обработки в тлеющем разряде		
600	1	-7,4±1
500	1	-19,7±1
450	1	-23,7±1

Наличие сжимающих напряжений на поверхности исходного образца величиной 7,1 кгс/мм², по-видимому, связано с предварительной механической обработкой (точение, шлифование и т.д.), которая, как правило, вызывает появление остаточных напряжений в тонком поверхностном слое материалов.

После азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на поверхности образцов возникают растягивающие напряжения,

которые могут быть причиной ускоренного зарождения и развития трещин. По результатам таблицы 1 видно, что температура влияет на величину остаточных напряжений. Снижение температуры ведет к уменьшению поверхностных растягивающих напряжений.

На поверхности образцов, обработанных в тлеющем разряде, возникают сжимающие напряжения, причем уменьшение температуры и времени выдержки обработки приводит к росту величины сжимающих остаточных напряжений и составляет $-23,7 \pm 1$ кгс/мм².

Выводы:

1. Установлено, что увеличение напряжения горения тлеющего разряда приводит к увеличению тока разряда. Применение смеси газов позволяет повысить ток разряда по сравнению с током разряда в чистом азоте.

2. Установлено что при азотировании в дуговом разряде при температуре 600 °С поверхностная микротвердость выше ~в 1.5 раза по сравнению с тлеющим разрядом. Толщина азотированного слоя одинакова при азотировании в обоих типах разряда.

3. При азотировании в тлеющем разряде в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, притом с увеличением температуры азотирования значение их уменьшается. После азотирования в сильноточном дуговом разряде, в поверхности образуются растягивающие напряжения, их значение увеличивается при повышении температуры обработки.

Список использованной литературы:

1. Chowdhury M. S. I. et al. Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation //Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 313. – С. 319-327.

2. Ochonogor O. F., Akinlabi E. T., Nyembwe D. A review on the effect of creep and microstructural change under elevated temperature of Ti6Al4V alloy for turbine engine application //Materials Today: Proceedings. – 2017. – Т. 4. – №. 2. – С. 250-256.

3. Antunes R. A., Salvador C. A. F., Oliveira M. C. L. Materials selection of optimized titanium alloys for aircraft applications //Materials Research. – 2018. – Т. 21. – №. 2.

4. Souza M. L. R. et al. Effects of plasma immersion ion implantation on fatigue properties of titanium alloy surfaces //Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo. – 2018. – Т. 36. – №. 3. – С. 131-138.

5. Zhecheva A. et al. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods //Surface and Coatings technology. – 2005. – Т. 200. – №. 7. – С. 2192-2207.

6. Farokhzadeh K., Edrisy A. Fatigue improvement in low temperature plasma nitrided Ti–6Al–4V alloy //Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Т. 620. – С. 435-444.
7. Batory D. et al. Plasma nitriding of Ti6Al4V alloy for improved water erosion resistance //Wear. – 2017. – Т. 374. – С. 120-127.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – С. 592.
9. Синкевич О. А., Стаханов И. П. Физика плазмы: Стационарные процессы в частично ионизованном газе: Учебное пособие. – Высшая школа, 1991. – С. 215.
10. Смирнов Б.М. Физика атома и иона. –М.:Энергоатомиздат, 1986. – С. 215.

УДК 534.1:539.3

Использование пружинно-массовых моделей для анализа колебаний рабочих колес с расстройкой параметров

И.Н. Рыжиков, Нгуен Динь Дьонг

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

При моделировании рабочих колес турбомашин необходимо учитывать различия в параметрах лопаток, всегда присутствующих в реальных конструкциях, вследствие несовершенства их изготовления (так называемую расстройку параметров). Как показали исследования других авторов, расстройка оказывает большое влияние на частоты и формы колебаний рабочих колес, а также на их напряженное состояние. В данной работе описана пружинно-массовая модель рабочего колеса с расстройкой, позволяющая с достаточной точностью проводить анализ его колебаний и требующая при этом значительно меньшей памяти компьютера, чем при обычном конечноэлементном моделировании.

Ключевые слова: *рабочие колеса, собственные частоты, расстройка*

При исследовании колебаний роторов турбомашин рабочие колеса обычно рассматриваются как системы с конструктивной поворотной симметрией. Эти конструкции можно описать с помощью пружинно-массовых моделей (ПММ), которые по сравнению с другими моделями имеют простое математическое описание, а также позволяют значительно сократить число степеней свободы системы, что позволяет использовать такие мо-

дели для исследования динамики и долговечности рабочих колес с расстройкой параметров. С 1988 года многие исследователи применяли достаточно простые ПММ для моделирования дисков и лопаток [1-15].

Авторами с использованием опыта предыдущих исследований разработана пружинно-массовая модель системы «диск - лопатка», которая содержит две степени свободы одного сектора, как показано на рис. 1[2].

При рассмотрении всего рабочего колеса, оно рассматривается, как состоящее из N одинаковых секторов, где N – количество лопаток или порядок симметрии системы. На рис. 2 показан процесс построения пружинно-массовой модели рабочего колеса [4, 5].

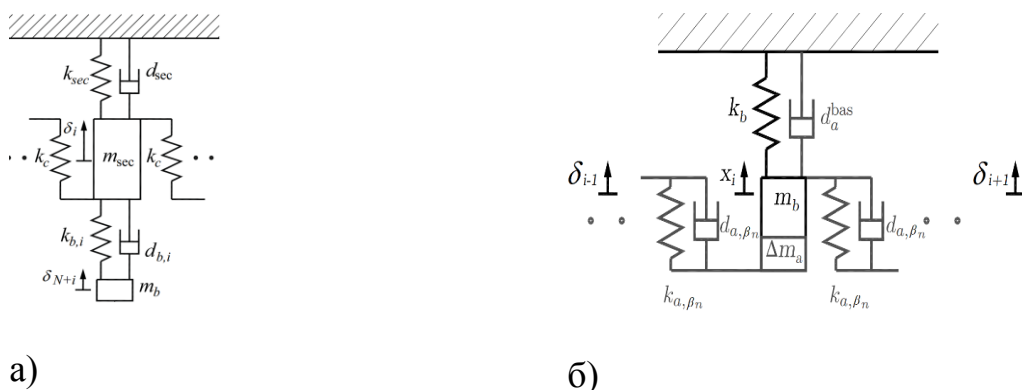


Рис. 1 Модель одного сектора на основе ПММ (а - без дополнительной массы; с дополнительной массой)

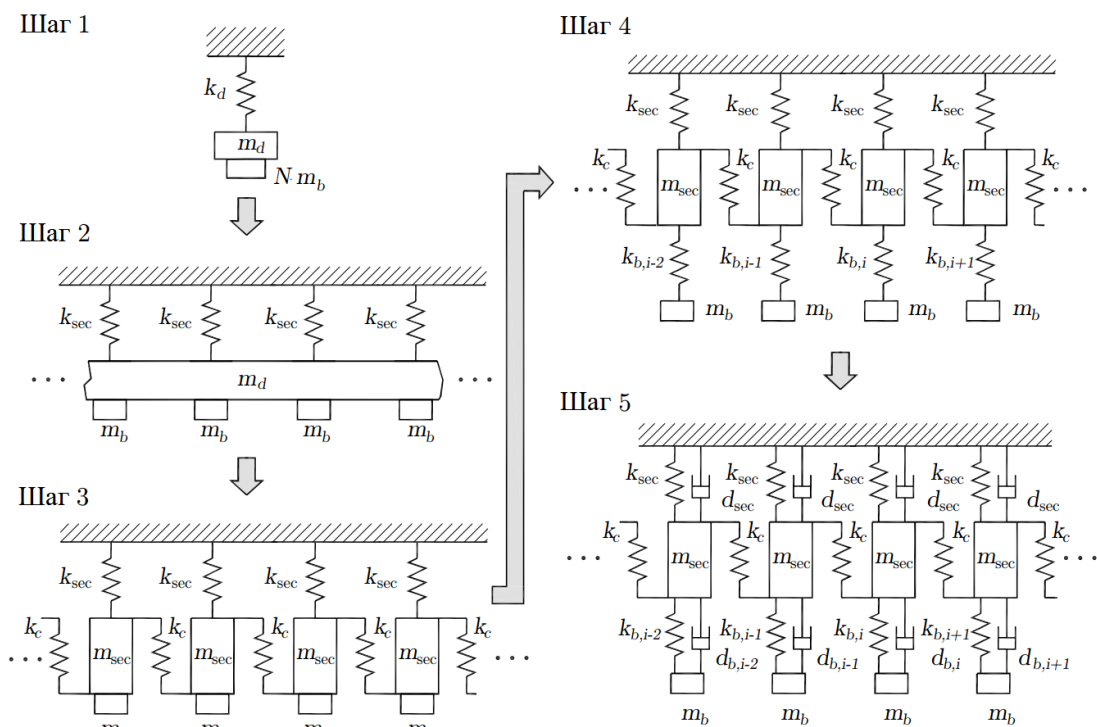


Рис. 2 Порядок построения пружинно-массовой модели рабочего колеса

Порядок построения модели следующий.

1. Массы диска (m_d) и лопатки ($m_{b,i}$) рассматриваются и определяются отдельно. Лопатки рассматриваются как идентичные, поэтому $m_{b,i}$ упрощается до m_b . В результате собственные частоты диска:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d + Nm_b}}$$

2. Поскольку колесо состоит из N секторов с N лопатками, жесткость диска учитывается в модели N пружинами. Жесткость сектора $k_{sec} = k_d/N$.

3. Так же, как и жесткость, масса диска включает N масс секторов. Масса сектора $m_{sec} = m_d/N$.

4. После определения параметров массы и жесткости диска и сектора определяются массы m_e и жесткости $k_{b,i}$ лопатки. Жесткость лопатки может быть вычислена с использованием одной степени свободы:

$k_{b,i} = 4\pi \cdot 2\omega_{b,i}^2 m_e$, где $\omega_{b,i}$ - измеренная частота. Первоначально эти измеренные частоты рассматриваются как частоты колебаний лопаток. Т.е. диск на этом этапе считается жестким. Следовательно, собственные частоты лопатки не будут соответствовать тем частотам, которые были получены при измерении, когда упругость диска присутствовала. Коррекция параметров лопатки выполняется после последнего шага настройки. В результате изменяется масса колеблющейся лопатки. Идея состоит в том, что не все части лопатки принимают участие в процессе колебаний. Считается, что часть массы лопатки участвует в колебаниях диска. Оставшаяся масса представляет собой массу, участвующую в колебаниях лопатки и обозначаемую m_e . В случае системы без расстройки все жесткости лопаток одинаковы, т.е. $k_{b,i} = k_b$.

5. Последний этап включает учет демпфирования в материале. Оба значения демпфирования диска d_d и демпфирования лопатки $d_{b,i}$ - результаты модального анализа. В соответствии с этапом 2, демпфирование диска разбивается на N отдельных секторов, т.е. $d_{sec} = d_d/N$. В случае системы без расстройки значения демпфирования материала лопаток одинаковы для всех лопаток, т.е. $d_{b,i} = d_d$ [4, 5].

Для проверки работоспособности разработанных моделей были проведены расчеты колебаний на примере рабочего колеса с расстройкой параметров, вводимой присоединением дополнительных масс к лопаткам (рис. 3).

Были проанализированы три варианта распределения массы лопаток по ободу рабочего колеса:

- 1) дополнительные массы по 0.00211 кг присоединялись к периферии всех лопаток, кроме последней;
- 2) одинаковые дополнительные массы по 0.005 кг присоединялись к периферии всех лопаток, кроме последней;
- 3) разные дополнительные массы присоединялись к периферии всех лопаток [4, 5].

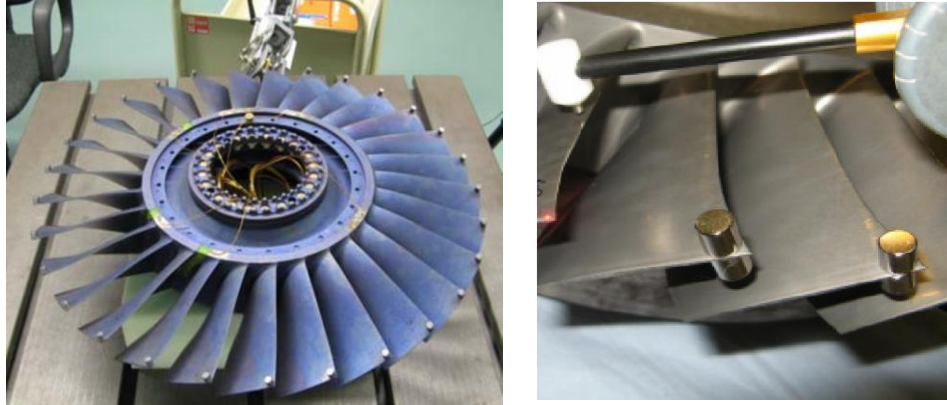


Рис. 3. Реальное рабочее колесо с дополнительными массами

Таблица 1. Результаты расчета колебаний колеса с расстройкой, вызванной разной массой лопаток

Форма колебаний	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	Собственные частоты (Гц)					
	МКЭ	Эксп.	МКЭ	Эксп.	МКЭ	Эксп.
1	403.385 4	397.8125	410.386 4	402.9375	416.386 4	403.8574
2	1296.54 17	1261.000 0	1300.22 14	1252.687 5	1304.55 84	1255.078 0
3	1803.37 84	1766.312 5	1826.68 54	1765.675 0	1843.32 58	1766.064 0

Выводы: Представленные результаты расчетов демонстрируют достаточно малую погрешность, что позволяет применять разработанные пружинно-массовые модели для анализа собственных частот колебаний рабочих колес с расстройкой параметров лопаток по их массе.

Список использованной литературы:

1. Автоматизация прочностных расчетов турбомашин / Заинчковский К.С., Репецкий О.В., Лопатин А.Б., Маликов В.Ф., Ольшевский А.Г., Персиянов В.В., Рыжиков И.Н./ под ред. О.В. Репецкого, - Иркутск: Иркутское отделение союза НИО, 1990. – 100 с.

2. До Мань Тунг Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин: Дис. канд. техн. наук. - Иркутск. 2014.- 196 с.

3. Нгуен Тьен Куэт Математические модели и программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес энергетических турбомашин на их долговечность: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Иркутск. - 2018. 24 с.

4. Нгуен Тьен Куэт Математические модели и программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес энергетических турбомашин на их долговечность. - Дис. канд. техн. наук. - Иркутск. - 2018. 155 с.

5. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Schmidt R. Исследование влияния различных видов расстройки параметров на колебания и долговечность рабочих колес турбомашин // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD (Байкальский государственный университет экономики и права). 2010. №1. С. 20-31.

6. Рыжиков И.Н. К оценке долговечности роторов газотурбинных двигателей // В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 288-294.

7. Beirow B. Grundlegende Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Verdichterlaufrädern in Integralbauweise. - Cottbus, 2009

8. Beirow B., Kuehhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 141, January, 2019, pp. 11008-11008-8.

9. Bladh J. R. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks - Part I: Theoretical Models/ J. R. Bladh, M. P. Castanier, C. Pierre// Journal of Engineering for Gas turbines and Power. - January 2001. - Vol. 123. - № 8. - P. 89-99.

10. Ewins D. J. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk/ D. J. Ewins, Z. S. Han// Trans. ASME, Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design. - 1984. - Vol 106. - P. 211. 217.

11. Irretier H Repetckii O V 1998 Vibration and Life Estimation of Rotor Structure IFToMM Conf. on Rotor Dynamics (Darmstadt).

12. Irretier H. Transient Vibrations of Turbine Blades Due to Passage Through Partial Admission and Nozzle Excitation Resonance / H. Irrtier //Proc. IFToMM Intl. Conf. Rotor Dynamics Tokyo. – 1986. – 30 p.

13. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Dynamics analysis in the design of turbomachinery using sensitivity coefficients. IOP Conf. Series: Journal of Physics, Vol. 944, 2018, 012096. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012096.

14. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Dynamics of gas turbine engines rotors taking into account non-linear effects. Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 8, 2016, pp. 361 365.

15. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Investigation of mistuning impact on vibration of rotor bladed disks. IOP Conf. Series: Journal of Physics, Vol. 944, 2018, 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012097.

Совершенствование высокопроизводительных процессов дуговой сварки в защитных газах

Е.А. Ямщикова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Осуществлен обзор существующих специальных сварочных процессов, реализованных на оборудовании полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитных газов. Рассмотрен характер влияния каждого процесса на производительность сварки и сварочную дугу, в частности.

Ключевые слова: *специальный сварочный процесс, полуавтоматическая сварка, импульсная сварка, сварочная дуга.*

Первые специальные сварочные процессы появились еще 10 лет назад [15]. Они были направлены на увеличение производительности полуавтоматической сварки и импульсной сварки, в частности [9].

Как известно применение импульсной дуги при MIG/MAG сварке было связано в основном с необходимостью обеспечения четко дозированного переноса электродного металла и, как следствие, обеспечения минимальных тепловложений, связанных с этим минимальных деформаций [5]. Она позволяет получить: улучшение формирования шва во всех пространственных положениях; повышение механических свойств сварных соединений; улучшение дегазации сварочной ванны; снижение сварочных деформаций и др [2]. Однако, производительность и скорость сварки были существенно ниже, чем при сварке со струйным переносом электродного металла [1].

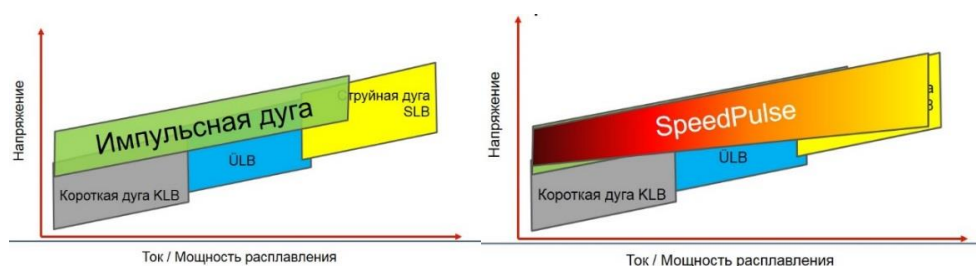


Рис.1 – Преимущества SpeedPulse в разрезе существующих сварочных дуг

С целью повышения скорости и производительности импульсной сварки был разработан специальный сварочный процесс SpeedPulse. Он

объединяет и перекрывает все преимущества сварки на короткой дуге, переходной, струйной и стандартной импульсной (см. Рис. 1).

Отличие от традиционного импульсного процесса заключается в том, что во время пауз между импульсами на долю миллисекунды включается процесс сварки со струйным переносом электродного металла и переход металла происходит также и между импульсами [8]. Таким образом, более эффективно используется энергия самой дуги, при этом количество переносимого металла остается контролируемым. Это можно увидеть на кадрах высокоскоростной съемки (см. Рис. 2).



Рис. 2 – Перенос капли SpeedPuls

В результате изменения сварочной дуги обеспечивается также более высокое и концентрированное давление электродного металла на заготовку. В итоге формируется более глубокое проплавление основного металла. Это видно на микрошлифе двух угловых сварных швов (см.Рис. 3).

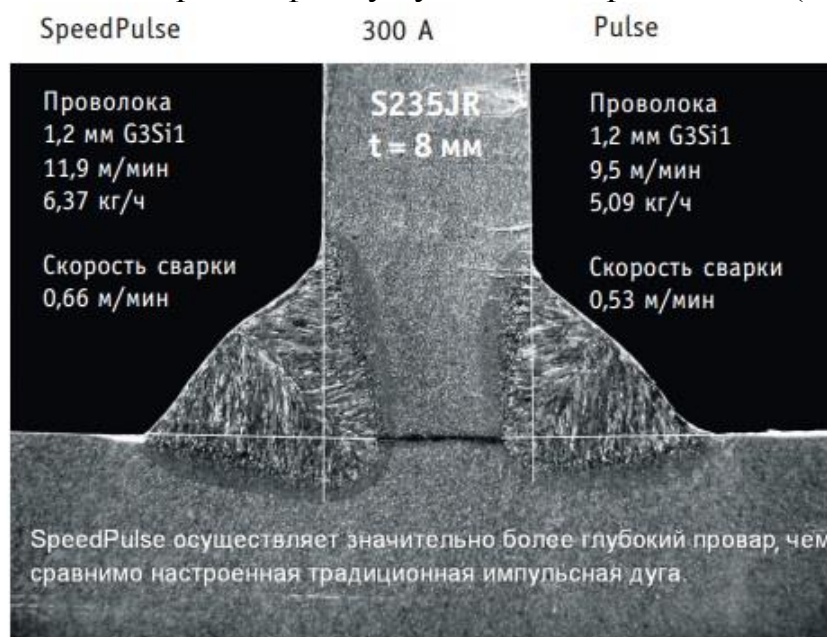


Рис.3 – сравнение проплавления

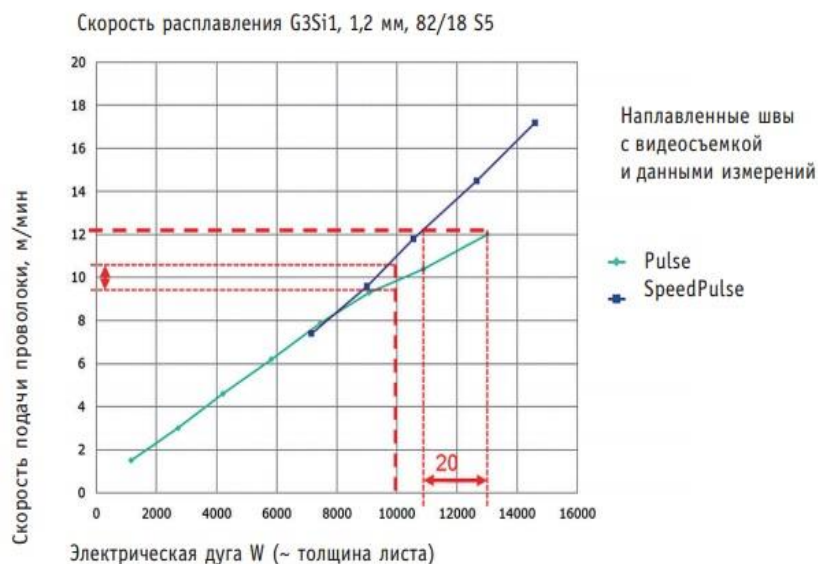


Рис.4 электрическая мощность дуги

Еще одним важным отличием нового сварочного процесса является более высокая скорость подачи присадочной проволоки по сравнению со стандартной импульсной сваркой: 11,9м/мин против 9,5м/мин [5], а также более высокую производительность наплавки: 6,37 кг/ч против 5,09 кг/ч [5]. Эффект от применения функции SpeedPulse наиболее ощутим на более высоких режимах сварки (см. Рис. 4). Например, при одинаковой мощности сварочных дуг (10 000 Вт) производительность расплавления с процессом выше на 10%, а при одинаковой скорости подачи проволоки функция обеспечивает меньшее на 20% тепловложение в изделие по сравнению со стандартной импульсной сваркой. Таким образом, объединение импульсной и струйной дуг в SpeedPulse существенно повлияло на производительность сварки, а именно:

- до 48% быстрее автоматизированной импульсной сварки;
- до 35% быстрее ручной импульсной сварки;
- до 10-15% быстрее обычной сварки MIG/MAG;
- до 30% быстрее при сварке нержавеющей стали в отличие от ручной импульсной сварки;
- до 20% быстрее при сварке алюминия в отличие от ручной импульсной сварки [11].

Специальный процесс SpeedArc.

Данная функция нацелена на повышение качества сварных соединений из толстолистового металла, гарантированного проплавления в корне шва, а также MIG/MAG сварки в узкую разделку. Данный процесс в отличие от стандартной струйной дуги поддерживает струйный процесс переноса металла более короткой дугой. Дуга становится более сфокусированной и устойчивой. Благодаря высокому плазменному давлению в дуге обеспечивается более глубокое проплавление (см.Рис. 5).

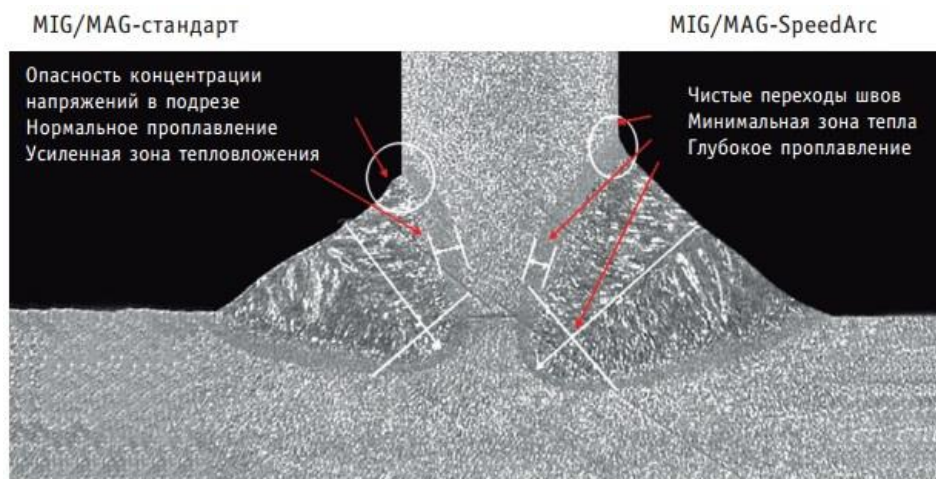


Рис.5 – Сравнение качества провара стандартной дуги (слева) и дуги SpeedArc (справа)

В результате возможна сварка на больших вылетах, в «узкую разделку» – до 40мм при гарантированном проваре корня шва, а также появляется возможность снижения угла разделки с 60 до 40 градусов в тех случаях, где это допускается [6]. При этом снижается тепловложение в основной металл и снижается вероятность таких дефектов как подрезы. Действие данного процесса позволяет существенно снизить расход сварочных материалов, а также повысить производительность сварки за счет уменьшения количества проходов при многопроходной сварке.

SpeedArc является высокопроизводительным, сочетающим в себе струйный перенос металла короткой дугой с высокой плотностью энергии, который за счет более эффективного использования энергии дуги допускает увеличение скорости сварки до 30% в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG [10].

Специальная функция SpeedUp.

Данный процесс позволил применить полуавтоматическую сварку MIG/MAG при работе с вертикальными и потолочными соединениями. SpeedUp помог уйти от сложных движений «ёлочка» или поперечных колебаний при сварке данных соединений. Возможность MIG/MAG сварки достигается комбинированием двух фаз сварочной дуги. Первая фаза - «горячая» фаза тока большой силы с высокой подачей энергии. Она предназначена для оптимального расплавления материала. Затем без переходов и практически без брызг наступает вторая, «холодная» фаза благодаря которой происходит заполнение металлом (см. Рис. 6).

Периодически возникающая высокая концентрация энергии дуги, колебания сварочной ванны и циклическое целенаправленное удлинение дуги обеспечивают надежное схватывание боковых кромок, Уменьшенная подача энергии на завершении каждого цикла обеспечивает надежный провар, точное объемное заполнение шва и почти оптимальный катет шва (см. Рис. 8).

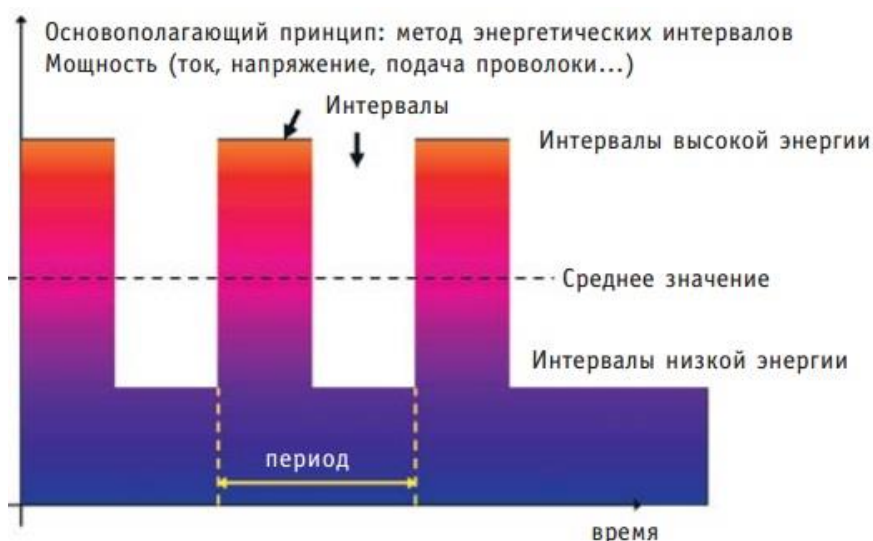


Рис.6 – Метод энергетических интервалов SpeedUp

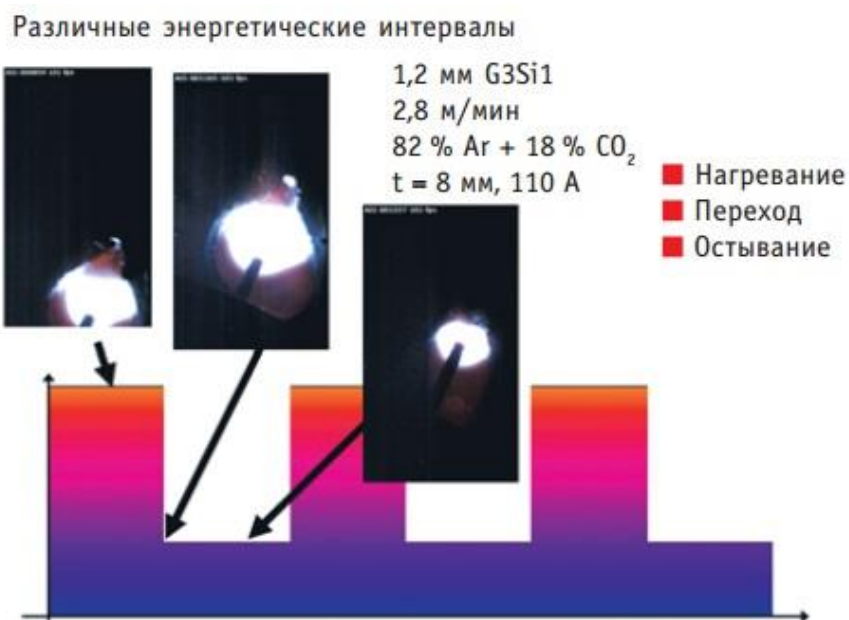


Рис.7 – Циклы горения дуги SpeedUp

В результате применения данной функции значительно повышается производительность сварки при выполнении сварки вертикальных и потолочных соединений – до 100% в сравнении с обычной MIG/MAG [13].

Специальный сварочный процесс SpeedRoot.

Данный процесс предназначен для MIG/MAG сварки корня шва с высокой производительностью заполнения зазора и гарантированным образованием обратного валика заданной геометрии. Обычные процессы MIG/MAG сварки короткой дугой мало пригодны для таких соединений, т.к. перенос металла происходит как правило, со взрывом шейки капли, из-за чего сварочная ванна провисает или шов слишком сильно и неравномерно продавливается через зазор.



Рис.8 – Сравнение провара шва техникой «ёлочка» (слева) и SpeedUp (справа) [7]

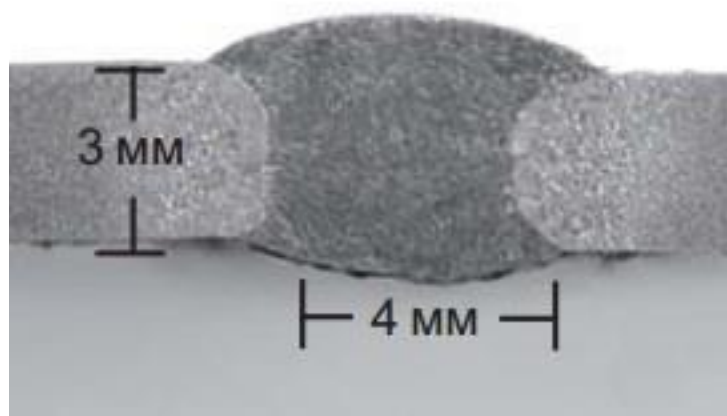


Рис.9 – SpeedRoot: Микрошлиф сварного соединения

Технология регулировки высокопроизводительного процесса Speed-Root обеспечивает «холодный» перенос материала с помощью ограничения времени короткого замыкания с уменьшенной энергии. Решающую роль при этом играет точный расчет времени низкого тепловложения и оптимальных условий для отделения и переноса капли. Процесс обеспечивает комбинацию минимального тепловложения, максимальных значений допусков по зазору и заполнение зазора. Так, например, зазор 4мм при толщине материала 3мм можно заполнить без применения колебательного движения (см. Рис. 9). Данный процесс значительно облегчает процесс сварки и минимизирует затраты на последующую обработку изделия. Кроме того, в сравнении с процессом TIG, применяемым на практике для заварки корня шва, SpeedRoot быстрее в 3 раза [12].

Совершенствование специальных процессов: новая система ХТ

С 2016 года российско-немецким производителем сварочного оборудования LORCH был внедрен принципиально новый процесс ХТ. На данный момент он запатентован только этим производителем.

Стандартный импульс представляет собой следующее чередование: "пауза/импульс/пауза/импульс" («I-I» регулировка) [3]. Это значит, что на каждый импульс приходится одна капля расплавленного металла (см. Рис. 10). Это делает перенос металла контролируемым, но более медленным в сравнении со стандартной сваркой [4]. С применением процесса SpeedPuls, данная регулировка изменилась. В процессе данной сварки импульс стал выглядеть иначе: "пауза/импульс с резким изменением тока/пауза/импульс с резким изменением тока" («I-I-I» регулировка»). Т.е. за первой каплей следует вторичная струйная дуга и скорость сварки значительно увеличивается (см. Рис. 11).

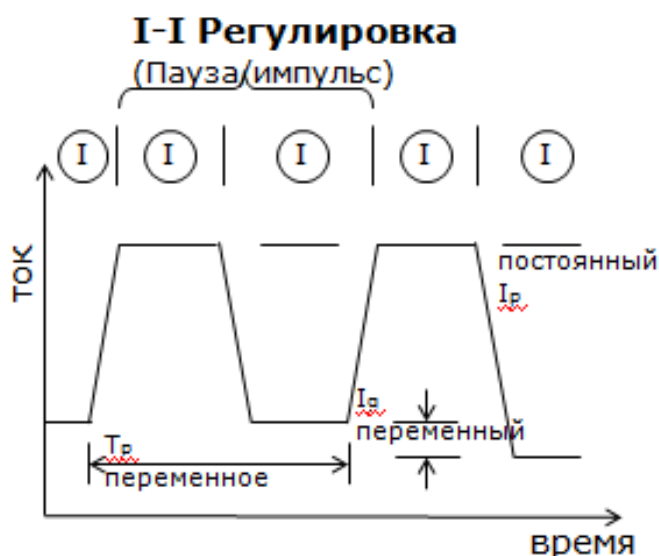


Рис.10 – Регулировка стандартная импульсной сварки

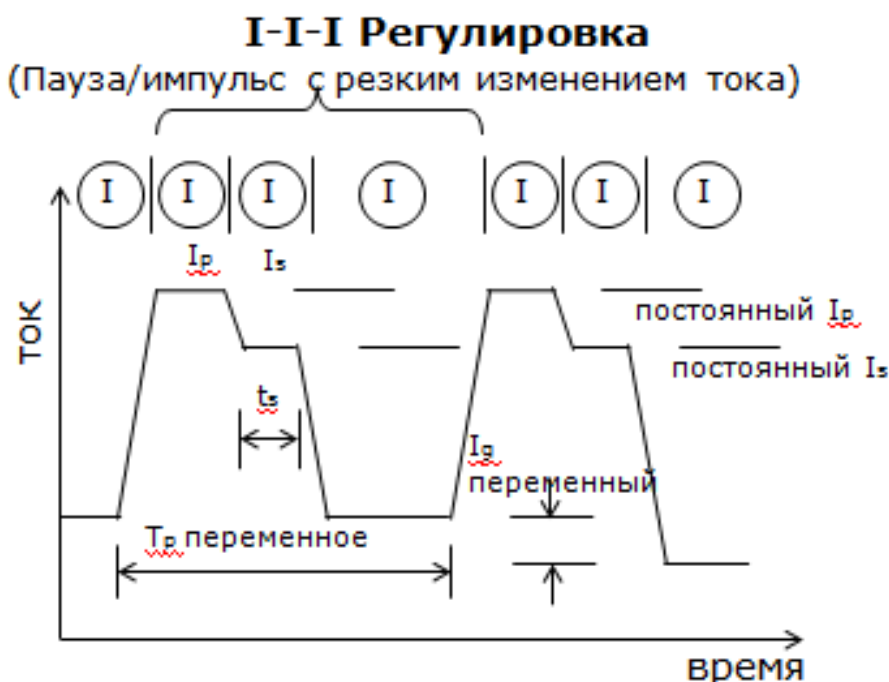


Рис.11 – Регулировка SpeedPuls

Следующим шагом, реализованным в 2016 году, стало новое изменение импульса: регулировка стала плавной, что позволило сделать сварку еще более стабильной и избавиться от влияния внешних факторов. Новый вид импульсной сварки получил название ХТ. В данном процессе регулировка выглядит следующим образом (см. Рис. 12).

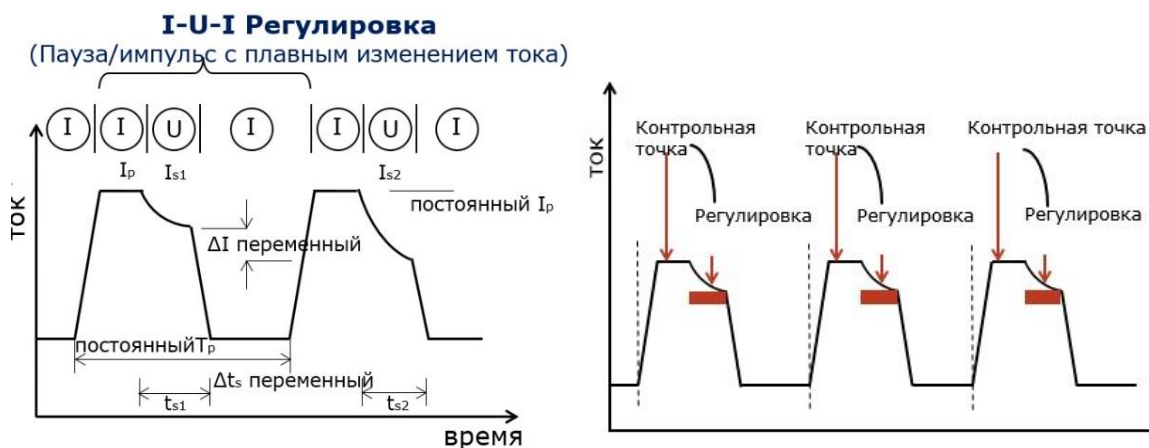


Рис.12 – Регулировка ХТ

В результате, внешне процесс сварки выглядит практически таким же, как SpeedPuls, однако он имеет ряд преимуществ: более высокий уровень наплавки; высококонцентрированная дуга (глубокое проплавление, хорошее формирование корня шва, глубокая дуга, без подрезов); в результате более высокая скорость сварки как результат нескольких факторов влияния на дугу [14].

Нами рассмотрены существующие специальные сварочные процессы, используемые при работе оборудования для полуавтоматической сварки MIG/MAG российско-немецкого производителя LORCH а также новейшие усовершенствования данных функций. Данные процессы существенно упрощают технику сварки, значительно повышая качество получаемого соединения и производительность. Также они позволяют нивелировать низкую квалификацию или отсутствие достаточного опыта сварщиков.

Список использованных источников

1. Источники питания для сварки / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 384 с.: ил. – (Высшее образование).
2. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. Управление процессом плавления и переноса при сварке в углекислом газе длинной дугой // Монография - 2009г

3. Современные способы импульсно-дуговой MIG/MAG сварки / Крампит А.Г., д.т.н., Зернин Е.А., к.т.н., Крампит М.А., аспирант ГОУ ВПО «Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета» - Сварка, родственные процессы и технологии.
4. Мозок В. М. Дополнительные особенности технологии дуговой механизированной и автоматической сварки с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство – 2010 - №1. С. 34-38.
5. Жерносеков А.М., Андреев В.В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (обзор) // Автоматическая сварка – 2001. №10.
6. Жерносеков А.М. Влияние вылета электрода на параметры шва при импульсно - дуговой сварке сталей // Автоматическая сварка – 2001. №8.
7. Накарякова В. И. Способ сварки, повышающий производительность труда сварщиков // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 20. – С. 4446–4450. – URL: <http://e-koncept.ru/2014/55154.htm>.
8. Высокопроизводительный процесс полуавтоматической сварки в защитных газах сварочной проволокой плоского поперечного сечения – URL: <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/blog/dinsemig.php>
9. Masters of Speed. Инновационные сварочные процессы от Lorch – URL: <https://www.lorch.eu/ru/resheniya/svarochnye-processy-speed-ot-lorch/>
10. SpeedArc: Сварка толстолистового металла в узкую разделку – URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/speed-arc-cvarka-tolstolistovogo-metalla-v-uzkuyu-razdelku-/>
11. SpeedPuls: Импульсная высокоскоростная сварка – URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/speed-puls-impulsnaya-vysokoskorostnaya-svarka/>
12. Больше производительности при сварке корня шва – URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/speedroot/>
13. Сварочная технология SpeedUp: повышение производительности сварки в вертикальных и потолочных положениях на 100% – URL: <https://www.ecosvar.com/statyi/869-svarochniye-tehnologii-speedup>
14. Контроль и регулировка импульсной сварочной дуги с LORCH XT – URL: <https://www.ecosvar.com/novosti/857-lorch-xt-news>
15. Сварочные технологии LORCH – URL: <https://www.ecosvar.com/svarochniye-tehnologii>

*Алгоритмы классификации производственных ситуаций в
многомерном признаковом пространстве*

В.З. Чоккой, Н.С. Бакурова

Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, 664009, г. Иркутск, ул. Советская, 139

Показана актуальность научного сопровождения процессов управления межполетным обслуживанием современных воздушных судов гражданской авиации. Рассмотрены подходы к возможным корректировочным решениям при межполетном обслуживании. Показано, что такие решения могут формироваться на основе анализа многомерных данных, в частности, дискриминантного и кластерного анализа. Предложены алгоритмы классификации производственных ситуаций, реализованные в виде программных модулей для ЭВМ. Данные модули рекомендованы для использования на автоматизированных рабочих местах авиадиспетчеров, контролирующих обслуживание воздушных судов в аэропортах.

Ключевые слова: алгоритм, воздушное судно, межполетное обслуживание, кластерный анализ, дискриминантный анализ, обучающая выборка.

Для современного этапа развития российских авиакомпаний характерно интенсивное использование ограниченного парка дорогостоящих воздушных судов (ВС) при соблюдении базовых условий – безопасности полетов и экономической эффективности [3], что обуславливает частые, ограниченные по времени и технологически сложные межполетные подготовки ВС. На данном этапе эксплуатации ВС выявляется и устраняется 26,4 % отказов оборудования, а также устраняется 29,2 % отказов оборудования, выявленных на различных фазах предыдущего полета (Рис. 1).

В этих условиях актуально алгоритмическое и методическое сопровождение эффективного управления процессами эксплуатации и обслуживания каждого отдельного ВС. Важными особенностями такого управления являются: вероятностный характер взаимосвязи трех групп объектов управления – среды, ВС, экипажа и авиаперсонала; ограниченный объем и недостаточная достоверность данных. Все это обуславливает высокий риск ошибочных решений и требует использования методов робастного, адаптивного, стохастического управления [6, 12, 13], в наибольшей степени соответствующих отмеченным условиям.



Рис. 1. Выявление отказов по этапам эксплуатации магистральных ВС (ТО – техническое обслуживание; НК – неразрушающий контроль)

Пусть эксплуатация ВС сопровождается наблюдениями за тремя векторами случайных процессов: $X(t)$ – состояние технической составляющей (ВС); $Y(t)$ – состояние эргатической составляющей (экипаж, авиаперсонал); $Z(t)$ – состояние среды (средства эксплуатации и обслуживания). Тогда можно предположить, что каждому временному срезу t будет соответствовать некая производственная ситуация, требующая адекватного варианта управления Q_t . Каждый такой вариант в общем случае может быть реализован несколькими $(1, 2, \dots, k)$ способами, характеризующимися различными уровнями затрат $D_t^{(k)}$.

В самом общем случае любой вариант управления является функцией двух аргументов: функции выигрыша (дохода) f и функции потерь (затрат) d , то есть $Q = Q(f, d)$. В свою очередь f и d являются функциями признаков (параметров, показателей) эрготехнической системы и среды: $f = f(x, y, z)$; $d = d(x, y, z)$.

Исходя из представленных замечаний можно указать несколько вариантов предельных стратегий управления, например:

– максимума выигрыша, когда

$$Q_1 = \sup_{f \in \Omega_f; d \leq d_0} Q(f, d) = Q(f^*, d \leq d_0);$$

– максимума экономии, когда

$$Q_2 = \inf_{d \in \Omega_d; f \geq f_0} Q(f, d) = Q(f \geq f_0, d^*);$$

– компромисс между выигрышем и потерями, когда

$$Q_3 = \sup_{f \in \Omega_f} \inf_{d \in \Omega_d} Q(f, d) = Q(f^*, d^*);$$

– максимум прибыльности, когда

$$Q_4 = \sup_{f \in \Omega_f; d \in \Omega_d} (k_f f - k_d d) = (k_f f^* - k_d d^*);$$

– максимум удельной эффективности, когда

$$Q_5 = \sup_{f \in \Omega_f; d \in \Omega_d} (f/d) = (f^*/d^*);$$

– минимум недополучения возможного выигрыша, когда

$$Q_6 = \inf_{f \in \Omega_f; d \in \Omega_d} [d \cdot (\hat{f} - f)].$$

где k_f, k_d – нормировочные коэффициенты приведения f и d к единой шкале; Ω_f, Ω_d – области существования f и d ; f_0, d_0 – предельно допустимые f и d ; \hat{f} – «идеальное» значение f .

В большинстве случаев реализация рассмотренных стратегий управления реализуется с использованием различных вариантов классического (траекторного) управления [7, 11, 13], которое при малых объемах и низкой достоверности исходных данных проблематично.

Разрешению обозначенной проблемы, применительно к авиационным эрготехническим системам, препятствуют ряд дополнительных обстоятельств [3]: стохастический характер и многокритериальность задачи управления, а также высокая размерность пространства поиска рациональных управленческих решений (как следствие, – необходимость использования сложных и трудоемких вычислений); необходимость регулярного, многоаспектного мониторинга процессов эксплуатации и накопления данных; сложность параметризации многочисленных эрготехнических элементов; отсутствие надежных математических моделей эрготехнических звеньев на уровне обслуживания отдельного ВС; высокие требования к квалификационному уровню лиц, принимающих участие в формировании решений.

Исходя из отмеченных обстоятельств представляется оправданным использование *классификационного* варианта управления [12], предполагающего: выполнение идентификации производственных ситуаций в рамках кластерного и дискриминантного анализа и, при необходимости, корректировку текущего режима работы эрготехнического звена уровня ВС; использование математического обеспечения в виде программного ресурса для ЭВМ с доступным по «входу» и «выходу» интерфейсом, не требующем от пользователей углубленной математической и компьютерной подготовки.

Алгоритмический модуль многопараметрической идентификации производственных ситуаций, имеет следующие особенности:

- кластеризация осуществляется по комбинации текущих значений некоторой совокупности из p наблюдаемых признаков (параметров, показателей, критериев), измеренных, в общем случае, на основе трех типов шкал: наименований, порядка, интервалов [1, 2];
- кластеризация выполняется, в общем случае, с использованием различных метрик (взвешенная Эвклида, Хемминга, Махаланобиса) и различных правил (ближнего соседа, средней связи, дальнего соседа) [2, 4, 5];
- кластеризация реализуется по обучающим выборкам (ОВ) с возможностью редактирования числа и состава кластеров, автоматического дисконтирования и наращивания мощности кластеров.

Формально алгоритмический модуль позволяет определять – какому из имеющихся в ОВ L кластеров соответствует текущая или прогнозная

комбинация (производственная ситуация) из p значений наблюдаемых признаков.

На блок–схеме алгоритма (Рис. 2) номера, вписанные в элементы типа «решение» (ромб), обозначают следующие вопросы: 0?– привязана ли текущая ситуация к одному из кластеров ОВ?; 1?– привязку ситуации к кластеру выполнить по правилу ближнего соседа?; 2?– упрощенную привязку ситуации к кластеру выполнить по правилу средней связи?

В качестве исходных данных использованы: число производственных ситуаций N , число признаков p , число кластеров L , массив результатов текущего наблюдения $\{X_{Np}\}$, набор массивов ОВ, а в качестве результатов – пополненный за счет текущей ситуации набор ОВ и номер S_L кластера, к которому отнесена текущая ситуация. Схема модуля включает девять частных алгоритмов, часть из которых выполняется в рамках цикла 3...6 (частные алгоритмы с номерами 4 и 5), часть – в рамках итерации 8...11 (частные алгоритмы с номерами 9 и 10), а оставшиеся частные алгоритмы с номерами 2, 7, 16, 18 и 19 на каждом шаге управления выполняются однократно.

Алгоритм содержит элемент 14, обеспечивающий выбор одного из трех вариантов идентификации по правилам: ближнего соседа, центра тяжести, дальнего соседа. Ввод исходных данных из базы данных обеспечивается элементом 1, в вывод результатов – элементами 20 (на экран АРМ) и 21 (с записью в базу данных). Алгоритмические элементы типа "дисплей" на блок–схеме обозначают: под номером 13 – вывод сообщения о необходимости привязки ситуации к кластеру ОВ; 20 – вывод сообщения об окончании идентификации и полученных результатах.

После ввода данных частный алгоритм 2 выполняет нормирование всех откликов из матриц текущих данных и матриц ОВ к единичному интервалу. Далее, в рамках цикла 3...6, частными алгоритмами 4 и 5 выполняется формирование границ каждого из имеющихся кластеров (групп однородных по обслуживанию производственных ситуаций) и непараметрическая оценка плотности распределения откликов в этих кластерах.

На следующем этапе частным алгоритмом 7 осуществляется отображение границ и плотности распределения имеющихся кластеров на одномерную числовую ось. На эту же ось отображается и идентифицируемая производственная ситуация. Далее, в рамках итераций 8...11 частными алгоритмами 9 и 10 осуществляется дробление актуальных кластеров на области и выполняется привязка квантов (отдельных откликов признаков) идентифицируемой ситуации к ближайшим областям кластеров. Если все кванты ситуации распределены по областям, то итерации завершаются.

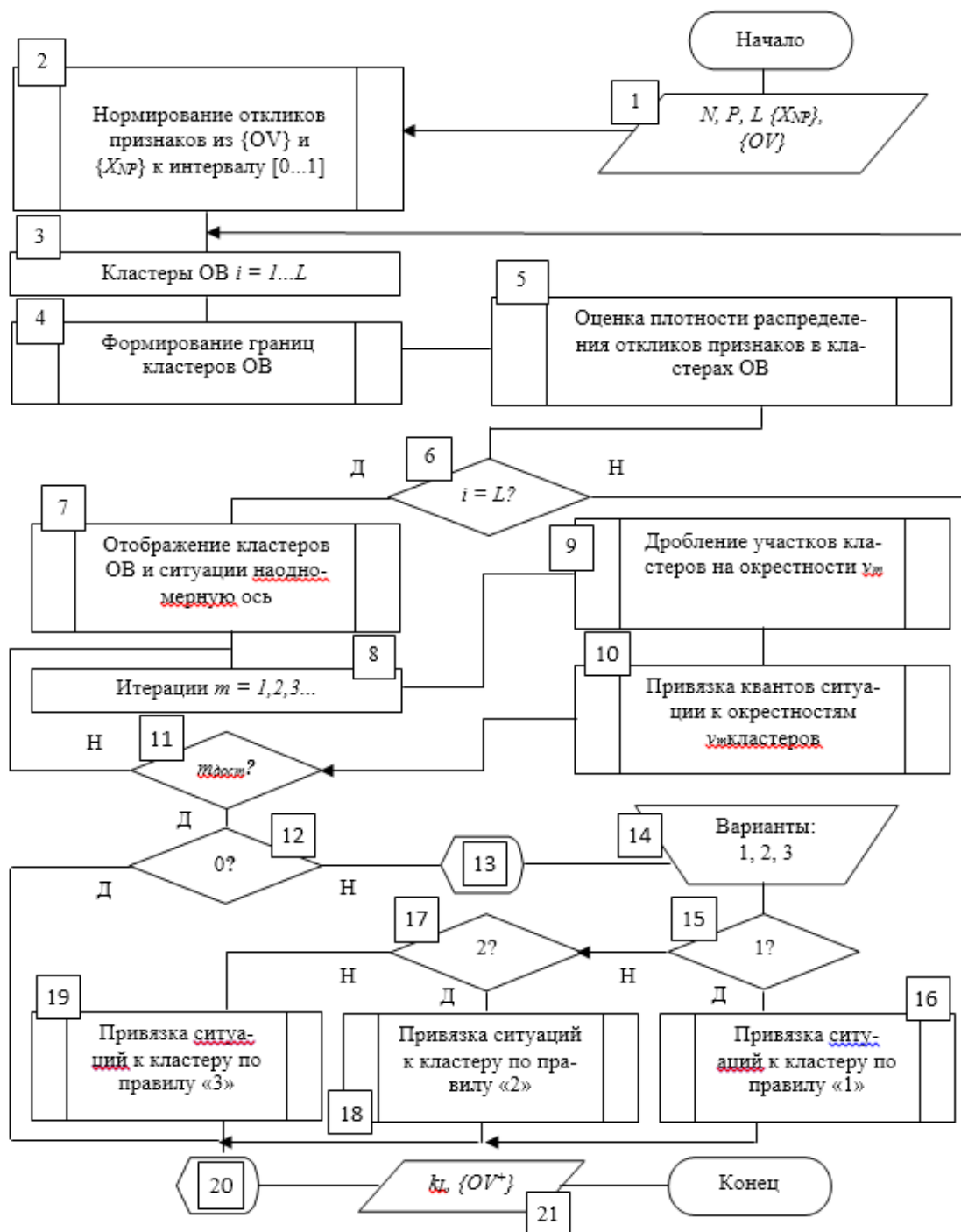


Рис. 2. Блок–схема алгоритма идентификации ситуаций

Если после завершения итераций обнаруживается, что использованные области принадлежат, преимущественно, одному из кластеров, то после вывода соответствующего сообщения и записи результатов идентификации в базу данных (элементы 20 и 21), работа модуля завершается. Если выявить преобладающий кластер не удалось, то об этом выводится сообщение (элемент 13) и управление передается к меню модуля (элемент 14).

Меню позволяет выбрать одну из трех альтернатив упрощенной, приближенной идентификации ситуации: 1 – по правилу ближнего соседа, 2 – по правилу центра тяжести, 3 – по правилу дальней связи. Альтернативные

варианты реализуются частными алгоритмами 16, 18 или 19. На завершающем этапе полученные результаты упрощенной идентификации фиксируются на экране и в базе данных (элементы 20 и 21).

Общая идея алгоритма идентификации заключается в следующем. Предположим, что при формировании ОВ указана принадлежность N_1 ситуаций из N , входящих в множество E , к t кластерам $A_i, i = \overline{1, t}$. Число ситуаций, принадлежащих каждому кластеру A_i известно

$$\sum_{i=1}^t |A_i| = N_1.$$

Требуется найти принадлежность остальных (или одной) $M = N - N_1$ ситуаций E к одному из кластеров. Здесь множества A_i – это ОВ в виде априорно сформированных кластеров. Если обозначить через $\hat{f}(x/A_i), x \in R^p$ оценку плотности распределения для кластера A_i , то классифицируемую ситуацию с признаками x^* следует отнести к тому кластеру, для которого $\hat{f}(x/A_i)$ максимальна.

В алгоритме идентификации принято допущение, что оценка плотности распределения значений в каждом кластере может быть рассчитана как

$$\hat{f}(x/A_i) = k_i / |A_i|^V,$$

где V – объем некоторой окрестности ситуации $x^* \in R^p$; k_i – число ситуаций кластера A_i , попавшие в объем V .

Тогда отнесение ситуации с признаками x^* к одному из кластеров ОВ определяется правилами: средней связи – когда идентифицируемая ситуация относится к тому кластеру, сумма расстояний до ситуаций которого минимальна; ближайшего соседа – когда идентифицируемая ситуация относится к тому кластеру, который имеет минимальное расстояние от идентифицируемой до самой близкой ситуации; дальнего соседа – когда идентифицируемая ситуация относится к тому кластеру, который имеет минимальное расстояние от идентифицируемой до самой отдаленной ситуации.

Рассмотренный алгоритм идентификации производственных ситуаций доведен до прикладного уровня и оформлен в виде модуля *Дискриминантный анализ данных*, интегрированного в авторский расчетно-информационный ресурс Модельер 2.1 (Рис. 3). Предполагается, что данный ресурс может стать элементом специального программного и информационного обеспечения автоматизированного рабочего места (АРМ) авиадиспетчеров, контролирующего межполетное (аэродромное) обслуживание ВС.

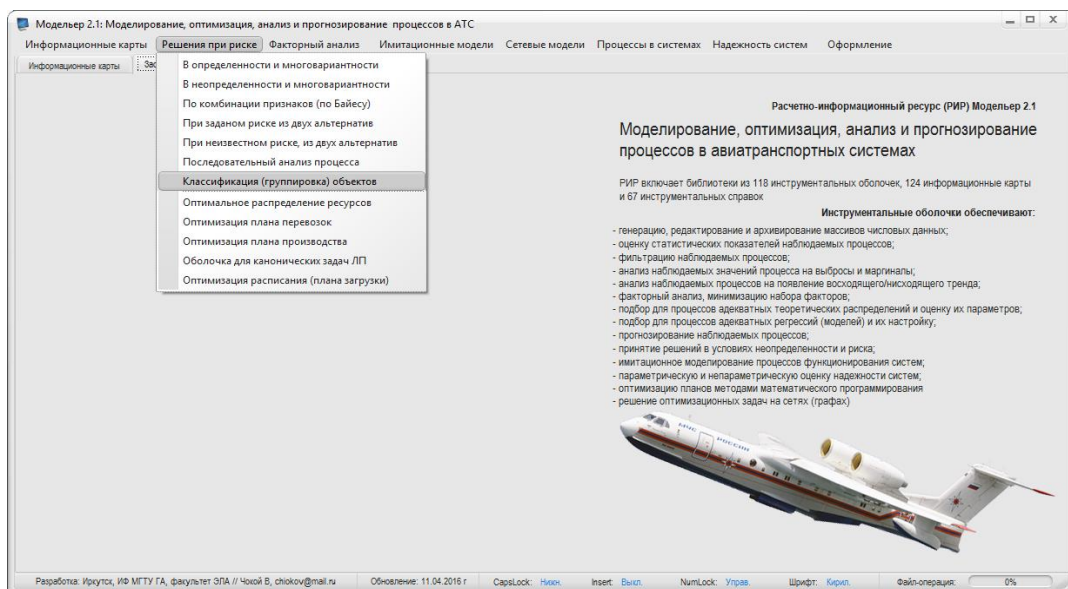


Рис.3. Головная панель расчетно-информационного ресурса Модельер 2.1

Из рассмотренных выше материалов следует, что алгоритм идентификации производственных ситуаций предполагает наличие предварительно сформированных ОВ. Их формирование осуществляется программно – с использованием алгоритма кластеризации, и/или путем ручного редактирования числовых массивов. Для идентификации первой производственной ситуации необходимо чтобы в каждом кластере ОВ имелась хотя бы одна «обучающая» ситуация. При каждом сеансе текущая идентифицированная ситуация автоматически пополняет ОВ.

Используемый для формирования ОС алгоритм относится к классу агломеративных алгоритмов [2] в котором используются рассмотренные ранее метрики расстояний и правила кластеризации. Алгоритм предполагает выполнение операций по следующей схеме: 1 – все исходные объекты объявляются отдельными одноэлементными кластерами; 2 – два самых близких (по используемой метрике) кластера объединяются в один; 3 – выполняется пересчет матрицы межкластерных расстояний по формуле

$$\rho(S_i, S_j) = \frac{1}{n_i \cdot n_j} \sum_{x_k \in S_i} \sum_{x_m \in S_j} \rho(x_k, x_m),$$

где n_i – число ситуаций в кластере S_i ; 4 – рассчитывается первая разность функции приращения межклассовых расстояний $f(n)$. Если ее максимум не достигнут, то перейти к пункту 2. Если максимум $f(n)$ достигнут, то искомая ОФ сформирована.

На рисунке 4 представлен вариант программной реализации алгоритма в виде модуля *Кластерный анализ данных*, также интегрированного в ресурс Модельер 2.1. Классификационные модули представлены в закладках отдельной инструментальной панели *Классификация (группировка) объектов*. Третья закладка *Справка по инструментальным оболочкам* содержит справочную информацию по следующим вопросам: порядок тестирования модулей, порядок решения практических задач, показания к применению модулей, примеры решения типовых задач, рекомендации по

интерпретации получаемых результатов.

Перед выполнением идентификации и при формировании начальных ОВ исходные данные подвергаются соответствующей статистической обработке (разведочному анализу, шкалированию, нормированию) [1, 5, 7]. Инструменты разведочного анализа, оформленные в виде отдельных модулей, включены в Модельер 2.1.

Для решения задачи идентификации ситуаций в качестве исходных используются: матрица откликов признаков $\{x_{ij}\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, P}$, где N – общее число ситуаций (текущей и в ОВ), P – общее число признаков; t – число кластеров в ОВ; D – управляющий символ ($D=0$ – признаки разнотипные, $D=1$ – признаки классификационные, $D=2$ – признаки качественные, $D=3$ – признаки количественные); F – управляющий символ ($F=1$ – решающее правило *ближайший сосед*, $F=2$ – решающее правило *средняя связь*, $F=3$ – решающее правило *дальний сосед*); G – массив признаков каждого типа (для случая, когда $D=0$).

Для решения задачи формирования ОВ в качестве исходных используются те же данные, что и для задачи идентификации ситуаций. Важным достоинством алгоритма формирования ОВ является возможность группировки не только ситуаций, но и признаков (например, при решении задачи минимизации размерности признакового пространства). В этом случае в качестве исходных данных для алгоритма формирования ОВ дополнительно используются: управляющий символ $D=4$ – выполнение группировки не ситуаций, а признаков; матрица весов признаков $\{\pi_j\}, j = \overline{1, P}$; матрица корреляций признаков $\{\hat{r}_{kl}\}$, элементы которой для признаков, измеренных по количественной шкале, могут быть рассчитаны по формуле

$$r_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i^{(k)} - \bar{x}(k)] \cdot [x_i^{(l)} - \bar{x}(l)]}{\sqrt{D(x^{(k)}) \cdot D(x^{(l)})}}$$

где $\bar{x}(i)$ – оценка среднего значения i -го признака; $D(x^i)$ – оценка дисперсии i -го признака.

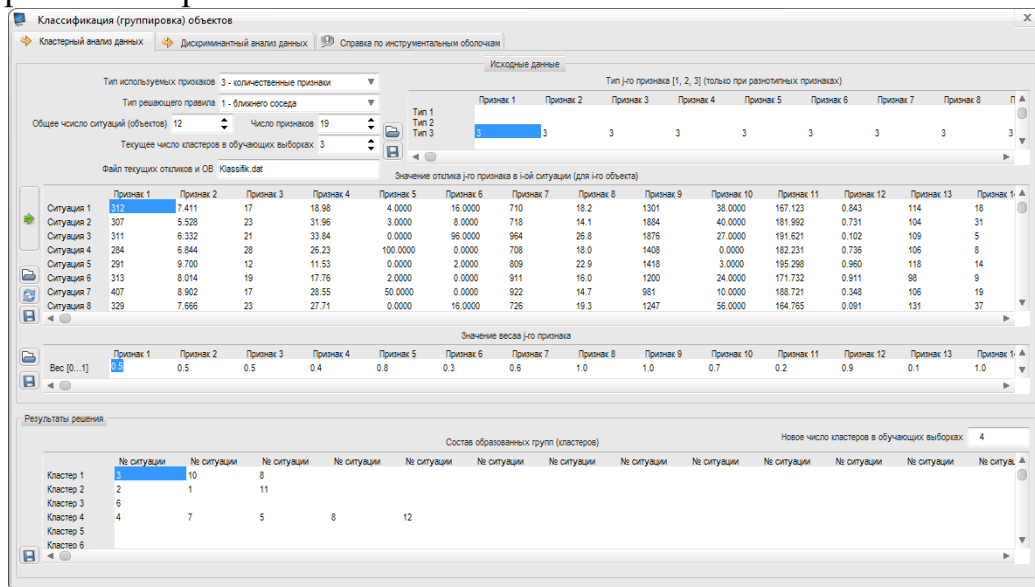


Рис. 4. Тестовый пример работы с модулем Кластерный анализ данных

Результатом работы алгоритмов является массив $\{k_i\}, i = \overline{1, N}$, элементы которого – номера приписанного кластера для каждой i -ой ситуации.

Необходимо отметить, что алгоритмы идентификации и формирования ОВ могут работать не только с текущими, но и с прогнозируемыми откликами признаков. Прогнозирование откликов может быть выполнено различными способами, например, в соответствии с [14]. Модуль прогнозирования также включен в расчетно–информационный ресурс Модельер 2.1.

Рассмотрены особенности проблемы оперативного управления процессами межполетного обслуживания современных воздушных судов. Показано, что в условиях высокого риска принятия ошибочных управленческих решений целесообразно применение для управления классификационного подхода.

Предложены алгоритмы идентификации производственных ситуаций, базирующиеся на аппарате кластерного и дискриминантного анализа. Решения по алгоритмам доведены до прикладного уровня в виде программных модулей, предназначенных для использования на автоматизированных рабочих местах (АРМ) авиадиспетчеров, контролирующих межполетное обслуживание воздушных судов.

Сформированные программные модули в настоящее время используются в образовательном процессе на факультете Эксплуатации летательных аппаратов Иркутского филиала МГТУ ГА. Полученные результаты опытной эксплуатации модулей свидетельствуют, в целом, о рациональности математических, алгоритмических и программных решений.

Однако получены и отдельные негативные результаты, например, неустойчивость числа и состава кластеров при малых объемах ОВ. Кроме того, стала очевидной необходимость использования в составе признаков и обобщенных показателей (критериев), например, эксплуатационной надежности технических и эргатических элементов. Эти факты требуют продолжения исследований в выбранном направлении.

Предполагается, что предлагаемые решения по АРМ авиадиспетчера могли бы стать элементом одной из современных сетевых информационных систем, например, системы CDM (CollaborativeDecisionMaking), рекомендованной IATA с целью сокращения межполетного простоя ВС [16].

Список использованной литературы:

1. Айвазян с.а., мхитарян в.с. прикладная статистика и основы эконометрики. – м.: изд. Юнити, 1998. – 1022 с.
2. Александров в.в., горский н.д. алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. – л.: наука, 1983. – 207 с.

3. Далецкий с.в. формирование эксплуатационно–технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. – м.: воздушный транспорт, 2005. – 416 с.
4. Дорофеев а.а. алгоритмы автоматической классификации // автоматика и телемеханика. 1971. № 12. С. 78–113.
5. Енюков и.с. методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа. – м.: финансы и статистика, 1986. – 230 с.
6. Пупков к.а., егупов н.д. методы робастного, нейро–нечеткого и адаптивного управления. – м.: мгу им. Н.э баумана, 2002. – 744 с.
7. Савенков м.в. автоматизация управления технической эксплуатацией авиационных систем. – м.: транспорт, 1992. – 285 с.
8. Семенов с.с., харчев в.н., иоффин а.и. оценка технического уровня образцов вооружений и военной техники. – м.: радио и связь, 2004. – 551 с.
9. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств–участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2015 г. – м.: международный авиационный комитет (мак), 2016. – 114 с.
10. Чокоей в.з. электронный тренажер speller–tsm по локализации отказов оборудования самолетов airbusa320 // международный информационно–аналитический журнал credeexperto, № 1 (8) 2016.
11. Чокоей в.з., величко и.и. оценка нормативов при траекторном управлении // материалы ххii научно–методической конференции института. – иркутск: иваии (ви), 2006. – с. 133–138.
12. Чокоей в.з., величко и.и. организационное управление в условиях лимита данных // материалы ххii научно–методической конференции института. – иркутск: иваии (ви), 2006. – с. 139–143.
13. Чокоей в.з., кабыкин а.в. адаптивное управление процессом хранения изделий авиационной техники // научные труды иркутского ваии. Выпуск 2. – иркутск: иваиу, 2001. – с. 94–99.
14. Чокоей в.з., чокоей р.в. допустимый период основания прогноза технического состояния объектов авиационной техники // вестник иргту № 1 (48), 2011. Иркутск: изд–во ни иргту, 2011. –с. 128–132.
15. Чокоей в.з., чокоей р.в. надежность эргатических систем предупреждения нештатных ситуаций на объектах промышленности и транспорта // вестник иргту № 9 (56), 2011. Иркутск: изд–во ни иргту, 2011. –с. 124–129.
16. The manual airport cdm implementation, april 2012, e–version /airport cdm adverse conditions, eurocontrol, 359 p.

Экспериментальные исследования воздействия заготовки на технологическую оснастку при одностороннем магнитно-импульсном нагружении

К.Н. Бобин, М.Б. Детинов, Н.В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет, 630073,
г. Новосибирск, ул. пр. К. Маркса, 20

В работе оценивалось воздействие заготовки из алюминиевого сплава на технологическую оснастку из различных материалов при одностороннем магнитно-импульсном нагружении. Экспериментальные исследования показали, что наиболее подходящим материалом для изготовления оснастки является сталь 45. Наиболее оптимальным режимом гибки на стальной оснастке при одностороннем нагружении импульсным магнитным полем является гибка в два импульса с первым формообразующим, а вторым калибрующим.

Ключевые слова: *магнитно-импульсная штамповка, экспериментальные исследования, форм-блок, алюминиевые сплавы*

Не смотря на достаточно большой опыт исследования магнитно-импульсной штамповки (МИШ) деталей, остается ряд нерешенных вопросов реального практического применения технологии на авиационном производстве. Одна из таких проблем, это выбор оптимального технологического оснащения для МИШ профилей из алюминиевых сплавов. Особенностью формообразования профилей летательных аппаратов магнитно-импульсной обработкой (МИО) является несимметричность импульсного нагружения, что предъявляет повышенные требования к выбору материала форм-блоков по сравнению с обычными условиями штамповки. Целью данной работы был выбор подходящего материала для изготовления оснастки в процессах МИШ с односторонним нагружением.

Для проведения экспериментальных исследований по гибке прямых бортов давлением импульсного магнитного поля (ИМП) использовались плоские образцы с размерами 50*50мм. Материалом образцов был сплав АМцМл2,0. Высота штампуемого борта составляла 9мм. Радиусгиба прямого борта выбирался равным 3,2 мм. Для изготовления форм-блоков использовались различные материалы: сухая сосна, сталь 45, балинит марки ДСП-Б и PLA-пластик (марка PLA). Размеры форм-блоков выбиралась заведомо большие размеров образцов с радиусом скругления по линиигиба равной 3,2 мм. Изготовление форм-блоков из сосны, стали и балинита про-

изводилось механической обработкой резанием, а форм-блока из PLA-пластика способом 3D печати на 3D принтере Anycubic Kossel linear plus. Базирование образцов на форм-блоках производилось по шпилечным отверстиям диаметром 2,6 мм.

Штамповка ИМП осуществлялась с использованием плоского индуктора (рис. 1) на магнитно-импульсной установке МИУ-10ВЧ. Спираль индуктора была изготовлена сваркой взрывом из листов меди и стали 30ХГСА.



Рис. 1. Общий вид индуктора для плоской штамповки

Индуктор имел 4 витка, внутренний и наружный диаметры спирали составляли $d=24$ мм и $D=96$ мм соответственно. Присоединение медных токовыводов индуктора проводилось газовой сваркой. Изоляция шин проводилась лентами из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и стеклоткани. Окончательная заливка выполнялась в изолирующий материал Силагерм-6030.

Установка квадратного образца производилась таким образом, чтобы на штампуемый борт по возможности действовало максимальное и равномерно-распределенное по поверхности заготовки давление от индуктора (рис. 2).

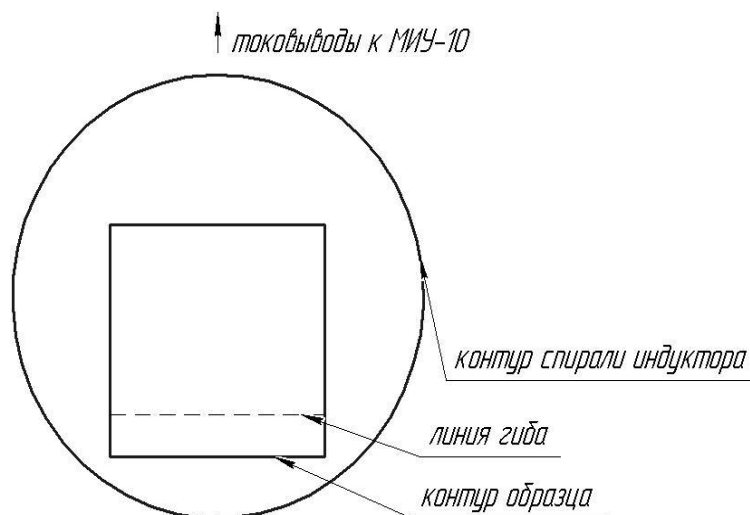


Рис. 2. Схема установки квадратных образцов под круглым индуктором

Расчет энергии импульса для формообразования прямого борта производился по методикам, описанным в работах [1-3], и затем экспериментально уточнялся для каждого форм-блока. Полученное расчетное значение энергии импульса составило около 2,7кДж при напряжении зарядки 7,5 кВ. Расчетная энергия импульса необходимая для калибровки составила 6,6кДж при напряжении зарядки 11,7 кВ.

На рис.3 показан результат формообразования образца на форм-блоке из сухой сосны при режимах $U=9$ кВ и $W=4$ кДж. Предполагалось, что штамповку ИМП возможно производить на форм-блоке из такого материала, но только для весьма ограниченного числа деталей (1-3 детали). Однако эксперимент показал, что такой материал совершенно не подходит в качестве материала для оснастки в процессах штамповки ИМП, так как он имеет малую твердость и прочность. Штампуемый образец просто сминал оснастку вместо деформирования на ней, причем с увеличением энергии импульса смятие форм-блока возрастало практически без уменьшения величины неприлегания образца к форм-блоку.



Рис. 3. Форм-блок из сухой сосны и образец после МИШ

На рис.4 показан результат формообразования образца на форм-блоке из балинита. Деталь с наименьшим прилеганием борта к форм-блоку удалось получить при режимах $U=10,5$ кВ и $W=5,3$ кДж. Разброс неприлегания составлял от 0,5 до 3мм, что связано с неравномерностью воздействия давления ИМП от индуктора. Было отмечено, что с увеличением энергии импульса происходило более сильное выгибание шпилек для крепления образца (рис. 5). При энергии импульса более 6,6 кДж и $U=11,5$ кВ происходил вырыв шпилек. При энергии импульса более 5,3 кДж и $U=10,5$ кВ происходило появление рисок на форм-блоке от удара борта. Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение форм-блоков из балинита для процессов одностороннего нагружения ИМП также не желательно.



Рис. 4. Неприлегание образца на балинитовой оснастке



Рис. 5. Выгиб шпилек и риска от удара образца с оснасткой

На рис. 6 показан результат формообразования образца на форм-блоке из стали 45. Деталь с наименьшим неприлеганием борта к форм-блоку удалось получить при режимах $U=9$ кВ и $W=3,9$ кДж. Разброс неприлегания составлял от 0,4 до 0,6 мм. При энергии импульса более 5,3 кДж и $U=10,5$ кВ происходил отрыв борта образца (рис. 7). Наиболее качественную деталь удалось получить при формообразовании в два импульса с параметрами 0,972кДж, $U=4,5$ кВ и 5,3кДж, $U=10,5$ кВ. Первый импульс был формообразующий на уголгиба примерно 15° , а второй калибрующий. Разброс неприлегания составлял от 0,3 до 0,4 мм, что соответствует параметрам геометрии готовых авиационных деталей. В ряде случаев при напряжении зарядки первого импульса более 7,5кВ наблюдались следы прижега образца к оснастке.



Рис. 6. Неприлегание образца на стальной оснастке



Рис. 7. Отрыв края образца

На рис. 8 показан результат формообразования образца на форм-блоке из PLA-пластика. Деталь с наименьшим прилеганием борта к форм-блоку удалось получить при режимах $U=8,5$ кВ и $W=3,5$ кДж. Разброс не-прилегания составлял от 0,5 до 4мм, что также связано с неравномерностью воздействия давления ИМП от индуктора. Было отмечено, что как и в случае с форм-блоком из балинита с увеличением энергии импульса происходило более сильное выгибание шпильки для крепления образца. При энергии импульса более 6,6 кДж и $U=10$ кВ происходило растрескивание форм-блока по шпилькам и дальнейшее использование форм-блока приводило к его разрушению. Кроме того при энергии импульса более 3,9 кДж и $U=9$ кВ нагретый в процессе МИШ образец приплавлялся к форм-блоку. Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение форм-блоков из обычного PLA-пластика для процессов одностороннего нагружения ИМП также не желательно. Очевидно, что для возможности применения PLA-пластика необходимо во-первых применять пластик с более высокими рабочими температурами, а во-вторых более прочный.



Рис. 8. Форм-блок из PLA-пластика и образец после МИШ



Рис. 9. Разрушение форм-блока после МИШ

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования одностороннего нагружения импульсным магнитным полем форм-блоков из различных материалов показали:

1 Наиболее оптимальным материалом для применения в форм-блоках при одностороннем нагружении импульсным магнитным является сталь;

2 Наиболее оптимальным режимом гибки на стальной оснастке при одностороннем нагружении импульсным магнитным является гибка в два импульса с первым формообразующим, а вторым калибрующим;

3 Необходимы дальнейшие исследования по оценке возможности применения PLA-пластика в качестве материала оснастки для магнитно-импульсной штамповки.

Список использованной литературы:

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.

2. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. - М.: Информтехника, 1992. – 143 с.

3. Глущенков В.А. Основные направления развития магнитно-импульсной обработки // КШП. - 1990. - № 7. - С. 11-13.

4. Галкин В.П. Анализ опыта освоения новейших импульсных электрофизических технологий в ссср (на примере магнитно-импульсной обработки металлов и материалов) / В.П. Галкин, Ю.А. Попов // Труды 3-й Международной научно-технической конференции. В 2 томах. Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования. МЕТАЛЛДЕФОРМ – 2009. Самара, 03-05 июня 2009 г.- Самара: СГАУ, 2009.- С. 62-67.

5. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности / М.И. Баранов // Электротехника и электромеханика. - 2009. - № 1. - С. 42-51.

6. Батыгин Ю.В. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт (Харьков). - 2006. - № 18. - С. 83-87.
7. Evandro Paese, Martin Geier, Roberto P. Homrich, Pedro Rosa, Rodrigo Rossi, Sheet metal electromagnetic forming using a flat spiral coil: Experiments, modeling, and validation, Journal of Materials Processing Technology, Volume 263, 2019, Pages 408-422.
8. Steven Woodward, Christian Weddeling, Glenn Daehn, Verena Psyk, Bill Carson, A. Erman Tekkaya, Production of low-volume aviation components using disposable electromagnetic actuators, Journal of Materials Processing Technology, Volume 211, Issue 5, 2011, Pages 886-895
9. Проскуряков Н.Е. Расчет энергоэффективности процессов электромагнитной штамповки плоских заготовок / Н.Е. Проскуряков, А.В. Володин, Д.З. Лай // В сборнике трудов VII Международной научно-практической конференции инновации в машиностроении (ИнМаш-2015). – Кемерово: КГТУ, 2015. - С. 465-469.
10. Лебедев Г.М. Инерционная посадка гофр при магнитно-импульсной гибке-формовке листовых деталей летательных аппаратов / Г.М. Лебедев, А.Д. Комаров, Г.З. Исарович, Д.Н. Лысенко // КШП. - 1970.- № 4. – С. 25-28.
11. Володин А.В. Основы расчета оборудования и операций плоской электромагнитной штамповки / А.В. Володин, Н.Е. Проскуряков, Н.Н. Архангельская // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2017. - № 11-1. - С. 286-291.
12. Астапов В.Ю. Изготовление листовых окантовок люков летательных аппаратов магнитно-импульсным способом и моделирование с использованием САПР // В.Ю. Астапов, Л.Л. Хорошко, М.С. Джоздани, А.Л. Хорошко // Труды МАИ. - 2017. - № 95. - С. 26.
1. 13 Fei Feng, Jianjun Li, Liang Huang, Xianlong Liu, Huizhuan Ma, Guodong Li, The research of electromagnetic incremental forming process of Aluminum alloy sheet and the interaction between the die and the sheet, Procedia Engineering, Volume 207, 2017, Pages 329-334
13. Белоусов В.С. Физические основы лазерной и магнитно-импульсной обработки. Уч. пособие. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 63 с.
14. Карпухин В.Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2012. - № 5(36). - С. 228-232.
15. Юдаев В.Б. Применение импульсных магнитных полей для формообразования деталей летательных аппаратов. Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. – М.: МАИ, 1995. – 168 с.

***Особенности структуры и формирования математической модели
аэродинамики экраноплана на этапе проектирования***

Е.А. Галушко, С.М. Кривель

Иркутский государственный университет, 664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1.

В работе производится описание математической модели аэродинамики экраноплана, предназначенной для решения задач его аэродинамического проектирования. Модель позволяет учитывать различные кинематические и управляющие параметры полета. Математическая модель представляет собой комплекс объединенных на принципах системного анализа моделей различного уровня описания аэродинамики экраноплана и учета факторов, определяющих его аэродинамические характеристики. Модель аэродинамики позволяет получать аэродинамические характеристики в широком спектре параметров полета.

Ключевые слова: проектирование экраноплана, математическая модель аэродинамики экраноплана, экраноплан, экранолет, WIG

В последнее время значительно возрос интерес к экранопланной тематике, о чем свидетельствуют различные исследования в области аэродинамики и устойчивости экранопланов [1...7]. Следует также отметить разработку новых перспективных экранопланов в различных странах мира [8... 12].

Проектирование экранопланов, как и любых других летательных аппаратов, весьма сложный и продолжительный процесс, поэтому особую актуальность приобретает его упрощение и оптимизация без потери качества получаемого результата проектирования.

Оптимизация аэродинамической компоновки и формирование внешнего облика экраноплана происходит поэтапно. Всему этому предшествуют различные физические или вычислительные эксперименты, а также опыт, полученный в реализации предыдущих технических решений. Особое место в процессе проектирования экраноплана занимает его математическая модель аэродинамики, представляющая собой систему уравнений (математических выражений), алгоритмы которых позволяют определять аэродинамические коэффициенты в зависимости от различных кинематических и управляющих параметров полета. Одной из главных особенностей математической модели является возможность планирования процесса исследования, проводимого в рамках проектирования будущего летательного аппарата.

Математическая модель аэродинамики экраноплана имеет свои специфические особенности, одной из которых является то, что экраноплан – это объект изученный в недостаточной степени по сравнению с самолетами или морскими судами, поэтому поиск оптимальной компоновки экраноплана включает в себя потребность в исследовании большего количества технических предложений (вариантов компоновок экранопланов).

Еще одной отличительной особенностью математической модели аэродинамики экраноплана является ее многофакторность. Наличие значительно большего числа факторов, определяющих аэродинамические характеристики экраноплана (по отношению к характеристикам самолета) усложняет и увеличивается объем потребных исследований при его проектировании. Поэтому необходимо создание такой математической модели аэродинамики экраноплана, методика построения которой бы минимизировала количество вычислительных или физических экспериментов, но в то же время позволяла получать достаточно точные и достоверные результаты.

Сложность задачи диктует необходимость подойти к формированию математической модели аэродинамики строго системно, и в соответствии с каждой задачей проектирования формировать свою отдельную математическую модель. Поэтому целью данной работы является формирование математической модели аэродинамики экраноплана на основе системного подхода, обеспечивающей решение основных задач при его проектировании.

Создание нового экраноплана, сопровождается выработкой определяющих требований, обеспечивающих его эксплуатационные преимущества. Основным требованием является аэродинамическое качество экраноплана, так как оно определяет его транспортную эффективность. Реализация больших значений качества позволяет экраноплану лететь дальше, брать больше полезной нагрузки, а также расходовать меньше топлива. Однако экраноплану при этом необходимо быть достаточно устойчивым и управляемым, чтобы он мог успешно и безопасно передвигаться вблизи экрана. К тому же экраноплан должен обладать приемлемыми характеристиками маневренности в условиях извилистых рек или множественности препятствий на пути его следования.

В данной работе на основе выше перечисленных требований сформулированы задачи аэродинамического проектирования и для каждой задачи сформулированы отдельные, унифицированные математические модели различного уровня описания аэродинамики экраноплана с учетом факторов, объединенные на принципах системного анализа, который предполагает поэтапную структуру построения математических моделей. На каждом этапе ставится задача, задается режим полета и формируется математическая модель.

В качестве объекта исследования использована компоновка экраноплана схемы “Тандем”. Параметры и особенности аэродинамики данной

компоновки рассмотрены в работах [13...15]. Исходными данными для формирования математической модели аэродинамики являются результаты вычислительного эксперимента с использованием ANSYS.

На первом этапе проектирования ставится задача определения и оценки аэродинамического качества предлагаемой компоновки экраноплана, так как этот параметр является важнейшей характеристикой, определяющей дальнейшую целесообразность исследований. На данном этапе рассматривается горизонтальный прямолинейный полет экраноплана с постоянной скоростью. Математическая модель аэродинамики выглядит следующим образом:

$$c_{x_a} = f(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) \quad c_{y_a} = f(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) \quad m_z = f(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c)$$

Для описания аэродинамики в математическую модель включены следующие определяющие параметры: угол атаки α , относительное отстояние от экрана \bar{h} , относительная координата центра тяжести \bar{x}_T и относительная скорость струи при поддуве \bar{V}_c . Особенностью данных параметров является их определяющее влияние на аэродинамические коэффициенты экраноплана.

Как известно, вращение летательного аппарата в полете осуществляется относительно центра тяжести. В случае расчета аэродинамических коэффициентов для некоторого диапазона положения центров тяжести предлагается следующая методика (Рис. 1):

1) Определяются аэродинамические коэффициенты экраноплана относительно точки О, при чем, отстояние от экрана до точки О задается как \bar{h}_0 и является минимально допустимым отстоянием, ниже которого полет экраноплана не возможен;

2) Для данного положения центра тяжести (точка О) рассчитывается относительная координата центра давления по следующей формуле:

$$\bar{x}_D = \left(\frac{m_z}{c_{y_a} \sin \alpha + c_{x_a} \cos \alpha} \right); \quad (2)$$

3) Выбирается другой центр тяжести, для которого необходимо найти аэродинамические коэффициенты, а также определяется его относительного отстояния (задается как \bar{h});

4) Поскольку значение \bar{h}_0 остается неизменным, то необходимо определить только значение коэффициента продольного момента для нового центра тяжести по следующей формуле:

$$m_z = -(\bar{x}_T - \bar{x}_D) (c_{y_a} \sin \alpha + c_{x_a} \cos \alpha). \quad (3)$$

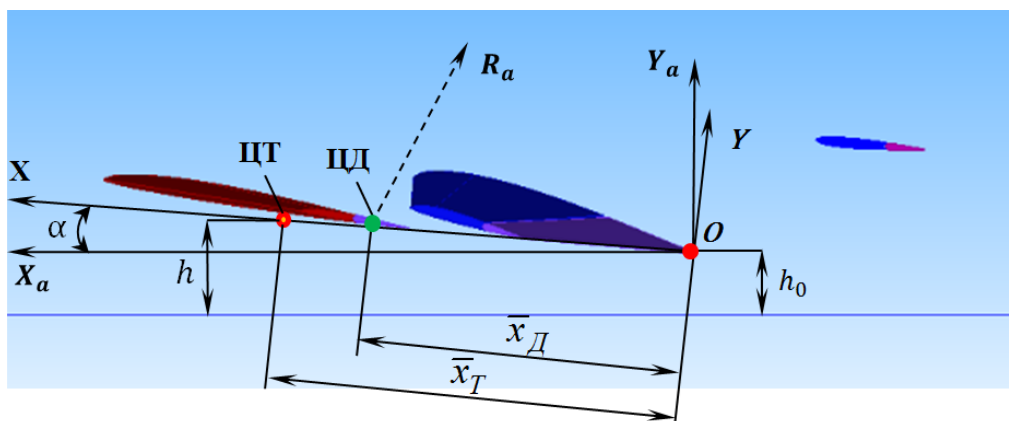


Рис. 1. Методика расчета аэродинамических характеристик

Отличием второго этапа является отклонение управляющих поверхностей экраноплана, так как задача состоит в оценке устойчивости, управляемости и обеспечения балансировки аппарата. Режим полета – сбалансированный (управляемый) горизонтальный прямолинейный полет экраноплана с постоянной скоростью. С учетом первого этапа математическая модель усложняется добавлением приращений коэффициентов $\Delta c_{x_a}, \Delta c_{y_a}, \Delta m_z$ от углов отклонения управляющих поверхностей $\delta_1, \delta_2, \delta_3$:

$$\begin{aligned}
 c_{x_a} &= c_{x_a}(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta c_{x_{a1}}(\bar{h}, \delta_1, \bar{V}_c) + \Delta c_{x_{a2}}(\bar{h}, \delta_2, \bar{V}_c) + \Delta c_{x_{a3}}(\bar{h}, \delta_3, \bar{V}_c); \\
 c_{y_a} &= c_{y_a}(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta c_{y_{a1}}(\bar{h}, \delta_1, \bar{V}_c) + \Delta c_{y_{a2}}(\bar{h}, \delta_2, \bar{V}_c) + \Delta c_{y_{a3}}(\bar{h}, \delta_3, \bar{V}_c); \\
 m_z &= m_z(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_{z1}(\bar{h}, \delta_1, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_{z2}(\bar{h}, \delta_2, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \\
 &+ \Delta m_{z3}(\bar{h}, \delta_3, \bar{x}_T, \bar{V}_c).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Особенностью этих приращений является то, что они не зависят от угла атаки α и положения центра тяжести \bar{x}_T по причине их слабого влияния. Однако центр тяжести учитывается в определении приращения коэффициента Δm_z .

На третьем этапе режимом полета является установившийся (правильный) разворот экраноплана, а также ставится задача оценки маневренных характеристик экраноплана. В математической модели добавляется новый параметр – угол крена γ . Его учет ведется в первом слагаемом для коэффициентов $c_{x_a}, c_{y_a}, c_{z_a}$, но не в их приращениях от рулей в силу слабого влияния. Для коэффициентов моментов угол крена учитывается в первом слагаемом для определения m_x , а также приращения этого коэффициента от угла отклонения элеронов, так как при помощи элеронов обычно и создается крен. В определении коэффициента m_y также включен угол поворота руля направления δ_n .

$$\begin{aligned}
c_{x_a, y_a, z_a} &= c_{x_a, y_a, z_a}(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c, \gamma) + \Delta c_{x_a, y_a, z_a}(\bar{h}, \delta_1, \bar{V}_c) + \Delta c_{x_a, y_a, z_a}(\bar{h}, \delta_2, \bar{V}_c) + \\
&+ \Delta c_{x_a, y_a, z_a}(\bar{h}, \delta_3, \bar{V}_c); \\
m_x &= m_x(\alpha, \bar{h}, \bar{V}_c, \gamma) + \Delta m_x(\bar{h}, \delta_1, \bar{V}_c) + \Delta m_x(\bar{h}, \delta_2, \bar{V}_c) + \Delta m_x(\bar{h}, \delta_3, \bar{V}_c) + \\
&+ \Delta m_x(\bar{h}, \delta_3, \bar{V}_c, \gamma); \\
m_y &= m_y(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_y(\bar{h}, \delta_1, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_y(\bar{h}, \delta_2, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \\
&+ \Delta m_y(\bar{h}, \delta_3, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_z(\bar{h}, \delta_3, \bar{x}_T, \bar{V}_c); \\
m_z &= m_z(\alpha, \bar{h}, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_z(\bar{h}, \delta_1, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \Delta m_z(\bar{h}, \delta_2, \bar{x}_T, \bar{V}_c) + \\
&+ \Delta m_z(\bar{h}, \delta_3, \bar{x}_T, \bar{V}_c).
\end{aligned}$$

5

В качестве примера на рисунках 2 – 4 приведены некоторые результаты вычислительного эксперимента, выполненные по алгоритмам трех математических моделей аэродинамики проектируемого экраноплана (компоновки схемы “Тандем”).

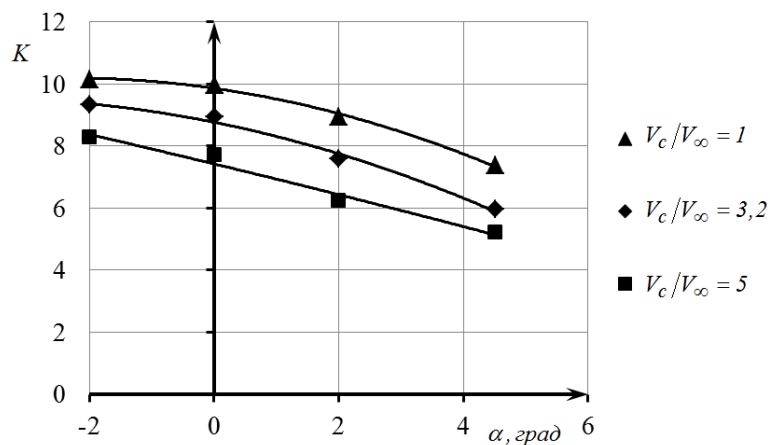
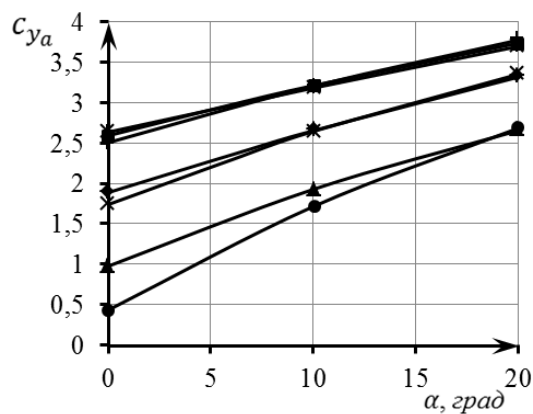


Рис. 2. Зависимость аэродинамического качества K от угла атаки экраноплана для различных скоростей выдува струи при относительном отстоянии от экрана $\bar{h} = 0,2$



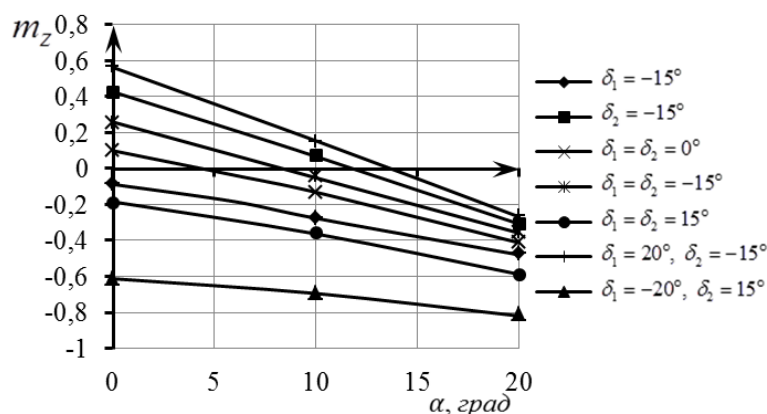


Рис. 3. Аэродинамические характеристики экраноплана при различных углах отклонения управляющих поверхностей

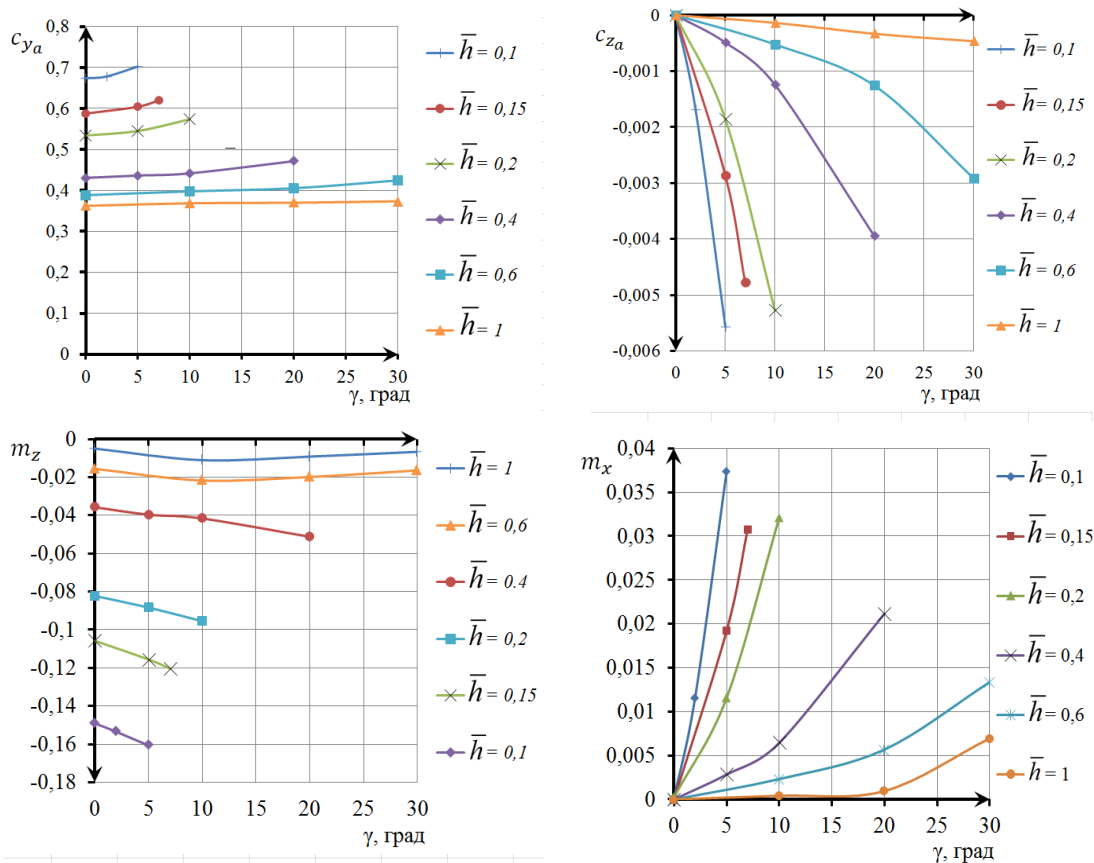


Рис. 4. Аэродинамические характеристики экраноплана при установленном развороте с креном

Данные результаты позволяют произвести оценку несущих свойств экраноплана, а также его балансировочные и маневренные характеристики. Методика построения математической модели позволяет эффективно решать задачи аэродинамического проектирования еще на этапе поиска и оптимизации аэродинамической компоновки экраноплана. Преимуществом данной математической модели является ее высокая достоверность, так как

она позволяет учитывать существенные факторы и параметры экранного полета, а также нелинейность изменения аэродинамических характеристик.

Список использованной литературы:

1. Wang H. Computational aerodynamics and flight stability of wing-in-ground (WIG) craft / H. Wang, C. J. Teo, B. C. Khoo, C. J. Goh // 7 th Asian-Pacific conference on aerospace technology and science. – 2013. – pp. 15 – 24.
2. Musaj M. Numerical and experimental investigation of the aerodynamics of an unconventional w-leading edge reversed delta wing in ground effect / M. Musaj, S. A. Prince // 26 th international congress of the aeronautical sciences. – 2008. – pp. 1 – 10.
3. Lee J. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect / J. Lee // Ocean engineering. – 2018. – No 168. – pp. 12–22.
4. Ground viscous effect on 3d flow structure of a compound wing-in-ground effect / S. Jamei, A. Maimun, N. Azwadi, and other // International journal of automotive and mechanical engineering (IJAME) . – 2012. –Vol. 9. – pp. 1550 – 1563.
5. Numerical study on aerodynamics and flow physics of a flapping wing hovering in ground effect / Q. Qu, L. Xu, P. Liu, and Y. Zheng // AIAA SciTech forum. – 2019. – San Diego / California.
6. Yang W. Complex flow for wing-in-ground effect craft with power augmented ram engine in cruise / W. Yang, Z. Yang // Chinese journal of aeronautics. – 2010. – No. 23. – pp. 1–8.
7. Lao C. T. CFD simulation of a wing-in-ground effect UAV / C. T. Lao, E. T. T. Wong // International conference on aerospace and mechanical engineering. – 2018. –Vol. 370. – pp. 1 – 8.
8. Park H. Study on design and test of composite WIG vehicle considering on impact loading / H. Park // MATEC web of conferences. – 2017. –Vol. 139. – Article ID: 00022.
9. Кальясов П.С. Математическое моделирование аэрогидродинамики амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на режиме хода на воздушной подушке / П.С. Кальясов, А.В. Февральских, В.В. Шабаров // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – № 76 (3). – С. 263 – 268.
10. Ahn Byoung-Kwon. Unmanned WIG (U-WIG) craft design and performance test / Byoung-Kwon Ahn, J. Jang, Kwan-Hyung Song // Journal of the society of naval architects of Korea. – 2008. –Vol. 45. – No. 4. – pp. 396 – 402.
11. Jeong Han-Koo. On the structural test of 1.5 – ton test WIG craft / Han-Koo Jeong, Jae-Do Han, Kuk-Jin Kang // Ocean engineering. – 2010. –Vol. 37. – pp. 1393 – 1401.

12. Zheng H. Pneumatic numerical simulation and flow field display of wing craft / H. Zheng, Z. Zhang // International journal of fluid dynamics. – 2018. – Vol. 6. – No 4. – pp. 69 – 77. – URL: <http://www.hanspub.org/journal/ijfd>.

13. Выбор параметров аэродинамических управляющих поверхностей компоновки экраноплана с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России. Сборник трудов IV научно–практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов. 3–5 декабря 2013 г. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2013. – 272 с.

14. Вшивков Ю.Ф. Несущая система экраноплана схемы "тандем" и ее аэродинамические характеристики. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 191-206.

15. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Концепция и результаты аэродинамического проектирования экраноплана с широким диапазоном эксплуатационных углов атаки // Международный информационно-аналитический журнал «CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык», март 2015 г., выпуск №1. (<http://ce.if-mstuca.ru>) [электронный ресурс].

УДК 629.7.016, 533.682

Комплексная методика оценки продольной статической устойчивости экраноплана в эксплуатационной области углов атаки и отстояний

Ю.Ф. Вшивков, С.М. Кривель

Иркутский государственный университет. Институт математики, экономики и информатики, 664003, г. Иркутск, ул. Гагарина бульвар, 20.

В работе предлагается синтез методик по оценке продольной статической устойчивости и управляемости экраноплана на этапе проектирования. Основным требованием к предлагаемой методике является надежность оценки устойчивости экраноплана. Выполнен анализ общепринятых подходов по оценке продольной устойчивости экраноплана с представлением основных проблем их практического использования для ряда компоновок. Предложенная методика позволяет оценить продольную статическую устойчивость экраноплана и определить эксплуатационный диапазон центровок на основе использования нелинейных аэродинамических характеристик и понятия центра давления. Методика реализована в виде программного комплекса в программе Matlab.

Ключевые слова: экраноплан, экранолет, вычислительная аэродинамика, устойчивость экраноплана, пилотажные характеристики экраноплана.

Обеспечение устойчивости экраноплана является исключительно ответственной и сложной задачей проектирования. Существующие методы оценки продольной устойчивости экраноплана являются достаточно сложными и часто приводят к противоречивым результатам. К тому же опыт проведения испытаний целого ряда экранопланов показал, что существующие подходы не позволяют решить задачу обеспечения продольной устойчивости в полной мере [1]. В связи с чем, целью работы является синтез методов и методик оценки продольной устойчивости и управляемости экраноплана на этапе проектирования

В настоящее время теоретические основы методов оценки продольной устойчивости экраноплана достаточно подробно проработаны рядом авторов [2...6]. Все эти методы объединяет несколько общих подходов. Они основаны на использовании производных аэродинамических коэффициентов, тем самым предполагается их определенная линейность, эти критерии достаточно громоздки и в простом понимании эти критерии сводятся к понятию фокуса по углу атаки \bar{x}_{FA} и отстоянию \bar{x}_{FH} . Хотя даже в этом аспекте, согласно работы [2] условием аperiодической устойчивости является:

$$\bar{x}_{FH} - \bar{x}_{FA} < 0,$$

где \bar{x}_{FH} – относительная координата фокуса по отстоянию от экрана,

\bar{x}_{FA} – относительная координата фокуса по углу атаки. То есть экраноплан будет устойчив, если центр масс расположен впереди фокуса по отстоянию \bar{x}_{FH} и фокус по отстоянию \bar{x}_{FH} будет впереди фокуса по углу атаки \bar{x}_{FA} .

Однако, в работе [5] на основе экспериментальных исследования автор приводит следующее условие устойчивости:

$$\bar{x}_{FH} > \bar{x}_{ЦМ} > \bar{x}_{FA}, \bar{x}_{ЦМ} \square \bar{x}_{FH},$$

согласно которому, для обеспечения статической устойчивости экраноплана его центр масс должен быть расположен между фокусом по отстоянию и фокусом по углу атаки и быть ближе к фокусу по отстоянию или совпадать с ним.

Опыт практических исследований статической устойчивости экраноплана схемы «тандем» показал, что применение положений, рассмотренных выше, к решению конкретных задач проектирования экраноплана не достаточно эффективно. В работе [7] выполнены методические исследования, которые показали, что анализ статической устойчивости экраноплана на основе положения фокусов имеет достаточно условную практическую значимость. Результаты исследований данной компоновки показывают,

что характер поведения фокуса по отстоянию имеет вид, представленный на рисунке 1.

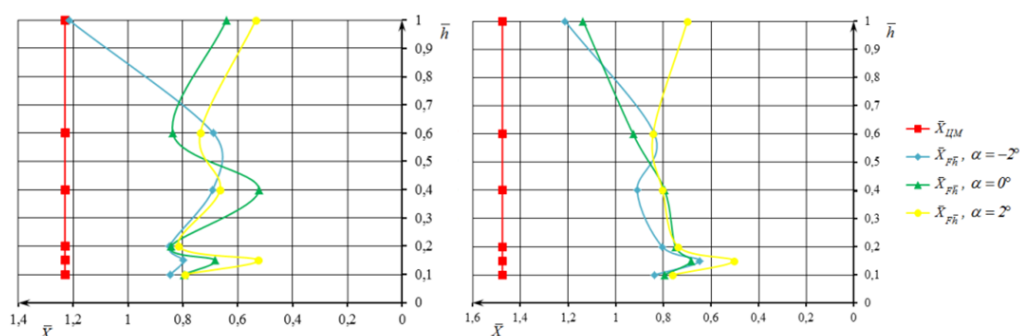


Рис. 1. Положения фокуса по отстоянию \bar{x}_{FH} от остояния \bar{h} для различных углов атаки

Фокус по отстоянию меняет свое положение относительно центра масс по мере изменения отстояния от экрана, а также в значительной степени зависит от крейсерского угла атаки. Поэтому его использование для оценки устойчивости теряет свою значимость. В работах [8...13] выполнялись исследования статической устойчивости экраноплана различных аэродинамических компоновок, расчет положений фокусов показал аналогичный результат.

Предлагаемая методика оценки статической продольной устойчивости экраноплана базируется на использовании нескольких подходов, один из которых основан на использовании понятия центра давления.

Методика оценки продольной статической устойчивости экраноплана включает в себя четыре метода:

- Классический метод, который нашел отражение в работе [2].
- Метод, основанный на анализе положения центра давления и центра масс.
- Исследование балансировочных характеристик экраноплана на основе виртуальной системы автоматического управления.
- Оценка динамической устойчивости экраноплана на основе имитационной модели динамики.

Подход на основе анализа положения центра давления и центра масс состоит в том, что центр давления во всей эксплуатационной области центров масс, углов атаки и отстояний должен быть расположен за центром масс. Результатом расчета является графическая зависимость аналогичная представленной на рисунке 2. В дальнейшем производится оценка предельно задней центровки экраноплана путем задания минимального значения $\Delta x_{\min} = (\bar{x}_{CM} - \bar{x}_{ЦД})$. Данное значение, по сути, является запасом устойчивости экраноплана, выход за которое недопустим.

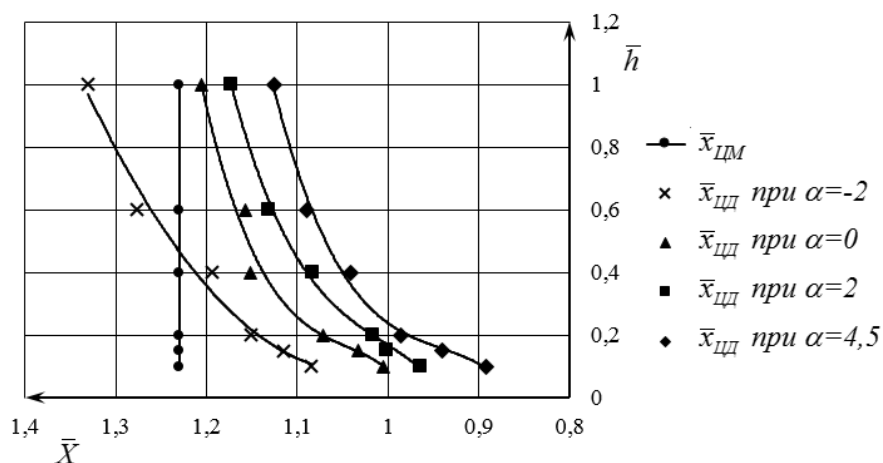


Рис. 2. Координаты центра давления по отстоянию \bar{h} для различных углов атаки

Одним из достоинств такого подхода является его применимость для оценки устойчивости в том случае, если производная коэффициента подъемной силы по отстоянию положительная величина $c_{y\alpha}^{\bar{h}} > 0$ (рис. 3). В данных задачах само понятие фокуса становится в некоторых режимах не определенным. Хотя летательный аппарат даже с большими углами установки крыла в принципе может в каких-то условиях полета выйти на эти режимы.

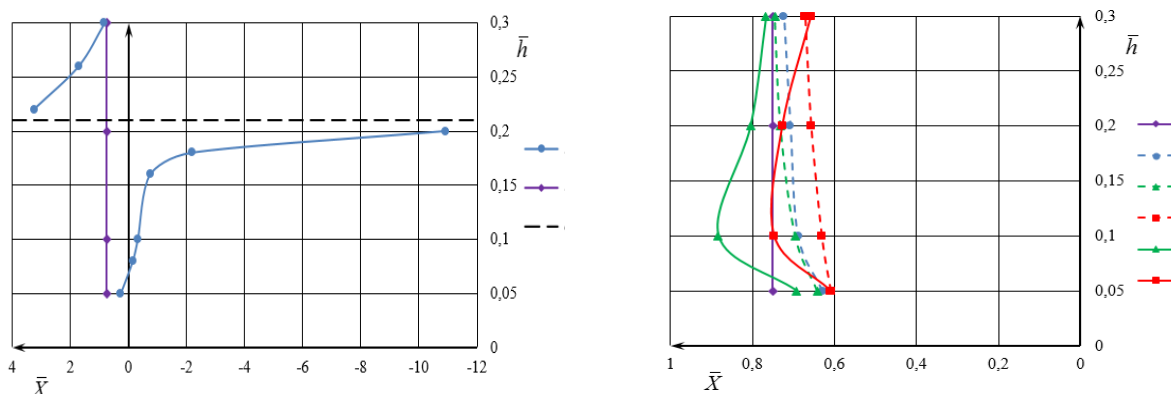


Рис. 3. Зависимость положения фокуса по отстоянию \bar{x}_{FH} от отстояния \bar{h} для различных углов атаки для крыла Glenn Martine 21

Следующий подход – оценка устойчивости по балансирующим характеристикам. Анализ балансирующих характеристик позволяет оценить предельно переднюю центровку экраноплана, качественно оценить продольную статическую устойчивость экраноплана по характеру его реакции на управляющее воздействие. Единая математическая модель, где решается система уравнений прямолинейного горизонтального полета представлена на рисунке 4.

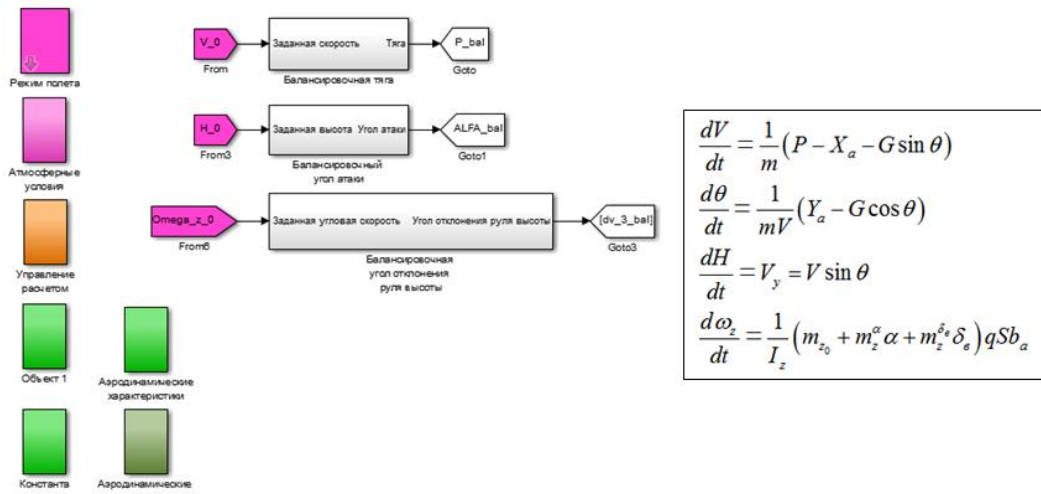


Рис. 4. Simulink-модель балансировки экраноплана

Фактически рассматривается процесс уравнивания экраноплана виртуальной системой автоматического управления на основе ПИД-регулятора. Принцип работы рассмотрим на примере первого уравнения системы и рисунка 5.

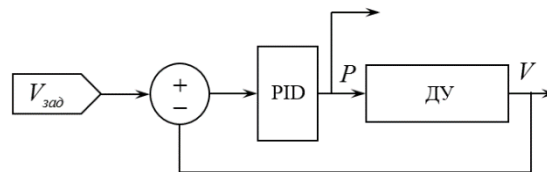


Рис. 5. Структурная схема подсистемы управления скоростью

Данное уравнение позволяет определить требуемую тягу для горизонтального прямолинейного полета. Исходя из заданной скорости $V_{зад}$ полета, ПИД-регулятор обеспечивает переходный процесс скорости V к заданной скорости $V_{зад}$, а та тяга, при которой будет выполнено данное условие, и когда произойдет уравнивание по всем четырем уравнениям, собственно и будет искомой.

Оценка устойчивости по балансировочным кривым основывается на том, что сам факт, что параметр устанавливается с помощью ПИД-регулятора в соответствии с заданным параметром позволяет нам с определенной степенью допуска судить, что система устойчива. Также в рамках данной модели мы можем оценить реакцию аппарата на различные возмущения, и можем утверждать, что если аппарат уравнивается с помощью ПИД-регулятора после получения возмущений, то это тоже позволяет судить о его устойчивости.

Кроме этого с помощью кривых Жуковского мы можем оценить реакцию экраноплана на управляющее воздействие в соответствии с той или иной стратегией управления (рис 6). И в принципе, если летательный аппарат реагирует на однократное управляющее воздействие выходом на новый устойчивый режим без переключений управляющего воздействия, то это

также свидетельствует по устойчивости по параметру (например, по скорости).

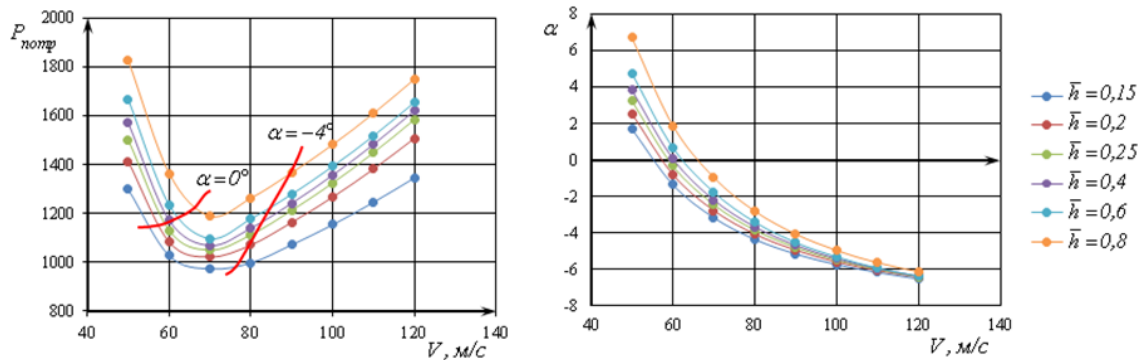


Рис. 6. Оценка устойчивости по кривым Н.Е. Жуковского

Следующий подход оценка устойчивости на основе имитационной модели. Под имитационной моделью понимается программный комплекс позволяющий рассчитать переходные процессы, которые описывают реакцию экраноплана на какие-то возмущения или управляющие воздействия в динамике. С целью сокращения времени расчетов и повышения точности расчетов был разработан модифицированный метод прогноза и коррекции [14] и реализован в программе Matlab-Simulink в виде программы, окно которой представлено на рисунке 7. Разработанная модель предназначена для расчета параметров собственного и вынужденного движения летательного аппарата (экраноплана), определения характеристик динамической устойчивости и управляемости летательного аппарата.

При этом экраноплан считается динамически устойчивым по группе параметров (виду движения) если при поступлении единичного входного управляющего сигнала экраноплан самостоятельно выходит на новый режим полета. Режим полета определяется набором стандартных (общепринятых в летной практике) параметров.

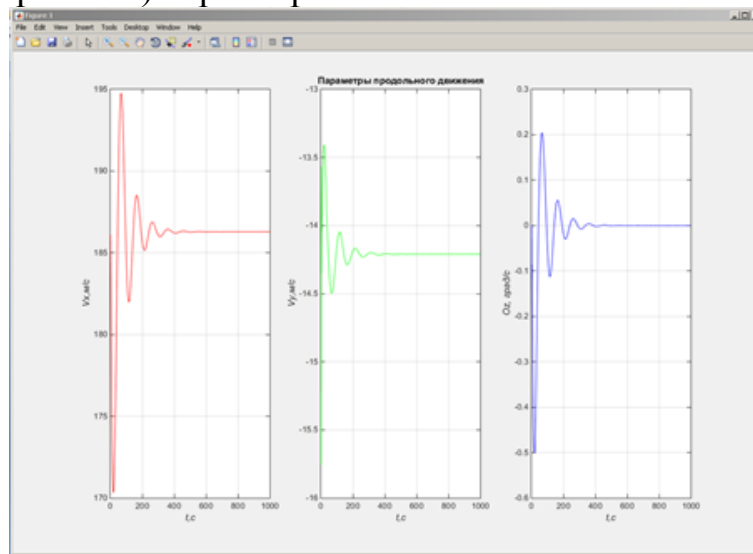


Рис. 7. Результаты расчета

Представленный метод оценки статической устойчивости экраноплана, основанный на нескольких подходах, позволяет повысить надежность оценки устойчивости экраноплана на этапе предварительного проектирования.

Список использованной литературы:

1. <https://www.youtube.com/watch?v=CuEsR8DFjHI> (дата обращения 16 апреля 2019).
2. Иродов Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана. // Ученые записки ЦАГИ. – 1970. Т.1. №4.
3. Жуков В.И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана // В.И. Жуков. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1997. – 80с.
4. Rozhdestvensky K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect. Heidelberg: Springer, 2000. p. 352.
5. Kornev N, Matveev K. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles. AIAA, 2003-600, 2003, 41 st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan., 2003, Reno, Nevada.
6. Панченков А.Н., Драчев П.Т., Любимов В.И. Экспертиза экранопланов. Н.Новгород: Типография «Поволжье», 2006. 656 с.
7. Вшивков Ю.Ф., Кривель С.М. Методика и программный комплекс исследования продольной статической устойчивости экраноплана на этапе проектирования // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. №4. С. 841–850.
8. H. Wang. Computational aerodynamics and flight stability of wing-in-ground (WIG) craft / H. Wang, C.J. Teo, B.C. Khoo, C.J. Goh. 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 7th APCATS 2013. Procedia Engineering 67, 2013, pp. 15–24.
9. H. Wang. Aerodynamic and stability characteristics of NACA4412 in ground effects / Wang Hao, C.J. Teo, B.C. Khoo, C.J. Goh. // International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2013, Vol. 1, Iss 2, pp. 145 – 153.
10. Shin, S.Y. Evaluation of longitudinal stability characteristics based on Irodov's criteria for wing-in-ground effect / Shin, S.Y., Whang, K.H., Kim, K.S., Kwon, J.H. // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2010, Vol. 53, No.182, pp. 237–242.
11. Kyoungwoo Park, Juhee Lee. Influence of endplate on aerodynamic characteristics of low-aspect-ratio wing in ground effect / Journal of Mechanical and Technology, 2008, Vol. 22, pp. 2578–2589.
12. Juhee Lee. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect // Ocean Engineering, 2018, Vol. 168, pp. 12–22.
13. M. Mobassher Tofa. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft / M. Mobassher Tofa, Adi Maimun, Yasser M. Ahmed,

Saeed Jamei, Agoes Priyanto, Rahimuddin // The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 489308, p. 7.

14. Вшивков Ю.Ф., Кривель С.М. Метод решения задачи исследования параметров динамики движения экраноплана вблизи подстилающей поверхности. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Математика». 2015. Том 14.

УДК 629.7.05

Разделение параллельных маршрутов зональной навигации

В.А. Борсоев¹, С.С. Демин¹, А.В. Прохоров¹, В.Б. Спрысков¹, А.А. Тараканов¹, И.Н. Шестаков²

1) ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, 125438, Москва, ул. Михалковская, 67, корпус 1;

2) Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, дом 38;

Рассматривается пара параллельных маршрутов зональной навигации с заданными навигационными спецификациями RNAV X, воздушное движение по которым осуществляется на одном эшелоне в одном или в противоположном направлениях. Управление воздушным движением на этих маршрутах может быть организовано как с использованием информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения (ОВД), так и процедурно. Ставится задача обосновать безопасное разделение параллельных маршрутов для разных интенсивностей потоков воздушных судов (ВС), направлений полётов ВС, протяженностей полётов на параллельных участках, при наличии или отсутствии наблюдения ОВД.

Ключевые слова: *параллельные маршруты зональной навигации, риск катастрофы, безопасность полётов.*

Задача безопасного разделения параллельных маршрутов ОВД для океанических полётов процедурно была решена много лет назад [1,2]. Уравнение риска катастроф ВС представляло собой удачное сочетание точной математической формулы вероятности попадания многомерного случайного процесса трехмерного относительного расстояния в замкнутый объём столкновения и статически оцененной частоты реализации точной формулы на один лётный час в системе маршрутов.

За многолетнюю историю моделирования риска катастроф ВС из-за потери бокового эшелонирования были опубликованы несколько эквива-

лентных друг другу уравнений рисков [3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12]. Будем использовать форму уравнений, основанную на частоте пролётов (встреч, продольных перекрытий). Подходящее уравнение для решения задачи установления безопасного бокового разделения S_y опубликовано во многих официальных документах ИКАО, в том числе в [7, 8]:

$$N_{ay_same} = \frac{2 \times n_{b_same}}{F} \cdot P_y(S_{y_same}) \cdot P_z(0) \times \left[1 + \frac{l_x}{l_y} \cdot \frac{|\bar{y}|}{|\bar{x}|} + \frac{l_x}{l_z} \cdot \frac{|\bar{z}|}{|\bar{x}|} \right]; \quad (1)$$

$$N_{ay_oppo} = \frac{2 \times n_{b_oppo}}{F} \cdot P_y(S_{y_oppo}) \cdot P_z(0) \times \left[1 + \frac{l_x}{l_y} \cdot \frac{|\bar{y}|}{2 \times \bar{W}} + \frac{l_x}{l_z} \cdot \frac{|\bar{z}|}{2 \times \bar{W}} \right], \quad (2)$$

где: N_{ay_same} – риск катастроф ВС из-за потери бокового эшелонирования S_{y_same} на параллельных маршрутах при полётах в одном направлении;

N_{ay_oppo} – риск катастроф ВС из-за потери бокового эшелонирования S_{y_oppo} на параллельных маршрутах при полётах в противоположном направлении за тот же календарный период времени;

F – суммарный объём налета ВС в зоне ответственности, в которой расположены параллельные маршруты за некоторый календарный период времени;

n_{b_same}, n_{b_oppo} – число продольных перекрытий ВС, выполняющих полёты по параллельным маршрутам, соответственно, в одном или противоположном направлениях за тот же календарный период времени;

$P_y(S_y)$ – вероятность бокового перекрытия ВС из-за ошибок выдерживания линии заданного пути маршрута (ЛЗП) в поперечном направлении при номинальном разделении маршрутов на величину S_y ;

$P_z(0)$ – вероятность вертикального перекрытия ВС, номинально выдерживающих одинаковый эшелон полёта;

l_x, l_y, l_z – усредненные размеры ВС по продольной, боковой и вертикальной осям;

$|\bar{x}|, |\bar{y}|, |\bar{z}|$ – средние, абсолютные относительные скорости ВС при столкновении из-за потери бокового эшелонирования;

\bar{W} – средняя путевая скорость полёта ВС.

Аналогичную форму модели риска катастроф используют для оценки безопасности полётов при потере вертикального эшелонирования [9].

Безопасным разделением S_y параллельных маршрутов зональной навигации, полёты на которых выполняются в одном или противоположном направлениях, согласно подходу ИКАО [7] считается такое, при котором значения риска катастроф ВС в уравнениях (1) или (2) не превосходит приемлемого (целевого) значения, равного $5 \times 10^{-9} \frac{1}{\text{л.чис}}$.

Для полётов по параллельным маршрутам протяженностью L_x с ограниченным временем пребывания ВС в зоне T (Рис. 1) в документах ИКАО отсутствуют сведения по оценке значений F, n_{b_same} и n_{b_oppo} .

Покажем, как оценить указанные параметры. В самом общем виде для оценки значений n_{b_same}, n_{b_oppo} должны быть известны интервалы времени (o'clock) нахождения ВС на параллельных маршрутах:

$$(t_{1_in}(i), t_{1_out}(i)); (t_{2_in}(j), t_{2_out}(j)),$$

где: $t_{1_in}(i)$ – текущее время входа i -ого ВС на условно первый параллельный маршрут;

$t_{1_out}(i)$ – текущее время выхода i -ого ВС с условно первого параллельного маршрута;

$t_{2_in}(j), t_{2_out}(j)$ – времена входа/выхода некоторого j -ого ВС для условно второго параллельного маршрута.

Оценка n_{b_same} . При движении ВС в одном направлении продольная встреча или продольное перекрытие ВС, находящихся на параллельных участках, возможно в двух случаях:

а) на дистанции протяженностью L_x ВС из потока на условно первом параллельном маршруте догоняет/перегоняет ВС из потока на условно втором параллельном маршруте;

б) на дистанции протяженностью L_x ВС из потока на условно втором параллельном маршруте догоняет/перегоняет ВС из потока на условно первом параллельном маршруте.

Случай догона/перегона а) описывается следующим отношением времен:

$$t_{2_in_j} \leq t_{1_in_i} \ \& \ t_{1_out_i} + \delta t_{same_{i,j}} \leq t_{2_out_j} \ . \quad (3)$$

Случай б) описывается следующим отношением времен:

$$t_{1_in_i} \leq t_{2_in_j} \ \& \ t_{2_out_j} + \delta t_{same_{i,j}} \leq t_{1_out_i} \ . \quad (4)$$

Используемое в (3) и (4) время $\delta t_{same_{i,j}}$ уточняет ситуацию догона/обгона:

- - догоном называют ситуацию, при которой ВС на разных параллельных участках сблизилась в продольном направлении на расстояние не большее, чем $2 \cdot l_x$;

- - обгоном называют ситуацию, при которой ВС на разных параллельных участках разошлись на расстояние большее $2 \cdot l_x$, при условии, что для этих же ВС была зафиксирована ситуация догона.

Очевидно, что

$$\delta t_{same_{ij}} = \frac{2 \cdot l_x}{|W_{1i} - W_{2j}|}, \quad (5)$$

где: W_{1i} – путевая скорость полёта ВС по условно первому параллельному маршруту в интервале времени $(t_{1_in}(i), t_{1_out}(i))$;

- W_{2j} – путевая скорость полёта ВС по условно второму параллельному маршруту в интервале времени $(t_{2_in}(j), t_{2_out}(j))$.

Для заданного календарного периода времени K необходимо просуммировать все ситуации выполнения отношений времен входов/выходов (3) и (4). Получим оценку n_{b_same} .

Оценка n_{b_oppo} . При движении ВС в противоположных направлениях продольное перекрытие ВС на параллельных участках возможно в двух случаях:

с) если ВС потока с условно первого параллельного маршрута еще не покинуло его, а на соседний участок влетело ВС потока условно второго параллельного маршрута;

д) если ВС потока с условно второго параллельного маршрута еще не покинул свой параллельный участок, а на соседний участок влетело ВС потока с условно первого параллельного маршрута.

Очевидно, каждый случай будет иметь свое соотношение времен входов/выходов ВС на параллельные участки:

- для с) отношение времен следует записать как

$$t_{1_in_i} \leq t_{2_in_j} \ \& \ t_{2_in_j} \leq t_{1_out_i} + \delta t_{oppq_j}. \quad (6)$$

- для д) отношение времен следует записать как

$$t_{2_in_j} \leq t_{1_in_i} \ \& \ t_{1_in_i} \leq t_{2_out_j} + \delta t_{oppq_j}. \quad (7)$$

Время δt_{oppq_j} расширяет понятие «перекрытия» при полётах в противоположных направлениях до касания проекций продольных положений двух ВС в момент времени, когда одно ВС покидает свою линию пути, а другое ВС влетает на свою линию пути. Очевидно, что

$$\delta t_{oppq_j} = \frac{2 \cdot l_x}{W_{1i} + W_{2j}}. \quad (8)$$

Пояснения для (8) точно такие же, как пояснения для (5).

Просуммировав все ситуации выполнения отношений (6) и (7), получим оценку n_{b_oppo} за рассматриваемый календарный период времени K .

Суммарный объём налёта ВС F в зоне ответственности, в которой движение осуществляется по параллельным маршрутам протяженностью L_x всегда оценивается вместе со значениями n_{b_same} и/или n_{b_oppo} . При этом для всех трёх величин могут быть использованы как методы фиксации

фактических параметров деятельности по ОВД, так и методы моделирования полётов ВС на параллельных маршрутах.

Как было указано при объяснении формул (1) и (2) $P_y(S_y)$ представляет собой вероятность бокового перекрытия ВС или вероятность столкновения ВС в «боковом» направлении (в направлении поперек движения ВС) из-за отклонений ВС от линий заданного пути каждого из маршрутов при номинальном разделении между ними, равном S_y . Из определения следует, что $P_y(S_y)$ главным образом зависит от ошибок выдерживания линии заданного пути в направлении поперёк движения ВС. На рисунке 1 представлены плотности вероятностей ошибок выдерживания линий пути маршрутов в направлении поперёк движения для параллельных линий пути, эшелонированных на S_y .

При ориентации осей ошибок выдерживания ЛЗП параллельных маршрутов $0_1 y_1$ и $0_2 y_2$ столкновение ВС с математической точки зрения означает, что каковы бы не были отклонения от ЛЗП y_1 и y_2 их разность с точностью до размера ВС в боковом направлении l_y должна быть равна S_y :

$$y_1 - y_2 = S_y. \quad (9)$$

При смене ориентации осей столкновение ВС происходит, если $y_1 + y_2 = S_y$.

Плотность вероятности разности (9) известна как

$$C_y^{"-"}(S_y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y) \cdot f_2(y - S_y) dy. \quad (10)$$

Для вычисления вероятности $P_y(S_y)$ при полётах ВС в одном продольном направлении (Рис. 2а) необходимо учитывать тот факт, что случайная величина $(y_1 - y_2)$ равняется не строго значению S_y , а лежит в интервале

$$S_y - l_y \leq y_1 - y_2 \leq S_y + l_y. \quad (11)$$

Адекватное математическое выражение выполнения условия (11) равно, соответственно,

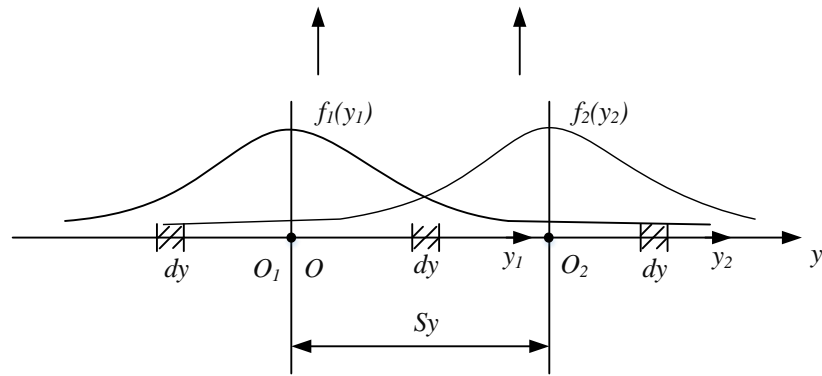
$$P_y^{"-"}(S_y) = \int_{S_y - l_y}^{S_y + l_y} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y) \cdot f_2(y - u) dy du. \quad (12)$$

Очевидное упрощение (12) позволяет записать

$$P_y^{"-"}(S_y) \cong 2 \cdot l_y \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y) \cdot f_2(y - S_y) dy = 2 \cdot l_y \cdot C_y^{"-"}(S_y). \quad (13)$$

В широком диапазоне параметров плотностей $f(y_1)$, $f_2(y_2)$ и значений S_y величины $P_y(S_y)$, полученные по формулам (12) и (13), совпадают.

а) движение ВС в одном направлении



б) движение ВС в противоположном направлении

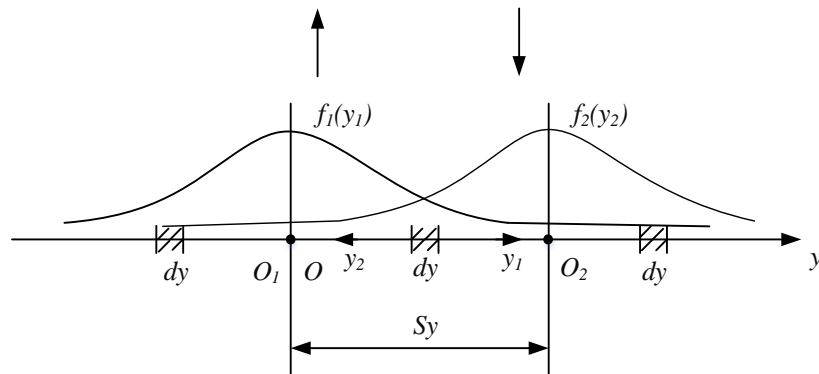


Рис. 1. Плотности вероятностей ошибок выдерживания линий заданного пути параллельных маршрутов: а) при полётах в одном направлении; б) при полётах в противоположном направлении

Применяя аналогичные рассуждения для случайной величины $(y_1 + y_2)$ и рассматривая условие

$$S_y - l_y \leq y_1 + y_2 \leq S_y + l_y, \quad (14)$$

можем получить точную и приближенную формулы расчета $P_y(S_y)$ для ориентации ошибок выдерживания ЛЗП, показанной на рисунке 2б):

$$P_y^{''+''}(S_y) = \int_{S_y - l_y - \infty}^{S_y + l_y \infty} \int f_1(y) \cdot f_2(u - y) dy du \quad ; \quad (15)$$

$$P_y^{''+''}(S_y) \cong 2 \cdot l_y \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y) \cdot f_2(S_y - y) dy = 2 \cdot l_y \cdot C_y^{''+''}(S_y) \quad (16)$$

Заметим, что, если плотности $f(y_1)$ и $f_2(y_2)$ обладают симметрией типа $f(x) = f(-x)$, то $P_y^{''-''}(S_y) = P_y^{''+''}(S_y)$.

В связи с тем, что разрешённые эшелоны полётов в одном направлении одинаковые, а для полётов в противоположные направления разные, для оценки $P_y(S_y)$ будем использовать формулу (13).

Наиболее сложный вопрос при оценивании $P_y(S_y)$ связан с выбором типа плотности для $f(y_1)$ и $f_2(y_2)$. В ИКАО [5, 6] для обоснования S_y используют либо двусторонний экспоненциальный тип плотности (DE), либо двустороннюю экспоненциальную плотность с двусторонним экспоненциальным засорением (DDE).

Плотность вероятности DE распределения записывают в виде [8]

$$f_{DE}(y) = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{core}} \cdot e^{-\frac{|y|}{\lambda_{core}}} \quad (17)$$

Плотность вероятности DDE распределения записывают в виде [7, 8]

$$f_{DDE}(y) = \frac{(1-\alpha)}{2 \cdot \lambda_{core}} \cdot e^{-\frac{|y|}{\lambda_{core}}} + \frac{\alpha}{2 \cdot \lambda_{tail}} \cdot e^{-\frac{|y|}{\lambda_{tail}}} \quad (18)$$

В формулах (17) и (18):

$$\lambda_{core} = \frac{\sigma_{core}}{\sqrt{2}};$$

$$\lambda_{tail} = \frac{\sigma_{tail}}{\sqrt{2}},$$

где σ_{core} и σ_{tail} представляют собой среднеквадратические отклонения типичных ошибок выдерживания ЛЗП (σ_{core}) и нетипичных или аномальных (очень больших) ошибок выдерживания ЛЗП (σ_{tail}) при полётах ВС на параллельных маршрутах.

Типичные ошибки соответствуют отклонениям ВС от ЛЗП, имеющим место в повсеместной практике. Параметр λ_{core} DE и DDE плотностей отклонений определяется посредством обработки собранных отклонений ВС от ЛЗП.

Нетипичные ошибки имеют место в исключительных обстоятельствах и их невозможно смоделировать на основе выборки собранных отклонений, так как выборка экспериментальных отклонений может охватывать недельный, месячных и так далее период воздушного движения, а нетипичные отклонения, возможно, появляются не чаще чем раз за несколько лет.

При задании значений параметров λ_{core} , λ_{tail} и α необходимо руководствоваться консервативными соображениями, которые с гарантией обеспечивают максимальную величину вероятности $P_y(S_y)$.

При полётах по маршрутам зональной навигации со спецификациями RNAV X консервативный подход к выбору значения λ_{core} и λ_{tail} обеспечивается при [7, 8]:

$$\lambda_{core} = -\frac{X}{\ln(0.05)} [n, m.]; \quad (19)$$

$$\lambda_{tail} = S_y. \quad (20)$$

Значение весовой доли нетипичных ошибок α в соответствии с [8] выбирается каждый раз таким образом, чтобы для установленных заранее величин параметров уравнений рисков (1) и (2) F , n_{b_same} , n_{b_oppo} , $P_z(0)$, l_x, l_y, l_z , $|\dot{x}|, |\dot{y}|, |\dot{z}|$, \bar{w} , λ_{core} и S_y , риски N_{ay_same} и/или N_{ay_oppo} равнялись бы $5 \times 10^{-9} \frac{1}{л.час}$.

Наконец, ИКАО рекомендует [7, 8] использовать для описания ошибок выдерживания ЛЗП плотность $f_{DDE}(y)$ для полётов, при которых повторяющиеся большие отклонения ВС от ЛЗП диспетчер УВД не имеет возможности выявить и скорректировать, то есть при процедурном методе УВД. В тех случаях, когда большие отклонения от ЛЗП наблюдаются с частотой обновления радиолокационной информации наблюдения, консервативный подход ИКАО заключается в использовании плотности $f_{DE}(y)$, для которой параметр λ_{core} определяется по формуле (19).

Таким образом, при обосновании безопасного разделения параллельных маршрутов зональной навигации, УВД на которых осуществляется с использованием информации системы наблюдения ОВД, вероятность столкновения ВС в направлении поперек движения определяется в соответствии с рекомендациями ИКАО [7, 8] как

$$P_y(S_y)_{DE} = 2 \cdot l_y \cdot \left(\frac{(\lambda_{core} + S_y)}{4 \cdot \lambda_{core}^2} \cdot e^{-\frac{S_y}{\lambda_{core}}} \right), \quad (21)$$

где: $\lambda_{core} = -\frac{X}{\ln(0.05)}$;

X – числовое обозначение навигационной спецификации маршрута зональной навигации RNAV X .

Для параллельных маршрутов зональной навигации, УВД на которых осуществляется без использования информации системы наблюдения ОВД, $P_y(S_y)$ в соответствии с рекомендациями ИКАО [7] определяется как

$$P_y(S_y)_{DDE} = 2 \cdot l_y \cdot \left[\left(\frac{(1-\alpha)}{2 \cdot \lambda_{core}} \right)^2 \cdot (\lambda_{core} + S_y) \cdot e^{-\frac{S_y}{\lambda_{core}}} + \left(\frac{\alpha}{2 \cdot \lambda_{tail}} \right)^2 \cdot (\lambda_{tail} + S_y) \cdot e^{-\frac{S_y}{\lambda_{tail}}} + \frac{\alpha \cdot (1-\alpha)}{2} \times \left(\frac{e^{-\frac{S_y}{\lambda_{core}}} + e^{-\frac{S_y}{\lambda_{tail}}}}{\lambda_{core} + \lambda_{tail}} + \frac{e^{-\frac{S_y}{\lambda_{tail}}} - e^{-\frac{S_y}{\lambda_{core}}}}{\lambda_{tail} - \lambda_{core}} \right) \right], \quad (22)$$

где: $\lambda_{core} = -\frac{X}{\ln(0.05)}$;

X – числовое обозначение навигационной спецификации маршрута зональной навигации RNAV X ;

$$\lambda_{tail} = S_y;$$

α назначается таким образом, чтобы при выбранных значениях всех других параметров уравнений рисков (1) или (2) значения N_{ay_same} и/или N_{ay_oppo} равнялись бы $5 \times 10^{-9} \frac{1}{\text{л.час}}$.

Примеры реализации описанного подхода к определению безопасного разделения параллельных маршрутов зональной навигации со спецификациями RNAV X представлены в [10], где помимо обоснования безопасных боковых интервалов параллельных маршрутов рассмотрены вопросы бокового эшелонирования границы зоны специальных полётов ВС и маршрутов полётов ВС гражданской авиации.

Список использованной литературы:

1. Правила аэронавигационного обслуживания. Doc. 4444 с Поправкой №6. – Монреаль, ИКАО, 2014.
2. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Doc 9613 AN/937. – Монреаль, ИКАО, 2013.
3. Reich P.G. Analysis of Long-Range Air Traffic System – Separation Standards I. – Journal of Navigation, 1966.
4. Reich P.G. Analysis of Long-Range Air Traffic System – Separation Standards II. – Journal of Navigation, 1966.
5. Reich P.G. Analysis of Long-Range Air Traffic System – Separation Standards III. – Journal of Navigation, 1966.
6. Методика определения минимумов эшелонирования, применяемых для разделения параллельных линий пути в структурах маршрутов ОВД. Cir 120 AN/89/2.– Монреаль, ИКАО, 1976.
7. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования. Издание первое с поправкой №1. Doc 9689 AN/953.– Монреаль, ИКАО, 2002.
8. A Unified Framework for Collision Risk Modelling in Support of the Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination on of Separation Minuta (Doc 9689). Cir 319 AN/181. – Montreal, ICAO, 2009.
9. Методика оценки безопасности полётов в воздушном пространстве с сокращенным интервалом вертикального эшелонирования Российской Федерации. Утверждена заместителем Руководителя Федерального агентства воздушного транспорта А. В. Ведерниковым 06 февраля 2015 г.
10. В.Б. Спрысков, А.А. Тараканов. Подход к оценке безопасного бокового эшелонирования зон специальных полётов и маршрутов полётов ВС. Москва, 2018

11. Инструктивный материал по внедрению минимумов бокового эшелонирования при использовании GNSS, основанных на минимумах эшелонирования по VOR. Cir 322 AN/184. – Монреаль, ИКАО, 2014.

12. Основные принципы бокового эшелонирования воздушных судов при вылете и прибытии по опубликованным смежным схемам полётов по приборам. Cir 324 AN/186. – Монреаль, ИКАО, 2011.

УДК 004.021

Разработка методики формализованного выбора технологических операций при проектировании технологического процесса изготовления деталей

Р.А. Сокольников

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В данной статье представлена идея автоматизации формализованного выбора технологических операций на основании взаимосвязей и зависимостей между различными составляющими технологического процесса, а также необходимых условий, удовлетворяющим производство данной детали на данном предприятии. И приведён пример формирования технологического процесса изготовления детали на примере авиационной детали типа «профиль».

Ключевые слова: формализация, технологические операции, технологический процесс, автоматизация производства, подготовка производства.

Автоматизация производственных процессов имеет безусловно важное значение для как авиа- и машиностроения, в целом, так и для их развития. Основой таких процессов являются автоматизированные технологические процессы механической обработки и сборки, они позволяют увеличить производительность и качество изделий. Современное авиа- и машиностроение направленно как раз-таки на автоматизацию производства, с широким использованием ЭВМ, роботизацию производства и внедрение гибких технологий, которые позволяют перестраивать технологические процессы на изготовление новых изделий.

Одной из важнейших задач при подготовки производственного процесса является формирование технологического процесса изготовления изделия. Важнейшей, и в то же время весьма трудозатратной. Так как на составление одного такого техпроцесса может уйти немалое количество времени, а если технолог только начинает своё становление на новом месте, то это может ещё затянуться. Первым шагом при составлении техпроцесса

является технологическая оценка детали, с целью определить её конструктивные элементы и их параметры.

Сейчас это делается вручную, однако для этого существуют специальные программы, которые выполняют предварительную оценку конструкции на технологичность и, тем самым, позволяют в дальнейшем избежать факторов, которые негативно воздействуют на такие показатели, как стоимость, качество и время, которое затрачено на изготовление детали (одной из таких программ является интегрированное в САД решение – DFMPPro). На сегодняшний момент инженеры конструкторы тратят свыше 20% времени на исправления, которые связаны с итерационной разработкой изделия, что значительно влияет на планирование выпуска изделия. Действие таких программ заключается в том, что подобно программе проверки правописания, они помогают конструкторам определить элементы конструкции изделия, при изготовлении или обслуживании которых возникают сложности, приводящие к росту стоимости этих самых изделий. Так же они содержат рекомендации по проектированию с учетом требований к технологичности изделия.

Рекомендации совмещают в себе знания, полученные из различных справочников и инструкций, а также от экспертов в различных областях производства. Существующие наборы технологических требований могут быть введены как стандарты организации. Также подобное программное обеспечение действует как инструмент для сбора знаний, обеспечивая организации мощным средством, позволяющим аккумулировать лучший опыт и знания.

Следующим шагом идёт непосредственное формирование техпроцесса. Происходит это путём нахождения похожих, типовых деталей. Грубо говоря, составление техпроцесса проходит по аналогии с уже имеющийся похожей деталью. Однако и эту процедуру можно автоматизировать, тем самым ещё сократить время на формирование техпроцесса.

Идея заключается в том, что мы имеем, уже сформированную, некую базу знаний (см. рис. 1), в которую входят такие компоненты как:

- конструктивные элементы деталей;
- оборудование;
- технологическая оснастка;
- технологические операции;
- инструменты;
- и др.

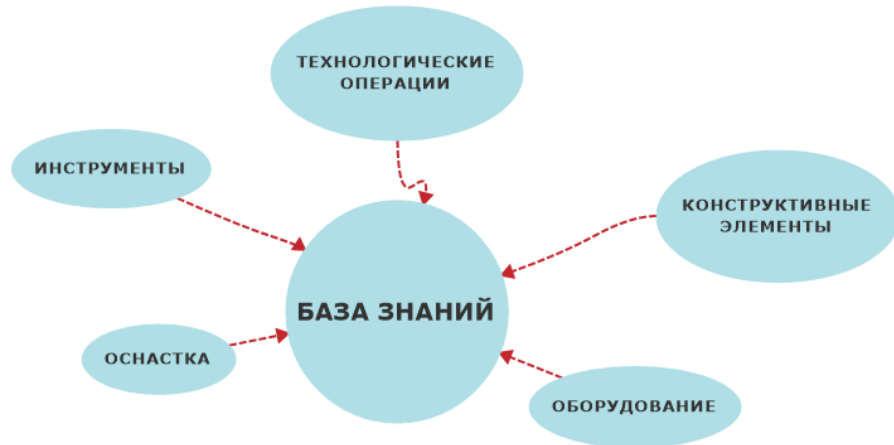


Рис. 1 Схема базы знаний

Так же имеются зависимости между всеми компонентами данной базы знаний. То есть, зная конструктивный элемент, и следуя зависимостям, программа подбирает нам необходимые технологические операции (если данный элемент можно выполнить разными способами) а также всё необходимое оборудование и инструменты.

Использование выше представленные технологии, по технологической оценке изделий, для выявления конструктивных элементов детали, позволит нам получить перечень этих самых конструктивных элементов. Далее происходит сопоставление технологической операции с оборудованием и оснасткой, которые необходимы для её выполнения. Таким образом формируется готовый технологический процесс изготовления детали.

Рассмотрим данную схему на конкретной авиационной детали каркаса типа профиль (рис. 2).



Рис. 2 Профиль

После проведения технологической оценки получаем следующую картину (см. рис. 3).



Рис. 3 Результаты технологического анализа

Далее, следуя связям выстраивается технологический процесс изготовления данного профиля.

Ниже на рисунке 4 представлен укрупнённый технологический процесс изготовления детали.

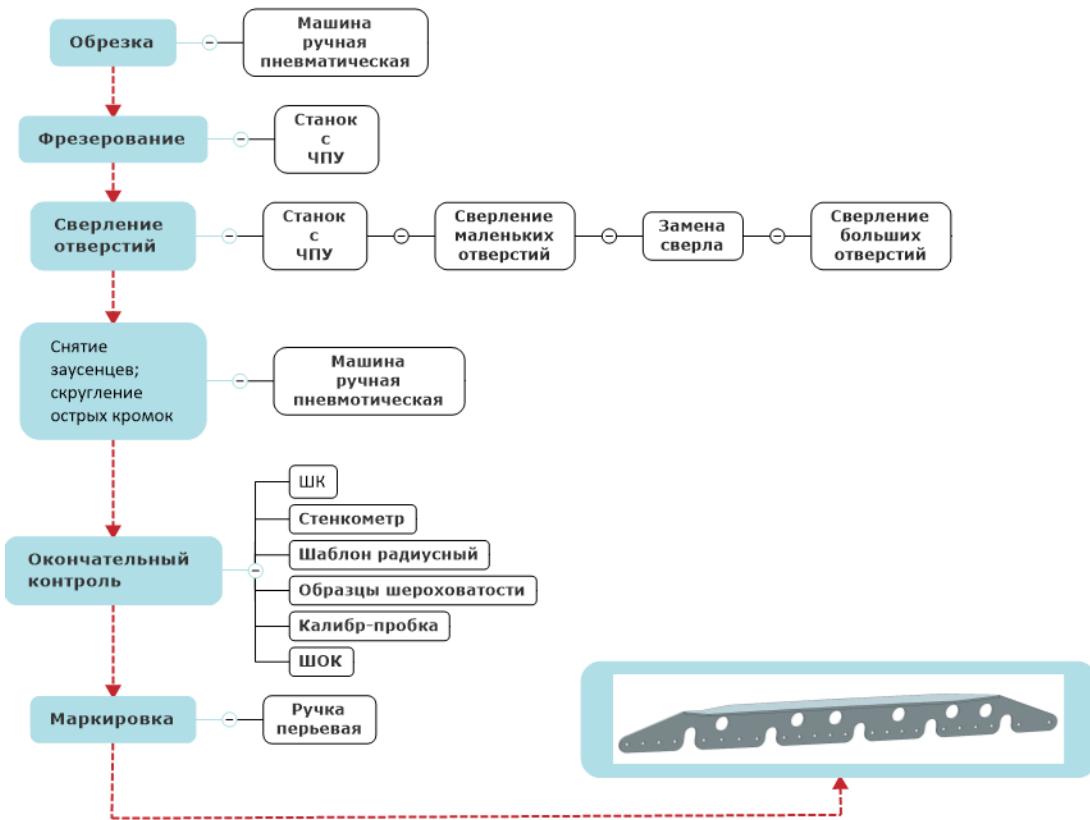


Рис. 4 Схема технологического процесса

По возможности, имеет смысл указать стоимость и время выполнения операции на том или ином оборудовании. А также, одним из вариантов задания условия, можно дополнительно указать, так сказать процент «популярности» различного оборудования для данной операции на данном предприятии. Т.е., например, гибку на данном предприятии в 80% случаях выполняют на листогибочном станке, в 15% – эластичной средой и в 5% – на падающем молоте. И перед формированием технического процесса указать, что необходимо получить, более дешёвую его версию или более быструю.

Таким образом, использование формализованных классификаторов и зависимостей между ними позволяет значительно сократить время на формирование технологического процесса, в сравнении с традиционным (ручным) способом.

Список использованной литературы:

1. Khusainov, R.M., Sharafutdinov, I.F. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 134 (2016) 012042
2. Krastyaninov, P.M., Khusainov, R.M. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 134 (2016) 012041
3. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation / IOP Conference Series. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 944 (2017) 012128 (DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012128>).
4. Гаер М.А., Яценко О.В. Электронная мастер- модель с трехмерными допустимыми отклонениями // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 56–58.
5. Говорков А.С. Методика количественной оценки технологичности конструкции изделий авиационной техники Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 31-37.
6. Говорков А.С., Ха В.Ч. Разработка автоматизированной системы проектирования технологических процессов изготовления изделия машиностроения на основе трехмерной модели /Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 48-56.
7. ГОСТ 2.051-2013 Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. Введ. 2014–06–01. М. : Стандартинформ, 2014. 9 с.
8. Ирзаев Г.Х. Экспертный выбор предпочтительного по технологичности варианта изделия методом аналитической иерархии // Вестник ИрГТУ. 2007. № 1. Т. 1. С. 126–130.
9. Лаврентьева М.В., Говорков А.С. Идентификация объектов структуры электронной модели изделия с помощью выявленных формализованных параметров из конструкторско-технологической среды / Труды МАИ. 2017. № 96. С. 29.
10. Чеславская А.А., Мироненко В.В., Колесников А.В., Максименко Н.В., Котов В.В. Выбор рационального метода формообразования детали средствами инженерного анализа с применением САЕ-систем // Металлург. - 2014. - №12. - С. 24-31.
11. Чьен Х.В., Лаврентьева М.В. Определение состава базирующих элементов сборочного приспособления при сборке авиационного изделия / Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 74-80.

Износ и эрозионная стойкость в газообразивном потоке композитных элементов авиационного двигателя

***А.В. Зинин¹, С.В. Бухаров¹, С.В. Добровольский¹,
А.К. Лебедев¹, К.Р. Пятунин²***

1. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

2. ПАО «ОДК-Сатурн», 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, 163

Представлены результаты экспериментального исследования эрозионной стойкости конструкционного углепластика применительно к элементам конструкций газотурбинного двигателя. Разработана методика определения характеристик процесса газообразивного изнашивания в потоке твердых частиц тонкостенных конструкций из полимерных композиционных материалов. Установлено, что степень абразивного воздействия пылегазовой смеси, образующейся на этапах взлета и посадки при забросе в компрессор двигателя песка и пыли, на композитные детали определяется углом атаки твердых частиц потока, концентрацией и фракционном составом смеси и механическими свойствами поверхности полимерного композита. Предложен критерий оценки эрозионной стойкости материалов в виде скорости эрозионного разрушения как отношение потери массы, приходящейся на единицу площади поверхности, за единицу времени воздействия.

Ключевые слова: *композиционные материалы, эрозия, износ, разрушение, газообразивный поток, скорость уноса*

Расширение использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях авиационных двигателей требует углубленного изучения эксплуатационных свойств применяемых композитов. Известные преимущества служебных свойств полимерных композитов в виде повышенной удельной прочности, высокой усталостной долговечности, весовой отдачей должны дополняться необходимыми качествами, определяющими возможности их эффективного применения в экстремальных условиях функционирования силовых установок летательных аппаратов [1-4].

Попадание в двигатель вместе с воздухом большого количества песка и пыли приводит к интенсивному эрозионному износу контурообразующих узлов и деталей, ухудшающему их аэродинамические и прочностные характеристики. Известные исследования авиационных двигателей [1] показывают, что не менее 2% потерь тяги обусловлено ухудшением характеристик двигателя вследствие его эрозии.

Абразивное воздействие пылегазовой смеси, образующейся в основном на этапах взлета и посадки при забросе песка, пыли, мелких осколков материала покрытий и др., особенно негативно сказывается на ресурсных характеристиках деталей из ПКМ. Анализ этого воздействия должен проводиться на этапах проектирования и отработки конструкции агрегатов двигателя и отражаться в нормативно-технической документации на двигатель.

В настоящее время исследованиями [5-11] однозначно установлено, что эрозийное поведение полимерных композитов зависит от многих взаимосвязанных факторов, которые включают тип матрицы, тип и форму волокна, соотношение компонентов материала, кинетические условия воздействия, газодинамические параметры пылегазового потока, геометрические характеристики эродента, такие как размер и форма частиц. В то же время механизмы разрушения при абразивной эрозии изучены недостаточно даже для традиционных металлических материалов [2,12], а теоретические исследования эрозионного разрушения и износа конструкционных композитных материалов и расчетные методики оценки повреждений практически отсутствуют [10 -13].

В этом направлении перспективным следует признать энергетический подход к механизму эрозионного разрушения, основанный на сопоставлении начальной энергии движущихся частиц с затратами на упруго-пластическое взаимодействие с поверхностью композита, последующее разрушение связей отдельных элементов матрицы и армирующих волокон и окончательного удаления этих частиц с поверхности композитного объекта. Такой подход обоснован фактами ускорения эрозионного износа материала с увеличением скорости потока и кинетической энергии абразивных частиц и при снижении удельной поверхностной энергии разрушения, определяемой трещиностойкостью материала.

В качестве важнейшего фактора, определяющего интенсивность разрушающего действия эрозионного потока, следует отметить направление движения абразивных частиц относительно поверхности контакта – угол атаки α [7,10,14-16]. При контакте частиц абразива под углом к поверхности передача энергии от движущейся частицы происходит лишь за счет нормальной составляющей вектора скорости и частично за счет сил трения. К тому же, влияние этого фактора определяется не только очевидным различием в уровне энергии деформации при ударе под разными углами, но и изменением механизмов разрушения поверхностного слоя полимерного материала в зависимости от геометрических условий контакта с движущейся частицей абразива. Исследования [14,17-19] структуры поврежденной поверхности полимерных композитов установили три возможных процесса, приводящих к эрозионному повреждению - процессы резания (cutting), ударного повреждения (impact) и усталости (fatigue), при которых начальная энергия частицы преобразуется в различные энергетические условия. В зависимости от угла падения частицы на поверхность объекта реализуются различные механические схемы ударного взаимодействия [6].

При нормальном ударном контакте частиц и композитного материала происходит упруго-пластическое взаимодействие, при котором часть энергии упруго высвобождается в форме кинетической энергии отскока, а оставшаяся часть затрачивается на микроповреждения усталостного типа и эффекты внутреннего трения. При наклонной к поверхности траектории движения частицы также происходит упруго-пластический удар, но при этом доминирующими становятся специфические формы повреждений вследствие явлений микрорезания (micro-cutting) и микроразрыхления (micro-ploughing), особенно при воздействии частиц с острыми краями [10].

Анализ результатов полученных ранее [2,5,14-18] исследований позволяет характеризовать общий подход к изучению износоустойчивости полимерных композитов в виде преобладания экспериментальных оценок влияния внешних физических условий воздействия (скорость частиц, их геометрия и концентрация в потоке и др.) и различных физических характеристик материалов (морфологические, термические, термомеханические и механические свойства) на эрозионный отклик ПКМ и его компонентов [14]. Формализация такого подхода выражается в получении эмпирических соотношений, согласно которым авторы пытались соотнести скорость эрозии с различными влияющими параметрами и механизмами разрушения.

Целью представленной работы является экспериментальное исследование закономерностей сопротивления эрозионному износу конструкционных полимерных композитов применительно к элементам конструкций газотурбинного двигателя и разработка методики определения характеристик эрозионной стойкости при газоабразивном изнашивании тонкостенных конструкций из полимерных композиционных материалов.

Объекты испытаний представляли собой образцы слоистого эпоксидного углепластика с симметричной укладкой слоев $[0^0/90^0]$ с размерами 100 x 60 мм, толщиной 2,4 мм и следующими характеристиками механических свойств : модули упругости $E_{11} = E_{22} = 65,9$ ГПа, коэффициенты Пуассона $\mu_{12} = \mu_{21} = 0,3$, модуль сдвига $G_{12} = 3,5$ ГПа; пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно 640 МПа и 520 МПа , плотность $\rho = 1500$ кг/м³.

Сущность испытаний на эрозионную стойкость заключается в экспонировании образцов композиционных материалов или элементов конструкций из них на траектории движущихся в потоке с заданными скоростью и углом атаки абразивных твердых частиц. Результатами испытания на эрозионный износ являются показатели потери массы объекта эрозии за время испытаний и продолжительность воздействия абразивной струи до момента разрушения, которое фиксировалось по факту образования сквозного повреждения объекта испытаний.

В ходе испытаний исследовалось влияние на сопротивление эрозионному износу двух параметров – угла атаки α и концентрации абразивного материала q в воздушном потоке.

В качестве абразивного материала при оценке эрозионной стойкости используют фракционированный кварцевый песок по ГОСТ 8736-2014,

предназначенный в том числе для устройства оснований взлетно-посадочных полос и перронов аэродромов, с размером зерен и концентрацией отдельных фракций, соответствующих условиям эксплуатации газотурбинных двигателей.

Испытания образцов углепластиков на эрозионную стойкость проводили на газодинамической эрозионной установке, в которой воздействие на объект испытания осуществляется путем формирования гетерогенного потока с заданными параметрами скорости движения абразивных частиц и их концентрации в потоке.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Несущий поток воздуха создается пневмосистемой установки с помощью компрессора и передается по пневмомагистралям в исполнительные блоки установки. Эрозионное воздействие на объект испытания осуществляют газопорошковая смесь, которая подготавливается в камере смешения испытательного стенда, где происходит турбулентное перемешивание воздуха и газопорошковой фракции и специальными устройствами обеспечиваются заданные параметры эрозионного потока. Полученная в камере смесь газа и порошка (гетерогенная смесь), поступает в разгонный блок - газодинамический ускоритель (сопло Лавалья), где формируется двухфазный поток, и, достигнув расчётной скорости, направляется на исследуемый объект.

Режим испытания опытного образца устанавливается исходя из необходимого уровня скорости частиц порошка в двухфазном потоке и его концентрации в смеси, и задается совокупным значением параметров гетерогенной смеси в камере смешения - массовыми расходами газопорошковой смеси и газа-носителя, температурой и давлением.

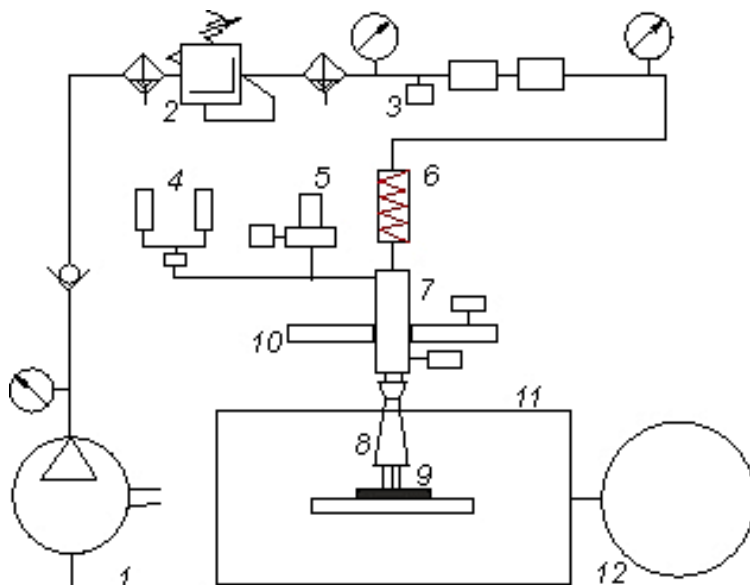


Рис. 1 – Принципиальная схема установки 1 – компрессор; 2 – модуль подготовки воздуха; 3 – блок управления подачи воздуха и твердой фазы, 1. дозатор вибрационный; 1. дозатор роторный; 1. нагреватель воздуха; 7 – смеситель; 8- ускоритель потока (сопло); 9 –

объект испытания; 10 - сканирующее устройство; 11. пылезащитная камера; 11. установка сбора пыли и очистки воздуха

Основная особенность проведенных экспериментальных исследований эрозионной стойкости углепластика заключается в максимально возможном воспроизведении при лабораторных испытаниях эксплуатационных условий воздействия пылегазовой смеси при взлете и посадке самолетов. Эти условия характеризуются скоростью движения частиц перед контактом с поверхностью композитной детали, функцией распределения размеров абразивных частиц по фракциям и массовым расходом каждой фракции потока. Однако ограниченные технические возможности испытательного оборудования для обеспечения заданных условий потребовали использования расчетных методов моделирования и аппроксимации полученных результатов для требуемых параметров эрозионного процесса.

Режим испытания образцов из углепластика устанавливали исходя из необходимого уровня скорости частиц порошка в двухфазном потоке и его концентрации в смеси. Варьируемыми параметрами режимов испытаний являлись массовый расход газопорошковой смеси и угол атаки при постоянной температуре и давлении. Параметры режимов испытаний устанавливали на основе моделирования процесса заброса пыли на вход в вентилятор двигателя и динамики дальнейших перемещений отдельных фракций пыли внутри двигателя.

В результате предварительного моделирования процесса заброса пыли на вход в вентилятор двигателя (рис.2) получены расчетные значения расхода абразивного наполнителя воздуха и параметры фракций при эксплуатационном режиме, соответствующего взлету и посадке (табл.1).

Таблица 1. Характеристики газопорошковой смеси и расчетные значения расхода абразивного наполнителя воздуха при эксплуатационном режиме

Диаметр частиц, 10^{-6} м	5	50	100	200	300	400	всего
Доля фракции	2,49%	6,45%	63,13%	12,38%	13,29%	2,26%	100%
Расход, кг/с	0,000004	0,000011	0,000109	0,000021	0,000023	0,000004	0,000173
Скорость, м/с	187,7						

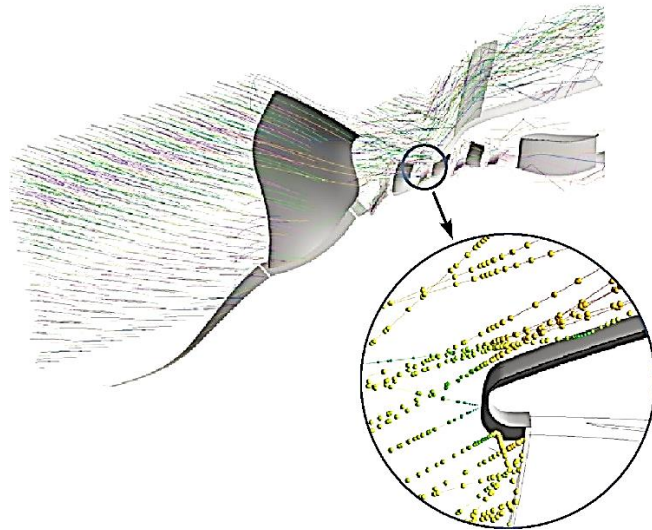


Рис. 2. Модель движения частиц абразива в компрессоре газотурбинного двигателя (траектории частиц отдельных фракций маркированы разными цветами)

В соответствии с методикой испытаний перед их проведением проводились контрольная диагностика параметров высокоскоростного гетерогенного потока, влажности абразивного материала и взвешивание образцов углепластика на аналитических весах с погрешностью не более 0,1 мг. Затем объект испытания устанавливали в рабочей зоне стенда, обеспечивая заданный угол атаки по отношению к эрозионному потоку, и экспонировали образец в пылегазовом потоке до появления сквозного повреждения. По итогам испытания фиксировали время воздействия абразива и проводили повторное взвешивание образца.

По результатам взвешивания образцов до и после испытаний на абразивное изнашивание в потоке твердых частиц с заданными скоростью и углом атаки определялась массовая скорость эрозионного разрушения ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) для угла атаки α как отношение потери массы $\Delta G_{i\alpha} = G_{in} - G_{ik}$, приходящейся на единицу площади поверхности за единицу времени, по формуле :

$$m_{\alpha} = \frac{G_{\alpha n} - G_{\alpha k}}{F_{\alpha} \tau_{\alpha}}$$

где $G_{\alpha n}$ и $G_{\alpha k}$ – масса опытного образца до и после испытания соответственно;

F_{α} – площадь поверхности образца, подвергшейся эрозии;

τ_{α} – время воздействия гетерогенного потока на образец.

Особенности эрозионного разрушения эпоксиуглепластика показаны на фотографиях разрушенных образцов (рис.3). Результаты испытаний на эрозионную стойкость и их обработки представлены в табл.2 и на рис.4.

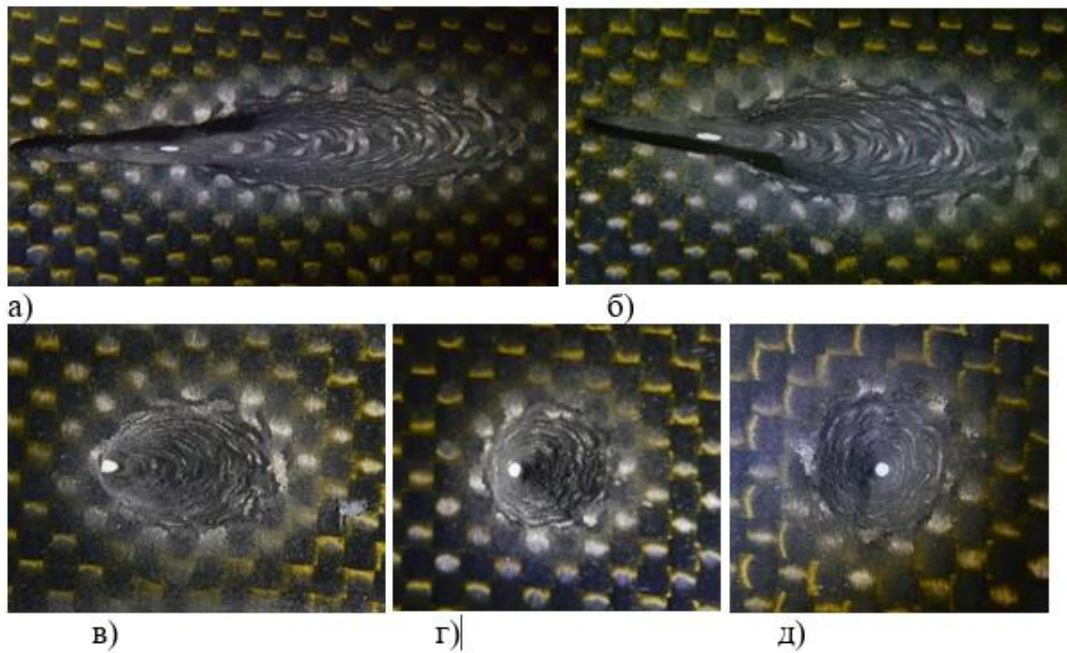


Рис. 3. Характер эрозионного повреждения эпоксидного углепластика при различных углах атаки а) 15 град; б) 20 град; в) 45 град; г) 70 град; д) 90 град

Таблица 2. Результаты испытаний на эрозионную стойкость при различных углах атаки

Расход абразива q , г/с	0,010		0,021		0,042	
	Унос массы ΔG , г	Время износа τ , с	Унос массы ΔG , г	Время износа τ , с	Унос массы ΔG , г	Время износа τ , с
Угол атаки α , град						
90	0,10074	244	0,10422	145	0,09196	75
70	0,11576	288	0,11677	181	0,11182	116
45	0,15555	581	0,16258	324	0,19225	285
20	0,48125	2085	0,50010	1493	0,50585	1032
15	0,65970	3656	0,68832	2523	0,6927	1476

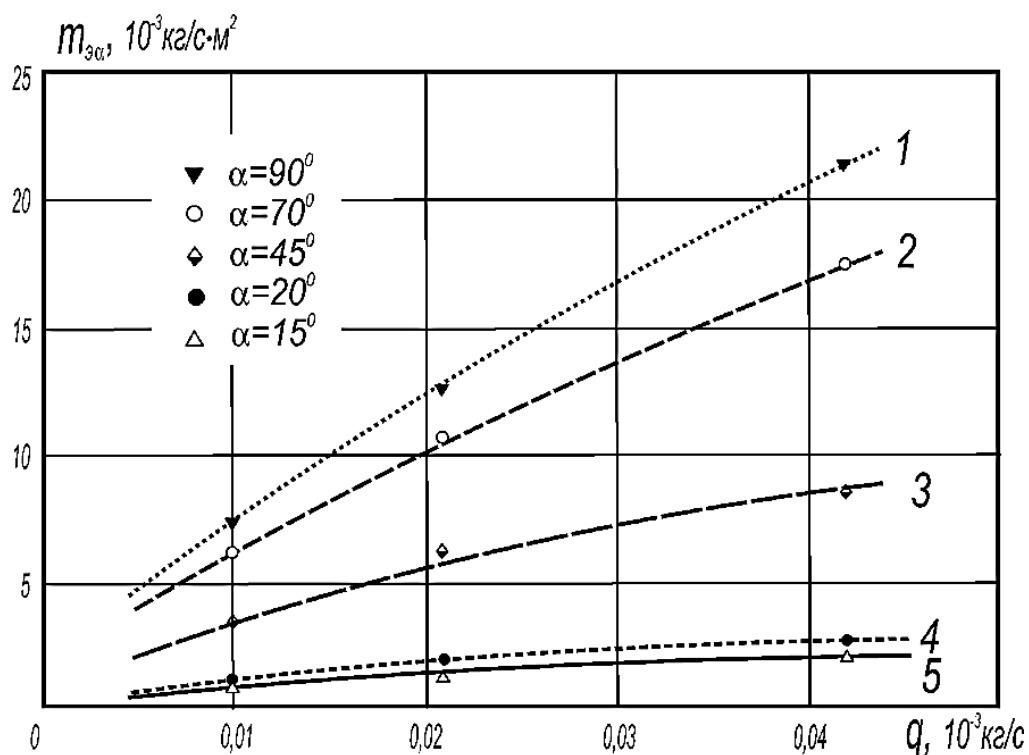


Рис. 4 – Экспериментальные зависимости эрозионной стойкости эпоксидного углепластика от расхода абразива в потоке

По результатам испытаний на эрозионную стойкость были получены экспериментальные зависимости массовой скорости эрозионного разрушения опытного образца от расхода абразива в потоке. В табл. 3 представлены уравнения регрессии степенного вида этой зависимости

$$m_{э\alpha} = C \cdot q^m$$

Таблица 3. Уравнения регрессии массовой скорости эрозионного разрушения опытного образца и расхода абразива в потоке

Угол атаки α , град	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
90	$m_{э\alpha} = 238,57 \cdot q^{0,758}$	0,999
70	$m_{э\alpha} = 178,65 \cdot q^{0,733}$	0,997
45	$m_{э\alpha} = 68,84 \cdot q^{0,646}$	0,954
20	$m_{э\alpha} = 14,27 \cdot q^{0,525}$	0,999
15	$m_{э\alpha} = 17,13 \cdot q^{0,665}$	0,995

В связи с технической невозможностью реализации в испытаниях малых концентраций и расхода абразива в воздушном потоке, соответствующих расчетным параметрам эксплуатационного режима, характеристики эрозионной стойкости для условий эксплуатации компрессора двигателя определяли по результатам испытаний при высоких

уровнях концентрации и расхода путем пересчета экспериментальных данных по уносу массы материала опытного образца.

Пересчет показателя эрозионной стойкости на эксплуатационные условия проводят исходя из конструктивно-геометрического подобия объекта испытаний и реальной детали. Исходными данными для обработки результатов испытаний являются расчетные условия эксплуатации: расход абразива $q = 0,000173$ кг/с, скорость потока $v = 200$ м/с, площадь поперечного сечения сектора контура $F_{\text{сектор}} = 10,14 \cdot 10^{-3}$ м². Исходя из теоретического соотношения между показателями массового содержания абразива в потоке расход абразива q (кг/с) и концентрации абразива в объеме воздушного потока k (г/м³), проходящего через сечение площадью F (м²) в виде

$$q = kFv, .$$

определяли концентрацию твердых частиц, соответствующую значению эксплуатационного расхода $q_{\text{расч}} = 0,000173$ кг/с

$$k_{\text{расч}} = \frac{q_{\text{расч}}}{Fv} = \frac{0,173}{0,0104 \cdot 200} = 0,085 \text{ г/м}^3$$

Тогда расчетному значению концентрации для сектора $k_{\text{расч}} = 0,085$ г/м³ соответствует при испытаниях расход $q_{\text{эксн}}$:

$$q_{\text{эксн}} = k_{\text{расч}} F_{\text{поток}} v = 0,085 \cdot 200 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 = 0,0048 \text{ г/с}$$

По уравнениям регрессии (табл.3) вычисляют расчетные значения массовой скорости эрозионного разрушения (рис.5) для экспериментального показателя расхода $q_{\text{эксн}} = 0,00048$ г/с, соответствующему расчетному расходу при эксплуатации.

Наибольшая эрозионная стойкость отмечена для угла атаки $\alpha = 15^\circ$, который практически соответствует углам между траекториями движения основной массы абразивных частиц потока и поверхностью разделителя потока.

Максимальная интенсивность эрозионного износа характерна для лобового контакта ($\alpha = 90^\circ$), при котором установлена минимальная продолжительность воздействия абразивной струи до момента разрушения объекта испытаний до сквозного повреждение.

Скорость уноса материала с поверхности композитной детали снижается по мере уменьшения угла атаки от 90 до 15 градусов, что связано с изменением механизма разрушения поверхностных слоев углепластика. При малых углах атаки ($\alpha < 45^\circ$) значительную часть энергии движущихся частиц абразива поглощают высокопрочные армирующие волокна, служащие защитой для хрупкого связующего. При контакте абразивных частиц с поверхностью объекта испытаний под углами, близкими к 90° , происходит быстрое выкрашивание расположенных между армирующими

волокнами частиц полимерного связующего, имеющего низкое сопротивление удару.

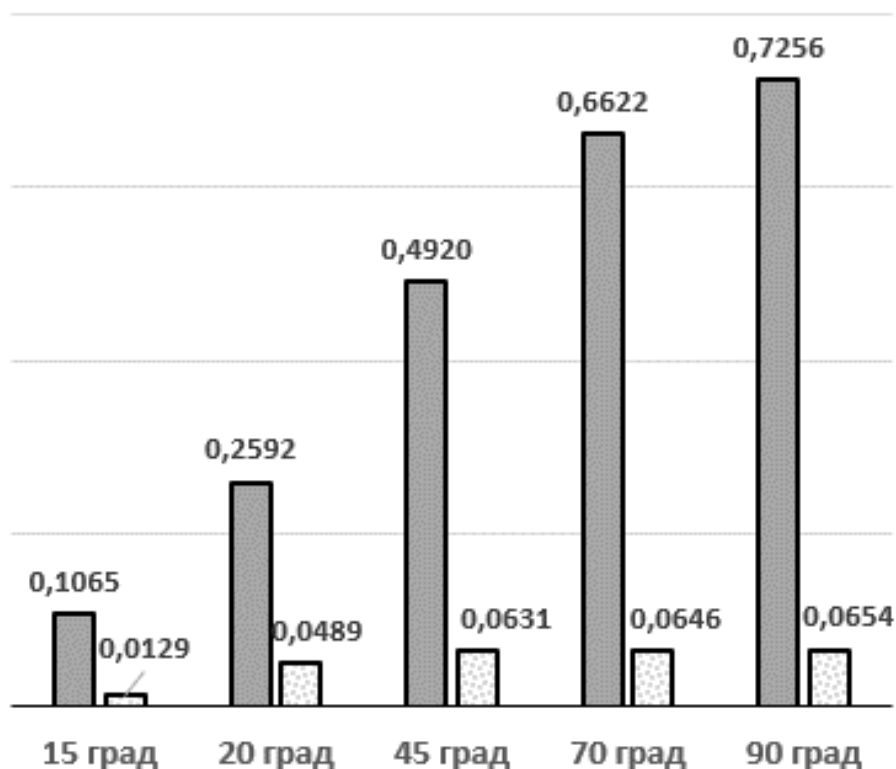


Рис. 5. Расчетные значения массовой скорости эрозионного износа при различных углах атаки для расхода 0,00048 г/с (темные) и 0,000020 г/с (светлые)

Результаты испытаний образцов эпоксидного углепластика на стойкость к эрозионному воздействию и методика их аппроксимации для малых концентраций пыли позволяют рассчитывать ресурс композитной детали компрессора двигателя по показателю износа в результате абразивного воздействия твёрдых частиц. При недостаточной стойкости к абразивному воздействию в качестве конструктивно-технологических способа повышения эрозионной стойкости рекомендуется нанесение защитного покрытия на поверхность композитных деталей в виде совместно отверждаемой композитной пленки или полиуретановой ленты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования России по реализации комплексного проекта, код 2017-218-09-172.

Список использованной литературы:

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография, г. Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003 г. — 396 с.

2. Каримбаев Т. Д., Ножницкий Ю. А., Гундаров В. И., Рысин Л. С., Лютцау В. Г., Тарасов И. А. Разрушение и износ композитных материалов при взаимодействии с потоком абразивных частиц // *Механика композитных материалов*, 1980, № 2, с. 235—240.
3. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц // *Сб. «Авиационные материалы и технологии»*, М., ВИАМ, 2011, №3, с. 30–36
4. Dalili N., Edrisy A., Carriveau R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance / *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009.V.13, №2, p. 428–438.
5. Harsha A.P., Tewari U.S., Venkataraman B. Solid particle erosion behavior of various polyaryletherketone composites / *Wear*. 2003. V.254, p. 453-464.
6. Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S.S., Dash R.R. Parametric optimization of erosion wear of polyester-GF-alumina hybrid composites using Taguchi method / *Journal of Reinforced Plastics and Composites* . 2008. V.27, №10, p. 1039–1058
7. Miyazaki N., Hamo T. Solid particle erosion of thermoplastic resins reinforced by short fibers / *Journal Composites Materials*. 1994. V.28. p.320-328.
8. Swar R., Hamed A., Tabakoff W., Miller R.A. Surface Deterioration of Thermal Barrier Coated Turbine Blades by Erosion, ISABE, Montreal, Canada, 2009
9. Bing Liu, Limin Bao, Anchang Xu Effect of fabric orientation and impact angle on the erosion behavior of high-performance thermoplastic composites reinforced with ductile fabric. / *Wear*. 2016, V. 352-353, p. 24-30
10. Gupta A., Kumar A., Patnaik A., Sandhyarani Biswas Effect of Different Parameters on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites / *International Journal of Polymer Science* Volume 2011, Article ID 592906, 10 pages doi:10.1155/2011/592906
11. Patnaik A., Satapathy A., Chand N., Barkoula N.M., Sandhyarani Biswas
Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review / *Wear*. 2010. V. 268, p. 249-263
12. Sudarshan Rao K, Varadarajan Y. S., Rajendra N. Erosive wear behaviour of carbon fiber-reinforced epoxy composite - 4th International Conference on Materials Processing and Characterization. *Materials Today: Proceedings* 2. 2015, p. 2971. 2983
13. Barkoula N.-M., Karger-Kocsis J. Review: Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites / *Journal of Materials Science*. 2002, V.37, P. 3807-3820
14. Binder M., Klocke F., Doebbler B. Abrasive wear behavior under metal cutting conditions. *Wear*. 2017. V.376-378 P.165-171

15. Юдина Е.М., Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е., Лысенко А.Н. Стойкость композиционных гальванических покрытий при абразивном изнашивании / Сельский механизатор. 2015. № 3. С. 34-35.
16. Humphrey J.A.C., Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact / International Journal of Heat and Fluid Flow. 1990.V.11, №3, p. 170–195
17. Edwards J.K., McLaury B.S., Shirazi S.A. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service/ - Proceedings of 2000 ASME fluids engineering summer meeting, 2000. Boston: Paper no. FEDSM2000-11245.
18. Ivosevic M., Knight R., Kalidindi S.R., Palmese G.R. Sutter J.R. Solid particle erosion resistance of thermally sprayed functionally graded coatings for polymer matrix composites / Surface and Coating Technology. 2006. V.200, p. 5145–5151
19. Rattan R., Bijwe J. Carbon fabric reinforced polyetherimide composites: Influence of weave of fabric and processing parameters on performance properties and erosive wear, Journal of Material Science and Engineering. 2006. V.420 P. 342-350.

УДК 678.027.9

Пространственное армирование прошивкой высокоплотных толстостенных заготовок слоистых композиционных материалов

С.В. Бухаров, А.К. Лебедев, А.В. Зинин.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) 125993 Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

Дан анализ технологических процессов формирования структуры пространственно-армированных волокнистых заготовок композиционных материалов. Предложена модифицированная технология прошивки для создания и внедрения нового класса пространственно-армированных композитов – толстостенных материалов с регулируемой анизотропией и физико-механическими свойствами, не уступающими соответствующим свойствам слоистых композитов. Применение разработанной технологии пространственного армирования толстостенных заготовок позволяет получать преформы с повышенной плотностью армирующей системы. Проведена экспериментальная оценка эффективности применения модифицированной технологии прошивки слоистой заготовки для получения объёмных преформ углерод-углеродных композитов.

Ключевые слова: *пространственно-армированный композит, преформа, прошивка, тафтинг, углеродные материалы.*

Объективные недостатки слоистых полимерных композитов как конструкционных материалов – слабое сопротивление межслойному сдвигу и трансверсальному отрыву, повышенная чувствительность к концентрации напряжений и развитие повреждений в межслоевом пространстве - могут быть в значительной мере сглажены формированием пространственно-армированной структуры армирующей системы с усилением трансверсальных связей. Одним из способов изготовления толстостенных деталей сложной конфигурации из композиционных материалов является их изготовление путем механической обработки заготовки, схема армирования которой соответствует геометрии будущей детали [1-5]. Основой такой технологии служит формирование пространственно-армированного волокнистого каркаса, который определяет морфологию заготовки. Такие пространственно-армированные каркасы, используемые в конструкциях на основе углеродных материалов, обеспечивают возможность производства многофункциональных изделий большой толщины и разнообразной формы. Полимерные композиционные материалы на основе пространственно-армированных преформ обладают повышенным сопротивлением динамическим и ударным нагрузкам, высокими характеристиками выносливости и трещиностойкости, повышенной теплопроводностью и высокой прочностью в зонах отверстий [6-10].

Различают два вида технологий получения волокнистых пространственно-армированных заготовок композиционных материалов:

- межслойное армирование, с долей трансверсальной составляющей до 25%, достигаемое с помощью технологий 3D-ткачества, прошивки и иглопробивных методов;

- пространственное армирование путем выкладки стержней и нитей, объёмного плетения и объёмного трикотажа.

Разнообразные технологии преформ пространственно-армированных композитов имеют свои ограничения, связанные со схемой армирования, применяемыми материалами, геометрией и толщиной заготовки. Так, технологии пространственных каркасов не позволяют достичь сопоставимую со слоистыми материалами плотность преформы.

Технологии межслойного армирования повышают уровень сопротивления сдвигу, но в процессе образования межслоевых связей, происходит повреждение армирующей системы основы.

Основными параметрами, характеризующими уровень технологичности различных способов производства объёмных преформ, следует считать:

- максимальная плотность преформы;
- относительная доля пространственного армирования;
- шаг армирования;
- прочность в плоскости слоя.

Ниже представлен краткий анализ отличительных особенностей существующих методов формирования пространственно-армированных композиционных материалов.

1. Иглопробивная технология позволяет получать преформы с достаточной, для обеспечения требуемого уровня механических свойств, частотой межслоевых связей. Однако эти связи имеют существенное ограничение по глубине, что сказывается негативно на теплопроводности материала при большой толщине. Кроме того, при иглопробивании повреждается армирующая система основы, снижая прочностные характеристики в плоскости слоя [11].

2. В процессе создания волокнистых заготовок методом объёмного ткачества армирующие нити многократно изгибаются и перетираются, снижая значения осредненного модуля упругости заготовки. Высокая степень истирания углеродной ПАН-нити в процессе формирования трансверсальных связей этим методом обуславливает физическое ограничение по толщине заготовки [12].

3. Типовой процесс прошивки при помощи иглы в форме крючка или при помощи двух нитей имеет ограничение как по толщине заготовки, так и по используемым нитям по причине сложной траектории движения иглы, большим количеством сложений нити с малым радиусом кривизны. Для снижения этого эффекта возможно применение только кручёных ПАН-нитей с большим количеством аппрета или нитей из вязкого углерода;

4. Прошивка, известная как метод «тафтинг» (иногда KSL-tufting, по названию разработчика оборудования) (рис. 1), заключающийся в создании пространственно-армированной структуры путем введения, с помощью специальных игл, пучка армирующих волокон в виде жгутов или нитей, что позволяет реализовать заданную схему армирования с шагом от 3мм для заготовок толщиной до 35мм, а также обеспечивает возможность прошивки под углом до 45°.

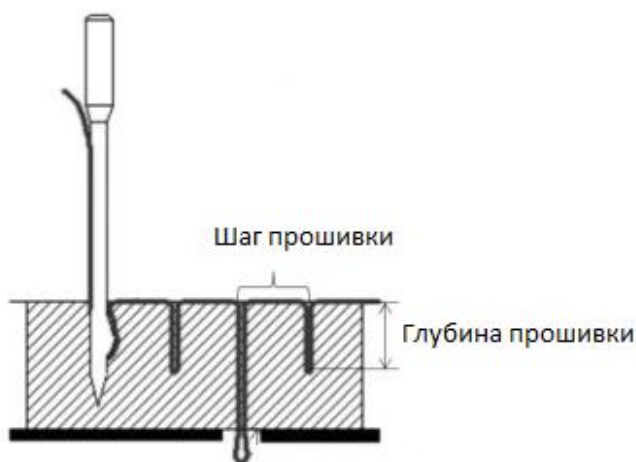


Рис. 1. Схема реализации метода тафтинга

Основные преимущества организации межслоевых связей методом тафтинга:

- нить фиксируется в натянутом виде, отсутствуют петли и перегибы;
- реализуется пространственная связь, проходящая через весь пакет, что не реализуется в межслоевых связях иглопробивных преформ;
- существует возможность создание сложной пространственной ориентации (прошивка одного пакета с разным шагом под различными углами);
- возможно использование разнородных армирующих материалов.

По результатам актуальных исследований [13-16] отмечаются существующие проблемы реализации технологии прошивки, связанные с истиранием как волокон прошивающей нити, так и волокна основы в процессе армирования. Истирание волокон при движении иглы является основной причиной снижения физико-механических характеристик и образования дефектов в виде структурных неоднородностей и концентраторов напряжений типа карманов [17-18].

Целью данной работы является оценка эффективности использования способа прошивки для создания пространственно-армированных заготовок углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) толщиной более 50 мм.

В качестве объекта исследований рассмотрена технология тафтинга, модифицированная для получения толстостенных высокоплотных заготовок УУКМ с массовой долей пространственной армирующей компоненты не менее 2%. Установлено, что предлагаемая модифицированная технология тафтинга позволяет реализовать произвольную схему армирования с шагом от 2мм. Эксперимент подтвердил возможность осуществлять прошивку слоистого пакета из углеткани толщиной 180 мм под углом 60° с минимальным истиранием армирующей нити.

Для выполнения программы исследования изготовлено три преформы размером 200x100x50мм для последующего совмещения по технологии многократной пропитки расплавом каменноугольных пеков. Слоистый пакет сформирован из 150 слоёв ткани УТ-900-3К-240-ЭД с поверхностной плотностью 240 г/м². Масса слоистого пакета составила 765г, шаг прошивки 5 мм. Введение армирующих нитей осуществлялось по модифицированной технологии, обеспечивающей их минимальное истирание. Отличие этой технологии от известной KSL-Tufting заключается в особой кинематике установки и оригинальной форме иглы. Экспериментально установлено, что разрывная прочность жгута УКН-М-3К-ЭД из ПАН-волокна, изъятая из преформы, составляет в среднем 83% от исходного, что является хорошим результатом для заготовки толщиной 50мм.

Предлагаемая модифицированная технология тафтинга дает уникальную возможность увеличить плотность волокнистых заготовок композиционных материалов, обеспечивая допустимый уровень повреждения во-

локон при прошивке. Для этого при введении трансверсальных армирующих элементов слоистый пакет фиксируется в закрытой жёсткой оснастке. С целью увеличения плотности преформы армирующие нити вводятся через жёсткую сетку-направляющую, не позволяющую заготовке увеличиваться в объёме. Увеличение плотности подтверждается результатами оценки массы заготовок. Массовые характеристики волокнистых заготовок, определенные взвешиванием оснастки с преформой, представлены в табл.1.

Таблица 1. Параметры волокнистых заготовок

Материал	Масса, г	Плотность, г/см ³	Массовое содержание армирующего жгута, г	Относительное массовое содержание армирующего жгута, %
Исходный слоистый пакет	765	0,765	-	-
Армирование жгутом 3К	779	0,779	14	1,8
Армирование жгутом 6К	793	0,793	28	3,5

Эксперименты также показали, что модифицированная технология дает возможности увеличения плотности преформы путем увеличения линейной плотности прошивной нити и уменьшения шага прошивки. Кроме того, при уменьшении плотности исходного слоистого пакета изменением относительного содержания пространственной составляющей в объёмной преформе возможно изменять морфологию полуфабриката. Путём варьирования плотности исходного пакета и относительного содержания пространственной составляющей в объёмной преформе достигается управление анизотропией свойств материала. Это является существенным преимуществом предложенной технологии, которая позволяет, например, поддерживать требуемый уровень относительного содержания армирующих волокон в заданном направлении.

Каркас оснастки для прошивки изготавливается из графита для использования этой оснастки, в дальнейшем, при пропитке матрицеобразующим расплавом пеков и многократной термообработке.

Образцы для проведения испытаний для определения физико-механических свойств были получены механической обработкой заготовки. Результаты стандартных механических испытаний приведены в табл. 2.

Результаты механических испытаний показали, что пространственно-армированный композиционный материал, изготовленный с использованием модифицированной технологии прошивки-тафтинга, превосходит по своим физико-механическим свойствам аналоги – конструкционные углерод-углеродные материалы:

- более чем на 50% по показателю межслоевой сдвиговой прочности;
- на 50% по теплопроводности в трансверсальном направлении;
- на 12% по коэффициенту линейного температурного расширения в диапазоне 25-1500°C;
- в 4 раза по показателю ударной вязкости.

Таблица 2. Сравнительные физико-механические свойства пространственно-армированных композиционных материалов

Характеристика	Новый материал	МК У4 М-7	КИМ Ф	Ипресс-кон
Средний коэффициент линейного температурного расширения в плоскости слоя $\alpha \cdot 10^6$ (1/К) 25-1500°C	1,76	2,5	2,7	2,0
Ударная вязкость, КДж/м ²	44±7	-	10	-
Плотность, кг/м ³	1,74	1,97	1,7	1,75
Теплопроводность трансверсальная, Вт/(м К)	12,63±0,9	50	5,4	8
Теплопроводность в плоскости слоя, Вт/(м К)	18,4	65	8,6	16
Разрушающее напряжение при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	102	103	74	140
Разрушающее напряжение при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	133	67	49	20
Модуль упругости при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	55,7	51,9	-	-
Модуль упругости при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	65,3	34,0	-	-
Разрушающее напряжение при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	115	96	180	180
Разрушающее напряжение при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	188±75	135	215	240
Модуль упругости при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	33,9	49,6	-	-
Модуль упругости при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	8.9±3.8	19,1	-	-

Наиболее важной характеристикой эксплуатационных свойств пространственно-армированных материалов является межслоевая сдвиговая прочность, увеличение которой чаще всего является целью создания межслоевых связей прошивкой. В таблице 3 приведены значения предела прочности при межслоевом сдвиге, определенного по методу испытания на трёхточечный изгиб образцов с надрезом материала, изготовленного по модифицированной технологии прошивки и некоторых известных углерод-углеродных композитов, классифицируемых как конструкционные.

Таблица 3 – Характеристики сопротивления межслойному сдвигу разработанного материала и аналогов

Материал	Межслоевая сдвиговая прочность $\tau_{сд}$, МПа
Новый материал	17,4 ±0,7
ТЕРМАР-АДФ	9,95±1,96
ГРАФИКИТ-2000	6,58±0,71
ГРАФИКИТ-2400	5,72±2,56

Анализ свойств материалов-аналогов позволяет отметить преимущество предлагаемого материала в области теплофизических свойств, обеспечиваемое повышенной плотностью новой преформы и наличием пространственных связей в виде натянутых жгутов. Пространственные каркасы существующих толстостенных пространственно-армированных материалов формируются на основе регулярных систем из пултрузионных высокоплотных стержней (МКУ4М-7) или из натянутых нитей (КИМФ), не позволяющих реализовать высокую плотность каркаса, что обуславливает заниженные теплофизические характеристики и повышенное значение коэффициента линейного температурного расширения. Современный материал «Импресскон», основой которого служит преформа, изготовленная по модифицированной иглопробивной технологии, обладает достаточным для обеспечения высокой жесткости количеством трансверсальных связей, однако, существенно теряет при этом в прочности в плоскости слоя. Предлагаемый новый материал лишен этих недостатков.

Анализ экономических показателей технологического процесса модифицированной прошивки указывает на высокий уровень затрат для выполнения этой операции, так как все операции выполняются на лабораторной установке в ручном, частично механизированном режиме. Разработка автоматизированного оборудования для модифицированной прошивки позволит снизить себестоимость процессов создания пространственно-армированных волокнистых заготовок композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования России по реализации комплексного проекта, код 2017-218-09-172.

Список использованной литературы

1. Донецкий К.И., Раскупит А.Е., Хиллов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А. Л. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов. - Труды ВИАМ, 2015, №9. С. 77-85
2. Бухаров С.В., Лебедев А.К., Зинин А.В., Базаев Е.М. Технология пространственно армированных полимерных волокнистых композиционных материалов в аэрокосмической технике. – В сборнике: Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники. Сборник докладов II Научно-технической конференции. ФГУП ВИАМ. 2015. С. 14.
3. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.М., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ. - Авиационные материалы и технологии. 2013, №1. С. 45-49
4. Dransfield K, Baillie C, Mai Y-W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching. A review. Composites Science and Technology. 1994. V.50, №3. p.305–317
5. Dell’Anno G, Treiber J, Partridge I. Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 37. 10.2016
6. L. McKague, Thermoplastic resins, in: D.B. Miracle, S.L. Donaldson, S.D. Henry (Eds.), ASM Handbook, V. 21: Composites, ASM International, Ohio, 2001, pp. 135–139.
7. Karuppanan, D., Sivaraman, V., Gaddikeri, K.M., Sundaram, R. and Ramesh, A., Effect of tufting on mechanical properties of laminated composites. In ISAMPE National Conference on composite Materials, pp. 2–3.
8. Masters J.E. Improved impact and delamination resistance through interleaving. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications; 1989. p. 317
9. Kinloch A.J., Masania K., Taylor A.C., Sprenger S., Egan D. The fracture of glassfibre-reinforced epoxy composites using nanoparticle-modified matrices. Journal Materials Science. 2008
10. Dang H., Zhu D., Wan F., Zhou W., Luo F. Influence of the C/C preform density on tribological characteristics of C/C-SiC composites under different conditions. // Ceramics International. 2015
11. Zhuan Xiao, Peng Zhang, Bengu Li, Yang Lu. Preparation and tribological properties of C/C-SiC brake composites modified by in situ grown carbon nanofibers. // Ceramics International. 2010. V.41 №10, p.1016
12. Tong Y, Bai S, Qin QH, Zhang H, Ye Y. Effect of infiltration time on the microstructure and mechanical properties of C/C-SiC composite prepared by Si- Zr10 alloyed melt infiltration.// Ceramics International. 2015
13. Wan, F., Liu, R., Wang, Y., Cao, Y., Zhang, C., James Marrow, T., In situ observation of compression damage in a 3D needled-punched carbon fiber-silicon carbide ceramic matrix composite. // Composite Structures. 2018.

14. Zhang J, Luo R, Xiang Q, Yang C. Compressive fracture behavior of 3D needle-punched carbon/carbon composites. // Materials Science and Engineering. 2011. V. 528, № 15, p. 5002-5006
15. Zhang, D., Sun, M., Liu, X., Xiao, X., Qian, K., Off-axis bending behaviors and failure characterization of 3D woven composites. // Composite Structures. 2018.
16. Chen, X., Zhang, Y., Xie J., Du, P., & Chen, L. Robot needle-punching path planning for complex surface preforms. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018. V.50. Issue C, p. 132-139.
17. Mouritz A., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. // Composites Structure. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. V.41, №6, p.709–28
18. Bigaud, J., Aboura, Z., Martins, A. T., Verger, S. Analysis of the mechanical behavior of composite T-joints reinforced by one side stitching // Composite Structures. 2018. V.184, p.249–255.

УДК 621.37

Автоматизированное определение наличия неисправности в узлах трения маслосистемы авиационных двигателей Д30КП по результатам СВЧ-плазменных измерений

А.Ю. Ходунаев^{1,2}

- 1) Иркутский государственный университет, г. Иркутск, б. Гагарина 20
- 2) Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Разработан классификатор технического состояния "исправен\особый контроль\неисправен" двигателей Д30КП по результатам СВЧ-плазменных измерений примеси в пробах смыва. В основу классификатора положен "случайный лес", алгоритм машинного обучения. В исходных данных для обучения техническое состояние было определено экспертным методом и подтверждается заводской разборкой. Для проверочной выборки, результат классификатора совпадает с экспертным методом в 82%, 58%, 78% случаев для состояний "исправен\особый контроль\неисправен", соответственно.

Ключевые слова: *экспертные системы, диагностика двигателей, машинное обучение*

Для оценки технического состояния узлов и агрегатов, омываемых смазочным маслом, в НИИ прикладной физики Иркутского госуниверситета разработан атомно-эмиссионный СВЧ-плазменный спектрометр и технология диагностирования авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1]. По величине измеренных параметров металлической примеси в пробе масла и пробе смыва принимается диагностическое решение.

Достоверность диагностирования узлов трения маслосистемы двигателей Д30КП с использованием лабораторного образца СВЧ-плазменного спектрометра составила 80% с точностью вплоть до дефектного узла и подтверждена данными заводской разборки [2].

Тем не менее, вследствие большого количества параметров примеси, измеряемых СВЧ-плазменным спектрометром, принятие диагностического решения требует высокого уровня подготовленности эксперта и поэтому актуальна автоматизация этого процесса.

Проблема формального определения алгоритма принятия диагностического решения экспертным методом, согласно которым можно было бы реализовать ПО, не решалась. Диагностика проводилась на основании сравнения со статистической моделью исправного двигателя. Однако, ни один из разработанных диагностических признаков или их совокупность не позволяли провести границу, по которой возможно было бы достоверно отделить исправный двигатель от неисправного.

В работе был проведен анализ параметров примеси в пробах смывов измеренных с помощью СВЧ-плазменного метода с использованием статистических методов и методов машинного обучения с целью создать систему, позволяющую грубо, но автоматически, определить техническое состояние двигателя.

В исходную выборку вошли данные с двигателей Д30КП, имевшие наработку более 500 часов после ремонта. Распределение проб по состояниям приведено в таблице 1.

Таким образом, в выборке присутствуют информация о дефектах коробки приводов, турбины высокого давления (подшипника, сепаратора), и межвального подшипника. Состояние "особый контроль" присваивается двигателю, когда эксперту не удастся явно определить дефектный узел, но есть основания полагать наличие дефекта, так как отмечено превышение параметрами граничный значений.

Таблица 1. Распределение проб по состояниям

№	Состояние, определенное для пробы	Количество проб
1	в норме	342
2	особый контроль	213
3	дефект в КП	16
4	дефект ТВД	16
5	дефект МВП	2

Информация о частицах изнашивания при СВЧ-плазменных измерениях представлена следующими признаками:

1. Массовая доля элемента в пробе масла, находящегося в виде субмикронной примеси или в виде дискретных частиц размером менее 2 мкм, Ср (г/т);
2. Массовая доля, находящегося в пробе масла в виде дискретных частиц износа размером от 2 до 60 мкм, Сч (г/т);
3. Количество частиц износа определенного элементного состава (Al-Cu, Fe-Ni и т. д.), из 8 возможных элементов (Al, Cr, Ni, Cu, Fe, Ag, V, Mg), N (см-3). Частицы из одного элемента называются "простыми", частицы из двух и более — "сложными";
4. Средний размер частиц износа каждого измеряемого элемента, D (мкм);
5. R – "рейтинг" частиц определенного элементного состава R (%). Определен как вклад количества этих частиц в общее количество измеренных частиц износа.

В работе основное применение получили рейтинги, так как они наиболее часто используются экспертами при диагностике проб смыва. Вследствие того, что количество возможных составов отдельного рейтинга составляет $2^8 - 1 = 255$ и требует учесть 255 различных признаков при сравнительно небольшой выборке, актуально уменьшение размерности.

Для этого была проведена работа по конструированию признаков, состоящая в следующем. Рейтинги были разделены на две группы.

В первую вошли рейтинги частиц, состоящих из одного элемента и частиц из нескольких элементов, содержащих определенный элемент.

Во вторую группу вошли рейтинги сложных частиц, имевшие более 30 различных значений по выборке.

Все признаки были приведены к нормальному распределению методом Йео-Джонсона (Yeo-Johnson), после чего было подсчитано количество превышений ими границы, кратной 2, 2.5 и 3 стандартным отклонениям (т. н. "сигма-сумма") по каждой из групп в отдельности.

На рисунке 1 приведено сравнение рейтинга сложных частиц, содержащих железо (слева) и "сигма-суммы" первой группы (справа).

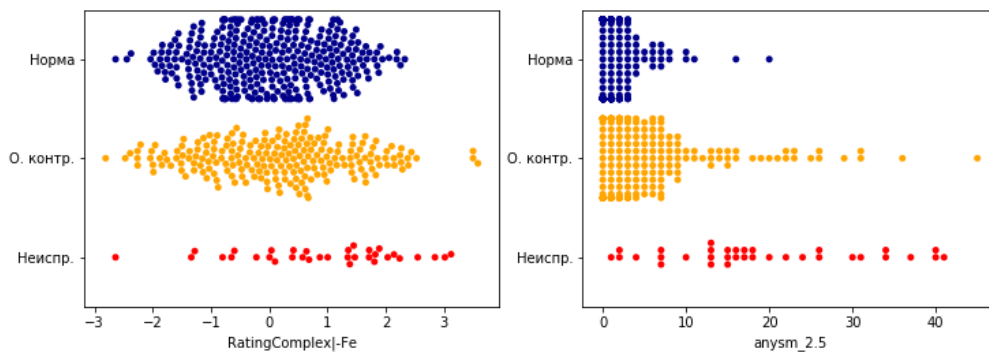


Рис. 1. Сравнение рейтинга сложных частиц, содержащих железо (слева) и "сигма-суммы" первой группы (справа).

Точками обозначено количество проб определенного состояния, попадающих в определенный интервал параметра, сверху вниз — «исправные», «особый контроль», «неисправные».

Как легко заметить, параметр справа позволяет более четко провести границу между пробами различных состояний — больше точек класса "неисправен" лежит правее максимального значения класса "норма". Рейтинг здесь приведен для примера; подобное распределение имеют почти все параметры с учетом лишь одного элемента.

По данным с новыми параметрами был обучен классификатор состояния на основе «случайного леса», алгоритма машинного обучения.

В качестве классов были выбраны состояния «исправный», «особый контроль», «неисправный»; в проверочную и обучающую выборки попало по половине от каждого класса. Неисправность межвального подшипника была выделена за малочисленностью (2 пробы) и попала только в проверочную выборку. Использовалась реализация алгоритма в пакете sklearn для языка python (sklearn.ensemble.RandomForestClassifier). Матрица ошибок полученного классификатора приведена в таблице 2.

Согласно таблице, для классов «исправен», «особый контроль», «неисправен», состояние было определено достоверно в 82%, 58% и 78% случаев соответственно, и 22% (трем) пробам с неисправностью было присвоено состояние «особый контроль». Из них две пробы — с дефектом межвального подшипника (МВП), отсутствовавшие в обучающей выборке.

Таблица 2. Матрица ошибок классификатора состояния

	Диагноз				Всего проб
		Исправен	О. К.	Неисправен	
На самом деле	Исправен	82%	18%	0	171
	О. К.	35%	58%	7%	107
	Неисправен	0	22%	78%	18

Основной абсолютный процент ошибки связан с неточным определением классов "особый контроль"/"исправен", что по всей видимости связано с отсутствием формального описания класса "особый контроль". Ни одна проба из класса "исправен" не была определена как "неисправен" и наоборот, что свидетельствует о том что выбранные параметры адекватно связаны с техническом состоянии.

Полученный результат позволяет говорить о том, что при помощи данного классификатора техническое состояние может быть определено достоверно в большинстве случаев.

При создании классификатора, значительное влияние оказали два ключевых момента. Первый — снижение до нуля 10-30% ошибки (определение класса "неисправен" как "исправен" и наоборот) путем устранения из рассмотрения проб от двигателей с приработкой (менее 500 часов после ре-

монта). Второй — увеличение достоверности определения класса "неисправен" на 30-40% без заметного увеличения ошибки путем конструирования признаков "сигма-сумма".

Помимо них, было испробовано множество других признаков

- Рейтинг/количество частиц по элементу из n элементов ($n=1..8$)
- Количество элементных составов из n элементов ($n=1..8$)
- Рейтинг "легких" частиц по элементу (сумма рейтингов в частицах из менее 4 элементов)
- Рейтинг "тяжелых" частиц по элементу (сумма рейтингов в частицах из более 4 элементов)
- Соотношение рейтингов "легких" и "тяжелых" частиц
- и т. д.

Их разработка и следовала мысли, что в двигателе с наличием дефекта неисправность будет проявляться через возникновение в протоколе анализа частиц из многих элементов. Это связано с тем, что ранее был использован признак — отношение количества "сложных" и "простых" частиц для определенного элемента, названный "коэффициентом износа" и позволявший провести границу между исправными двигателями и 40-50% неисправных.

В данной работе было обнаружено, что суммы рейтингов сложных частиц по элементу концептуально аналогичны "коэффициентам износа", однако имеют немного более "четкую" границу между "исправными" и "неисправными", поэтому использовались взамен.

Что касается остальных разработанных признаков, то классификаторы, использующие их, не показали значительного увеличения достоверности определения технического состояния, что говорит о том, что связь появления частиц сложных составов с техническим состоянием двигателя, скорее всего, ложная.

Эффективность "сигма-сумм" позволяет сделать предварительный вывод, что техническое состояние двигателя связано с появлением в протоколе анализа пробы статистических выбросов по нескольким признакам одновременно. Однако, очевидно, что не все выбросы одинаково полезны в целях определения технического состояния и проблема определения значимости каждого отдельного из них остается открытой. В этой связи перспективным направлением представляется конструирование признаков для определения наличия дефекта конкретного узла трения. Значимости компонент здесь будут заданы материалом узла и останется лишь определить лишь способ их связывания.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ с использованием результатов работ, выполненных в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2011. 2020 годы» по теме: «Разработка и создание программно-аппаратного СВЧ-плазменного комплекса для мониторинга, контроля и безопасной эксплуатации маслосистемы двигателей

наземного и воздушного назначений». Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ о предоставлении гранта № 14.577.21.0289, 075-02-2018-229. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0289.

Список использованных источников

1. Техсправка №44-517141. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ-15, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом при контроле сцинтилляционным методом за период 2000-2007 гг. – ОАО НПО «Сатурн» – г. Рыбинск – 2008. – С. 18

2. Состояние и перспективы развития спектральной трибодиагностики авиационных газотурбинных двигателей. / Иноземцев А.А., Дроков В.Г., Дроков В.В., Казмиров А.Д., Калошин А.Е. // Контроль. Диагностика – 2012. – № 9. – С. 20-28.

3. Дроков В.Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.14, 05.26.02 / В.Г. Дроков – Иркутск – 2009. – С. 42.

УДК 629.735.33

Координатная модель базирования изделия в технологическом процессе сборки в машиностроении

М.В. Сафонов, Р.Х. Ахатов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

На сегодняшний день в автоматизированной сборке изделия широко используется его координатная модель, представленная значениями координат некоторой совокупности дискретных точек, связанных с этим изделием. Эти точки используются, например, при контроле пространственного положения изделия и при управлении позиционированием при его сборке. При этом выбор состава и положения этих дискретных точек выполняется после решения задачи построения схемы базирования изделия, таким образом они являются косвенными технологическими базами изделия. В статье предлагается дискретные точки, связанные с элементами конструкции изделия, использовать в качестве косвенных технологических баз, задающих схему базирования изделия.

Ключевые слова: *модель базирования, технологические базы.*

В традиционном производстве в технологическом проектировании при построении схемы базирования изделия определяются технологические базы изделия и базы, определяющие необходимые ограничения на перемещение изделия при различных возмущающих воздействиях в процессе его производства и эксплуатации. При этом с учетом правила сохранения единства баз технолог стремится выбрать технологические базы, совпадающие с конструкторскими. Но не всегда это удается, так как учитываются не только геометрические параметры изделия, но и взаимодействие его с другими объектами технологической системы, такими как инструмент, оборудование, технологическая оснастка, средства контроля и др. Поэтому зачастую выбираются технологические базы, не совпадающие с конструкторскими, которые по отношению к последним являются косвенными, и в определенной степени снижают точность изготовления изделия, поскольку увеличивают длину размерной цепи. Однако технологические преимущества выбора косвенных технологических баз определяют их все более широкое использование в современном производстве. Так значительно упрощается технологическая сборочная оснастка при использовании в качестве косвенных технологических баз различных отверстий, связанных с изделием [1]. Широко используются косвенные технологические базы в виде дискретных точек, связанных с изделием, обеспечивающих автоматизацию контроля и пространственного позиционирования изделия [2].

1. Модель базирования изделия.

В традиционном производстве схема базирования определяется как совокупность опорных точек, символизирующих выбранные базы изделия для определения заданного пространственного положения его в выбранной системе координат и наложения необходимых ограничивающих связей на его перемещения (рисунок 1) [3].

В традиционном производстве координатная система основного тела (станины, корпуса, каркаса) задается комплектом баз, относительно которых осуществляется определение пространственного положения всех компонентов сборочной единицы.

Для упрощения на рисунке 1 схема базирования показана в плоскости, где конструкторские и технологические базы символически представлены опорными точками.

При проектировании технологического процесса сборки сборочной единицы выбираются технологические базы, необходимые для решения задачи пространственного позиционирования и текущего контроля положения изделия в процессе сборки.

Совмещение технологических баз с конструкторскими для выполнения задачи позиционирования не всегда целесообразно, поскольку геометрические особенности конструкторских баз в ряде случаев затрудняют их контроль и осуществление направленного перемещения при позиционировании.

Наличие современных технических средств координатного контроля точек, связанных с изделием, таких как лазерный трекер [4], лазерный радар [5], 3D сканер [6], позволяет в качестве косвенных технологических баз выбрать дискретные точки, связанные с изделием, назовем их базовыми точками.

Выбор этих базовых точек обусловлен техническими особенностями применяемых средств координатного контроля и должен удовлетворять ряду условий:

- компонент сборки должен содержать базы, на которых можно выявить и задать положение базовых точек, допускающих их явную физическую связь с изделием или возможность неявной связи, определяемой с использованием технических средств координатного контроля;

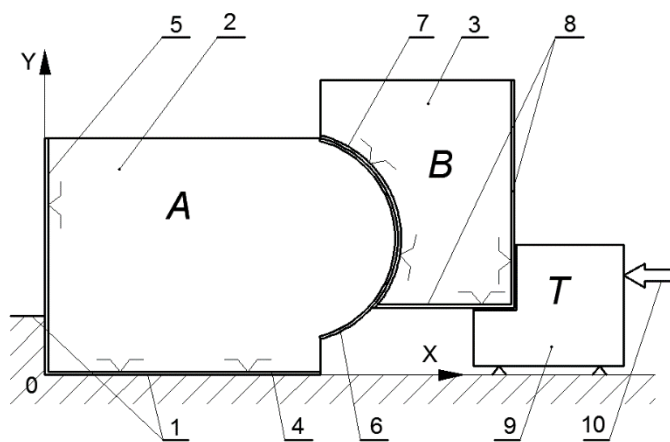


Рис. 1. Схема базирования сборочной единицы: 1 – основное тело, определяющее выбранную систему координат; 2 – компонент сборки *A*; 3 – компонент сборки *B*; 4, 5 – основные конструкторские базы компонента сборки *A*; 6 – вспомогательные конструкторские базы компонента сборки *A*; 7 – основные конструкторские базы компонента сборки *B*; 8 – технологические базы изделия, задающие определенность базирования компонента *B*; 9 – базирующий элемент *T* технологической оснастки, задающий определенность базирования компонента *B*; 10 – элемент технологической оснастки, задающий силовое замыкание сборки.

- носители базовых точек, связанных с изделием должны обеспечивать возможность доступа к ним технических средств координатных измерений при минимальном количестве их переустановок;

- технологические процессы, в которых используются средства координатного контроля, должны исключать критически важные для проведения процедуры измерения помехи, такие как вибрации, ограничения доступа к измеряемой точке, резкие перепады температуры и др.;

- количество базовых точек определяется с учетом однозначной определенности пространственного положения каждого компонента сборочной

единицы, например, для определения пространственного положения детали типа «втулка» достаточно двух базовых точек, для твердого тела – трех базовых точек, не лежащих на одной прямой, тогда как положение в пространстве детали малой жесткости типа «обшивка» достигается заданием множества базовых точек.

Координаты базовых точек, связанных с изделием, позволяют однозначно определить положение изделия в выбранной координатной системе. Таким образом, под координатной моделью базирования будем понимать совокупность базовых точек, связанных с изделием и определяющих однозначное положение изделия в выбранной системе координат. Для показанной на рисунке 1 схемы базирования сборочной единицы координатная модель базирования будет выглядеть как показано на рисунке 2, где также для упрощения показана схема базирования в плоскости.

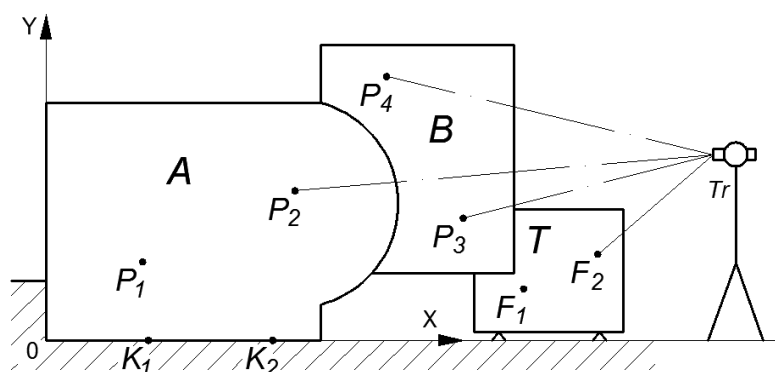


Рис. 2. Координатная модель базирования сборочной единицы:

Координатная система основного тела задает базовую систему координат, которая в пространстве определяется тремя точками (на рисунке 2 в плоскости это точки K_1 и K_2). Конструктивные элементы основного тела определяют базы для задания координатной определенности положения компонента сборки A – базового компонента сборки. Компоненты сборочной единицы имеют координатные модели, представленные базовыми точками: для компонента A – P_1, P_2 ; для компонента B – P_3, P_4 . Сборочная оснастка также может иметь координатную модель, определяемую в собственной или базовой системе координат. Тогда базирующий элемент сборочной оснастки может быть определен координатной моделью – F_1, F_2 .

Значения координат всей совокупности базовых точек, определяющих координатные модели объектов технологической системы, формируются в процессе технологического проектирования. В частности, координатные модели сборочной единицы и технологической оснастки при построении схемы базирования выполняются в системе 3D моделирования. При этом важно учитывать, что положение базовых точек, определяющих

и собственные координатные системы сборочной единицы и технологической оснастки, и базовые точки, определяющие схему базирования, должно быть выбрано с учетом возможности их воспроизведения в физическом пространстве производственного подразделения и с возможностью доступа к ним системы координатных измерений.

Таким образом для решения одной из существенных задач технологического процесса сборки – определение баз для задания пространственной определенности изделия в выбранной системе координат основного тела и управление пространственным позиционированием изделия, координатная модель сборочной единицы может быть принята в качестве схемы базирования, т.е. основного технологического документа для проектирования технологического процесса пространственного позиционирования компонентов сборочной единицы. Такая координатная модель базирования сборочной единицы имеет свои преимущества:

- возможность вариативного выбора косвенных технологических и измерительных баз компонента сборочной единицы, доступных для текущего контроля, особенно когда доступ к контролю явных баз изделия затруднен из-за высокой плотности помех в зоне контроля;
- совмещение косвенных технологических и измерительных баз компонента сборочной единицы для обеспечения координатного контроля положения изделия на различных этапах выполнения технологического процесса сборки с возможностью обеспечения единства и постоянства баз [7];
- и др.

Для уменьшения погрешности координатной модели базирования, связанной с увеличением размерной цепи при определении положения носителей базовых точек изделия может использоваться метод компенсации. Сущность этого метода состоит в том, что на любом этапе передела компонента сборочной единицы, включая этап позиционирования, при определении положения изделия в выбранной системе координат, выполняется процедура калибровки, т.е. измерение действительного положения косвенных технологических баз изделия по его координатной модели относительно конструкторских баз, заданных ранее на этапе технологического проектирования. Выявленные величины отклонений от номинального положения базовых точек координатной модели вводятся в качестве компенсирующей поправки в координатную модель для выполнения очередного этапа технологического процесса сборки.

Предложенная координатная модель базирования конструкции сборочной единицы может быть создана на многих современных предприятиях машиностроительного производства. Для этого необходимо оснащение предприятия системами 3D моделирования и техническими сред-

ствами пространственного координатного контроля базовых точек, связанных с изделием. Такая координатная модель базирования изделия задает однозначную определенность базирования компонентов сборочной единицы, а также возможность без дополнительных преобразований использовать эту модель при решении производственных задач управления пространственным позиционированием компонентов сборки и текущего контроля их пространственного положения в выбранной системе координат данной технической системы.

Список использованной литературы:

1. Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А., Громашев А.Г. и др. «Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов», Москва: Аграф-пресс, 2006. - 304 с.
2. Штарк, Ульрих, Шрикель, Йорг, Брандт, Вольфганг, «Устройство и способ для пространственного ориентирования по меньшей мере двух компонентов подгрупп», Патент 2533984 Российская Федерация, МПК В64F 5/00, В21D53/92 по заявке: 2011148902/02 от 10.06.2013. Опубликовано 27.11.2014, 15 с.
3. ГОСТ 21495-76 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения». Москва : Издательство стандартов, 1987. - 35 с.
4. Leica Geosystems Official Site (Electronic materials) http://metrology.leica-geosystems.com/en/Laser-Tracker-Systems_69045.htm.
5. Nikon Metrology Official Site (Electronic materials) <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/laser-radar-mv331-351>
6. API Official Site (Electronic materials) <https://apisensor.com/products/3d-non-contact-systems>
7. Ахатов Р.Х., Однокурцев К.А., Зыкова Е.В., Богданов К.В., Поленов А.Г. «Способ сборки изделия на нескольких рабочих этапах, комплекс сборочных приспособлений и используемое в них переносное сборочное приспособление», Патент 2517920 Российская Федерация, МПК В64F 5/00 по заявке №2012154849 от 19.12.2012/ Опубликовано 10.06.2014, 19 с.
8. Авраменко В.Е., Индаков Н.С., Курзаков А.С. «Базирование и базы в машиностроении», Учебное пособие. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. — 169 с.
9. Колкер Я.Д., Руднев О.Н. «Базирование и базы в машиностроении», К.: Высшая школа, 1991. – 100 с. – Для студентов машиностроительных вузов.
10. Маталин А.А. «Конструкторские и технологические базы», М.-Л.: Машиностроение, 1965. — 208 с.

УДК 629.7.083

Анализ технологии постановки болт-заклепки

А.В. Стрельников

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Цель работы: рассмотрение технологии постановки болтовых заклепок с натягом, выявление основных проблем и пути их решения.

Результат. Были проанализированы типы болтовых заклепок, соединения с их использованием и области применения в самолетостроении. Ознакомление с технологическим процессом постановки болтовых заклепок и выполнение соединений. Описаны методы выполнения отверстий под заклепки, используемое современное оборудование и методы установки стержней и обжатия колец болт-заклепочных соединений.

Заключение. Проведенные исследования позволили выявить как сильные, так и слабые стороны технологии сборки при помощи болтовых заклепок с натягом, а также обозначить направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: *болт-заклепочное соединение, пакет, сборка с осевым натягом, технология сборки ЛА (летательных аппаратов).*

Разрушение конструкций ЛА происходит в основном в местах соединений конструкций. По этой причине при постановке болтовых заклепок необходимо следовать основным привалам: обеспечение правильной обработки отверстий; обеспечение осевого и радиального натяга.

Использование болтовых заклепок упростило сборку конструкций т.к. данный метод обеспечивает односторонний подход при сборке, а также клепку в труднодоступных местах. Использование болтовых соединений в большой степени увеличивает вес конструкции, а также является не целесообразным решением в летательных аппаратах.

Соединение деталей, узлов, панелей и агрегатов самолета и любого летательного аппарата производится с помощью заклепок, болтовыми элементами, клеями, клее-клепкой, сваркой и клее-сваркой, пайкой.

Особо надежным и в большей степени распространенным на данный момент является метод соединения элементов в конструкции самолета заклепочным соединением. Использование заклепок дает преимущество перед другими соединениями по прочностным, экономическим и технологическим показателям, а самым важным образом это степенью освоения и оснащенностью технологических процессов [1].

Для того чтобы минимизировать объем ударной клепки в ходе производства современных летательных аппаратов в клепаных конструкциях

все чаще используют фиксацию с односторонним подходом, это способствует выполнять сборочно-клепальные и другие ремонтные работы в труднодоступных участках, в большей степени сокращая при этом трудоемкость, исключается звук и вибрация.

Широкое применением обладают:

- стержневые заклепки (заклепки с сердечником);
- гайка – пистон;
- заклепки с повышенным сопротивлением срезу (для одностороннего подхода);
- стержневые заклепки с повышенным сопротивлением срезу;
- болтовые заклепки.

Главной причиной повышения работоспособности точечных соединений является присутствие осевого натяга нужного и устойчивого параметра. Возможность обеспечения данного фактора лучше всего осуществляется в болтовых заклепочных соединениях, в которых происходит усилие сжатия пакета в пределах 55...75% от разрушающей нагрузки стержня. Осевой натяг в болтовых заклепочных соединениях возможен и вместе с радиальным.

Самым главным направлением в самолетостроении является качество соединённых узлов. Методы и средства контроля качества клепаных швов узлов и агрегатов. Многолетняя практика эксплуатации летательных аппаратов показывает, что наличие разрушений в конструкции часто определяется качеством выполнения клепаных и болтовых соединений. Основная функция клепаных соединений состоит в передаче усилия с одного элемента конструкции изделия на другой [2].

Клепанные соединения должны обеспечивать:

- требуемую прочность, жесткость и выносливость;
- гладкость поверхности соединяемых деталей;
- антикоррозионную стойкость;
- герметичность швов изделия.

Качество установленных болт-заклепок, контролируется визуально в соответствии с нормативным документом на их постановку.

Внедрение робота.

Актуальность данного направления заключается в том, что при роботизированной постановке заклепок, получается, значительно сократить время на выполнение операций по сборке самолета, при этом значительно увеличив качество сборки по сравнению с ручной постановкой заклепок. Такое развитие автоматизации приведет к уменьшению общего числа рабочих за счет сокращения малоквалифицированных специалистов, и в перспективе полностью автоматизированные производства будут обслуживаться минимальным числом высококвалифицированных специалистов-наладчиков сложного оборудования.

Преимущества автоматизированной сборки:

- повышение производительности труда;
- сокращение длительности производственного цикла;
- уменьшение заделов незавершенного производства и ускорение оборачиваемости оборотных средств;
- повышение качества продукции, снижение брака;
- снижение себестоимости продукции.

Технологический процесс постановки болт-заклепки

В состав болтовой заклепки входит: стержень 1 и кольцо 2 (см рис.1). Стержень болтовой заклепки содержит головку «а» рабочую зону «б» и технологический хвостовик «в». Между рабочей частью и хвостовиком исполнена канавка, по которой после формирования замыкающей головки осуществляется, отрыв технологического хвостовика. Рабочая зона состоит из: гладкая цилиндрическая и профильный участок с кольцевыми канавками, которые заполняются материалом кольца в ходе его обжатия прессом.

На технологическом хвостовике сделаны специальные кольцевые ребра, необходимые для захвата стержня кулачками пресса.

Кольцо 2 представляет из себя цилиндр, внутренний диаметр у которого больше, чем диаметр с ребристой зоной стержня болтовой заклепки.

Технологический процесс производства соединения болтовыми заклепками включает в себя пять главных действий:

- 1) выполнение отверстий в пакете;
- 2) выполнение гнезд под потайные головки;
- 3) вставку стержней в отверстия;
- 4) формирование замыкающих головок (сжатие колец прессом);
- 5) контроль качества готового соединения.

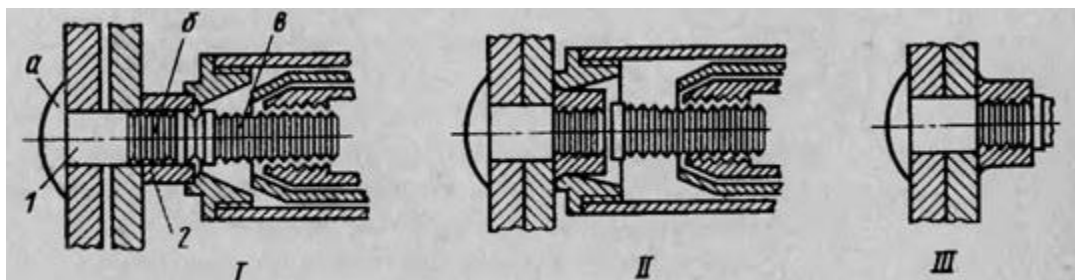


Рисунок 1 - Последовательность установки болтовой заклепки:

I —установка пресса на технологический хвостовик; II —сжатие кольца прессом; III — отрыв технологического хвостовика и съем пресса с обжатого кольца

1. Выполнение отверстий в пакете под болтовые заклепки. Необходимо соблюдать качество отверстий, который должен соответствовать качеству гладкой части болтовых заклепок, за исключением случаев, специально помеченных на чертежах.

Под галтель требуется выполнять фаски в полученных отверстиях,

для того чтобы между закладными головками болтовых заклепок и поверхностью детали или гнезда не было зазора.

Для этой операции используют зенковки с ограничительными насадками. В отверстиях Н12 фаски снимают после операции сверления отверстий окончательного размера, в отверстиях Н7 — перед первым черновым развертыванием или протягиванием.

2. Образование гнезд под потайные головки болтовых заклепок выполняется при помощи зенковок с ограничительными насадками. Гнезда под потайные головки болтовых заклепок в отверстиях Н12 зенкуют после сверления отверстий окончательного размера, а под болтовые заклепки Нб — перед черновым развертыванием или протягиванием.

Как правило операции образования гнезд и снятие фасок под галтель потайных головок болтовых заклепок выполняют одновременно зенковками с двойными углами заточки.

В труднодоступных участках, указанных в технологическом процессе, разрешено образование гнезд зенкером без упора (или сверлом, заточенным соответствующим образом).

3. Вставка стержней болтовых заклепок, имеющих диаметр гладкой части по h6, производится вручную — не сильным ударом молотка из алюминиевого сплава (посадка стержней в отверстия соответствует Н1/И6). Стержни болтовых заклепок, изготовленные по 12-му качеству, вставляют в отверстия без использования какого-либо приспособления.

4. Образование замыкающих головок болтовых заклепок. Порядок выполнения процесса образования замыкающей головки болт-заклепки показана на рис. 1.

5. Контроль качества соединения. Качество выполнения операций постановки болтовых заклепок контролируется пооперационно и окончательно.

Операционному контролю подвергаются отверстия и длины болтовых заклепок.

При окончательном контроле проверяют:

- конструктивное оформление соединения в целом;
- тип и материал болтовых заклепок;
- состояние поверхностей соединяемых деталей;
- форму и размер замыкающих головок;
- выступание или западание потайных головок болтовых заклепок;
- плотность прилегания головок болтовых заклепок к поверхностям соединяемых деталей;
- состояние поверхностей закладных и замыкающих головок болт-заклепок.

Контроль конструктивного оформления соединения состоит в кон-

тролировании правильности расположения болтовых заклепок в швах, прямолинейности швов, отсутствия хлопунгов, провалов, величины перемычек и др.

Тип и материал болтовых заклепок устанавливают визуально.

Состояние поверхностей соединяемых деталей, закладных и замыкающих головок анализируют визуально, при необходимости применяя лупу. Определяют наличие: вмятин, царапин, рисок и других механических повреждений.

Форму и размеры замыкающих головок анализируют шаблоном. Выступание или западание закладных головок болт-заклепок определяют с помощью индикаторного устройства. Плотность прилегания закладных головок стержней к поверхностям соединяемых деталей определяют щупом [3].

Заключение.

Исследования помогли более подробно разобраться в технологии сборки с применением болтовых заклепок:

- анализ технологии сборки показал, что болт-заклепочные соединения по ряду параметров представляют собой эффективный процесс, требующий дальнейшего совершенствования.
- имеются проблемы при разделке отверстий с полем допуска Н7 и при втягивании стержней болт-заклепок в отверстия.
- подбор сложного оборудования для решения поставленной задачи и увязка его для правильного взаимодействия.

Список использованной литературы:

1. П.Д.Самсонов. Проектирование и конструкции гидросамолетов. НКТП ГУАП Моск. авиац. инст. 1936. 541 с.
2. Вашуков Ю.А., Ломовской О.В., Шаров А.А. Технология и оборудование сборочных процессов. 2011. — 179 с.
3. А.П. Худайберганов, А.Я. Черняк Справочник молодого слесаря-сборщика летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1987. — 88 с.
4. Юргенс, В.Ф. Технология самолетостроения / В.Ф. Юргенс. - Москва : Государственное издательство оборонной промышленности, 1943. - Книга 1. Основы самолетостроения и подготовка производства. - 140 с.
5. Абибов А.Л. и др. Технология самолетостроения. Учебник для авиационных вузов. Издание второе, переработанное и дополненное. Под редакцией профессора А.Л. Абибова. М Машиностроение. 1982г. 551с.
6. Павлов В.В., Медведев Б.А., Хухорев В.С. Технология сборки самолетов и вертолетов. Теоретические основы сборки. Учебник для вузов. В 2-х томах. Том-1 1993г. 288с.

7. Ершов В.И. под ред., Павлов В.В. Технология сборки самолетов и вертолетов: учебник для вузов. "Самолето и вертолетостроение" В 2-х т. Т2 2017г.
8. С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев и др. Учебник для вузов / Проектирование самолетов 1983 г. — М.: Логос, 2005. — 648 с.
9. И.М.Колганов, В.А.Ильин. Технология сборки самолетов. Методические указания по проведению лабораторных работ в условиях производства / 1993. - 32 с.
10. Г.Б.Строганов, Ю.Г.Ронг и др. Под общей ред. Г.Б.Строганова «Технологическое обеспечение авиационного производства /,- М.: Машиностроение , 1991г.- 368 с.
11. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов. Машиностроение 2-е издание. 1995г.
12. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов: Справочник .- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1984.- 552 с.

УДК 620.165.29

Метод проведения испытаний на герметичность неразъемных и разъемных стыков элементов летательных аппаратов с помощью тепловизора

А.В. Ветлугин, И.Н. Зотов

Приведены результаты анализа современных методов и аппаратуры, используемой в самолетостроении при контроле герметичности герметичных отсеков, кабин, топливных баков и трубопроводов. Сделаны выводы о применимости отдельных методов контроля в условиях современного производства.

Ключевые слова: *герметичность; контроль; утечка; теплограмма; тепловизор.*

В процессе производства летательных аппаратов, необходимо оценивать общую герметичность, а также производить контроль местных утечек крупногабаритных объектов – таких, как топливные и другие баки, отсеки фюзеляжа и крыла, а также других герметичных элементов конструкции.

В настоящее время в различных областях техники широко применяют контроль изделий с помощью проникающих веществ. Методы испытаний различаются по виду проникающих веществ (жидкости или газы), назначению, областям применения, используемой технологической оснастке и др. Жидкие или газообразные пробные вещества проникают через несплошности конструкции вследствие наличия перепада давлений на

ее стенке или за счет капиллярных сил. Для конструкций, работающих под избыточным относительно атмосферного давлением, перепад давлений считают положительным, для вакуумных – отрицательным, а для конструкций с разомкнутым объемом – равным нулю [1].

Методы испытаний, при которых индикаторное вещество проникает через неплотности при положительном перепаде давлений, называют компрессионными, а при отрицательном – вакуумными.

В зависимости от способа индикации первичной информации различают гидравлические, капиллярные, пузырьковые (пневматический, пневмогидравлический, вакуумный), манометрические (падение и нарастание давления, дифференциальный, микроманометрический), химический, искровой, акустический, радиоактивный, галогенный, катарометрический и масс-спектрометрический методы испытаний. Области применения методов определяются их чувствительностью к обнаружению течей, производительностью, стоимостью, безопасностью проведения работ, возможностью механизации и автоматизации контроля.

Контролю на герметичность подвергают изделия, у которых на протяжении заданного времени должно сохраняться заданное давление рабочего или контрольного вещества либо утечка рабочего вещества не должна превышать допустимого значения. Эти величины задают в технических условиях (ТУ) на изготовление изделий. К изделиям, испытываемым на герметичность, относятся корпуса судов, летательных аппаратов, ядерных реакторов, изделия холодильной и вакуумной техники, агрегаты и соединяющие их элементы гидравлических и газовых систем, трубопроводы и многие другие.

Нарушения герметичности изделий обусловлены неплотностями материала, из которого изготовлены их элементы и узлы, а также неплотностями в соединениях этих элементов и узлов друг с другом. Требуемую герметичность соединений обеспечивают путем совершенствования их конструкций и технологических процессов сборки, сварки и др. Для отсеков, находящихся под избыточным давлением, требования к герметичности определяются их объемом и допустимым изменением давления в них в течение времени. Иногда исходят из условий допустимого повышения концентрации вытекающего из объема в окружающее пространство газа.

При испытаниях вакуумных систем следует иметь в виду возможность ложных натеканий, не связанных с нарушениями герметичности оболочки системы, но препятствующих получению или сохранению необходимой степени разрежения. Ложные натекания могут быть вызваны процессами газыделения из твердых тел и так называемыми «внутренними течами», представляющими собой каналы, соединяющие с откачанным объемом замкнутую полость внутри оболочки, образовавшуюся в процессе изготовления и содержащую газ, в среде которого осуществлялась герметизация изделия.

Существенное влияние на режим откачки контролируемых вакуумных систем оказывает влажность элементов. Например, количество пара, образующегося при испарении 1 мм^3 воды при комнатной температуре в объеме, откачанном до давления 10^{-4} Па , может быть откачано насосом с быстротой откачки $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ только через сутки.

Герметичность является необходимым условием работоспособности различных изделий, поэтому надежность их контроля должна быть высокой.

Однако даже после тщательного проведения испытаний герметичность объектов может быть нарушена вследствие нескольких причин:

- превращение несквозных дефектов в сквозные под действием остаточных напряжений в конструкции в результате различных физико-химических воздействий;

- исчезновение и появление течей в результате деформации оболочек, особенно тонкостенных, под действием механических или термических нагрузок, в связи с чем испытания оболочек изделий ответственного назначения следует проводить в условиях, максимально приближенных к рабочим;

- случайное перекрытие полостей неплотностей в результате попадания в них пыли или технологических жидкостей, а также атмосферной влаги.

Воздействие атмосферной влаги может приводить к уменьшению канала течи в $10 \dots 1000$ раз и даже к его полному перекрытию. При этом течь может находиться в закупоренном состоянии длительное время (от нескольких недель до нескольких месяцев) независимо от размера ее канала. Вскрытию закупоренных влагой течей способствует высокотемпературный прогрев изделий в нейтральной атмосфере или в вакууме, а также вымачивание в ацетоне перед прогревом.

При испытаниях изделий на герметичность должны быть обеспечены возможности надежной герметизации заглушек и труб подачи и отвода пробных веществ, подготовки внутренней и наружной поверхностей изделия к полному удалению посторонних веществ из полостей неплотностей, а также доступа ко всем контролируемым участкам для исправления мест, в которых возможно наличие течей [1].

Каждый новый объект исследования требует отдельной проработки и объективного обоснования выбора способа контроля.

Контроль на герметичность подвергают изделия, у которых на протяжении заданного времени должно сохраняться заданное давление рабочего или контрольного вещества либо утечка рабочего вещества не должна превышать допустимого значения. Эти величины задают в технических условиях (ТУ) на изготовление изделий. В самолетостроении к объектам, испытываемым на герметичность, относятся герметичные отсеки и кабины

летательных аппаратов, агрегаты и соединяющие их элементы гидравлических и газовых систем, трубопроводы, баки и агрегаты топливных систем и др.

Герметичность является необходимым условием работоспособности изделий, поэтому надежность их контроля должна быть высокой.

Диапазон и проявления утечек весьма разнообразны, что можно видеть из данных таблицы 1.

Масс-спектрометрический метод контроля герметичности является наиболее совершенным и широко применяемым в самых разных отраслях промышленности.

Метод основан на разделении по массам сложной смеси газов и паров в электрическом и магнитном полях.

Большинство масс-спектрометрических течеискателей настроено на регистрацию одного пробного газа – гелия.

Гелий в весьма малых количествах содержится в атмосфере (3,8 мкм рт.ст.) и отсутствует в продуктах газовой выделенной вакуумных систем. Поэтому фоновые эффекты при работе с ним сказываются значительно меньше, чем в случае применения других веществ.

Таблица 1 - Размеры и проявления утечек различной мощности

Величина потока м ³ Па/с	Размер (диаметр) течи	Фактическое проявление течи при Δр=1 бар
10 ¹	1 мм	Истечение воды струей
10 ⁻¹	0,1 мм	Вытекание воды по капле
10 ⁻³	0,03 мм	Водонепроницаемая/ газопроницаемая течь
10 ⁻⁵	≈3 мкм	1 воздушный пузырек(≈1мм ³) за10 сек
10 ⁻⁷	≈0,1 мкм	Утечка газа объемом ≈1см ³ за 12 дней
10 ⁻⁹		Утечка газа объемом ≈3см ³ за 1 год
10 ⁻¹¹		Утечка газа объемом ≈1см ³ за 300 лет

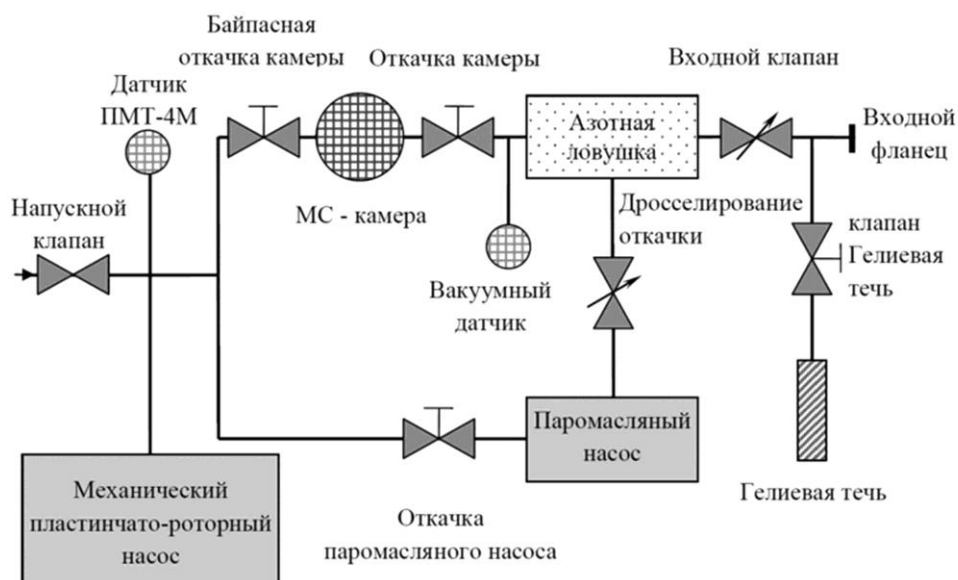


Рис.1. Схема масс-спектрометрического течеискателя ПТИ-10

Однако масс-спектрометрические течеискатели являются весьма сложными и дорогими приборами и требуют высококвалифицированного персонала для работы с ними (см. рис.1).

Специалисты Санкт-Петербургской компании «Вактрон» приняли участие в разработке проекта системы для проведения испытаний трубопроводных систем в консоли крыла самолета МС-21.

МС-21 – это российский ближне-среднемагистральный пассажирский самолёт. Проверке на герметичность в данном самолете подлежат следующие системы: топливная, нейтрального газа, пожарной защиты, отбора воздуха и противообледенительная. Испытания разделены на два этапа. Сначала проводится проверка манометрическим методом, предполагающим контроль изменения давления во времени.



а б

Рис.2. Промышленные (а) и бытовые тепловизоры(б)

Тепловизоры для бытовых нужд (Рисунок 2 б), это самые маленькие, самые легкие и недорогие ИК-камеры на рынке такого оборудования. Они

исключительно просты в эксплуатации. Такие устройства - это, по существу, тот случай, когда необходимы только операции "наведи-сними-определи" для получения высококачественных тепловых изображений, которые сразу же дают необходимую ИК-информацию. Такие тепловизоры используются например для диагностики электрического и механического оборудования.

Промышленные тепловизоры (рисунок 2 (а)) были специально разработаны для решения сложных задач измерения и мониторинга тепловых процессов. Они устанавливают самый высокий стандарт для такого типа приборов, благодаря их исключительным техническим характеристикам.

Основные области применения:

- авиация и космонавтика;
- автомобильная промышленность и машиностроение;
- лазерная техника и сварка;
- электроника/микроэлектроника, испытания в сборе;
- производство стали, стекла и пластмасс;
- НИОКР;
- неразрушающий контроль материалов (NDT);
- обеспечение качества соединений и обнаружение раковин;
- охрана объектов;
- медицина.



Рис.3. Контроль герметичности фюзеляжа самолета предлагаемым методом

Современные технологии предлагают множество решений. Одной из таких передовых и инновационных технологий является метод визуализа-

ции полей температур при оценке. В последнее время, с развитием электронных устройств и технологий, широкое распространение стали получать исследования тепловых полей (теплогам) объектов с помощью переносных и стационарных тепловизоров различных марок и возможностей ними (см. рис.4).

При разработке метода учитывались следующие критерии [4]:

а) выявление неплотностей и трещин на ранней стадии и на всех последующих (стадии производства, контроля и эксплуатации);

б) исключение прямого физического контакта с объектом;

в) возможность исследования объекта с разных сторон и под разными углами;

г) возможность хранения в базе данных снимков проведенных испытаний (иметь протокол объективного контроля). Это дает возможность сравнивать результаты испытаний наложением снимков и по возникшим изменениям прогнозировать развитие сквозных микротрещин по изменению температурных полей вызванных изменением утечек контрольного газа и этим предотвратить возможную аварийную ситуацию;

д) уменьшение времени и трудозатрат.

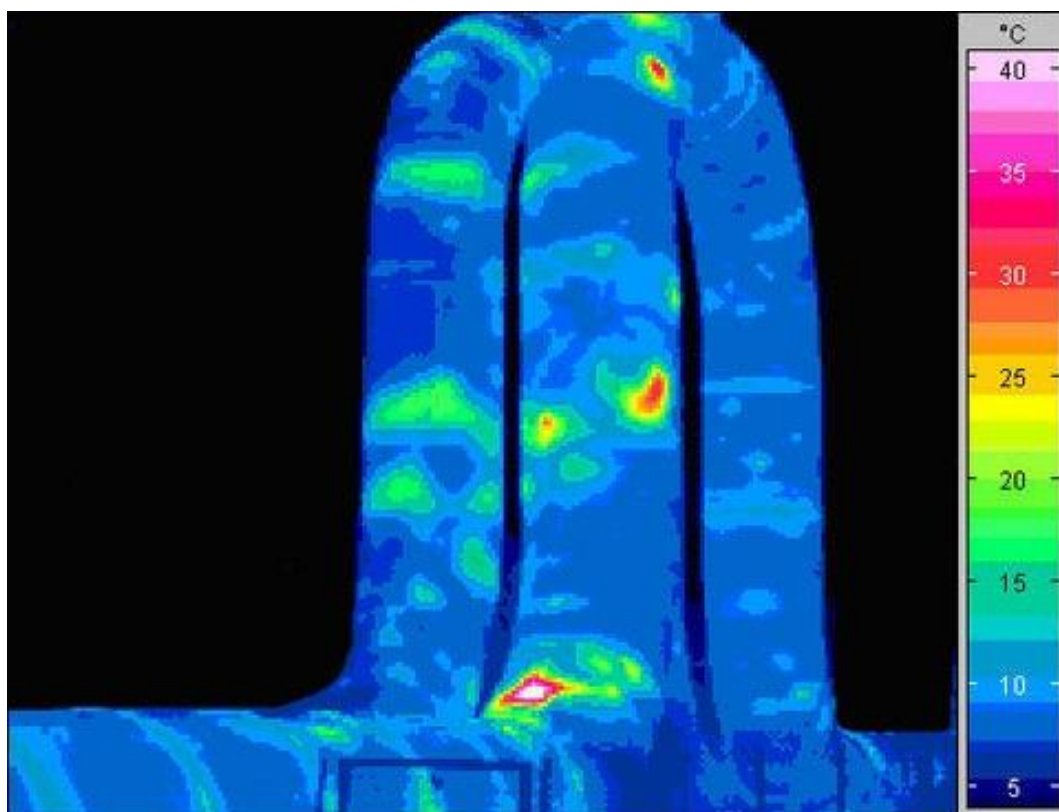


Рис.4. Исследование герметичности трубопроводов с помощью тепловизора.

Метод визуализации – это технология определения инфракрасного излучения с помощью специального устройства. Прибор позволяет увидеть

разницу излучения охлажденного при расширении газа и на фоне окружающей среды за счет сверхчувствительной матрицы таким образом, что становится возможным обнаружение с высокой точностью. Для реализации этого метода требуется достаточный визуальный подход к исследуемым поверхностям.

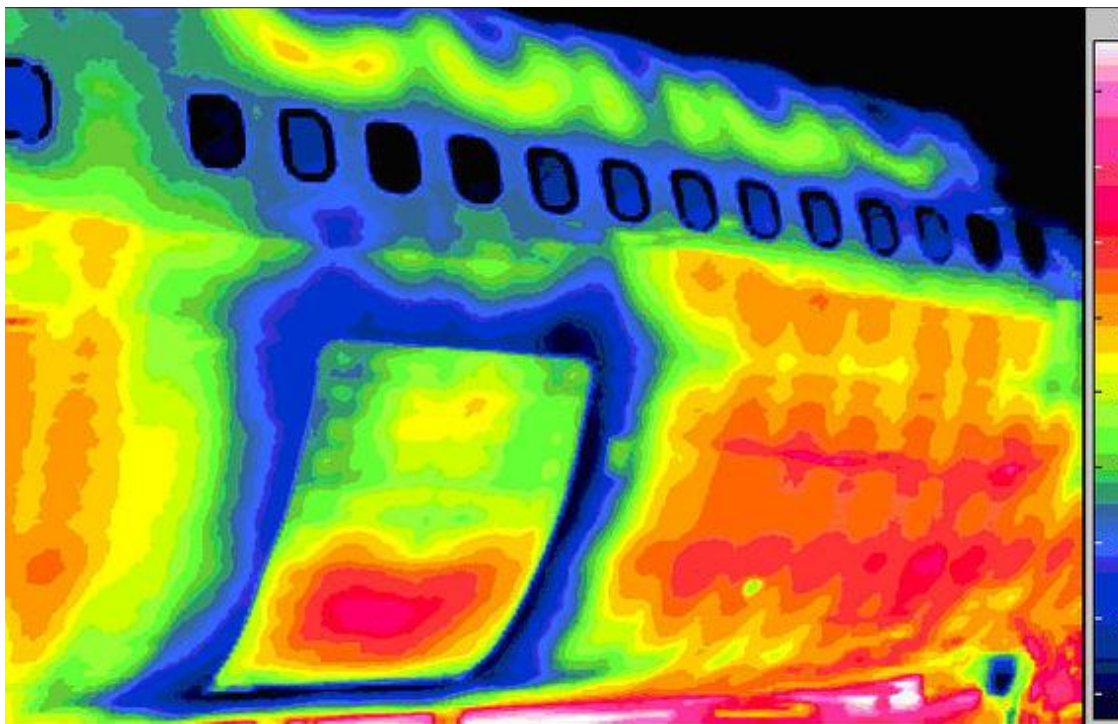


Рис 5. Исследование фюзеляжа самолета с помощью тепловизора.

Подобный метод уже активно применяется для выявления плохого контакта электрических цепей, а также для определения мест нагрева трущихся частей машин и их механизмов. Строительная термография и тепловизор как инструмент применяют для выявления мест утечки тепла из домов, квартир, окон, щелей в отопительных устройствах и коммуникациях.

Подобная разгерметизация характерна для неразъемных и разъемных стыков отсеков фюзеляжа, крыла, баков и трубопроводных гидрогазовых систем (см. рис.5).

Заключение

Новые технологии приходят в нашу жизнь, некоторые из них со временем становятся общеотраслевыми стандартами. Особенно те, которые обеспечивают безопасность как для сотрудников предприятий, так и для окружающей среды. К таким перспективным методам можно отнести метод ультразвукового генератора и метод визуализации полей температур. Метод визуализации утечек призван быть одной из таких технологий в силу огромной широты для ее применения, но главное, в силу тех объективных возможностей, которые он предоставляет, в первую очередь, в разрезе безопасности современных технологических производств.

Область применения метода визуализации для обнаружения утечек может распространяться практически на все производственно-инфраструктурные объекты промышленных предприятий (агрегаты, запорно-регулирующую арматуру, элементы трубопровода, резервуары и т.д.).

Список использованной литературы:

1. Vinogradov M. Helium leak detection: Education, equipment, application // Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), 2015 IV Forum. – IEEE, 2015. – С. 1-4.
2. Соловьев А.И. Методика проверки герметичности кабин самолетов малым избыточным давлением // Государственный ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт гражданской авиации (ГосНИИ ГА). - 1987
3. Гушин С.В., Кудряшов А.И. Современные методы и средства контроля герметичности в самолетостроении // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей VII Всерос. науч.-практ. Конф. (Иркутск, 13-16 апреля 2016 г.). –Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. 438 с. С. 307-310.
4. Geiger, G., Werner, T., Matko, D. (2003): Leak Detection and Locating – A Survey. 35th Annual PSIG Meeting, 15–17 October 2003, Bern, Switzerland.
5. Гушин С.В., Зотов И.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопроводов летательных аппаратов с использованием систем инженерного анализа // Вестник ИрГТУ №2 2011 стр. 89-92
6. Гушин С.В., Зотов И.Н. Рожков В.Н. Чернышев А.В Перспективы развития технологии монтажа герметичных разъемных соединений // М., “Авиационная промышленность” № 10, 1991
7. Гушин С.В., Зотов И.Н. Рожков В.Н. Чернышев А.В. Духов К.А. Устройство для контроля герметичности фланцевых соединений трубопроводов // А.С. № 1179118 1985
8. Виноградов М. Л. Разработка портативного прибора контроля герметичности вакуумных систем // Интернет-журнал «Технологии техно-сферной безопасности. – 2013. – С. 2013-3.
9. <http://ndt-testing.ru/klassifikacija-metodov-kontrolja-germetichnosti.html>
10. Соловьев А.И. Методика проверки герметичности кабин самолетов малым избыточным давлением // Государственный ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт гражданской авиации (ГосНИИ ГА). - 1987

Моделирование роста поры в пластине с высоким температурным градиентом

А.К. Емалетдинов, А.В. Галактионова

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12

Исследована скорость роста пор системой избыточных вакансий в пластине с высоким градиентом температуры. Получена система уравнений для диффузионной скорости роста поры. Проведено моделирование системы и сравнение с экспериментальными данными для жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: *концентрация вакансий; вероятность поглощения вакансий; пересыщение вакансиями; скорость роста поры; высокий температурный градиент.*

Рабочие лопатки турбины из нанокристаллического жаропрочного сплава с γ'/γ -микроструктурой работают в условиях высоких температур и нагрузок. Под действием термомеханических нагрузок в них происходит зарождение вакансий, активация диффузионных процессов, в частности рост пор [1-5]. Диффузионное зарождение и рост пор рассматривался в большом количестве работ [6-12]. Рост пор в материале включает ряд физических процессов: 1) возникновение избыточной концентрации вакансий, 2) неустойчивость и коагуляция вакансий в кластеры и зарождение поры критического размера, 3) рост пор. Поры зарождаются, когда в твердом теле избыточная концентрация вакансий достигает критического значения, по сравнению с равновесной. Источником пересыщения вакансий является энергия внешнего воздействия или притока внешней энтропии, например, облучение, термомеханическая нагрузка, градиенты деформационных и температурных полей. Было установлены термодинамические условия и критический размер зерен для зарождения пор [4,5]. Проанализированы основные режимы роста пор. Жаропрочные нанокристаллические сплавы являются двухфазными, в них изменяются кинетические параметры металлов, например, коэффициент диффузии и другие, что должно приводить к изменению кинетики порообразования. В работе впервые анализируется модель диффузионного роста пор в никелевом жаропрочном сплаве при высоком градиенте температур до 10^5K/m .

Рассмотрим бесконечную пластину, находящуюся под действием постоянных растягивающих напряжений вдоль и температурного градиента

поперек пластины. За счет работы термомеханических нагрузок происходит зарождение избыточных вакансий, которые будут конденсироваться в кластеры и поры. Для определения избыточной плотности вакансий, роста пор используем уравнения кинетики [4]. Кинетика изменения плотности избыточных вакансий в первом приближении описывается уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div} J = \frac{c - c_0}{\tau_0}, \quad (1)$$

где c - избыточная плотность вакансий, c_0 - равновесная плотность вакансий, τ_0 - среднее время жизни вакансий по поглощения стоками (поверхностью, порой и др.), J - поток вакансий. Поток вакансий определяется градиентом химического потенциала μ

$$J = -\frac{cD}{kT} \nabla \mu, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии вакансий.

В поле термоупругих напряжений σ и температур T в изотропной среде вакансии будут обладать химическим потенциалом, который может быть представлен в виде [4]:

$$\mu = kT \ln\left(\frac{c}{c_0}\right) - \frac{1}{3} \Omega \sigma + \frac{k_T}{cD} T, \quad (3)$$

где Ω - мощность вакансии, характеризующая изменение объема кристалла при образовании в нем вакансии. Равновесная концентрация вакансий равна [4]: $c_0 = \exp(-E + \sigma\Omega/kT)$.

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим плотность потока вакансий:

$$J = -D \left[\left(1 - \frac{\sigma\Omega}{kT}\right) \nabla c + \frac{k_T}{kT} \nabla T \right], \quad (4)$$

где Ω - мощность вакансии, характеризующая изменение объема кристалла при образовании в нем вакансии, k_T = термодиффузионное отношение. Первое слагаемое описывает диффузию вакансий, второе и третье слагаемые характеризуют дрейфовое движение вакансий под действием неоднородных напряжений и температуры соответственно. Равновесная концентрация вакансий определяется соотношением:

$$c_0 = \exp\left(\frac{-E + \sigma\Omega}{kT}\right), \quad (5)$$

где E - энергия образования вакансии.

Систему уравнений (1)-(5), необходимо дополнить граничными условиями. В первом приближении в линейной теории упругости напряжения будут определяться выражением

$$\sigma(r) = K_0 \Omega c - K_0 \alpha_T T(r), \quad (6)$$

где K_0 - модуль всестороннего сжатия, α_T - коэффициент теплового расширения. Первое характеризуют концентрационные напряжения, последнее термоупругие напряжения.

Для упрощения задачи рассмотрена стационарная, усредненная вдоль пластины по срединной линии γ' - кубоида одномерная задача для слоистой системы, состоящей из γ'/γ - микроструктуры с толщиной l_p/l_m соответственно (рис.1). Напряженное состояние периодической ячейки описывается двумя компонентами напряжений σ^m и σ^p .

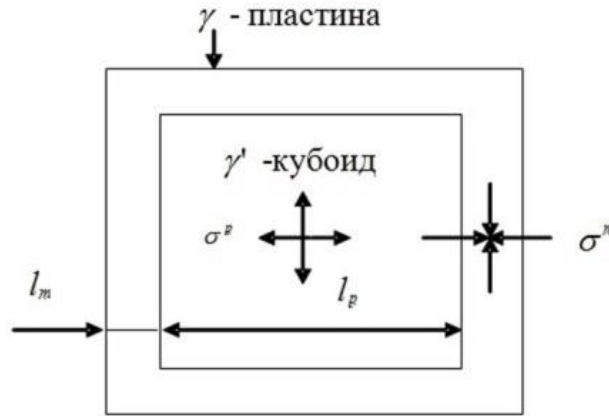


Рис.1. Схема микроструктуры жаропрочных никелевых сплавов

Химический потенциал $\mu(r)$, определяется дифференциальным уравнением в виде [5]:

$$\nabla^2 \mu = \frac{\partial^2 \mu}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \mu}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

Граничные условия будут иметь вид:

$$\begin{cases} \mu_r = \mu_0 + \frac{2\gamma}{r}\Omega, \\ \mu_r = \mu_0 + \Delta\mu, \end{cases} \quad (8)$$

где γ – поверхностное натяжение поры, Ω – объем вакансии.

Решение задачи (7),(8) химического потенциала $\mu(r)$ имеет вид:

$$\mu(r) = \mu_0 + \frac{\Delta\mu l_p}{r} + \frac{2\gamma\Omega}{l_m} \left(1 - \frac{l_p}{r}\right) + \left(\frac{l_p^2 - r l_p}{r}\right) \left(\frac{\mu_0 + \Delta\mu}{l_m + l_p}\right). \quad (9)$$

Избыточная плотность вакансий Δc будет определяться выражением:
 $\Delta c \approx c_0 \exp[(\mu(r) - \mu_0)/kT]$.

Используя выражение (9), получим, что пересыщение вакансий для слоистой системы, состоящей из γ'/γ -микроструктуры с толщиной l_p/l_m равно:

$$\frac{\Delta c_v(r)}{c_{v0}} = \frac{\frac{\Delta\mu l_p}{r} + \frac{2\gamma\Omega}{l_m} \left(1 - \frac{l_p}{r}\right) + \left(\frac{l_p^2 - r l_p}{r}\right) \left(\frac{\mu_0 + \Delta\mu}{l_m + l_p}\right)}{kT}. \quad (10)$$

Для изменения объема поры будет определяться потоком вакансий на поверхность поры:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -D \frac{\nabla c_v}{c_{v0}} \Big|_R. \quad (11)$$

Подставив (10) в (11) получим уравнение для скорости роста в виде:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -D \left(\frac{\Delta\mu l_p}{r} + \frac{2\gamma\Omega}{l_m} \left(1 - \frac{l_p}{r} \right) + \left(\frac{l_p^2 - r l_p}{r} \right) \left(\frac{\mu_0 + \Delta\mu}{l_m + l_p} \right) \right) / kT. \quad (12)$$

Проинтегрировав уравнение (12), получим выражение вида:

$$\frac{1}{a^2} (b + ar - b \ln|ar + b|) = \frac{-D}{kT} t, \quad (13)$$

$$a = \frac{2\gamma\Omega - \left(\frac{\mu_0 + \Delta\mu}{l_m + l_p} \right) l_m l_p}{l_m}, \quad b = \Delta\mu l_p - \frac{2\gamma\Omega l_p}{l_m} + \left(\frac{\mu_0 + \Delta\mu}{l_m + l_p} \right) l_p^2.$$

где:

При взаимодействии одиночных избыточных вакансий в поле напряжений и температур возникают неустойчивости, приводящие к образованию кластеров вакансий. Восходящий поток вакансий к кластеру определяется релаксацией свободной энергии неравновесной системы избыточных вакансий и приводит к формированию и росту пор. Их зарождение и рост является кинетическим процессом и зависит от множества факторов: распределения поля напряжений, неравновесных вакансий и температур, от структуры, распределения дефектов и других.

Для скорости роста пор при потоке вакансий из подрешеток γ - и γ' - фаз в жаропрочном никелевом сплаве при термической нагрузке запишем выражение [2]:

$$\frac{dR}{dt} = 2 \frac{D_\gamma D_{\gamma'}}{D_\gamma + D_{\gamma'}} \cdot \frac{1}{R} \left((c - c_0) - \frac{2\sigma\Omega c_0}{RkT} \right), \quad (14)$$

где D_γ , $D_{\gamma'}$ - коэффициенты диффузии γ - и γ' - фаз соответственно.

Интегрируя уравнение (14), получим решение в неявном виде:

$$t = \left(\frac{D_\gamma + D_{\gamma'}}{2D_\gamma D_{\gamma'} (c - c_0)} \right)^3 A^2 + \frac{8D_\gamma D_{\gamma'} \sigma\Omega c_0}{(D_\gamma + D_{\gamma'}) kT} A - \left(\frac{4D_\gamma D_{\gamma'} \sigma\Omega c_0}{(D_\gamma + D_{\gamma'}) kT} \right)^2 \ln A, \quad (15)$$

$$A = \frac{2D_\gamma D_{\gamma'} (c - c_0)}{D_\gamma + D_{\gamma'}} R - \frac{4D_\gamma D_{\gamma'} \sigma\Omega c_0}{(D_\gamma + D_{\gamma'}) kT}.$$

где

Изменение плотности избыточных вакансий будет определяться уравнением:

$$\partial c / \partial t + \nabla D \nabla c = c - c_0 / \tau_0, \quad (16)$$

где c - избыточная плотность вакансий, c_0 - равновесная плотность вакансий, τ_0 - среднее время жизни вакансий до поглощения стоками (дислокациями, границами зерен и др.), D - коэффициент диффузии вакансий.

Характерное время жизни вакансии до поглощения в стоке оценивается выражением:

$$\tau_0 = \frac{l^2 p}{D}, \quad (17)$$

где l - среднее расстояние между стоками, p - коэффициент прилипания вакансии. В зависимости от плотности стоков время жизни вакансий может изменяться от 10 до 10^3 с.

Одним из параметров, характеризующих рост частиц в наноструктурных двухфазных сплавах, является эффективный коэффициент диффузии. При образовании сферических частиц эффективный коэффициент диффузии определится выражением [6]:

$$D_{эфф} = D_v + \frac{\delta_a}{d} D_{ГЗ}, \quad (18)$$

где D_v - коэффициент объемной диффузии вакансий, δ_a - параметр несоответствия решеток, d - толщина межфазной прослойки, $D_{ГЗ}$ - коэффициент диффузии границы зерна.

В поле градиента температур диффузионный поток может быть определен как [6]:

$$\vec{J} = -N_0 \frac{c\alpha}{T} D \nabla T, \quad (19)$$

где α - коэффициент термического расширения.

В этом случае, рассматривая данный механизм как основополагающий для порового роста при действии температуры, можно записать выражение для термодиффузионного потока в нанокристаллическом жаропрочном сплаве в виде:

$$J_T = \left(\frac{DQ}{\Omega kT} \right) \left(\frac{\nabla T}{T} \right), \quad (20)$$

где $D = D_1 + D_2 \delta_a / d$ - эффективный коэффициент диффузии в нанокристаллическом двухфазном сплаве, Q - эффективная теплота потока, T - температура, $D_{1,2}$ - коэффициенты диффузии γ - и γ' - фаз соответственно, δ_a - параметр несоответствия решеток, d - толщина прослойки.

При нестационарном градиенте температур на различных участках растущей поры устанавливается различная температура. Поглощение и испускание вакансий растущими порами характеризуется различным значением температуры на их поверхности, что зависит от различных значений вакансионного потока при поглощении и испускании вакансий. Кроме того, необходимо учесть вероятность поглощения вакансий, которая зависит, в том числе, и от структуры поверхности поры. Таким образом, поток вакансий при нестационарном действии температуры определится разностью потоков на участках с различной температурой с учетом вероятности поглощения, и скорость роста поры будет равна:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{3(J_2 - J_1)\Omega DR}{4\omega V}, \quad (21)$$

где J_1 и J_2 – потоки при температурах T_1 и T_2 соответственно, ω – частота поглощения, V – объем кубоида γ' – фазы.

Рост поры при действии градиента нестационарной температуры с учетом энергии активации определится выражением:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{3}{4} D^2 \frac{E}{kT} \frac{Q}{kT} \left(\frac{\nabla T}{T} \right)^2 \frac{R^2}{\omega V}, \quad (22)$$

где E – энергия активации.

Выражая вероятность поглощения через критический радиус поры R_c , получим:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{4} D \frac{E}{kT} \frac{Q}{kT} \left(\frac{\nabla T}{T} \right)^2 R \left[1 - \left(\frac{R_c}{R} \right)^3 \right] p_0, \quad (23)$$

где p_0 – вероятность поглощения вакансии свободной поверхностью металла.

При моделировании системы уравнений с помощью метода Эйлера использованы следующие значения параметров для никелевого жаропрочного сплава:

$$\sigma_0 = 180 \text{ МПа}, \quad \alpha_{Tm} = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad \alpha_{Tp} = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad D_p = 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с},$$

$$\sigma_1 = 5 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad \tau_0 = 10 \text{ с}, \quad D_m = 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 / \text{с}, \quad \Omega = 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3, \quad \sigma = 0 \div 1,8 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

На рис. 2. приведены результаты моделирования роста поры при различных значениях избыточной плотности вакансий. Точками показаны экспериментальные данные [1]. Как видно расчетные кривые лежат ниже экспериментальных точек. Это связано с тем, что при эксплуатационных нагрузках возникает добавочная избыточная плотность вакансий вызванных действием растягивающих и вибрационных напряжений.

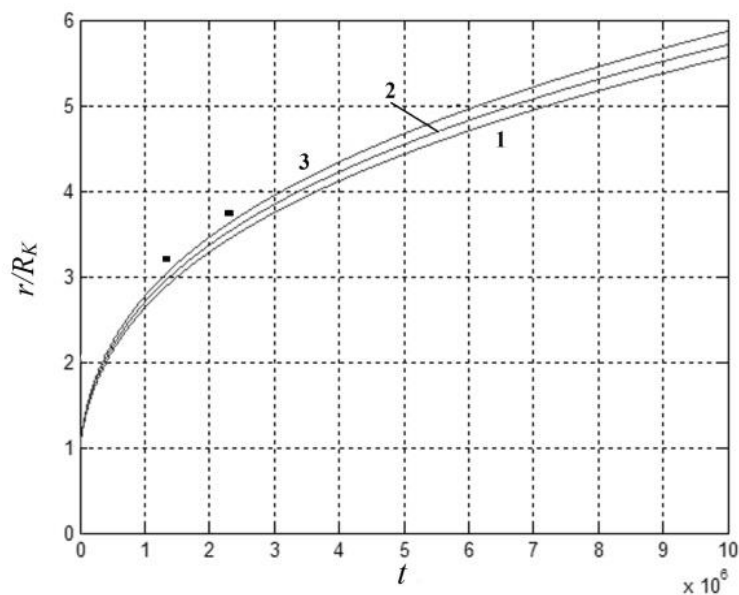


Рис.2. Изменение относительного радиуса поры в зависимости от времени при различных значениях пересыщения вакансий

Список использованной литературы:

1. Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1977. 336 с.
2. Е.Н. Каблов Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия. М.: МИСиС. 2001. 632с.
3. В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожь., ОАО «Мотор Сич». 2003. т.1,2.
4. Я.Е. Гегузин, М.А. Кривоглаз. Движение макроскопических включений в твердых телах. Metallurgia. 1971. 142с.
5. П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат. 1990. 376с.
6. И.Л. Светлов, И.В. Исходжанова, Л.Г. Евченков. Исследование высокотемпературной ползучести и дефектности структуры монокристаллов никелевого жаропрочного сплава после горячего изостатического пресования // Деформация и разрушение. – 2011, №3, с.28-32.
7. Б.С. Бокштейн, А.И. Епишин, В.А. Есин, А.О. Родин, И.Л. Светлов, Т. Линк. Рост и залечивание пор в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе // Функциональные материалы. – 2007, т.1, №5, с.75-79.
8. М.Р. Орлов. Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных двигателей: дис. на соискание уч. ст. д-ра техн. наук / М.Р. Орлов. - М., 2008. – 203 с.
9. Я.Е. Гегузин. Диффузионная зона. М.: Наука. 1979. 344с.
10. D. Hull, D.E. Rimmer. The growth of grain-boundary voids under stress // Philosophical Magazine. – 1959, V.4, p. 673-687.
- I. W. Chen, A. S. Argon. Diffusive growth of grain-boundary cavities // Acta Met. – 1981, V. 29, p. 1759-1768.
11. С.А.Кукушкин. Начальные стадии хрупкого разрушения твердых тел // Успехи механики. – 2003, №2, с.24.

УДК 621.785

Нелинейные эффекты при зарождении и росте пор в жаропрочных сплавах АД при термомеханической нагрузке

А.К. Емалетдинов, А.В. Галактионова

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12

Рассмотрена модель гомогенного зарождения пор как процесса самоорганизации неравновесной вакансионной подсистемы нагруженного

кристалла. Исследованы силовые и энергетические условия, а также критический размер и время зарождения пор и сопоставлены с данными экспериментов.

Ключевые слова: *рост пор; солитон; критический размер пор; время зарождения пор.*

Солитонные решения уравнения синус-Гордона в физике твердого тела описывают различные дефекты решетки (дислокации, поры, микротрещины; см., например, [1-3]). Динамика гомогенного зарождения пор (статичных солитонов) исследовалась методами абсолютных скоростей реакций и термодинамики решетки [4-8]. Целью настоящей работы является изучение динамики гомогенного зарождения пор как процесса самоорганизации неравновесной вакансионной подсистемы нагруженного кристалла. Кроме того, исследованы силовые и энергетические условия, а также критический размер и время зарождения поры.

При пластической деформации и разрушении локально выполняются первый и второй закон термодинамики [9-11]. В общем случае скорость производства энтропии можно представить в виде [9-11]:

$$P = (F - \text{div} \vec{q}) / T, \quad (1)$$

где \vec{q} - вектор потока тепла, F - диссипативная функция вязких напряжений. В условиях, когда теплообменом можно пренебречь, производство энтропии будет определяться диссипативной функцией $P = F / T$. Конкретное выражение диссипативной функции включает систему диссипативных процессов, возникающих при деформации. Обозначим работу напряжений на необратимых деформациях:

$$\delta A^P = \sum_l \sigma_{ij} \varepsilon_{ij(l)}^P. \quad (2)$$

где $\varepsilon_{ij(l)}^P$ - означает l - диссипативный механизм необратимой деформации. Величина δA^P называется работой диссипации. Прирост энтропии благодаря необратимым диссипативным процессам определяется соотношением:

$$dS^P = \frac{1}{T} \sum_l \sigma_{ij} \varepsilon_{ij(l)}^P, \quad (3)$$

т.е. каждый диссипативный процесс увеличивает энтропию. Диссипативные процессы изменения внутренней энергии тела при деформации можно представить в виде:

$$\delta U = \sum_i \delta E_i + \sum_i \delta Q_i, \quad (4)$$

где $\sum \delta E_i$ - изменение механической упругой энергии тела благодаря накоплению латентной упругой энергии зародившихся дефектов кристаллической решетки, $\sum \delta Q_i$ - локальное тепловыделение благодаря процессам вязкого движения дефектов, т.е. дефекты являются одним из каналов диссипации энергии. Образование структур происходит, когда прирост отрицательной внешней энтропии превысит критическое значение:

$$dS_e \geq dS^P \geq 0, \quad (5)$$

где dS_e - приток энтропии из внешней среды. При деформировании баланс энтропии с учетом (1) - (3) можно выразить соотношением:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS^P}{dt} = - \int_S J_i^s df_i + \sum_l \int \frac{dS_l^P}{dt} d^3r \geq 0, \quad (6)$$

где J_i^s - вектор потока энтропии от внешней среды, df_i поверхностный дифференциал. В рамках синергетического подхода [11,12] образование дефектов кристаллической решетки есть один из каналов диссипации энергии неравновесной вакансионной системы кристалла. При приложении внешних сил (напряжений σ_{ij} , температуры T) кристалл переходит в неравновесное состояние. Вакансионная система также переходит в неравновесное состояние, описываемое функцией распределения вакансий c , в первом приближении $c = c_0 + \Delta c$, здесь c_0 - равновесная концентрация вакансий при данной температуре, Δc - избыточная неравновесная концентрация вакансий. Неравновесная система вакансий создает поле деформаций $\varepsilon_{ij}(\Delta c)$ и напряжений и обладает механической энергией, благодаря которой может производиться механическая работа, например гомогенное образование неравновесных n - солитонов (дислокаций, пор), т.к. механическая энергия вакансионной системы в отличие от полной энергии не сохраняется. Чтобы в системе началось образование дефектов (диссипативных атомных структур), отдача энтропии должна превышать некоторое критическое значение, т.е. процесс начинается, когда параметры системы превосходят критические значения. Вблизи критической точки система становится неустойчивой и какая-либо из мод начинает нарастать, ее время релаксации становится очень большим (есть аналогия с “мягкой” модой [12]). Амплитуда виртуально неустойчивой моды (параметра порядка) становится медленно меняющейся функцией координат и отвечает коллективному движению групп вакансий кристалла. Таким образом, гомогенное образование дефекта представляет собой когерентный процесс релаксации возбужденной вакансионной подсистемы кристалла. Размер дефекта будет определяться длиной когерентности.

Рассмотрим кристалл, с простой кубической решеткой подвергнутый упругой деформации $\varepsilon_{ij}(\Delta c)$. Процесс зарождения исследуем в адиабатическом приближении [12]. Неустойчивые моды заключены в узкой полосе

значений волновых векторов b , т.е. неустойчивой становится одна или несколько мод Ω . Нагруженный кристалл представим как совокупность осцилляторов ω_{kj} , взаимодействующих с критической модой. Смещения атомов кристалла при наличии деформации от неравновесных избыточных вакансий запишем в виде [13,14]:

$$u_i(l, \chi) = \sum \varepsilon_{ij} x_j(l, \chi) + d_i(l, \chi) + \xi_i(l, \chi). \quad (7)$$

где $x_j(l, \chi)$ - координата положения равновесия атома (l, χ) , $d_i(l, \chi)$ - неоднородная деформация от зародившегося дефекта, $\xi_i(l, \chi)$ - тепловые смещения атомов вблизи новых положений равновесия. Тензор ε_{ij} - симметричный. Положения равновесия атомов в деформированном кристалле определяются из условия минимальности потенциальной энергии:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \xi_i} \right|_{\xi=0} = \sum Q_{ij}^{II} [\varepsilon_{jm} x_m(l, \chi) + d_j(l, \chi)] = 0, \quad (8)$$

Откуда:

$$d_j(l, \chi) = \sum \varepsilon_{sm} G_{ji}^{II(0)} Q_{is}^{II} x_m(l, \chi), \quad (9)$$

где $G_{ji}^{II(0)}$ - статическая функция Грина решетки в гармоническом приближении, совпадающая с точностью до множителя (-1) с обратной матрицей гармонических силовых постоянных [14]. Ограничимся линейным по деформациям приближением. В дальнейшем греческие индексы α , δ , γ и ρ обозначают различные состояния фононов, задаваемые совокупностью волнового вектора k и поляризации j : $\alpha = (k_1, j_1)$, $\delta = (k_2, j_2)$, $\bar{\alpha} = (-k_1, j_1)$.

Запишем гамильтониан через нормальные координаты в виде:

$$H = H_0 + H_C + H_V + H_D, \quad (10)$$

где H_0 - гармонический гамильтониан фононов решетки, H_C - гамильтониан критической моды, его удобно записать в представлении чисел заполнения, выбрав в качестве базиса систему собственных функций трехмерного гармонического осциллятора, H_V - гамильтониан взаимодействия критической моды с фононной системой, H_D - гамильтониан однородной деформации кристалла, которая вызывает квазиравновесное смещение функции. Запишем гамильтонианы в представлении чисел заполнения в виде:

$$H_0 = \sum_{\alpha} h\omega_{\alpha} a_{\alpha}^{+} a_{\alpha}, \quad H_C = \sum_{ni} hE_{ni} b_{ni}^{+} b_{ni}, \quad (11)$$

$$H_V = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{\alpha mn} h\omega_{\alpha} \beta_{\alpha} (mj, ni) b_m^{+} b_n (a_{\alpha}^{+} + a_{\alpha}) + \frac{1}{N} \sum_{\alpha\gamma} h\omega_{\alpha} \zeta_{\alpha\lambda} (mj, ni) b_{ni}^{+} b_{mj} a_{\alpha} a_{\gamma}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned}\beta_\alpha(mj, ni) &= \frac{1}{h\omega_\alpha} \sum_{lk, \gamma\rho\delta} Q_{\gamma\rho\delta}(l\chi) \left(\frac{h}{2M\omega_\alpha}\right)^{1/2} B_\gamma^\alpha(l\chi) \langle ni | u_\gamma u_\rho | mj \rangle, \\ \zeta_{\alpha\gamma}(mj, ni) &= \frac{1}{h\omega_\alpha} \sum_{lk, l'k'} Q_{\delta\nu\rho} \frac{h}{2\sqrt{M_k M_{k'} \omega_\alpha \omega_\gamma}} B_\delta^\alpha(lk) B_\nu^\gamma(l'k') \langle ni | u_i | mj \rangle,\end{aligned}\quad (13)$$

здесь $B_\gamma^\alpha(l\chi)$ - нормальная координата, a_α^+ , a_α , b_{ni}^+ , b_{ni} - операторы рождения и уничтожения фонона и критической моды соответственно, $Q_{\gamma\rho\delta}(l\chi)$ - силовые константы третьего порядка, $E_{ni} = h\Omega + \Delta E_{ni} \approx h\Omega$, здесь ΔE_{ni} - вклад, связанный с диагональной по $|ni\rangle$ частью ангармонического взаимодействия четвертого порядка. Гамильтониан взаимодействия с однородной деформацией запишем в континуальном приближении в виде [15]:

$$H_D = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \sum_{\alpha\gamma} V_{\alpha\gamma}^k (a_\alpha + a_\alpha^+) (a_\gamma + a_\gamma) \exp(i\Omega t). \quad (14)$$

где $V_{\alpha\gamma}^k = A_{ij}^{\alpha\gamma} \varepsilon_{ij}^k$, $A_{ij}^{\alpha\gamma} \approx 1/4\Lambda(\omega_\alpha \omega_\gamma)^{1/2} / \mu$, Λ - некоторое среднее значение модулей третьего порядка.

Исключая осцилляционную временную зависимость величин a_α и b_α введением новых переменных $\tilde{a}_\alpha = a_\alpha \exp(i\omega_\alpha t)$, $\tilde{b}_n = b_{ni} \exp(i\Omega t)$ и вводя феноменологические слагаемые для учета диссипативных процессов, получим гейзенберговские уравнения движения для операторов \tilde{a}_α и \tilde{b}_n в виде:

$$\dot{\tilde{b}}_n = -\tilde{b}_n / \tau_C + i \sum_{\alpha, m} \beta_\alpha(m, n) \tilde{a}_m, \quad (15)$$

$$\dot{\tilde{a}}_\alpha = -\tilde{a}_\alpha / \tau_F + i \sum_{\gamma, m} \zeta_{\alpha\gamma}(m, n) \tilde{b}_n \Delta N_\alpha, \quad (16)$$

где τ_C - время затухания моды в системе, τ_F - время затухания нормальных фононов системы. В уравнениях (15), (16) пренебрегли слагаемыми пропорциональными \tilde{b}_n , поскольку в дальнейшем интересны средние значения операторов, а $\langle \tilde{b}_n \rangle = 0$.

Кинетическое уравнение для приращения функции распределения запишем в виде:

$$\Delta \dot{N} = (\Delta N_* - \Delta N) / \tau_r + 2i \sum_{\alpha\gamma} \frac{\pi}{h^2} |V_{\alpha\gamma}^k|^2 (\tilde{b}_n^+ \tilde{a}_\alpha - \tilde{b}_n \tilde{a}_\alpha^+), \quad (17)$$

где τ_r - время релаксации неравновесной фононной системы,

$$\Delta N_* = \frac{2\pi}{h} \left| \frac{\Lambda}{4\mu} \varepsilon_{\alpha\gamma} \right|^2 (\omega_\alpha \omega_\gamma) N_0 (N_0 + 1) \quad (18)$$

- квазиравновесное смещение функции распределения, поддерживаемое нагружением.

Нелинейная система уравнений (15) - (17) может быть решена лишь численно при соответствующих значениях микроскопических параметров. В процессах самоорганизации обычно время релаксации обычных мод много меньше, чем время релаксации параметра порядка τ_C , а также τ_r , и можно использовать метод многомасштабных разложений [11-12], вводя быстрые переменные для \tilde{a}_α . Можно получить уравнение для критической моды (параметра порядка) в виде:

$$\dot{\tilde{b}}_n = -\alpha_0 \tilde{b}_n - \beta_0 \tilde{b}_n^+ \tilde{b}_n \tilde{b}_n, \quad (19)$$

где

$$-\alpha_0 = -1 / \tau_{Rr} + \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \beta_\alpha(m, n) \zeta_{\alpha\gamma}(m, n) \Delta N_* \quad (20)$$

$$\beta_0 = \tau_C \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \frac{\pi}{h^2} |V_{\alpha\gamma}^k|^2 \beta_\alpha(m, n) \zeta_{\alpha\gamma}^2(m, n)$$

Уравнение (19) представляет собой уравнение ангармонического осциллятора в двухянном потенциале. Когда $\alpha_0 < 0$, мода является обычной релаксирующей. Если неравновесность фоновой системы мала

$$\Delta N < \Delta N_C = 1 / \tau_C \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \beta_\alpha(m, n) \zeta_{\alpha\gamma}(m, n)$$

то нелинейностью можно пренебречь. Поскольку флуктуации температуры и напряжений приблизительно гауссовы, то и амплитуда \tilde{b}_n также распределена по гауссову закону, т.е. это обычные термоактивационные флуктуации смещений атомов от положений равновесия. Когда $\alpha_0 = 0$ возникает бифуркация, для \tilde{b}_n появляются два новых устойчивых положения равновесия.

При $\alpha_0 > 0$, т.е.

$$\Delta N > \Delta N_C = 1 / \tau_C \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \beta_\alpha(m, n) \zeta_{\alpha\gamma}(m, n) \quad (21)$$

мода может интерпретироваться как амплитуда акустической волны от зарождающегося дефекта). Таким образом, для гомогенного зарождения дефекта необходимо превысить критическую величину неравновесности фоновой (вакансионной) системы (21). Уравнение (19) можно получить из синергетического потенциала типа Гинзбурга-Ландау для фазовых переходов [12].

Для определения корреляционного радиуса параметра порядка l_C - размера зарождающегося дефекта необходимо решать неоднородную задачу. В уравнении (19) появится член вида $C |\nabla b_n|^2$. Выражение для корреляционной длины (размера критической флуктуации) определяется с помощью корреляционной пространственной функции $\langle b_n(x,t)b_n(x',t') \rangle$ [12]:

$$l_C \cong (aC / (-1/\tau_{Rr} + \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \beta_\alpha(m,n) \zeta_{\alpha\gamma}(m,n) \Delta N))^{1/2} \quad (22)$$

Ясно, что представление процесса зарождения дефекта в виде возникновения одной критической моды является упрощенным. В реальной ситуации должен возникать солитонный пакет, приводящий к зарождению дефекта. Таким образом, синергетическое исследование процесса гомогенного зарождения дефектов показало, что процесс зарождения связан с возникновением коллективных длинноволновых критических мод в возбужденной фононной подсистеме кристалла, подчиняющих себе поведение системы. Когда критические моды колапсируют в стационарный N - солитонный пакет, возникает дефект кристаллической решетки (вакансия, дислокационная петля, пора, микротрещина и др.).

Время гомогенного зарождения дефектов в рамках синергетики определяется временем формирования критического n - солитонного пакета. Точное нахождение значения времени t_C в микроскопической теории должно определяться динамикой формирования солитона и условием достижения энергии критического солитонного пакета E_C , нарастающего во времени $E_C(t)$, собственной механической энергии зародившегося дефекта E_0 , т. е. из уравнения:

$$E_C(t_C) = E_0 \quad (23)$$

Для нахождения энергии солитонного пакета необходимо решать кинетические уравнения (15)-(21) для параметра порядка как функции времени. Рассмотрим асимптотику при больших t . Для определения времени зарождения получим из (23) уравнение в виде:

$$E_0 = 8\pi K_1 \int_0^{t_C} dt \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{A}(k)|^2 dk \quad (24)$$

где $\tilde{A}(k)$ - фурье образ амплитуды, K_1 - размерная постоянная. В модели Дебая, и коэффициента Грюнайзена \mathcal{Y} [14] решение уравнения (24) для времени зарождения имеет вид:

$$t_C = t_0 \exp(-(U_0 - \gamma_0 \sigma) / kT), \quad (25)$$

где $t_0 = \tau_r$, $\gamma_0 = \gamma c_V l_C^3 / 16\pi K_1$,

$$U_0 = 16\pi^3 E_0 \gamma \tau_C \tau_F \sum_{\alpha\gamma, m} \beta_\alpha(m, n) \zeta_{\alpha\gamma}(m, n).$$

Оно имеет вид эмпирической формулы [4-6], в которой макроскопические параметры U_0 и γ_0 выражаются через микроскопические характеристики неравновесной фононной системы аналогично работе [7,8].

Рассмотрим силовые и энергетические условия зарождения дефектов. Необходимо, чтобы энергия критического пакета фононов превышала собственную энергию солитона (дефекта). В общем случае может возникнуть еще более жесткое условие необходимого профиля пакета. Если энергии пакета равна энергии n солитона возможно образование поры.

Взяв фононный вклад в тензор упругих напряжений [13], получим:

$$\sigma_{ij}^F = \sum_j \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} h\Omega M_{ij} \Delta N_C, \quad (26)$$

где M_{ij} - тензор деформационного потенциала. Оценка критической неравновесности ΔN_C , показала, что $\sigma_{ij}^F \approx \sigma_C \cong (10^{-2} \div 10^{-1})\mu$, т.е. порядка прочности идеальной решетки при ОК. Силовое условие зарождения имеет классический вид [4-6]: $\sigma \geq \sigma_C$. Если имеется дефект в решетке, например, дислокации леса, то условие (22) примет вид: $\sigma \geq \sigma_C - \sigma_D \ll \sigma_C$. Поэтому зарождение дефектов может происходить вблизи имеющихся дефектов.

Используя выражение для плотности механической энергии фононной системы [13], запишем энергетическое условие гомогенного зарождения дефектов в критической флуктуации:

$$E_0 = \frac{\beta}{2} \sum_j \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{(\Delta N)^2}{N_0(N_0 + 1)}. \quad (27)$$

где $E_0 = E_S + E_P$ - собственная упругая и поверхностная энергия, зародившегося солитона (дефекта: вакансии, дислокации, поры, микротрещины). Для самосогласованного определения ΔN_C и l_C необходимо решать кинетические уравнения для функции $\Delta N(l_C)$, что является затруднительным. В первом приближении воспользуемся квазигармоническим приближением для смещения частот нормальных колебаний через коэффициент Грюнайзена γ и приращения функции распределения в виде $\Delta N_C \cong N_0^2 \exp(h\omega_\alpha\beta)(h\omega_\alpha\beta)\gamma\epsilon_{ii}$. Тогда условие (27) примет вид:

$$\frac{3N_A kT}{16\pi^3} \left(\frac{T}{\theta}\right) \int_0^{l_C} d^3r \gamma \epsilon_{ii} \int_0^{\theta/T} \frac{e^z z^4}{(e^z - 1)^2} dz = E_0. \quad (28)$$

где ϵ_{ii} - относительное изменение объема в пакете, θ - температура Дебая. В приближении однородности деформации в пределах флуктуации условия зарождения (24) для поры примут вид:

$$l_T \geq 8\pi\gamma_S / (\gamma\epsilon_{ii})^2 c_V T, \quad (29)$$

где γ_s - поверхностная энергия микротрещин, c_V - объемная теплоемкость.

Таким образом, размер критической флуктуации должен превышать критические значения (29).

Взяв типичные значения для дебаевских температур: $a = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, $c \approx 10^3 \text{ м/с}$, из формулы (17) получим, по порядку величины $l_c \approx 10^{-5} \text{ см}$, что хорошо коррелирует с размером пор, наблюдаемых экспериментально, [5-8]. Взяв типичные значения из (4) получим, что время зарождения составляет $t_c \leq 10^{-3} \text{ с}$. Это значение не противоречит экспериментальным данным [5-8].

Список использованной литературы:

1. Буллаф Р.Ф., Кодри Р.Дж., Солитоны, М.: Мир, 1983.
2. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х., Солитоны и нелинейные волновые уравнения, М.: Мир, 1988.
3. Ньюэлл А., Солитоны в математике и физике, М.: Мир, 1989.
4. Котрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургия, 1958.
5. Хирт Дж., Лотте И., Теория дислокаций, М.: Атомиздат, 1972.
6. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983.
7. Журков С.Н., Петров В.А., О физических основах температурно - временной зависимости прочности. - ДАН СССР, 1978, т. 239, № 6, с.1316 - 1319.
8. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел. В кн. Физика прочности и пластичности под ред. Журкова С.Н. Л.: Наука, 1986, с. 5- 11.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987.
10. Косевич А.М. Дислокации в теории упругости. Киев: Наукова Думка, 1978.
11. Хакен Г. Синергетика, М.: Мир, 1980.
12. Николис Г, Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.
13. Гуревич В.Л. Кинетика фононных систем. М.: Наука, 1980.
14. Бетгер Х. Принципы динамической теории решетки. М.: Мир, 1986.
15. Альшиц В.И., Инденбом В.Л. Динамика дислокаций. УФН, 1975, т. 115, № 1, с. 3 - 39.

УДК 621.785

***Моделирование залечивания пор при термомеханической нагрузке
поверхности жаропрочных сплавов***

А.К. Емалетдинов., А.В. Галактионова

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12

Исследован процесс залечивания пор при термомеханической обработке поверхности жаропрочных сплавов. Разработана математическая модель эволюции структуры и поры при термомеханическом воздействии на поверхность. Проведено моделирование залечивания поры.

Ключевые слова: залечивание пор; термомеханическая нагрузка; жаропрочные сплавы; поверхность.

Рабочие лопатки турбин авиационных газотурбинных двигателей являются важнейшими деталями, во многом определяющими возможность получения высоких рабочих параметров, ресурс и безопасность полетов. Длительная эксплуатация рабочих лопаток турбины из нанокристаллического жаропрочного сплава с - микроструктурой в условиях высоких температур и нагрузок сопровождается развитием пор и трещин, которые определяют ресурс лопатки [1-3]. Сплавы испытывают комплексное воздействие нескольких эксплуатационных факторов: высоких нагрузок, вибрации, неравномерного циклического нагрева. Другая важная проблема повышения качества и работоспособности лопаток ГТД связана с возможностью и эффективностью восстановления структуры и свойств поврежденных при эксплуатации лопаток. Для уменьшения степени «поврежденности» материала при наработке в настоящее время применяют ремонтно-восстановительную обработку. Ее цель - повысить ресурс эксплуатируемых изделий. Для увеличения ресурса лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов после наработки обычно используют восстановительную термовакуумную обработку (ВТВО). Один из главных недостатков ВТВО как восстановительной обработки заключается в том, что ВТВО не способствует уплотнению материала и уменьшению пористости. Целью настоящей работы является разработка физических основ процесса залечивания пор при термомеханической нагрузке поверхности жаропрочных сплавов ГТД.

Одним из наиболее распространенных и эффективных путей повышения ресурса конструкций, наряду с выполнением требований по качеству несущих поверхностей, является упрочнение поверхности [4-11]. По способам воздействия на поверхность изделия и их комбинациям различают механические, термические, химико-термические методы упрочнения покрытия. Несмотря на право самостоятельного существования каждого из указанных выше способов, в основе упрочняющей технологии в

качестве приоритетного лежит механический способ в сочетании с другими. Сущность поверхностно-упрочняющей технологии заключается в силовом взаимодействии потока энергонесущей среды с поверхностным слоем упрочняемого тела. Обеспечивая высокоскоростную накачку энергии, поверхностно-упрочняющая технология создает в поверхностных слоях материала фрактальные структуры. Они формируются в результате кооперативных процессов различной природы. В качестве квалификационных критериев служат: скорость деформирования тел при взаимодействии; контактные условия при взаимодействии; форма рабочей части упрочняющего тела; граничные условия при взаимодействии; способы передачи энергии.

Залечивание пор в процессе термомеханической обработки может осуществляться двумя механизмами. Первый – пластическая деформация, сопровождающаяся превращением сферической поры в диск, ее схлопыванием и диффузионным спеканием противоположных поверхностей диска. Второй механизм – диффузионный, заключающийся в повакансионном растворении пор и диффузионном стоке образовавшихся вакансий к поверхности образца или детали.

Рассмотрим механизмы локального термомеханического пластического залечивания пор. Математическая формулировка задачи нагрева полуограниченного тела поверхностным нормально-распределенным неподвижным источником имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -q_0 \exp(-kr^2),$$

$$T(r, z, 0) = T(\infty, z, t) = T(r, \infty, t) = T_0,$$

где T – температура; r, z – пространственные координаты; t – время; q_0 – плотность потока энергии, поглощенной телом; k – коэффициент сосредоточенности; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; T_0 – начальная температура; для $t > 0$, $0 \leq r < \infty$, $0 \leq z < \infty$.

В системе (1.1) перейдем к безразмерным величинам с помощью соотношений:

$$u = (T - T_0) \lambda \sqrt{k} / q_0, p = r \sqrt{k}, \xi = z \sqrt{k}, \tau = kat. \quad (2)$$

Вместо (1.1) получим:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial p^2} + \frac{1}{p} \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} = \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = -\exp(-p^2), \quad (4)$$

$$u(p, \xi, 0) = u(\infty, \xi, \tau) = u(p, \infty, \tau).$$

Решение системы (3),(4) известно [8]:

$$u(\rho, \xi, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} I(\rho, \xi, \tau),$$

$$I(p, \xi, \tau) = \int_0^{\sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{p^2}{4x^2 + 1} + \frac{\xi^2}{4x^2} \right) \right] \frac{dx}{4x^2 + 1} \quad (5)$$

При локальной термопластической деформации механизмами дислокационной кинетики имеются следующие уравнения и соотношения [7]: для внешних σ_{ik}^{ext} и внутренних σ_{ik}^{in} напряжений:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad \sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{ext} + \sigma_{ik}^{in},$$

$$\sigma_{ik}^{in} = \int A_{iksp} (r' - r) \alpha_{sp} (r', t) dr', \quad F_l = \epsilon_{lpq} v_p b_s \sigma_{qs}, \quad (6)$$

для тензорной плотности дислокаций α_{sp} и ее потока J_{lp} :

$$\frac{\partial \alpha_{sp}}{\partial t} + \epsilon_{sql} \frac{\partial J_{lp}}{\partial x_q} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_{sp}}{\partial x_p} = 0, \quad J_{lp} = \epsilon_{lqs} \alpha_{sp} u_q, \quad (7)$$

для деформаций и скоростей деформации (упругих и пластических):

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ik}^{el} + \varepsilon_{ik}^{pl}, \quad \varepsilon_{ik}^{el} = \int B_{iksp} (r' - r) \alpha_{sp} (r', t) dr',$$

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^{el} \int C_{ikml} J_{ml} dr', \quad \dot{\varepsilon}_{ik}^{pl} = \frac{1}{2} (J_{ik} + J_{ki}). \quad (8)$$

В формулах (6) – (8) $A_{iksp} = -c_{ikmn} \epsilon_{njs} c_{piqt} G_{qm,l}$, $B_{iksp} = [\epsilon_{sim} c_{lqmp} G_{qk,l}]_{[ik]}$, $C_{ikml} = -c_{njml} [G_{ij,nk}]_{[ik]}$, $G_{qm} (r' - r)$ – тензорная функция Грина статической теории упругости кристалла, c_{ikmn} – тензор упругих постоянных, ϵ_{njs} – перестановочный тензор, F_l – сила, действующая на дислокацию со стороны внешних и внутренних далекодействующих напряжений, v – орт касательной к линии дислокации, u – скорость дислокации, $\alpha_{sp} = \sum_a \alpha_{sp}^a$ – тензорная плотность дислокаций с различными векторами Бюргерса.

Были получены следующие выражения. Для температурного поля:

$$T(\xi) = \frac{\pi}{4} \frac{T_m}{\xi + 1}, \quad T_m = \frac{\sqrt{\pi}}{2} q_0 \frac{1}{l_T \lambda_T} \quad (9)$$

где T_m – максимально достигаемая температура, ξ – безразмерная координата, $l_T \approx 10^{-1} \div 1$ см – характерный размер зоны теплового воздействия, q_0 – тепловой поток поступающий в подложку, λ_T – коэффициент теплопроводности.

Поле термоупругих напряжений определяется:

$$\sigma_{xx}(\xi) = \mu_\sigma \alpha_T (T_m - T_0) \frac{\pi}{4(\xi + 1)} + \sigma_0, \quad \sigma_0 = \alpha_\sigma b \sqrt{\rho_0}. \quad (10)$$

где μ_σ – модуль сдвига, α_T – коэффициент теплового расширения, T_0 – комнатная температура принимается равной 300К, σ_0 – внутренние напряжения с исходной плотностью дислокаций $\rho_0 \approx 10^4 \div 10^6 \text{см}^{-2}$, $\alpha_\sigma \approx 0.5 \div 0.8$ – постоянная взаимодействия дислокаций, \mathbf{b} – вектор Бюргерса.

$$\sigma_{xy}(\xi) = \beta_\sigma \sigma_{xx}(\xi), \quad (11)$$

где $\beta_\sigma < 1$ – коэффициент взаимосвязи сдвиговых и нормальных напряжений. Деформация определяется выражением:

$$\varepsilon_{xy} = \sigma_{xy}(\xi) / \mu_\sigma. \quad (12)$$

При записи пренебрегли динамическими составляющими внешних и внутренних напряжений, ввиду того, что перемещение дислокаций при обычной пластической деформации имеет в большинстве случаев квазистатический характер.

Локальная поверхностная деформация моделируется виброупрочнение дробью. Концентрация напряжений в полярной системе координат определяется следующими выражениями [8]:

$$\sigma_{xx} = \frac{P_0}{\pi\rho} \sin\theta(1 + \cos 2\theta), \quad \sigma_{yy} = \frac{P_0}{\pi\rho} \sin\theta(1 - \cos 2\theta), \quad (13)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{P_0}{\pi\rho} \sin\theta \sin 2\theta \quad (14)$$

$$\text{где } P_0 = \frac{F_0}{4\pi l^2}, \quad F_0 = \frac{m\nu_0}{\tau_c}, \quad l = \sqrt{R^2 - (R-h)^2}, \quad h = \sqrt{\frac{m_0\nu_0^2}{2\pi R\sigma_0}},$$

$$\sigma_0 = \max \sigma_{11}, \quad \tau_c \approx 3 \left(\frac{\mu_c^2}{K_0^2 \nu_0} \right)^{1/5}, \quad K_0 = \frac{2}{5D_0}, \quad D_0 = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_{II}^2}{E_y} + \frac{1-\nu'_{II}{}^2}{E'_y} \right),$$

где l – радиус образовавшейся лунки; ν_0 – скорость сдвига; R – радиус дробинки; h – глубина образовавшейся лунки; μ_c – модуль сдвига; E – модуль упругости материала дробы; E' – модуль упругости материала подвергнутого обработке; ν_{II} – коэффициент пуассона материала дробы; ν'_{II} – коэффициент пуассона материала подвергнутого обработке.

При моделировании обработки поверхности получены следующие результаты.

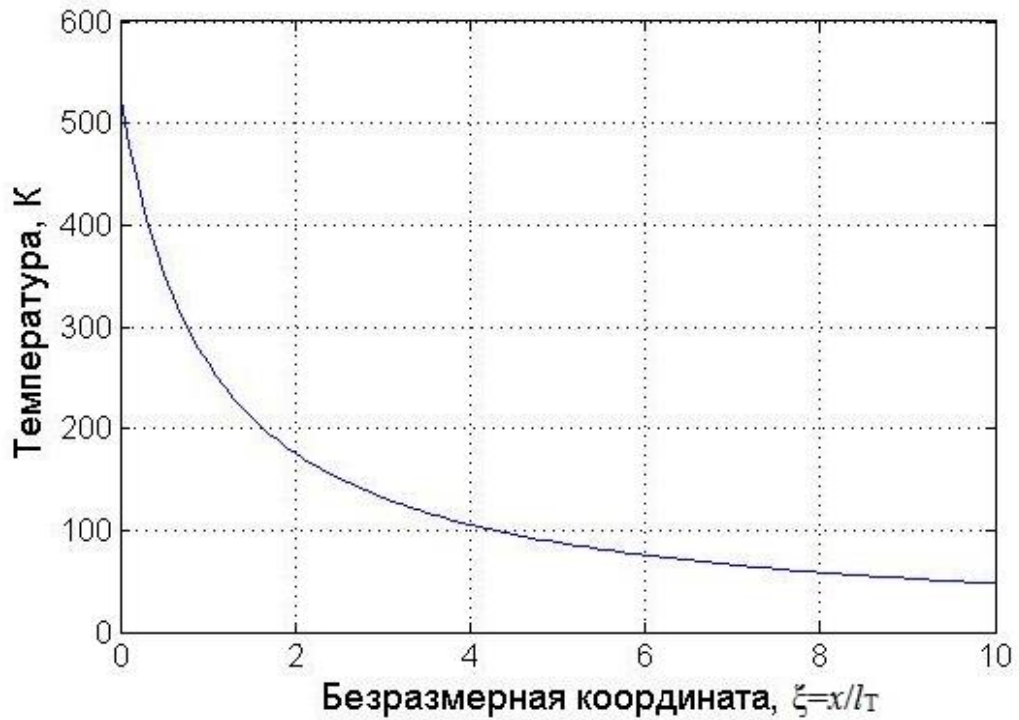


Рис.1. Температура в материале подложки в зависимости от безразмерных координат

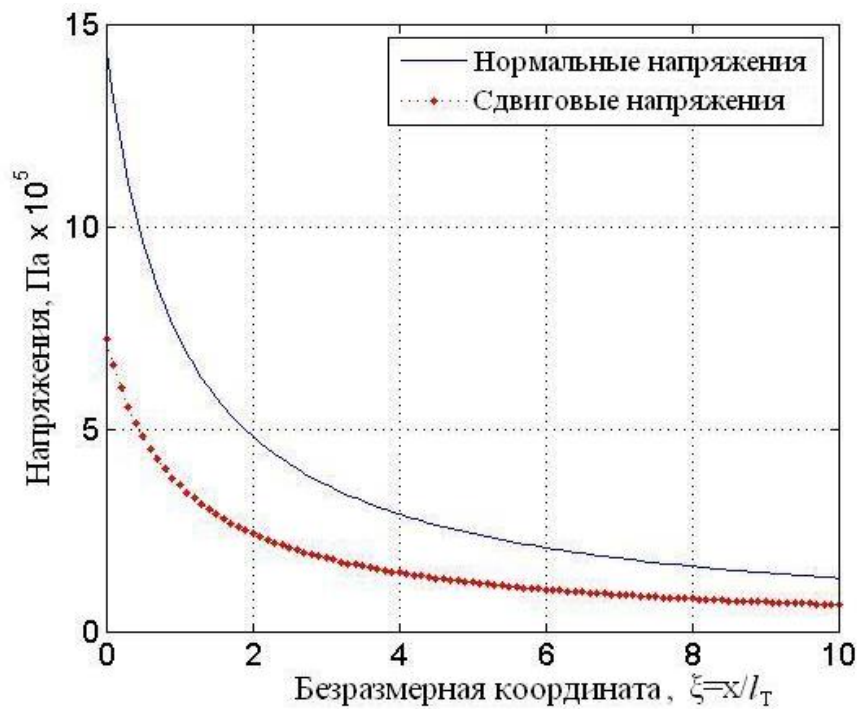


Рис.2. Нормальные и сдвиговые напряжения в зависимости от безразмерных координат

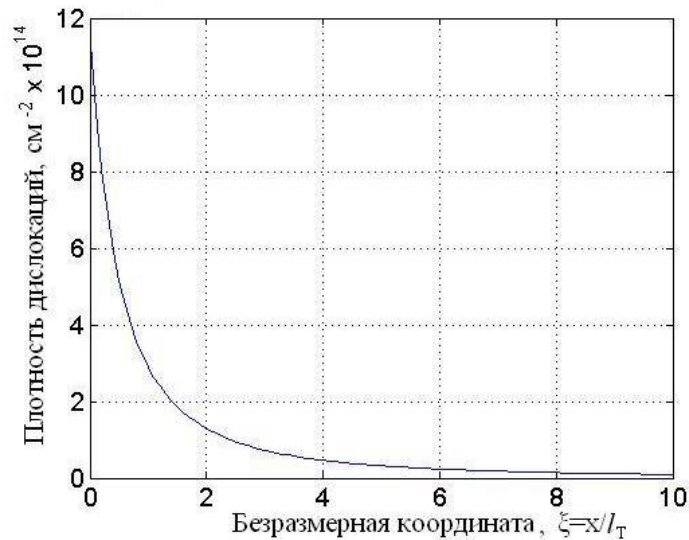


Рис.3. Плотность дислокаций в зависимости от безразмерных координат

Скорость изменения радиуса сферических пор R_p определяется уравнением [4,5]:

$$\frac{2\dot{R}_p}{R_p} = -\left(\frac{2\alpha}{R_p} + \frac{1}{3}\sigma_{ii}\right)B/b^2\rho. \quad (15)$$

При моделировании залечивания пор получены следующие результаты.

При моделировании залечивания пор получены следующие результаты.

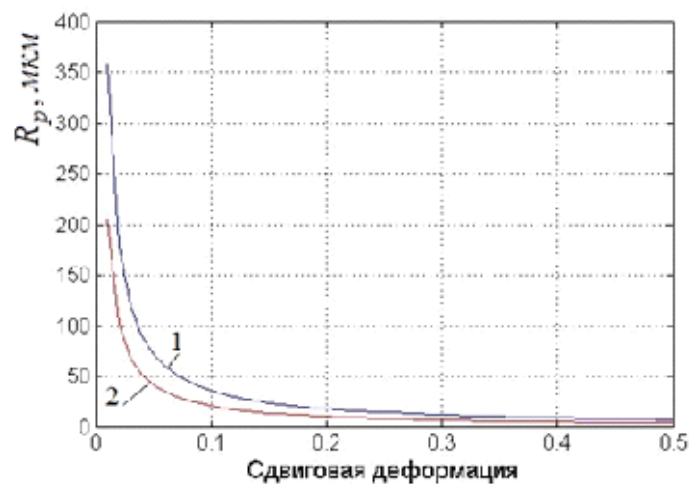


Рис.4. Размер пор при росте деформации

Интегрируя уравнение (15) с начальным условием $R_p(0) = R_0$, можно получить решение в неявном виде:

$$\frac{2B}{\sigma_{ii}} \ln\left[\frac{2\alpha + R_0\sigma_{ii}}{2\alpha + R\sigma_{ii}}\right] = t. \quad (16)$$

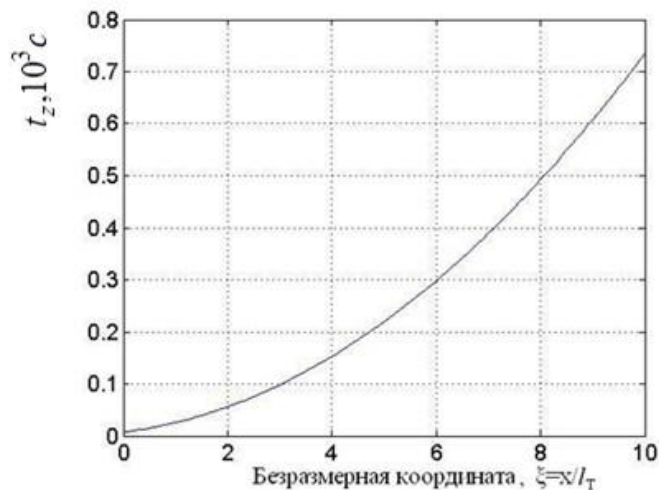


Рис. 5. Время растворения пор в зависимости от безразмерных координат от поверхности для поры с размером 1,0 мкм

Из выражения (16) можно получить время t_z полного залечивания поры:

$$t_z = \frac{2B}{\sigma_{ii}} \ln[(2\alpha + R_0\sigma_{ii})/2\alpha]. \quad (17)$$

Разработана математическая модель эволюции дислокационной структуры при термомеханическом воздействии на поверхность. На основе системы уравнений, описывающих кинетику дислокаций при термомеханическом воздействии на поверхность, записаны выражения для напряжений, деформаций. Произведено моделирование параметров напряжений, деформаций при действии на поверхность теплового потока. Произведено моделирование размеров пор при деформации поверхности шариком, времени растворения поры. Полученные результаты позволяют обрабатывать экспериментальные данные при термомеханическом поверхностном упрочнении и оптимизировать технологические процессы термомеханической обработки поверхности.

Список использованной литературы:

1. Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1977. 336 с.
2. Е.Н. Каблов Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия. М.: МИСиС, 2001. 632с.
3. В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожь., ОАО «Мотор Сич». 2003. т.1,2.
4. Я.Е. Гегузин, М.А. Кривоглаз. Движение макроскопических включений в твердых телах. Metallurgy. 1971. 142с.

6. П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат. 1990. 376с.
7. Г.А. Малыгин Механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях //Физика твердого тела. - 2006. Т. -48. вып. 4 - С. 651 – 657. – ISSN 0367-3294.
8. В.И. Большаков, В.И. Андрианов, В.В. Данишевский. Асимптотические методы расчета композитных материалов с учетом внутренней структуры. Днепропетровск: Пороги. 2008. 196с.
9. Г.А. Ванин. Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наукова Димка. 1985. 304с.
10. Г.С. Скубачевский. Авиационные и газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение. 1981. 550с.
11. L. Müller, U. Glatzel, M. Feller-Kniepmeier. Modelling of thermal misfit stresses in nickel-base superalloy containing high volume fraction of γ' -phase. Acta metal, mater. 1992. V40, N6, P1321-1327.

УДК 621.95

Проект кондукторов для сверления отверстий по соединению шпангоутов с обшивками по боковым панелям кабины пилотов.

С. С. Ляпин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Актуальной проблемой производства летательных аппаратов в условиях рыночной экономики и жесткой конкуренции на мировом рынке является снижение трудоемкости и себестоимости изготовления авиационной техники, а также удовлетворение требований по увеличению ресурса самолётов за счет повышения качества узлов и деталей путём внедрения новых процессов автоматизированной сборки, а также путем механизации наиболее ответственных технологических процессов.

Ключевые слова: обшивка, шпангоут, кондуктор, боковая панель.

Описание объекта исследования. Кабина пилотов самолета МС-21, отсек Ф1. Конструкция кабины пилотов состоит из передней части фюзеляжа (отсек Ф1) с лобовым прозрачным верхом, кабина неподвижная. Прозрачный верх-кожух не открывается (не откидывается). Кабина пилотов самолета оборудована лобовыми стеклами в конструкции предусмотрены две откатные прозрачные форточки. Из кабины пилотов осуществляется управление самолетом.



Рис. 1. Кабина пилотов самолета МС-21, отсек Ф1

Описание предмета исследования. Задачей данной работы является разработка проекта кондукторов для сверления отверстий по соединению шпангоутов с обшивками по боковым панелям кабины пилотов отсека Ф1 самолета МС-21. Боковая панель состоит из: обшивки, продольного набора-стрингеров, поперечного набора-шпангоутов.

Габаритные размеры боковой панели Д2,5×Ш1,6.

Основные направления работы:

- 1) выполнить проект конструкции кондукторов для сверления отверстий по соединениям шпангоутов с обшивками;
- 2) проработать возможность выполнения отверстий при помощи СМАП. Плюсы и минусы использования СМАП.

Основные требования:

- кондуктора выполнить с учетом их применения в приспособлении для сборки (учесть расположения ложементов приспособления);
- кондуктора выполнить для выполнения отверстий качества Н7 под стержни болт-заклепок.

- в конструкции кондукторов предусмотреть места для сверления НО для мест где крепеж будет устанавливаться на последующих этапах сборки.

Существующие и предлагаемые технические решения для существующей проблемы.

Существующий метод сборки боковой панели имеет ряд недостатков:

- увеличенная трудоемкость при изготовлении деталей шпангоутов (сверление направляющих отверстий Н.О в ободке шпангоута), что приводит к увеличению финансовых затрат;

- неудовлетворительное качество отверстий;
- увеличенное время на сверление, разсверление до большего диаметра, зенкование.

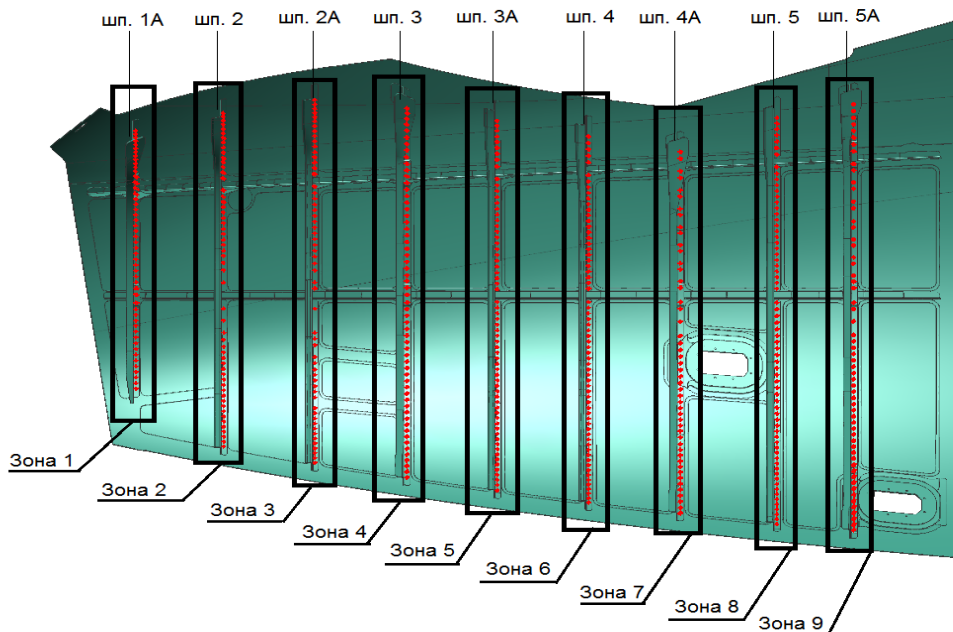


Рис. 2. Боковая панель кабины пилотов секции Ф1 самолета МС-21

Применение кондуктора позволяет сверлить отверстия без предварительной разметки. Сверление отверстий по кондуктору получается более точным, чем по разметке. Кондуктор создает направление сверлу и предупреждает уводку его в сторону, особенно при глубоком сверлении.

Кондуктор представляет собой металлическую плиту с отверстиями. Форма плиты соответствует обрабатываемой детали. В случаях при больших размерах детали целого кондуктора на всю деталь не делают, а изготавливают кондуктор таких размеров где требуется сверление отверстий. Кондуктор в этом случае обхватывает только небольшой участок самой детали. Например, для сверления отверстий в нервюре с обшивкой кондуктор состоит из ряда плит, размещенных на общей обшивке. Кондукторные плиты расположены над теми местами нервюры, на которых должны устанавливаться узлы и где должны быть просверлены отверстия.

Кондуктор состоит из корпуса (плиты), направляющих втулок, через которые проходит сверло, фиксаторов при помощи, которых кондуктор крепится к детали. Применение кондуктора значительно сокращает время, затрачиваемое на разметку и сверление.

Кондуктор в современном авиастроении используется со СМАП (Сверлильная машина с автоматической подачей) что выводит технологию сборки агрегатов на новый уровень.

К положительным качествам СМАП относятся:

- надежная фиксация в кондукторе;

- автоматический цикл сверления – при нажатии кнопки пуска включается механизм вращения шпинделя и автоподача, после выполнения отверстия шпиндель возвращается в исходное положение и останавливается;
- наличие импульсной (“ключущей”) подачи и системы отвода измельченной стружки, позволяющие уменьшать влияние последней на качество обработки отверстий;
- наличие счетчика количества циклов (для своевременной замены сверла).
- сверления отверстий под заклепки в деталях из КМ и в смешанных пакетах;
- сверления и зенкования отверстий под болты и болт заклепки в один переход в деталях из КМ в смешанных пакетах.

Проект технического решения для анализируемой проблемы представлен на рисунке 3.

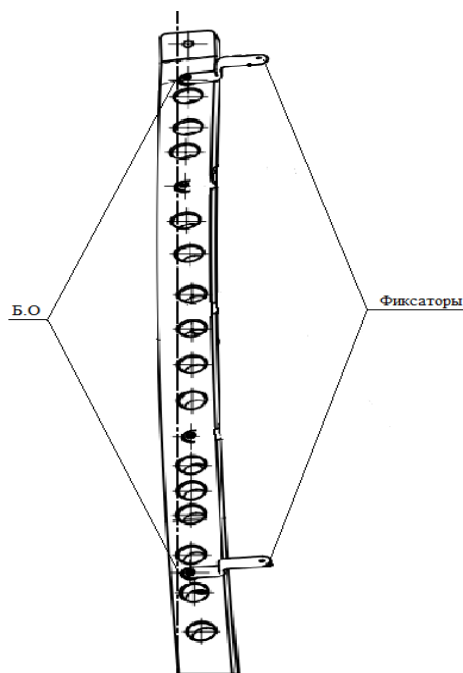


Рис. 3. Кондукторов для сверления отверстий по соединению шпангоутов с обшивками

Проект кондукторов для сверления отверстий по соединению шпангоутов с обшивками имеет ряд преимуществ:

- увеличивается точность сборки до качества Н7.
- уменьшается цикл сборки и всего технологического процесса.
- уменьшается трудоемкость при изготовлении деталей шпангоутов.

Список использованной литературы

1. Технология сборки самолетов / В.И. Ершов, В.В. Павлов, М.Ф. Каширин, В.С. Хухорев. - М.: Машиностроение, 1986. - 456 с.

2. Современные технологические процессы сборки планера самолета / Под ред. Ю.Л. Иванова. - М: Машиностроение, 1999. - 304 с.
3. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А. и др. М.: Аграф-пресс, 2006. - 304 с.
4. Бабушкин А.И. Методы сборки самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1985.
5. ОСТ 1 42392-88 Соединение деталей и узлов болт-заклепками с технологическим хвостовиком. Типовой технологический процесс.
6. Технология самолетостроения. Под общей редакцией А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1983. – 551 с.
7. Проектирование сборочных приспособлений: Конспект лекций по дисциплине «Проектирование сборочных приспособлений» для специальности 160201 «Самолето и вертолетостроение» /Сост. Р.Х.Ахатов, Электрон. ресурс. – Иркутск, 2008, 167 с.
8. Колганов И.М., Филиппов В.В. Проектирование приспособлений, прочностные расчеты, расчет точности сборки: Учебное пособие. – Ульяновск, 2000. – 99 с.
9. Иванов Ю.Л. Современные технологические процессы сборки планера самолета. – М.: Машиностроение, 1999. – 304 с.
10. Григорьев В.П. Приспособления для сборки узлов и агрегатов самолетов и вертолетов: Учебное пособие для авиационных вузов. – М.:Машиностроение, 1977. – 140 с.

УДК 621.452.3

Влияние разброса частот собственных колебаний рабочих лопаток ГТД на значение напряжений при связанных формах колебаний

С. М. Гусенко, Д. С. Старшинов, А. Г. Терешко

В настоящей работе рассматривается влияние разброса частот собственных колебаний рабочих лопаток газотурбинных двигателей на значение напряжений при связанных формах колебаний и даются рекомендации по вибронпряжения в рабочих лопатках бандажированных ступеней.

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, рабочие лопатки, связанные формы колебаний, разночастотность.*

При проектировании авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) одним из важных вопросов является приемлемый уровень динамических напряжений в рабочих лопатках компрессорных узлов. Эта проблема стоит

особенно остро в виду повышения аэродинамической нагруженности ступеней современных компрессоров и турбин. Доводка рабочих лопаток приводит к многократным изменениям их геометрии с последующими дорогостоящими испытаниями. В данной работе представлен способ снижения динамических напряжений для бандажированных рабочих лопатках ГТД. Наличие бандажных полок на лопатках рабочего колеса обуславливает возбуждение в основном связанных форм колебаний (Рис. 1).

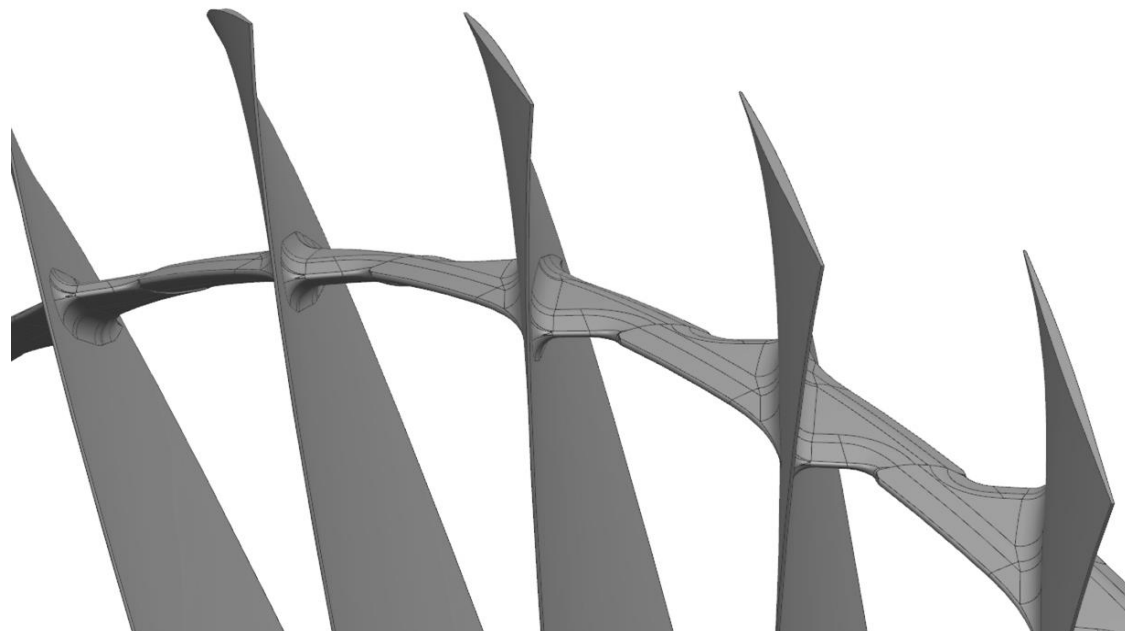


Рис. 1. 3-D модель бандажированного рабочего колеса компрессора авиационного ГТД

При выполнении работ по определению динамических напряжений на рабочих лопатках компрессоров двух идентичных ГТД, было отмечено существенное различие в полученных значениях. С целью определения причины различия динамических характеристик, были определены частоты собственных колебаний (ЧСК) для двух комплектов рабочих лопаток. Определение ЧСК проводилось по трем испытаниям для каждой лопатки, определялись первые семь собственных форм колебаний. На основе полученных данных было получено стандартное отклонение – мера того, как насколько широко разбросаны точки данных относительно их среднего (Рис. 2).

Для каждой формы колебаний было построено нормальное распределение:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где}$$

μ - значение n частоты собственных колебаний рабочей лопатки,

σ - среднеквадратическое отклонение.

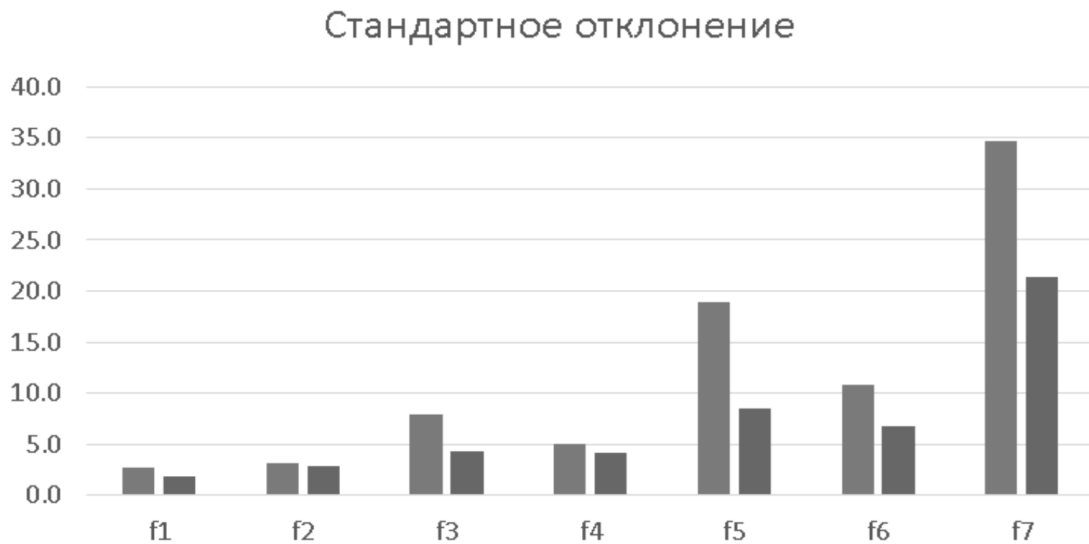


Рис. 2. Стандартное отклонение для семи собственных форм колебаний для двух комплектов лопаток

Пример нормального распределения значений частот для двух комплектов рабочих лопаток по пятой форме колебаний представлен на Рис. 3.

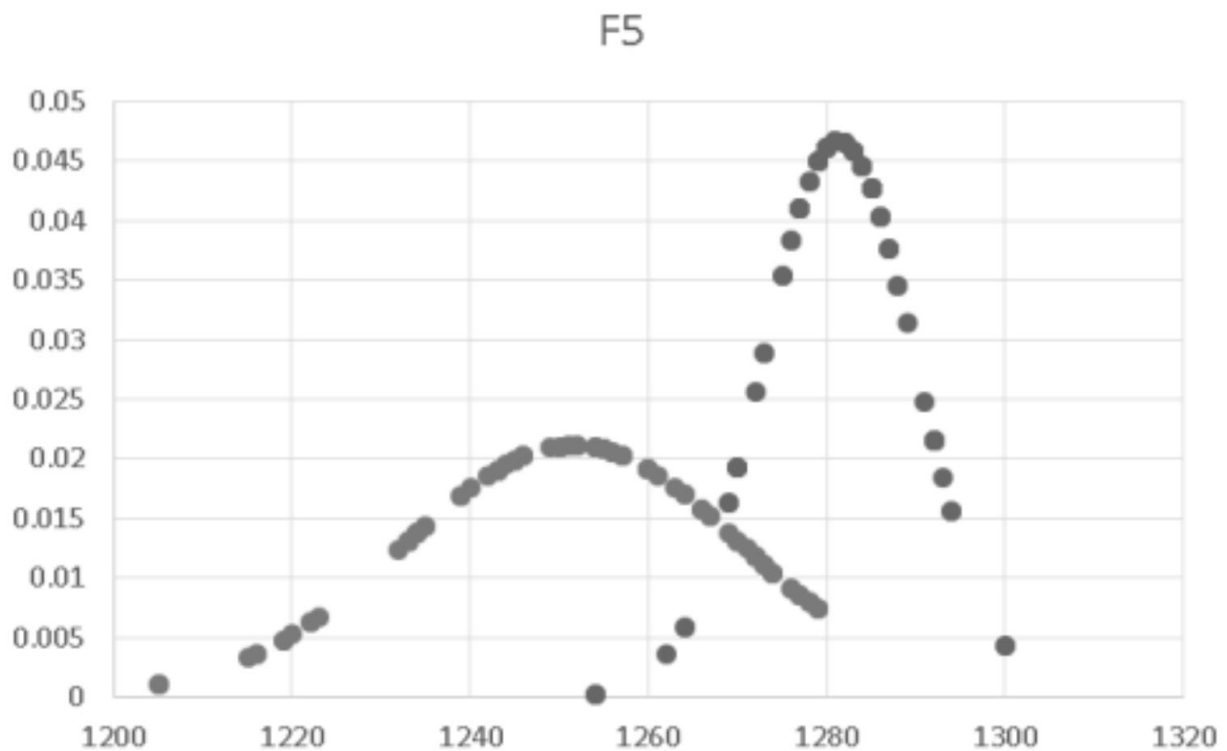


Рис. 3. Нормальное распределение значений частот для двух комплектов рабочих лопаток по пятой форме колебаний

Аналогичная картина наблюдалась и по остальным формам колебаний, что говорит о различной ширине разброса частот (стандартное отклонение) для различных комплектов рабочих лопаток. При этом геометрия

обоих комплектов лопаток, полученная методом трехмерного сканирования, не выявила отклонений от электронной модели.

Для комплекта лопаток с большим стандартным отклонением по собственным частотам колебаний значения измеренных напряжений были существенно ниже, чем для комплекта с более узким разбросом частот. Подобная закономерность была выявлена и подтверждена на четырех идентичных комплектах рабочих лопаток с различных ГТД.

Данное наблюдение позволило разработать методику, которая на этапе комплектования рабочих лопаток позволяет изначально добиваться пониженных динамических напряжений. Методика заключается в следующем:

1. Для удвоенного комплекта рабочих лопаток на вибростенде определяются первые n -частот собственных колебаний.

2. На основе полученных статистических значений получаем среднее значение для каждой из n -частот и строим нормальное распределение.

3. На основе полученного распределения отбирается комплект лопаток $K1$ с наиболее близкими собственными частотами (по каждой из n -частот).

4. Полученный комплект $K1$ делится пополам относительно значения n частоты собственных колебаний РЛ. Формируется комплект $K2$ из половины комплекта $K1$ с частотами ниже частоты F_n и оставшихся лопаток с частотами выше частот комплекта $K1$ и комплект $K3$ с лопатками комплекта $K1$ с частотами выше частоты F_n и оставшихся лопаток с частотами ниже частот комплекта $K1$ (см. Рис.4)

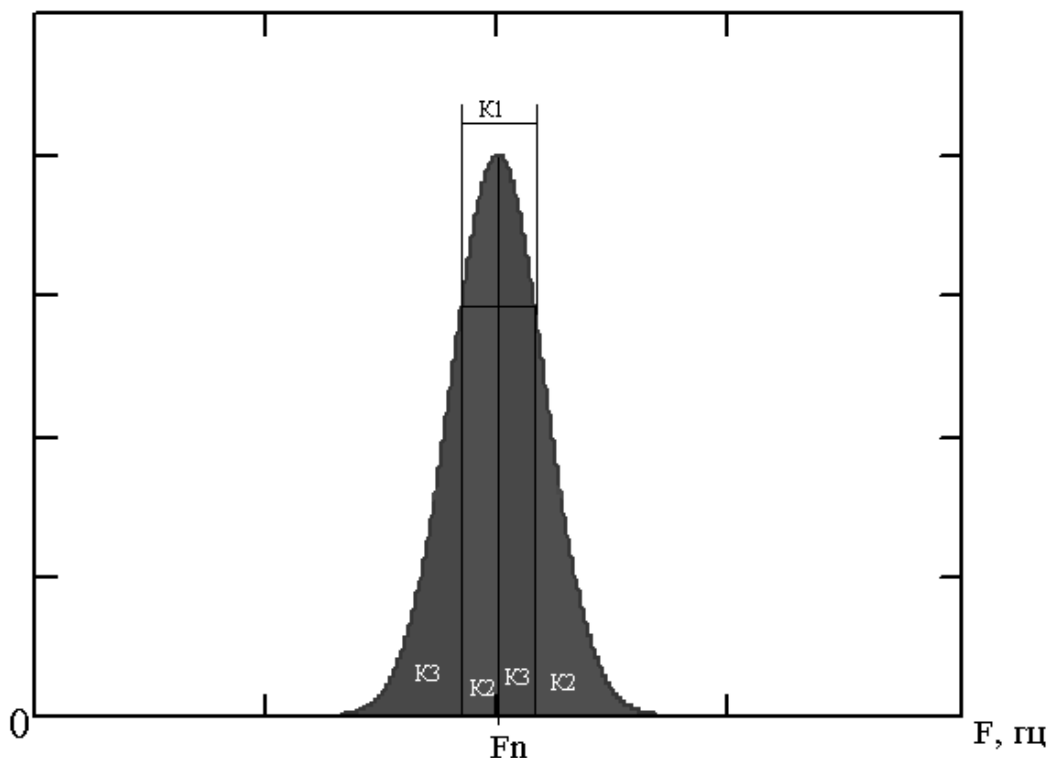


Рис. 4. Формирование двух комплектов рабочих лопаток на основе статистического распределения

Разработанная методика позволяет существенно снизить вибрапрояжения в рабочих лопатках бандажированных ступеней ГТД за счет расширения спектра собственных частот колебаний связанного характера и снижения эффекта взаимного влияния резонансов. Введение разночастности свойственно при отстройке от автоколебаний, где колебания также носят связанный характер [2].

Список использованной литературы:

1. Сиротин Н.Н., Марчуков Е.Ю., Новиков А.С. Повреждаемость и работоспособность авиационных ГТД. Справочник. М.: Наука, 2015.
2. Хориков А.А., Данилкин С.Ю. Способ диагностики вида аэроупругих колебаний лопаток рабочего колеса осевой турбомашин. Патент RU 2451922.
3. Пивоварова М.В., Бессчетнов В.А., Артемов А.В., Лимонова В.М. Верификация расчета распределения динамических напряжений и расчетного метода разработки схемы препарирования для рабочей лопатки компрессора // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №2 (49).
4. Караваев Ю.А., Ходецкий С.А. Оценка прочностного состояния рабочих лопаток компрессоров и турбин авиационных ГТД // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2016. №4.
5. Васильев Б.Е., Магеррамова Л.А. Анализ влияния конфигурации бандажных полок лопаток турбин перспективных двигателей на прочностные характеристики // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2015. №3 (69).
6. Бабенко О.Н., Прибора Т.И. Методы регулирования частот собственных колебаний рабочих лопаток компрессора ГТД // Вісник двигунобудування. 2016. №1.
7. Комаров О.А., Дмитриев Д.Р., Даутов С.Ю., Оссиала В.Б.А. Потери КПД в турбине высокого давления с бандажированной рабочей лопаткой // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2017. №2 (76).
8. Коскин А.О., Селезнёв В.Г. Исследование форм и частот колебаний бандажированного колеса вентилятора на голографической установке и в составе двигателя на испытательном стенде // Вестник СГАУ. 2014. №5-2 (47).
9. Михайлова А.Б., Аймурзин В.А., Ахмедзянов Д.А., Ахметов Ю.М., Михайлов А.Е. Повышение эффективности автоматизированного проектирования лопаточных машин авиационных ГТД в программном комплексе turbocom // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2016. №4 (74).
10. Вентцель Е.С. Теория Вероятностей: Учебник для студ. вузов – 9-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.

Сравнение результатов КЭ расчетов с экспериментом по забросу птиц на вход в работающий ГТД

С. М. Гусенко, А. Г. Терешко

В настоящей работе представлены результаты эксперимента по забросу птиц на вход в работающий газотурбинный авиационный двигатель и их сравнение с результатами конечно-элементных расчетов, выполненных с использованием программного пакета LS Dyna.

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, испытания, эксперимент, заброс птиц, конечно-элементные расчеты.*

В процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) регулярно отмечаются случаи попадания на вход воздухозаборника самолета различных птиц. При этом не исключается возможность повреждения узлов и деталей двигателя (от простого повреждения рабочих лопаток до схода двигателя с подвески), изменение его эксплуатационных характеристик и основных параметров. Наиболее критичными данные происшествия являются для двигателей военной авиации (ВА), что связано с особенностями конструкции и эксплуатации ГТД ВА. Оценка последствий попадания птиц на вход в двигатель является необходимым требованием нормативной документации при проектировании ГТД и прохождении государственных стендовых испытаний (ГСИ).

В современном авиадвигателестроении накоплен большой опыт решения задачи по оценке последствий попадания птиц на вход в ГТД:

- прямой эксперимент, когда на вход в двигатель забрасывается птица (или стая птиц), после чего проводится оценка последствий;
- непрямой эксперимент, когда на вход в двигатель забрасывается гелиевый (или иной) имитатор птицы, соответствующий ей по размеру и массе;
- расчетный метод – с помощью конечно-элементных (КЭ) программных комплексов, таких как ANSYS, LS DYNA и т.п. производится моделирование быстротекущего процесса соударения модели птицы и вращающихся рабочих лопаток (РЛ) ГТД.

С решением задач по забросу птиц на вход в двигатель ОКБ им. А. Люльки сталкивались и ранее: в 80-х годах XX века подобные испытания проводились путем прямого эксперимента. На вход в двигатель производился заброс как отдельных птиц и нескольких птиц одновременно.

В дальнейшем, стал широко применяться расчетный метод КЭ, что позволило решить данную задачу для целого ряда изделий на этапе проектирования. Пример подобного расчета представлен на рис. 1.

Однако применение расчетных методов имеет ряд ограничений: в случае, когда вновь проектируемый двигатель не имеет близкого по конструкции прототипа, либо на этапе ГСИ требуется проведение прямого эксперимента по забросу птиц на вход в двигатель.

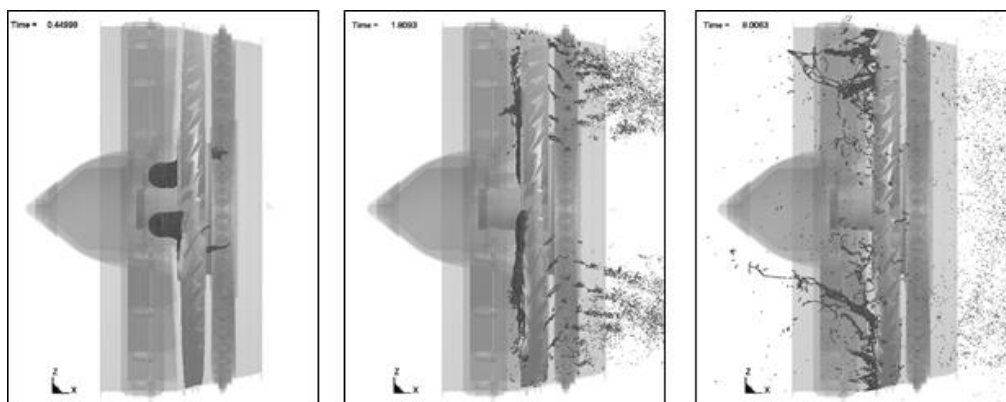


Рис. 1. КЭ моделирование быстротекущего процесса соударения двух птиц с вращающимся колесом вентилятора

В связи с выходом на ГСИ новейших двигателей для выполнения требований нормативной документации было принято решение провести натурные испытания по забросу двух птиц массой 300г. При проведении эксперимента был решен ряд задач:

- восстановлена и доработана установка для обеспечения реализации требуемых условий эксперимента;
- разработана система замера скорости вылета снаряда и система фиксации точки попадания;
- выполнен прямой эксперимент по забросу двух птиц на вход в работающий двигатель;
- проведена верификация методов КЭ моделирования, применяемых в отделе прочности ОКБ им. А. Льюльки, с проведенным экспериментом.

Для реализации испытаний была собрана установка на базе классической пневмопушки, состоящей из ствола, диаметром 125 мм, ресивера и сервоклапана (рис. 2).



Рис. 2. Пневмопушка

В конструкцию пневмопушки были внесены следующие изменения:

- для облегчения прицеливания установлен лазерный целеуказатель (по ТЗ разброс «птиц» при попадании не должен превышать ± 50 мм);
- разработан и смонтирован глушитель (для исключения колебаний ствола до момента вылета птиц) вылета пыж-контейнера (Рис. 3).

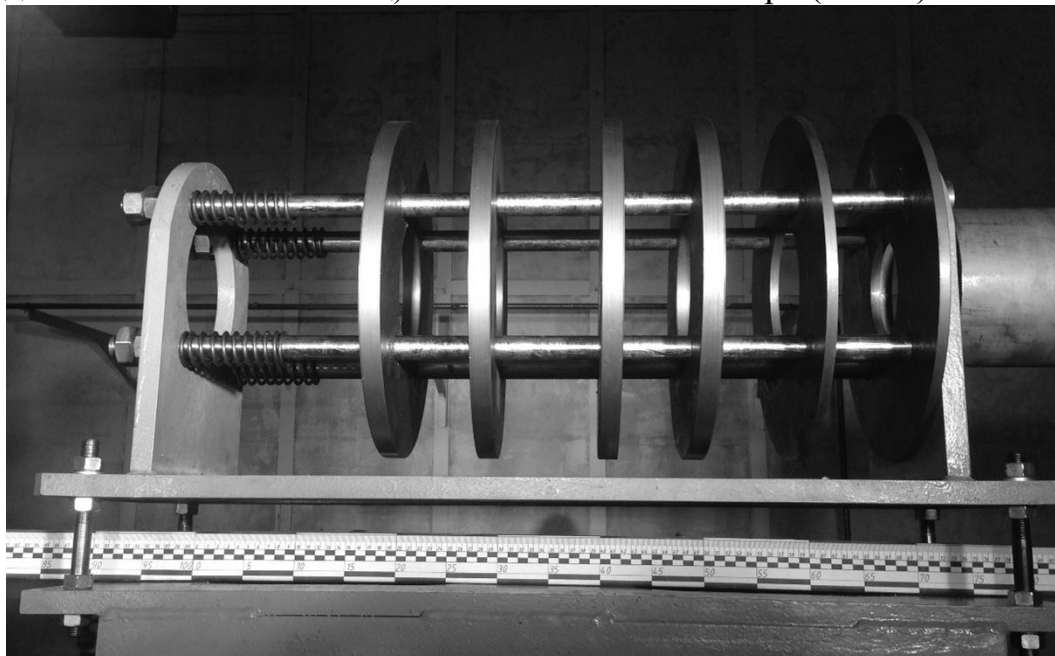


Рис. 3. Глушитель вылета пыж-контейнера

Замер скорости заброса объектов осуществлялся посредством видеосъемки с использованием высокоскоростной камеры Phantom с частотой записи 5000 кадров/с. Еще одна аналогичная камера была установлена напротив входа в двигатель для видеофиксации точки попадания.

Для выбора оптимального давления в ресивере (скорости вылета объекта из пневмопушки), а также для проверки системы видеорегистрации, было выполнено несколько выстрелов с использованием массогабаритных макетов (ММГ) птиц по имитатору входа в двигатель.

Наличие видеокамеры направленной на вход в двигатель позволило точно зафиксировать точку попадания каждого из объектов в отдельности, что ранее было невозможно сделать классическими методами.

СТП (средняя точка попадания) и скорость вылета для каждого из ММГ птиц была определена по серии из пяти выстрелов. Средняя скорость вылета ММГ из ствола и отклонение от расчетной точки попадания удовлетворяют требованиям ТЗ (Рис. 4). Дополнительно было выполнено сравнение замера скорости вылета и точности попадания при выстрелах имитаторами и при выстрелах реальной птицей.

Анализ результатов показал, что поведение реальных птиц при контакте с твердыми объектами хорошо коррелирует с расчетной моделью, где плотность птиц принимается равной плотности воды.

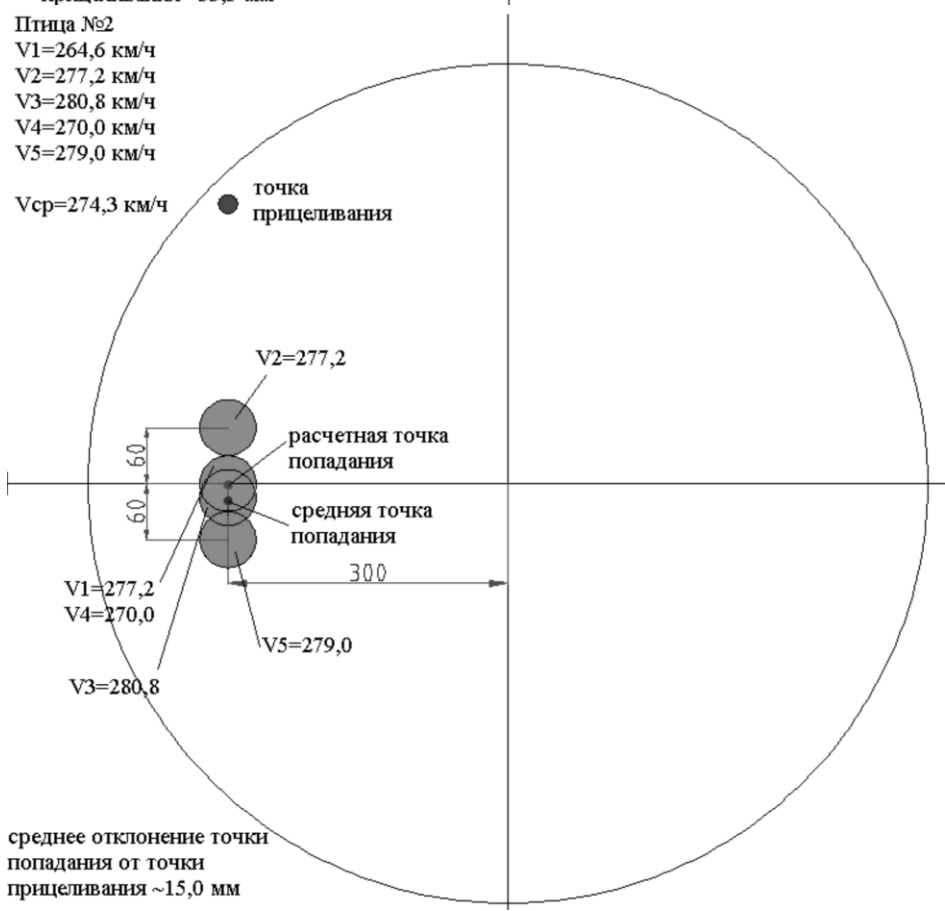
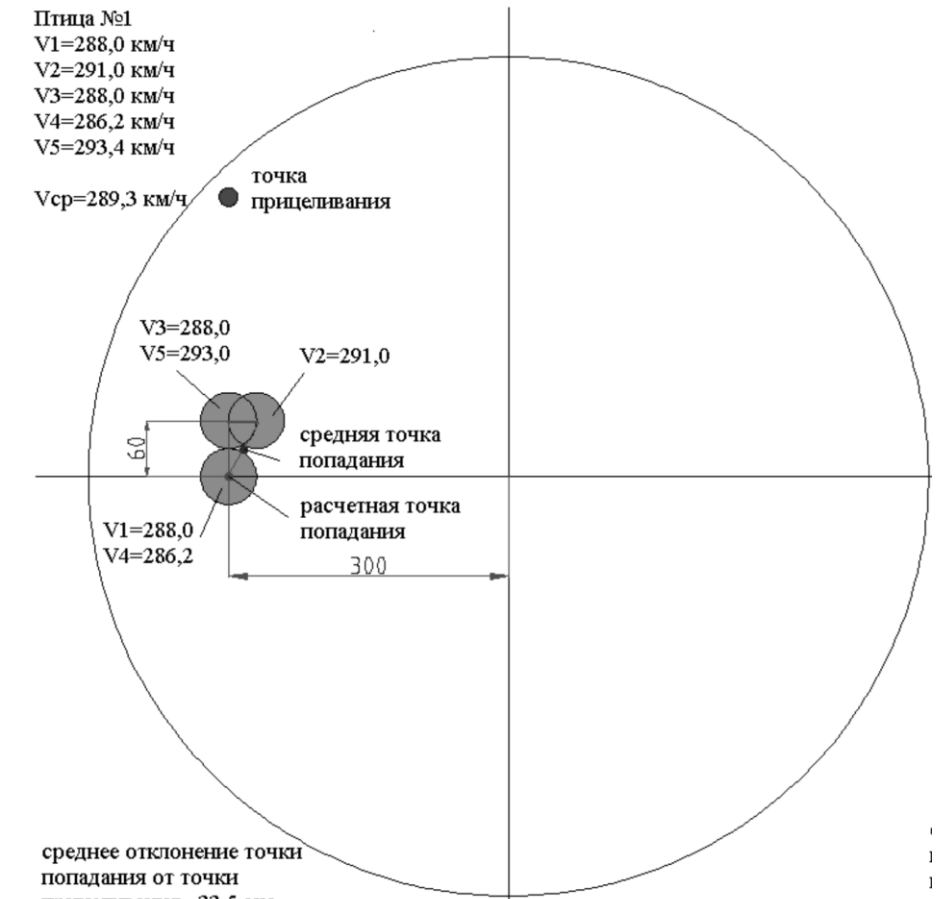


Рис. 4. Результаты замеров СТП и скоростей ММГ по результатам серии из пяти выстрелов

Полученная точность позволила выполнить эксперимент по забросу двух птиц на вход в работающий двигатель в соответствии с требованиями ТЗ и сравнить его с результатами КЭ расчета. Как показало сравнение, получена хорошая сходимость расчета с экспериментом как по характеру взаимодействия птиц с элементами двигателя, так и по результатам их деформации (Рис. 5 и 6).

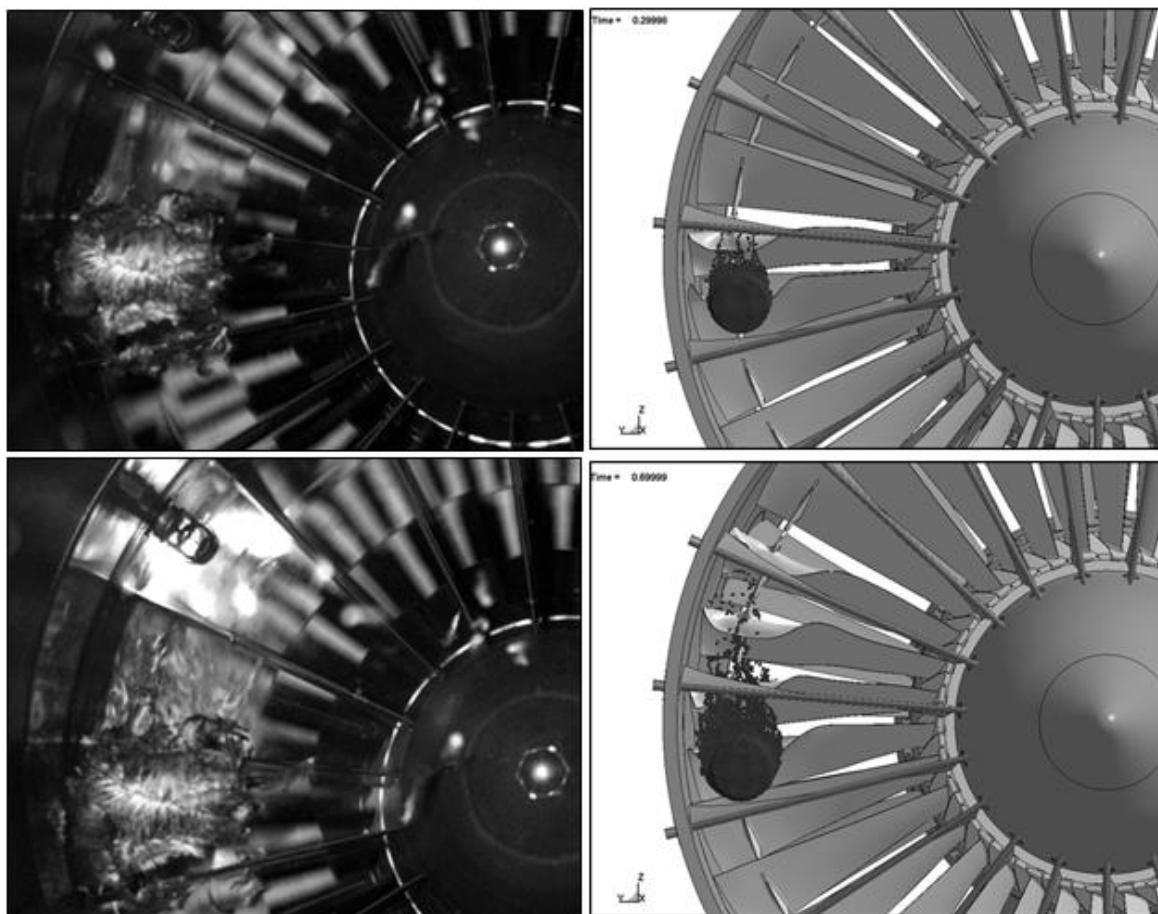


Рис. 5. Сравнение характера взаимодействия первой птицы с элементами двигателя при эксперименте и в КЭ расчете в нулевой момент времени и через 400 мс

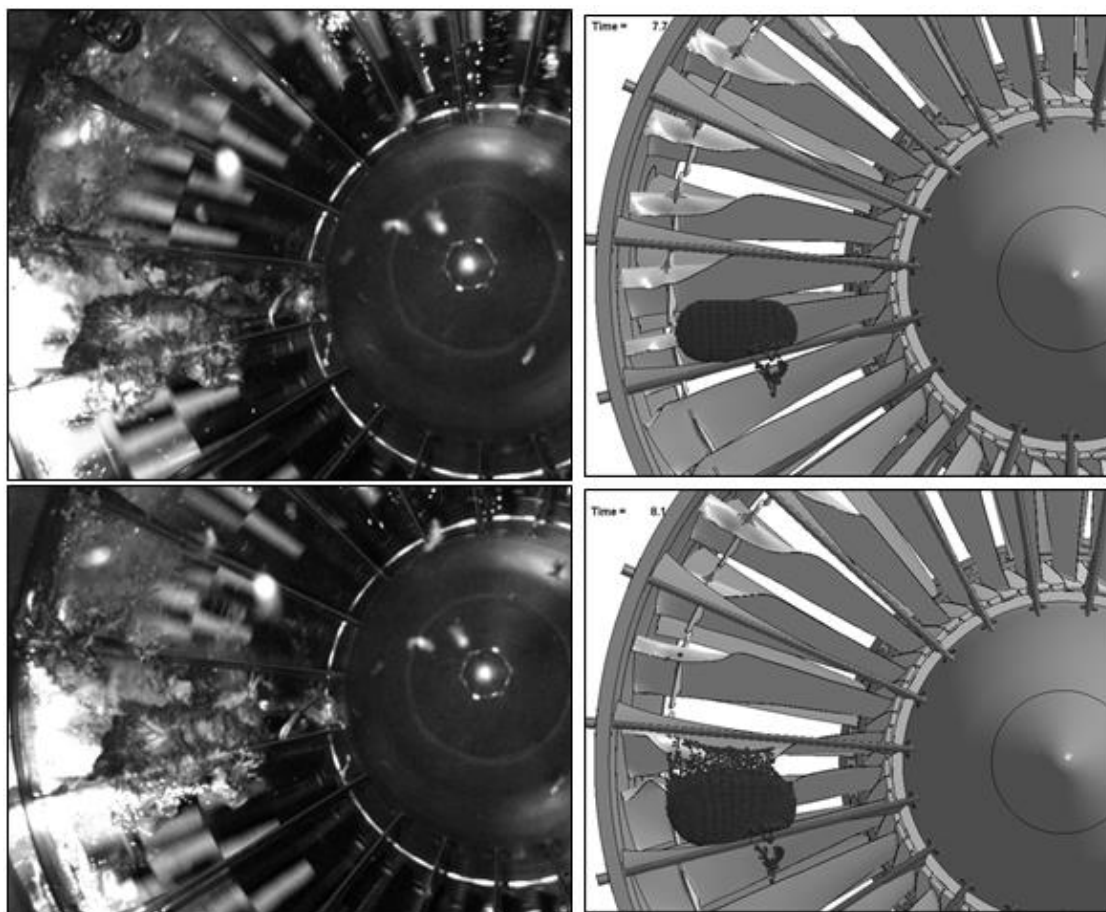


Рис. 5. Сравнение характера взаимодействия второй птицы с элементами двигателя при эксперименте и в КЭ расчете в нулевой момент времени и через 400 мс

Полученные в ходе результаты подтвердили, что установка по забросу птицу удовлетворяет требованиям ТЗ и позволяет выполнять натурные эксперименты в соответствии с требованиями нормативной документации. Проведенный эксперимент и расчеты, выполненные по результатам верифицированных КЭ моделей, позволили успешно завершить ГСИ двигателя. Опыт по верификации математических моделей позволил в дальнейшем заменить ряд аналогичных экспериментов расчетами, что существенно сэкономило средства и сохранила дорогостоящую мат. часть.

Список использованной литературы:

1. Баляева Н.Н., Гусенко С.М., Терешко А.Г. Эксперимент по забросу птиц на вход в работающий ГТД и сравнение его результатов с КЭ расчетом. Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 12-14 сентября 2018 г. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2018 – С.29-30.

2. Кирсанов А.Р. Методика оценки повреждаемости ГТД на этапах его создания, изготовления и эксплуатации от поражающего воздействия птиц. Диссертация – ФГУП ГосНИИ ГА – Москва, 2016. – 205 с.
3. Кузьмин М.В., Кирсанов А.Р. Расчетная оценка повреждаемости газотурбинного двигателя при попадании на вход птиц. Научный вестник МГТУ ГА. - 2015. - № 212. - С.127-133.
4. Сиротин Н.Н., Марчуков Е.Ю., Новиков А.С. Повреждаемость и работоспособность авиационных ГТД. Справочник. М.: Наука, 2015.
5. Сиротин Н.Н., Мараховский И.В., Кирсанов А.Р. Методика оценки адекватности повреждаемости ГТД, воспроизведенной при численном моделировании, реальной повреждаемости. Научный вестник ГосНИИ ГА. - 2015. - № 11. – С.82-89.
6. Кузьмин М.В., Кирсанов А.Р. Описание модели разрушения материала рабочих лопаток вентилятора. Научный вестник ГосНИИ ГА. - 2014. - № 4. - С. 62-67.
7. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Гладкий И.Л. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2011. - т. 13, № 4 (4). - С. 991-997.
8. Нарыжный А.Г., Павленко В.Н., Светличный С.П. Анализ факторов, связанных со случаями попадания птиц в авиационный двигатель. Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал. – 2011. – Вып. 6 (83). - С. 62-67.
9. Нарыжный А.Г., Павленко В.Н., Светличный С.П. Особенности постановки задачи исследования механических процессов соударения птицы с лопаткой двигателя. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2012. - № 57. - С. 67-77.
10. Константинов А.Ю. Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней: Диссертация – НИИМ Нижегородского университета. – Нижний Новгород, 2018. – 304 с.

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 372.862

Опыт создания и применения электронно-образовательного ресурса для графических дисциплин

О.В. Белокрылова, В.О. Кобелева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Электронная информационно-образовательная среда организации должна обеспечивать проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Главный акцент в электронном обучении и управлении знаниями – это помочь студентам оптимизировать процесс получения знаний

Ключевые слова: *электронное обучение, компьютерные программы, графические дисциплины*

В настоящее время разного вида инновации характерны для любой отрасли промышленности, актуальны они и для системы образования, в том числе и для кафедры начертательной геометрии и технического черчения

Инновации в нашей деятельности являются результатом постоянных практических поисков, прогрессивного педагогического опыта, повседневной работы преподавателей графических дисциплин. На кафедре приходится постоянно изменять современное учебно-методическое сопровождение графическим дисциплинам, а это и есть педагогические инновации, т.е. изменения в содержании и технологии

Одним из основных организационно-педагогических условий ее формирования является создание и применение электронно-образовательного ресурса (ЭОР) для графических дисциплин.

Требования к электронной информационно-образовательной среде вуза прописаны в Федеральном государственном образовательном стандарте.

Электронная информационно-образовательная среда организации должна обеспечивать проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением

электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Создание ЭОР осуществлялось на основе дистанционной среды, позволяющей организовать образовательную деятельность.

Таким образом, стираются грани между обучением на расстоянии и непосредственно внутри образовательного учреждения. Правительство РФ поручило МОН разработать модель включения онлайн курсов во все образовательные программы. В 2014 вузы РФ получили право полной замены аудиторных занятий на работу онлайн. Развитие современной системы образования в России обуславливается влиянием и внедрением информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) во все сферы деятельности учебных заведений. Главный акцент в электронном обучении и управлении знаниями – это помочь студентам оптимизировать процесс получения знаний.

Учебный материал предоставляется пользователю в электронном виде, и пользователь изучает его, просматривая в интернет-браузере.

Однако, такой вариант электронного обучения «односторонний» — пользователи имеют доступ к учебному материалу, изучают его, но не ясно как они его усвоили, и вообще смотрели ли они его. Для упрощения и контроля учебного процесса и существует система электронного обучения. Главное преимущество электронного обучения-это, «обратная связь». Система электронного образования позволяет автоматизировать многие рутинные процессы и получить даже больше информации об успеваемости, чем при традиционном обучении. Теперь можно сказать точно, насколько хорошо учащиеся усвоили учебный материал, а также подкорректировать учебный процесс, как в целом, так и для конкретных студентов.

У электронного обучения есть свои плюсы и минусы. В качестве основных преимуществ электронного обучения большинство исследователей называют:

- доступность учебных материалов во времени и в пространстве;
- автоматизация проверки заданий (тестов) и хранение результатов;
- возможность оперативного обновления теоретического материала, фактической и статистической информации;
- наглядность учебных материалов на основе использования различных средства мультимедиа (анимации, аудио и видео), позволяющая задействовать большинство механизмов восприятия человеком новой информации;
- упор на самостоятельную работу студента, способствующую формированию навыков самоорганизации и рационального планирования учебного времени;
- развитие навыков владения современными инфокоммуникационными технологиями;

- формирование и развитие навыков целеполагания, инициативности и ответственности;
- индивидуальный подход, возможность адаптации учебных курсов для студентов с разным уровнем подготовки.

Успешность внедрения электронного обучения, кроме вышеизложенного, во многом определяется мотивацией студентов и профессорско-преподавательского состава. Как правило, студенты сегодня психологически и практически больше, чем преподаватели готовы к использованию электронного обучения. У большинства студентов уже сформированы навыки работы в сети. Почти каждая учебная группа имеет свою страницу в социальных сетях, в которой происходит обмен информацией, учебными материалами и пр. Некоторые преподаватели успешно используют этот ресурс.

Кроме того, существуют различные модели электронного обучения, включая полностью сетевое обучение по отдельному курсу или в рамках виртуальной кафедры, университета; интегрированное с очным обучением. Каждая из указанных моделей имеет свою специфику, касающуюся, как организации учебных материалов, так и методики проведения занятий, форм. Интеграция дистанционных и очных форм обучения представляется на сегодняшний день наиболее перспективной и востребованной для вузов взаимодействия студентов друг с другом, с преподавателем.

Для студентов очной формы обучения сейчас идет реализация образовательных программ в ИрНИТУ с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий. Строится на базе информационной системы Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), распространяемой системы управления обучением MOODLE.

Разработка осуществлялась по модульному(тематическому) принципу, поскольку учебный материал имеет модульную структуру и разбит на темы, предполагающую методически и содержательно обоснованное деление ЭОР на самостоятельно оформленные учебные модули.

По каждому модулю создавался необходимый учебно-методический материал: электронные лекции, учебники, пособия, методические указания по выполнению графических работ, электронные задания для практических занятий примеры и технологии их выполнения, справочные средства (библиотеки стандартных изделий, ГОСТ, глоссарий и т.д.),

обучающие средства (различные видеоролики и т.д.), контролирующие средства (тесты, контрольные вопросы и т.д.).

Учитывая специфику преподавания графических дисциплин, в системе MOODLE можно включать интерактивные анимационные ролики, демонстрирующие процессы формообразования, решение типовых задач, построение линии пересечения поверхностей и др. Активные элементы курса являются реализацией практических занятий при сетевом обучении.

К активным элементам в данном случае относятся: задание, тест, форум, чат, глоссарий, кроссворд. При контроле знаний тестов оценка выставляется автоматически. Для организации информационного взаимодействия преподаватель может использовать элемент форум (вопрос по теме), элемент «чат».

Все материалы по курсу инженерной графики доступны студентам в любое время. Достаточно зарегистрироваться на сайте электронного обучения ИрНИТУ. Существует возможность ограничения по времени изучение курса или допуска к следующему элементу курса, например, тесту. Без изучения темы доступ к тесту закрыт.

После анализа результатов в конце семестра хорошо прослеживается связь между изучением курса и результатами промежуточной успеваемости. Студенты, не заходившие на сайт или не изучавшие предложенные материалы, показывали худшие результаты на практических занятиях и при прохождении тестов по темам и на экзамене.

После прохождения курса инженерной графики студентам был предложен небольшой опрос о выборе предпочитаемых источников получения информации по курсу. Вот что показали результаты опроса.

Участников опроса было 105 человек, студенты института высоких технологий и института авиамашиностроения и транспорта.

- Освоение теоретического курса традиционным способом (учебник из библиотеки) использовали 19 % студентов.
- Электронные лекции (презентации) с сайта электронного обучения использовали 95 % обучающихся.
- Другие источники: электронные учебники, другие обучающие сайты 20%.

Практические занятия, как показан опрос лучше воспринимаются, если идет объяснение или просто небольшая помощь в решении задач преподавателем на доске или экране монитора.

Практически 98% студентов указывают как хороший источник для выполнения графических работ пример решения и поэтапное построение в презентациях на сайте электронного обучения. Активно используют примеры на YouTube.

Подготовка специалиста конкурентоспособного на современном рынке труда невозможна без использования информационных технологий в образовании. В частности, без прикладных графических программных продуктов, позволяющих сокращать сроки и повышать качество выполнения и оформления чертежей в соответствии со стандартами.

Применение любого графического пакета AUTOCAD или КОМПАС дает возможность качественно выполнять чертежи, сократить время на самостоятельное выполнение задания, но на изучение прикладной графиче-

ской системы время программой курсов «Начертательная геометрия», «Инженерная графика» не предусматривается. Следовательно, знакомиться с работой графического пакета студентам приходится чаще всего во время самостоятельной вне аудиторной работы или на консультации. Надо отметить что студенты охотно используют возможность выполнения графических работ с помощью графических программ так как у многих студентов нет навыков качественного выполнения графических работ вручную.

Следует заметить, что с учетом специфики предметов, заключающейся в необходимости графических построений, наличия чертежей заменить полностью очное обучение на электронное невозможно. Но подготовится и проконтролировать свои знания и умения вполне. Сдача экзамена или зачета в настоящий момент предполагает очное собеседование с преподавателем и выполнение контрольных графических заданий.

Такая система электронного обучения позволяет вывести обучение на новый уровень, повысить уровень коммуникации, обеспечить необходимой информацией по курсу, указать другие информационные источники.

Список использованной литературы

1. Белокрылова О.В., Иванова М.А., Оптимизация учебной деятельности студентов по графическим дисциплинам с помощью электронного обучения //Сборник материалов 1X Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». -Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2017.с.504-507
2. Сечкарева Г. Г. Проблемы электронного обучения в школе глазами студента-практиканта // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 13. – С. 36–40
3. Михеева С.А, Свит Е.П. Опыт и перспективы использования электронного обучения в образовательной среде педагогического университета //Журнал Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Выпуск№ 168 / 2014
4. Хамитова Д. В. Электронно-образовательный ресурс курсов графических дисциплин в системе управления обучением LSM MOODLE // Вестник казанского государственного энергетического университета. – 2014 – № 2 (21). – С. 138–142.
5. Андриюшина Т.В., Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 27 марта 2015 г., г. Брест, Республика Беларусь, г. Новосибирск, Российская Федерация

Исследование влияния ориентации инструмента на силы резания при обработке поверхностей сфероцилиндрическими фрезами

Б.Б. Пономарев, Нгуен Ши Хьен

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния ориентации инструмента, определяемой углами наклона и опережения, на силы резания при чистовом фрезеровании поверхностей свободной формы. Подтверждено, что позиция точки инструмента с нулевой точки фактически влияет на динамические характеристики процесса фрезерования. Сформулированы оценки и рекомендации по выбору оптимальной позиции инструмента для избегания от высокой нагрузки в обработке.

Ключевые слова: *поверхности свободной формы, пятикоординатное чистовое фрезерование, сфероцилиндрические фрезы, силы резания.*

Поверхность сложной формы – это поверхность, параметры локальной топологии которой изменяются от одной точки к другой бесконечно близкой ее точке [0]. Для процесса чистовой обработки сложных поверхностей на современных станках с ЧПУ чаще всего используют сфероцилиндрические концевые фрезы, которые позволяют минимизировать остаточный гребешок и избежать локальных и глобальных зарезаний в заготовке.

При пятикоординатном фрезеровании инструмент может ориентироваться двумя его параметрами по отношению к нормали к обрабатываемой поверхности в точке их касания: угол наклона (α) и угол опережения (β) [2]. Угол наклона – это угол между проекцией оси инструмента и нормалью обрабатываемой поверхности на плоскости, проходящей через нормаль поверхности и перпендикулярной подачи стола; а угол опережения определяется углом между ними на плоскости, проходящей через нормаль поверхности и параллельной подаче стола.

Задачей данного исследования является исследование влияния ориентации инструмента на силы резания при чистовом фрезеровании поверхностей.

Для установления закономерностей при чистовой обработке поверхностей концевой сфероцилиндрической фрезой, был проведен ряд экспериментов по изготовлению и измерению сил резания процесса. Обработка произведена на пятикоординатном фрезерном станке модели HSC 75 linear,

используя концевые сфероцилиндрические фрезы фирмы MISUBISHI диаметром 8 мм с двумя и четырьмя зубьями (рис. 1). В качестве заготовки использованы пластины из стали ст3 размером 120x120x10 мм. Для подготовки управляющих программ использовался САМ модуль программы Unigraphic NX.



Рис. 1. Сфероцилиндрические фрезы с двумя и четырьмя зубьями, используемые в исследовании

Для измерения сил резания в процессе фрезерования был выбран трехкомпонентный стационарный динамометрический комплекс для токарных станков Kistler Type 9129AA, с помощью которого определяются три компонента силы резания F_x , F_y и F_z с диапазоном измерения ± 10 кН.

Для сбора и анализа данных при силовом анализе производителями приборов предлагается использовать многоцелевое программное обеспечение DynoWare. Программное обеспечение разработано с целью создания измерительного комплекса на основе хорошо зарекомендовавшей себя линейки кварцевых динамометров фирмы Kistler и их использования совместно с современной компьютерной техникой [3, 4].

При исследовании влияния позиции инструмента относительно нормали к заготовке в точке касания режимы резания были неизменны и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режим резания при ориентации инструмента

Глубина резания, t	0,2 мм
Частота вращения шпинделя, n	6000 мин^{-1}
Подача на зуб, f_z	0,02мм/зуб

Так как при ориентации инструмента из-за изменения характеристики зоны встречного и поперечного фрезерования при контакте инструмента с заготовкой, составляющие силы F_x , F_y и F_z изменяют знак при повороте инструмента в процессе фрезерования. При этом для полной оценки влияния ориентации инструмента на силы резания необходимо анализировать все графики-диаграммы проекций сил резания. Это очень сложно выполнить при большом количестве попыток исследований.

В этом исследовании для оценки силы резания используем значение, определяемое корнем от суммы квадратов всех составляющих проекций по формуле (1).

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

На рис. 2 представлен результат преобразования составляющих сил на суммарную силу резания в программе DynoWare с помощью инструмента Манипуляция данными (Data Manipulation). При этом сможем применить максимальные $F_{\text{макс.}}$ и средние параметры $F_{\text{сред.}}$ для оценки результирующей силы резания в процессе чистового фрезерования. $F_{\text{макс.}}$ характеризует максимальную нагрузку, действующую на инструмент, и влияет на прочность инструмента. $F_{\text{сред.}}$ характеризует максимальную нагрузку и влияет на долгосрочность инструмента.

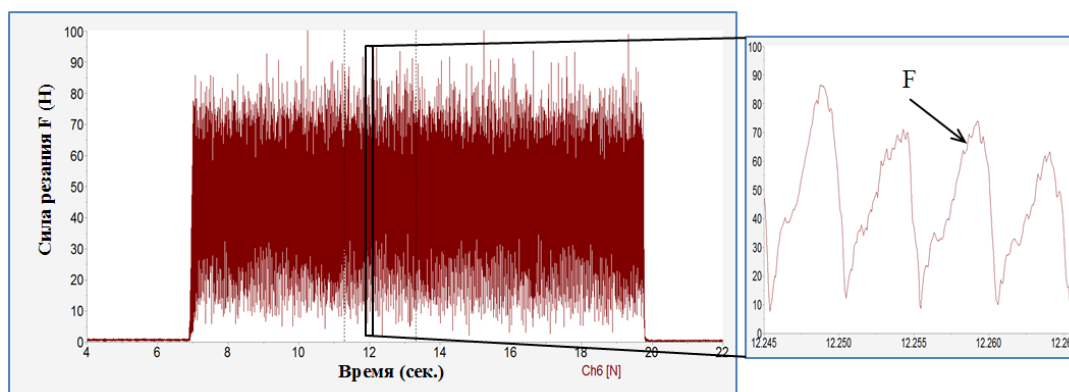


Рис. 2. Зависимость суммарной силы резания F от времени

Влияние угла наклона инструмента на силы резания. Для анализа влияния угла наклона инструмента на силы резания были проведены испытания измерения сил резания при различных значениях угла наклона в интервале $(-50, 50^\circ)$. При этом углы $\pm 18,2^\circ$ – углы, при которых, точка с нулевой скоростью выходит из зоны контакта с обрабатываемой поверхностью.

Зависимость максимальных и средних значений суммарной силы резания $F_{\text{макс.}}$ и $F_{\text{сред.}}$ представлена на рис. 3. Сразу видно, что при постоянном режиме резания силы, действующие на четырехзубную фрезу больше, чем на двухзубную. Критическое значение нагрузки может достигаться при переходе нулевой точки из зоны обработки на зону холостого движения. А среднее значение силы резания достигает максимума при нулевом угле наклона.

Также необходимо отметить, что при холостом движении нулевой точки инструмента, происходит перерыв между проходами кромок фрезы, т.е. в некоторые моменты времени силы резания приближаются к нулю. Поэтому при таких позициях инструмента разница между максимальным значением и средним значением силы резания стала большой (см. рис. 3).

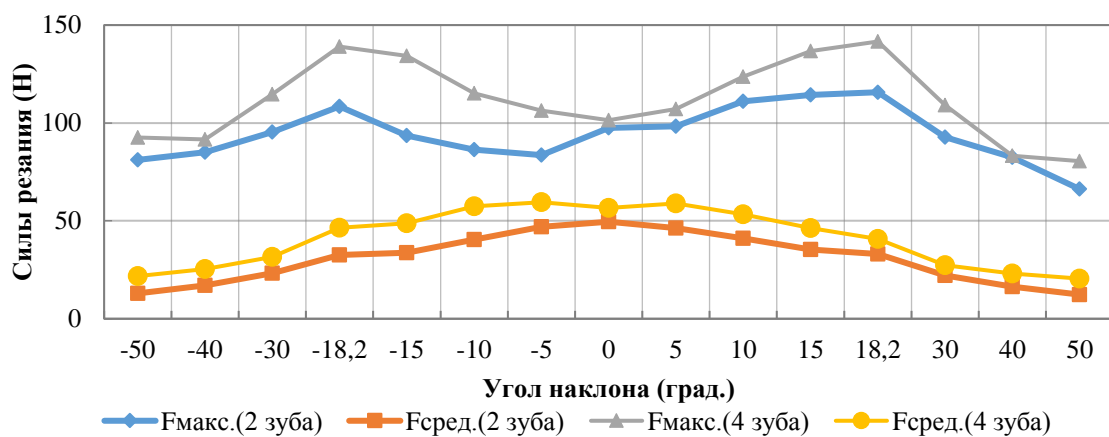


Рис. 3. Зависимость максимальных и средних значений суммарной силы резания от угла наклона

Влияние угла опережения инструмента на силы резания. Аналогично, для оценки влияния угла опережения инструмента на силы резания инструмент был ориентирован под углом в интервале $(-50^{\circ}, 50^{\circ})$. В отличие от предыдущего случая, нулевая точка находится в зоне контакта с заготовкой только при изменении угла опережения от 0 до $18,2^{\circ}$.

На рис. 4 изображены графики изменения суммарной силы резания при различных значениях угла опережения инструмента.

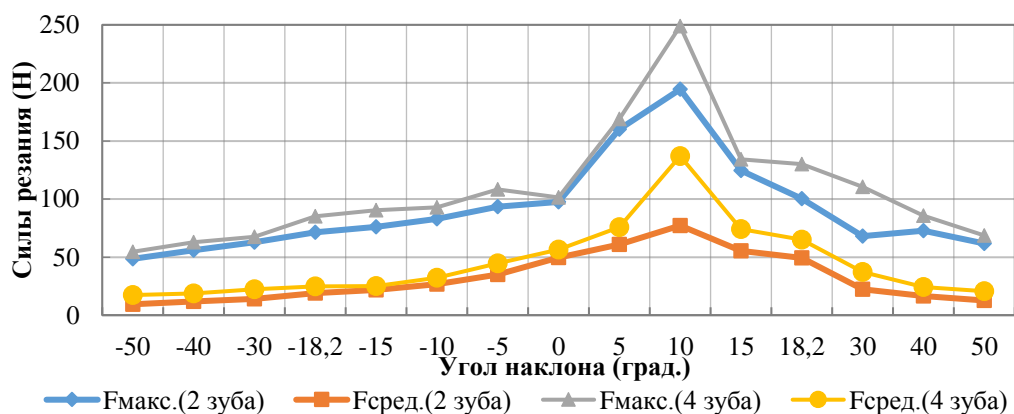


Рис. 4. Зависимость максимальных и средних значений суммарной силы резания от угла опережения

Из графиков видно, что в интервале изменения угла опережения, при котором точка инструмента с нулевой скоростью еще находится в зоне обработки, силы резания значительно увеличивается, и силы достигаются максимуму при угле 10° . При этом процесс фрезерования имеет много общего с процессом сверления.

Влияние комбинации двух углов на силы резания. Для двухфакторного анализа влияния ориентации инструмента на силы резания с учетом углов наклона и опережения был проведен ряд испытаний, при котором углы изменялись в интервалах $(-30^{\circ}, 30^{\circ})$ с шагом 10° . Тогда инструмент

ориентируется вокруг нормали обрабатываемой поверхности во всех сторонах, и для каждого случая угол между оси инструмента и нормалью поверхности определяется по следующей формуле:

$$\gamma = \text{arctg} \left(\sqrt{\text{tg}^2 \alpha + \text{tg}^2 \beta} \right) \quad (2)$$

Результаты измерения и анализа силы резания при ориентации инструмента с двумя и четырьмя зубьями представлены на рисунках 5, 6.

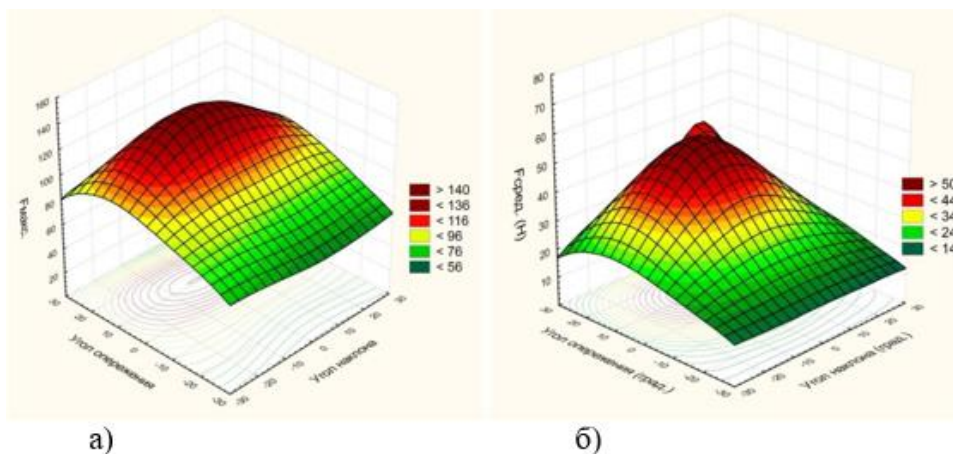


Рис. 5. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) сил резания от ориентации инструмента при фрезеровании четырехзубной фрезой

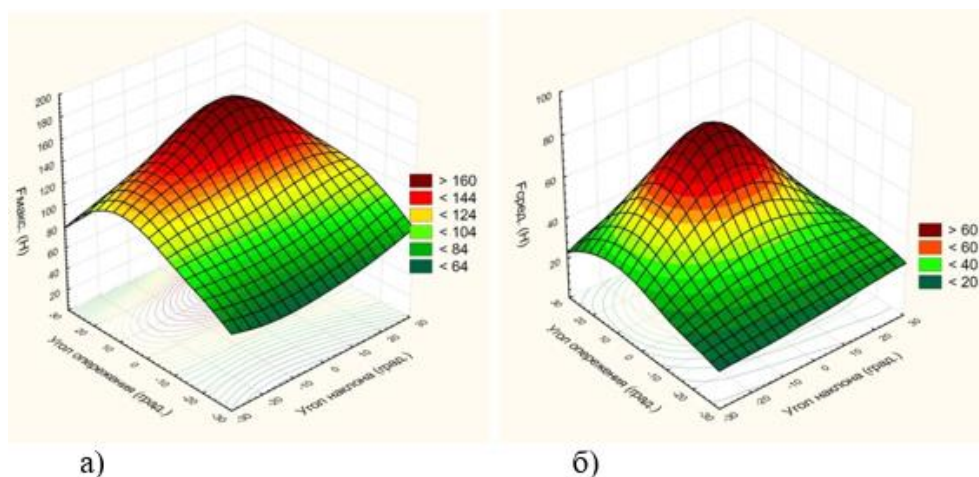


Рис. 6. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) сил резания от ориентации инструмента при фрезеровании четырехзубной фрезой

На диаграммах увидим, что при ориентации инструмента вокруг нормали поверхности силы резания значительно увеличиваются в зоне контакта, при которой нулевая точка инструмента участвует в процессе снятия стружки, т.е. в интервалах изменения угла наклона от -10° до 10° и угла опережения от 0 до 20° . Критические значения силы резания могут дости-

гаться при ориентации инструмента под углом наклона 0 и углом опережения 10°. Низкие значения силы получаются при ориентации с углом опережения -30°.

Таким образом, в этом исследовании был проведен ряд испытаний для измерения силы резания процесса концевой фрезерования при различных позициях ориентации инструмента. Результаты измерения и анализа силы резания при концевом фрезеровании сфероцилиндрической фрезой позволили оценить влияние углов наклона и опережения инструмента на динамические характеристики процесса и выбрать оптимальные углы позиционирования инструмента при концевом фрезеровании поверхностей на пятикоординатных станках с ЧПУ с целью соблюдения прочности и устойчивости инструмента.

Список использованной литературы:

1. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей С.П.– Растан, 2001. – 592 с.
2. Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, т. 708, № 3, с. 11–20.
3. Руководство по эксплуатации - Программное обеспечение DYNOWARE.
4. Утенков В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный Вестник – 2012. – № 10 – 9 с.

УДК 621.757

Изучение влияния корреляции конфигурационных параметров на точность прогнозирования при оценке доли успешных сборок

Л.Ф. Хващевская

Иркутский национальный научно-исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В статье изучается влияние коррелированности конфигурационных параметров узла на точность прогнозирования доли успешныхборок. Предполагается нормальный закон распределения сборочных переменных. Установлено, что игнорирование корреляции при прогнозировании доли успешныхборок может оказывать существенное влияние на точность прогноза.

Ключевые слова: *сборка, коррелированность, допуски, конфигурационные параметры, доля успешныхборок.*

Размерно-точностной анализ сборок играет немаловажную роль в повышении качества изделий машиностроения и снижения затрат их производство.

Для того чтобы обеспечить функциональные возможности узла инженер-конструктор должен иметь возможность контролировать вариации критических переменных сборки. Критическими переменными сборки (критическими конфигурационными параметрами) считаем переменные, которые определяют конфигурацию сборки и от которых зависит «успех» сборки [1]. Конфигурационные параметры описывают смещения и повороты геометрических элементов деталей, входящих в узел.

Изучение современного состояния проблемы размерно-точностного анализа сборок показывает, что достаточно хорошо разработаны методы для проведения одномерного линейного размерного анализа [2-9]. Однако для проведения полноценного пространственного размерно-точностного анализа сборки и получения адекватных результатов необходимо использование многомерных методов [10,11].

Целью данного исследования является изучение влияния корреляции критических конфигурационных параметров сборки на точность прогнозирования доли успешных сборок при оценке собираемости.

Для того чтобы оценить долю успешных сборок используем подходы, описанные в [12] и [1]. Долей успешных сборок будем определять качество сборки.

Предположим, что собираемость узла обеспечивается выполнением точностных требований к одной геометрической характеристике узла. В этом исследовании ограничимся допусками расположения [13].

Конфигурационное многообразие допуска [1] на ключевую геометрическую характеристику сборки характеризуется n критическими сборочными переменными, то есть имеем вектор $\bar{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)^T$ критических сборочных переменных. Для конфигурационных многообразий допусков расположения возможны значения $n = 1, 2, 3$.

Предположим также, что вектор критических переменных сборки имеет нормальный закон распределения [14], то есть $\bar{U} \sim N(\bar{M}_U; \text{cov}(\bar{U}))$, где $\text{cov}\bar{U} = \text{cov}(U_1, U_2, \dots, U_n)$ – ковариационная матрица; $\bar{M} = (m_{U_1}, m_{U_2}, \dots, m_{U_n})^T$ – вектор математических ожиданий (средних значений).

Тогда долю успешных сборок мы можем определить путём n -кратного интегрирования по области Ω следующим образом:

$$\hat{P}_{\Sigma} = \underbrace{\int \dots \int}_{n} f(\bar{U}) du_1 \cdot du_2, \dots, du_n, \quad (1)$$

где $f(\bar{U})$ – функция плотности распределения вероятностей случайного вектора критических сборочных переменных; Ω – конфигурационное многообразие.

Процент брака определится по формуле:

$$Q_{\Sigma}^{\text{брак}} = (1 - \hat{P}_{\Sigma}) \cdot 100\%.$$

Рассмотрим, например, 3D-сборку, состоящую из четырёх однотипных блоков (рис. 1). Предположим, что на верхнюю плоскость каждого блока назначен допуск параллельности относительно нижней поверхности блока. Пусть ключевой геометрической характеристикой сборки является параллельность верхней поверхности четвертого блока относительно базовой плоскости – нижней поверхности первого блока. Конфигурационное пространство допуска параллельности плоскости относительно базовой плоскости определяется двумя критическими переменными: φ_1, φ_2 – углами поворота верхней плоскости четвертого блока вокруг координатных осей OX_1, OX_2 соответственно.

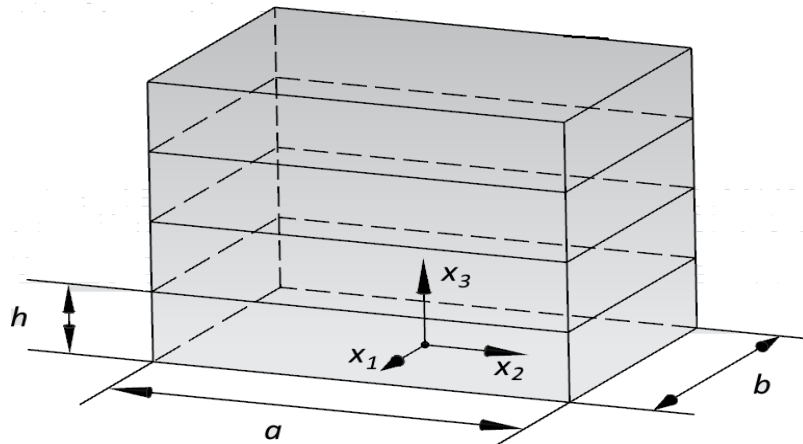


Рис. 1. Сборка из четырёх однотипных блоков

Доля «успешных» сборок, состоящих из четырёх однотипных блоков, будет получена из формулы:

$$\hat{P}_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{|\text{cov}(\bar{\Phi})|}} \cdot \iint_{\Omega} \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot (\bar{\Phi} - \bar{M}_{\bar{\Phi}})^T \cdot (\text{cov}(\bar{\Phi}))^{-1} \cdot (\bar{\Phi} - \bar{M}_{\bar{\Phi}})\right\} \cdot d\varphi_1 \cdot d\varphi_2$$

где $\bar{\Phi} = (\varphi_1, \varphi_2)^T$ – вектор критических переменных сборки; $\bar{M}_{\bar{\Phi}} = (m_{\varphi_1}; m_{\varphi_2})^T$ – вектор математических ожиданий критических переменных сборки; $\text{cov}(\bar{\Phi}) = \text{cov}(\varphi_1, \varphi_2)$ – ковариационная матрица сборки; Ω – область интегрирования: $b \cdot |\varphi_2| + a \cdot |\varphi_1| \leq \Delta$.

Если предположить, что все критические переменные сборки независимы и $-l_i \leq U_i \leq l_i$, то общее качество сборки (долю «успешных» сборок) можно определить по формуле:

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \left(\int_{-l_i}^{l_i} f(u_i) du_i \right) = \prod_{i=1}^n \left(\Phi \left(\frac{l_i - m_{U_i}}{\sigma_{U_i}} \right) \right), \quad (2)$$

где $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt$ – функция Лапласа; m_{U_i} – математическое

ожидание критической сборочной переменной U_i ; σ_{U_i} – среднее квадратическое отклонение U_i .

В случае наличия ковариации критических сборочных переменных формула (2) даёт оценку доли успешных сборок с некоторой ошибкой и для получения более точной оценки необходимо выполнить n -кратное интегрирование по формуле (1).

Исследуем влияние ковариации на оценку доли успешных сборок для двумерного распределения.

Ковариационную матрицу для двумерного распределения запишем в виде:

$$\text{cov}(U_1, U_2) = \begin{pmatrix} \sigma_{U_1}^2 & r \cdot \sigma_{U_1} \cdot \sigma_{U_2} \\ r \cdot \sigma_{U_1} \cdot \sigma_{U_2} & \sigma_{U_2}^2 \end{pmatrix},$$

где r – коэффициент корреляции; U_1, U_2 – критические переменные сборки.

Для двумерного нормально распределённого случайного вектора критических сборочных переменных $\bar{U} = (U_1, U_2)$ с параметрами $N(\bar{0}; \text{cov}(\bar{U}))$ совместную функцию плотности распределения вероятностей запишем в виде:

$$f(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-r^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2\sqrt{1-r^2}} \cdot \left[\frac{u_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{2r \cdot u_1 \cdot u_2}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{u_2^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}.$$

Здесь $\sigma_1 = \sigma_{U_1}$, $\sigma_2 = \sigma_{U_2}$ – средние квадратические отклонения критических сборочных переменных U_1 и U_2 соответственно.

Предположим, что $r=0$ и $U_1 \in [-3\sigma_1; 3\sigma_1]$, $U_2 \in [-3\sigma_2; 3\sigma_2]$, тогда долю успешных сборок найдем с использованием формулы (4.2) в виде:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \int_{-3\sigma_1}^{3\sigma_1} \exp\left(-\frac{u_1^2}{2 \cdot \sigma_{U_1}^2}\right) du_1 \cdot \int_{-3\sigma_2}^{3\sigma_2} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2 \cdot \sigma_{U_2}^2}\right) du_2 = [\Phi(3)]^2 = 0,99461$$

Рассчитаем долю «успешных» сборок путем двукратного интегрирования по формуле (4.1):

$$\hat{P}_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \iint_{\Omega} \exp\left\{-\left(\frac{u_1^2}{2 \cdot \sigma_1^2} + \frac{u_2^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right)\right\} \cdot du_1 \cdot du_2,$$

где область интегрирования Ω : $\begin{cases} -3\sigma_1 \leq u_1 \leq 3\sigma_1, \\ -3\sigma_2 \leq u_2 \leq 3\sigma_2. \end{cases}$

Получим $\hat{P}_{\Sigma} = 0,99461$.

Сравнивая P_{Σ} и \hat{P}_{Σ} , видим, что результаты расчётов совпадают.

Пусть коэффициент корреляции $r = \pm 0,25$. Тогда, игнорируя корреляцию, по формуле (2) получим $P_{\Sigma} = 0,99461$. Бракованными будут признаны 0,539% сборок.

При двукратном интегрировании функции плотности распределения вероятностей $f(u_1, u_2)$ по формуле (1) с использованием квадратурной формулы Гаусса [15] (количество узловых точек 32) получаем долю успешных сборок, равную 0,99464. Брак составит 0,536%.

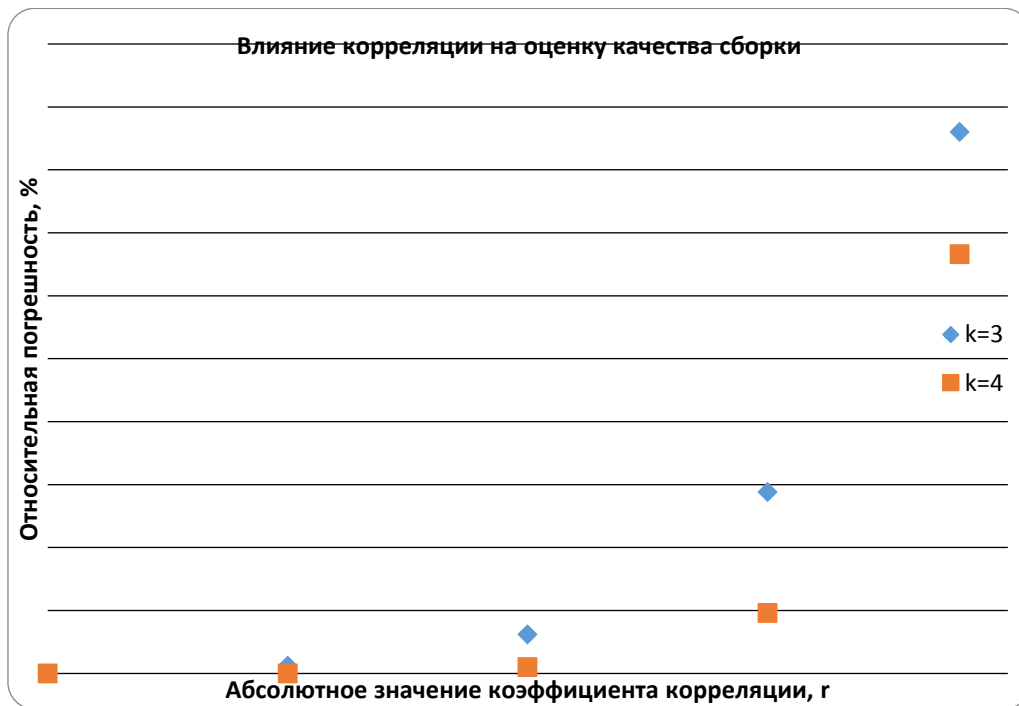


Рис. 2. Относительная ошибка при прогнозировании доли «неуспешных» сборок (двумерное нормальное распределение)

Рассчитаем относительную погрешность при определении доли брака, получаемую при расчёте по формуле (2), при наличии коррелированности сборочных переменных следующим образом:

$$\delta = \frac{|P_{\Sigma} - \hat{P}_{\Sigma}|}{1 - \hat{P}_{\Sigma}} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Для рассмотренного случая при $r = \pm 0,25$ получим $\delta = 0,6 \%$.

В таблице 1 приведены результаты расчетов доли успешных сборок по формуле (2) и с учетом корреляции по формуле (1), а также относительные погрешности при определении долей бракованных сборок, полученные при различных значениях коэффициента корреляции.

Таблица 1 – Влияние корреляции на оценку качества сборки в случае двумерного распределения ($U_i \in [-3\sigma_i; 3\sigma_i]$)

№ п/п	Значения коэффициента корреляции, r	P_Σ	\hat{P}_Σ	δ
1	$r = 0$	0,99461	0,99461	0%
2	$r = \pm 0,25$	0,99461	0,99464	0,6%
3	$r = \pm 0,5$	0,99461	0,99477	3,1%
4	$r = \pm 0,75$	0,99461	0,99529	14,4%
5	$r = \pm 0,95$	0,99461	0,99623	43%

Рассмотрим теперь расчёт доли «успешных» сборок по формулам (1) и (2), когда $r = 0$ и $U_1 \in [-4\sigma_1; 4\sigma_1]$, $U_2 \in [-4\sigma_2; 4\sigma_2]$. Получим:

$$P_\Sigma = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \int_{-4\sigma}^{4\sigma} \exp\left(-\frac{u_1^2}{2 \cdot \sigma_{U_1}^2}\right) du_1 \cdot \int_{-4\sigma}^{4\sigma} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2 \cdot \sigma_{U_2}^2}\right) du_2 = [\Phi(4)]^2 = 0,9998,$$

$$\hat{P}_\Sigma = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \iint_D \exp\left\{-\left(\frac{u_1^2}{2 \cdot \sigma_1^2} + \frac{u_2^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right)\right\} \cdot du_1 \cdot du_2 = 0,9998,$$

где область интегрирования D : $\begin{cases} -4\sigma_1 \leq u_1 \leq 4\sigma_1, \\ -4\sigma_2 \leq u_2 \leq 4\sigma_2. \end{cases}$

Если коэффициент корреляции $r = \pm 0,25$, то, игнорируя корреляцию, по формуле (2) и с учётом корреляции по формуле (1) получим $\hat{P}_\Sigma = P_\Sigma = 0,99980$. Процент брака составит 0,02%.

В таблице 2 приведены результаты расчетов доли годных по формуле (2) и с учетом корреляции по формуле (1) для различных значений коэффициента корреляции, а также относительная погрешность при расчёте доли бракованных сборок по формуле (3) для рассматриваемого случая.

Таблица 2 – Влияние корреляции на оценку качества сборки в случае двумерного распределения ($U_i \in [-4\sigma_i; 4\sigma_i]$)

№ п/п	Значения коэффициента корреляции, r	P_Σ	\hat{P}_Σ	δ
1	$r = 0$	0,99980	0,99980	0,0%
2	$r = \pm 0,25$	0,99980	0,99980	0,0%
3	$r = \pm 0,5$	0,99980	0,999799	0,5%
4	$r = \pm 0,75$	0,99980	0,99979	4,8%
5	$r = \pm 0,95$	0,99980	0,99970	33,3%

На рисунке 2 относительные погрешности при оценке качества сборки для значений $k = 3; 4$ представлены графически.

На основании проведенного исследования влияния ковариации при прогнозировании доли успешных сборок при заданных диапазонах изменения сборочных переменных U_i ($i = \overline{1,2}$) в отрезках $[-k\sigma_i; k\sigma_i]$, где $k = 3; 4$, можно сделать следующие выводы:

1) при увеличении абсолютного значения коэффициента корреляции наблюдается рост относительной ошибки при прогнозировании доли успешных сборок при игнорировании корреляции сборочных переменных, причём, чем ближе $|r|$ к единице, тем значительнее становится ошибка (рис. 2);

2) если абсолютное значение коэффициента корреляции близко к нулю и пределы интегрирования независимы, то формула (2) достаточно хорошо оценивает долю успешных сборок;

3) при увеличении коэффициента k влияние корреляции на оценку доли успешных сборок снижается.

Аналогичные выводы можно получить и для случая $p = 3$, где p – порядок распределения.

Очевидно, что когда пределы интегрирования не являются постоянными, для точного прогноза доли успешных сборок необходимо использовать формулу (1).

Список использованной литературы:

1. Хващевская Л.Ф., Журавлёв Д.А. Моделирование пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с помощью биквадрантных // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 11(22). – С. 71-88.

2. Ашихмин В.Н. Выявление и расчёт размерных цепей при размерном анализе технологических процессов // Учебное электронное текстовое издание. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 57 с.

3. Исаев С.В. Методика оценки линейной модели пространственной размерной цепи для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке // Автореферат диссертации. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М. 2007. – 19с.

4. Шамин В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: Компьютерная версия учебного пособия. – 4-е изд., перер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2005 – 530 с.

5. Основы технологии сборки в машиностроении: [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / И.М. Морозов, В.Ю. Шамин. – Электрон. текст. дан. (1,36 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013.

6. Журавлёв Д.А., Шабалин А.В. Методика пространственного размерного анализа в системе ГеПАРД / Д.А. Журавлёв, А.В. Шабалин. – Вестник ИрГТУ. – 2015. – №8. – С. 58-65.

7. Медарь А. В. Точностной анализ в технологическом проектировании сборочных процессов / А. В. Медарь // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. - № 1. - С. 37-42. - 2009. - № 2. - С. 33-42.

8. Скворцов А. В. Статистическое моделирование векторных и скалярно-векторных размерных цепей / А. В. Скворцов, Д. А. Скворцова, Д. А. Чмырь // Изв. Вузов. Машиностроение. 2007. - № 7. - С. 41-48.
9. Наукоемкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
10. Хващевская Л.Ф. Анализ точности 2D-сборки на основе модели векторного контура // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Тенденции развития науки и образования» – Тамбов, 2015. – Т.3. – с. 149-153.
11. Хващевская Л.Ф., Д.А. Журавлёв, А.В. Шабалин. О методах размерного анализа на основе конфигурационной модели сборки// Сборник трудов 1-ой международной научно-практической конференции “Технология машиностроения и материаловедение”, Новокузнецк, апрель 2017. – с. 68-70.
12. Хващевская Л.Ф. Статистический анализ точности сборки с учётом пространственных допустимых отклонений расположения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 11 (106). – С. 40 – 43.
13. Гвоздев В.Д. Основы взаимозаменяемости: размерные и геометрические допуски: Учебное пособие. - М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 88 с.
14. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. «Теория вероятностей и её инженерные приложения» 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000.— 480 с.
15. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В., Рудченко Е.А. Scilab: Решение инженерных и математических задач. – М.: ALT Linux: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с.

УДК 621.7787.4

***Оценка эффективности повышения производительности алмазного
выглаживания торцев диска по параметрам шероховатости***

Д.Ю. Казимиров, А.В. Прокопьева, В.А. Широколов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для реализации производительного варианта алмазного выглаживания построена номограмма и создан план натурного эксперимента. Этот вариант сопоставлен с традиционной схемой обработки выглаживанием. Проведен анализ влияния скорости обработки. Установлен вариант задания скорости для выглаживания, при котором параметры качества наилучшие.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, диск, скорость обработки, качество.

Среди технологических методов, обеспечивающих повышение прочности и долговечности деталей машин, большое значение имеет обработка методами поверхностно-пластического деформирования (ППД). Это завершающая операция при изготовлении деталей, успешно заменяющая традиционные финишные обработки, такие как доводка, хонингование, суперфиниширование и др. В результате обработки методами ППД изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, образуется поверхность с меньшей шероховатостью. Указанные изменения вызывают существенное повышение прочности поверхностного слоя.

К наиболее простым методам обработки ответственных деталей следует отнести алмазное выглаживание (АВ). Алмазным выглаживанием можно обрабатывать почти все применяющиеся в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, так как они налипают на рабочую часть выглаживателя. [4].

В нефтехимическом машиностроении широко применяются детали типа диск или фланец, а автостроении – цапфа кулака, обладающие протяженными и нежесткими торцовыми поверхностями. К этим поверхностям предъявляются особые требования по точности и шероховатости. В традиционной последовательности их обработке АВ встречается мало из-за относительно низкой производительности. Но данная операция позволяет обеспечить малые значения шероховатости контактирующих поверхностей и применяется для получения более интенсивного, но менее глубокого упрочненного слоя при обработке маложестких деталей [8], в т.ч. типа диск. Для повышения производительности процесса АВ применяют разные методы, например, в [13] рассмотрен вариант обработки двумя и более индеторами, установленными в специальное приспособление или в разные суппорта и имеющие отличающиеся значения подачи.

Этот вариант труднореализуем, особенно при обработке торцовых поверхностей. К тому же при их обработке при поперечном движении алмаза к центру падает скорость вращения, следовательно, это и является причиной потери производительности. Требуется увеличение режимов обработки, повышающих производительность, но при этом не без ухудшения качества поверхности, т.к. шероховатость поверхности при скоростях близких к нулю становится хуже. Скорость выглаживания практически не влияет на шероховатость поверхности, но может повлиять косвенно на волнистость и опорную способность. При повышении скорости более 60 м/мин возможно возникновение вибраций, которые отрицательно влияют на обрабатываемую поверхность, в виде повышенного износа алмаза [1]. Следовательно, нет необходимости ее завышать, а требуется периодически восстанавливать ее величину. Существуют два способа обработки протяженной торцовой поверхности на станке – первый способ, в котором V_p снижается при перемещении инструмента к центру детали

в следствии постоянства заданной частоты вращения, когда диаметр обработки с каждым оборотом шпинделя уменьшается. Второй, с сохранением $V_p = \text{const}$ при изменяющейся частоте вращения, как это делается на станках с ЧПУ [12].

Известно, что при обработке с постоянной частотой вращения шпинделя $n = \text{const}$ расчетная скорость резания V_p соответствует эквивалентному $R_э$ радиусу торцевой поверхности, причем $R_{max} > R_э$.

Частота вращения шпинделя при этом определяется из равенства:

$$n = \frac{V_p * 1000}{2\pi * R_э},$$

где $R_э = R_{min} + 0,6(R_{max} - R_{min})$;

R_{min} – внутренний радиус торцевой поверхности.

Фактическая скорость резания V_i на произвольном радиусе торцевой поверхности R_i определяется из равенства:

$$V_i = \frac{R_i}{R_э} * V_p.$$

Для токарных станков ЧПУ с коробкой скоростей для изменения частоты вращения шпинделя прежде всего необходимо определить координаты опорных точек, в которых происходит ее повышение.

При обработке торца по максимальному диаметру частота вращения определяется из равенства:

$$n_1 = \frac{V_p * 1000}{2\pi * R_{max}}$$

Полученное значение согласовывается с паспортными данными станка. При обработке следующего участка поверхности частота вращения шпинделя n_2 принимается ближайшей большей после n_1 по паспорту.

Исходя из номенклатуры материала и типоразмеров фланцев, изготавливаемых на предприятиях, чтобы избежать учета масштабного фактора, был подготовлен образец из стали 40ХН ($\varnothing 224$, толщина $b=9$, $L=24$, диаметр базы $\varnothing 43$) типа «диск». Образец прошел черновую + чистовую токарные обработки твердосплавным инструментом со стандартной геометрией. По торцевой поверхности помимо проточки за несколько ходов, на частоте 500 об/мин с $S=0,065$ мм/об, дополнительно провели шлифование лепестковым инструментом с зернистостью Р120. Опыты проводились в лабораторных условиях на станке модели 1К62.

При упругой схеме АВ биение обрабатываемой поверхности должно быть 0,03...0,05 мм [3]. Контроль торцового биения осуществляли индикатором, с ц.д. 0,01 мм. Получено биение 0,053 мм.

Параметрами, определяющими качество поверхности после АВ являются твердость детали, исходный параметр шероховатости, усилие прижима P , величина подачи, скорость выглаживания, величина радиуса вершины алмазного наконечника, вид охлаждающей среды.

Образец закрепляли за цапфу в трехкулачковом патроне. Инструментом служил алмазный наконечник, тип 2 с $R_{сф} = 1,5$ мм. В качестве СОТС использовалось масло И20. Упругое выглаживание производилось тарированной державкой типа «гусиная лапка».

Усилие прижима алмазного наконечника к обрабатываемой поверхности необходимо до 250Н в зависимости от вида обрабатываемого материала, учитывая, что при меньших значениях, процесс АВ будет неполным, деформирование микронеровностей будет происходить по отдельным участкам поверхности. А при больших значениях возможна деформация тонкостенных мало жестких деталей алмаза [1].

Режимы обработки были следующие: усилие выглаживания - $P_y = 150$ Н; поперечная подача - $S = 0,037$ мм/об; скорость вращения детали - V м/мин, которая задавалась двумя способами.

Согласно [2] рекомендуемая скорость для АВ закаленных сталей не более 100 м/мин. Учитывая массу обрабатываемого диска и низкую виброустойчивость системы примем $n_1 = 20$ об/мин по паспорту станка. Тогда фиксированная скорость обработки:

$$V = \frac{\pi d_1 n_1}{1000} = \frac{3,14 * 224 * 20}{1000} = 14 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$$

Определим координаты опорных точек изменения частоты вращения, согласно таблицы частот станка 1К62 по формуле

$$D_2 = \frac{1000 * V}{\pi * n_{i+1}} = \frac{1000 * 14,06}{3,14 * 25} = 179,1 \text{ мм.}$$

Результаты расчетов для остальных опорных точек при паспортных значениях частоты вращения сведем в таблицу (см. Рис. 1). Для визуализации данных построена диаграмма, показывающая изменение скорости АВ при обработке в зонах равных частот, на рассчитанных диаметрах (Рис. 1).

После обработки по данному плану эксперимента и измерений качественных характеристик, АВ диска была выполнена при $n = 80$ об/мин для их сопоставления по основным показателям качества. Остальные условия сохранились неизменными.

Критерием качества, является высота микронеровностей, которая зависит в данном случае от скорости. Исследуемые параметры шероховатости R_a , R_q , R_z , R_{max} , S_m , t_p при $p = \sqrt{5}; 95$ % по ГОСТ 25142-82 измерены с помощью системы на базе профилографа – профилометра модели 252 завода «Калибр». Параметры были измерены по вектору подачи, для трех областей опорных точек: при $D > 150$, $75 < D < 150$ и $D < 75$ мм.

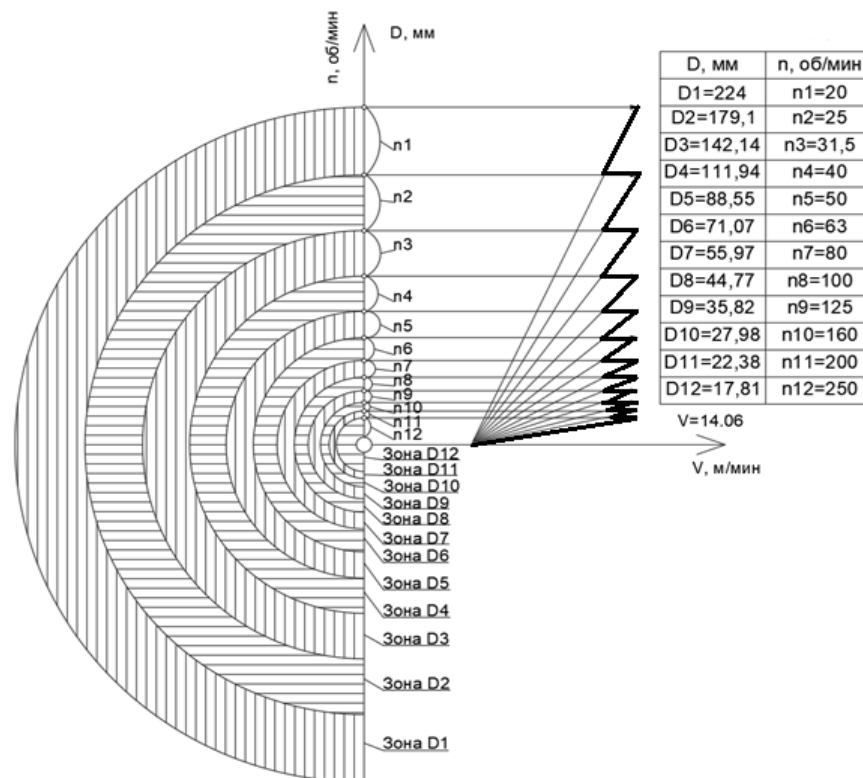


Рис. 1 – Изменение частоты вращения при обработке торцевой поверхности

Известно, что упругая державка копирует волнистость или образует новую из-за возможных вибраций при обработке, поэтому ее контролировали и визуально и инструментально. Она занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. По ГОСТ Р ИСО 4287-2014 предусмотрено два параметра: S_w - шаг волнистости, W_z – высота волнистости. При $1000 > S_w/W_z > 40$ отклонения относят к волнистости [6]. Измерение проводилось при помощи прибора микрокатор (ГОСТ 10197-70). Диск помещался на стол, измерялись зоны с явно выраженной волнистостью, ножка подводилась к диску и касалась трех точек волнистой поверхности. Для определения высоты волны использовали эталон по ГОСТ 9038-90, который прикладывали к поверхности в ту же область и проводили повторное измерение. Эталон определял прилегающую поверхность, разница в показаниях давала высоту единичной волны из которой получили волнистость $W_z = 7,2$ мм, определяемую по известной формуле $W_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 W_{zi}$.

Все профилограммы, полученные после алмазного выглаживания при $V = \text{const}$, имеют явно выраженную волнистость от вибрации, которая наблюдалась при движении инструмента с D_{max} до D_2 (рис. с фото 4), при этом из рис. 2 видно, что шероховатость имеет малую долю в совокупном образовании микронеровности. Так же в профилограммах наблюдаются значительные впадины, которые не были заполнены пластически текущим металлом под инструментом. Средние параметры шероховатости для областей в которых контролировалась микронеровность следующие.

Таблица 1 – Шероховатость поверхности при $V=const$

Диаметры	Полученные значения параметров шероховатости, мкм					
	Ra	Rz	Rq	R_{max}	S	S_{max}
$D > 150$	0,04	0,12	0,05	0,21	8,65	202,43
$75 < D < 150$	0,04	0,14	0,05	0,27	8,23	115,61
$D < 75$	0,07	0,2	0,08	0,38	9,04	97,21
Среднее значение	0,050	0,153	0,060	0,287	8,640	138,417

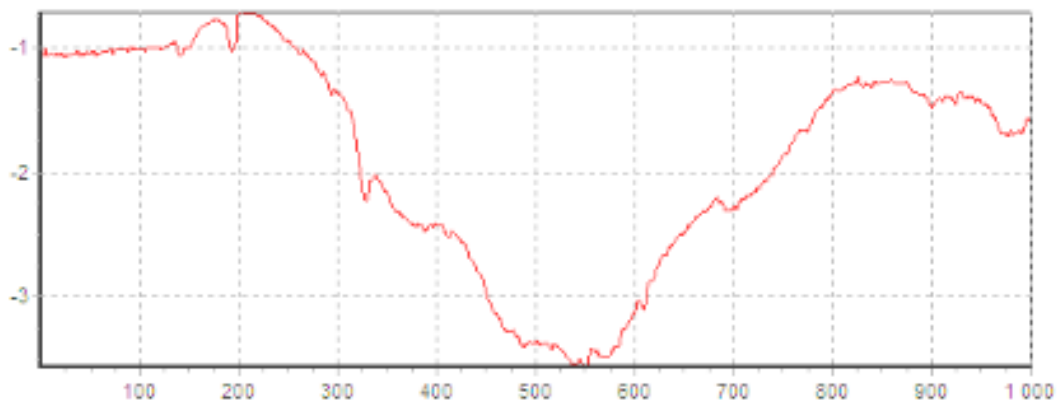


Рис. 2 – Профилограмма поверхности при $V=const$ при $D4$

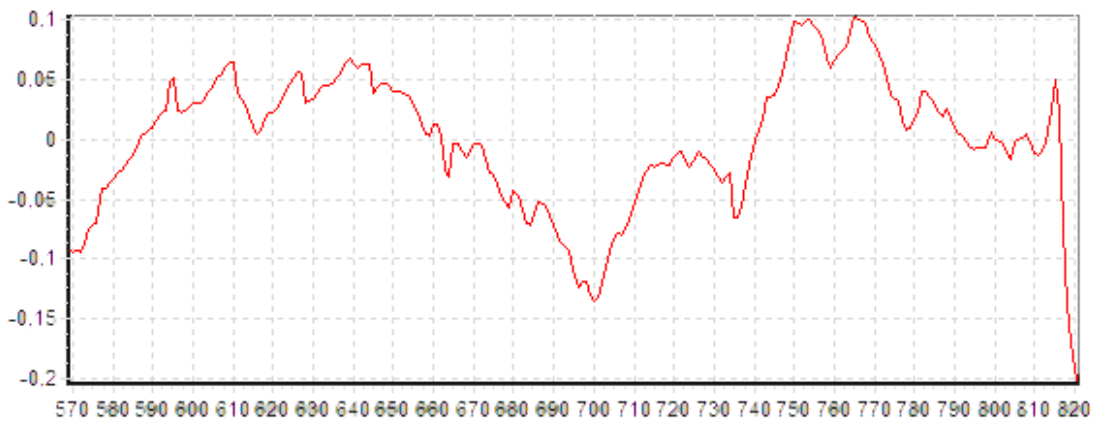


Рис. 3 – Профилограмма поверхности при $V=var$ при D_{max}

Напротив, профилограммы, полученные после алмазного выглаживания при $V=var$, сформированы только шероховатостью поверхностью, с присутствием на них (см. Рис. 3) характерных следов рисок от подрезания торцов лезвийным инструментом. Средние параметры шероховатости для областей в которых контролировалась шероховатость соответственно следующие:

Таблица 2 – Шероховатость поверхности при $V=var$

Диаметры	Полученные значения параметров шероховатости, мкм					
	Ra	Rz	Rq	R_{max}	S	S_{max}
$D>150$	0,04	0,12	0,05	0,21	8,65	202,43
$75<D<150$	0,04	0,14	0,05	0,27	8,23	115,61
$D<75$	0,07	0,2	0,08	0,38	9,04	97,21
Сред- нее зна- че- ние	0,050	0,164	0,065	0,336	7,098	122,960

Отметим, что они похожи как для варианта с увеличиваемой частотой вращения и отличаются не значительно.



Рис. 4 – Диск после АВ при $V=const$

Сравнение шероховатостей после алмазного выглаживания двумя вариантами задания скорости обработки показало незначительное улучшение в показателях качества при переменной скорости $V=var$, при этом различие по параметру шероховатости Rz составило в 1,25 раза, однако это наблюдается только на диаметрах свыше $D3$, а по остальным не значительно отличаются. На меньших диаметрах все параметры шероховатости несущественно хуже. Для более производительного режима с $V=const$ заметны следы вибрации с показателем волнистости $Wz=7,2$ мкм, что не наблюдалось при альтернативном варианте выглаживания. Это снижает эксплуатационные свойства деталей машин, о чем отмечалось ранее. Т.к. алмазное выглаживание является окончательной операцией, то превалирующим выбором становится не производительность процесса, а качество обработки. Вариант с $V=const$ возможен только при условии повышения виброустойчивости системы.

Список использованной литературы:

1. Гольвань А. Я., Грановский Э. Г., Машков В. Н. Алмазное точение и выглаживание. – М.: Машиностроение, 1976. – 32 с.
2. ОСТ 92-1547-89 Деформирование поверхностное пластическое. Типовой технологический процесс алмазного выглаживания.
3. Торбило В. М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.
4. Кузнецов В.П., Горгоц В. Г., Губанов В. Ф., Схиртладзе А. Г., В. П. Борискин В. П. Обеспечение требуемого качества поверхности деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания – ООО «ТНТ», 2006. – 100 с.
5. Метрология и стандартизация – волнистость поверхности, параметры волнистости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metrologiya.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 18.03.19)
6. Мои конспекты – относительная опорная длина профиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mykonspekts.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 18.03.19)
7. Александров Н. Г., Кислицын В. П., Лобанов В. К., Пилипенко В. М., Туровский М. Л., Шифрин И. М. Влияние направления волокна металла и поверхностного упрочнения на свойства сталей. – М.: Машиностроение, Вестник Машиностроения, 1983. – 80 с.
8. Папшев Д. Д. Эффективность методов отделочно-упрочняющей обработки. – М.: Машиностроение, Вестник Машиностроения, 1983. – 80 с.
9. Нагоркин М.Н. Технологическое управление параметрами шероховатости и волнистости плоских поверхностей деталей из чугуна высокоскоростным торцевым фрезерованием и алмазным выглаживанием с применением поликристаллических сверхтвёрдых материалов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Брянск-2002.- С19.
10. Абрамов В. В., Ракунов Ю. П. Выглаживание плоских металлических поверхностей сапфировым инструментом / прогрессивные технологии и системы машиностроения. Изд-во: Донецкий национальный технический университет, № 4(59), 2017, – С. 3-10.
11. Ковальногов В. Н. Алмазное выглаживание с малым силовым воздействием на обрабатываемую поверхность/СТИН, № 4, 2009. – С. 36-39.
12. Высокопроизводительная обработка металлов резанием./ Д.В. Виноградов - М.: Изд-во «Полиграфия», 2003
13. Михайлов А. А., Плешаков В. В., Андрианов В. В., Савицкий Ю. Н. Повышение эффективности алмазного выглаживания/ Вестник машиностроения, №4, 1983. - С. 59-61

УДК 621.795

Исследование влияния скорости алмазного выглаживания на опорную способность поверхности фланцев

Д.Ю. Казимиров, А.В. Прокопьева, В.С. Елистратов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для фланцевых деталей выполнен эксперимент и проведен анализ опорной способности торцевой поверхности, который влияет на эксплуатационные характеристики. Выявлено существенное увеличение качества и рекомендовано не повышать частоту вращения при алмазном выглаживании.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, опорная способность, фланец, герметичность, микровпадины

Производитель [1] классифицирует фланцевые детали по следующим типам: воротниковый, свободный (накидной), приварной плоский, раструбный, резьбовой и глухой. Они характеризуются особенностями конструктивного исполнения, температурным диапазоном эксплуатации, областью применения и индивидуальными особенностями.



Рис. 1. Фланец для нефтегазовой промышленности

Изготавливая фланцевые детали необходимо добиться высокой точности прилегания по торцу. Оно достигается за счет придания правильной плоской формы, так как только тогда будет плотное прилегание к ответной поверхности. В связи с этим нужны следующие требования к качеству торца и ресурсу соединений. [2, 3] Основное требование — это перпенди-

кулярность торцев относительно оси, а также высокая точность и малая шероховатость самой контактной поверхности торца. Фланец должен быть способен удерживать технологическую среду, т.е. обеспечивать герметичность трубопровода или гидросистемы. Для этого на его поверхности не должно быть радиальных микровпадин, идущих от центра к краю торца.

Обработка торцев фланцевых деталей может, осуществляется: плоским торцовым шлифованием, отделочными методами, такими как суперфиниширование и методами поверхностно-пластического деформирования [4, 5]. Среди технологических методов, обеспечивающих повышение прочности и долговечности детали машин, большое значение имеет обработка, осуществляемая методами поверхностно-пластического деформирования (ППД). К наиболее простым методам обработки ППД следует отнести обкатывание, алмазное выглаживание и др. [6, 7]. Каждый из методов обладает определенными достоинствами и недостатками. Плоское торцовое шлифование является высокопроизводительным процессом, суперфиниширование позволяет достичь высокие требования по шероховатости и точности, но требует специального оборудования. Алмазное выглаживание (АВ) характеризуется достижением высоких эксплуатационных свойств при простоте, легкости реализации и экономической эффективности. АВ является завершающей операцией. В результате обработки методами ППД изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, повышается его структурная однородность, образуется поверхность с меньшей шероховатостью. Указанные изменения вызывают существенное повышение прочности поверхностного слоя. Т.о. АВ является лучшим способом повышения качества плоских торцовых поверхностей.

Известно, что в зависимости от цели обработки АВ подразделяются на сглаживающие, упрочняющие-сглаживающие и упрочняющие [8]. Вопросы герметичности посвящена работа [9] в которой уделено внимание влиянию микрогеометрии после АВ на утечки в гидропаре. Определено, что АВ способствует повышению герметичности, особенно при нанесении частично регулярного рельефа на поверхности сопряжения. Не допустимы комуницирующие впадины, а только замкнутые. АВ характеризуется относительно невысокой производительностью. Например, в работе [10] рассмотрены варианты сравнения коническим и сферическим индентером обработки плоскостей и оценена их производительность по режимам обработки. Выглаживание повышает несущую способность деталей машин, что является обязательным требованием для дисков ГТД [11]. Однако, этот процесс неустойчив по вибропараметрам и поэтому может привести к ухудшению результатов при обработке нежестких поверхностей. Более того, упругое выглаживание копирует погрешности, образованные на предшествующих стадиях, но может частично повышать опорную площадь плоскости. Этот факт необходимо проверить на торцовых поверхностях фланцевых деталей, к которым и предъявляется жесткие требования.

Известен способ обработки протяженных торцовых поверхностей [12], в котором для повышения производительности увеличивают частоту вращения, тем самым сохраняя скорость обработки неизменной ($V=\text{const}$). Исследование проведено для проверки качественных показателей после применения указанного способа при АВ. В качестве сравнения, получены аналогичные показатели качества для традиционной схемы задания режимов обработки, т.е. при постоянной частоте вращения, когда $V=\text{var}$ и уменьшается при приближении инструмента к оси вращения до 0 м/мин.

Исходя из номенклатуры материала и типоразмеров фланцев, изготавливаемых на предприятиях, чтобы избежать учета масштабного фактора, был подготовлен образец типа диска с размерами $\varnothing 225$ мм, толщина диска 9 мм, диаметр цапфы 43 мм, длина базовой поверхности 24 мм. Он изготовлен из стали 40ХН и подвергнут закалке. Ее обрабатываемость резанием в горячекатаном состоянии при НВ 166-170 и $\sigma_s = 690$ МПа, твёрдым сплавом идентично стали 45 (K_v , тв. спл=1,0). Относительное удлинение прутка по ГОСТ 4543-71 при разрыве $\square_s = 11\%$, относительное сужение $\square_{\square} = 45\%$ [13].

Образец предварительно прошел черновую + чистовую токарные обработки. По торцовой поверхности помимо проточки за несколько ходов, при частоте 500 об/мин с подачей $s = 0,065$ мм/об резцами из Т15К6 с радиусом при вершине и окончательно без радиуса при вершине, дополнительно провели шлифование лепестковым инструментом с зернистостью Р120. Опыты проводились в лабораторных условиях на станке модели 1К62. Образец закрепляли за цапфу в трехкулачковом патроне Инструментом для выглаживания служил алмазный наконечник, тип 2 с $R_{сф} = 1,5$ мм. В качестве СОТС при алмазном выглаживании использовалось масло И20. Упругое выглаживание производилось тарированной державкой типа «гусиная лапка». В качестве влияющих переменных были выбраны следующие факторы: усилие выглаживания - $P_y = 150$ Н; поперечная подача – $s = 0,037$ мм/об; скорость вращения детали - V м/мин, которая менялась по плану опытов.

Для количественной оценки опорной площади торца следует провести замеры после операции АВ путём цифрового топографирования. Этот метод диагностики позволяет учесть характер макрогеометрии поверхностей. Для численного описания несущей плоскости использован показатель – относительная опорная часть площади, теоретическое обоснование которого приведено в [14]:

$$t_{fM} = \left(1 - \frac{F_{\text{ВП}}}{F_{\Sigma}} \right) \times 100 \%,$$

где f – глубина впадины, которая соответствует толщине фракции индикатора-наполнителя;

F_{Σ} – суммарная площадь проекции;

$F_{\text{ВП}}$ – площадь проекции впадин.

Первоначально, необходимо получить цветной фотофайл с расширением *JPEG* обработанной поверхности с выделенными областями контакта. Для этого использован метод красок, который удобен для индикации впадин макронеровностей. На поверхность с помощью резинового валика следует нанести слой масляной краски «Краплак красный» с размерами помола крупниц породы до 2 мкм. Излишки нанесенной краски удалялись с изучаемой поверхности до прекращения переноса на эталон плоскостности – плиту 3-1-250x250 ГОСТ 10905-86. Гранитная плита характеризуется допуском плоскостности 8 мкм.

Объект изучения фотографировался в режиме макросъемки с разрешением снимка 3264x2448 пикселей. Каждая элементарная площадка поверхности: выступ, впадина, каньон и т.д. – в цифровом фотоснимке отражалась пикселем соответствующего цвета. Пиксели фотоснимка, отличающиеся от оттенков красного цвета, выделялись средствами цифровой обработки. Фотофайл переводился в цветной Рис. и ограничивался количеством 16 бит, достаточным для оценки топографии поверхности рис. 4, б. При этом открашенные области близкие по тону к красному цвету из возможных 16-ти. Количественное соотношение пикселей сохранялось такое же, как и в исходном файле пикселей красных оттенков к остальным. Этот файл конвертировался с помощью программы ImageMagick-6.8.4 в таблицу частот пикселей каждого из цветов, закодированных в *HTML*- и *RGB*- кодах.

Таблица 1 – Частотное распределение встречаемости пикселей каждого цвета при $V=\text{const}$

Кол-во пикселей	HTML- и RGB- код	Кол-во пикселей	HTML- и RGB- код
3488	(128,0,0) #800000 maroon	290470	(128,0,0) #800000 silver
53797	(128,0,0) #800000 purple	28416	(128,0,0) #800000 red
343	(128,0,0) #800000 olive	17	(128,0,0) #800000 magenta
531803	(128,0,0) #800000 fractal		

Согласно *HTML*-кодам выявляются стандартные оттенки красного, которые отражают наличие впадин. Затем были исключили не интересующие нас цвета, например, белый, являющийся цветом фона.

На финишных операциях часто регламентируют значения высотных параметров шероховатости. Однако известно, что поверхности, обработанные различными методами, при одинаковых высотных параметрах микро рельефа могут изменять эксплуатационные свойства деталей машин. Причиной этого служат различные опорные площади макронеровностей [15].

Повышение несущей способности контактирующих поверхностей деталей частично обеспечивается за счет увеличения параметра t_p . Иссле-

дваемые параметры шероховатости t_p при $p = \overline{5; 95}$ % по ГОСТ 25142-82 измерены профилографом – профилометром модели 252 завода «Калибр». Параметры были измерены по вектору подачи для трех областей с характерными изменениями результата: при $D > 150$, $75 < D < 150$ и $D < 75$.

Результаты обработки и анализа данных показали следующее. Обработка АВ по варианту с $V = \text{const}$ привела к появлению на поверхности и участков со следами вибрации (1) и контактными зонами (2), не окрашенные краской индикатором, что хорошо видно на рис. 2. Визуально легко оценить, что опорная поверхность меньше, чем зоны впадин или кратеров (провалов). Она характеризуется величиной $t_{fM} = 32\%$, которая определена по таблице 1 как:

$$t_{fM} = \left(1 - \frac{(3488 + 53797 + 343 + 28416 + 531803)}{(3488 + 53797 + 343 + 531803 + 290470 + 28418 + 17)} \right) * 100$$

Остальная поверхность не входит в контакт с ответной деталью, следовательно, герметичность и другие эксплуатационные требования обработкой АВ по данной схеме не выполняются. Дополнительно оценили относительную опорную длину профиля, представленную на рис. 3. Отметим, что кривая опорной линии имеет пологое склонение от t_5 до t_{95} , что свидетельствует о невысокой опорной способности такой поверхности. В характерных точках, которые отвечают за износ, за прирабатываемость и за маслосъемность, $p = 15, 50, 90$ % средняя величина t_p соответственно равна для относительного внедрения $15 = 3,301\%$, для $50 = 46,028\%$, для $90 = 90,354\%$.



Рис. 2. Образец типа диск после обработки АВ, полученный при $V = \text{const}$ с участками контактных зон

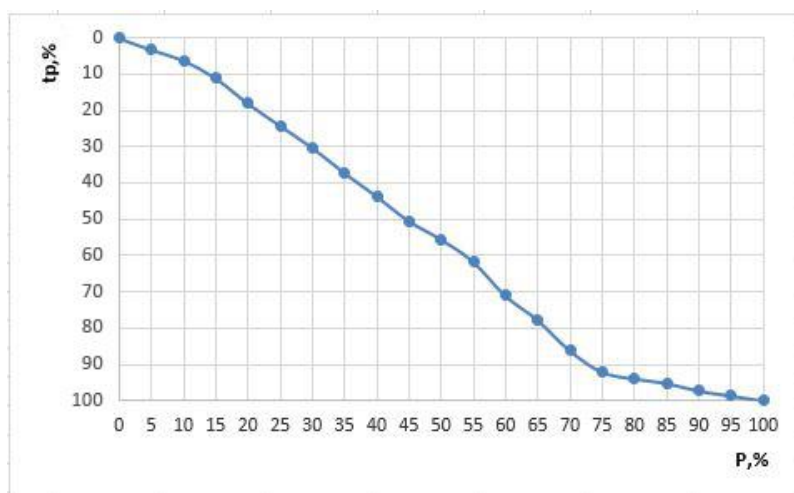


Рис. 3. График опорной длины профиля t_p торца диска после АВ при $V=const$ в области $D<75$ мм

После обработки по первому варианту, проведена обработка с $V=var$, постепенно уменьшающаяся с 56,5 до 0,1 м/мин. Хотя это вариант менее производительный чем первый, результаты анализа данных показали следующее. АВ по варианту с $V=var$ привела к появлению на поверхности и участков в основном контактных зона (1), не окрашенные краской индикатором, что хорошо видно на рис. 4, а. Визуально легко оценить, что опорная поверхность возросла, а зоны впадин или кратеров (провалов) намного меньше. Она оценивается величиной $t_{fM} = 89\%$. Яркость краски по краям говорит о том, что толщина зоны впадин очень незначительная, и в основном это не макронеровности формируемые и исправляемые АВ, а форма диска, которая получилась сферичной и выпуклой после предшествующей стадии обработки. Вогнутость поверхности сосредоточена в центре детали, которая часто функционально не используется во фланцах (см. Рис. 4).

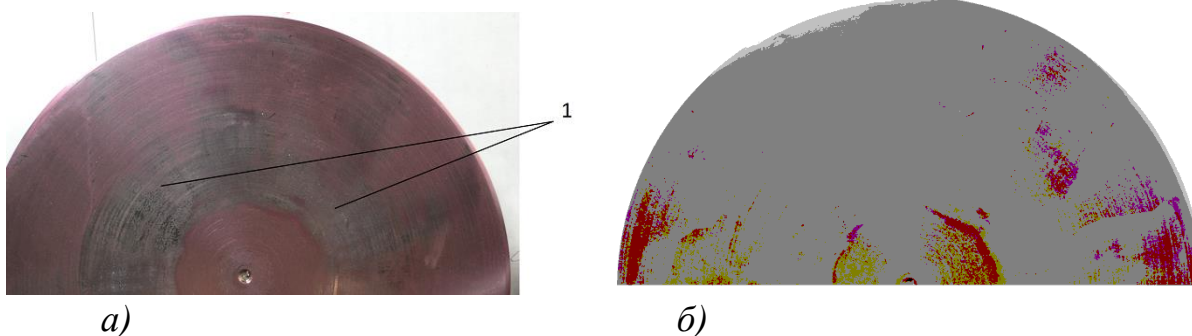


Рис. 4. Образец типа диск после обработки АВ, полученный при $V=var$: а – исходный фотофайл; б – сконвертированный в 16 бит

Дополнительно оценили относительную опорную длину профиля, представленную на рис. 5. Отметим, что кривая опорной линии имеет крутое склонение от t_5 до t_{95} , что свидетельствует о высокой опорной способности такой поверхности. В характерных точках, которые отвечают за,

$p=15, 50, 90$ % средняя величина t_p соответственно равна для $90=96,637$, для $50=72,532$, для $15=5,815$ для контролируемых областей диска.

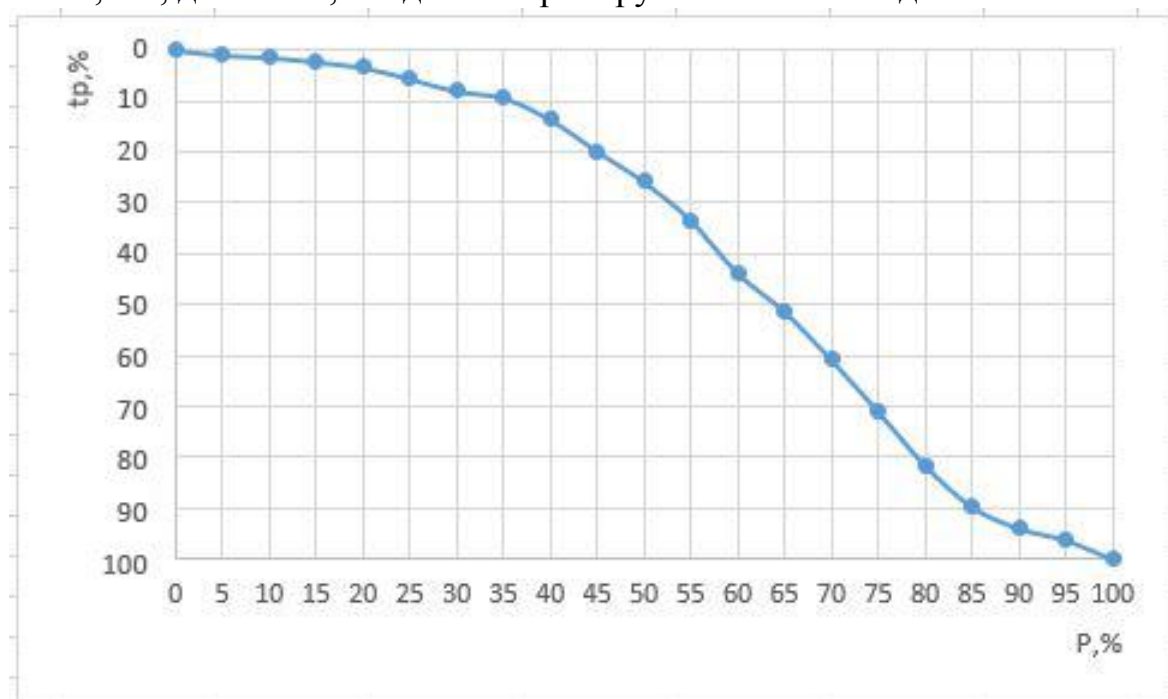


Рис. 5. График опорной длины профиля t_p торца диска для обработки АВ при $V=var$ в области $D>150$ мм

Проведенное экспериментальное исследование позволило сформулировать следующие выводы. Алмазное выглаживание по исследуемым вариантам задания скорости обработки однозначно влияет на опорную способность поверхности. Выглаживание при постоянной частоте вращения и переменной скорости $V=var$ рекомендуется назначать для контактирующих поверхностей деталей, статично сопрягаемых или совершающих малоамплитудные перемещения. Анализ фотоснимков выявил особенности зон вероятного контакта базовых поверхностей фланцевых дисков. Они будут формироваться от D_{max} до $D=70$ мм. Обработка по предпочтительной схеме позволяет повысить величину опорной площади на 57%, по сравнению с производительной схемой при $V=const$ с повышением частоты вращения, а относительный показатель t_{50} повысился на 26%, для максимальных и минимальных t_p - незначительно. Показатель, оценивающий область контакта плоской детали, позволил углубить наши представления о формировании выглаженных поверхностей.

Список использованной литературы:

1. ПКФ "Спецдеталь" – производство и поставки деталей трубопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pkfdetal.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 20.03.2019)

2. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: учебное пособие / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. [и др.]: изд., перераб и доп. – Старый Оскол: ООО “ТНТ”, 2006. – 100 с.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978.
4. Отделочные методы обработки деталей машин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cherch.ru> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 17.03.2019)
5. Абрамов В.В., Ракунов Ю.П. Выглаживание плоских металлических поверхностей сапфировым инструментом/ Прогрессивные технологии и системы машиностроения Изд-во: Донецкий национальный технологический университет, №4(59), 2011. С. 3–10
6. Папшев Д.Д., Эффективность методов отделочно-упрочняющей обработки/ Вестник машиностроения, №7, 1983. – С. 42–43
7. Кузнецов В.А., Шестакин П.В., Смирнов А.В., Сазонов Д.А. Выглаживание деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами/ Автомобильная промышленность, №10, 2010. – С. 24–25
8. Донсков А.С., Торбило, В.М. Выбор режимов алмазного выглаживания/ Вестник машиностроения, №5, 1981. – С. 52–54
9. Лукьянец В.А., Влияние микрорельефа поверхности цилиндрического золотника на утечки по зазору/ Вестник машиностроения, №11, 1985. – С. 25– 26
10. Попов М.Е. Расчет усилий и деформаций при выглаживании поверхностей/ Вестник машиностроения, №8, 1975. – С. 69–71
11. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием/ В.К. Яценко и др. – М.: Машиностроение, 1985.
12. Высокопроизводительная обработка металлов резанием/ Д.В. Виногорадов – М.: Изд-во «Полиграфия», 2003.
13. Марочник сталей и сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.splav-kharkov.com>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 19.03.2019)
14. Солер. Я.И., Казимиров. Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами NORTON. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. №5(307). - С. 142-150
15. Рыжов Э.В. Влияние шероховатости поверхности на величину опорной площади/ Высокопроизводительное резание в машиностроении. – М.: Наука, 1966. – С. 273-281

***Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств
поверхностного слоя штамповой оснастки для горячей гибки***

Н.С. Улаханов¹, У.Л. Мишигдоржийн¹, А.Д. Грешилов¹, А.Г. Тихонов²

1) Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1

2) Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Рассмотрены вопросы формирования эксплуатационных свойств штамповой стали, используемой для изготовления оснастки для горячей гибки титановых оковок, путем технологически последовательных операций, включающих диффузионное насыщение и окончательную механическую обработку. Выявлены условия создания диффузионных слоев с композиционной структурой с помощью высокотемпературного диффузионного насыщения штамповой стали 3Х2В8Ф бором и алюминием. Показана возможность механической обработки диффузионных слоев.

Ключевые слова: *высокотемпературное бороалитирование, химико-термическая обработка, композиционная структура, эксплуатационные свойства, микротвердость, шероховатость. титановые оковки, штамповая сталь, окончательная механическая обработка.*

Для повышения надежности эксплуатации несущего винта вертолета в условиях повышенной запыленности (пустынях, горных районах), а также для предотвращения повреждений противообледенительной системы на лонжероне и защиты от эрозионного износа передних кромок лопастей используют противоабразивные накладки, изготовленные из титановых сплавов [1].

В Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления разработана технология и изготовлено прессовое оборудование горячей штамповки титановых оковок с применением метода радиационного нагрева галогеновыми лампами инфракрасного излучения (рис. 1) [1-3].

Формообразование детали производится путем базирования заготовки на матрице, последующего нагрева радиационными лампами и процесса штамповки-выдержки.

Преимуществами радиационного нагрева являются [1]: высокие скорости нагрева; отсутствие необходимости разогрева установки перед началом эксплуатации; возможность проведения нагрева заготовки непосредственно в рабочем пространстве штампа.

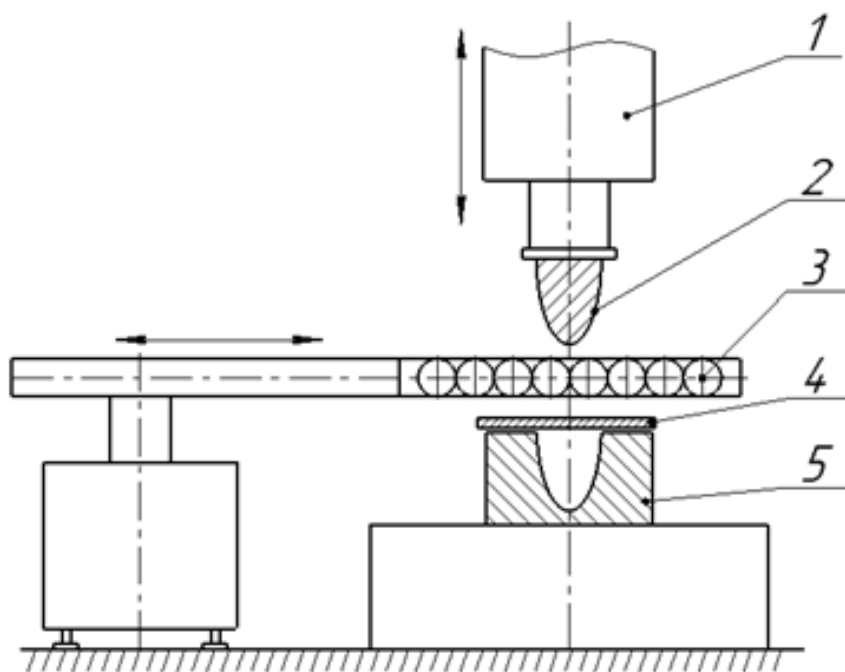


Рис. 1. Схема установки радиационного нагрева: 1 – гидроцилиндр, 2 – пуансон, 3 – устройство радиационного нагрева, 4 – заготовка, 5 – матрица.

Применение радиационного метода нагрева для горячих гибки оковок из титановых сплавов позволяет: снизить вероятность окисления и появления газонасыщенного слоя; исключить из технологического процесса гибки операцию термостабилизации; повысить производительность и снизить стоимость изготовления деталей.

Однако, при этом возрастают требования к обеспечению функциональных свойств поверхностного слоя штамповой оснастки для горячей гибки, которая должна, исходя из служебного назначения, обладать следующими характеристиками: высокая износостойкость для сохранения формы и размеров поковки; повышенная жаростойкость для сопротивления образованию окалины, возникающей из-за высокого перепада температур; высокая разгаростойкость для предотвращения образования разгарных трещин, образующихся вследствие циклических нагревов и охлаждений штампа в процессе работы; минимальную схватываемость со штампуемым изделием; низкую шероховатость рабочих поверхностей ($Ra \leq 0,8$ мкм).

При создании технологий упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов для придания высоких функциональных свойств широкое распространение получили такие методы химико-термической обработки как азотирование, цементация, борирование. Комплексное диффузионное насыщение бором и алюминием позволяет увеличить сопротивление износу, повысить жаростойкость, коррозионную стойкость и ряд других

свойств поверхностных слоев формообразующих инструментов [4]. Функциональные свойства зависят от множества факторов технологического процесса, и формируются на этапах предварительной обработки поверхности, диффузионного бороалитирования и финишной обработки рабочих поверхностей. В качестве финишной обработки штамповой оснастки в большинстве случаев используется шлифование, позволяющее обеспечить требуемые параметры шероховатости и точности рабочих поверхностей.

Комплексное решение подобных задач актуально с позиции теории технологической наследственности [5, 6]. В связи с этим, исследование возможности создания функциональных свойств рабочих поверхностей штамповой оснастки в более широком диапазоне путем диффузионного насыщения (высокотемпературное бороалитирование) и последующей окончательной финишной обработки является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование формирования эксплуатационных свойств на поверхности штамповой стали 3Х2В8Ф, используемой для изготовления оснастки для горячей гибки титановых оковок, путем технологически последовательных операций, включающих диффузионное бороалитирование и окончательную механическую обработку.

Высокотемпературное бороалитирование (ВБА) осуществляли в насыщающих пастах, содержащих порошки карбида бора, алюминия и фторида натрия в качестве активатора. Соотношение Al/V₄C составляло 1/4 по весу. Образцы из инструментальной стали 3Х2В8Ф помещались в прямоугольные формы вместе с насыщающей пастой. Длительность выдержки составляла от 1 до 4 ч, температура обработки – 950, 1000 и 1050°С. Охлаждение образцов проводили вне печи на спокойном воздухе при комнатной температуре.

Окончательная механическая обработка (ОМО) проводилась на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ Romi D800. Инструмент – эльборовая шлифовальная головка для координатной шлифовки МГШ 20,0×10,0 диаметром 20 мм зернистостью 250. Скорость резания составляла 250 м/мин, подача стола составляла 0,08 мм/мин, глубина резания 0,05 мм.

Шероховатость поверхности до и после ВБА, а также после механической обработки проводили на профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200. Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34». Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе «JSM-6510LV, JEOL» с микроанализатором «INCA Energy 350, Oxford Instruments». Исследования проводили в Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО ВСГУТУ и НИЛ «Технологии высокопроизводительной механической обработки» ФГБОУ ВО ИРНИТУ.

Эксперименты показали, что при температуре бороалитирования ниже 1000 °С, формируется преимущественно алитированный слой со слоистой структурой (рис. 2а, б). Алюминий, как более активный компонент смеси, реагирует с активатором быстрее карбида бора с образованием фторидов AlF и AlF_2 . Глубина слоя составляет 115 мкм на образце 1 (рис. 2а) и 140 мкм на образце 2 (рис. 2б). Обработка свыше 1050 °С (рис. 2в) приводит к формированию слоев с композиционной структурой [7, 8], где твердые структурные составляющие (бориды) располагаются в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие (твердые растворы) образуют сплошную матрицу. Такое строение обуславливает высокие механические свойства, в частности износостойкость и повышенную пластичность. Кроме того, высокотемпературная выдержка при ХТО позволяет нивелировать слоистость (фазовую неоднородность по глубине диффузионного слоя), а также увеличить толщину слоя до 400 мкм.

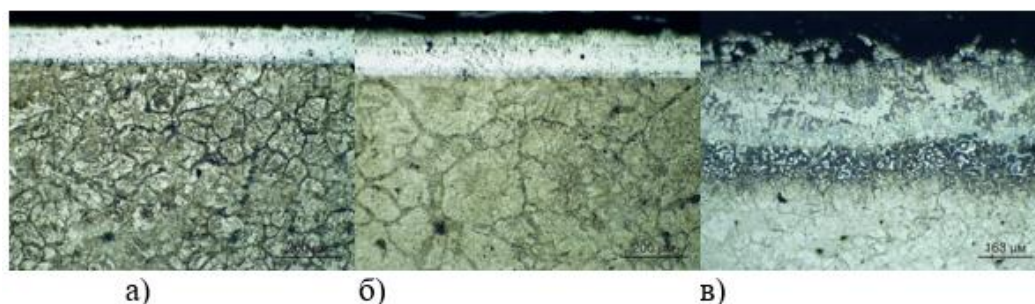


Рис. 2. Микроструктуры бороалитированных слоев на стали 3Х2В8Ф, $\times 100$: а) образец 1 ($t = 950$ °С, время выдержки 2 ч.); б) образец 2 ($t = 950$ °С, время выдержки 4 ч.); в) образец 3 ($t = 1050$ °С, время выдержки 2 ч.)

На износостойкость, а, следовательно, долговечность штамповой оснастки значительное влияние оказывает шероховатость поверхности. В источнике [9] отмечается, что процесс борирования может быть использован как окончательный метод обработки детали и не приводит к изменению шероховатости. Однако в данной работе исследовался процесс низкотемпературного жидкостного борирования углеродистых сталей. В настоящее время отсутствуют сведения о качестве поверхностного слоя изделий из инструментальных сталей, подвергаемых ВБА. На рис. 3 приведена диаграмма изменения шероховатости поверхности образцов до и после ВБА. Как видно из диаграммы на рост шероховатости после ВБА оказывает влияние повышение температуры процесса и времени выдержки.

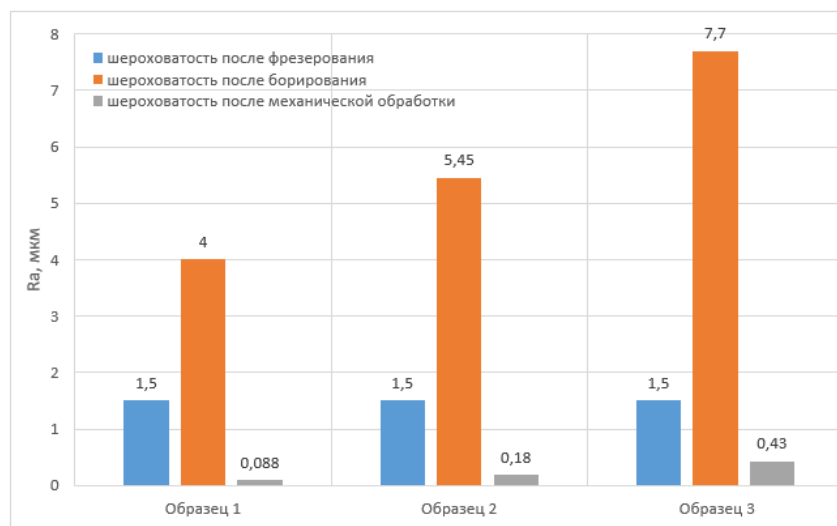


Рис. 3. Диаграммы изменения шероховатости поверхности

С целью снижения шероховатости поверхностных слоев и удаления верхней пористой зоны было осуществлено шлифование. Исследование топографии до и после шлифования показало, что чистоту поверхности можно довести до $Ra = 0,4$ мкм шлифованием, по сравнению с исходными $Ra = 7,7$ мкм после ВБА. При этом, функциональные свойства обеспечиваются в полной мере оставшимися зонами слоя на образце, подвергнутом обработке свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

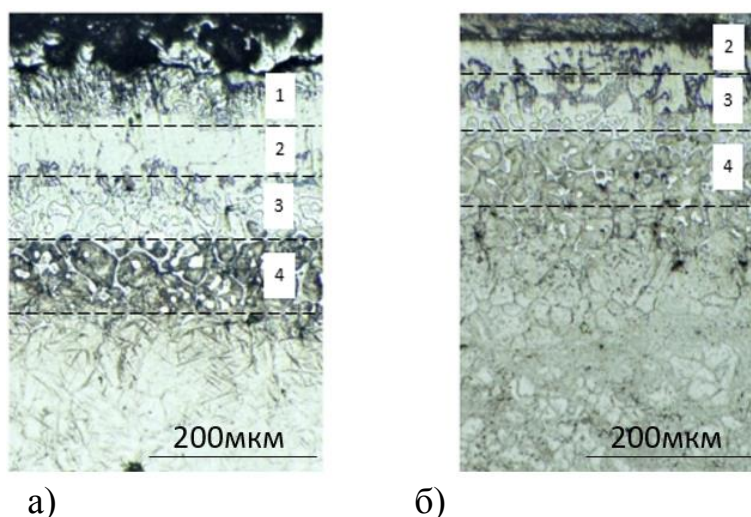


Рис. 4. Микроструктуры бороалитированных стали: а) после ВБА; б) после окончательной механической обработки, где 1-4 – зоны слоя с определенной структурой и составом

На рис. 5 представлено распределение микротвердости по глубине слоя, где максимальное значение соответствует зонам 1 и 3 диффузионного слоя.

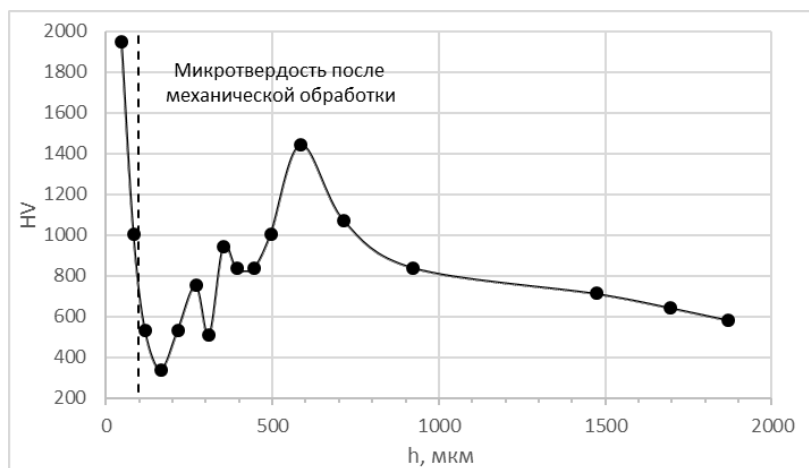
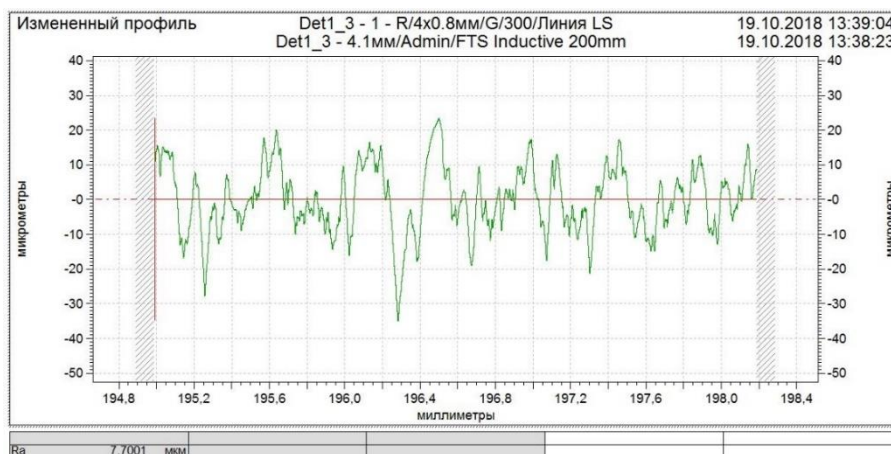
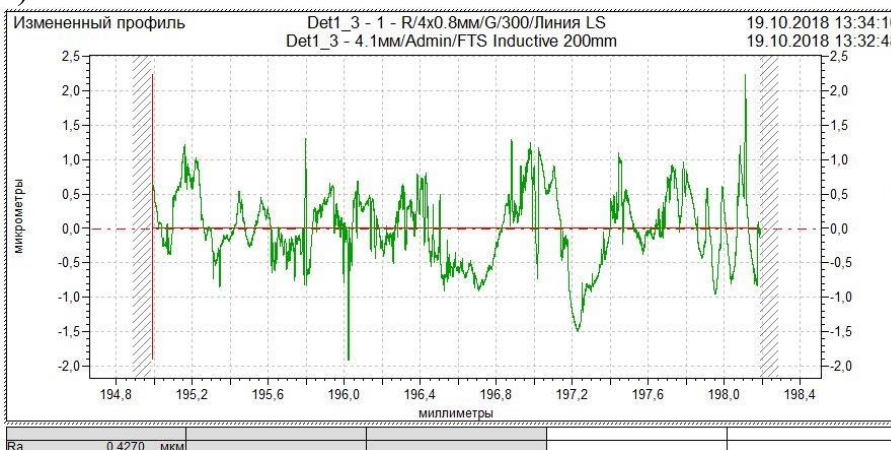


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине

На рис. 6 представлены типичные профилограммы поверхности после ВБА и механической обработки.



а)



б)

Рис. 6. Профилограммы поверхности образца: а) после ВБА; б) после шлифования эльборовыми головками

После шлифования эльборовыми шлифовальными головками по указанным ранее технологическим режимам обработки шероховатость поверхности снижается, причем наблюдается влияние технологической наследственности.

Таким образом, комплексное решение задачи обеспечения необходимой шероховатости с результатами металлографического анализа позволяет сформировать наиболее благоприятную модификацию структуры, которая способствует обеспечению минимальной шероховатости покрытий после шлифования.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-38-00939 мол_а).

Список использованной литературы:

1. Грешилов А. Д., Лыгденов Б. Д., Мотошкин Э. Э., Гурьев А. М. Разработка технологии гибки противоабразивных оковок / Ползуновский альманах. – 2006. – №3 – С. 12-15.
2. Галкин В. В, Белкин А. С., Карташов А. А. Оценка ресурса пластичности тонколистового титанового сплава ОТ4-1 при горячей формовке / Кузнечно-штамповое производство. – 2001. – № 12. – С. 13-16.
3. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. Л. А.Никольский, С. З. Зиглин. В. В., Бойцов и др.- М.: Машиностроение, 1975 г. – 280 с.
4. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: Физматлит, 2010 – 384 с.
5. Чесов Ю. С., Зверев Е. А., Плохов А. В. Эксплуатационные свойства плазменных покрытий из износостойкого порошкового материала марки ПГ-С27 / Обработка металлов. – 2010. – № 2(47). – С. 8-12.
6. Шероховатость поверхности износостойких покрытий после финишной механической обработки / Ю. С. Чесов, Е. А. Зверев, А. И. Попелюх, П. В. Трегубчак / Обработка металлов. – 2011. – № 1(50). – С.12 - 14.].
7. Shmatov Alexander, Lubomir Soos, Zdenko Krajny. Thermo-Hydrochemical Treatment for Tool Materials (a monograph). Bratislava, Slovak Technical University, 2014. - 109 pp. (in Slovak).
8. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали / А.А. Шматов, Г.К. Жовнерко, Ю.О. Лисовская // Материаловедение. – 2013. – № 1. – С. 43-50.
9. Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности / Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2005. – № 2 (25). – С. 91-94.

Изучение фазовых превращений в деталях из титанового сплава BT22 при плоском шлифовании

Я.И. Солер, Май Динь Ши, Д.Ю. Казимиров

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Титановые сплавы могут изменять свой фазовый состав после абразивной обработки. Шлифование кругами из CBN количественно влияет на изменение интерметаллидных соединений в BT22, что подтверждается экспериментально. Эти изменения являются положительными или отрицательными, в зависимости от назначения детали из титанового сплава. Рентгеноструктурный анализ выявил наличие фазы, ранее не описанной.

Ключевые слова: *титановый сплав, шлифование, интерметаллиды.*

В настоящее время шлифование становится наиболее важным процессом окончательной обработки ответственных деталей. Это объясняется тем, что в результате разработки методов более точнойковки и литья, размеры которых приближается к окончательной геометрии, шлифование стало более приоритетным процессом единой обработки непосредственно из заготовки до окончательных размеров с сокращением точения или фрезерования [1, 2, 3].

Известно, что титановые сплавы широко применяются в разных отраслях машиностроительного производства для ответственных изделий: авиационной и космической техники, газоперекачивающей аппаратуры, химическом оборудовании и судостроения. Однако при их шлифовании из-за своей низкой теплопроводности в зоне контакта с абразивным инструментом возникает высокая температура резания, что может привести к появлению прижогов и шлифованных трещин. Как показано в работе [4], температура шлифования α -титановых сплавов должна быть ниже 500°C для предотвращения водородной хрупкости и ниже температуры рекристаллизации, что позволит избежать охрупчивания и разупрочнение поверхностного слоя детали. При шлифовании титановых сплавов ($\alpha+\beta$)-группы при нагреве до температуры выше эвтектоидного превращения и при быстром охлаждении образуется интерметаллидное соединение титана с легирующими элементами (ω -фазы), что повышает их хрупкость и снижает стойкость к усталостному излому при их работе на изгиб. Но с другой стороны содержание ω -фазы позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя и способствует росту модуля упругости с повышением прочности σ_b при взаимодействии ω -фазы с ($\alpha+\beta$)-группой. Сказанное является благоприятным явлением для деталей, работающих в качестве корпусных и др., несущих значительные контактные нагрузки. При определении температуры шлифования ав-

торы [5] построили конечно-элементную модель для ее прогнозирования. Установлено, что при шлифовании деталей из ВТ6 обычными кругами из карбида кремния с применением СОЖ температура резания может превышать 700° С при увеличении глубины резания до 0,02 мм. А при сухом шлифовании температура в зоне контакта деталей с инструментом дополнительно повышается на 150° С [6]. Шлифование титановых сплавов кругами из кубического нитрида бора (например, CBN) за счет своей превосходной износостойкости может обеспечить более низкую температуру в зоне контакта деталей с инструментом (до 423°С), что уменьшает или локализует ее тепловое повреждение и нежелательные остаточные напряжения [7]. При шлифовании образцов из сплава ВТ22 круги из CBN повышают сопротивление усталостному разрушению: в 1,5 раза по сравнению с кругами из монокорунда и на 20% с кругами из карбида кремния [8]. В связи с вышесказанным данная работа посвящена изучению фазового превращения интерметаллидов (ω -фаз), α - и β -титановых фаз при плоском шлифовании деталей из титанового сплава ВТ22 высокопористыми кругами CBN.

Методика исследования включала два последовательных этапа: проведение натурального эксперимента и определение фазового состава.

Шлифование проведено при следующих условиях: станок модели 3E711В; абразивный инструмент – нитридборовый высокопористый круг формы 1А1 с размерами 200×20×76×5мм и характеристикой CBN30 В107 100 OV K27 КФ40; Скорость круга $v_k = 28$ м/с; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол – 6, подаваемая поливом на деталь с расходом 7-10 л/мин; объект исследования – образцы из титанового сплава ВТ22 (5,5Al–5,0Mo–5,0V–1,0Cr–1,0Fe) с механическими свойствами: $\sigma_b = 1400$ МПа, $\delta = 8$ %, имеющие размеры $L \times B \times H = 40 \times 40 \times 40$ мм; шлифуемой плоскостью служит $L \times B$. Варьирование параметров режимов шлифования показано в таблицу 1.

Съемку рентгеновских спектров со шлифованных деталей проводили на рентгеновском дифрактометре *Shimadzu XRD-7000* при диапазоне углов 2θ от 10,0° до 80,0°. С целью повышения точности измерений проведен анализ двух деталей, полученных при одинаковом условии шлифования, для каждого из которых получена рентгенограмма спектров шлифованной поверхности, и исходной поверхности, предварительно фрезерованной. Анализ съемок проведен с помощью программы *Match 1.11*. Качественный и количественный фазовый анализ проведен по методике [9]. При этом количество фаз в сплаве определяется методом соотношения относительной интенсивности (*RIR*).

Таблица 1 – Переменные условия проведения исследования

№ опыта $j=1;5$	Продольная подача $S_{пр}$, м/мин	Поперечная подача $S_{п}$, мм/дв.ход	Глубина t , мм	Операционный припуск z , мм
1	5	2	0,0200	0,3
2	18	2	0,0050	0,2
3	18	2	0,0125	0,2
4	18	2	0,0200	0,2
5	18	10	0,0200	0,3

В титановых сплавах основным превращением является полиморфное $Ti_{\alpha} \leftrightarrow Ti_{\beta}$. Низкотемпературная α -фаза имеет гексагональную плотноупакованную решетку (ГПУ), а высокотемпературная β -фаза – объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК). Как и другие промышленные титановые сплавы, ВТ22 легирован алюминием (5,5%), ванадием (5,0%), хромом (1,0 %), что дает возможность образовать интерметаллиды на основе систем $Ti-Al$, $Ti-Cr$ и $Al-Ti-V$ [10]. Как показано в табл. 2, в данной работе при анализе рентгенодифракционных спектров исходной поверхности (после фрезерования) обнаружены фазы: Ti_3Al (α_2 -фаза), $TiCr_4$, $Al_5Ti_3V_2$ (образована из соединений двух интерметаллидов: $TiAl$ и V_5Al_8).

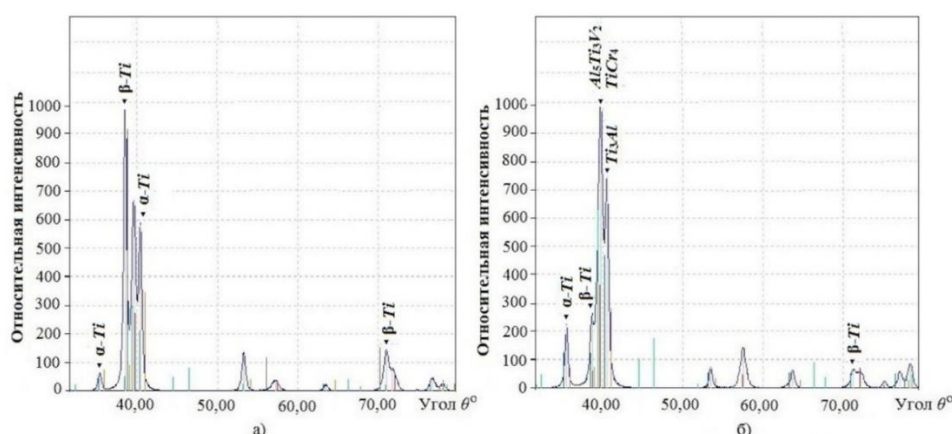


Рис. 1. Рентгенодифракционный спектр при условии шлифования ($j=4$), где: а-для исходной поверхности, б – для шлифованной поверхности

В данной работе все значения количественного рентгенофазового анализа в сплаве являются средними и рассчитаны по опытам. Известно, что титановые сплавы обладают низкой теплопроводностью (в 15 раз меньше теплопроводности алюминия и в 5 раза – железа и сталей). На рисунке 1 представлен рентгенодифракционный спектр с выделением фаз титана и интерметаллидов, определенных по опыту $j=4$ на исходной поверхности и шлифованной поверхности. При анализе съемок рентгеновских спектров исходных поверхностей (Рис. а) очень редко наблюдается одинаковое содержание α - и β -фазы. В большинстве случаев количество α -фазы оказалось больше, чем β -фазы (в 1,13 раза по общему среднему). После теплового воздействия, вызванного шлифованием, независимо от исходного содержания этих фаз выявлено сильное снижение количества β -фазы до 1,8%, а количество α -фазы неоднозначно возросло до 39,2% (Рис. б).

При их шлифовании с увеличением поперечной подачи (от 2 до 10 мм/дв.ход) и глубины шлифования (от 0,005 до 0,020 мм) в зоне резания выделяется большое количество тепла. При минимальной продольной подаче $S_{пр}=5$ м/мин ($j=1$) тепловой источник медленно перемещается по поверхности, что приводит к повышению отвода тепла в деталь. Вероятно, что в сплаве ВТ22 в исходном состоянии (после фрезерования) имеется β -фаза высокой метастабильности. При высокой температуре шлифования происходит распад β -фазы с

образованием ω -фазы [11]. Кроме этого, поверхностный слой деталей в процессе шлифования испытывает сильную пластическую деформацию, которая вероятно приводит к увеличению объемной доли выделений α -фазы в высокотемпературной области [12]. В результате чего кристаллическая решетка меняется и ее деформация приводит к сдвигу по углу θ .

В таблице 2 при количественной оценке фазового содержания интерметаллидов в сплаве ВТ22 видно, что при относительно жестких режимах шлифования с высокой интенсивностью теплообразования, особенно при $j=5$, количество интерметаллидных фаз $TiCr_4$ и $Al_5Ti_3V_2$ оказалось больше чем в других опытах.

Таблица 1. Содержание исследуемых фаз в сплаве ВТ22

Фаза	Относительное содержание фаз					
	Исходный образец	Опыт $j=1;5$				
		1	2	3	4	5
$\alpha-Ti$	24,0	39,2	38,3	24,6	32,4	33,6
$\beta-Ti$	21,3	6,8	6,4	3,0	1,8	5,0
$CrTi_4$	9,9	17,9	20,8	16,8	14,3	18,6
Ti_3Al	19,1	0,0	8,1	15,8	13,9	0,0
$Al_5Ti_3V_2$	25,8	36,2	26,6	39,9	37,7	42,9

Их количество достигает минимума при шлифовании с минимальной поперечной подачи и глубины резания ($j=2$). Неоднозначное изменение фазы Ti_3Al от режимов шлифования возможно из-за ее нестабильности и перехода в другие интерметаллидные фазы.

В результате количественного фазового анализа рентгенодифракционных спектров в сплаве ВТ22 выявлено влияние процесса шлифования на содержание интерметаллидных фаз. При этом, количество таких фаз зависит от параметров процесса шлифования, с трудно прогнозируемой закономерностью.

Эта работа поддержана РФ по теме №9.6484.2017/8.9 БЧ.

Список использованной литературы:

1. Bright, R., Biro, A., Hitchiner, M. Grinding of γ -titanium aluminide with superabrasives INTERTECH 2011. Indianapolis Downtown Marriott Indianapolis; United States; 19 May 2015
2. Stephen M. Guo C. Grinding technology: theory and application of machining with abrasives. // Industrial Press Inc., 2008. 372 pp.
3. Hood, R., Cooper, P., Aspinwall, D.K., Soo, S.L., Lee, D.S. Creep feed grinding of γ -TiAl using single layer electroplated diamond superabrasive wheels CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Volume 11, November 01, 2015, Pages 36-44
4. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н., Чумаченко Т. В. Рациональные температуры при шлифовании некоторых наплавленных и напыленных на рабочие

поверхности деталей сталей, сплавов и химических соединений (часть 2)// Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2014, № 26 (1069). С. 16-21.

5. Xun L., Zhitong C., Wuyi C. Suppression of surface burn in grinding of titanium alloy TC4 using a self-inhaling internal cooling wheel // Chinese Journal of Aeronautics, 2011. №1 (24). P. 96-101.

6. Tang J. S., Pu X. F., Xu H. J. et al. Studies on mechanisms and improvement of workpiece burn during grinding of titanium alloys // Annals of the CIRP, 1990. №1 (39). P. 353-356.

7. Yuan Z., Zhu B., Lu Z. and etc. Finish Surface Grinding of Titanium Alloys // Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium, 2002. pp. 481-485.

8. В.А. Носенко, С.В. Носенко. Технология шлифования металлов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013.

9. "Developments in Formulation Analysis by Powder Diffraction Analyses" – Fawcett, T. G., J. Faber, F. Needham, S. N. Kabekkodu, C. R. Hubbard, and J. A. Kaduk., (2006) Powder Diffraction 21(2), pp. 105-110.

10. Shen, Z., He, L., Huang, G., Mu, R., Gu, J., Liu, W. Microstructures and mechanical properties of TiAl/Ti3Al multilayered composite Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica Volume 52, Issue 12, 11 December 2016, pp. 1579-1585

11. A.I. Khorev, Alloying and heat treatment of structural ($\alpha + \beta$) titanium alloys of high and superhigh strength, Russian Engineering Research. 30.7, 2010, p. 682-688.

12. Илларионов А.Г., Нарыгина И.В., Карабаналов М.С., Демаков С.Л., Попов А.А., Елкина О.А. Структурные и фазовые превращения в титановом сплаве переходного класса при деформационном воздействии/ Физика материалов и металлография, т. 110, вып. 3, 2010, с. 295-304.

УДК 621.785.532

Ионное азотирование нержавеющей стали AISI 321 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля

Р. К. Вафин, А. В. Асылбаев

Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия

Исследовано влияние наложения магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде на поверхностную микротвердость и микроструктуру нержавеющей стали AISI 321. Установлено, что после ионного азотирования в тлеющем разряде с наложением магнитного поля происходит увеличение поверхностной микротвердости нержавеющей стали AISI 321 в 1,5...2 раза по сравнению с ионным азотированием в тлеющем

разряде без наложения магнитного поля. На основе анализа микроструктуры установлено, что увеличение числа актов ионизации приводит к 1,5 кратному увеличению толщины диффузионного слоя нержавеющей стали AISI 321.

Ключевые слова: азотирование, тлеющий разряд, ионное азотирование, магнитное поле, сталь, микротвердость поверхности, толщина диффузионного слоя, диффузия азота.

Введение: Современные технологические процессы химико-термической обработки (ХТО) должны соответствовать следующим критериям: высокоэффективность, ресурсосберегаемость, малоотходность, экологичность, и легко управляемость [1]. В полной мере этим критериям соответствует технологический процесс ионное азотирование.

Азотирование широко используют в различных отраслях промышленности для повышения долговечности и надежности многих ответственных деталей и инструментов. При этом у обрабатываемых деталей повышаются следующие эксплуатационные свойства: прочность, твердость, износостойкость, задиростойкость, сопротивление усталости и коррозии, высокотемпературная прочность и жаропрочность (при объемном насыщении) [1].

По сравнению с газовым азотированием, а также с другими способами упрочняющей ХТО, ионное азотирование имеет ряд преимуществ и технологических возможностей [1], среди которых выделяют следующее:

- высокая скорость диффузии;
- возможность получения азотированного слоя заданной структуры и фазового состава;
- сохранение высокой чистоты обработки поверхности;
- снижение хрупкости азотированного слоя;
- уменьшение деформации изделий в процессе обработки;
- экологичность и универсальность процесса.

Ионное азотирование в тлеющем разряде (ТР) с использованием магнитных полей (МП) позволяет повысить на порядок плотность плазмы и эффективность ионизации газа по сравнению ионным азотированием без использования магнитных полей [2, 3]. Особенностью такой обработки является интенсификация процесса за счет удержания магнитным полем электронов в зоне обработки, которые увеличивают число актов ионизации.

Целью данной работы является исследование влияния наложения магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде на поверхностную микротвердость и микроструктуру нержавеющей стали AISI 321.

Материал и методы исследования: Для проведения эксперимента использовались образцы из нержавеющей стали марки AISI 321. Химический состав стали приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав нержавеющей стали AISI 321

Элемент	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	S	P
Содержание элементов, %	до 0,08	до 0,8	до 2	9...11	17...19	до 0,3	~65	до 0,02	до 0,035

Эксперимент производился на электронно-лучевой установке ЭЛУ-5М, модернизированной для проведения термической и химико-термической обработок в плазме тлеющего разряда с магнитным полем (рис. 1).

Для питания разряда использовался импульсный источник питания АрЕI-М-5PDC, на котором контролировались показания тока разряда и разности потенциалов. Образцы в камере размещались таким образом, что одна часть образца попадала в область наложения магнитного поля, а другая нет.

Перед началом ионного азотирования в вакуумной камере производилась ионная очистка поверхности образца в течение 15 мин. в среде аргона. Процесс ионного азотирования проходил при температуре $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов в газовой смеси из аргона, азота и водорода (50% Ar + 35% N₂+ 15% H₂). Расход газа контролировался блоком управления РРГ БУИП 3. Давление рабочей газовой смеси было постоянным на протяжении всего эксперимента и составляло $P=50\text{ Па}$. Контроль и снятие температур производилось при помощи оптического пирометра Термикс.

Для исследования поверхностной микротвердости азотированных образцов использовался метод измерения твердости по Виккерсу при помощи микротвердомера Struers Duramin-2. Для проведения испытаний были подготовлены специальные косые шлифы с углом наклона 7°. Анализ микроструктуры азотированных образцов проводился на металлографическом микроскопе Olympus GX51.

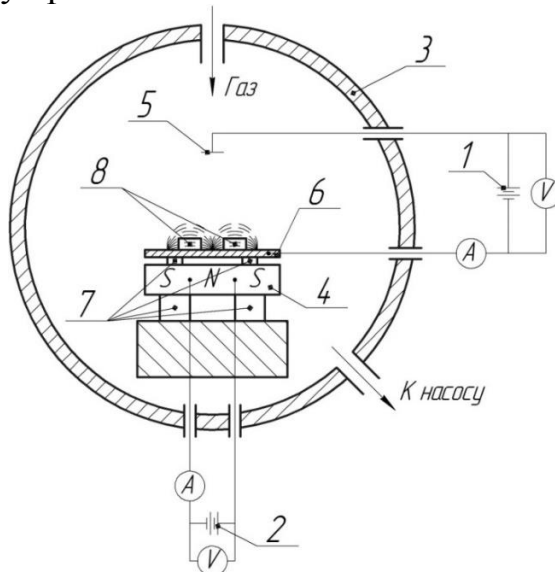


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1, 2 – источники питания, 3 – вакуумная камера, 4 – электромагнитная система, 5 – анод, 6 – подложка (катод), 7 – изоляторы, 8 – образцы

Результаты исследования и их обсуждение:

Для установления влияния наложения магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде был проведен эксперимент при температуре $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 6 часов, после чего был произведен замер поверхностной микротвердости и выполнен анализ микроструктуры косого шлифа азотированного образца.

Анализируя полученный график распределения микротвердости по глубине (рис. 2) видим, что поверхностная микротвердость образца в зоне наложения магнитного поля в 1,5...2 раза больше, чем вне области наложения МП. Также из графика видно, что наложение магнитного поля привело к 1,5 кратному увеличению толщины диффузионного слоя, что подтверждается снимками микроструктуры (рис. 3). Такой результат обусловлен увеличением плотности ионного тока, за счет удержания магнитным полем электронов в зоне обработки, которые в свою очередь увеличивают число актов ионизации [4].

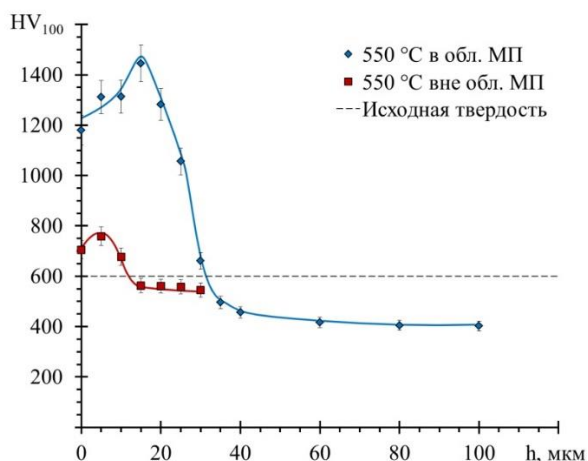
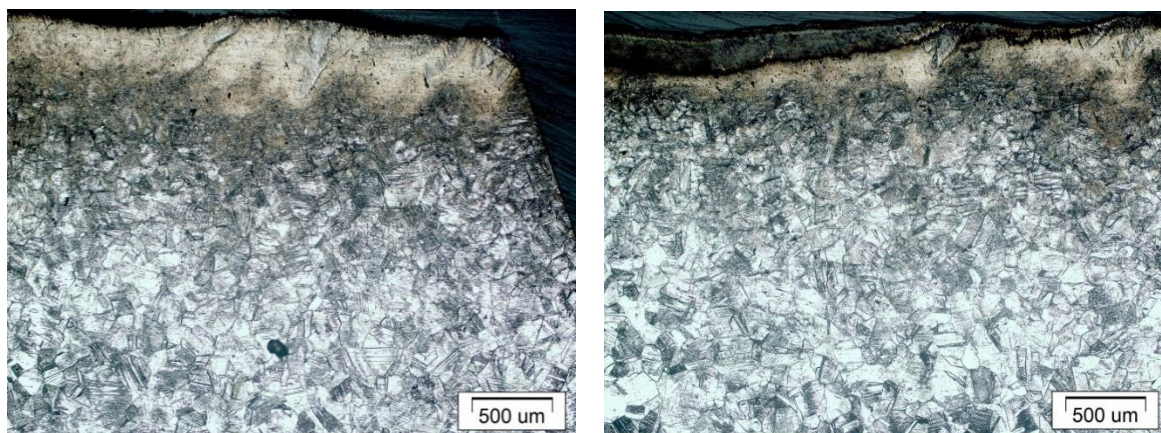


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине образца азотированного при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$



а

б

Рис. 3. Металлографические снимки микроструктуры нержавеющей стали AISI 321 азотированного при 550 °С: а – в области наложения МП, б – вне области наложения МП

Резкое снижение микротвердости от поверхности вглубь материала образца в области наложения магнитного поля объясняется тем, что наложение МП значительно повышает энергию частиц, за счет чего повышается температура в зоне обработки [4], что в свою очередь служит причиной образованию избыточной энергии ионов, которая приводит к катодному распылению.

Выводы: В результате исследования влияния наложения магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде на поверхностную микротвердость и микроструктуру нержавеющей стали AISI 321, было установлено, что:

1. Наложение магнитного поля при ионном азотировании в тлеющем разряде интенсифицирует процесс насыщения стали азотом, вследствие увеличения числа актов ионизации [3, 4], приводящая к 1,5 кратному увеличению толщины диффузионного слоя обрабатываемых деталей.

2. При ионном азотировании с наложением магнитного поля происходит увеличение поверхностной микротвердости нержавеющей стали AISI 321 в 1,5...2 раза по сравнению с ионным азотированием без наложения магнитного поля.

Список использованной литературы:

1. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.В., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: МГТУ им. Баумана, 1999. С. 134-148.

2. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. С. 217-223.

3. Вафин Р.К., Швеёва Т.В., Асылбаев А.В., Мухаметов Р.И., Николаев А.А. Исследование технологических режимов ионного азотирования в плазме тлеющего разряда // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2017: сборник тезисов. 2017. С. 137.

4. R. Vafin, A. Asylbaev, A. Pesin and D. Pustovoytov. Influence of the magnetic field at ion nitriding in the glow-discharge on the microhardness of steel AISI 321 // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115. DOI:10.1088/1742-6596/1115/3/032061

УДК 621.9.06, 62-523.8

Трехосевая шпиндельная головка для производства панелей в авиастроении

И.Г. Майзель¹, В.В. Платонов²

1. Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

2. Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 655017, Россия, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27.

Разработана новая кинематическая схема, спроектирована и изготовлена трехосевая шпиндельная головка, позволяющая исключить основные привода станка (X,Y,Z) при сверлении отверстий. Использование данной технологии позволит повысить надежность процесса сверления отверстий панелей, включая панели из ПКМ, а также снизить энергетические затраты. Данная технология целесообразна при производстве деталей с большим числом отверстий

Ключевые слова: *станки с ЧПУ, модернизация металлообрабатывающих станков, трехосевая шпиндельная головка, глубокое сверление.*

Широкое распространение в авиастроительной отрасли при производстве сложных деталей с переменной кривизной получили пяти-координатные фрезерные станки, которые позволяют воспроизвести практически любую открытую поверхность методом фрезерования [1,2]. При этом использование технологий CAD-CAM успешно решает проблему разработки управляющих программ для станков с ЧПУ.

В тоже время, при производстве авиационных деталей, которые впоследствии собираются методом клепки, возникает необходимость сверления большого количества отверстий, на которые накладываются достаточно жесткие требования, для обеспечения последующей качественной сборки элементов. Отметим, что современное фрезерное оборудование способно обеспечить формообразование практически любых отверстий с заданной точностью и любым пространственным расположением. В этом случае поддержание соосности инструмента и отверстия будет обеспечиваться дискретными перемещениями по основным подачам станка (X,Y,Z). Следовательно, чем точнее отверстие, тем меньше дискретный шаг приращения по координате, тем на большее количество шагов разбивается траектория. Отметим, что при рассогласовании сигналов по осям подач вели-

чина приращения воспринимается как радиальное биение инструмента, которое снижает точность и качество отверстия. Это особенно явно может проявиться, когда в детали необходимо просверлить несколько сотен пространственных отверстий, желательно одним инструментом.

Проблема еще более актуальна, если речь идет о глубоком сверлении, когда сверло многократно выводится из отверстия в процессе сверления.

В данной работе рассмотрен один из подходов к решению данной проблемы, на основе создания 3-осевой шпиндельной головки.

Данная задача по отработке технологии глубокого сверления была поставлена в ходе решения проблемы импортозамещения при производстве литейной оснастки, в частности кристаллизаторов (рис.1). Кристаллизаторы, для создания водной рубашки, имеют большое количество (до 800шт) отверстий (рис.2). При этом из-за криволинейности внутренней поверхности кристаллизатора, оси данных отверстий, как правило, имеют пространственное расположение и не параллельны друг другу.

Долгое время компания РУСАЛ приобретала данную литейную оснастку за рубежом, поскольку продукция отечественных производителей не отвечала предъявляемым требованиям.

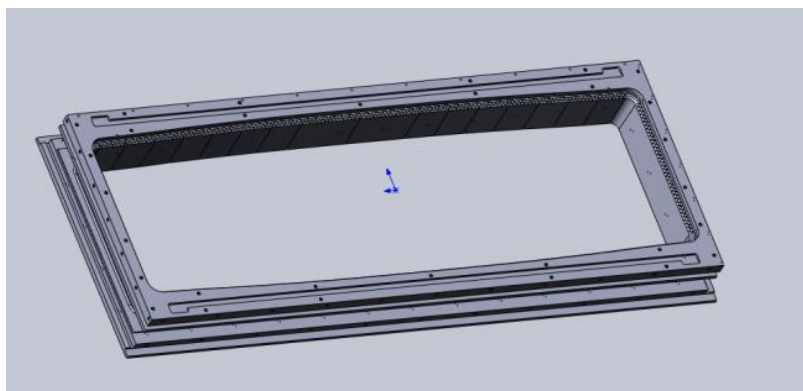


Рис. 1 3D-модель кристаллизатора

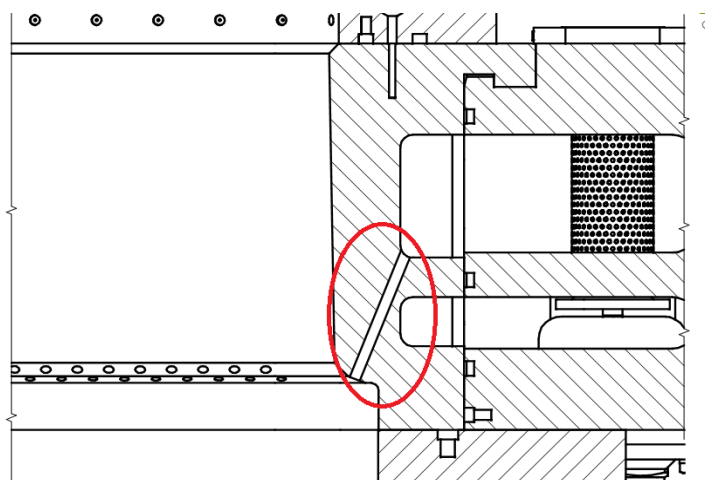


Рис.2 Отверстие кристаллизатора Диаметр- от 3 до 4,5мм
Глубина – от 40 до 54мм

Отметим, что сверление данных отверстий считается глубоким (отношение глубины к диаметру более 12), а при сверлении в алюминиевых сплавах требуется многократный вывод инструмента для удаления стружки и охлаждения режущих кромок [3]. В процессе отработки технологии, найдены оптимальные параметры сверления, при которых сверло выводится после врезания на глубину 0,75-1 диаметра отверстия. Таким образом, в процессе сверления данных отверстий выводится от 15 до 20 раз. При существующей технологии эти возвратно-поступательные перемещения обрабатываются основными приводами станка X,Y,Z, при этом система ЧПУ стремится удержать соосность инструмента и отверстия.

Как отмечено в литературе [4], процесс сверления мелкоразмерных отверстий до 3 мм в различных конструкционных материалах трудно поддается автоматизации. Концевой инструмент диаметрами до 3 мм, из быстрорежущих и твердых сплавов при отклонении от оптимальных режимов резания легко ломается, особенно при высокоскоростной обработке (ВСО).



Рис.3 Продольно-фрезерный станок 6М610Ф11-23

Обработка технологии производилась на базе модернизированного продольно-фрезерного станка 6М610Ф11-23 [5,6,7,8,14] (рис. 3). В стандартной комплектации, станок имеет всего три управляемых оси координат. Для повышения точности обработки на контуре в качестве датчиков обратной связи использованы оптические линейки по всем трем осям. Результатами контрольных испытаний было подтверждено, что гарантированная точность линейного размера при чистовой обработке на круговом контуре 500 мм составляет не более 0,02-0,03 мм. При этом скорость рабочих подач по осям X,Y,Z доходит до 2 м/мин.

Для повышения числа управляемых осей и реализации нового подхода к сверлению пространственных отверстий была разработана и изготовлена 3-осевая шпиндельная головка (рис.4), имеющая круговые оси А,С и линейную ось – W, а также с высокоскоростной мотор-шпиндель. С

целью увеличения рабочей зоны по оси Z 3-осевая шпиндельная головка устанавливается в гнездо, предназначенное для крепления лобовой шпиндельной насадки станка. В конструкции головки использовались современные инновационные решения для машиностроения, а именно, круговые оси A и C реализованы с помощью 2-х кольцевых двигателей MBT290D-0018-F (Мощность 4,1кВт, момент 220 Нм, скорость до 350 об/мин) производства Bosch Rexroth, линейная ось W с помощью линейного модуля перемещения ТКД-275-NN производства Bosch Rexroth (Германия). Это позволило отказаться от традиционно используемых зубчатых передач в круговых осях и передачи винт-гайка в линейном приводе, что значительно упростило конструкцию и, в сочетании со скоростным мотор-шпинделем ET125-40-12Z-7.5, позволило поднять точность и качество обработки.

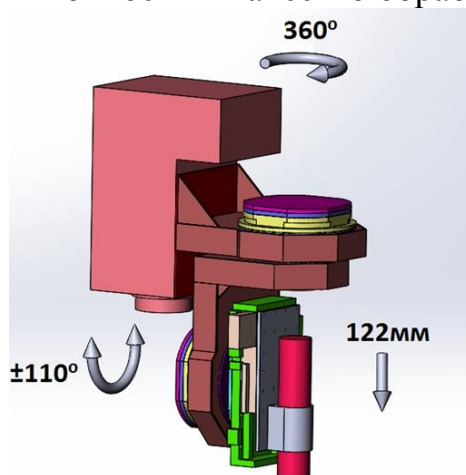


Рис.4. Схема 3-осевой шпиндельной головки



Рис. 5. Трех-осевая шпиндельная головка (без мотор-шпинделя)

Наличие дополнительной вторичной линейной оси W в шпиндельной головке позволяет расширить технологические возможности по сравнению с традиционной 5-осевой обработкой, особенно при высокоскоростной обработке пространственных отверстий. Принципиально обработку про-

странственных отверстий при пяти-осевой обработке (оси А и С реализованы в шпиндельной головке) можно получить за счет приращений по линейным осям (X,Y,Z), а за счет круговых осей А и С ось инструмента позиционируется в пространстве и совмещается с осью отверстия.

Процесс формообразования отверстия осуществляется следующим образом: ось шпинделя с инструментом позиционируется в пространстве, т.е. совмещается с осью отверстия с помощью 5-ти управляемых координат X,Y,Z,A,C, после чего привода фиксируются в данном положении, а осевая подача сверла обеспечивается исключительно линейным приводом W, на котором закреплен мотор-шпиндель. Данный подход значительно упрощает процесс сверления, поскольку нет необходимости постоянно удерживать соосно инструмент и отверстие, а регулируемые остаются только два параметра, - вращение сверла и осевая подача. Это особенно важно при глубоком сверлении, когда сверло совершает многократные возвратно-поступательные движения.

Стоит отметить, что предложенный подход значительно экономит электроэнергию, поскольку по сравнению с традиционной технологией в процессе сверления отсутствуют отработка перемещений по осям X,Y,Z с использованием электродвигателей мощностью 15 кВт по оси X, 8 кВт по оси Y, 7 кВт по оси Z. В момент сверления привода зафиксированы. Линейный привод обеспечивает осевое перемещение на 122мм, что в большинстве случаев позволяет получить отверстия с одной установки. При необходимости, в каталоге Bosch Rexroth есть привода с большим ходом.

Особые сложности возникают при сверлении полимерных композиционных материалов ПКМ, что обусловлено их физико-механическими характеристиками: склонности к расслоению в процессе обработки из-за их слоистости, структурной неоднородности, высокой твердости материала наполнителя и низкой пластичности связующего [9]. Особое внимание необходимо уделять режимам резания и правильностью отработки траектории, поскольку это в конечном итоге обеспечивает требуемое качество обработанных деталей (рис.6).

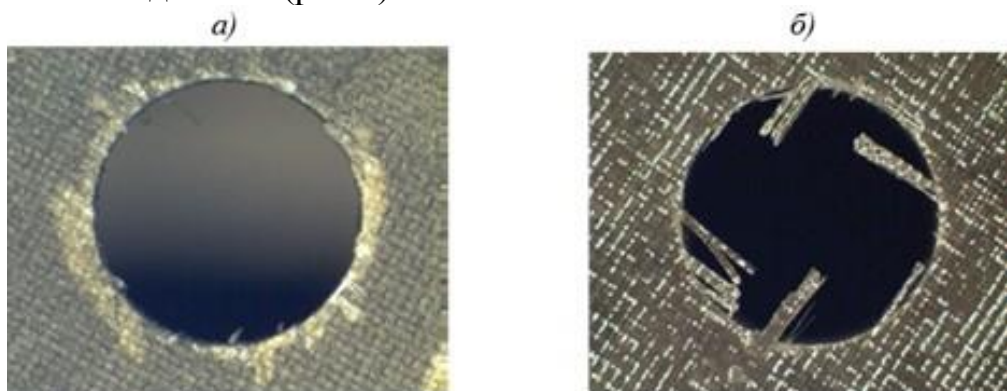


Рис. 6. Местное отслоение (деламинация) слоев материала при нарушениях режимов осевой подачи инструмента при сверлении (а) и фрагменты волокон (сколы) на внутренней поверхности отверстия из-за износа режущей кромки и нарушений режимов сверления (б)

Традиционное получение отверстий в панелях из ПКМ методом сверления имеет следующие недостатки: низкое качество обработанных отверстий (наличие сколов), низкая стойкость режущего инструмента, малая производительность процесса [10,11].

Научные вопросы прикладного значения и проблемы, возникающие на практике по обработке отверстий в неметаллических слоистых материалах, рассмотрены в работах С. Кравченко [12] и Н.А. Криштопа [13]. Все исследователи отмечают, что при сверлении в панелях из ПКМ требуется высокая жесткость системы и точность отработки траектории для формирования качественного отверстия.

Для разработки программы обработки на фрезерных станках нами обычно используется система SprutCAM, позволяющая реализовывать различные стратегии на основе 3-модели обрабатываемой детали. Однако кинематическая схема представленного фрезерного станка с 6-ю управляемыми осями является уникальной и отсутствует в базе оборудования SprutCAM. Поэтому для коммерческого использования 3-осевой шпиндельной головки в производственном процессе, требуется проведение адаптации программного продукта под данную кинематическую схему, чтобы сразу получать окончательную программу обработки. В настоящее время, в условиях отсутствия данной версии, программирование по осям X,Y,Z,A,C осуществляется с помощью программы SprutCAM, а линейное перемещение по оси W с помощью G-кодов. Данный подход не является оптимальным, однако позволяет оценить эффективность процесса сверления.

Выводы:

1. Спроектированная 3-осевая шпиндельная головка для продольно-фрезерного станка 6М610 создает обрабатывающую систему с 6-ю управляемыми осями, что позволяет:

- повысить надежность и точность сверления пространственных отверстий, особенно при глубоком сверлении отверстий малого диаметра;
- упростить технологию получения отверстия до уровня сверлильного станка, в котором процесс сверления задается двумя параметрами (подача и число оборотов);
- повысить производительность и снизить потребление электроэнергии при сверлении большого числа отверстий.

2. При комплексном анализе обрабатываемых деталей и экономическом обосновании, использование 3-осевой шпиндельной головки быть рациональным решением при производстве авиационных деталей с большим числом отверстий.

Список использованной литературы:

1. Waurzyniak P. Пятикоординатные станки в мире - причины и степень их распространения // Manufacturing Engineering N. 6 Vol. 132, 2004, , с. 47 – 54.
2. Волчкевич, И.Л. Исследование фактической работоспособности современного высокопроизводительного оборудования с ЧПУ // Машиностроение и техносфера XXI века.: Сборник докладов XVII международной научно-технической конференции. Донецк. - 2011. - С. 144-145.
3. Санкин Ю.Н., Пирожков С.Л. УСТОЙЧИВОСТЬ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2000. № 2 (10). С. 87-93.
4. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.
5. Майзель, И.Г., Платонов, В.В., Глушкин, Е.Я. Модернизация продольно-фрезерного станка 6М610ф11-23 для современной технологии изготовления крупногабаритной литейной оснастки // «Вестник ИрГТУ»: Механика и машиностроение. – 2015. - №4(99). - 27-32.
6. Майзель, И.Г., Платонов, В.В., Глушкин Е.Я. Разработка специальной трехосевой шпиндельной головки для изготовления литейной оснастки по технологии HSM. // «Вестник ИрГТУ»: Механика и машиностроение. – 2015. - №7(102). – С. 66-70.
7. Платонов В.В., Платонова Е.В., Майзель И.Г. Модернизация металлорежущих станков с ЧПУ под конкретные технологические задачи с применением элементов агрегатирования. // СТИН: Научно-технический журнал. – ООО «СТИН», №8, 2016. – С. 8-12.
8. Platonov V.V., Platonova E.V., Maizel I.G. Modernization of numerically controlled machine tools on modular principles // Russian Engineering Reserch. – Vol. 37. -№2. – 2017. – pp. 140-143
9. А. Е. Раскутин, А. В. Хрульков, Р. И. Гирш Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>
10. Дударев Александр Сергеевич. Повышение эффективности и качества обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления изделий из полимерных композиционных материалов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Дударев Александр Сергеевич; [Место защиты: Перм. гос. техн. ун-т].- Пермь, 2009.- 173 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2508
11. Дударев А.С. Вопросы получения отверстий в элементах звукопоглощающих панелей авиационных двигателей из композиционных материалов. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «аэрокосмическая техника и высокие технологии». Сборник тезисов. -Пермь: ПГТУ, 2005. С. 45.

12. Кравченко Л.С. Исследование процесса сверления слоистых пластмасс. Дис. канд. техн. наук. Харьков: ХПИ, 1973. - Г76 с.

13. Криштопа Н.А. и др. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах. К.: Техника, 1980. - 126 с

14. Стародубов, В.С. Модульный принцип построения металлорежущих станков с числовым программным управлением // Известия высших учебных заведений: Машиностроение – 2013. - № 1 – С. 68-74.

УДК 658.512

Использование концепции «фабрики будущего» при технологической подготовке производства.

И.В. Фокин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Приведен типовой пример решения задач технологической подготовки производства, путем составления математического множества, согласно теории типовых решений. Метод основан на использовании совокупности ранее используемых критериев применимости и последующем его составлении математического неравенства. Такое представление процесса технологического проектирования укажет путь для формализации самого процесса принятия технологических решений, так как для этого достаточно математически представить каким-либо образом весь набор типовых решений, а также условий их применимости, при которых может быть использовано каждое из них. Полученные данные дают возможность свести процесс выбора к проверке соответствия исходных параметров к критериям применимости представленных решений, при полном их соответствии всех условий совокупности принимается соответствующее ранее использованное типовое решение.

Ключевые слова: *автоматизация, технологический процесс, технологическое проектирование, формообразование, производство, формализация.*

Подход к построению маршрута изготовления в его привычном виде можно охарактеризовать как, процесс крайне сложный и трудноформализуемый. Имея ввиду, что при ТПП как правило люди руководствуются своим практическим опытом, полученным в процессе их профессиональной деятельности. В свою очередь все производители в условиях жесточай-

шей борьбы, заинтересованы в скорейшем изготовлении продукции под изменяющиеся запросы со стороны заказчика и скорейшем выводе своей продукции на рынок.

Сама же концепция «Виртуальных Фабрик Будущего» – представляет построения систем комплексных технологических решений с мощной робототехникой и использованием в своем составе интегрированных систем «искусственного интеллекта». Реализуется на базе сравнительно нового способа представления информации – «Умный цифровой двойник» или умная цифровая копия реального физического объекта.

«Умный цифровой двойник» – это система представления набора мультидисциплинарных математически описанных моделей с высоким уровнем подобия реальным материалам, конструкциям, имеющее в своем составе физико-механические процессы, описываемые уравнениями математических символов. Такие модели имеют в своем составе все имеющиеся знания статических и динамических параметров рассматриваемого объекта.

В современных исследованиях в области искусственного интеллекта значительное место занимает вывод, основанный на прецедентах (Case Based Reasoning, CBR). CBR – это технология для решения проблем, основанная на опыте. Вывод, основанный на прецедентах, составляет альтернативу экспертным системам, основанным на правилах. Вместо логического контроля событий или объектов для оценки текущей ситуации используется информация о том, как в подобных случаях поступали раньше, т. е. производится анализ прецедентов. Прецедент – это описание проблемы или ситуации в совокупности с подробным указанием действий, предпринимаемых в данной ситуации для решения данной проблемы [5].

В настоящее время используя современное ПО любой объект или физическое явление можно описать в цифровом виде. Сначала моделируется (отрисовывается) объект в 3Д модели, с полным его соответствием геометрическим параметрам. Затем задаются материал, шероховатость, способ изготовления, допуск и т.д., тем самым мы имеем полностью готовую цифровую модель, которую можно использовать на дальнейшем производственном этапе.

В основу предлагаемого подхода – положена идея формализации знаний опыта эксперта-технолога и их онтологическое описание с целью обоснованного построения на их базе системы поддержки принятия решений. Это приведет к снижению количества ошибок и уменьшению издержек при организации производстве за счет сравнения нескольких технологических решений и выбора оптимального по наименованию технологических операций технологического процесса, их структура и информационная модель представлены на рисунке 1. Рассматриваемый способ обладает гибкостью в своем применении, и представит возможность применения на различных авиационных и машиностроительных предприятиях [1].

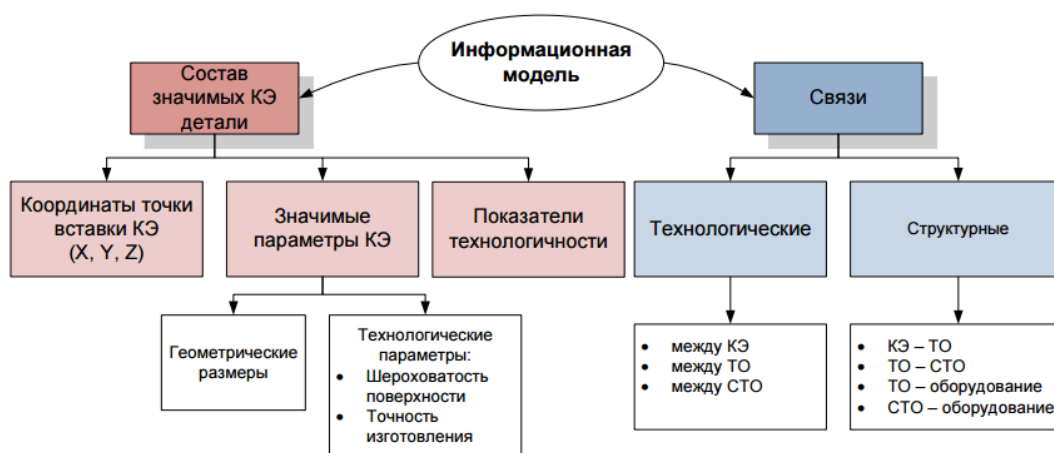


Рис. 1 – структура и состав данных информационной модели.

При разработке технологической документации технологи в своей работе опираются на 3D модель изделия, которая имеет в своем составе значимые параметры, используя которые технологи затем и строят подходящий маршрут изготовления.

Рассмотрим более подробно принцип формирования маршрута рассматриваемый в статье, схематично работа которого представлена на рисунке 2.

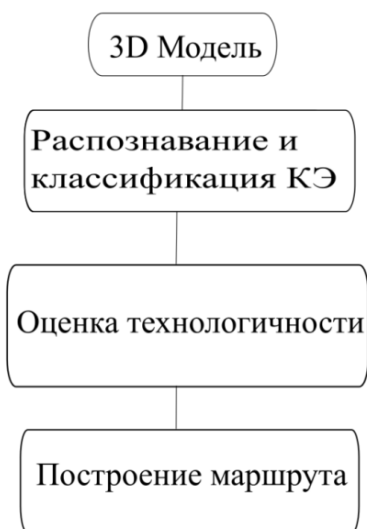


Рис. 2 – принцип работы предлагаемой методики.

Рассмотрим типовую деталь планера самолета – стенка, которая состоит из следующих конструктивных элементов: стенка, отбортовка (тип 1), борт, подсечка (рис. 3).

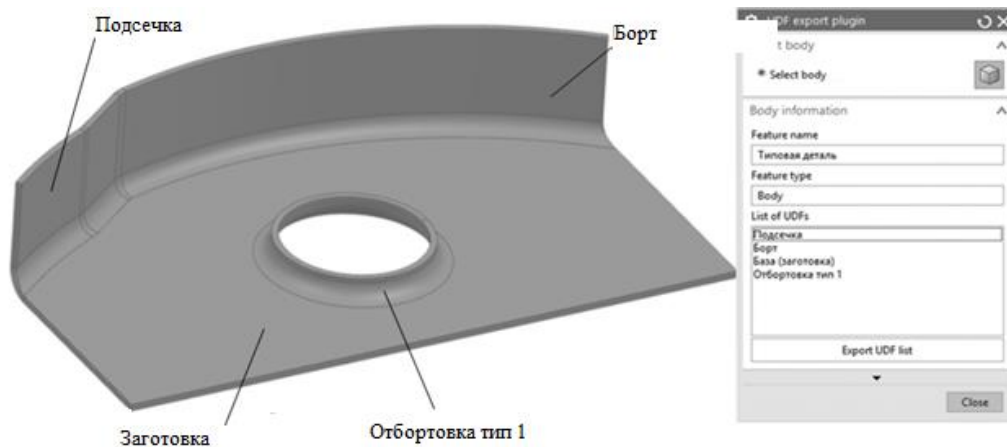


Рис. 3 – подкрепляющая стенка

Затем происходит автоматизированный поиск в существующих классификаторах и БЗ распознанного КЭ, для дальнейшей его ориентации в построении маршрута. Строится таблица с соответствием всех распознанных КЭ и вариантов его изготовления. Например – в рассматриваемая деталь имеет КЭ «отбортовка», значит перед выполнением этой операции необходимо выполнить предварительно отверстие в заготовке.

Таблица 1. Варианты выполнения операции

Наименование	Возможные ТО $j = 1 \dots n(m)$				
	1	2	...	n	m
Стенка (КЭ ₁)	ТО ₁	ТО _{j+1}	...	ТО _n	–
Отбортовка (КЭ ₂)	ТО ₁	ТО _{j+1}	...	ТО _{m-1}	ТО _m
Борт (КЭ ₃)	ТО ₁	–	–	–	–
Подсечка (КЭ ₄)	ТО ₁	ТО _{j+1}	–	–	–

Из информации указанной в таблице 1 можно сказать что данный способ применим при условии, чтобы была использована технологическая кодировка для каждого КЭ входящего в состав ТО. Для решения этого вопроса, можно использовать в своей работе кодировку «Общероссийского классификатора технологических операций машиностроения и приборостроения».

Процесс построения с концепции теории познания можно представить как распознавание объекта в пространстве из всего имеющегося множества объектов. В таком случае распознается только та часть, которая необходима для идентификации КЭ с его ТО и дальнейшим составлением маршрута.

В свою очередь любой из рассмотренных выше ТО принадлежит своя СТО, это значит что выполнение казалось бы одного и того же КЭ (например борт) может выполняться несколькими способами, на разном оборудовании. В конечном счете это отражается на технологичности конечного продукта, ввиду того, что выполнение одной операции разным способом требует разной квалификации рабочего и обладает разной трудоемкостью, а значит разной себестоимостью выполнения такого простого элемента.

Тем самым встает выбор по составу используемого оборудования и СТО, которые находятся в непосредственной связи между собой.

Таблица 2. Типовой классификатор

КЭ	ТО	СТО	Оборудование
Борт	Гибка	Вспомогательное СТО	Кузнечно-прессовое оборудование
		Шкурка	Молоты ковочно-штамповочного типа
		ШВК	Машины кривошипного типа
		ОШПН	Молоты ковочно-штамповочного типа
		Молоток текстолитовый	
		Клин	
		Обжимка	

Такой подход, позволит не просто решать задачи в пределах заданных критериев, но и генерировать множество новых решений, за пределами начальных условий, избавиться от множества «рутинных» работ по оптимизации конструктива.

В этом концепции, следует, также, обратить внимание на то, что фундаментом является применение искусственного интеллекта. Что в свою очередь приведет к повышению скорости тестируемых процессов, точности в выборе операций, росту компетенций и росту их множества.

Список использованной литературы:

1. R. Akhatov, A. Govorkov, A. Zhilyaev Software Solution Designing of «The Analysis System of Workability of Industrial Product» During the Production Startup of Aeronautical Products // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 21. С. 4256–42562.
2. Govorkov A.S. Technique of Designing of the Product of Aviation Technics with Maintenance of the Set Criteria of Adaptability to Manufacture // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies. 2011. Т. 5. № 3. С. 156–161.
3. Govorkov A.S., Zhilyaev A.S The Estimation Technique of the Airframe Design for Manufacturability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Т. 124. № 1.
4. Ахатов Р.Х., Лаврентьева М.В. Распознавание конструктивно-технологического состава изделия по его электронной модели // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 8. С. 8–14.
5. ГОСТ 2.051-2013 Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. Введ. 2014–06–01. М. : Стандартинформ, 2014. 9 с.

6. ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. Введ. 2008–08–31. М. : Стандартинформ, 2007. 11 с.
7. Гаер М.А., Яценко О.В. Электронная мастер- модель с трехмерными допустимыми отклонениями // Вестник ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 56–58.
8. Гозбенко В.Е. Изменение динамического состояния упруго-связанных систем / Гозбенко В.Е., Хоменко А.П. Деп. в ВИНТИ 23.07.2002, № 1379-В2002.
9. Ирзаев Г.Х. Исследование и моделирование информационных потоков конструкторско- технологических изменений на этапах освоения и серийного производства изделий // Организатор производства. 2012. Т. 52. № 1. С. 131–135.
10. Ирзаев Г.Х., Адамов А.П. Исследование системы обработки потоков информации об изменениях в конструкции радиоэлектронных средств на этапах освоения и производства // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 1 (33). С. 7.
11. Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. Автоматизация процесса формирования системы показателей для оценки технологичности конструкции изделия // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 11. С. 27–33.

УДК 621.785.532

Технология нанесения покрытий с аморфно-кристаллической структурой из плазмы вакуумного дугового разряда

***Е.А. Брюханов, Р.Ш. Нагимов, Э.Л. Варданян,
А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов***

Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12

Разработана технология нанесения покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al с аморфно-кристаллической структурой из плазмы вакуумного дугового разряда. Проведены рентгеноструктурные исследования. Изучены закономерности влияния режимов осаждения на содержание аморфной составляющей в покрытиях.

Ключевые слова: *аморфная структура, кристаллическость, рентгеноструктурный анализ.*

Введение:

На сегодняшний день к режущему и долбежному инструменту предъявляется очень высокие требования по прочности, точности и износостойкости. В связи с этим работы, направленные на повышение свойств и ха-

ра характеристик инструмента, являются весьма актуальными. Одним из методов повышения стойкости инструментов является ионно-плазменное нанесение покрытий [1].

На сегодняшний день существует большое количество технологий получения аморфно-кристаллической структуры: закалка из расплава; тепловое или деформационное воздействие на твердофазное аморфное состояние; импульсная фотонная и лазерная обработка; ионная имплантация и ряд других. Однако данные способы получения аморфно-кристаллической структуры сложны и многоэтапные.

Аморфное состояние металлов и сплавов является метастабильным состоянием [2], поэтому существуют термодинамические стимулы перехода его в кристаллическое состояние. Процесс перехода аморфной фазы в кристаллическую связан с преодолением энергетического барьера. Энергия активации этого процесса зависит от природы кристаллизующей фазы. Переход аморфного состояния в кристаллическое то же самое, что переход «беспорядок-порядок».

При этом кристаллическая структура определяется взаимодействиями между частицами покрытия и оказывает существенное влияние на характеристики наносимых покрытий. Увеличение силы межатомных взаимодействий чаще всего приводит к упрочнению в структуре твердых тел, снижение – к улучшению антифрикционных свойств [3,4].

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния режимов осаждения на содержание аморфной составляющей в покрытиях полученных из плазмы вакуумно-дугового разряда.

Методика проведения исследования:

Для исследования аморфно-кристаллической структуры покрытий использовались образцы из быстрорежущей стали P12Ф2К8М3-МП.

На образцы было нанесено покрытие на основе интерметаллидов системы Ti-Al в среде азота. Исследовались 16 образцов.

Схема проведения эксперимента при одновременном осаждении покрытия из двух электродуговых испарителей с однокомпонентными катодами с вращением рабочего стола вокруг своей оси при различных скоростях ($\omega=1 \dots 14$ об/мин) представлена на рисунке 1. Один образец закреплялся в центре рабочего стола и три образца крепились на различных радиусах от оси рабочего стола.

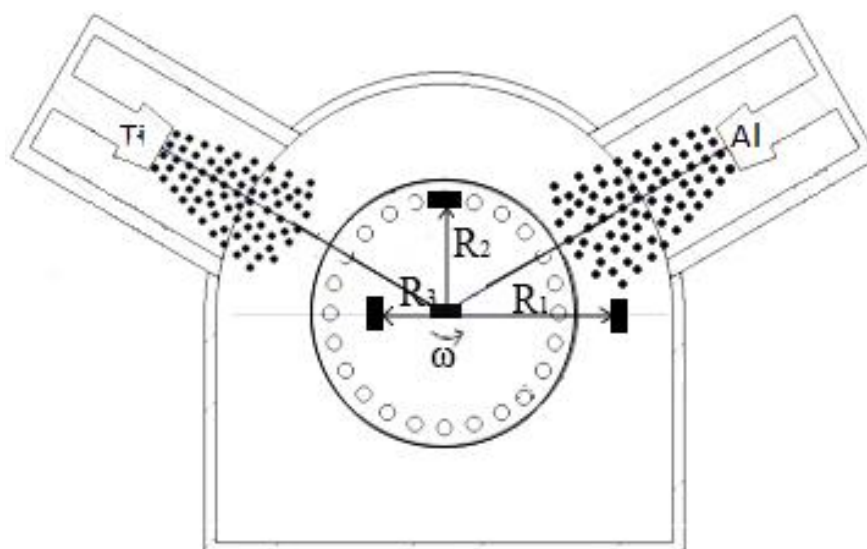


Рис. 1. Установка ННВ-6,6-И1. Схема проведения эксперимента при последовательном осаждении покрытия с вращением рабочего стола вокруг оси.

Результаты исследования и их обсуждения:

После осаждения покрытия из двух электродуговых испарителей с однокомпонентными катодами, при различных технологических параметрах нанесения, образцы были исследованы методом рентгеноструктурного анализа на установке Rigaku для определения аморфной и кристаллической структуры.

В результате были получены дифракционные картины образцов представленных на рисунке 2 и 3.

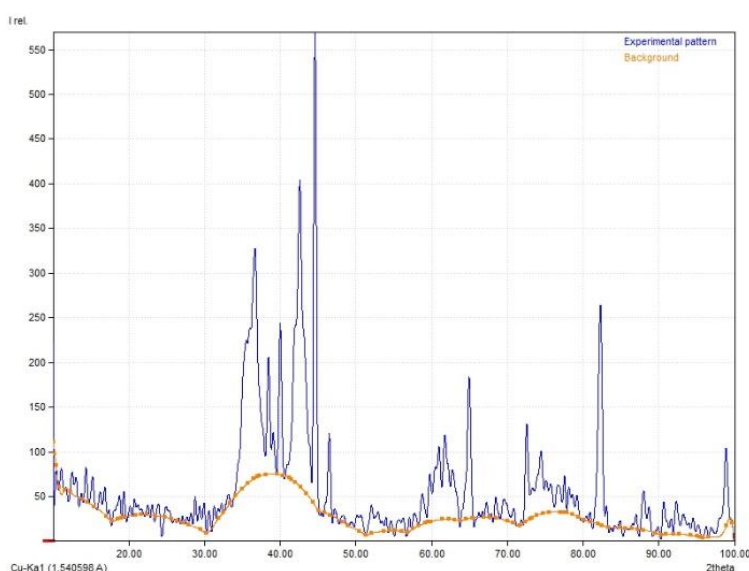


Рис. 2. Образец № 8, при $\omega = 3$ об/мин, $R=22$ см, реакционный газ - N_2

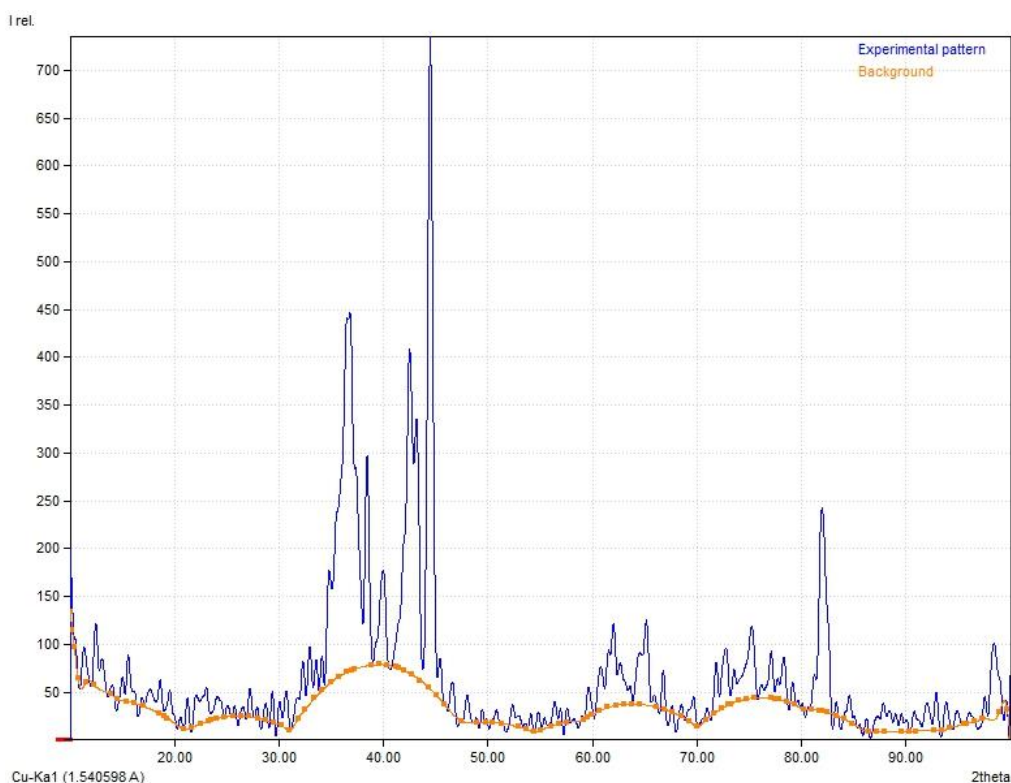


Рис. 3. Образец № 12, при $\omega = 7$ об/мин, $R=22$ см, реакционный газ - N_2

По диффрактограммам определяли площадь аморфной и кристаллической структуры покрытий, наносимых при разных режимах.

Степень кристалличности покрытия определяли по формуле 1.

$$x = \frac{S_{кр}}{S_{кр} + S_{ам}} \times 100 \quad (1)$$

Результаты расчётов степени кристалличности для газа N_2 от скорости вращения стола и расстояния от центра стола приведены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1. Степень кристалличности покрытий, осажденных из плазмы вакуумно-дугового разряда.

Скорость вращения стола ω , об/мин	Расстояние от центра стола R, см			
	0	8	15	22
1	76,94	78,39	78,08	74,16
3	72,09	73,7	73,2	70,6
7	73,2	73,3	73,2	70
14	75,5	81,9	78,3	75,4

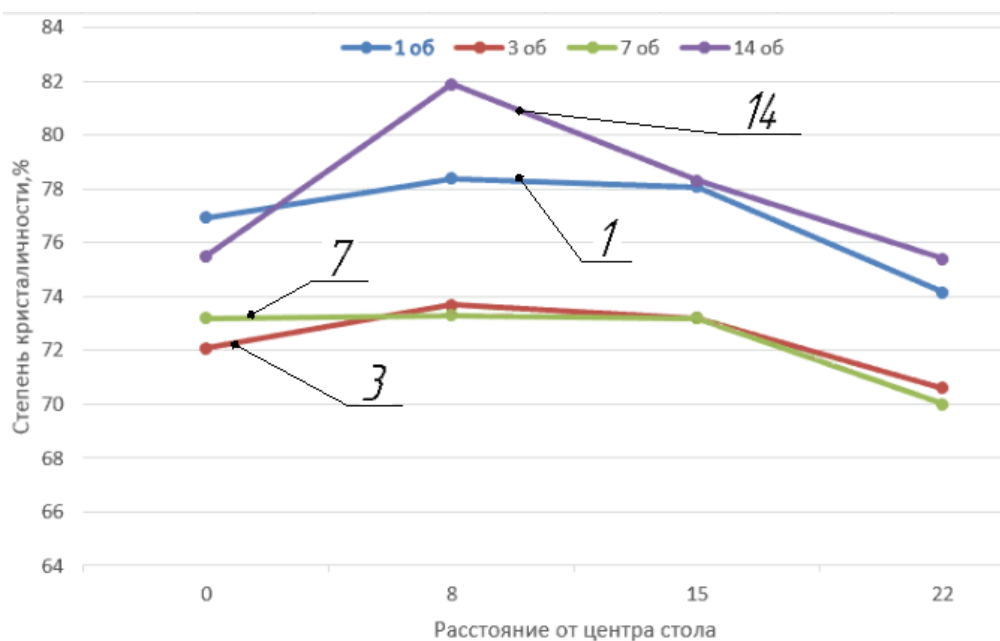


Рис. 4. Зависимость степени кристалличности структуры покрытий от угловой скорости и расстояния от центра рабочего стола

В результате вычислений, получили, что наибольшей степенью кристалличности обладает покрытие на образце №14 с параметрами: скорость вращения стола - $\omega = 14$ об/мин, радиус закрепления образца - $R=8$ см, реакционный газ - N_2 .

А наибольшее содержание аморфной составляющей у образцов под номерами 8 и 12 с параметрами:

1. Скорость вращения стола - $\omega=3$ об/мин, радиус закрепления образца - $R=22$ см, реакционный газ - N_2
2. Скорость вращения стола - $\omega=7$ об/мин, радиус закрепления образца - $R=22$ см, реакционный газ - N_2

Из результатов рентгеноструктурного анализа следует, что при увеличении расстояния от центра стола аморфная структура возрастает кристалличность нанесенного материала падает, так же видно, что в диапазоне от 3 до 7 оборотов наблюдается высокое содержание аморфной структуры.

Выводы:

Таким образом, с увеличением расстояния от центра рабочего стола в диапазоне оборотов от 3 до 7 оборотов и прочих равных условий, было получено наиболее большее процентное количество аморфной структуры.

Список использованной литературы:

1. Структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами / М.В. Ноженков, В.И. Боднарчук, Ю.М. Герасимов, А.А. Сорокко, Н.Т. Фадюкова // Тез. докл. XIII Всесоюзн. конф. по электронной микроскопии. Сумы. 1987. С. 273–275

2. Модель роста кристаллов, получаемых ионным распылением / М.В. Ноженков, А.С. Авилов, А.П. Семенов, С.А. Семилетов, Л.А. Тигра-нян, Ю.М. Товмасын // Растровая электронная микро скопия и аналитиче-ские методы твердых тел: тез.докл. IV Всесо юз.симпозиума РЭМ84. М.: ИК АН СССР, 1984, с. 200.

3. Ноженков М.В. Влияние кристаллической структуры на три ботехнические свойства MoS₂, наносимых высокочастотным распылением // Машиноведение. 1985. № 2. С. 82–86.

4. Ноженков М.В. О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41–47.

УДК 621.785.532

***Повышение износостойкости металлорежущего инструмента,
работающего при высоких нагрузках***

Р.Ш. Нагимов, Э.Л. Варданян, А.Ю. Назаров, К.Н. Рамазанов

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12

Исследовано влияние состава покрытия вакуумного ионно-плазмен-ного напыления на физико-механические характеристики металлорежу-щего инструмента. Получены результаты по рентгено-структурному анализу, адгезионной стойкости и износостойкости инструмента. Уста-новлено, что покрытия на основе интерметаллидов системы Ti-Al с леги-рованием Zr и Cr увеличивают износостойкость в 3-5 раз.

Ключевые слова: *вакуумное ионно-плазменное напыление, режущий инструмент, дуговой разряд.*

Введение:

В процессе эксплуатации инструментов для обработки деталей ма-шин, в зоне контакта происходит комплекс физических, физико-механиче-ских, акустических и других явлений, влияющих на процессы трения и из-нос металла [1]. Для улучшения триботехнических свойств необходимо провести модификацию поверхности. Наиболее эффективных методом мо-дификации поверхностных свойств инструмента является нанесение функ-циональных покрытий. В настоящее время процессы физического осажде-ния покрытий (процессы ФОП или PVD) на различные изделия получают все большее применение из-за высокой надежности, универсальности, воз-можности получения покрытий практически любой архитектуры, состава, структуры с обеспечением экологической чистоты процессов при произ-

водстве инструмента. Для разных типов обработки используются различные типы покрытий. Так, для обработки инструментов прерывистого типа (фрезы, долбяки) лучше всего использовать многослойные композиционные покрытия, так как трещины, появляющиеся на поверхности, будут продолжать расти до границы раздела слоев покрытия. Оптимальные свойства износостойких покрытий можно получить при определенном соотношении между фундаментальными характеристиками материалов покрытий. К таким характеристикам относятся:

1. Характер связи в конкретных материалах;
2. Стехиометрия;
3. Фазовые соотношения;
4. Анизотропия;
5. Характер растворимости в конкретных системах, определяющих образование в материалах покрытия и в подложке твердых растворов, интерметаллидов и т. п.

К узлам и деталям ГТД, с заявляемыми параметрами конструкции и работы предъявляются различные требования. Переход на гранулированный материал, имеющий более высокие прочностные характеристики, делает возможным увеличение ресурса деталей, снижение удельного веса двигателя [2]. Однако наряду с увеличением ресурса детали, увеличивается и трудоемкость его изготовления.

Одним из наиболее ответственных узлов является ротор низкого давления (РНД), которая состоит из турбины низкого давления (ТНД), носка и вала (ТНД) (Рис. 1).

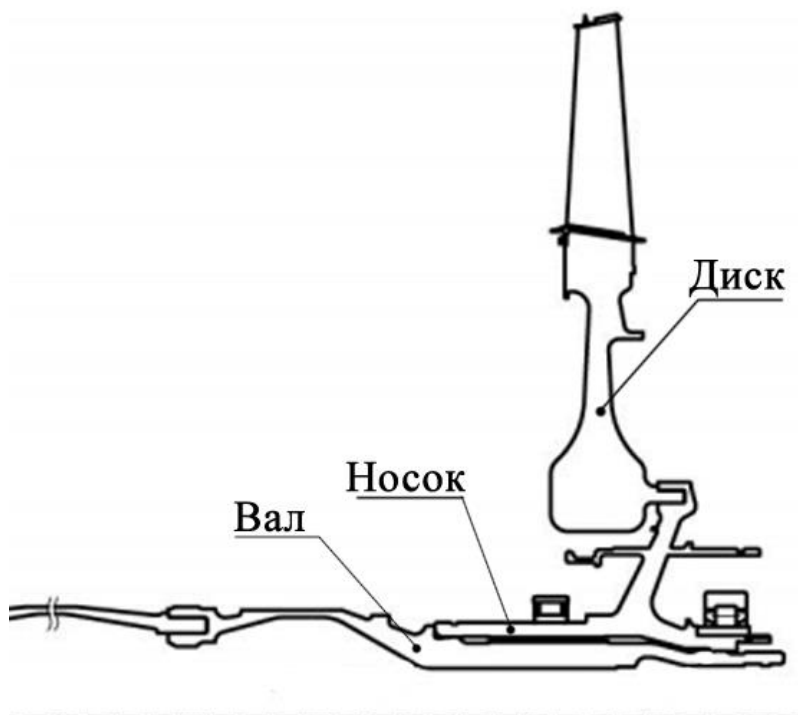


Рис. 1. Схема ротора низкого давления

В процессе работы долбяк подвергается в основном тепловому изнашиванию, образованному в результате трения задней поверхности зубьев режущего инструмента о поверхность обрабатываемой детали и трения стружки, сходящей на передней поверхности зубьев инструмента. В зависимости от времени работы инструмента его изнашивание можно разделить на три этапа (рис.2), которые соответствуют трем участкам изнашивания. С увеличением времени работы изнашивание возрастает постепенно. Начало интенсивного изнашивания зависит в основном от следующих факторов: скорость резания, материал инструмента и обрабатываемой детали и его термическая обработка [3].

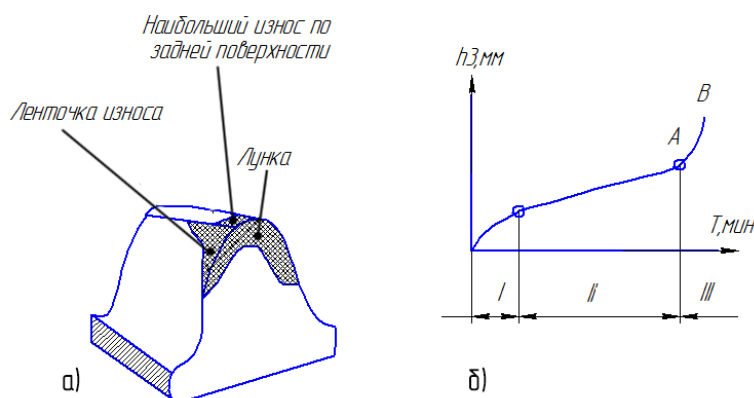


Рис. 2. Схема износа долбежного инструмента: а) характер изнашивания зуба; б) зависимость изнашивания от времени работы инструмента

Поэтому, целью работы являлось повышение износостойкости контактных площадок инструмента “долбяк”.

Из анализа факторов, влияющих на стойкость долбяка выявлено [4], что для повышения эксплуатационных свойств долбяка требуются упрочняющие покрытия, обладающие высокими ударостойкими характеристиками, повышенной износостойкостью. На основе литературного анализа работ авторов по упрочнению долбежного инструмента и проведенных экспериментальных исследований [5], была разработана технология упрочнения инструмента. В качестве упрочняющего покрытия для повышения эксплуатационных свойств инструмента предложена следующая комбинация слоев: Ti-TiAl-(TiAl)N + легирование Zr, Cr. Для исследования физико-механических свойств покрытий, в камере установили образцы на расстоянии 15 см от центра стола. Скорость вращения составляла 1 об/мин.

Методика проведения исследования:

Нанесение покрытий проводилось на модернизированной установке ННВ-6,6-И1, предназначенная для конденсации вещества из металлической плазмы и модифицирования поверхности несамостоятельным сильно-точным диффузионным, дуговым и тлеющим разрядами, оснащенной системой подачи газов, плазмогенератором с накальным катодом ”ПИНК”, а

также электродуговыми испарителями. Режимы процесса: давление в камере $P = 10^{-1} - 10^{-2}$ Па, ток дуги $I = 60-100$ А, время обработки $t = 60-75$ мин, температура $T < 500^\circ\text{C}$.

Рентгеноструктурный анализ образцов проводили на оборудовании Rigaku IV. Для анализа прочности адгезии покрытия использовалась установка CSM ScratchTest. Измерения микротвердости производились на установке EMCО-Test DuraScan 50.

Результаты исследования и их обсуждения:

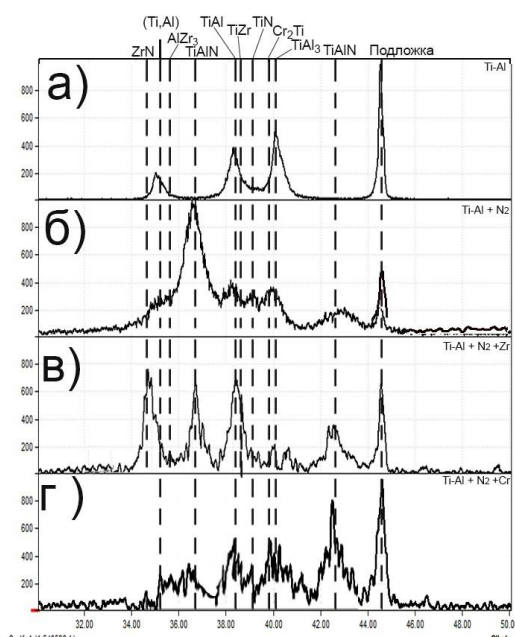


Рис. 3. Дифрактограммы образцов с покрытиями: а) Ti-Al (в среде Ar); б) Ti-Al (в среде N_2); в) Ti-Al (в среде Ar и N_2) + легирование Zr; г) Ti-Al (в среде Ar и N_2) + легирование Cr

Результаты исследований образцов с покрытиями, легированными Zr, показали, что в процессе легирования в материале покрытия формируются дополнительные интерметаллидные соединения Zr с Al (ZrAl_3), TiZr, а также нитрид ZrN. Исследование образцов с покрытиями, легированными Cr, показали, что в процессе легирования в покрытии формируются интерметаллидные соединения Cr с Ti (Cr_2Ti) и нитрид CrN. Таким образом, легирование покрытий разработанным способом позволяет формировать в покрытиях на основе интерметаллидов системы Ti-Al дополнительные интерметаллидные фазы (соединения титана и алюминия с легирующим элементом), что позволит повысить механические и эксплуатационные свойства данных покрытий.

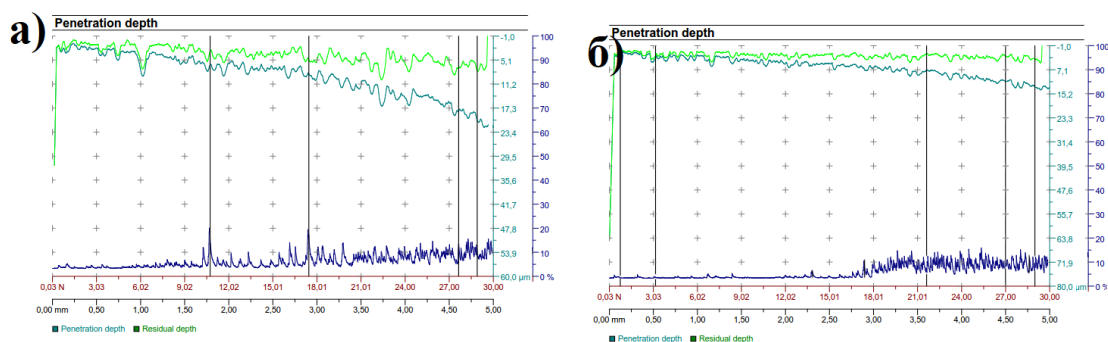


Рис. 4. Результаты регистрации глубины проникновения индентора при царапании высоколегированных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al с содержанием: а) Zr 5%; б) Cr 4%

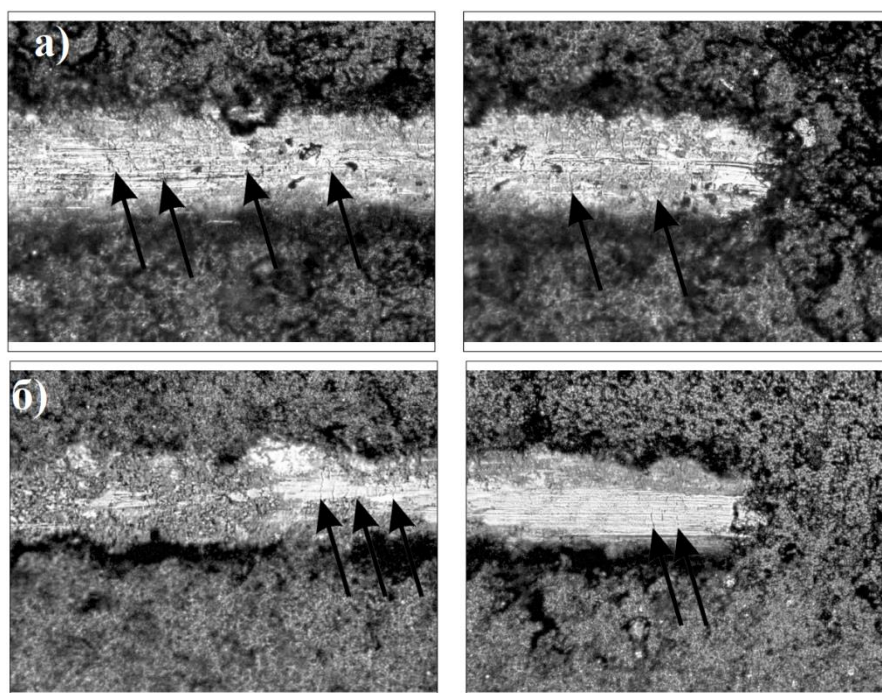


Рис. 5. Оптическая фотография дорожки царапания в области начала образования микротрещин в покрытии на основе интерметаллидов системы Ti-Al с содержанием: а) Zr 5%, б) Cr 4%

Результаты испытаний образцов с покрытиями, полученными по различным технологиям показали, что адгезионная прочность сцепления покрытия с материалом основы хорошая. С увеличением содержания Zr от 4 до 20%, критическая нагрузка начала формирования микротрещин в покрытии снижается от 24Н для (3-10)% Zr до 15Н, для покрытий с содержанием легирующего элемента 20%Zr. Таким образом, результаты исследования адгезионной прочности покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al легированных Zr или Cr показали следующее: с увеличением нагрузки на индентор до 30Н, разработанные покрытия не разрушаются и не отслаиваются, что свидетельствует о высоких прочностных и адгезионных свойствах.

Стойкость долбяка для эвольвентных шлиц определяется количеством обработанных деталей до износа инструмента. Критерием стойкости инструмента служило образование фаски износа, не превышающей 0.5 мм, Производственные испытания производилась на площадке ПАО УМПО г.Уфа на зубодолбежной машине Liebherrls380f (рис. 7) по серийной технологии.



Рис. 6. Зубодолбежная машина Liebherrls 380f

Результаты износостойкости инструмента до и после обработки приведены на рис. 7.

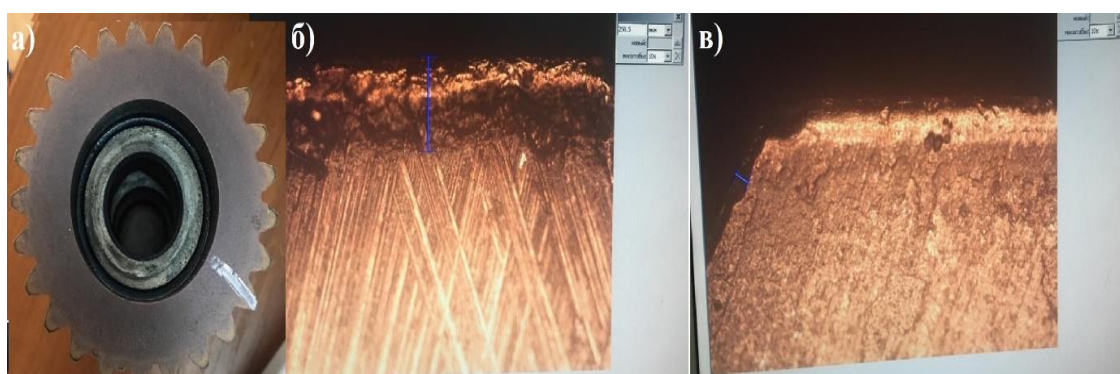


Рис. 7. Результаты на износостойкость инструмента: а) внешний вид инструмента и отметка места измерения; б) измерение до нанесения покрытия; в) измерение после нанесения

Нанесение композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al на металлорежущий инструмент «долбяк для эвольвентных шлиц» позволило обработать деталь в размер, в соответствии с требованиями чертежа, с применением одного инструмента и тем самым повысить стойкость по сравнению с нормативной в 5 раз, что позволит использовать инструмент в дальнейшем (после переточки и повторного нанесения покрытия), в отличие от исходного инструмента с катастрофическим износом (срез зубьев долбяка).

Выводы:

По результатам производственных испытаний долбяка для эвольвентных шлиц с различными композиционными покрытиями наибольшее увеличение стойкости в 3-6 раз по сравнению с инструментом, изготовленным по заводской технологии показали долбяки для эвольвентных шлиц с покрытиями на основе интерметаллидов системы Ti-Al. Ионная имплантация N не позволила набрать статистику и выявление средней стойкости долбяка для эвольвентных шлиц. Комбинированная лазерная обработка с последующим нанесением покрытия TiAlN показала стойкость ниже долбяка для эвольвентных шлиц, изготовленных по серийной технологии.

Таким образом, разработана технология повышения стойкости долбяка для эвольвентных шлиц нанесением на рабочих поверхностях многослойных наноструктурных легированных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al. Разработанный технологический процесс испытан на заводе ПАО «ОДК- УМПО».

Из полученных данных можно сделать вывод, что износостойкость инструментов увеличилась примерно в 3-5 раз при использовании многослойных композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti-Al.

Список использованной литературы:

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах. М.:Машиностроение, 2007
2. Материаловедение: Учебник для ВУЗов. Под редакцией Арзамасова Б.Н. – М.:МГТУ им.Баумана, 2008
3. L.A.Dobrzaeski, K.Lukaszowicz, A.Zarychta – Properties of the monolayer ceramic coatings deposited by PVD process, Proceeding of the 12th International Scientific Conference “Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME 2003, Gliwice-Zakopane, 2003, 233-256
4. D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperature, Wear 251 (2001) 1308-1314.
5. R. Hoy, J.D. Kamminga, G.C.A.M. Janssen, Scratch resistance of CrN coatings on nitrided steel, Surface and Coatings Technology 200 (2006) 3856-3860.

Многофункциональное технологическое оборудование на модульном принципе

В.Н. Москвитин, Е.В. Зеньков, Е.А. Иванов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

При изготовлении различных изделий самой распространенной операцией является разделение материала на готовые заготовки с размерами близкими к размерам детали. Предложена конструкция многофункционального пильного станка, основанная на модульном принципе и включающая три модуля: основания, рабочего стола с набором регулируемых направляющих для резки, шпинделя и привода. Дается описание практической ценности разработки и отличительным особенностям по сравнению с имеющимися аналогами. Приведены результаты лабораторных испытаний станка по пиленю различных материалов с фиксацией времени и скорости на обработку.

Ключевые слова: *пильный станок, модульный принцип, обработка материалов*

Актуальной задачей в настоящее время является оснащение производства технологическим оборудованием на уровне малых предприятий. Такое оборудование при обеспечении точности, надежности, приемлемой производительности должно иметь небольшую стоимость. Представленное на рынке оборудование отличается высокой стоимостью (даже производства КНР) и специализацией по технологическим процессам и обрабатываемым материалам.

Современные достижения в области управления приводами любой мощности, например, пневматические и гидравлические приводы высокого давления, позволяют создавать технологическое оборудование на модульном принципе, которое при приемлемой стоимости решает несколько задач, в первую очередь, по обработке разных материалов. Попытки создания подобного оборудования предпринимались в иркутском техническом университете еще в 90-е годы прошлого века. Данная установка имела один универсальный привод с унифицированными узлами стыковки, что позволяло быстро устанавливать сменные модули в количестве одного или двух. Разработанные модули выполняли операции по дроблению зерновых культур, обработке древесины, получению отсевов, пневматическую классификацию разных материалов [1, 2]. Достоинством данного оборудования это широкая многофункциональность при низкой стоимости оборудования, а недостатком – снижение технических характеристик ввиду отсутствия в то время эффективных регуляторов оборотов привода

В последние годы появились частотные регуляторы оборотов асинхронных двигателей, регуляторы мощности коллекторных двигателей, электронные устройства контроля перемещений и многое другое по приемлемой стоимости и высокого качества. Все это позволяет создавать новое поколение технологического оборудования на модульном принципе с высокими техническими показателями.

В 2018 году на кафедре ТОМП ИРНИТУ в рамках дипломного проекта был разработан и изготовлен многофункциональный пильный станок на модульном принципе [3]. Отличием от ранее созданной установки модульный принцип охватывает все узлы станка. Из предлагаемого набора модулей можно создавать пильные станки для обработки дерева, металла и керамики с использованием разных пильных дисков, и модулей для фрезерования и вибрационной резки. На данном станке возможно изготовление деталей подобных станков, что позволяет потребителю самостоятельно производить его ремонт и модернизацию.

На рынке электрического пильного оборудования представлен широкий ассортимент инструмента. Некоторые имеют модульный принцип, где при замене нескольких частей может получиться станок другого назначения. Для заготовительных работ с разными материалами наиболее распространены распиловочные настольные станки, которые хорошо подходят для использования в небольших цехах и домах. Сегодня рынок наполнен таким оборудованием разных фирм в основном зарубежного производства (рис. 1).

При изготовлении различных изделий самой распространенной операцией является разделение материала на готовые заготовки с размерами близкими к размерам детали. Конструкция разработанного пильного станка разбита на три основных модуля (рис. 2): модуль – основание размером 500x500x350 (см. рис. 2, поз. 1); модуль – рабочий стол размером 500x500x20 с набором регулируемых направляющих для резки (см. рис. 2, поз. 2); модуль – сменный модуль для крепления инструмента и привода (см. рис. 2, поз. 3) для его работы (пиление дисками, ленточной пилой, лобзиком и т.д.).



Рис. 1. Образцы пильных станков различного назначения

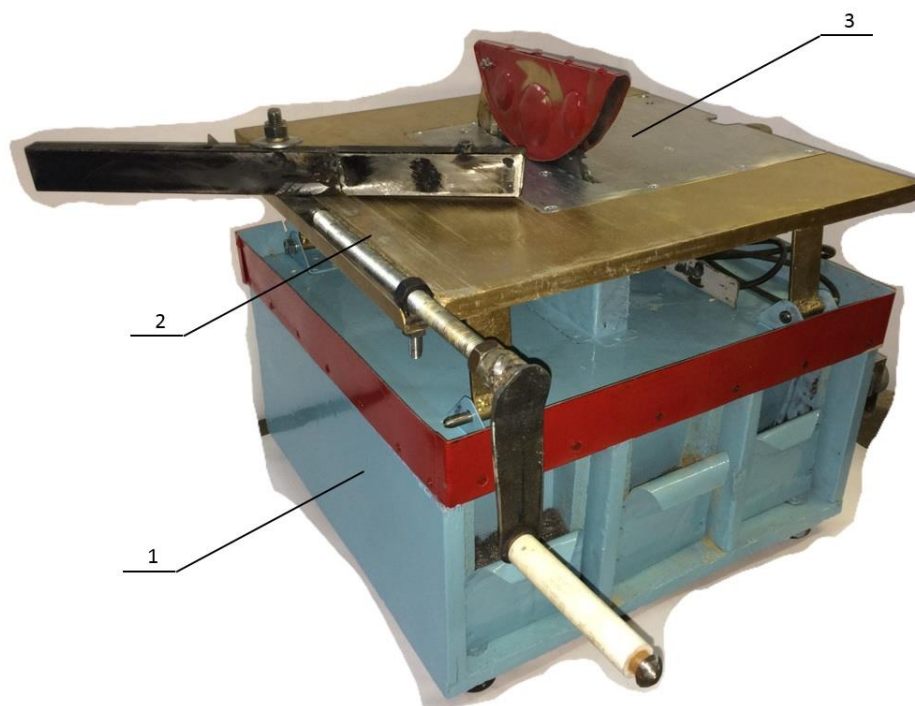


Рис. 2. Общий вид пильного станка на модульном принципе

Работа пильного станка осуществляется следующим образом. На станке выполняются работы по распиловке заготовок из древесных материалов (дерево, ДСП, ДВП и др.) и пластика, металла, включая и цветные (листовой, круглый, уголки и профили), керамической плитки. Для каждого вида материала используется свой инструмент: для дерева дисковые пилы, для металла абразивные отрезные диски, для керамики алмазные круги. Процесс пиления производится по прямым линиям с базированием по направляющей планке, которая перемещается по продольному пазу рабочего стола станка. Подача материала типа древесины и пластика производится вручную с использованием толкателя, а металлических заготовок при помощи винтового механизма с закреплением его на направляющей планке.

Работоспособность заявляемого изобретения обеспечивается проведенными лабораторными испытаниями. Испытания проводились с установленной электродрелью мощностью $N=650$ Вт и частотой вращения $n=2900$ об/мин, с ручной постоянной подачей. Принимался следующий пильный инструмент для пиления соответствующих материалов: пильный диск с твердосплавными напайками диаметром 190 мм, абразивный диск диаметром 180 мм и толщиной 2,5 мм, диск с алмазным напылением 140 мм и толщиной 1,6 мм. Материалом для испытания выбраны: доска сосновая толщиной 40 и плита ДСП толщиной 17 мм, труба из Ст3 квадратного сечения и размером стороны 25 мм и толщиной стенки 1,5 мм, уголок из Ст3 с высотой полки 40x40 мм и толщиной 4 мм, лист из Д16Т толщиной 4 мм и длиной 115 мм, пластина из стали 65Г толщиной 7 мм и длиной 55 мм, кафельная плитка толщиной 7 мм и длиной 96 мм. Время и скорость обработки различных материалов сведены в таблице.

Таблица 1. – Время и скорость на обработки различных материала на заявляемом станке

Материал	Время или скорость
Доска сосна, 40 мм	30 см/мин
Плита ДСП, 17 мм	50 см/мин
Ст3, □25x25	50 с.
Ст3, L 40x40	2 мин. 24с.
Д16Г, лист 115x4	1 мин. 24 с.
Сталь 65Г, пластина 55x7	5 мин.
Кафельная плитка, 96x7	35 сек.

Отличительной особенностью разработанного станка по сравнению с имеющимися аналогами, например, [4], является возможность пиления разных материалов путем замены на соответствующий пильный инструмент с его точной установкой посредством двух кронштейнов с клеммным зажимом, а также наличие ящичков с возможностью выдвигания и снятия для сбора отходов пиления и улавливания пыли.

В результате проведенных испытаний можно дать следующий рекомендации по улучшению качества обработки и уменьшению времени:

- для увеличения производительности при пилении металла желательно установить электродрель с более мощным мотором, а именно 1000 Вт;

- для увеличения производительности и уменьшению нагрузки на электропривод при пилении металл применять диск меньшей толщины;

- при пилении кафельной плитки и камня использовать подачу воды, дабы избежать чрезмерного запыления рабочего помещения.

В заключении необходимо сказать, что создание технологического оборудования на модульном принципе является основным направлением развития в плане оснащения малых и средних предприятий разных отраслей производства основными средствами. Использование разработанного оборудования позволяет расширить технологические возможности модульных пильных станков при пиления разных материалов, создать многофункциональные, мобильные и простые по конструкции пильные станки, нашедшие свое применение и спрос как в индивидуальном хозяйстве, так и в промышленности.

Список использованной литература:

1. Кириченко И.Г., Севрюгина Н.С. Сервисная технологичность и компоновка дорожных машин по модульному принципу / Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. № 63. С. 18-21.

2. Зеньков Е.В., Леонович Д.С. Разработка конструкции 3D принтера на модульном принципе / Сборник статей Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 320. с. 214-217.

3. Ерофеев Я.П., Бобков А.В. О модульном принципе конструирования авиакосмической техники / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 96-98.
4. Бусырева К.В., Шаихов Р.Ф., Шиляев С.А. Разработка организационно-технологической схемы сборки машины, основанной на модульном принципе построения с использованием методики трёхмерного моделирования / Труды XVIII Международной молодёжной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2018)». – Москва: Изд-во Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018. – 400. с. 218-220.
5. Базров Б.М. Организация машиностроительного производства на принципах модульной технологии / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 6. С. 67-78.
6. Журавлев Д.А., Захаров В.А., Москвитин В.Н. Многофункциональный агрегат для приготовления кормов / Патент на изобретение РФ №2077833. – Оpubл. 27.04.1997.
7. Журавлев Д.А., Захаров В.А., Москвитин В.Н. Многофункциональный агрегат для приготовления кормов / Патент на изобретение РФ №2190336. – Оpubл. 10.04.2002.
8. Москвитин В.Н., Зеньков Е.В., Катоманов В.А. Модульный многофункциональный пильный станок / Заявка на изобретение РФ №2018139458. – Оpubл. 09.11.2018.
9. Выбираем циркулярный станок по дереву: типы конструкции. Режим доступа: <http://legkoe-delo.ru/remont-doma/dom-dacha/9973-vybiraem-tsirkulyarnyj-standok-po-derevu-tipy-konstruktsii> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
10. Деревообрабатывающее оборудование Belmash. Режим доступа: <https://belmash.ru/products/stanki-derevoobrabatyvayushchie> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
11. Станки распиловочные (циркулярные) ЗУБР. Режим доступа: <https://zubr.ru/mekhanizirovannye-instrumenty/stanki/stanki-raspilovochnye-tsirkulyarnye> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
12. Циркулярные станки (распиловочные) Makita. . Режим доступа: <https://makita.vseinstrumenti.ru/stanki/tsirkulyarnye> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
13. Настольная дисковая пила Bosch GTS. Режим доступа: <https://bosch.vseinstrumenti.ru/stanki/tsirkulyarnye/nastolnaya-diskovaya-pila-bosch-gts-10-xc-professional-0601b30400> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
14. Циркулярная пила Metabo ТКНС 315 М 3100. Режим доступа: <https://metabo.vseinstrumenti.ru/stanki/tsirkulyarnye/tkhs-315-m-3100-w-0103153100> - свободный. – Дата обращения 01.05.2019.
15. Соколов С.А. Пильный станок / Описание полезной модели к патенту №54554 U1. – Оpubл. 10.07.2006.

***Анализ эффективности технологической подготовки операции
фрезерования кромок на ртк***

С.Ю. Фалеев, А.С. Беломестных

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Приведены результаты исследования влияния калибровки инструмента на точность позиционирования РТК, выявлено влияние направления осей инструмента при обработке с использованием силомоментного очувствления. Предложена улучшенная методика настройки РТК.

Ключевые слова: *промышленный робот, операция фрезерования кромок, силомоментный датчик, калибровка инструмента, позиционирование робота.*

Обработка кромок деталей является обязательной в современном авиастроении, в настоящее время операция выполняется вручную, и, как следствие, характеризуется низкой производительностью и качеством. В целях повышения эффективности процесса на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств синтезирован робототехнический комплекс на базе промышленного робота РТК KUKA KR210 R2700 extra (рис. 1), задачей которого является обработка кромок сложнопрофильных деталей [1], [3], [8].



Рис. 1. РТК на базе KUKA KR210 R2700 extra

Важнейшими целевыми характеристиками обработки являются шероховатость и размер фаски. Размер фаски достаточно мал (0.1-0.4 мм), и чтобы добиться требуемых точности обработки и качества поверхности необходимо разработать эффективную управляющую программу для РТК, установить рациональные режимы обработки и произвести точную настройку комплекса [9]. Нарушение технологического регламента процесса приводит к появлению зарезов, вибраций при обработке, выходу размеров за пределы технологического допуска [1], [11].

В лаборатории промышленной робототехники для разработки управляющей программы используются САМ системы: MasterCAM, PowerMill, SprutCAM. Использование данных систем упрощает создание управляющих программ, сокращает цикл технологической подготовки операции и снижает вероятность брака при обработке деталей.

В программе PowerMill присутствует конфигурация Delcam Robot Interface, где можно выбрать соответствующий РТК, задать конфигурацию и положение робота при создании управляющей программы.

Существенным недостатком данной САМ системы является невозможность установления требуемых направлений осей инструмента и, как следствие, необходимость создания нескольких подпрограмм включения и отключения силомоментного датчика с различными настройками. Данная особенность значительно усложняет написание программы и увеличивает вероятность зарезов [7].

Для оценки характера изменения направлений осей инструмента в процессе обработки выполнено экспериментальное исследование. Траектория была разбита на шесть фрагментов. На каждом участке с помощью встроенного приложения «RSI monitor» были установлены направления осей инструмента в режиме TTS. TTS – это мобильная система координат, которая вычисляется для каждой точки траектории робота. Результаты моделирования обработки в режиме TTS представлены на рис. 3.

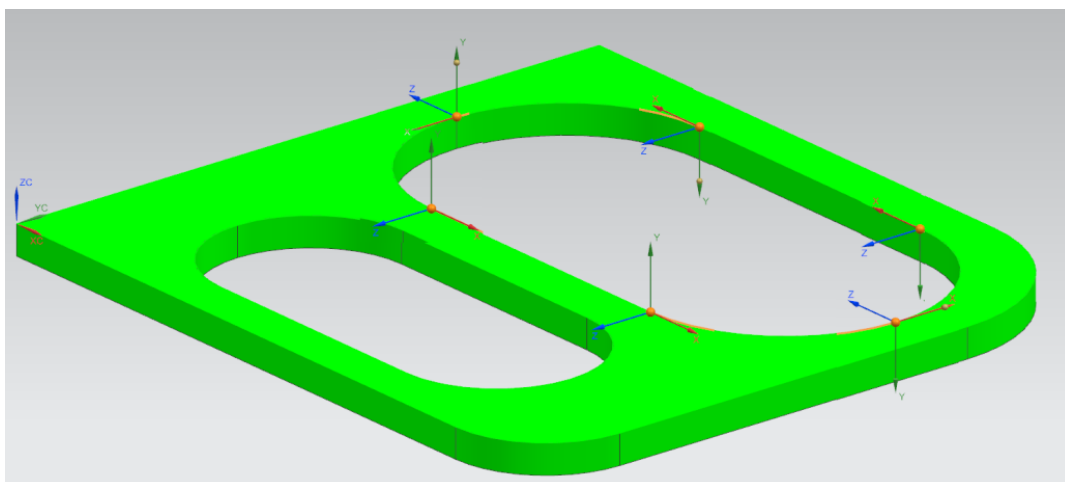


Рис. 3. Направление осей в режиме TTS

Как видно, основной является ось X, и вокруг нее происходит вращение осей Z и Y при перемещении инструмента.

Полученная траектория была воспроизведена с подключением силомоментного очувствления и записаны диаграммы сил вдоль траектории (рис. 4).

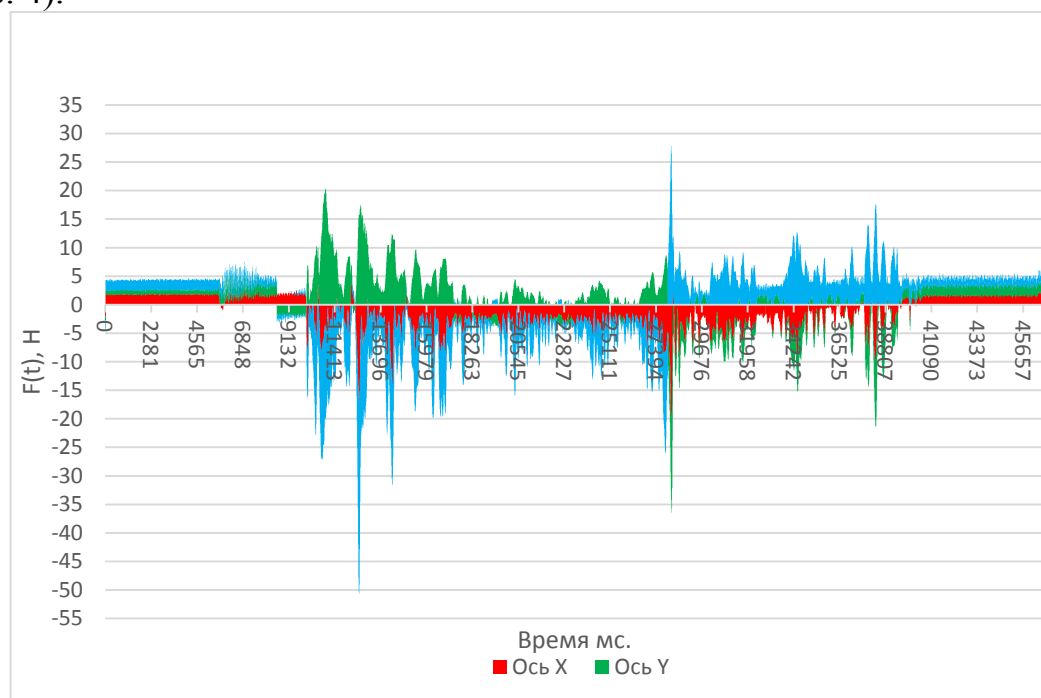


Рис. 4. Диаграмма сил при синтезе программы в PowerMill

Из графических зависимостей следует, что при повороте траектории инструмента на 90 градусов, вектора сил меняют свой знак на противоположный. Это обуславливает необходимость дробления программы на фрагменты с различными настройками датчика. При этом не гарантируется требуемое качество обработки, так как в момент изменения положения вектора сил может произойти зарез или отход инструмента от кромки детали. Еще одним недостатком является низкая скорость обработки детали не более 10 мм/с. Таким образом, применение данной САМ- системы при обработке сложнопрофильных деталей является нежелательным.

Программное обеспечение SprutCAM robot имеет ряд удобных функций, таких как редактирование САД- модели детали, построение карты осей робота при расчете траектории, возможность изменения направление осей инструмента. Последняя функция является основным преимуществом данной программы [7].

Как и в предыдущем эксперименте, траектория была разбита на шесть фрагментов, и в каждой позиции оценивались направления сил (рис. 5). Начальное направление осей инструмента имело вид: ось X – вниз, Y – направлена к основанию робота, Z – по касательной к траектории движения робота. Согласно представленной модели в режиме TTS видно, что ось X также осталась главной, вокруг нее происходит вращение осей Y и Z вдоль траектории, но, в отличии от предыдущей настройки, ось Y всегда

перпендикулярна к траектории, а ось Z всегда перпендикулярна к плоскости XOY.

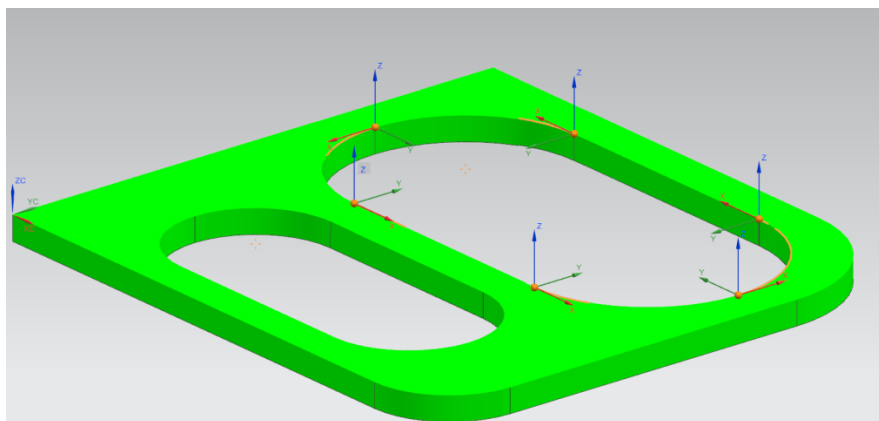


Рис.5 – Направление осей инструмента в режиме TTS

На рис. 6 представлена силовая диаграмма обработки при указанной выше настройке. Ось Y является осью приложения нормальной составляющей сил резания на протяжении всей траектории в режиме TTS.

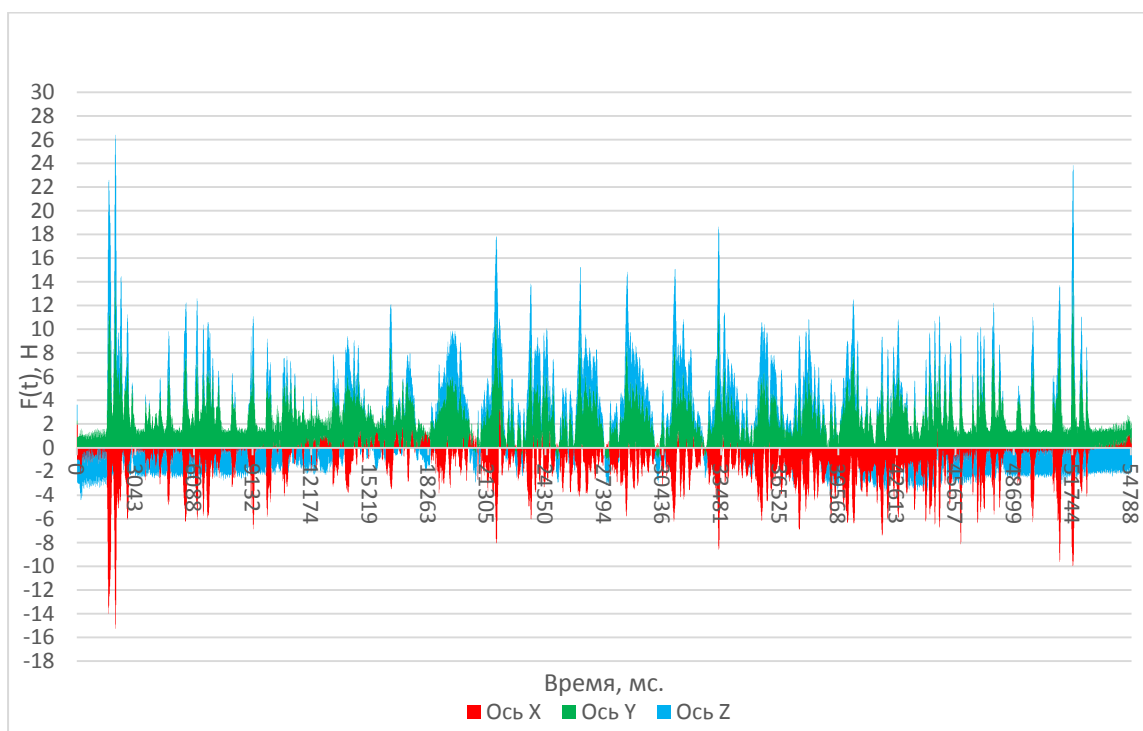


Рис. 6. Диаграмма сил при синтезе программы в SprutCAM

Проанализировав данную диаграмму, можно сделать заключение, что направление оси Y не изменяется на протяжении всей траектории обработки. В этом случае программу обработки не нужно фрагментировать, что существенно упрощает написание управляющей программы.

Из полученных данных можно сформулировать правило расчета направления осей в режиме TTS: ось X является касательной к траектории,

ось Y рассчитывается как вектор нормали к плоскости $X_{TTS}O X_{TOOL}$, ось Z-вектор нормали к плоскости XOY в режиме TTS.

Методика калибровки для работы с силомоментным датчиком должна быть следующей: ось X инструмента должна быть обязательно направлена вдоль инструмента, оси Y и Z могут находиться в произвольном направлении [12].

Важнейшим этапом подготовительных работ является качественная настройка РТК. В нее входит ТО комплекса перед запуском, проведение юстировки осей робота, калибровка инструмента и калибровка базы детали.

Калибровка инструмента играет важную роль при обработке, от нее зависит точность позиционирования робота, точность калибруемой базы и настройки силомоментного датчика.

Экспериментальное исследование включало в себя калибровку инструмента (твердосплавная коническая фреза диаметром 12 мм) с различной точностью и дальнейшим анализом точности позиционирования робота относительно детали (таблица 1).

Таблица 1. Калибровочная таблица

Значения координат X,Y,Z после калибровки, мм	Ошибка калибровки, мм
X=242.549, Y=1.098, Z=184.626	0.318
X=242.490, Y=1.510, Z=185.461	0.601
X=242.234, Y=1.449, Z=185.424	0.838
X=242.554, Y=1.425, Z=185.096	1.080

По результатам исследований синтезированы диаграммы, наглядно демонстрирующие изменения позиции робота в зависимости от погрешности калибровки инструмента (рис. 8, 9).

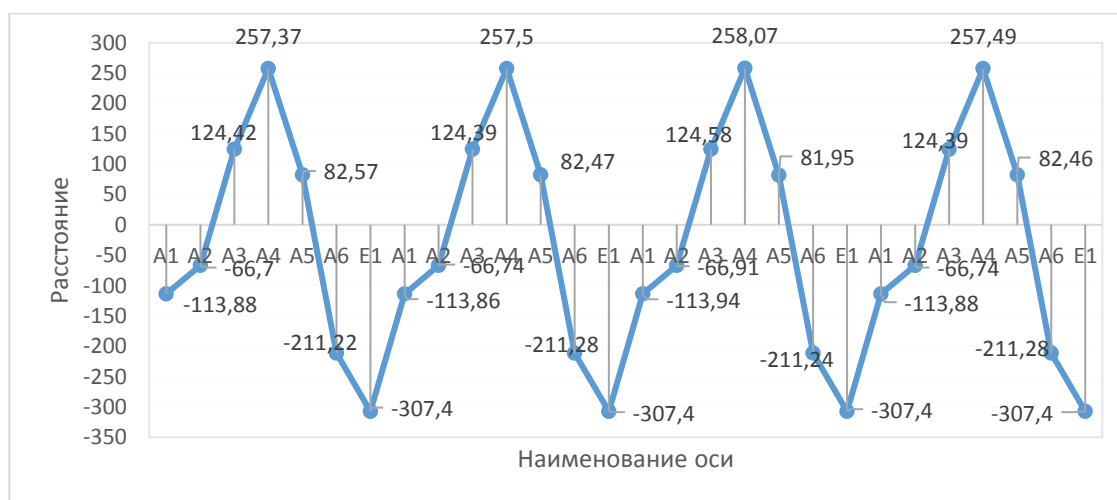


Рис. 8 – Изменения позиции робота в осях А, Е при различной калибровке

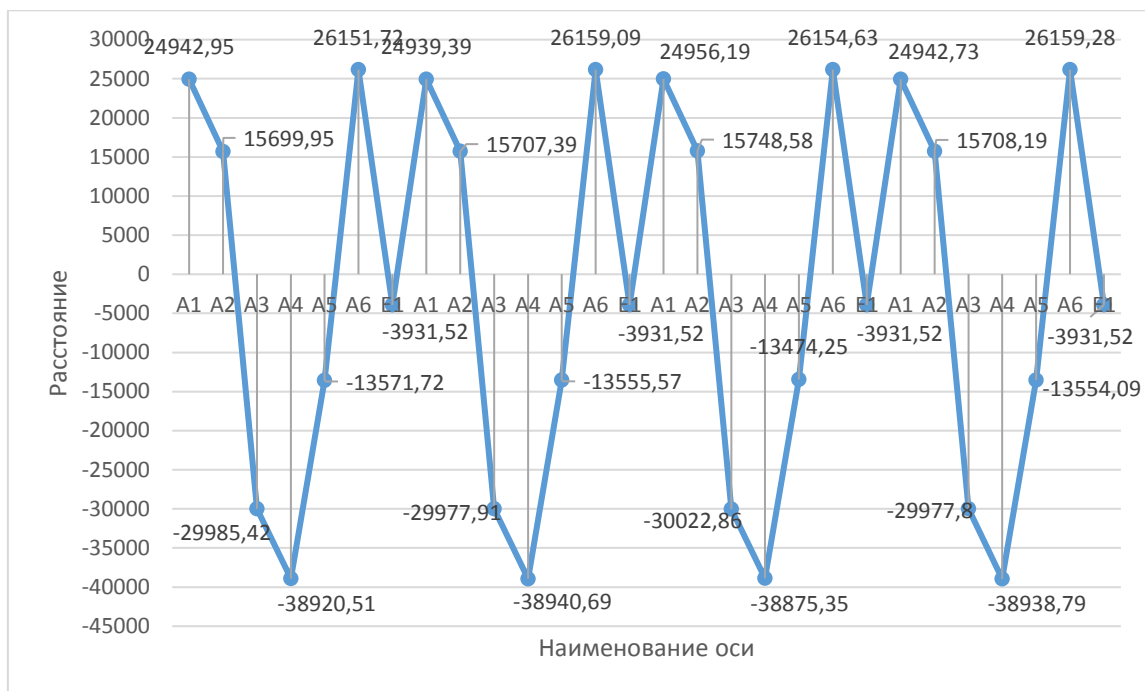


Рис. 9 – Изменения углов поворота двигателей робота (градусы) в осях А, Е при различной калибровке

В результате выполненных процедур итоговая погрешность позиционирования по осям при ошибке калибровки в 0.308 и 1.080 составляет 0,36 мм. Данная погрешность является недопустимой с точки зрения обеспечения требуемой точности обработки. Кроме этого, на данную погрешность накладываются ошибки калибровки базы детали и отклонения формы детали относительно САД - модели. Совокупность всех этих факторов приводит к зарезам, недообработке, выходу размеров за пределы технологического допуска.

Таким образом, важнейшим критерием эффективности настройки РТК является точная и корректная калибровка инструмента. От качества калибровки осей робота зависит корректность работы силомоментного датчика. Кроме того, неверно откалиброванные оси значительно усложняют написание управляющей программы.

Список использованных источников:

1. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей. Иванова А.В., Пономарев Б.Б., Савилов А.В., Чапышев А.П. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 49-53.
2. Исследование частотных характеристик робота KUKA KR210 R2700 Extra. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 252-257.

3. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота Kuka KR210 R2700 extra / Семенов Е.Н. [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2015 № 12. с. 86 – 95.

4. Савилов А.В. Современные технологии механообработки и формообразования авиационных деталей. В сборнике: Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах. 2016. С. 494-499.

5. Стуров А.А., Чашин Н.С. Определение зависимости качества обработанной поверхности от используемых режимов резания при фрезеровании кромок на углепластике с помощью промышленного робота КУКА KR210 R2700 Extra. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 281-285.

6. Бакшеева Е.Н., Костин П.Н., Беломестных А.С. Ревизия алгоритма и программного обеспечения для технологической подготовки финишной обработки авиационных деталей на робототехническом комплексе. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 8-12.

7. Савилов А.В. Разработка управляющих программ РТК при помощи CAD/CAM систем //В сборнике: Экстремальная робототехника. Материалы VIII Научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 54-55.

8. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E., Ponomarev V.B. International Journal of Engineering and Technology. 2015. Т. 7. № 5. С. 1774-1780.

9. Беломестных А.С., Иванова А.В., Чапышев А.П. Исследование влияния коэффициента усиления в канале управления скоростью движения робота на технологические свойства робототехнического комплекса механической обработки кромок деталей.

10. Кольцов В.П., Ружников Д.А, Беломестных А.С. Активный контроль технологических операций при виброабразивной обработке. Тез. докл. российской научно- технической конференции “Научное машиностроение и приборостроение”. Рыбинск: РАТИ, 1994. с. 18-20.

11. E.N. Semyonov, A.V. Sidorova, A.E. Pashkov, A.S. Belomestnykh. Accuracy Assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial Robot. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol 16 No 1, p. 19-25.

12. Воротников С.А., Солдатов А.В. Интеллектуальный силомоментный датчик для задач промышленной и экстремальной робототехники. М.: Изд-во ИПУРАН, 2012. С. 70–77.

13. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зави-

симостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента //Вестник ИрГТУ. 2015. № 1 (96). С. 32–41.

14. Вепрев А.А., Пашков А.Е., Тараканова Ю.С., Малащенко А.Ю., Лихачев А.А. Автоматизация производства длинномерных панелей и обшивок на Иркутском авиационном заводе. Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 53-56.

УДК 006.91

Автоматизированная система валидации измерительных комплексов для машиностроительных предприятий

М.Б. Сольский, А.С. Беломестных

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Рассматриваются вопросы обеспечения измерительных комплексов автоматизированной системой учета их поверок и контроля соблюдения поверительной дисциплины. Затрагиваются основные аспекты решения этой задачи: технические, информационные, нормативно-правовые.

Ключевые слова: *Измерительный комплекс, поверка приборов, автоматизация протоколирования поверок, обработка данных.*

На машиностроительных и авиастроительных предприятиях задействовано большое количество разнообразных средств измерений. Измеряются физические, химические, электромагнитные и иные свойства материалов, изделий, среды [3].

Технологическое оборудование, а также вспомогательное оборудование (транспортные, складские, климатические комплексы), как правило, находятся «под наблюдением» автоматизированных систем. Эти системы контролируют объем и периодичность обслуживания, обеспечение необходимыми запасными частями и расходными материалами [2].

В то же время сфера управления жизненным циклом средств измерений практически отсутствует. На уровневеряющих организаций существует общая система (АИС «Метрконтроль»), но данные в неё заносятся вручную и не доступны для пользователя средств измерений [9].

Проводят поверки специализированные учреждения системы Росстандарта РФ. Как правило, это Центры стандартизации и метрологии. Но ониверяют «серийные» средства измерений. А поверки уникальных средств измерения (СИ) проводят другие учреждения Росстандарта РФ [3].

В частности, поверки средств измерений влажности некоторых типов газов проводит только Восточно-Сибирский филиал ВНИИФТРИ. Филиал находится в г. Иркутске и является хранителем первичного эталона влажности газов нескольких видов. Эталон имеет государственный номер ГЭТ 151-2010 [1]. ГЭТ 151-2010 - единственный в России и СНГ.

В рамках научно-технического сотрудничества между ВС филиалом ВНИИФТРИ и ИРНТУ был проведен анализ технологии поверок СИ влажности газов и процесса оформления результатов поверки [8]. Собственно технология поверок только начинает формироваться. Первичный эталон влажности газов находится в опытной эксплуатации. Поэтому большая часть операций обработки данных при поверочных работах выполняется вручную.

Технология поверки приборов следующая. Поверяемый прибор заказчика поступает на склад филиала. В порядке очередности прибор со склада попадает в специальную лабораторию. Там его подключают к криогенной газовой сети, связывающей прибор и первичный эталон через гигрометр компаратор, и проводят длительную процедуру охлаждения двух приборов и сличения определенных параметров. Поверка длится от 6 часов до нескольких суток.

Если контрольные испытания прошли успешно, поверка считается законченной, и метролог-поверитель выписывает итоговое заключение. Это бумажный документ, который вместе с прибором возвращается заказчику. Одновременно данные с этого документа вручную заносятся в АИС «Метрконтроль». Следует отметить, что и сам ход поверки выборочно протоколируется в журнале на бумажном носителе. Такой «ручной» способ оформления поверки не дает заказчику возможности убедиться в корректности проведения процедур поверки. Её достоверность подтверждается только репутацией поверителя. Но, как показывает практический опыт, доверия на уровне репутации уже недостаточно [11].

Совместно с ВС филиалом ВНИИФТРИ нами была разработана система автоматизации протоколирования поверок СИ влажности газов. В её основе лежит метод компьютерного мониторинга за ходом поверки и записи результатов в публичную базу данных.

По предлагаемой модифицированной технологии поверяемый прибор и прибор-компаратор подключаются дополнительно к компьютеру метролога-поверителя через интерфейсы RS 485 (рис. 1).

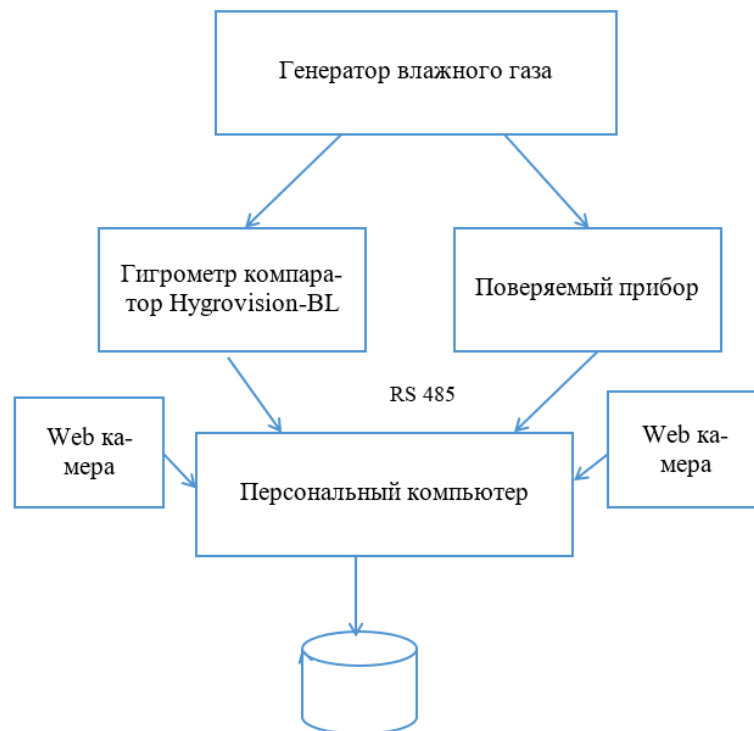


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного комплекса протоколирования поверок

На компьютере поверителя установлена специальная программа, в которую заложен график сличения наблюдаемых параметров (массив контрольных точек). Программа осуществляет постоянный мониторинг за параметрами приборов и при достижении контрольных точек графика автоматически записывает наблюдаемые параметры и результаты сличения в специальный файл. Данные шифруются установленным комплектом КРИПТО. Кроме технических параметров поверки в файл пишется видео протокол с двух камер наблюдения, установленных в лаборатории и направленных с разных ракурсов на рабочее место поверителя (рис.2).

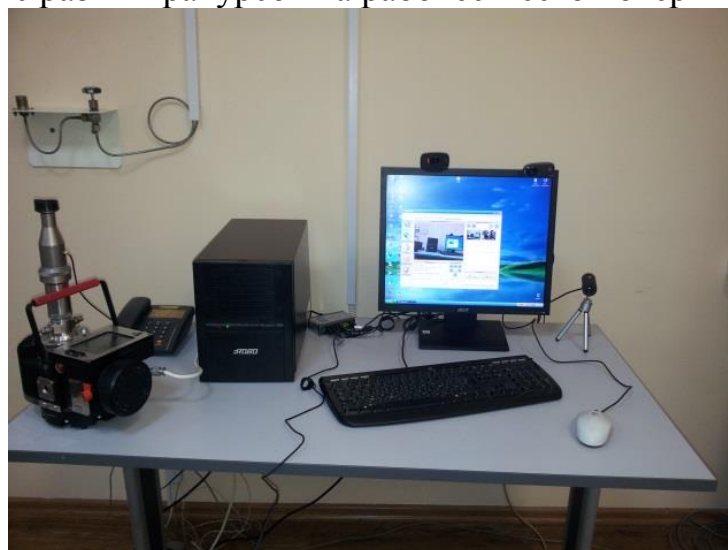


Рис. 2. Комплект технических средств для проведения поверки

После окончания поверки файл с комплексным протоколом автоматически переносится в базу данных поверителя. Это самая важная часть системы. Отличительной особенностью базы данных является наличие средств разделенного регламентного доступа заказчиков к протоколам поверки их приборов. Эта особенность обеспечивает заказчику возможность лично удостовериться в качестве поверки и обоснованности выписанного свидетельства.

База данных содержит следующие разделы:

- Производители (описания, контакты, параметры служб технической поддержки);
- Приборы (описания, технические параметры, описания протоколов коммуникации с компьютерами, драйверы);
- Пользователи приборов;
- Поверители;
- Графики поверки приборов;
- Объединенные протоколы поверок;
- Итоговые документы;
- Регламенты доступов;
- Протоколы доступов к результатам поверок.

В СУБД входит комплекс средств защиты данных, удаленный доступ, кроссплатформенный доступ. Для клиентов предусмотрен «личный кабинет», для администратора – полный доступ, для проверяющего аудитора – выборочный доступ к протоколам.

В настоящее время система работает в локальном режиме. В базе данных находятся только поверки клиентов ВС филиала ВНИИФТРИ.

Но даже в таком локальном варианте проявляются следующие преимущества (по сравнению с предшествующей, ручной технологией):

- Уменьшено влияние человеческого фактора на формирование результатов поверок и их протоколирование;
- Значительно повышена производительность поверителя (теперь он освобожден от рутинных операций мониторинга и записи протоколов и может одновременно поверять несколько приборов);
- Улучшена работа с клиентами (база данных – это основа технологии CRM);
- Созданы предпосылки регулярности поверок и их обеспечения необходимым уровнем доверия к пользователям СИ [8].

Эффективность системы может быть усилена, если распространить базу на всю отрасль. Для этого необходимо осуществлять регистрацию приборов в едином электронном реестре, регистрацию клиентами своих средств измерений, также требуется внести дополнения в методики поверок в части электронной фиксации результатов и протоколов.

В последнее время наблюдается рост заказчиков ВС филиала ВНИИФТРИ на поверки приборов, измеряющих влажность газов. Сегодня

в филиал приходят приборы со всей России от Калининграда до Сахалина. Кроме российских появились иностранные заказчики из стран ближнего и дальнего зарубежья. Англия, Германия, Швеция – это уже постоянные заказчики поверок [10].

Появилась очередь заказов. Временами длина очереди достигает нескольких десятков приборов. Очередь – это всегда увеличение срока выполнения услуги поверки. От потери заказчика филиал спасает только монопольное владение первичным эталоном. Но увеличение срока выполнения услуги снижает привлекательность филиала как надежного партнера. Внедрение новой технологии позволит решить эту проблему.

Список использованных источников:

1. Госреестр средств измерений <http://www.rostest.ru/GosreestrSI.php> [Электронный ресурс]
2. Зыонг Ван Л., Кольцов В.П., Ле Чи В., Стародубцева Д.А. Мощность привода как параметр управления процессом зачистки поверхности лепестковым кругом. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3 (134). С. 35-43.
3. Димов Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация (ПРАКТИКУМ): Учеб. пособие. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. - 274с.
4. Исследование частотных характеристик робота KUKA KR210 R2700 Extra. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 252-257.
5. Исследование влияния коэффициента усиления в канале управления скоростью движения робота на технологические свойства робототехнического комплекса механической обработки кромок деталей / Беломестных А.С. [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2015 № 7. С. 39 – 46.
6. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота Kuka KR210 R2700 extra / Семенов Е.Н. [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2015 № 12. с. 86 – 95.
7. E.N. Semyonov, A.V. Sidorova, A.E. Pashkov, A.S. Belomestnykh. Accuracy Assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial Robot. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol 16 No 1, p. 19-25.
8. Сольский М.Б. Автоматизация поверки средств измерений с удаленным доступом. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». Иркутск: ИРНИТУ, 2018, с. 43-47.
9. АИС «Метрконтроль» <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1360005> [Электронный ресурс].
10. Savilov A.V., Svinin V.M., Timofeev S.A. Investigation of output parameters of titanium revers. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series Ser. "International Conference Information Technologies in Business and Industry 2011. Enterprise Information Systems" 2018. С. 042055.

11. Бакшеева Е.Н., Костин П.Н., Беломестных А.С. Ревизия алгоритма и программного обеспечения для технологической подготовки финишной обработки авиационных деталей на робототехническом комплексе. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 8-12.

12. Савилов А.В. Комплексный анализ выходных параметров при точении авиационных материалов. В сборнике: Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2018. С. 55-61.

13. Свинин В.М., Савилов А.В., Шутенков А.В., Панин М.А. Подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12 (143). С. 115-124.

14. Кольцов В.П., Ле Чи В., Стародубцева Д.А. Математическая модель формирования среднеарифметического отклонения профиля поверхности при дробеударной обработке. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 26-33.

15. Беломестных А.С. Информационно-измерительный комплекс. Материалы международной научной конференции «Повышение эффективности познавательной деятельности обучающихся». Иркутск: ИрГТУ, 1995, с. 21-24.

УДК 681.5

Система дистанционного мониторинга и управления промышленным роботом kuka kr210 r2700

В.А. Фоломеев, А.С. Беломестных

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье представлена система дистанционного мониторинга и управления промышленным роботом KUKA KR210 R2700, приводятся направления ее практического использования, особое внимание отводится операции фрезерования кромок деталей.

Ключевые слова: *робототехнический комплекс, финишная обработка, система дистанционного мониторинга и управления.*




Современное машиностроительное производство характеризуется большой номенклатурой сложнопрофильных деталей и высокими требованиями к качеству и производительности технологических операций. В этих условиях актуализируются робототехнические технологии. На кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств ИРНИТУ проводятся активные исследования в области фрезерования кромок деталей на РТК [1], [2], [3].

В то же время обозначился ряд проблем при практической реализации механообрабатывающих операций. В таблице 1 приведены основные разновидности дефектов обработки.

На данный момент в лаборатории промышленной робототехники кафедры ТОМП проблемы обеспечения точности решаются инструментальными способами, поиском оптимальных режимных и настроечных параметров, очувствлением процесса обработки, позволяющих повысить точность обработки кромок [2], [6], [7], [8].

Однако, найденные практические решения имеют ограниченный характер, необходим поиск дополнительных способов. В статье рассматривается новый подход к контролю и управлению промышленным роботом (ПР), использующий технологии дистанционного доступа, визуализации, анализа текущего состояния манипуляционной системы.

Таблица 1 – Основные виды дефектов обработки кромок на РТК

Вид дефекта	Фотография дефекта
Зарез при работе программы «Поиск контакта»	
Нестабильность глубины резания на криволинейных траекториях обработки	
Потеря контакта на внешних контурах	

<p>Потеря контакта в режиме «Удержание»</p>	
<p>Зарезы при повороте системы координат в режиме TTS</p>	

Принцип работы предлагаемой системы заключается в обмене данными между промышленным роботом (в данном случае KUKA KR210 R2700) и персональным компьютером (ПК), где производится фиксация, анализ и обработка принятых данных с последующей визуализацией конфигурации робота, графиков перемещений, скоростей, сил и моментов с помощью специального программного обеспечения. Данные анализа используются для коррекции программы управления роботом.

Общий вид НМ-интерфейса разработанного программного обеспечения представлен на рис. 1.



Рис. 1. НМ- интерфейс системы

Разрабатываемое ПО имеет следующие функции:

- Осуществление обмена данными с роботом и их обработка;
- Визуализация САМ-модели;
- Построение различных графиков (скоростей, текущих координат, сил)
- Терминальное управление промышленным роботом;
- Аварийный останов (отвод);

Ниже представлены основные практические аспекты использования, разработанного ПО.

1. Траекторный (позиционный) анализ. На данном этапе запускается программа робота в тестовом режиме с целью контроля ряда параметров, в частности, отклонения от теоретической траектории, оценка фактической скорости и т.д. Затем с робота на внешнем устройстве считываются два вида переменных (\$POS_ACT и \$POS_FOR), содержащих в себе: текущие и целевые координаты. Далее с помощью графиков, встроенных в ПО, можно в простом и наглядном виде оценить позиционные и скоростные ошибки. На рис. 2 представлен график перемещения по координате X, построенный программой, где красным цветом показана фактическая координата, а желтым цветом – программно-заданная координата. Данное отклонение выявлено при изменении направления движения робота по оси X, которое составило 0.195 мм в режиме линейного перемещения и при подаче в 2мм/с.

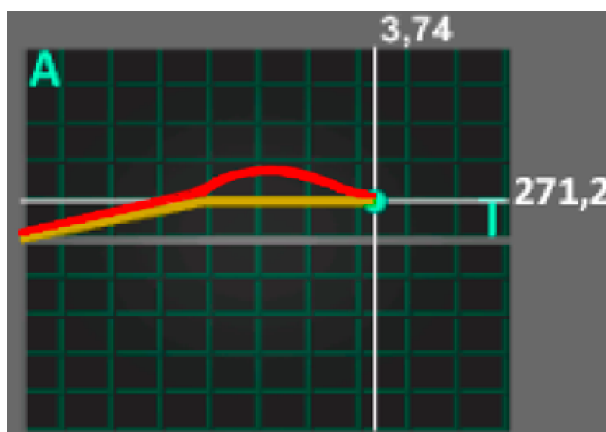


Рис. 2. Визуализация траектории движения робота

2. Техническая настройка РТК. На данном этапе устанавливаются основные параметры РТК: подача, коэффициент усиления KR, фиксируется базовая точка, задаются силовая уставка, параметры управления процессом резания и т.д. В дальнейшем планируется реализовать модуль адаптивной настройки и оптимизации режимных параметров РТК во время выполнения тестовой программы.

3. Технологическая операция. На этом этапе осуществляется процесс финишной обработки. На этой стадии возникают различные отклонения, ввиду влияния многочисленных факторов, таких как: погрешности изготовления и установки детали, износ инструмента, кинематические и динамические ошибки робота, различные помехи, ошибки программы и настройки РТК [3]. Внедрение предлагаемого ПО позволит снизить вероятность брака при выполнении технологических операций:

- Во-первых, в инструментальной среде воспроизводятся в реальном масштабе графики скоростей (рис. 3), перемещений (рис. 2), сил

(РТК оснащен силомоментным датчиком) (рис. 4, 5), что позволяет производить оперативный мониторинг важнейших параметров комплекса.

- Во-вторых, в процессе обработки, можно корректировать движение специальными элементами управления, производить смену инструмента и, наконец, в критической обстановке осуществлять аварийный останов робота.

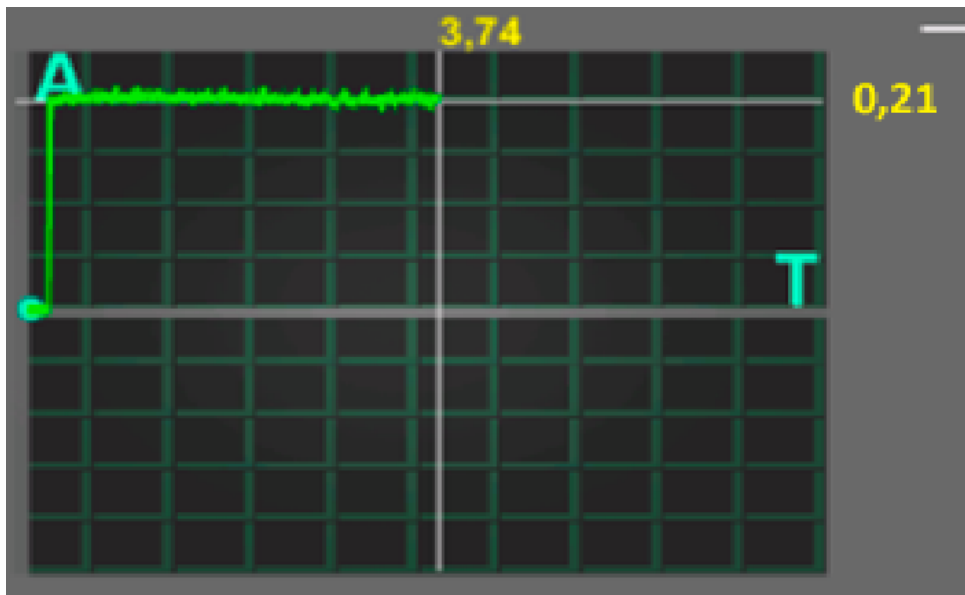


Рис. 3. Фрагмент графика скорости ПР

Из вышеприведенного графика можно заметить, что показатель скорости имеет незначительные отклонения от номинала (в среднем на 0.5-1%). Данные девиации не должны оказывать существенного влияния на точность позиционирования и качество обработки.

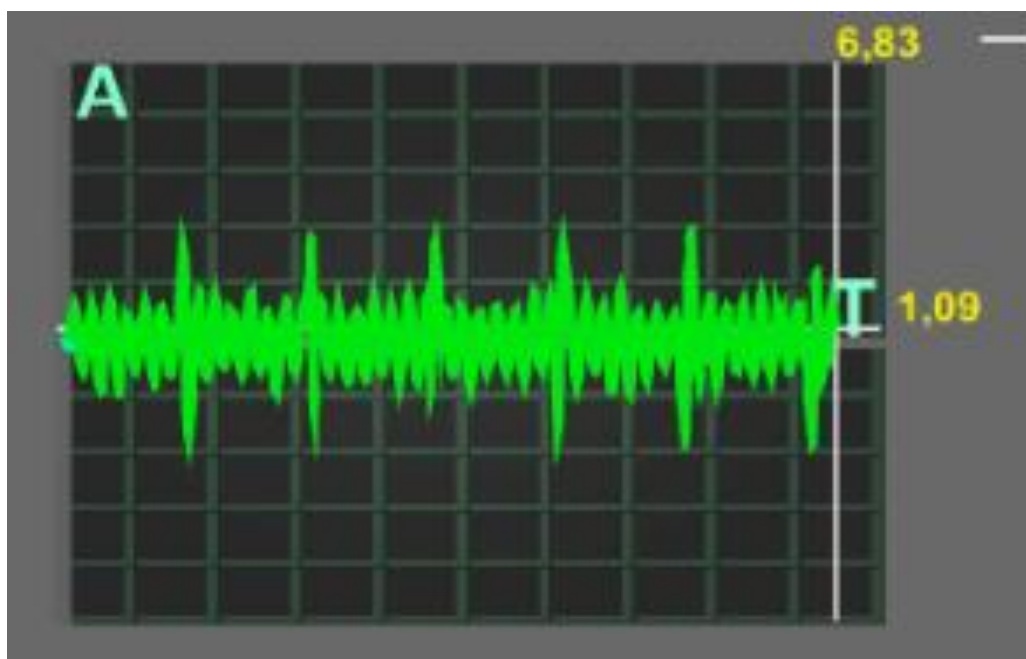


Рис. 4. Диаграмма сил Fx без нагрузки и при неподвижном состоянии робота

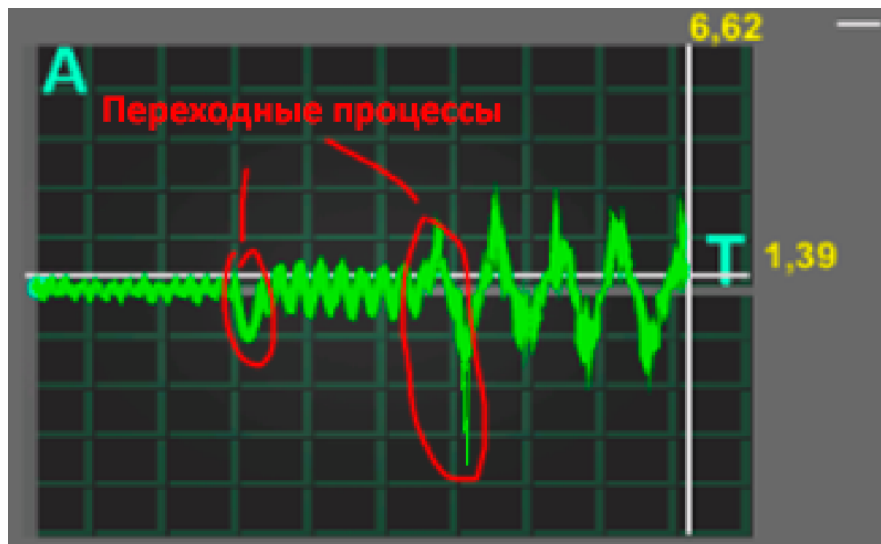


Рис. 5. Диаграмма сил F_x при трогании и равномерном движении робота

Из диаграмм сил следует, что при холостом ходе возникают регулярные колебания робота, а при изменении величины скорости ПР возникают переходные процессы, которые нужно учитывать при назначении стратегии и режимов обработки.

В настоящее время компания KUKA для оптимизации финишной обработки предлагает программный пакет *ForceTorqueControl* [15], который позволяет работать с силомоментным датчиком и строить эффективную траекторию движения. Но, как показывает практика, этого недостаточно, т.к. на данный процесс влияет множество факторов: коэффициент KR , подача, глубина резания, частота вращения шпинделя, вид инструмента, параметрические шумы и т.д.

В перспективе разрабатываемую систему дистанционного управления можно будет применять не только для финишной обработки, но также в лазерных, сварочных, сборочных операциях. На лазерной резке и сварочных работах система позволит отслеживать перемещение робота и вводить поправки в его траекторию.

Перспективным выглядит применение данного ПО на сборочных операциях, где требуется повышенная точность, необходим контроль усилий.

Таким образом, применение данной системы позволит рационализировать процедуру технического обслуживания робота, повысить эффективность технологической подготовки роботизированных операций, реализует возможность оперативного контроля и управления РТК. В конечном счете, следует ожидать повышения качества и производительности обработки деталей на робототехническом комплексе.

Список использованной литературы:

1. Ivanova A., Belomestnyh A., Semenov E., Ponomarev B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details// International Journal of Engineering and Technology (IJET). Vol 7 No 5 Oct-Nov 2015, p.1774-1780.
2. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S. Accuracy assessment of KUKA KR210 R2700 extra industrial robot// International Journal of Engineering and Technology. 2016. Т. 16. № 1. p. 19-25.
3. Беломестных А.С., Иванова А.В., Чапышев А.П. Исследование влияния коэффициента усиления в канале управления скоростью движения робота на технологические свойства робототехнического комплекса механической обработки кромок деталей / Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 39-47.
4. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Автоматизация процесса финишной обработки после дробеударного формообразования. Материалы конференции «Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении». Иркутск: ИрГТУ, 2000, с. 28-31.
5. Савилов А.В. Современные технологии механообработки и формообразования авиационных деталей. / Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах. 2016. С. 494-499.
6. Иванова А.В., Пономарев Б.Б., Савилов А.В., Чапышев А.П. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей / Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 49-53.
7. Бакшеева Е.Н. Разработка алгоритма для технологической подготовки финишной обработки авиационных деталей на робототехническом комплексе / Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей VII Всерос. науч.-прак. конф. 2016 г. с. 209-213.
8. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота Kuka KR210 R2700 extra / А.В. Сидорова [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2015 № 12. с. 86-95.
9. KUKA System Software 8 – Учебная документация. KUKA Roboter GmbH 2013.
10. KUKA RobotSensorInterface 2.3 – Документация. KUKA Roboter GmbH 2012.
11. KUKA. EthernetKRL. 2.1 – Документация. KUKA Roboter GmbH 2009.
12. System Variables for KUKA System Software 8.1, 8.2 and 8.3 – Документация. KUKA Roboter GmbH 2012.

13. KUKA RSI vs KRL [электронный ресурс]. URL: <https://www.robot-forum.com/robotforum/kuka-robot-forum/kuka-rsi-vs-kr1/> - (Дата обращения: 02.03.2019).

14. RSI Ethernet example [электронный ресурс]. URL: <https://www.robot-forum.com/robotforum/kuka-robot-forum/rsi-ethernet-example/> - (Дата обращения: 06.03.2019).

15. KUKA – зачистка заусенцев [электронный ресурс]. URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/технологии/производственные-технологии/2016/07/зачистка-заусенцев> - (Дата обращения: 25.02.2019).

УДК 621.771.23

Точность обработки при изготовлении радиоэлектронных деталей

Ю.И. Карлина¹, Д.А. Журавлев¹, Д.С. Леонович¹, А.Д. Колосов¹

1. Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Представлены результаты анализа показателей высокой производительности различных технологических операций при изготовлении радиоэлектронных деталей.

Ключевые слова: *технология машиностроения, радиоэлектронные детали, штампы*

Введение. Работоспособность детали в изделии во многом зависит от точности исполнения ее качественных параметров.

Постоянное увеличение объемов производства, стремление к улучшению качества, увеличению производительности труда и сокращению сроков технологической подготовки производства приводят к необходимости применения высокоэффективных способов производства, основанных на инновационных наукоемких технологиях. Одним из таких способов является обработка давлением, а наиболее часто используемым способом – холодная листовая штамповка. Штамповочные способы в большинстве случаев обеспечивают достижение необходимых показателей качества деталей (точности линейных размеров и взаимного расположения поверхностей, шероховатости поверхности), высокую производительность и низкую себестоимость (часто стоимость труда составляет около 5% и менее от общей себестоимости детали). Эти показатели возможны благодаря тому, что ряд операций листовой штамповки обеспечивает:

- удовлетворительную точность линейных размеров и формы;
- шероховатость поверхности до $Ra\ 1,25...0,32$;

– легкость выполнения механизации и автоматизации процессов штамповки;

– экономическую эффективность и при мелкосерийном и единичном производстве.

Точность сопрягаемых размеров различных деталей в машино- и приборостроении должна быть в пределах 6...9 квалитетов. Основные процессы листовой штамповки обеспечивают точность в пределах 12... 14 квалитетов. Для достижения более высокой точности вводят дополнительные операции штамповки, но это увеличивает производственные затраты.

Имеющиеся научно-производственные данные до настоящего времени не позволяют обоснованно и уверенно назначать необходимую точность размеров листоштампованных деталей из-за:

– противоречий в рекомендациях и стандартах по назначению точности;

– отсутствия конкретных данных об условиях, при которых возможно достижение требуемой (более высокой) точности.

Однако требуемая точность размеров деталей во многих случаях может быть достигнута без дополнительных затрат. Научной базой для такого повышения точности штампованных деталей и их элементов при проектировании технологии и совершенствовании ее является учет влияния (обычно не учитываемых и в настоящее время) систематических погрешностей, определяющих величину отклонения размеров деталей от размеров инструмента.

Сочетание отдельных процессов штамповки определяет технологический маршрут, а правильно выбранный маршрут обеспечивает достижение высокого качества изделия.

Качество изделия формируется в отдельных процессах штамповки, его напряженно-деформированным; состоянием. Напряженно-деформированное состояние и следующая после снятия деформирующего усилия разгрузка определяют отклонения размеров и форму изделия.

Анализ показателей высокой производительности различных технологических операций.

Качество поверхности изделия зависит в основном от способа ее получения, качества поверхности заготовки, инструмента и других факторов.

Напряженно-деформированное состояние заготовки для квазистатического процесса деформирования определяют:

- уравнения равновесия;
- условие пластичности;
- условия неразрывности деформаций;
- уравнения связи деформаций и перемещений (уравнения равновесия представлены в приложении).

Наметившаяся в радиоэлектронной промышленности тенденция к минимизации размеров выпускаемых изделий привела к необходимости

совершенствования технологий изготовления и обновления парка оборудования. На Иркутском релейном заводе в последние годы закупили новые высокоточные станки с ЧПУ: токарные автоматы, электроэрозионные станки, обрабатывающие центры. Максимальная эффективность от использования таких станков может быть достигнута только при применении современных инструментов САПР. И если CAD/CAM системы применяются на предприятии для подготовки производства на этих станках, то CAE-системы и другие программы, позволяющие правильно сконструировать изделие без проведения лишних натуральных экспериментов, пока почти не внедряются.

Достижение более точных размеров деталей в производстве в настоящее время основано на:

- интуиции;
- производственном опыте технологов;
- производственном эксперименте.

Но выполнение этих условий не гарантирует быстрого достижения нужного результата, поэтому часто требуется многократная доводка дорогостоящего инструмента, связанная или с изменением конструкции штампа или его рабочих частей. Для этого необходимо выполнить дополнительный объем конструкторских и инструментальных работ, что связано со значительными затратами времени и денежных средств и, следовательно, влияет на сроки подготовки производства и себестоимость деталей [1].

Размеры изделий почти всегда отличаются от размеров инструмента, так как формообразование происходит методом копирования формы и размеров инструмента.

Новое оборудование, например, обрабатывающий центр HURCO, способно изготовить любую деталь с высокой точностью и применение его для изготовления рабочих деталей штампа (матриц и пуансонов), требующих повышенной точности является целесообразным. В связи с этим возникает вопрос о правильности задания размеров и комплексных пространственных допусков на детали штампа в процессе конструкторской подготовки.

Источники, причины, виды и закономерности отклонения размеров при штамповке.

При листовой и объемной штамповке геометрические параметры деталей в основном получают методом копирования формы и размеров рабочих частей штампа. В основе методики исследования и технологического обеспечения точности размеров лежат физико-механические процессы.

Во всех исследованиях принимаем материал изделия изотропным.

Точность размеров изделий (ТРИ) взаимно связана со стойкостью инструмента (СИ), поэтому рассмотрим и этот вопрос. Особенно наглядно эту взаимосвязь видно на примере формирования ТРИ и СИ при вырубке-пробивке. В этом процессе штамповки в зависимости от величины зазора

между пуансоном и матрицей, который увеличивается из-за износа рабочих частей штампа, наружные размеры деталей могут быть меньше (при $z > 0,08s$, где s - толщина штампуемого материала), больше (при $z < 0,08s$) и равны размеру инструмента (пуансона или матрицы) и соответственно этому стойкость штампа будет больше или меньше.

В основе методики технологического обеспечения ТРИ и повышения СИ находятся возможности корректировать рабочие размеры инструмента на стадии проектирования или совершенствовать его в процессе производства с учетом деформации разгрузки детали после штамповки и тепловых процессов, сопутствующих изготовлению детали требуемой точности.

В процессе работы под действием технологического усилия во всех элементах технологической системы пресс-иггамп-заготовка возникают деформации, которые в зависимости от конкретных условий процесса штамповки могут вызывать большие или меньшие отклонения размеров изделия от размеров инструмента.

Главными источниками отклонения размеров штампуемых деталей являются процессы, протекающие во всех элементах технологической системы (прессе, штампе, штампуемой заготовке), и условия выполнения процесса штамповки.

Основные причины отклонения размеров:

- непостоянство механических свойств материала детали;
- упругие деформации детали;
- возможные пластические деформации Детали при ее разгрузке и инструмента и др.

Вызываемые этими причинами деформации и отклонения могут быть представлены в виде математической модели в целях последующего расчета размеров и отклонения размеров детали от размеров инструмента.

Различают следующие виды погрешностей: систематические и случайные.

Систематические погрешности - это погрешности, величину и момент возникновения которых можно заранее рассчитать.

Случайные погрешности - это погрешности, величину и момент возникновения которых заранее нельзя определить.

Предварительное определение величины и моментов возникновения отклонения размеров детали от размеров инструмента позволяет решить важнейшие практические задачи:

- повышение точности размеров изготавливаемых деталей за счет исключения влияния систематических, а в некоторых случаях и случайных погрешностей;
- повышения износостойкости рабочих элементов пуансонов и матриц при отсутствии повышенных требований к точности изделия за счет расширения поля допуска детали на изнашивание инструмента.

Математическая модель для предварительного определения величины отклонения размеров деталей от рабочего размера формообразующего инструмента может быть создана на основе обычно применяемых полиномов некоторой степени со статистически определяемыми затем коэффициентами полинома. Однако возможно создание математической модели на основе изучения и математического представления основных физических процессов. Такие модели являются более информативными со всех точек зрения и могут быть менее трудоемки как с точки зрения их создания, так и практического использования. Суммирование погрешностей здесь возможно, как по способу минимума-максимума, так и способом наименьших квадратов в зависимости от числа элементов, формирующих размер изделия [2-5].

Рассмотрим вопросы точности холодноштампованных деталей и их элементов. Рекомендации по качеству листоштамповочных деталей включают данные о шероховатости поверхности, точности формы и размеров для всех основных операций штамповки. Заметим, что точность штампованных деталей в пределах 6...16 качества зависит от выбранной операции и ее схемы. Шероховатость поверхности детали, формируемая непосредственно в контакте с разделительным инструментом, соответствует Ra 0,32... 1,25, а не формируемая в контакте с инструментом - Rz 20 и выше. Исходная шероховатость поверхности листовой заготовки в других операциях на деформированных участках поверхности детали увеличивается на 1...2 параметра шероховатости поверхности. Отметим также существенное влияние упругого и некоторого пластического деформирований почти всей поверхности получаемой штамповкой детали на точность формы - плоскостность, прямолинейность, взаимное расположение, которые возникают в процессах формообразования и последующей за удалением из штампа разгрузки детали [6-9].

Точность штампованных деталей определяют следующие параметры:

- точность размеров;
- взаимное расположение поверхностей;
- шероховатость поверхности;
- однородность свойств материала.

Все эти параметры зависят от выбранного технологического маршрута, отдельных процессов и качества изготовления инструмента.

Заключение. Качество штампованных деталей определяют: точность размеров, взаимное расположение и шероховатость поверхностей, однородность свойств материала и другие параметры [10]. Все они зависят от выбранного технологического маршрута, схемы отдельных процессов

штамповки, качества изготовления инструмента и выбранного оборудования.

Возможно развитие исследований в направлении оценки видов и причин отклонений размеров при штамповке и способов их устранения на этапе конструирования, а также возможность автоматизированного расчета и установки оптимальных допусков на элементы конструкции штампа, применение которых поможет повысить точность и стойкость штампов, изготавливаемых на Иркутском релейном заводе.

Список использованной литературы:

1. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости: Учебное пособие / В.Г. Ковалев, С.В. Ковалев. – М.: КНОРУС, 2010. – 224 с.
2. Технология листовой штамповки: учеб. для вузов / Л.Н. Ильин, И.Е. Семенов. – М.: Дрофа, 2009. – 475, [5] с. : ил.
3. Марков Н.Н., Осипов В.В., Шабалина М.Б. Нормирование точности в машиностроении. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 2001. – 335 с.
4. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Karlina Yu.I., Karlina A.I., Artyunin A.I. Automation of the motion process of the materials which are subject to the incoming quality control // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Т. 19. № 3. С. 289-297.
5. Яценко О.В., Карлина Ю.И., Карлина А.И. Автоматизация учета движения производственных ресурсов и объемно-календарное планирование // В сб.: АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский национальный исследовательский технический университет; Редакционная коллегия: Бобарика И.О. (ответственный редактор); Лыткина А.А. 2017. С. 287-291.
6. Михаленко Ф.П. Стойкость разделительных штампов. М.: Машиностроение, 1986. – 208 с.
7. РД.37.002.0490-86.4.1. Конструирование штампов листовой штамповки: руководящий документ. М.: Минавтопром, 1987. – 329 с.
8. ГОСТ 53442-2009. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Стандартиформ, 2010. – 51 с.
9. Торопов Ю.А. Припуски, допуски и посадки гладких цилиндрических соединений. Припуски и допуски отливок и поковок: справочник. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2004. – 598 с.
10. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1 : Учебное пособие / И.М. Колганов, П.В. Дубровский, А.Н. Архипов — Ульяновск: УлГТУ, 2003. — 148 с., ил.

Преимущества внедрения 3D-допусков при конструировании изделий радиоэлектронной промышленности

Ю.И. Карлина¹, Д.А. Журавлев¹, Д.С. Леонович¹, А.Д. Колосов¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Представлены результаты анализа внедрения 3D-допусков при конструировании изделий радиоэлектронной промышленности.

Ключевые слова: *технология машиностроения, радиоэлектронные детали, 3D-допуски*

Введение. Сегодня соответствовать современным требованиям рынка возможно только путем применения современных инструментов ведения бизнеса. В настоящее время высокая технологичность производства уже не преимущество, а необходимость. Повысить эффективность и производительность, тем самым снизив себестоимость, в настоящих условиях возможно за счёт сквозного управления жизненным циклом изделия от разработки до утилизации, обеспечивая высокую технологичность изделий.

Анализ перспектив развития рынка продукции радиоэлектронной промышленности показывает, что требуются сложные специализированные инструменты систем автоматизированного проектирования, а именно комплексные решения для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) и интеграции ее в единый информационный контур управления предприятием, обеспечивающие технологичность изделий. В настоящее время эффективность конструкторско-технологической подготовки производства может быть повышена за счет:

- 1) автоматизации управления сквозными бизнес-процессами КТПП и потоками работ;
- 2) использования единой системы управления инженерными данными и жизненным циклом изделий во всех службах предприятия, занятых КТПП;
- 3) применения единых источников и средств управления нормативно-справочной информацией;
- 4) создания единого информационного пространства для территориально распределенных подразделений;
- 5) консолидации всех данных и документов, накопленных в процессе КТПП, в виде электронного состава изделия. В этом контексте

состав изделия содержит не только привычные конструкторские спецификации, а всю необходимую информацию для планирования производства: исполнения и варианты замен, пространственные модели и чертежи, результаты поверочных и прочих расчетов, данные о заготовках и нормах расхода материалов, технологические маршруты, нормы на выполнение операций, сведения о применяемом оборудовании и СТО, историю изменений объектов и документов, и т. д.;

б) автоматизированной передачи данных PDM-системы в ERP-систему управления предприятием.

По результатам проведенного исследования выявлены следующие преимущества внедрения 3D-допусков при конструировании штампов:

1) Повышение точности конструкции штампов за счет выявления недостатков конструкции, которые невозможно учесть при назначении допусков «вручную», при анализе сборок на этапе конструирования;

2) Повышение качества штампов за счет снижения выпуска непригодных штампов и повышения их стойкости из-за расширения поля допуска детали на изнашивание инструмента;

3) Расширение технологических возможностей производства за счет выпуска штампов для высокоточных изделий.

Автоматизация предприятия и управления продуктом при внедрении системы ГеПАРД и внедрением 3D-допусков в контексте комплекса решений на предприятии позволит упорядочить процесс взаимодействия участников разработки и выпуска изделия, повысить качество и эффективность документации.

Достижение этих результатов происходит за счет преимуществ применения 3-D допусков в целом и особенностей интерфейсной логики программ, составляющих комплексное решение. Комплекс решений ГеПАРД позволит автоматизировать оформление документации, направленной на назначение допусков, использовать технологии параллельного проектирования, унифицировать проектные решения и процессы проектирования, повторно использовать наработанные решения, данные, изделия, заменять натурные и макетные испытания математическим, функциональным, динамическим и прочими видами моделирования, повысить качество управления в целом.

Программный комплекс ГеПАРД построен с учетом принципа необходимой достаточности, что позволит оптимизировать сроки и затраты на внедрение, обучение и работу.

Наибольший эффект от применения комплекса решений ГеПАРД и системы 3D-допусков в целом достигается на машиностроительных предприятиях следующих профилей:

- предприятия с полным циклом КТПП и производства изделий машиностроения (единичное и серийное производство, в том числе с позаказной формой выпуска изделий);

- самостоятельные конструкторские бюро, проектирующие изделия для производства на мощностях заказчика;

- предприятия, выполняющие производство изделий по конструкторской документации заказчика, головной организации, субподрядчика и т. п.;

- предприятия, специализирующиеся на обслуживании и ремонте изделий машиностроения.

Изделия, спроектированные на основе программных решений ГеПАРД будут востребованы и с успехом будут применяться на предприятиях различных отраслей общего, среднего и точного машиностроения за счет своей технологичности, а также экономической выгоды, в том числе: железнодорожное машиностроение; судостроение; автомобильная и авиационная промышленность; станкостроение и инструментальная промышленность; предприятия ОПК; сельскохозяйственное, химическое и лесопромышленное машиностроение; производство бытовых приборов и машин; приборостроение; электротехническая промышленность и т. д.

Комплекс решений ГеПАРД [1-5] обеспечивает автоматизацию всех этапов и процессов конструкторско-технологической подготовки производства, начиная от создания вариантов компоновки нового изделия и заканчивая передачей документации в производство или внешнему заказчику, охватывая новейший спектр задач, ранее не внедренный ни одной ныне существующей системой САПР. При этом все элементы КТПП, используя централизованные средства хранения и обработки данных, органично увязаны в единую информационно-процессную среду проектирования и подготовки производства. Такой подход к решению задач в итоге позволяет:

- сократить сроки конструкторско-технологической подготовки производства;

- существенно повысить качество конструкторской и технологической документации;

- наладить работу системы управления производством с актуальными инженерными данными, что в результате обеспечивает точность планирования производственной деятельности и прозрачность управления предприятием;

- снизить издержки на материально-техническое обеспечение производства за счет оптимизации номенклатуры применяемых материалов, оснастки и покупных комплектующих;

- создать актуальную нормативную базу для оценки плановой себестоимости изделия и контроля отклонений от плановых показателей;

- снизить издержки или совсем исключить опытное производство изделий;

- максимально быстро вводить в производство модификации изделий;

- эффективно эксплуатировать парк станочного оборудования (в том числе дорогостоящее импортное оборудование с ЧПУ) и оптимизировать расход инструмента;

- оперативно получать требуемые комплекты технической документации на ранее изготовленные изделия для выполнения ремонтных работ, а также для работы с возражениями заказчика по гарантийным обязательствам;

- снизить себестоимость конечной продукции и услуг по техническому обслуживанию и ремонту;

- обеспечить накопление и сохранность интеллектуальной собственности предприятия, существенно повысить уровень информационной безопасности бизнеса.

Оценка точности разделительных штампов при назначении 3D-допусков в системе ГеПАРД.

Процесс моделирования в системе «ГеПАРД» разбивается на несколько этапов.

1. Сначала создается номинальная модель сборки. На этом этапе импортируется модель сборки (подсборки) в номинальных размерах и взаимосвязях, которая представляется в терминах теории квадратичных форм и теории кватернионов.

Основанием для этого является теорема Бонне (основная теорема теории поверхностей), согласно которой всякая поверхность (как аналитически описываемая, так и аналитически не описываемая) определяется однозначно заданием *пары квадратичных форм*, связанных структурными уравнениями при условии задания начальных условий для решения системы уравнений в частных производных (деривационных формул). Эти начальные условия определяют точку трехмерного пространства и ортонормированный репер (локальную систему координат) [4-7].

2. При создании конфигурационной модели сборки (подсборки) сначала производится назначение и параметризация допусков, которые гармонично вписываются в созданную ранее номинальную модель. Все допуски мы разбили на три группы:

- допуски расположения, описываемые с помощью единичных кватернионов, как представителей группы вращений трехмерного пространства;

- допуски формы, описываемые вариациями коэффициентов первой и/или второй квадратичных форм;

- комбинированные допуски [8-9].

Тогда, все возможные допустимые отклонения от номинальных размеров, формы и расположения каждой поверхности в отдельности и деталей и сборок в целом описываются изменяемыми коэффициентами квадратных форм и/или положениями вариационных реперов поверхностей, деталей, сборок. Это представляется с помощью конфигурационных многообразий, каждой точке которых соответствует определенное состояние поверхностей деталей и сборок (измененное положение и/или форма).

В итоге получаем конфигурационную модель сборки, которая «поглощает» созданную ранее номинальную модель.

3. При анализе собираемости изделий с учетом наложенных допустимых отклонений применяются в совокупности знания всех трех, рассматриваемых нами, математических теорий [8-9].

А именно, по точкам конфигурационного многообразия сборки (подсборки) с помощью разработанных нами алгоритмов, основанных на теории квадратных форм и теории кватернионов, мы получаем некоторые отклоненные фиксированные положения всех элементов сборки (подсборки), оцениваем их взаимосвязи и делаем вывод о возможности собираемости с заданными допусками.)

При анализе штампов в системе ГеПАРД были выявлены следующие отклонения форм и взаимного положения деталей:

- Нижняя плита имеет отклонения от плоскостности;
- Отверстия под штифты имеют отклонения от соосности;
- Матрица имеет отклонения от плоскостности;
- Направляющие колонки имеют отклонения от соосности;
- Верхняя плита имеет отклонения от плоскостности и не параллельна плоскости нижней плиты.
- Пуансон имеет отклонение от соосности относительно общей оси.

Заключение. Произведенный на заводе изготовителе анализ позволяет констатировать факт необходимости «доводки по месту» путём шлифовальных работ поверхности нижней плиты. В настоящее время не имеет применения на практике назначения 3D-допусков на плоскостность и даже при наличии шероховатости в поле назначенного допуска, необходима доработка.

Комплекс решений ГеПАРД успешно может использоваться в российском машиностроении, в том числе на предприятиях оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.

Список использованной литературы:

1. Шабалин А.В. Конфигурационные пространства для оценки собираемости изделий машиностроения с пространственными допустимыми отклонениями // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иркутский государственный технический университет. Иркутск, 2011.
2. Гаер М.А., Шабалин А.В. Представление кривых на карте поверхности, заданной квадратичными формами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 47.
3. Журавлёв Д.А., Гаер М.А., Шабалин А.В. Взаимное отклонение точек сопрягаемых поверхностей в автоматизированном размерном анализе с пространственными допустимыми отклонениями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 69-73.
4. Хващевская Л.Ф., Шабалин А.В. К проблеме обеспечения точности в изделиях машиностроения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 1 (84). С. 25-29.
5. Фарактинов Д.А., Евстигнеев Ю.С., Шабалин А.В. Сравнительный обзор возможностей автоматизированного размерного анализа в современных (сат) системах автоматизированного размерного анализа // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 97-104.
6. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Karlina Yu.I., Karlina A.I., Artyunin A.I. Automation of the motion process of the materials which are subject to the incoming quality control // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. T. 19. № 3. С. 289-297.
7. Яценко О.В., Карлина Ю.И., Карлина А.И. Автоматизация учета движения производственных ресурсов и объемно-календарное планирование // В сб.: АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский национальный исследовательский технический университет; Редакционная коллегия: Бобарика И.О. (ответственный редактор); Лыткина А.А. 2017. С. 287-291.
8. Лгалов В.В. Оптимизация процесса плоского шлифования штампов и пресс-форм радиоэлектронной промышленности. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Иркутск – 2013 г. 184 с.
9. Шабалин А.В. Конфигурационные пространства для оценки собираемости изделий машиностроения с пространственными допустимыми отклонениями // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Иркутск – 2011 г. 165 с.

Проектирование конструкции термоматрона

Д.С. Леонович¹, Ю.И. Карлина¹, Д.А. Журавлев¹, А.С. Суханов¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Представлены результаты проектирования конструкции экспериментального термоматрона.

Ключевые слова: *технология машиностроения, термоматрон, авиастроение*

Введение. В настоящее время производство требует от специалиста принятия

квалифицированных инженерных решений при проектировании, изготовлении и эксплуатации технологического оборудования и оснастки. Умение проводить научные исследования становится неотъемлемой частью работы специалиста, так как часто лишь с их помощью удастся реализовать особенности конкретных условий производства и выявить резервы повышения его эффективности. Заключение, сделанные в результате проведения исследовательских изысканий, должны иметь возможность практического применения в организации технологического цикла или в конструкции оборудования. Такие выводы могут быть как организационно-технического характера, так и имеющие отношение к изобретательской деятельности. Последнее указывает на необходимость владения специалистом приемами решения изобретательских задач.

В настоящей работе будет рассмотрено проектирование термоматрона двух конструкций с конусом MAS BT-40:

1) классическая конструкция термоматрона для стандартной фрезы с цилиндрическим хвостовиком с ограничением по крутящему моменту в зависимости от полученного натяга [1-3] (см. рис 1,2);

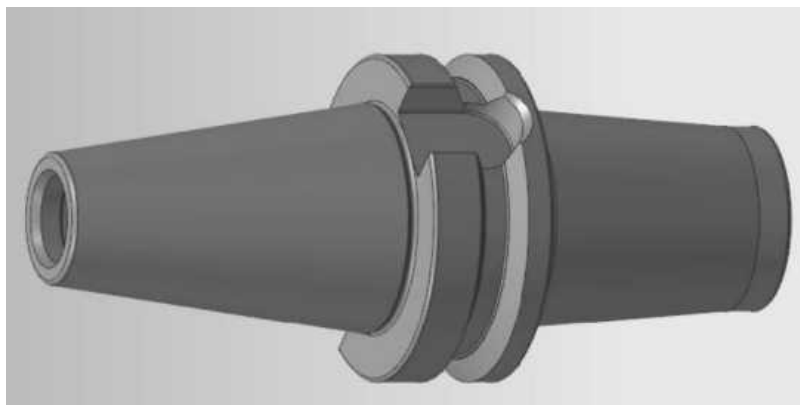


Рис.1. Термоматрон классической конструкции

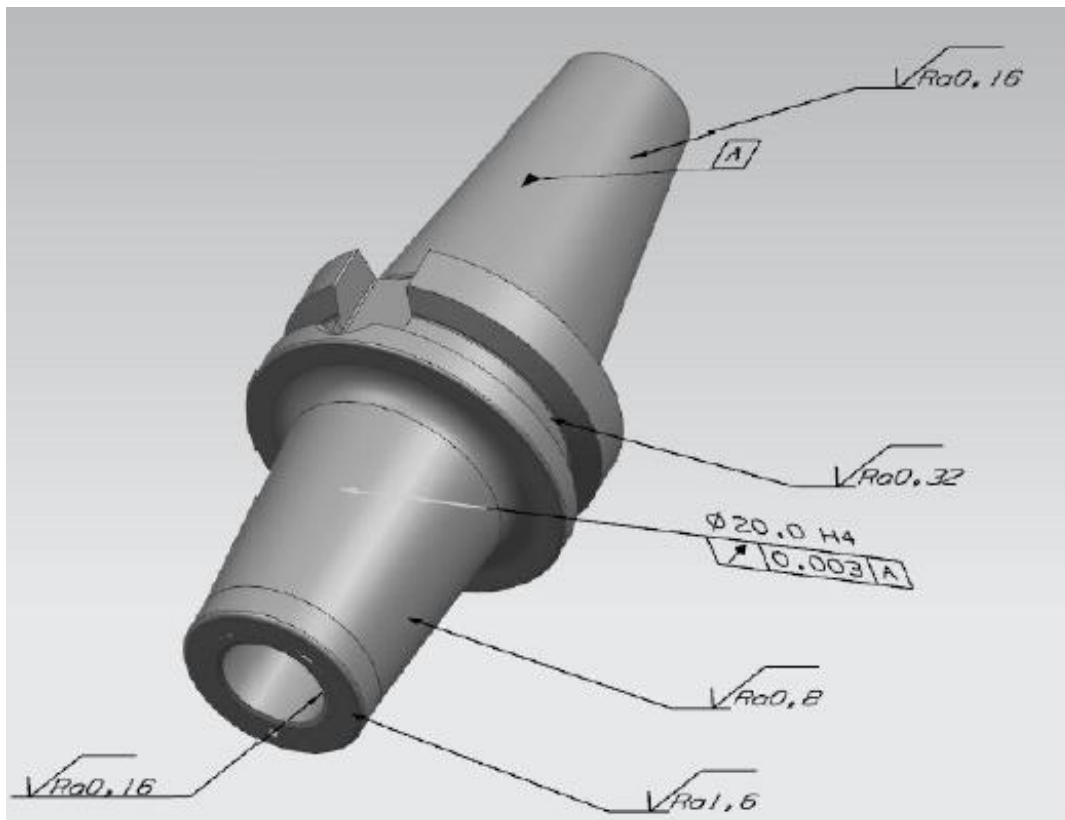


Рис.2. Классический термоматрон

2) нестандартная конструкция термоматрона, особенностью которой является повышение предела передаваемого крутящего момента за счёт фиксации по трём винтовым канавкам фрезы под углом 30 градусов в патроне тремя радиальными штифтами (см. рис 3,4 – термоматрон с фрезой в сборе).

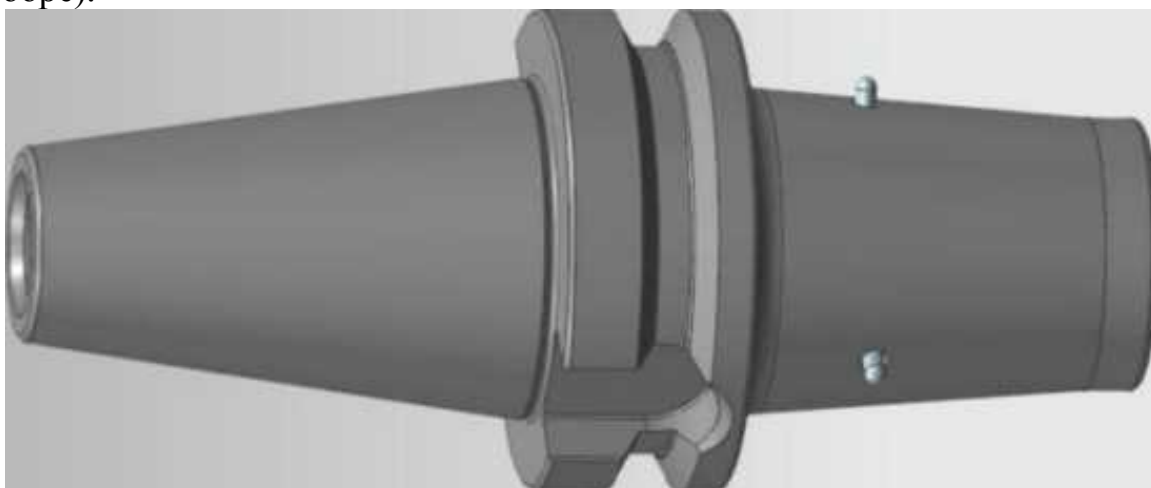


Рис.3. Конструкция термоматрона со штифтами

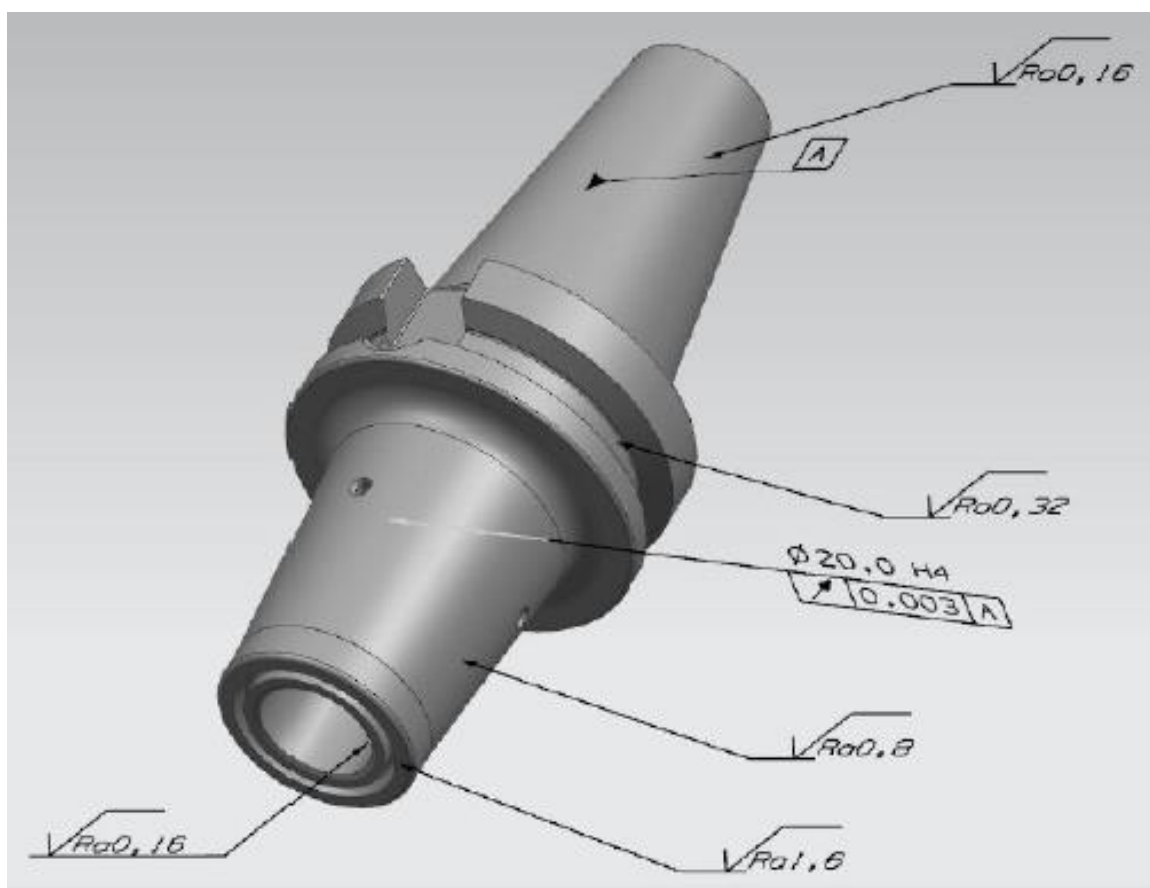


Рис.4. Термопатрон с отверстиями под штифты

Результатом данной работы являются практические изыскания, связанные с расчётом соединения с натягом в термопатроне и проектирование самого термопатрона с рассмотрением возможности его технологического изготовления, которые не отражены в существующей литературе и прочих научных трудах.

Так как нестандартная конструкция представляет собой модификацию классического патрона и является более сложной в изготовлении, то именно она будет рассмотрена в маршрутной карте.

Анализ инструментальных материалов.

В ходе анализа наиболее предпочтительными отечественными материалами для изготовления термопатрона являются стали марок ШХ15, Х12Ф1. Для сравнения будет рассмотрена и быстрорежущая сталь Р6М5.

Вышеупомянутые материалы были выбраны из-за следующих достоинств: стали марки ШХ15 обеспечивают высокую временную размерную стабильность, что обеспечивает долговечность и надёжность изготавливаемого из неё инструмента, что крайне важно для обеспечения постоянного натяга и нивелирования биения, а так же данная сталь обладает высоким коэффициентом линейного расширения при нагреве на температуру свыше 100°C , вследствие чего для обеспечения собираемости термопатрона её достаточно нагреть до $200-250^{\circ}\text{C}$: сталь марки Х12Ф1, Х12МФ обладает более низким коэффициентом линейного расширения, чем ШХ15 вследствие

чего необходим более высокий нагрев до 450°C. Для обеих сталей необходимо добиться распада остаточного аустенита для предотвращения линейного изменения размеров с течением времени, т.е. обеспечить термостабильность, для этого необходимо выполнить термическую обработку холодом в режиме - 70°C в течение 1 часа [4-9].

Для выполнения расчета изменения диаметра отверстия патрона, на основании коэффициентов из таблицы 1 выполнен расчет линейного расширения материалов в таблице 2.

Приращение полученных размеров, для материалов, из которых планируется изготовление проектируемого термопатрона, приведены на рисунке 5, для материалов, из которых планируется изготовление инструмента, на рисунке 6. Для анализа выполнены приращения размеров с линейным расширением для фрез/патронов на рисунке 7, 8.

Таблица 1. Зависимость коэффициентов линейного расширения от температуры нагрева материала

	материал	температура нагрева, °C									
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
коэффициент линейного расширения (α, 10 ⁻⁶ (-6), 1/°C)	X12MΦ	10,9	10,9	10,9	11,4	11,4	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
	ШХ15	11,9	15,1	15,5	15,6	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
	Р6М5 (М2)	10	10	10	10	10	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
	ВКб-ом	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
	ВК8	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
	ВК10	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4

Таблица 2. Линейное расширение материала в зависимости от температуры нагрева

	мат-л	температура нагрева, °C									
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
линейное расширение, мкм	X12MΦ	0,00218	0,0109	0,0218	0,0327	0,0436	0,0545	0,0654	0,0763	0,0872	0,0981
	ШХ15	0,00238	0,0119	0,0238	0,0357	0,0476	0,0595	0,0714	0,0833	0,0952	0,1071
	Р6М5 (М2)	0,002	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	ВКб-ом	0,00098	0,0049	0,0098	0,0147	0,0196	0,0245	0,0294	0,0343	0,0392	0,0441
	ВК8	0,00102	0,0051	0,0102	0,0153	0,0204	0,0255	0,0306	0,0357	0,0408	0,0459
	ВК10	0,00108	0,0054	0,0108	0,0162	0,0216	0,027	0,0324	0,0378	0,0432	0,0486

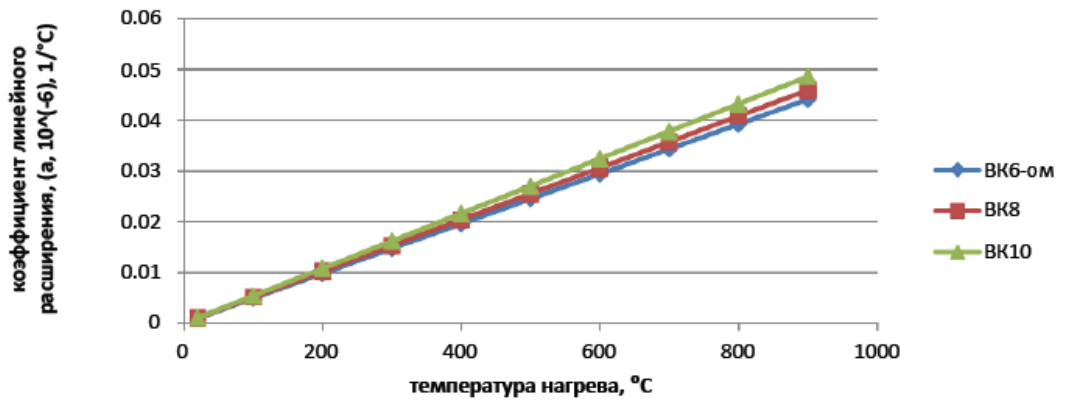


Рис.5. Приращение размеров с термоусадкой для термопатронов

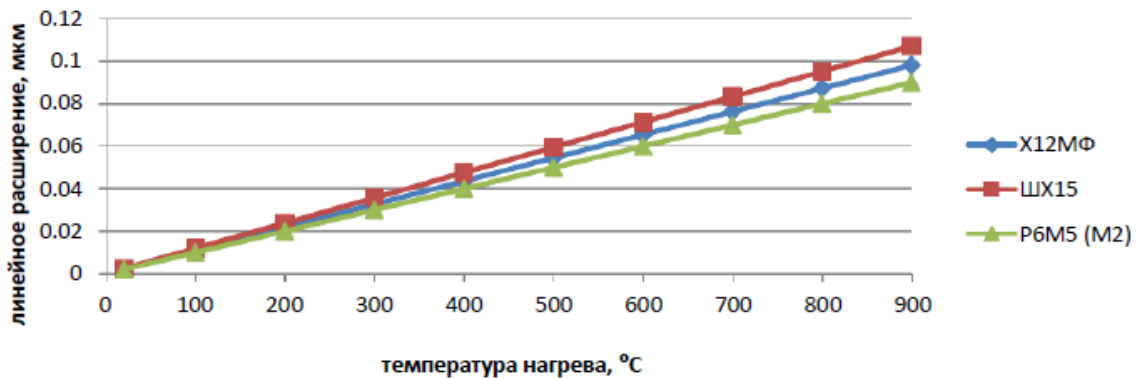


Рис.6. Приращение размеров с термоусадкой для хвостовиков фрез

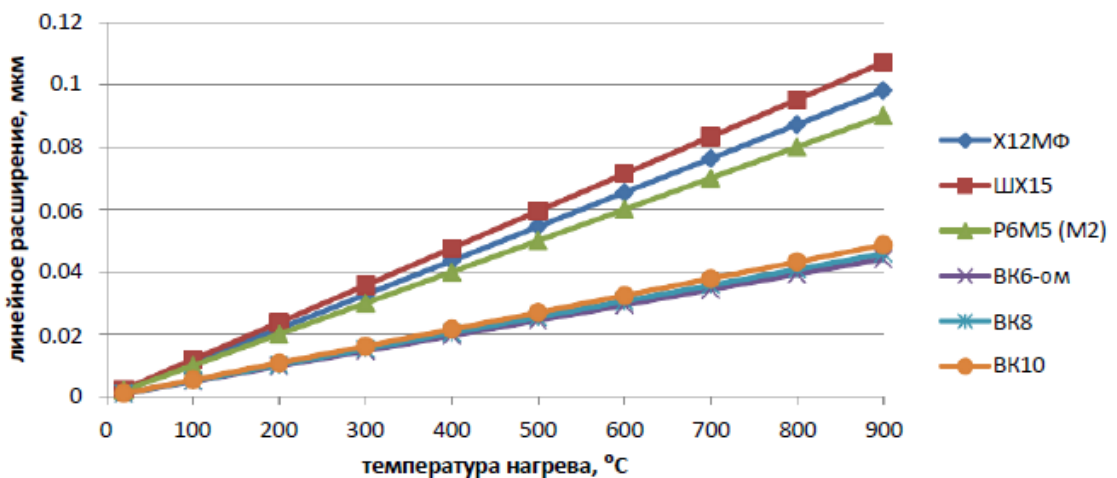


Рис.7. Совмещение графиков термоусадки патронов с цилиндрическими хвостовиками

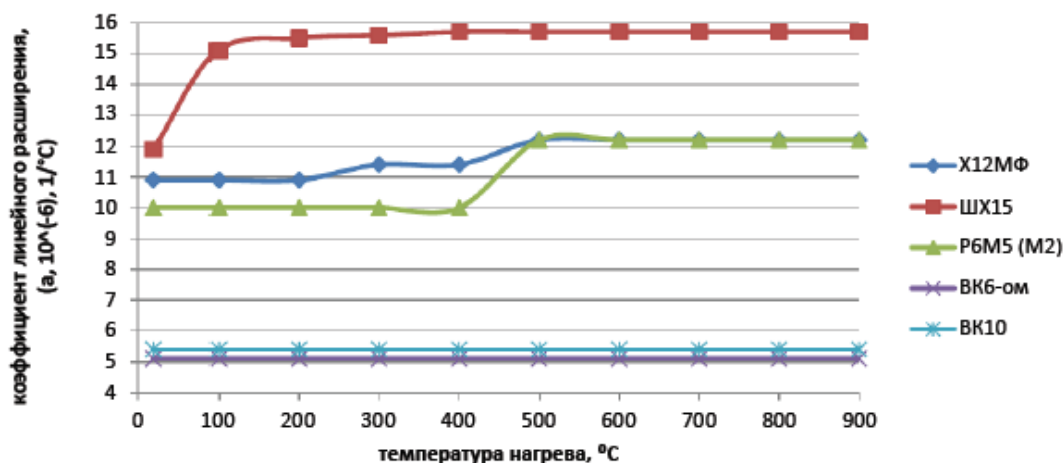


Рис.8. сопоставление коэффициентов линейного расширения материалов

На основании вышеупомянутых характеристик материалов и диаграммы 1 в качестве материала термоматрона определена сталь ШХ15.

Заключение.

Авторы настоящей работы ставит перед собой следующие цели:

1. Собрать, систематизировать и критически обработать материалы, связанные с вопросами расчета, конструирования и технологии сборки соединений с натягом в термоматроне;
2. Представить аналитические расчеты в удобном для практической работы виде путем сопоставления изготовления инструмента и термоматрона из различных конструкционных и инструментальных сталей;
3. Увязать вопрос расчета, конструирования и сборки термоматрона и фрезы с натягом

Результатом данной работы являются практические изыскания, связанные с расчетом соединения с натягом в термоматроне и проектирование самого термоматрона с рассмотрением возможности его технологического изготовления, которые не отражены в существующей литературе и прочих научных трудах.

Список использованной литературы:

1. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2015 – 368с.: ил.
2. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В.А. Ванин, В.Г. Однолько, С.И. Пестрецов, В.Х. Фидаров, А.Н. Колодин. – Тамбов: Из-во Тамб. госю техн. ун-та, 2009. -232 с.
3. Инструментальные системы машиностроительных производств/ А.Р. Маслов: учебник. – М.: Машиностроение, 2006. -336 с.: ил.
4. Проектирование одношпиндельной токарной обработки в NX САМ: метод. указания к выполнению лабораторной работы №2 / сост.: А.Б. Стрелков. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 58 с.

5. http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/SHX15
6. Карлина А.И., Карлина Ю.И., Камышан В.И. Предлагаемые поддерживающие стратегии и рекомендуемые действия в области управления ремонтным предприятием // В сб.: Проблемы развития экономики и предпринимательства 2016. С. 347-352.
7. Савченко А.А., Каимов Е.В., Карлина А.И. Влияние структуры внешних воздействий на динамические свойства механических колебательных систем // В сб.: Кулагинские чтения материалы XI Международной научно-практической конференции. 2011. С. 203-205.
8. Кубический нитрид бора (КНБ) и алмаз с бакелитовой связкой // Вальтер Граф – Виллах: Изд-во «ВСТ Винтеутр Шляйфтехник Аг», 2000. – 77 стр.
9. Посадки с натягом в машиностроении: справочное пособие/ Е. И. Берникер. – Ленинград: Изд-во «Машиностроение», 1966. – 168 стр.

УДК 372.862

Опыт создания и применения электронно-образовательного ресурса для графических дисциплин

О.В. Белокрылова, В.О. Кобелева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Электронная информационно-образовательная среда организации должна обеспечивать проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Главный акцент в электронном обучении и управлении знаниями – это помочь студентам оптимизировать процесс получения знаний

Ключевые слова: *электронное обучение, компьютерные программы, графические дисциплины*

В настоящее время разного вида инновации характерны для любой отрасли промышленности, актуальны они и для системы образования, в том числе и для кафедры начертательной геометрии и технического черчения

Инновации в нашей деятельности являются результатом постоянных практических поисков, прогрессивного педагогического опыта, повседневной работы преподавателей графических дисциплин. На кафедре прихо-

дится постоянно изменять современное учебно-методическое сопровождение графическим дисциплинам, а это и есть педагогические инновации, т.е. изменения в содержании и технологии

Одним из основных организационно-педагогических условий ее формирования является создание и применение электронно-образовательного ресурса (ЭОР) для графических дисциплин.

Требования к электронной информационно-образовательной среде вуза прописаны в Федеральном государственном образовательном стандарте.

Электронная информационно-образовательная среда организации должна обеспечивать проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых предусмотрена с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Создание ЭОР осуществлялось на основе дистанционной среды, позволяющей организовать образовательную деятельность.

Таким образом, стираются грани между обучением на расстоянии и непосредственно внутри образовательного учреждения. Правительство РФ поручило МОН разработать модель включения он-лайн курсов во все образовательные программы. В 2014 вузы РФ получили право полной замены аудиторных занятий на работу он-лайн. Развитие современной системы образования в России обуславливается влиянием и внедрением информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) во все сферы деятельности учебных заведений. Главный акцент в электронном обучении и управлении знаниями – это помочь студентам оптимизировать процесс получения знаний.

Учебный материал предоставляется пользователю в электронном виде, и пользователь изучает его, просматривая в интернет-браузере.

Однако, такой вариант электронного обучения «односторонний» — пользователи имеют доступ к учебному материалу, изучают его, но не ясно как они его усвоили, и вообще смотрели ли они его. Для упрощения и контроля учебного процесса и существует система электронного обучения. Главное преимущество электронного обучения-это, «обратная связь». Система электронного образования позволяет автоматизировать многие рутинные процессы и получить даже больше информации об успеваемости, чем при традиционном обучении. Теперь можно сказать точно, насколько хорошо учащиеся усвоили учебный материал, а также подкорректировать учебный процесс, как в целом, так и для конкретных студентов.

У электронного обучения есть свои плюсы и минусы. В качестве основных преимуществ электронного обучения большинство исследователей называют:

- доступность учебных материалов во времени и в пространстве;
- автоматизация проверки заданий (тестов) и хранение результатов;

- возможность оперативного обновления теоретического материала, фактической и статистической информации;
- наглядность учебных материалов на основе использования различных средства мультимедиа (анимации, аудио и видео), позволяющая задействовать большинство механизмов восприятия человеком новой информации;
- упор на самостоятельную работу студента, способствующую формированию навыков самоорганизации и рационального планирования учебного времени;
- развитие навыков владения современными инфокоммуникационными технологиями;
- формирование и развитие навыков целеполагания, инициативности и ответственности;
- индивидуальный подход, возможность адаптации учебных курсов для студентов с разным уровнем подготовки.

Успешность внедрения электронного обучения, кроме вышеизложенного, во многом определяется мотивацией студентов и профессорско-преподавательского состава. Как правило, студенты сегодня психологически и практически больше, чем преподаватели готовы к использованию электронного обучения. У большинства студентов уже сформированы навыки работы в сети. Почти каждая учебная группа имеет свою страницу в социальных сетях, в которой происходит обмен информацией, учебными материалами и пр. Некоторые преподаватели успешно используют этот ресурс.

Кроме того, существуют различные модели электронного обучения, включая полностью сетевое обучение по отдельному курсу или в рамках виртуальной кафедры, университета; интегрированное с очным обучением. Каждая из указанных моделей имеет свою специфику, касающуюся, как организации учебных материалов, так и методики проведения занятий, форм. Интеграция дистанционных и очных форм обучения представляется на сегодняшний день наиболее перспективной и востребованной для вузов взаимодействия студентов друг с другом, с преподавателем.

Для студентов очной формы обучения сейчас идет реализация образовательных программ в ИрНИТУ с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий. Строится на базе информационной системы Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), распространяемой системы управления обучением MOODLE.

Разработка осуществлялась по модульному(тематическому) принципу, поскольку учебный материал имеет модульную структуру и разбит на темы, предполагающую методически и содержательно обоснованное деление ЭОР на самостоятельно оформленные учебные модули.

По каждому модулю создавался необходимый учебно-методический материал: электронные лекции, учебники, пособия, методические указания

по выполнению графических работ, электронные задания для практических занятий примеры и технологии их выполнения, справочные средства (библиотеки стандартных изделий, ГОСТ, глоссарий и т.д.),

обучающие средства (различные видеоролики и т.д.), контролирующие средства (тесты, контрольные вопросы и т.д.).

Учитывая специфику преподавания графических дисциплин, в системе MOODLE можно включать интерактивные анимационные ролики, демонстрирующие процессы формообразования, решение типовых задач, построение линии пересечения поверхностей и др. Активные элементы курса являются реализацией практических занятий при сетевом обучении. К активным элементам в данном случае относятся: задание, тест, форум, чат, глоссарий, кроссворд. При контроле знаний тестов оценка выставляется автоматически. Для организации информационного взаимодействия преподаватель может использовать элемент форум (вопрос по теме), элемент «чат».

Все материалы по курсу инженерной графики доступны студентам в любое время. Достаточно зарегистрироваться на сайте электронного обучения ИрНИТУ. Существует возможность ограничения по времени изучение курса или допуска к следующему элементу курса, например, тесту. Без изучения темы доступ к тесту закрыт.

После анализа результатов в конце семестра хорошо прослеживается связь между изучением курса и результатами промежуточной успеваемости. Студенты, не заходившие на сайт или не изучавшие предложенные материалы, показывали худшие результаты на практических занятиях и при прохождении тестов по темам и на экзамене.

После прохождения курса инженерной графики студентам был предложен небольшой опрос о выборе предпочитаемых источников получения информации по курсу. Вот что показали результаты опроса.

Участников опроса было 105 человек, студенты института высоких технологий и института авиационного строительства и транспорта.

Освоение теоретического курса традиционным способом (учебник из библиотеки) использовали 19 % студентов.

Электронные лекции (презентации) с сайта электронного обучения использовали 95 % обучающихся.

Другие источники: электронные учебники, другие обучающие сайты 20%.

Практические занятия, как показан опрос лучше воспринимаются, если идет объяснение или просто небольшая помощь в решении задач преподавателем на доске или экране монитора.

Практически 98% студентов указывают как хороший источник для выполнения графических работ пример решения и поэтапное построение в презентациях на сайте электронного обучения. Активно используют примеры на YouTube .

Подготовка специалиста конкурентоспособного на современном рынке труда невозможна без использования информационных технологий

в образовании. В частности, без прикладных графических программных продуктов, позволяющих сокращать сроки и повышать качество выполнения и оформления чертежей в соответствии со стандартами.

Применение любого графического пакета AUTOCAD или КОМПАС дает возможность качественно выполнять чертежи, сократить время на самостоятельное выполнение задания, но на изучение прикладной графической системы время программой курсов «Начертательная геометрия», «Инженерная графика» не предусматривается. Следовательно, знакомиться с работой графического пакета студентам приходится чаще всего во время самостоятельной вне аудиторной работы или на консультации. Надо отметить что студенты охотно используют возможность выполнения графических работ с помощью графических программ так как у многих студентов нет навыков качественного выполнения графических работ вручную.

Следует заметить, что с учетом специфики предметов, заключающейся в необходимости графических построений, наличия чертежей заменить полностью очное обучение на электронное невозможно. Но подготовиться и проконтролировать свои знания и умения вполне. Сдача экзамена или зачета в настоящий момент предполагает очное собеседование с преподавателем и выполнение контрольных графических заданий.

Такая система электронного обучения позволяет вывести обучение на новый уровень, повысить уровень коммуникации, обеспечить необходимой информацией по курсу, указать другие информационные источники.

Список использованной литературы:

1. Белокрылова О.В., Иванова М.А., Оптимизация учебной деятельности студентов по графическим дисциплинам с помощью электронного обучения //Сборник материалов 1X Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». -Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2017.с.504-507
2. Сечкарева Г. Г. Проблемы электронного обучения в школе глазами студента-практиканта // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 13. – С. 36–40
3. Михеева С.А, Свит Е.П. Опыт и перспективы использования электронного обучения в образовательной среде педагогического университета //Журнал Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Выпуск№ 168 / 2014
4. Хамитова Д. В. Электронно-образовательный ресурс курсов графических дисциплин в системе управления обучением LSM MOODLE // Вестник казанского государственного энергетического университета. – 2014 – № 2 (21). – С. 138–142.
5. Андрияшина Т.В., Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы: сборник трудов Международной научно-практической конференции, 27 марта 2015 г., г. Брест, Республика Беларусь, г. Новосибирск, Российская Федерация

Получение электроэнергии из систем водоснабжения

А. Г. Осипов, А. С. Зуев.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Разработан способ решения энергетической проблемы, основанный на принципе работы гидроэлектростанций. Разработана модель электроэнергетической установки. Расчетным путем подтверждена возможность работы новой электроэнергетической установки в системе водоснабжения. Рассмотрены три варианта распределения полученной электроэнергии в зависимости от расхода воды. Доказана целесообразность размещения электроэнергетической установки в системе водоснабжения Ил. 2, Библиогр. 10.

Ключевые слова: *эффективность работы, система водоснабжения, гидроустановка, чистая энергия, водная энергия, эксплуатационная надежность.*

На данный момент нехватка электроэнергии в современном мире выражена наиболее сильно. Все дело в том, что помимо увеличивающегося населения увеличивается и потребляемое количество электроэнергии. А поскольку экономия электроэнергии значительно бы отразилась на привычном укладе жизни человека, то использовать альтернативные источники энергии, а не строить новые дорогостоящие гидро- и теплоэлектростанции (ГЭС и ТЭС) [1] является перспективным направлением для развития.

Проанализировав данную проблему и ее решение можно прийти к выводу, что на данный момент нет достаточно эффективного и экономичного источника альтернативной энергии [1] который можно бы было установить на промышленном предприятии или, например, в жилом доме. Так, например, солнечные панели [11], аккумулирующие энергию, являются дорогостоящим способом, зависящим от количества солнечных дней в году, а КПД около 17%. Помимо этого требуются преобразователи постоянного тока, а так же необходима постоянная очистка панелей.

Ветрогенераторы [13] в городах так же не являются достаточно эффективным способом получения энергии. Сила ветра постоянно меняется, следовательно варьируется и количество выработанной энергии, помимо этого бывают дни, в которых и вовсе нет ветровых пото-

ков. Например, цена ветрогенератора типа Ecmork составляет не менее ста тыс. руб., даже без учета всей необходимой дополнительной аппаратуры [3].

Наиболее подходящим вариантом решения энергетической проблемы в городской среде можно рассмотреть мини ГЭС [12] с бесколлекторными индукционными гидротурбинами [4]. Достоинствами этих установок является удобство монтажа посредством обводной трубы, получение сразу переменного тока, небольшой вес. Однако недостатки данных установок все же более существенны для городской инфраструктуры, чем положительные их стороны. Так например, к недостаткам этих установок можно отнести ограниченную мощность, не превышающую 3600 Вт [4], необходимость изготовления отвода от основных водных коммуникаций невозможность использования в областях с высокими температурами.

Для решения обозначенной в работе проблемы на основании проведенного выше анализа существующих в настоящее время альтернативных источников энергии нами была разработана и обоснована новая конструкция установки, позволяющей получать дополнительную электроэнергию для освещения домового или промышленной территории при использовании обычной водопроводной системы. При проектировке данной системы было учтено то, большинство построек в России имеет проточную (подпорную) систему водоснабжения [5], в которой вода под напором не циркулирует по трубопроводам, а подается на все этажи самотеком за счет постоянного давления, то есть стоит на подпоре. Поэтому разработанная установка включается в работу и начинает вырабатывать дополнительную электрическую энергию при каждом использовании водопровода [6, 7]. Следует отметить, что для реализации энергоустановки не требуется разработка специального оборудования, а все компоненты стандартизированы и в свободном доступе на российском рынке. Помимо этого, для монтажа домового электроэнергетической установки не требуются специалисты высокой квалификации, поскольку все компоненты хорошо подходят друг к другу и надежны в эксплуатации.

Анализируя пути решения проблемы, следует учесть, что в настоящее время существует несколько вариантов встраиваемых в трубы водоснабжения и канализации небольших электроэнергетических установок, способных вырабатывать электроэнергию за счет падающего потока отработанной воды. Например, устройство генерирующее электроэнергию посредством падения отработанной воды, разработанное в Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, защищенное патентом RU № 2492352, а также устройство для получения электроэнергии от канализационных стоков, защищенное патентом RU № 84474 U1 [2].

Конструкция разработанной домашней электроэнергетической установки показана на рис. 1.

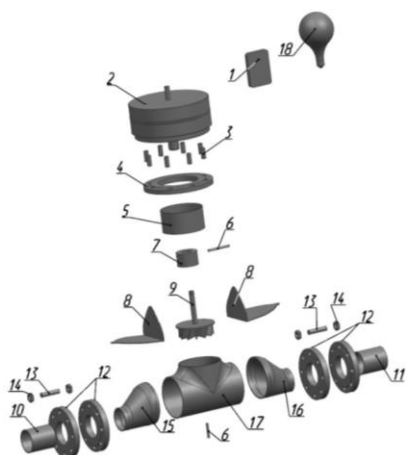


Рис. 1. Основные узлы энергетической установки: 1 – аккумулятор; 2 – электрогенератор; 3 – установочные штифты; 4 – стальной фланец; 5 – стакан-патрубок; 6 – фиксирующие штифты; 7 – переходная втулка; 8 – регуляторы напора воды; 9 – лопастной ротор; 10 – трубопровод для входа воды; 11 – трубопровод для выхода воды; 12 – фланцы; 13 – шпильки для соединения фланцев; 14 – гайки; 15 – входной переход эксцентрический; 16 – выходной переход эксцентрический; 17 – тройник штампованный; 18 – потребитель энергии.

Согласно рис. 1, разработанная конструкция содержит: аккумулятор 1 для накопления электроэнергии; электрогенератор 2 ВГБЖ-02(64)28,5-200-02 серии «ВИНДЭК» [3]; установочные штифты 3 ГОСТ 2128-70 для крепления электрогенератора 2 на фланце 4 ГОСТ 12820 сталь 09Г2С; стакан-патрубок 5 ГОСТ 17378-2001 сталь 09Г2С; фиксирующие штифты 6 ГОСТ 3128-70; переходную втулку 7 с фиксирующим штифтом 6; регуляторы напора воды 8 из стали 09Г2С толщиной 3 мм; ротор 9 диаметром 130 мм с рабочими лопатками; трубопровод 10 для входа воды; трубопровод 11 для выхода воды; фланцы 12 ГОСТ 12820-80 сталь 09Г2С; шпильки 13 ГОСТ 9066-76 для соединения входных и выходных фланцев установки с аналогичными фланцами трубопроводов 10 и 11; гайки 14 ГОСТ 5915-70 для крепления фланцев; входной переход эксцентрический 15 ГОСТ 17378-2001 сталь 09Г2С; выходной переход эксцентрический 16 ГОСТ 17378-2001 сталь 09Г2С; тройник 17 штампованный ГОСТ 17376-2001 сталь 09Г2С; потребитель 18 дополнительной электрической энергии [8]. Так же в системе находятся преобразователи электрического тока и стандартные распределители.

Особенностью данной конструкции так же является то, что лопастной ротор 9 гидротурбины, выполнен из куниали "А" [14], представляющей медно-никелевый сплав, характеризующийся высокими эксплуатационными показателями и коррозионной стойкостью.

Разработанная установка функционирует следующим образом: после открытия любого крана водопроводной сети в магистральном трубопроводе под действием постоянного избыточного давления начинается расход воды и ее движение. Учитывая то, что на входе установки в конфузоре давление и скорость водяного потока увеличивается получаем повышение напоры воды поступающей на лопажки ротора 9 гидротурбины, и увеличение частоты вращения вала ротора, соединенного с электрогенератором 2, вырабатывающем электроэнергию.

После прохода воды через установку в диффузоре давление и скорость потока снижается, а напор нормализуется, таким образом данная система практически не влияет на работоспособность жилых или промышленных водопроводных систем.

Последовательность монтажа электроустановки: Вначале на горизонтальном участке трубопровода сети [5] вырезается отрезок трубы длиной 544 мм и к обоим свободным концам трубопровода привариваются фланцы 12, которые посредством шпилек 13 и гаек 14 соединяются в последствии с аналогичными фланцами, приваренными на входе и выходе воды из установки (рис. 3.)

Сборка турбогенератора установки начинается со сварки входного эксцентрического перехода 15 и выходного эксцентрического перехода 16 с фланцами 12. Входной эксцентрический переход 15 (диффузор) позволяет увеличить диаметр магистрального трубопровода с 89 мм до 159 мм и наиболее полно использовать напор, обеспечивая наибольшую эффективность установки. Затем в переходы 15 и 16 устанавливаются регуляторы напора воды 8, которые на входе в гидротурбину увеличивают давление и скорость потока почти в четыре раза, выполняя роль конфузора, сужающего поток, а на выходе из гидротурбины снижают напор, выполняя роль диффузора, постепенно расширяющего поток. Далее переходы 15 и 16 привариваются к тройнику 17, в верхнем патрубке которого сваркой фиксируется положение ранее установленных на входе и выходе регуляторов напора 8. Затем к стакану-патрубку 5 приваривается фланец 4 для установки с помощью штифтов 3 электрогенератора 2 [3]. Далее через верхний патрубок тройника 17 устанавливается лопастной ротор 9 гидротурбины и центрируется штифтом 6. На вал ротора 9 надевается резиновый диск диаметром 135 мм, предотвращающий выплескивание воды вверх, и ротор гидротурбины посредством переходной втулки 7 и фиксирующего штифта 6 соединяется с электрогенератором 2. Затем стакан-патрубок 5 с приваренным к нему фланцем 4 соединяется неразъемно или на резьбе с верхним патрубком тройника 17. Далее на фланец 4 посредством штифтов 3 устанавливается электрогенератор 2 и проводами через распределители энергии и преобразователи тока соеди-

няется с потребителями электроэнергии 18 и аккумулятором 1, который передает дополнительную электрическую энергию потребителям при неработающей установке [8].

Преимущества разработанной электроэнергетической установки: повышенная мощность по сравнению саналогами при сопоставимых средних показателях расхода воды, производство по соответствующим ГОСТам [9], возможность работы в широком диапазоне температур, хорошую защиту от коррозии, износостойкость, небольшую массу и габариты.

Недостатки установки: необходимость врезки в магистральный трубопровод водопроводной сети, усложнение ее конструкции, незначительное снижение эксплуатационной надежности водопроводной сети, необходимость преобразования постоянного тока в переменный.

Результаты гидравлического расчета разработанной электроэнергетической установки на основании формул с источников [9, 10] приведены ниже. Секундный расход воды-8,9 м³/с; КПД гидротурбины-43,4 %. Мощность гидротурбины -171 кВт. Электрическая мощность на выводах генератора-154 кВт. Потери напора-0,25 м.

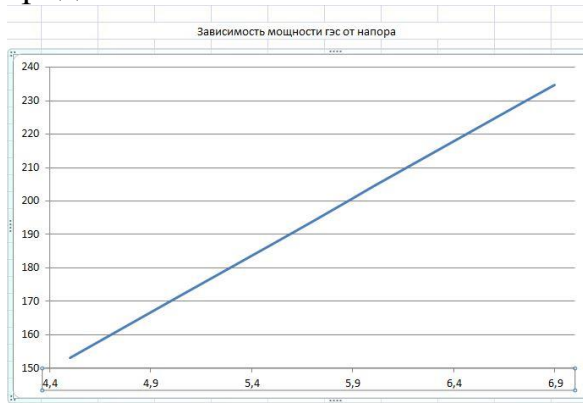
Полученная в результате проведенного гидравлического расчета потеря напора $H = 0,13 \text{ м} + 0,12 \text{ м} = 0,25 \text{ м}$ в разработанной установке свидетельствует о том, что последняя не оказывает значительного влияние на эксплуатационные параметры водопроводной сети промышленных или жилых сооружений.

При разработке типовых электроэнергетических установок могут быть использованы графические зависимости, приведенные на рис. 2. При этом необходимо учитывать группу потребителей воды [15].

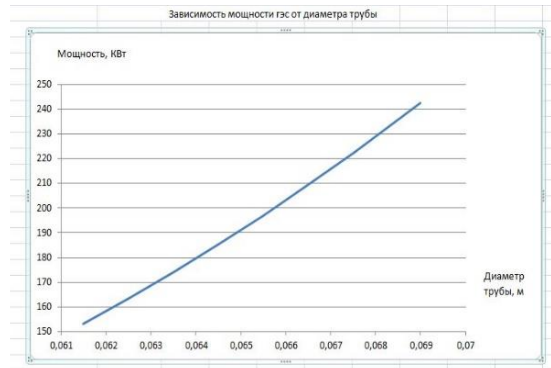
Первая группа потребителей: жилые дома и офисы. В данной группе потребление воды не очень высоко и носит пикообразный характер. Первый – утренний с 7 до 10 часов утра, когда среднестатистический человек умывается, готовит и т. д. Второй – обеденный с 12 до 14 часов дня, когда люди возвращаются домой. Третий – вечерний, когда люди приходят с работы, принимают ванну или душ, ужинают и т. п. Данный пик характерно выражен в период времени с 20 часов до полуночи. Так же стоит учитывать сезон отпусков, когда потребление воды увеличивается, несмотря на то, что не все жители остаются в своих квартирах. В данной группе потребителей воды предусматривается накопление электрической энергии в течение всего дня.

Ко второй группе потребителей воды относятся фонтаны и небольшие бассейны с повышенным потреблением воды. Электроэнергетические установки данной группы потребителей воды способны выполнять расширенный спектр задач, например, питание WI-FI роутера, проигрывание радио и даже заряд мобильных устройств.

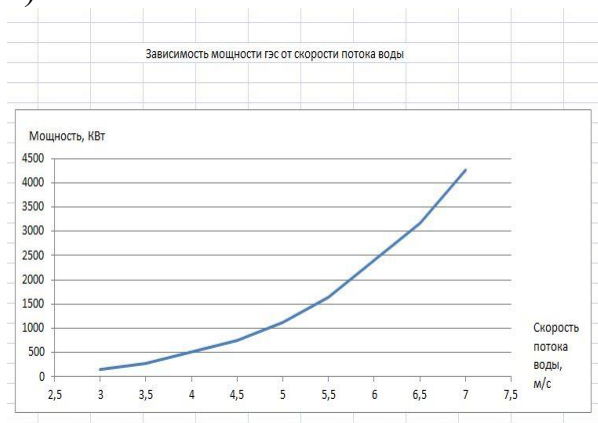
К третьей группе потребителей воды относятся объекты с повышенным потреблением воды, например, предприятия, нуждающиеся в постоянном расходе воды, большие бассейны и аквапарки. Электроэнергетические установки на таких объектах способны вырабатывать достаточное количество электрической энергии для передачи ее в городские сети.



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимости электроэнергетической установки от эксплуатационных факторов: а – напора воды; б – диаметра водопроводной трубы; в – скорости потока воды

Экономические расчеты позволяют сделать вывод о том, что стоимость одной разработанной электроэнергетической установки, составляет порядка двухсот тысяч руб. При этом наиболее дорогостоящим является электрогенератора 2 [3]. стоимостью порядка 5-7 тыс. руб.

Производительность одного разработанного устройства, составляет порядка 1070 кВт/ч в сутки, а всех пяти установок – 5350 кВт/ч в сутки. Учитывая тариф на электроэнергию- 1,01 руб. за один кВт/ч стоимость дополнительной электроэнергии, выработанной системой из пяти разработанных установок за один день составит 5564 рублей [10].

По итогу получается, что уже через 194 дня при расчетном режиме работы, установка будет приносить прибыль, следовательно, ее использование весьма целесообразно.

Список использованной литературы:

1. Гидроэлектростанция [Электронный ресурс] // Интернет ресурс «Свободная энциклопедия» [https:// ru.wikipedia.org/wiki/](https://ru.wikipedia.org/wiki/) (дата обращения 06.11.2018).
2. Пат. № 2492352, РФ, МПК F03B 13/12. Устройство преобразования энергии отработанной воды в электрическую энергию. 10.09.2013 г.
3. Электрогенераторы ВИНДЭК для ветряков и микро ГЭС [Электронный ресурс] // Интернет ресурс «Малая энергетика» http://www.rosinmn.ru/ELEKTRO_alternator_windec.htm (дата обращения 06.11.2018).
4. Мини-ГЭС-малые гидротурбины [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “ Новая генерация ” https://manbw.ru/analytics/mini-GES_hydro-turbine_hydroelectric-power-plant.html (дата обращения 02.12.2018).
5. Макотрина Л.В. Водоснабжение и водоотведение с основами гидравлики: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – 178 с.
6. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике. – М.: Изд-во "Наука", 1984. – 596 с.
7. Бутиков Е.И., Быков А.А.. Физика в примерах и задачах. – М.: Изд-во "Наука", 1979. – 464 с.
8. Осипов А.Г. Зуев А.С. Электроэнергетическая установка в системе водоснабжения многоквартирного дома: Молодежный вестник ИрГТУ. – том 9, № 1.- Иркутск: Изд-во, ИрГТУ 2019. – 125-132 с.
9. СНиП II-3-79* Система нормативных документов в строительстве [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Энциклопедия сантехника” <http://infobos.ru/> (дата обращения 06.11.2018).
10. Расчет гидравлического сопротивления в системе отопления. [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Энциклопедия сантехника” <http://infobos.ru/> (дата обращения 06.11.2018).
11. Принцип работы солнечной батареи: как устроена и работает солнечная панель [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “ Совет инженера ” <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/princip-raboty-solnechnoj-batarei.html> (дата обращения 29.04.2019).
12. Принцип работы мини ГЭС [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Портал альтернативную энергию ” <https://alter220.ru/voda/mini-ges.html> (дата обращения 29.04.2019).
13. Принцип работы ветрогенератора [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Все об альтернативной энергии” <https://tcip.ru/blog/wind/printsip-dejstviya-i-raboty-vetrogeneratora.html> (дата обращения 29.04.2019).

14. Свойства и сферы применения медно-никелевых сплавов [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Металлойд- металлы и сплавы” <https://metalloid.ru/splavy/medno-nikelevye> (дата обращения 29.04.2019).

15. Основные категории потребителей воды [Электронный ресурс] // Интернет ресурс “Лекция” <https://lektsia.com/6x628a.html> (дата обращения 29.04.2019).

УДК 622-1/-9

Разработка метода управления динамическим состоянием рабочих органов горных машин на основе концепции обратных задач динамики

Н.К. Кузнецов¹, И.А. Иов,² Е.С. Долгих¹

1) Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

2) ООО «СЛСи-Джи Эйч», г. Москва

Доклад посвящен проблеме снижения динамических нагрузок горных машин на основе управления динамическим состоянием рабочих органов путем решения обратной задачи динамики по заданному виду их движения. Дается описание математической модели трехмассовой механической системы, с помощью которой могут быть описаны динамические свойства многих горных машин, реализующих заданные технологические процессы или осуществляющих перемещение различных грузов. Определяется управляющее воздействие привода, обеспечивающее желаемый закон изменения упругого момента, и приводятся результаты численного моделирования эффективности предложенной системы управления для ограничения колебательных движений рабочих органов.

Ключевые слова: *динамические нагрузки; трехмассовая расчетная схема; обратная задача динамики; дополнительные обратные связи*

Высокие скорости движения современных горных машин предъявляет высокие требования к уровню их динамических расчетов, вызывая необходимость учета упругих свойств конструкции и разработки методов и средств ограничения колебательных движений, которые приводят к повышенному износу конструкции, снижению производительности и надежности работы машин. Необходимость учета упругих свойств исполнительных механизмов возникает в задачах динамики и управления движением шагающих и роторных экскаваторов, карьерных мехлопат, шахтных подъемных машин и т. д. [1–6]. В качестве расчетных схем подобных машин наряду с двухмассовыми все большее применение начинают получать трехмассовые колебательные системы [7–10]. Эффективным способом управления динамическим состоянием горных машин является использование концепции обратных задач динамики, позволяющей определять структуру и параметры системы управления, желаемый характер движения рабочих органов [11,12].

В настоящем докладе на примере трехмассовой механической системы приводятся результаты исследования эффективности управления колебаниями на основе дополнительных обратных связей, синтезированных путем решения обратной задачи динамики по заданному виду упругого момента.

Исследования проводятся применительно к трехмассовой механической системе с упругими связями, показанной на рис.1. На этой схеме приняты следующие обозначения: J_1 – приведенный момент инерции ротора двигателя и редуктора; J_2 – приведенный момент инерции промежуточных масс, служащих для передач движения от двигателя к рабочим органам или перемещаемым грузам; J_3 – приведенный момент инерции рабочего органа (или перемещаемого груза); $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – обобщенные координаты приведенных масс; c_{12} и b_{12} – коэффициенты жесткости и демпфирования механической передачи движения между двигателем и промежуточными массами; c_{23} и b_{23} – коэффициенты жесткости и демпфирования механической передачи движения между промежуточными массами и рабочим органом (или перемещаемым грузом); M_{dv} – момент, развиваемый приводом; M_c – момент, создаваемой нагрузкой.

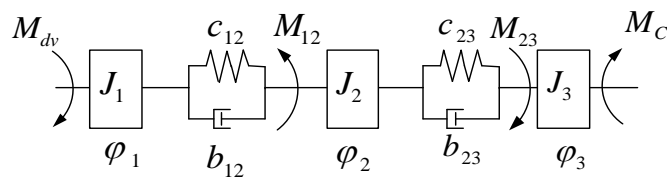


Рис. 1. Трехмассовая расчетная схема

Полагая приведенные массы сосредоточенными, а коэффициенты жесткости и демпфирования постоянными, получим дифференциальные уравнения движения механической системы в операторной форме:

$$J_1 \varphi_1 s^2 = M_{dv} - c_{12} \Delta \varphi_{12} + b_{12} \Delta \varphi_{12} s; \quad (1)$$

$$J_2 \varphi_2 s^2 = c_{12} \Delta \varphi_{12} + b_{12} \Delta \varphi_{12} s - c_{23} \Delta \varphi_{23} - b_{23} \Delta \varphi_{23} s; \quad (2)$$

$$J_3 \varphi_3 s^2 = c_{23} \Delta \varphi_{23} + b_{23} \Delta \varphi_{23} s - M_c, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$; $\Delta \varphi_{23} = \varphi_2 - \varphi_3$ деформации упругих элементов;

$\frac{d}{dt} = s$ оператор Лапласа.

Определим движущий момент привода, который обеспечивает желаемый закон изменения упругого момента M_{23} в виде экспоненциальной зависимости

$$M_{23} = C_1 (e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t}), \quad (4)$$

где C_1 – некоторая постоянная; λ_1 и λ_2 – корни уравнения, такие что $\text{Re } \lambda_{1,2} < 0$.

Для установления связи движущего момента M_{dv} привода с заданным значением упругого момента (4) был использован подход, предложенный в работе [12], и основанный на разделении трехмассовой системы на две парциальные подсистемы, одна из которых состоит из первой J_1 и второй J_2 приведенных масс, связанных между собой упруго-демпфирующими элементами с коэффициентами жесткости c_{12} и демпфирования b_{12} и описывается уравнениями (1) и (2), а вторая – из приведенных масс J_2 и J_3 , соединенных упруго-демпфирующими элементами с коэффициентами жесткости c_{23} и демпфирования b_{23} . И выражения сначала связи упругого момента $M_{12} = (c_{12} + b_{12}s)\Delta\varphi_{12}$ с заданным значением момента (4) во второй парциальной подсистеме с последующим установлением связи найденного момента M_{12} с моментом M_{dv} в первой парциальной подсистеме.

Величина управляющего воздействия определится выражением

$$M_{dv} = D_1 e^{\lambda_1 t} + D_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (5)$$

где $\omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$ – парциальная частота колебаний первой под-

системы; $\omega_{23} = \sqrt{\frac{c_{23}(J_2 + J_3)}{J_2 J_3}}$ – парциальная частота колебаний второй под-

системы; $J_{12} = \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}$ и $J_{23} = \frac{J_2 + J_3}{J_2 J_3}$ – коэффициенты соотношения при-

веденных масс в первой и второй парциальных подсистемах;

$$D_1 = \frac{J_1 E_1}{b_{12} b_{23} \lambda_1^2 + (b_{12} c_{23} + c_{12} b_{23}) \lambda_1 + c_{12} c_{23}}; \quad D_2 = \frac{J_1 E_2}{b_{12} b_{23} \lambda_2^2 + (b_{12} c_{23} + c_{12} b_{23}) \lambda_2 + c_{12} c_{23}};$$

$$E_1 = B_1 [b_{23} \lambda_1^3 + b_{12} b_{23} J_{12} \lambda_1^2 + c_{23} (\lambda_1^2 + b_{12} J_{12} \lambda_1 + \omega_{12}^2)] + C_1 \left[\frac{c_{12} c_{23}}{J_2} + \frac{c_{23} b_{12} \lambda_1}{J_2} + \frac{b_{12} b_{23} \lambda_1^2}{J_2} + \frac{b_{23} c_{12} \lambda_1}{J_2} \right]$$

;

$$E_2 = B_2 [b_{23} \lambda_2^3 + b_{12} b_{23} J_{12} \lambda_2^2 + c_{23} (\lambda_2^2 + b_{12} J_{12} \lambda_2 + \omega_{12}^2)] + C_1 \left[\frac{c_{12} c_{23}}{J_2} + \frac{c_{23} b_{12} \lambda_2}{J_2} + \frac{b_{12} b_{23} \lambda_2^2}{J_2} + \frac{b_{23} c_{12} \lambda_2}{J_2} \right]$$

$$; \quad B_1 = \frac{J_2 K_1}{c_{23} + b_{23} \lambda_1}; \quad B_2 = \frac{J_2 K_2}{c_{23} + b_{23} \lambda_2}; \quad K_2 = C_1 (\lambda_2^2 + \omega_{23}^2 + \lambda_2 b_{23} J_{23}) \quad \text{и}$$

$$K_1 = C_1 (\lambda_1^2 + \omega_{23}^2 + \lambda_1 b_{23} J_{23}).$$

Найденные законы изменения движущего M_{dv} и упругого M_{12} моментов, дают возможность определить требуемый закон изменения ускорения координаты привода. Подставляя в (1) выражение (5), получим

$$\varphi_1 = F_1 e^{\lambda_1 t} + F_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (6) \quad \text{где} \quad F_1 = \frac{D_1 - B_1}{J_1 \lambda_1^2} \quad \text{и} \quad F_2 = \frac{D_2 - B_2}{J_1 \lambda_2^2}$$

Требуемые законы изменения движущего момента M_{dv} (5) и координаты перемещения первой массы φ_1 (6), обеспечивающие желаемый характер изменения упругого момента M_{23} (4), являющиеся функциями времени, позволяют сформировать различные структуры дополнительных обратных связей для управления движением в трехмассовой колебательной системе.

Сформируем, например, структуру и параметры системы управления колебаниями на основе дополнительных обратных связей по координате φ_1 привода и ее производным. С этой целью, выразив из (6) временные зависимости через скорость и ускорение движения привода и подставляя их в (5) получим зависимость, определяющую структуру и параметры системы управления колебаниями на основе дополнительных обратных связей по скорости и ускорению движения привода

$$M_{dv} = \frac{D_2 F_1 \lambda_1 - D_1 F_2 \lambda_2}{F_1 F_2 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \varphi_1 s^2 + \frac{F_2 D_1 \lambda_2^2 - F_1 D_2 \lambda_1^2}{F_1 F_2 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \varphi_1 s = K_c \varphi_1 s^2 + K_v \varphi_1 s, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad K_v = \frac{F_2 D_1 \lambda_2^2 - F_1 D_2 \lambda_1^2}{F_1 F_2 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \quad \text{и} \quad K_c = \frac{D_2 F_1 \lambda_1 - D_1 F_2 \lambda_2}{F_1 F_2 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} - \text{коэффициенты}$$

усиления дополнительных обратных связей по скорости и ускорению движения привода.

Аналогичным образом на основе выражений (4) и (5) была определена структура и параметры системы управления колебаниями на основе дополнительных обратных связей по упругому моменту M_{23}

$$M_{dv} = \frac{D_2 \lambda_1 - D_1 \lambda_2}{C_1 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} M_{23} s^2 + \frac{D_1 \lambda_2^2 - D_2 \lambda_1^2}{C_1 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} M_{23} s = K'_c M_{23} s^2 + K'_v M_{23} s. \quad (8)$$

$$\text{где} \quad K'_v = \frac{D_1 \lambda_2^2 - D_2 \lambda_1^2}{C_1 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \quad \text{и} \quad K'_c = \frac{D_2 \lambda_1 - D_1 \lambda_2}{C_1 \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} - \text{коэффициенты уси-$$

ления дополнительных обратных связей по скорости и ускорению упругого момента M_{23} .

Структурная схема управления колебаниями в трехмассовой механической системе на основе дополнительных обратных связей приведена на рис. 2. На этом рис. штриховая линия 1 обозначает дополнительную обратную связь по производным упругого момента M_{23} , а 2 – дополнительную обратную связь по скорости и ускорению движения привода.

С целью проверки эффективности использования предложенных дополнительных обратных связей было выполнено численное моделирование

уравнений движения трехмассовой механической системы (1–3) с движущими моментами, определяемыми выражениями (7) и (8), при следующих параметрах системы:

$$J_1 = J_2 = J_3 = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad c_{12} = c_{23} = 3000 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад};$$

$$b_{12} = b_{23} = 15 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

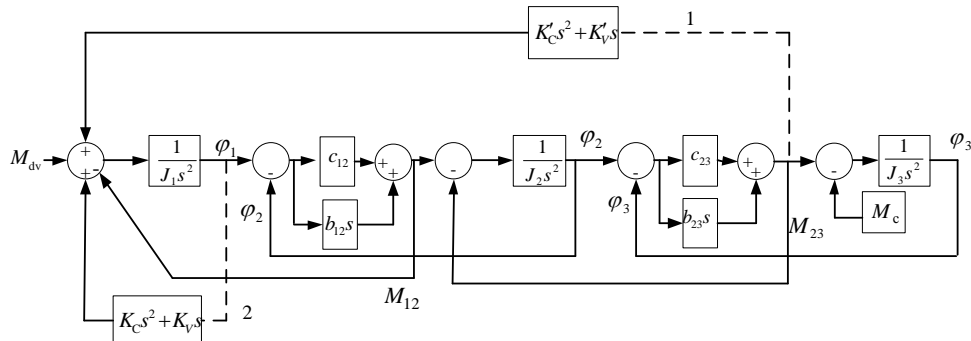


Рис. 2. Структурная схема трехмассовой системы с обратными связями

Численное моделирование проводилось в среде *Matlab Simulink* при ступенчатом изменении движущего и нагрузочного моментов. При этом регистрировались значения упругих моментов M_{12} и M_{23} . Проведенные исследования показали высокую эффективность использования предложенных дополнительных обратных связей для снижения колебательных движений в трехмассовой механической системе. Эти связи позволяют снизить амплитуды упругих колебаний и сократить время переходных процессов в системе.

В качестве иллюстрации, на рис. 3 и 4 приведены осциллограммы изменения упругих M_{12} , M_{23} и управляющего M_{dv} моментов для исходной механической системы (1), системы с дополнительными обратными связями по скорости и ускорению привода движения (2) и с дополнительными обратными связями по производным упругого момента M_{23} (3).

В режиме пуска в исходной системе (кривая 1) наблюдаются значительные колебания упругих моментов M_{12} и M_{23} (см. рис. 3). При этом величина перерегулирования для момента M_{12} составляет 51% с декрементом колебаний $\delta = 0.0912$, для M_{23} – 114% и $\delta = 0.283$, соответственно. Длительность переходных процессов $t_{пр} = 1.5$ сек. Использование дополнительных обратных связей по скорости и ускорению привода (кривая 2) позволяет снизить перерегулирование момента M_{12} в режиме пуска до 42% и почти полностью исключить повторные колебания. Амплитуда колебаний момента M_{23} снижается на 14%, а декремент колебаний возрастает до $\delta = 0.4$ по сравнению с исходной системой. Длительность переходного

процесса снижается до $t_{tp} = 0.7$ сек. Применение дополнительных обратных связей по производным упругого момента M_{23} (кривая 3) позволяет получить переходные процессы экспоненциального вида, с полным отсутствием перерегулирования, при длительности переходного процесса, равной $t_{tp} = 0.7$ сек.

Изменение момента нагрузки M_c в исходной системе (кривая 1) приводит к существенным колебаниям упругих моментов: величина перерегулирования для момента M_{12} составляет 35% с декрементом колебаний $\delta = 0.0912$, а для момента M_{23} – 36% и $\delta = 0.09$, соответственно (см. рис. 3). Длительность переходных процессов находится в пределах $t_{tp} = 1.5$ сек. Применение дополнительных обратных связей по скорости и ускорению привода (кривая 2) позволяет значительно снизить колебания моментов M_{12} и M_{23} при почти полном отсутствии перерегулирования и сокращении времени переходных процессов. Отметим, что использование дополнительных обратных связей по производным упругого момента M_{23} (кривая 3) позволяет получить монотонный переходный процесс для момента M_{23} , однако приводит к значительным колебаниям упругого момента M_{12} при длительности переходного процесса, равного $t_{tp} = 0.7$ сек.

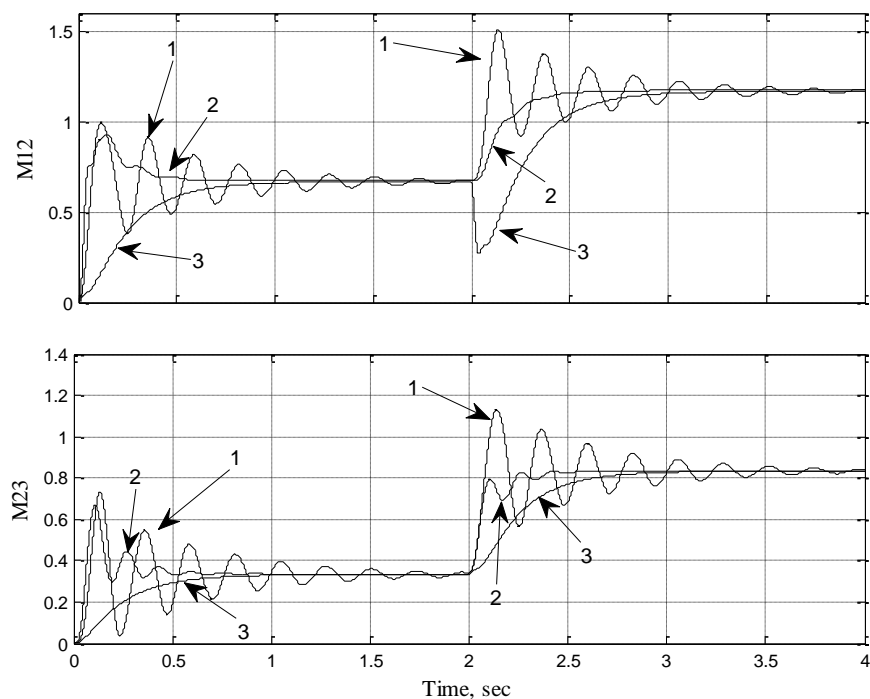


Рис. 3. Осциллограммы упругих моментов в режиме пуска и изменения нагрузки

Проведенные исследования показали как работоспособность предложенного метода управления динамическим состоянием горных машин, основанного на решении обратной задачи динамики по заданному виду движения рабочего органа, так и его эффективность для выбора структуры и параметров дополнительных обратных связей, обеспечивающих ограничение колебательных движений.

Список использованной литературы

1. Волков Д. П., Каминская Д.А. Динамика электромеханических систем экскаваторов: монография. – М. : Машиностроение, 1971. – 384с.
2. Нижник Н.В., Шемятин А.О. Программное обеспечение для определения нагрузок в главной линии прокатных клетей при нестационарных режимах работы // Машинознавство : Матеріали 8-ої регіональної науково-методичної конференції. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – С. 77 – 81.
3. Корняков М. В. Защита шахтных подъемных установок от динамических нагрузок при движении подъемного сосуда в стволе. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – 164 с.
4. Леоненко А.С. Методы и технические решения повышения эффективности эксплуатации горных машин в регионах холодного климата: монография. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2010. – 280 с.
5. Степанов А.Г. Теоретические основы динамики подъемных машин // Горное оборудование и электромеханика, 2013. № 7. С. 31. 40.
6. Степанов А.Г., Корняков М.В. Динамика машин: монография. – 2-е изд. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2014. – 412 с.
7. Герасимьяк Р.П., Пуртова Е.С. Синтез коррекции трехмассовой электромеханической системы подъемных механизмов // Автоматика. Автоматизация. Электротехн. компл. и системы. – 2000. – №1 (6). – С.65–72.
8. Бургин Б. Ш. Вариант трехмассовой электромеханической системы стабилизации скорости с измерением лишь угловой скорости двигателя // Электротехника. – 2002. – № 3. – С. 42–47.
9. Кузнецов Б. И., Чаусов А.А., Шурло О.В. Цифровая модель обмоточной машины как трехмассовой системы // Вестник НТУ «ХПИ»: сборник научных работ – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – №10. – Т.2 – С.313–314.
10. Перельгина А.Ю. Численное моделирование упругих колебаний трехмассовой системы // Наука. Технологии. Инновации : Материалы всерос. научн. конф. молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск, 2006. – Ч. 1. – С. 114-115.
11. Kuznetsov, N.K., Iov, I.A., Iov, A.A. Synthesis of controlling the movement of digging mechanisms of excavators on the basis of inverse dynamic problems //Lecture Notes in Mechanical Engineering (9783319956299). – 2019.– С. 205-213
12. Kuznetsov N K, Iov I A ect. 2018 Sinthesis of motion control of three-mass oscillation system based on solution of inverse dynamic problem Proceedings of the international conference: aviamechanical engineering and AER-Advances in Engineering Research 158. – 2018. – С.240-245.

Как российские университеты теряют подготовку инженерных кадров

П.В. Королев¹, М.М. Ратинер²

- 1) Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
- 2) «Эбилити» Лтд, г. Тель-Авив, Израиль

Доклад посвящен проблеме потери подготовки инженерных кадров в российских университетах. В мировой практике известны различные пути подготовки инженеров на новых принципах и подходах. Авторы доклада выносят на обсуждение коллег вопрос методологического обеспечения по использованию инновационных технологий при подготовке инженерных кадров на примере изучения общеинженерных дисциплин.

Ключевые слова: *методологическое обеспечение по использованию инновационных технологий при подготовке инженерных кадров, качество образования, успеваемость, интерактивные методы обучения, «дальтон-план», «проблемное обучение», электронное дистанционное обучение.*

В работе [1] были подробно рассмотрены тенденции последних лет в развитии высшего технического образования в России, суть которых в следующем: экзамены по общеинженерным дисциплинам заменяются на зачеты, курсовые проекты отменяются, количество лекционных часов сокращается в два или три раза, изучение некоторых предметов, например сопротивление материалов, для инженеров-механиков отменяется, издание учебных пособий на бумажных носителях становится роскошью.

Также в этой работе были приведены статистические данные о том, что 54% поступивших в университет абитуриентов имели баллы ЕГЭ по математике на уровне 2 и 3 по пятибалльной системе оценивания, а 46% - на уровне 4 и 5. Мировой опыт говорит о том, что: «... если студент не понимает математики, то он не способен стать инженером».

Такой подход к подготовке инженерных кадров в самое ближайшее время приведет к тому, что российские инженеры смогут только эксплуатировать зарубежную технику, а создавать отечественные образцы машиностроительной продукции им будет уже не под силу, следовательно, ни о какой «модернизации» не может быть и речи при таких условиях.

Но самое главное в том, что эта плачевная ситуация ежегодно только ухудшается, как говорят специалисты наступает «необратимый упадок»:

второй год подряд до сотрудников всех кафедр ИрННТУ доводятся «плановые показатели». В текущем году они отражены в документе: «Плановые показатели на 2018 – 2019 учебный год по текущей деятельности по кафедре (название кафедры)».

В «Плановых показателях...» требуют от преподавателя обеспечить уровень успеваемости не ниже 85%, а уровень отчисляемых студентов за неуспеваемость не более 10%. Преподаватели, которые не обеспечат плановых показателей, лишаются премий.

Еще одна новость: «Более 20 вузов с этого года будут начислять при поступлении дополнительные баллы к ЕГЭ членам движения «Юнармия». Об этом сообщил ТАСС начальник главного штаба движения Роман Романенко» [2]. Специалисты с сарказмом прогнозируют, что «За международный рейтинг российских ВУЗов и качество будущих специалистов теперь можно не волноваться. Будущее цифровой России в надежных руках».

Изучение общеинженерных дисциплин, таких как: Механика, Прикладная механика, Техническая механика, Теоретическая механика, Сопротивление материалов, Теория механизмов и машин, Детали машин, требует от обучающегося знания математики на уровне не ниже, чем 4 и 5.

Анализ успеваемости семи групп студентов-механиков (180 человек) трех разных специальностей (сварщики, автомеханики, горное дело) по общеинженерным дисциплинам показал, что сессию в срок сдали в среднем 51% обучающихся. По сложившейся многолетней практике, студенты, которые не сдали сессию в срок, сдают свои долги в следующем семестре. Успеваемость в этом случае увеличилась уже до 78%. Такая ситуация наблюдается на многих кафедрах.

Часть преподавателей сделали свой выбор и быстро перестроились под требования «Плановых показателей ...»: успеваемость во время сдачи сессии у них возросла до 95% и даже 100%, рассуждая так: «раз руководство университета интересуется не качеством и уровнем знаний студентов, а процент успеваемости, то преподаватели выполняют то, что от них требуют».

Правда иногда случаются курьезные случаи: преподаватель жалуется, что не может добиться 100% успеваемости, он готов поставить положительную оценку за экзамен, но студент не был на его занятиях ни разу, и даже не идет получать положительную экзаменационную оценку.

Таким образом, низкий уровень успеваемости студентов во время сессии (51%) объясняется следующими причинами:

- 54% студентов имели балл ЕГЭ по математике на уровне 2 и 3 по пятибальной системе оценивания, так как большинство из них приехали из деревень, поселков и небольших городков Иркутской области, Забайкальского края и республики Бурятии, где в школах не всегда даже бывают профильные учителя,

- до 15 % студентов вынуждены совмещать учебу и работу, так как родители не могут обеспечить их финансово, и число таких студентов ежегодно увеличивается из-за роста бедности в стране,

- в некоторых группах от 10% до 25% контингента студентов составляют обучающиеся из таких стран, как: Монголия, Таджикистан, Узбекистан, Туркмения. У большинства из них низкий уровень школьной подготовки накладывается на плохое знание русского языка.

Для новых исследований была выбрана целевая группа обучающихся в количестве 212 человек (9 учебных групп), решивших связать свою будущую деятельность с нефтедобычей. Эта группа, также имеет вышеперечисленные проблемы при обучении, но обладает одной особенностью.

Суть особенности в следующем: родители у 95% обучающихся, никак не связаны с нефтяной отраслью, но прекрасно знают, что наибольшая зарплата у сотрудников предприятий, связанных с нефтедобычей.

Сами обучающиеся часто подчеркивают, что их будущая зарплата в несколько раз, а то и на порядок будет превышать зарплату молодых специалистов в Иркутске, которая в настоящее время составляет 15, 20 и очень редко 25 тыс. рублей. Эти обучающиеся понимают, что получение специальности, связанной с нефтедобычей, является их единственным шансом подняться по ступенькам социального лифта в жизни.

Поэтому у них имеется высокий стимул к получению высшего образования, которое им даст: «... возможность устроиться на высокооплачиваемую и престижную работу и получать высокую зарплату». А высокая зарплата позволит: «... купить родителям то, чего у них сейчас нет, позволит быть финансово независимым человеком, материально помогать родителям, иметь возможность путешествовать по стране и миру, поднять на ноги младшую сестру, содержать в будущем свою семью и т.д.».

Часть обучающиеся из стран Средней Азии, являются старшими детьми в многодетных семьях и согласно их традициям, должны помогать не только родителям, но и младшим братьям и сестрам, когда закончат обучение, вернуться на родину и начнут работать. Другая часть, начинает сразу же оформлять гражданство РФ во время учебы в университете, планируя в дальнейшем перебраться для работы в более благополучные страны.

Для решения проблем, выбранной целевой группы обучающихся, была поставлена следующая цель: разработать методологическое обеспечение по использованию инновационных технологий при подготовке инженерных кадров при изучении комплекса общеинженерных дисциплин с применением электронного дистанционного обучения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы три следующие задачи: повышение качества образования, повышение успеваемости студентов и мотивирование студентов на приобретения знаний.

Для решения каждой из трех задач были разработаны и выполнены соответствующие мероприятия.

Например, для повышения качества образования и успеваемости, был подготовлен Проект Служебной записки с конкретными предложениями для руководства университета. Авторы обратились с просьбой к студентам помочь в редактировании предложений Проекта по повышению успеваемости и разместили текст Проекта на двух электронных площадках: на сайте ИрНИТУ по адресу: <https://int.istu.edu/extranet/> в профиле «Живая лента», и на сайте «ВКонтакте» по адресу: <https://vk.com/id484117991>. За месяц данный Проект просмотрели более 100 человек на сайте ИрНИТУ, и 1000 человек «ВКонтакте». Предложения авторов и студенческие предложения приводим в тезисной форме.

Предложения авторов по повышению качества образования и успеваемости:

1. Низкая успеваемость студентов и большой процент отчисляемых студентов, объясняется тем, что половина студентов, поступивших в ИрНИТУ, имели оценку ЕГЭ по математике на уровне 2 и 3.

2. Многолетняя ежегодная преподавательская практика показывает, что 50% студентов сдают предметы текущей сессии в следующем семестре. Предлагаем «расширить» временные рамки для сдачи экзаменов студентами без последствий для них. В этом случае университет должен будет оплачивать преподавателям время, потраченное ими на дополнительные консультации в следующем семестре, так как университет принимает абитуриентов с очень низкими баллами ЕГЭ по математике и физике.

3. В документе «Плановые показатели на 2011. 2019 учебный год по текущей деятельности по кафедре ...» предлагаем немедленно отменить пункт № 7 (№8), с требованием к преподавателю обеспечить уровень успеваемости не ниже 85%, и пункт № 9 (№10), с требованием уровня отчисляемых студентов за неуспеваемость. Обоснование отмены этого пункта такое: считаем, что требование об уровне успеваемости студентов не ниже 85% является преступным против студентов и против преподавателей.

4. Преступление против студентов заключается в том, что университет берет деньги с родителей за обучение их детей, а не может обеспечить получение качественного образования. При таком подходе к обучению студентов они не станут профессионалами и настоящими инженерами, а после окончания университета они столкнутся с проблемой поиска работы из-за низкого уровня образования.

5. Слово «преступление» - это не игра слов. Еще два года такой практики и университет выпустит первых «специалистов», родители которых, имея на руках документ «Плановые показатели на 2018 – 2019 учебный год по текущей деятельности по кафедре ...», в котором обозначен

требуемый от преподавателей уровень успеваемости, обратятся в суд с иском о взыскании убытков, причиненных оказанием образовательных услуг ненадлежащего качества, на основании Закона РФ от 07.02.1992 № 2300-1 «О защите прав потребителей». Университету придется возвращать не только сумму за стоимость обучения, но и неустойку и компенсацию морального вреда. Сами студенты прекрасно понимают, как достигается высокий уровень успеваемости в 85, 95 и даже 100%.

6. Преступление против преподавателей заключается в том, что требование об успеваемости не ниже 85% снижает их мотивацию на качественное обучение студентов, повышение своей квалификации и кругозора, развращает преподавателей несоответствием выставляемых ими оценок и знаниями студентов, и самое главное проводит среди преподавателей отрицательную селекцию. До недавнего времени сфера обучения и Преподаватель подвергались только положительной селекции: из-за низкой зарплаты здесь работали в основном патриоты своего дела, болеющие за престиж страны и желающие передать свой опыт и знания молодому поколению инженерных кадров.

7. Потребуется всего несколько лет и уровень регионального инженерного образования резко снизится. У этого преступления есть один плюс – выпускники нашего университета будут не востребованы не только за рубежом, но и в Москве, куда они переезжают из-за невозможности найти достойную по оплате работу в регионе. Тогда проблема утечки инженерных кадров из Иркутска в Москву будет решена. Например, по данным Иркутскстата в 2018 году Иркутскую область по разным причинам покинуло 74 000 человек [3].

8. Статистика показывает, что количество бедных людей в стране увеличивается ежегодно. Многие родители не могут финансово обеспечить своих детей во время их учебы в университете. Поэтому студентам приходится подрабатывать, пропуская занятия, времени на учебу не остается. Число таких студентов ежегодно увеличивается, следовательно, процент неуспевающих студентов будет также увеличиваться.

9. Предлагаем руководству университета разработать программу поддержки и трудоустройства таких студентов в стенах ИрНИТУ, чтобы они работали, но имели возможность посещения занятий.

Предложения студентов по повышению качества образования и успеваемости:

1. Раннее время начала занятий в 8-15. Желательно перенести начало занятий на 9 часов утра, так как уже снизится час пик, уменьшатся пробки на дорогах и можно без проблем добраться до университета.

2. Учебу в субботу отменить, так как не удастся полноценно отдохнуть за один день в воскресенье.

3. Снизить большой объем домашней работы, все вечера заняты учебой, не остается свободного времени на хобби.

4. Работаю, потому, что родители не могут меня обеспечить финансово. Поэтому не хватает времени на учебу. Предлагаю решение этого вопроса: стипендию сделать 20-30 тыс. рублей, плюс дополнительные бонусы за отличную учебу, а рабочий день (учебный) сделать 8-ми часовым.

5. Из-за соревнований за ИрНИТУ студентам-спортсменам приходится пропускать занятия. Требуется решение этой проблемы на уровне ректората ИрНИТУ.

6. Неинтересно учиться по некоторым предметам, так как мало нового оборудования в лабораториях по выбранной специальности.

7. Неудачное расписание занятий: окна между парами или малое количество пар в один из дней недели.

8. Предлагаем доплачивать определенную сумму к стипендиям старост групп в случае высокой успеваемости в группе.

9. Образцы студенческих комментариев на сайте «ВКонтакте»: «Послабления ради процента успеваемости имеют двоякую роль, все прекрасно всё понимают».

«Здравствуйте. Очень обидно, что сокращают часы важных для нас предметов. Так же обидно, что китайское техническое образование считается лучшим, чем русское. Даже впал в небольшую депрессию из-за того, что наша страна не лучше, а то и хуже Китая».

Аналогичным образом решались и другие поставленные задачи, путем разработки соответствующих мероприятий. Перечислим некоторые из этих мероприятий:

- применение интерактивных методов обучения: «дальтон-план» и «проблемное обучение»,

- общение со студентами (краткие консультации, ответы на вопросы, разбор неправильно решенных контрольных задач в конце лекции и др.) на сайте «ВКонтакте», так как университетский сайт «Живая лента» студенты игнорируют,

- отличные результаты дает взаимодействие со студентами старшекурсниками из диаспор таких стран, как: Монголия, Туркмения, Узбекистан, Таджикистан, которые уже сдали общеинженерные дисциплины и поэтому очень доступно и понятно объясняют младшекурсникам необходимость 100% посещения занятий, своевременной сдачи отчетов по практическим работам и выполнения всех требований преподавателя,

- авторы на собственном опыте убедились, что многолетняя проблема по преемственности и последовательности преподавания общеинженерных дисциплин, то есть, какая дисциплина, за какой дисциплиной должна идти, не решается в университете десятилетиями. Например, невозможно преподавать такую дисциплину, как «Теория механизмов и машин»,

если обучающиеся еще не изучали «Теоретическую механику». А дисциплину «Детали машин» невозможно преподавать, если студенты не изучали «Соппротивление материалов».

Многие мне не поверят, но с 2019 года студентам-механикам направления горное дело перестали читать курс «Соппротивление материалов», а курсовой проект по «Деталям машин и основам конструирования» пока еще оставили! Для снижения отрицательных последствий от такого решения, авторы в 2018 году подготовили Учебное пособие по Механике (включающий такие дисциплины, как: «Соппротивление материалов», «Теория механизмов и машин», «Детали машин и основы конструирования») объемом 150 страниц, которое снабжено 137 иллюстрациями высокого качества. Учебное пособие использовалось в качестве раздаточного материала на занятиях не только для студентов заочной формы обучения, но и дневной. Эффект от такого пособия (авторы в шутку, а может быть и всерьез назвали его «Комикс по механике») оказался положительным. Поэтому, в 2019 году авторы подготовили второе издание Учебного пособия по Механике объемом уже 250 страниц (200 иллюстраций) и дополнили его основами дисциплин: «Теоретическая механика» и «Взаимозаменяемость»,

- также авторы подготовили и выложили в сети интернет «Электронный учебный курс для дистанционного обучения в рамках образовательной программы «Теория механизмов и машин» для направления «Нефтегазовое дело». Студенты, с помощью своих гаджетов (телефонов), без проблем используют этот материал в любое удобное для них время.

Дополнительно был проведен эксперимент, суть которого в следующем: студентам было предложено два варианта изучения дисциплины «Теория механизмов и машин». Вариант 1, стандартный: преподаватель читает лекции, проводит практические занятия и в конце семестра проводится текущий контроль. Вариант 2, инновационный: студенты самостоятельно изучают теоретические основы дисциплины по «Электронному учебному курсу ...», выполняют контрольные практические задания (схемы механизмов и машин берутся из учебников по специальным дисциплинам, которые студенты еще не изучали), и защищают изученный материал в удобное для них время до конца семестра.

Результаты эксперимента показали, что 1-ым вариантом воспользовались 60% студентов, а 2-ым - 40% студентов.

Для решения поставленных трех задач также использовались мероприятия, связанные с общим процессом воспитания студентов (порядочность, честность, взаимопомощь и др.). В данной статье эти мероприятия не рассматриваются.

Таким образом, разработанные мероприятия позволили решить поставленные три задачи: повышение качества образования, повышение

успеваемости студентов и мотивирование студентов на приобретения знаний. Например, текущая успеваемость повысилась до 70%, качество образования также улучшилось, так как студенты решали на практических занятиях не отвлеченные примеры, а конкретные практические задания из своих будущих специальных дисциплин. При самостоятельном изучении дисциплины и для защиты изученного материала студентам пришлось искать дополнительные данные в сети интернет [4].

Решение трех задач в свою очередь обеспечило достижение выбранной цели: разработать методологическое обеспечение по использованию инновационных технологий при подготовке инженерных кадров при изучении комплекса общеинженерных дисциплин с применением электронного дистанционного обучения.

На примере студентов-нефтяников была отработана методология учебно-познавательной деятельности: формы, способы, мероприятия.

Разработка Учебных пособий по Механике, включающих весь комплекс общеинженерных дисциплин, научный потенциал которых применяется при выполнении реальных практических расчетах в дисциплинах: «Теория механизмов и машин» и «Детали машин», позволяет исключить автономное использование каждой общеинженерной дисциплины и перейти к системному подходу обучения студентов, как при изучении общеинженерных дисциплин, так и при изучении специальных дисциплин на основе единой методологии.

Список использованной литературы:

1. Королев П.В. Ратинер М.М. Проблемы подготовки инженерных кадров для машиностроительных производств лесного комплекса. Труды XIII международного Евразийского симпозиума 18-21 сентября 2018 г. – Екатеринбург, 2018, с. 216-223.

2. Более 20 российских вузов решили добавить членам «Юнармии» при поступлении дополнительные баллы к ЕГЭ/
<https://www.novayagazeta.ru/news/2019/03/29/150435-boleerossiyskih-20-vuzov-reshili-dobavit-chlenam-yunarmii-pri-postuplenii-dopolnitelnye-bally-k-egе>

3. «74 тысячи человек уехало из Иркутской области в 2018 году»,
https://news.yandex.ru/story/74_tysyachi_chelovek_uekhalo_iz_Irkutskoj_oblasti_v_2018_godu--3c6679e8a1df196cc4140d26185f19f6.

4. Королев П.В. Инновационные продукты лесного комплекса глазами молодого поколения (по результатам работы выставки SibWoodExpo 2018), Иркутск, 15.10.2018г., 7 с.,
<https://promdevelop.ru/science/innovatsionnye-produkty-lesnogo-kompleksa-glazami-molodogo-pokoleniya/>.

Особенности формирования динамического состояния вибрационных технологических машин на основе введения дополнительных упругих связей

Р.С. Большаков, К.Ч. Выонг

Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Рассматривается вибрационная технологическая машина, расчётная схема которой представляет собой механическую колебательную систему с твёрдым телом на упругих опорах. В структуру системы дополнительно введён упругий элемент, обеспечивающий возможности для настройки динамического состояния вибрационной машины за счёт изменения положения относительно центра тяжести твёрдого тела и регулировки его жёсткости. Предлагается метод математического моделирования, предназначенный для оценки динамического состояния вибрационной технологической машины. При этом расчётной схеме вибрационной машины сопоставляется структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Приведены аналитические соотношения для получения соответствующих динамических режимов.

Ключевые слова: *вибрационное поле, соотношение координат, вибрационные технологические машины, коэффициент связности внешних воздействий, межпарциальные связи.*

Вибрационные технологии широко используются в различных производственных процессах строительной индустрии, на предприятиях горнодобывающей, химической промышленности, в машиностроении при вибрационном упрочнении поверхностей деталей, транспортировке, сортировке и ориентировании деталей в автоматических технологических комплексах [1 – 5].

Многообразие технологических процессов предполагает разнообразие технологических машин, характерной особенностью которых является выполнение технологической функции в условиях повышенных динамических нагрузений. Подходы в оценке факторов, влияющих на динамическое качество работы машин и оборудования, представлены в [6, 7]. Также для оценки динамического состояния вибрационных технологических машин могут быть использованы подходы, характерные для теории автоматиче-

ского управления, когда расчётная схема технического объекта соотносится с эквивалентной моделью в виде системы автоматического управления [8 – 11].

Особенностью работы технологических вибрационных машин является достаточно высокий уровень динамических взаимодействий элементов системы, изменение приведённых параметров массоинерционной и упруго-диссипативной природы, что требует соответствующего внимания к вопросам расширения возможностей в оценке, контроле, формировании и коррекции динамических состояний рабочих органов [12 – 15]. Такие состояния определяются чаще всего определёнными закономерностями распределения амплитуд колебаний.

В предлагаемом докладе на примере механической колебательной системы с твёрдым телом рассматриваются возможности метода структурного математического моделирования в задачах оценки динамического состояния вибрационной технологической машины при введении дополнительных связей.

I. Некоторые общие положения. Постановка задачи исследования

На рис. 1 показано, что основная расчётная схема определяется рабочим органом в виде твёрдого тела массой M и моментом J , опирающимся через упругие элементы с жесткостями k_1, k_2, k_3 , связанные с опорной поверхностью.

Внешнее воздействие, создающее динамическое состояние вибрационной технологической машины (её рабочего органа) создаётся двумя гармоническими синфазными силами, приложенными соответственно в тт. A_2, B_2 , как показано на фиг. 2.

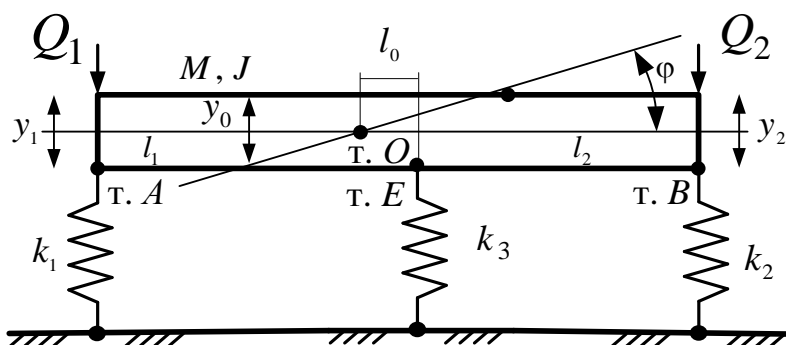


Рис. 1. Расчётная схема механической колебательной системы с твёрдым телом на упругих опорах

Между силовыми факторами Q_1 и Q_2 имеется функциональная зависимость

$$Q_2(t) = \alpha Q_1(t), \quad (1)$$

где α – коэффициент связности, который может принимать отрицательные, положительные, в том числе, и нулевые значения.

Найдем выражения для кинетической и потенциальной энергий системы, необходимые для построения математической модели системы [8, 11]:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2, \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 y_2^2 + \frac{1}{2} k_3 y_E^2, \quad (3)$$

где $y_1 = y_0 - l_1 \varphi$, $y_2 = y_0 + l_2 \varphi$, $\varphi = c(y_2 - y_1)$, $y_E = y_0 - l_0 \varphi$, $y_0 = a y_1 + b y_2$ в вышеприведённых соотношениях между координатами y_1 , y_2 , y_0 и φ используются

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}; \quad (4)$$

Примем также, что $d = \frac{l_0}{l_1 + l_2}$.

Уравнения движения системы во временной форме в системе координат y_1 , y_2 можно записать в виде

$$y_1''(Ma^2 + Jc^2) + k_1 y_1 + k_3(a-d)^2 y_1 - y_2''(Jc^2 - Mab) + k_3(a-d)(b+d) = Q_1(t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & y_2''(Mb^2 + Jc^2) + k_2 y_2 + k_3(b+d)^2 y_2 - \\ & - y_1''(Jc^2 - Mab) + k_3 y_1(a-d)(b+d) = Q_2(t). \end{aligned} \quad (6)$$

После преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях в соответствии с [8, 10] получим систему уравнений (5), (6) в операторной форме

$$\begin{aligned} & \bar{y}_1(Ma^2 + Jc^2)p^2 + \bar{y}_1[k_1 + k_3(a-d)^2] - \\ & - \bar{y}_2(Jc^2 - Mab)p^2 + \bar{y}_2 k_3(a-d)(b+d) = \bar{Q}_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \bar{y}_2(Mb^2 + Jc^2)p^2 + \bar{y}_2[k_2 + k_3(b+d)^2] - \\ & - \bar{y}_1(Jc^2 - Mab)p^2 + \bar{y}_1 k_3(a-d)(b+d) = \bar{Q}_2. \end{aligned} \quad (8)$$

В уравнениях (6), (7) принимается $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) – комплексная переменная, значок $\bar{}$ над переменной означает её изображение по Лапласу [8, 10].

Имея уравнения (6), (7) в операторной форме, можно построить математическую модель исходной системы в виде структурной схемы эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления [11], как показано на фиг. 3.

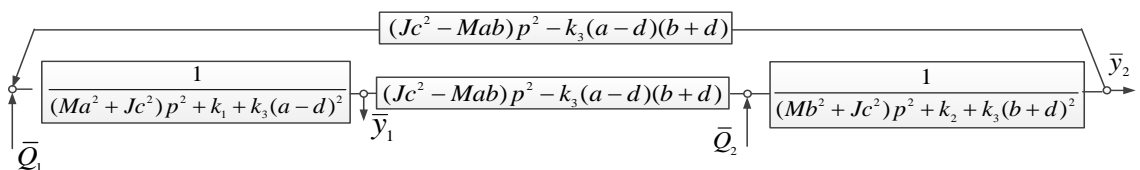


Рис. 2. Структурная схема (структурная математическая модель) исходной системы (рис. 1).

Структурная схема эквивалентной модели в виде системы автоматического управления имеет два входных сигнала \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 и состоит из двух парциальных систем, связанных между собой звеном колебательной структуры.

Основной задачей исследования является оценка возможностей регулирования динамического состояния вибрационной технологической машины за счёт изменения параметров дополнительного упругого элемента.

II. Оценка динамических свойств системы

Характерными для системы является так называемые парциальные частоты

$$n_1^2 = \frac{k_1 + k_3(a-d)^2}{Ma^2 + Jc^2}, \quad (9) \quad n_2^2 = \frac{k_2 + k_3(b+d)^2}{Mb^2 + Jc^2}. \quad (10)$$

При наличии в себе только одного внешнего сигнала (по координате \bar{y}_1 или \bar{y}_2) частоты, определяемые из (8), (9), соответствуют частотам динамического гашения колебаний по координатам \bar{y}_1 или \bar{y}_2 .

Отметим, что на частоте

$$\omega_{нар}^2 = \frac{k_3(a-d)(b+d)}{Mb^2 - Jc^2} \quad (11)$$

обнуляется межпарциальная связь, что соответствует режиму «автономных» движений по координатам \bar{y}_1 , \bar{y}_2 .

При одновременном действии двух силовых факторов, связанных между собой соотношением (1), передаточные функции системы принимают вид

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_0} = \frac{[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_3(b+d)^2] + \alpha[(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3(a-d)(b+d)]}{A(p)}, \quad (12)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_0} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_3(a-d)^2] + [(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3(a-d)(b+d)]}{A(p)}, \quad (13)$$

$$\text{где } A(p) = [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_3(a-d)^2][(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_3(b+d)^2] - [(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3(a-d)(b+d)]^2 = 0 \quad (14)$$

— является частотным характеристическим уравнением системы.

Для оценки динамического состояния системы введём понятия передаточной функции межпарциальных связей

$$W_{12}(p) = i = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha \left[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_3(a-d)^2 \right] + \dots}{\left[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_3(b+d)^2 \right] + \dots} \dots + \frac{\left[(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3(a-d)(b+d) \right]}{\dots + \alpha \left[(Jc^2 - Mab)p^2 - k_3(a-d)(b+d) \right]}. \quad (15)$$

Выражение (15) является основным для оценки реализации возможных динамических состояний (или структур вибрационного поля).

1. Если принимается, что $\bar{y}_1 = 0$, когда система находится в режиме динамического гашения колебаний, то соответствующая частота определится выражением

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{\alpha k_3(a-d) \left[\alpha(a-d) - (b+d) \right] - k_2}{Mb^2 + Jc^2 + \alpha Jc^2 - \alpha Mab}. \quad (16)$$

2. Если рассматривается режим динамического гашения колебаний по координате \bar{y}_2 , то соответствующая частота определяется выражением

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{k_1\alpha + k_3(a-d) \left[\alpha(a-d) + (b+d) \right]}{Ma(\alpha a - b) + Jc(1 + \alpha)}. \quad (17)$$

Соотношение $i = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$ между координатами также может принимать различные значения. Формула общего вида будет выглядеть следующим образом

$$\omega_i^2 = \frac{\alpha k_1 - ik_2 + k_3 \left[\alpha(a-d)^2 - (a-d)(b+d) - i(b+d)^2 + i\alpha(a-d)(b+d) \right]}{M \left[(\alpha a - b)(a + ib) \right] + Jc^2 \left[(1-i)(1+\alpha) \right]}. \quad (18)$$

Случай, когда передаточная функция межпарциальных связей принимает значение, равное единице, соответствует структуре вибрационного поля, характерного для отсутствия угловых колебаний, что можно увидеть на частоте:

$$\omega_{i=1}^2 = \frac{\alpha k_1 - k_2 + k_3 \left[\alpha(a-d)^2 - (a-d)(b+d) - (b+d)^2 + \alpha(a-d)(b+d) \right]}{M(b^2 + ab - \alpha ab - \alpha a^2)}. \quad (19)$$

Выражение I можно рассматривать как обобщённую функцию настройки вибрационного поля при постоянных значениях коэффициентов жёсткости k_1, k_2 , массоинерционных параметрах M, J .

При наличии значений коэффициента жёсткости k_3 при заданном значении a и b , можно выбирать значения частот возбуждения вибростенда, обеспечивающих работу при выбранном i , то при заданных параметрах структуры вибрационного поля естественно задаётся и коэффициент связности движения.

Если параметры вибрационного поля не укладываются к регламент не укладываются в регламент технологического процесса, то возможно использование ресурса изменения параметра d , который, в физическом смысле, соответствует изменению положения точки E , где крепится упругий элемент с изменяемой жёсткостью k_3 .

Заключение

Таким образом система автоматической коррекции и поднастройки вибрационного поля может осуществляться изменением жёсткости только одного настраиваемого упругого элемента. В случае необходимости диапазон средств, корректирующих динамические свойства вибрационной технологической машины может быть существенно расширен за счёт изменения положения точки E крепления упругого элемента k_3 , коэффициента связности внешних воздействий α , а также за счёт вариации в определённых пределах коэффициента связности амплитуд колебаний точек рабочего органа i , представляющего собой, по существу, передаточную функцию межпарциальных связей.

Технология автоматической настройки вибрационного поля требует использования информации об амплитудах колебаний рабочего органа (это координаты y_1 и y_2), а также значение l_0 , определяющего положение т. E . Поисковый режим для выбора параметров и порядок управления приводами для перемещения дополнительной упругой связи с жёсткостью k_3 , реализуются типовыми пакетами прикладных программ на стандартных микропроцессорах. Аналогичным образом обрабатывается и подбор значений жёсткости пневмобаллона, обеспечивающего необходимую упругую дополнительную связь с жёсткостью k_3 .

Что касается других параметров системы, то они могут не рассматриваться как элементы системы автоматического управления динамическим состоянием технологической вибрационной машины.

Список использованной литературы:

1. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография / Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 569 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-на-Дону: изд-во центр ДГТУ, 2008. – 693 с.
3. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. Москва: Наука, 1981. – 319 с.
4. Clarence W. De Silva. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press, 2000. 957 p.
5. Blekhman I.I. Vibrational mechanics. (Nonlinear dynamic effects, general approach, applications). – Singapore et al.: World Scientific Publishing Co, 2000. – 510 p.
6. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – 708 p.
7. Ким Д.П. Теория автоматического управления (том 1) Том1. Линейные системы. - М.: Физматлит, 2003. -288 с.
8. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск: ИГУ. 2008. – 523 с.
9. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
10. Кашуба В.Б., Елисеев С.В., Большаков Р.С. Динамические реакции в соединениях элементов механических колебательных систем. – Новосибирск: Наука, 2016. – 331 с.

11. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи) : монография – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – 692 с.

12. Елисеев С.В. Новые подходы в оценке динамических свойств технических объектов при одновременном действии нескольких гармонических возмущений / С.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, К.Ч. Выонг // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. Т. 22. № 6 (137). С. 19-33.

13. Елисеев С.В. Вопросы развития методологических основ в решении задач динамики транспортных и технологических машин / С.В. Елисеев, А.С. Миронов, К.Ч. Выонг // В сборнике: транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. Материалы I международной научно-практической конференции. – 2018. С. 69-79.

14. Елисеев С.В., Большаков Р.С., Николаев А.В. Развитие подходов в задачах динамики технологических машин и транспортных средств при вибрационных нагружениях // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 3 (64). С. 44-53.

15. Елисеев С.В., Большаков Р.С., Николаев А.В. Неудерживающие связи во взаимодействиях элементов систем: оценка динамических реакций связей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (58). С. 27-34.

УДК 519.62, 519.63

О разработке универсального алгоритмического обеспечения исследования свободных колебаний систем взаимосвязанных твердых тел, прикрепленных к стержню

А.Д. Мижидон, В.В. Гармаева, А.В. Харахинов

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская 40В, строение 1

В докладе обсуждается алгоритмическое обеспечение комплекса программ, исследования свободных колебаний класса механических систем, представляющих собой системы взаимосвязанных твердых тел, прикрепленных с помощью пружин к упругому стержню (к балке Эйлера-Бернулли или к балке Тимошенко). Алгоритмическое обеспечение основано на аналитико-численных методах исследования обобщенных математических моделей данного класса механических систем, представляющих собой гибридные системы дифференциальных уравнений, заданной структуры. Сравнительный анализ численных расчетов, проведенных предложенным методом с расчетами проведенными другими способами, известными из литературы, показывает достоверность и универсальность предлагаемого алгоритмического обеспечения.

Ключевые слова: алгоритмическое обеспечение, система твердых тел, упругий стержень, обобщенная математическая модель, комплекс программ.

При исследовании механических колебаний элементов различных конструкций, деталей и механизмов машиностроения, авиастроения, приборостроения во многих случаях расчетными схемами исследования является твердое тело (или система твердых тел), соединенное упругими связями со стержнем. В этом случае применение вариационного принципа Гамильтона-Остроградского для построения уравнений динамики таких механических систем приводит к рассмотрению гибридных систем дифференциальных уравнений (ГСДУ) [1], исследованию которых до настоящего времени не уделялось должное внимание. Под ГСДУ понимается система дифференциальных уравнений, состоящая из обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных

В работах зарубежных исследователей, для различных расчетных схем механических систем, представляющих собой системы твердых тел, прикрепленной упругими связями к балке Эйлера-Бернулли [2-10] или к балке Тимошенко [11-20] и в ряде других, для исследования свободных колебаний каждый раз разрабатываются специальные, ориентированные на них аналитические, численно-аналитические методы, или используется метод конечных элементов. При этом основные трудности, возникающие при исследовании, прежде всего, связаны, с многообразием вариантов закрепления абсолютно твердых тел к упругим стержням. Для преодоления подобных затруднений в приведенных работах [2-20] обычно производится разбиение стержней на участки с последующим сшиванием решений в точках крепления упругих связей. Однако такой подход сопряжен со значительным увеличением объема вычислений при отыскании аналитического решения, а при численном решении требует большой подготовительной работы. Другой, более продуктивный путь, обсуждаемый в докладе, состоит в исследовании обобщенных моделей, описываемых ГСДУ, с помощью относительно простого и достаточно наглядного математического аппарата обобщенных функций [21-24].

Под обобщенной математической моделью некоторого подкласса систем твердых тел, установленных с помощью пружин на упругом стержне, понимается ГСДУ заданной структуры.

ГСДУ в случае балки Эйлера-Бернулли имеет вид [22]:

$$\begin{cases} A\ddot{q} + Cq + \bar{C}(Dq - \bar{u}) = 0, \\ a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) + c \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(x, t) = \sum_{i=1}^m k_i (d^{iT} q(t) - u(x, t)) \delta(x - a_i), \end{cases} \quad (1)$$

где x – переменная, описывающая координатную ось, совпадающую

с балкой; $q(t)$ n -мерная вектор-функция, описывающая перемещение системы твердых тел; $u(x, t)$ – скалярная функция, описывающая поперечные перемещения точек стержня; $\bar{u}(t)$ – m -мерная вектор-функция с компонентами $u(a_1, t), u(a_2, t), \dots, u(a_m, t)$; $a_j, (j = \overline{1, n})$ – координаты точки закрепления пружин к балке; A, C – заданные, постоянные $n \times n$ – матрицы; \bar{C} – заданная, постоянная $n \times m$ – матрица; D – заданная, постоянная $m \times n$ – матрица; d^i – n -мерный вектор, составленный из строк матрицы D ; $a, c, a_i, k_i, (i = \overline{1, m})$ – заданные постоянные, причем $0 \leq a_i \leq l$; $(\cdot)^T$ – операция транспонирования.

Функция $u(x, t)$ описывает поперечные перемещения точек балки. В связи с этим на функцию $u(x, t)$ наложены некоторые граничные условия, соответствующие тем или иным способам закрепления концов:

$$\Gamma_1(u(0, t)) = 0, \quad \Gamma_2(u(l, t)) = 0, \quad (2)$$

где l – длина стержня.

Обобщенная математическая модель системы взаимосвязанных твердых тел, упруго прикрепленной к балке Тимошенко, ГСДУ имеет вид [24]

$$\begin{cases} A\ddot{z} + Bq + C(Dq - \bar{u}) = 0, \\ EI \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} - EI \frac{\partial^3 \beta(x, t)}{\partial x^3} - \rho I \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho I \frac{\partial^3 \beta(x, t)}{\partial x \partial t^2} + \\ + \rho F \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^m k_i (d^{iT} q(t) - u(x, t)) \delta(x - a_i), \\ EI \frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial x^3} - EI \frac{\partial^2 \beta(x, t)}{\partial x^2} - \rho I \frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial x \partial t^2} + \rho I \frac{\partial^2 \beta(x, t)}{\partial t^2} + \chi GF \beta(x, t) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\beta(x, t)$ – функция, описывающая угол сдвига, E – модуль Юнга, G – модуль сдвига балки, I – момент инерции поперечного сечения балки, ρ – плотность материала балки, F – площадь поперечного сечения балки, χ – параметр, характеризующий поперечное сечение балки.

Теоретические основы исследования свободных колебаний с учетом демпфирования в упругих связях в обобщенной математической модели (1) приведены в [23].

Для обобщенных математических моделей (1) и (3) на основе единого подхода обсуждаются аналитико-численные методы построения частотного уравнения и собственных форм колебаний, положенные в основу построения алгоритмического обеспечения. Суть единого подхода заключается в привлечении математического аппарата обобщенных функций. Для нахождения обобщенных решений с помощью гармонической подстановки или экспоненциальной подстановки, зависящей от скалярных и функциональных коэффициентов, ГСДУ сводится к вспомогательной алгебраическо-дифференциальной системе уравнений, относительно коэффициентов.

Для нахождения функциональных коэффициентов вводится их представление в виде некоторых зависимостей от функций типа Грина, нахождение которых сводится к вспомогательным краевым задачам, которые решаются аналитически. Найденные функции, позволяют получить систему линейных однородных алгебраических уравнений относительно скалярных коэффициентов и значений функциональных коэффициентов, вычисленных в точках крепления упругих связей со стержнем. Условие нетривиальности решений системы линейных алгебраических уравнений определяет частотное уравнение системы.

Разработанное на основе аналитико-численных методов алгоритмическое обеспечение программно реализовано на языке Фортран [25,26].

Отметим, математические модели, построенные на основании вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, типовых расчетных схем систем твердых тел, прикрепленных к стержню, рассмотренные при исследовании свободных колебаний зарубежными исследователями [2-20], являются частными случаями предложенных обобщенных математических моделей (1) и (3). Поэтому для исследования свободных колебаний можно использовать аналитико-численные методы построения частотного уравнения [22-24]. Сравнительный анализ численных расчетов, проведенных предложенным методом с расчетами проведенными другими способами, известными из литературы, показывает достоверность и универсальность аналитико-численных методов исследования свободных колебаний. В целом, алгоритмическое обеспечение, разработанные применительно к обобщенным математическим моделям, позволяют с единых позиций исследовать различные классы механических систем, представляющие собой многообразие систем твердых тел, соединенных упругими связями со стержнями, в зависимости от различных вариантов закрепления абсолютно твердых тел к упругим стержням при тех или иных инженерных гипотезах исследования.

Список использованной литературы

1. Мижидон А.Д., Мижидон К.А. Собственные значения для одной системы гибридных дифференциальных уравнений // Сибирские электронные математические известия. 2016. Т. 13. С. 911-922.
2. D. W. Chen. The exact solution for free vibration of uniform beams carrying multiple two-degree-of-freedom spring-mass systems // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – № 295 – Pp. 342–361.
3. T.P. Chang, C.Y. Chang. Vibration analysis of beams with a two-degree-of-freedom spring-mass system // Journal of Solids and Structure. – 1998. – № 35 (5–6). – Pp. 383–401.
4. Cha P.D. Free vibrations of a uniform beam with multiple elastically mounted two-degree-of-freedom systems // Journal of Sound and Vibration 307 (2007) 386-392.

5. Naguleswaran S. Transverse vibration of an Euler-Bernoulli uniform beam carrying several particles //Int.J.Mech.Sci. 2002. 44:2463-2478.
6. Wu J.-J., Whittaker A.R. The natural frequencies and mode shapes of a uniform cantilever beam with multiple two-DOF spring-mass systems, Journal of Sound and Vibration 227(1999) 361-381.
7. Naguleswaran S. Transverse vibration of an Euler-Bernoulli uniform beam carrying several particles //Int.J.Mech.Sci. 2002. 44:2463-2478.
8. Su H., Banerjee J.R. Exact natural frequencies of structures consisting of two part beam-mass systems // Struct. Eng.and Mech. 2005. 19(5):551-566.
9. Wu J.S. Alternative approach for free vibration of beams carrying a number of two-degree of freedom spring-mass systems. // J.Struct. Eng. 2002. 128:1604-1616.
10. Wu J.-S., Chen D.-W. Dynamic analysis of uniform cantilever Beam carrying a number of elastically mounted point masses with dampers. Journal of Sound and Vibration. – 2000. – 229 (3) – P.549-578.
11. Majkut L. Free and forced vibration of Timoshenko beams described by single difference equation. Journal of theoretical and applied mechanics. 2009. Vol. 47, I. 1. Pp. 193-210.
12. Yesilce Y., Demirdag O., Catal S. Free vibrations of a multi-span Timoshenko beam carrying multiple spring-mass systems. Sadhana. 2008. Vol. 33, P. 4. Pp. 385–401.
13. Kukla S. Application of Green functions in frequency analysis of Timoshenko beams with oscillators. Journal of Sound and Vibration. 1997. Vol. 205, I. 3. Pp. 355-363.
14. Yesilce Y., Demirdag O., Catal S. Free vibrations of a multi-span Timoshenko beam carrying multiple spring-mass systems. Sadhana. 2008. Vol. 33, P. 4. Pp. 385–401.
15. Yesilce Y. Free and forced vibrations of an axially-loaded Timoshenko multi-span beam carrying a number of various concentrated elements. Shock and Vibration. 2012. No.19. Pp. 735–752.
16. Yesilce Y. Differential transform method and numerical assembly technique for free vibration analysis of the axial-loaded Timoshenko multiple-step beam carrying a number of intermediate lumped masses and rotary inertias. Structural Engineering and Mechanics, 2015. Vol. 53, No. 3. Pp. 537-573.
17. Wu J.S., Chen D.W. Free vibration analysis of a Timoshenko beam carrying multiple spring–mass systems by using the numerical assembly technique. 2001. Vol. 50, Issue 5. Pp. 1039–1058.
18. Magrab E. B. Natural Frequencies and Mode Shapes of Timoshenko Beams with Attachments. Journal of Vibration and Control. 2007. Vol. 13, I. 7. Pp.905-934.
19. Xu S., Wang X. The discrete singular convolution for analyses of elastic wave propagations in one-dimensional structures. Applied Mathematical Modeling. 2010. Vol. 34, I. 11. Pp. 3493-3508.

20. Eftekhar Azam S., Mofid M., Afghani R. Dynamic response of Timoshenko beam under moving mass. Scientia Iranica. 2013. Vol. 20, I. 1. Pp. 50-56.

21. Мижидон А. Д. Теоретические основы исследования одного класса гибридных систем дифференциальных уравнений // Математический анализ, Итоги науки и техн. Сер. Современ. Мат. И ее прил. Темат. Обз. 2018. Т. 155. С. 38–64.

22. Мижидон А.Д., Цыцыренова М.Ж. Обобщенная математическая модель системы твердых тел, установленных на упругом стержне // Вестник ВСГУТУ. 2013. № 6. С. 5-12.

23. Mizhidon A.D. Modelling of mechanical systems basing on interconnected differential and partial differential equations // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS), 2017, vol. 10, no. 1, pp. 22-34

24. Мижидон А.Д., Харахинов А.В. Гибридная система дифференциальных уравнений, описывающая системы твердых тел, прикрепленных к балке Тимошенко // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2018. № 1. С. 88-101.

25. Мижидон А.Д., Баргуев С.Г., Дабаева М.Ж., Гармаева В.В. Расчет собственных частот балки Эйлера-Бернулли с прикрепленными твердыми телами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612387 – 18.02.2015.

26. Мижидон А.Д., Харахинов А.В., Гармаева В.В. Расчет собственных частот балки Тимошенко с прикрепленными твердыми телами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613600 – 22.03.2017.

УДК 629.1

Построение шагающей машины с использованием перестраиваемых шарнирных механизмов

В.С. Балбаров, Н.М. Рабданова

ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

В работе рассматриваются вопросы построения механической системы шагающей машины с ортогональными движителями. Для обеспечения движителем маршевого движения, маневрирования синтезирован пятизвенный перестраиваемый шарнирный механизм. При этом движение машины с заданной скоростью осуществляется при постоянной частоте вращения кривошипа механизма, а маневрирование – изменением

параметров шарнирного механизма с помощью устройства, аналогичного рулевому управлению автомобиля.

Все решения по построению механической системы апробированы испытанием лабораторного образца восьминой шагающей машины.

Ключевые слова: *шагающая машина, ортогональный движитель, перестраиваемые шарнирные механизмы.*

Машины, использующие шагающий принцип передвижения, способны передвигаться по естественной, неподготовленной поверхности, подобно представителям живого мира. Это свойство определяет области человеческой деятельности, где использование шагающих машин целесообразно и выгодно. Это работа в труднодоступных местах без подготовки дорог; в условиях завалов и разрушений после катастроф [1]; в местах, трудно или совсем непроходимых для колесной и гусеничной техники (болотистые поверхности, крутые склоны и т.д.) [2, 3]; в местах, где необходима техника с экологически щадящим воздействием на растительный покров (тундра, экологически охраняемые территории) [4, 5]; в местах, где для передвижения можно использовать свойство неподвижности стопы ноги во время опорной фазы (вертикальные и наклонные поверхности, трубы, колонны и т.д.) [6, 7]. Этот список может продолжаться по мере развития и совершенствования шагающих машин.

Шагающая машина, как мехатронная система, представляет собой симбиоз механической системы и системы управления. Разработка этих систем связана с необходимостью выполнения ряда условий, обеспечивающих организацию шагания. Эти условия наглядно демонстрируются шагающим животным миром. И если брать пример с живой природы, то можно в определенной мере провести аналогии между костно-мышечной системой, например лошади, и механической системой шагающей машины, нервной системой и мозгом и системой управления соответственно. Однако, прямое копирование животного мира нецелесообразно, ибо животные, как самовоспроизводящиеся, самоорганизующиеся “машины” являются итогом миллионов лет эволюции и обладают огромным диапазоном функций, в том числе и при обеспечении передвижения, большинство из которых не требуется транспортным или технологическим шагающим машинам.

Механизмы движителей большинства различных проектов и экспериментальных образцов шагающих машин структурно подобны ногам человека, животных или насекомых и представляют собой механизмы с большим числом управляемых степеней свободы, с нелинейными зависимостями изменения скоростей и моментов приводов в течение каждого шага. Длительность шага может составлять доли секунды уже при скорости движения пешехода. Поэтому, для реализации движений необходима развитая система управления в реальном режиме времени, сервопривода с высоким

быстродействием и большим ресурсом работы [8]. Все это приводит к высокой стоимости машины, сложности обслуживания и эксплуатации.

Кроме структурно зооподобных движителей существуют движители на основе пантографных механизмов, которые также требуют управление ведущими звеньями в процессе каждого шага[9]. В ортогональных движителях движение стопы относительно корпуса организовано в двух плоскостях: горизонтальной, параллельной продольной и поперечной осям корпуса и ортогональной ей вертикальной плоскости. Это например, робот Ambler [10]. Перемещение корпуса относительно стоек-опор осуществляется двухзвенником, звенья которого приводятся в движение сервоприводами, управляемыми компьютером.

Известны разработки шагающих машин грунтовой проходимости в ВолГТУ [11], у ортогональных движителей которых цикловые механизмы размещены в вертикальной плоскости. Здесь ведущие звенья механизмов вращаются с постоянной скоростью при заданной скорости движения машины, но недостатками являются “тракторный поворот” и практическое отсутствие адаптации к неровностям поверхности. Тем не менее, эти машины показали свою эффективность при применении в сложных условиях эксплуатации [12,13].

В данной работе рассматриваются принципы и методики построения ортогональных шагающих движителей на основе перестраиваемых шарнирных механизмов и механической системы шагающей машины в целом.

Н.В. Умновым предложен ортогональный шагающий движитель [14], у которого необходимая траектория движения стопы ноги относительно корпуса машины образуется сложением движений двух плоских механизмов в ортогональных плоскостях: вертикальной и горизонтальной плоскостях корпуса. В вертикальной плоскости нужно простое движение: опускание и подъём стопы в определенные моменты цикла шагания. Это может быть обеспечено, например, гидроцилиндром или каким-либо прямолинейно-направляющим механизмом. В горизонтальной плоскости корпуса, в обращенном движении (в котором удобно рассматривать движения горизонтального механизма относительно стойки-корпуса) стопа ноги должна перемещаться по траектории, эквидистантой траектории центра корпуса при кинематически точном повороте. Синтез такого механизма не предоставляется возможным.

Если рассматривать приближенный поворот, то задачу поворота можно разбить на две подзадачи. Первая - воспроизведение горизонтальным механизмом движителя семейства дуг окружностей положительной и отрицательной кривизны K_M , включая прямую, с соответствующим изменением скорости воспроизводящей точки (стопы движителя) механизма. Вторая подзадача - структурно-кинематическое обеспечение перехода с одной дуги окружности на другую.

Диапазон кривизн K_M семейства дуг окружностей горизонтального механизма i -го движителя:

$$\frac{-K_{\max}}{\sqrt{(1+BK_{\max})^2 + D^2K_{\max}^2} + h_oK_{\max}} \leq K_M \leq \frac{K_{\max}}{\sqrt{(1-BK_{\max})^2 + D^2K_{\max}^2} - h_oK_{\max}}.$$

где B и D – геометрические параметры ориентации i -го движителя вдоль поперечной и продольной осей корпуса машины;

$K_{\max} = 1/R_{\min}$ – минимальный радиус поворота центра корпуса шагающей машины;

$h_o = h(r_1, r_2, \dots, r_m)$ – функция m постоянных параметров механизма.

При этом скорость воспроизведения этих дуг окружностей определяется следующей зависимостью:

$$V_m = V_o \cdot [\sqrt{(1 \pm BK)^2 + D^2K^2} \pm h_o \cdot K],$$

где V_o – аналог скорости механизма при воспроизведении прямой;

V_m – аналог скорости механизма при воспроизведении дуги окружности кривизной K_M , соответствующей кривизне K траектории центра корпуса шагающей машины.

Таковы исходные данные для синтеза передаточно-направляющего шарнирного механизма.

Для решения этой задачи синтезирован пятизвенный регулируемый направляющий механизм на основе диады Чебышева, который обеспечивает требуемое движение стопы в горизонтальной плоскости при

$-K_{\max} \leq K \leq K_{\max}$ [15]. Перемещение стопы ноги производится при вращении кривошипа механизма с постоянной скоростью, а изменение кривизны траектории и скорости стопы производится перестройкой механизма путем перемещения управляющего звена. Управляющие звенья всех движителей шагающей машины кинематически связаны и управление маневрированием машины осуществляется аналогично управлению автомобилем – поворотом одного звена, аналогично повороту рулевого колеса у автомобиля [16].

Так как кривошипы всех движителей вращаются синхронно с одинаковой частотой, постоянной для определенной скорости движения ШМ, управление циклом шагания сводится к обеспечению опускания ног до касания грунта и подъема в нужные моменты цикла шагания, соответствующего одному обороту кривошипа. Поэтому, управление процессом шагания может быть организовано даже с помощью простых релейных схем.

Для изменения кривизны движения стопы относительно корпуса, в структуру механической системы машины введены специальные звенья-компенсаторы. Математическим моделированием перемещений механической системы машины определены оптимальные параметры компенсаторов [17].

Данная концепция построения механической системы ШМ апробирована при проектировании лабораторного образца восьминогой шагающей машины (рис.1).



Рис. 1 Лабораторный образец восьминой шагающей машины

Испытания лабораторного образца подтвердили возможность создания полноразмерной шагающей машины с относительно низкой стоимостью, сравнимой по уровню сложности обслуживания и эксплуатации с автомобилем или трактором.

Список использованной литературы

1. Батанов А. Ф. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций / А. Ф. Батанов, С. Н. Грицынин, С. В. Муркин // Симпозиум по робототехнике и мехатронике. Москва, ВВЦ, 4-6 ноября 2008 г. — С.37-66.
2. Артоболевский И. И. Особенности и возможности шагающих машин / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Вопросы земледельческой механики, — 1978. — С.41.
3. Брискин Е. С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. — 2013. — № 1 (1). — С.6-14.
4. Чернышев В.В. Исследование механизма взаимодействия опорных элементов (стоп) шагающих машин со слабыми и экологически ранимыми грунтами / В. В. Чернышев // Состояние и перспективы развития дорожного комплекса: Сборник научных трудов международной конференции. БГИТА. —2001. —Выпуск 2. — С.35-36.
5. Gorinevky D., Schneider A. Force control in locomotion of legged vehicles over rigid and soft surfaces / D. Gorinevky, A. Schneider // International Journal of Robotics Research. —no 2. — pp.4-23.

6. Роботы вертикального перемещения : монография / В.Г. Градецкий, М.Ю. Рачков ; Рос. акад. наук. Отд-ние пробл. машиностроения, механики и процессов управления. Ин-т проблем механики РАН. - Москва : [б. и.], 1997. - 223 с. :
7. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В.Г. Градецкий, В.Б. Вешников, С.В. Калиниченко, Л.Н. Кравчук ; Рос. акад. наук. Ин-т проблем механики. - Москва : Наука, 2001. - 360 с.
8. URL:<http://cyberneticzoo.com>
9. Waldron K. J. Configuration design of the adaptive suspension vehicle / K. J. Waldron, V. J. Vohnout, A. Pery, R. B. Mcghee // International Journal of Robotics Research. — 1984. — no 2, — pp. 37-48.
10. Simmons R. An integrated walking system for the Ambler planetary rover / R. Simmons, E. Krotkov // Proceedings of IEEE Robotics and Automation Conference. — 1991. — pp.2086-2091.
11. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями: монография / Под ред. Е. С. Брискина. — М.: Машиностроение, 2009. — 191 с.
12. Брискин Е.С., Калинин Я.В., Мирошкина М.В. Способ достижения минимальных затрат энергии на перемещение шагающего робота при его движении по неровному грунту // Проблемы механики современных машин: Материалы VII международной конференции - Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. - Том 1. с. 45-48.
13. Брискин Е.С., Калинин Я.В. Об энергетически эффективных походках шагающих роботов // Экстремальная робототехника. - 2017. -Т. 1. -№ 1. С. 146-150.
14. Артоболевский И.И., Бессонов А.П., Умнов Н.В. Проектирование движителей шагающих машин // Тр. III Междунар. конгресса по ТММ. - Белград, 1971. - С. 172-177.
15. Bessonov A.P., Balbarov V.S., Umnov N.V. Study of Propelling Agents Construction Features of Orthogonal Walking Robots Using Plane Mechanisms. // Prep. of V CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators. - Udine, Italy, 1984. - P. 19-27.
16. Балбаров В.С. Механизмы управления маневрированием шагающей машины с ортогональными движителями //Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – Улан-Удэ, 2012. – №3(38).-С.51-56.
17. Балбаров В.С. Моделирование движения шагающей машины с ортогональными движителями. // Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО`11): Материалы IV Международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2011 – с.77-80.

Новые свойства маятника на вращающемся валу механической системы

А.И. Артюнин, О.Ю. Суменков

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15;
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Проведено механико-математическое моделирование движения маятника, установленного с возможностью свободного вращения на валу ротора электродвигателя, закрепленного в корпусе на упругих опорах. Выявлены особенности движения маятника в диапазоне от нуля до заданной величины угловой скорости ротора электродвигателя при наличии в этом диапазоне собственных частот колебаний механической системы. Установлено, что при изменении момента трения в опоре маятника возможен такой режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость вращения маятника равна одной из собственных частот колебаний механической системы. Результаты проведенного численного эксперимента при механико-математическом моделировании движения маятника на вращающемся валу подтвердили результаты ранее проведенного натурного эксперимента о возможном появлении эффекта «застревания» маятника для механических систем общего вида.

Ключевые слова: *механическая система, собственная частота, угловая скорость, маятник, эффект «застревания».*

1. **Введение.** Уникальным объектом исследований и практического применения в механике является маятник. Колебания маятника с неподвижной точкой подвеса под действием силы тяжести изучали ещё основоположники механики Г. Галилей [1], И. Ньютон [2], Х. Гюйгенс [3]. Исследования движения маятника с малыми углами отклонения положили начало линейной теории механических колебаний. Другое направление исследований возникло, когда стали изучать движение маятника с колеблющейся точкой подвеса [4], [5]. Основополагающими в этой области исследований являются работы академиков Н.Н. Боголюбова [6], [7] и П.Л. Капицы [8], [9].

Для исследования движения маятника с колеблющейся точкой подвеса, как правило, проводилось с использованием метода усреднения и его приложения получили в работах [10-13] или метода малого параметра [14], [15]. В настоящее время также активно проводятся исследования динамики

маятниковых систем с колеблющейся точкой подвеса, в том числе с применением компьютерных программ аналитических вычислений [16-23].

В своё время академик П.Л. Капица писал [9]: «что ни одной из механических систем не было уделено столько внимания и теоретического изучения как всем разновидностям маятника. Казалось бы этот вопрос должен быть исчерпан.....». Однако маятник и в наше время обнаружил свои новые свойства. А именно, при проведении экспериментальных исследованиях возможности автоматической балансировки роторов с помощью маятниковых подвесов было обнаружено новое явление. Оказалось, что для жестких роторов на упругих опорах возможен такой режим движения, при котором ротор вращается с заданной угловой скоростью, а маятники, установленные на валу ротора с возможностью свободного вращения, в зависимости от момента инерции массы маятника и момента трения в его опоре на валу, вращаются с угловой скоростью равной одной из критических скоростей ротора [24-25]. Это явление было названо эффектом «застревания» маятника на вращающемся валу. В дальнейшем были проведены экспериментальные исследования возможности появления этого эффекта для другой механической системы, включающей в себя электродвигатель и маятник на валу ротора электродвигателя. Результаты этих экспериментов приведены в работах [26-27].

Целью настоящих исследований является механико-механическое моделирование нового явления – эффекта «застревания» маятника на вращающемся валу механической системы.

2. Экспериментальные исследования движения маятника на вращающемся валу в работах [26], [27]. В этих работах использовалась экспериментальная установка, изображенная на рисунке 1, которая представляла собой электродвигатель 1, закрепленный на толстой металлической пластине 2, которая в свою очередь крепилась с помощью 4-х пружин 3 на неподвижном основании 4. На валу электродвигателя с возможностью свободного вращения устанавливался маятник 5. Маятник состоял из стержня с резьбой для навешивания грузов, металлического кольца и подшипника качения. Для измерения угловой скорости вращения маятника и двигателя использовался оптический тахометр – 6. Данная механическая система в плоскости, перпендикулярной плоскости вала электродвигателя, имела 3 собственные частоты колебания: $k_1 = 44,0$ рад/с; $k_2 = 100,5$ рад/с; $k_3 = 123,1$ рад/с. Эти собственные частоты колебаний механической системы были меньше частоты вращения вала электродвигателя $\omega = 157,0$ рад/с.

Суть эксперимента заключалась в измерении угловой скорости маятника на вращающемся валу двигателя при различных моментах инерции массы маятника.

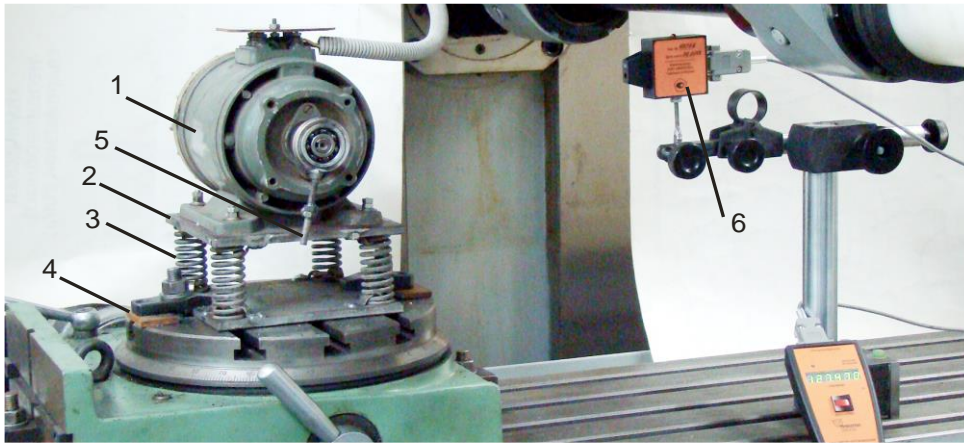


Рис.1. Экспериментальная установка для изучения движения маятника на вращающемся валу: 1 – электродвигатель; 2 – металлическая пластина; 3 – пружины; 4 – неподвижное основание; 5 – маятник; 6 – оптический тахометр.

В результате эксперимента при постоянном моменте трения в опоре маятника было установлено следующее. При моменте инерции в диапазоне $256,8 \leq I \leq 281,2$ г·см², маятник вращался вместе с валом электродвигателя, и его угловая скорость равнялась $\omega = 157,0$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $304,0 \leq I \leq 369,8$ г·см² угловая скорость вращения маятника составила $\omega = 118,2$ рад/с, которая с точностью эксперимента равна третьей собственной частоте колебаний механической системы $k_3 = 123,1$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $394,5 \leq I \leq 506,3$ г·см² его угловая скорость вращения маятника составила $\omega = 100,5$ рад/с. Это значение угловой скорости совпало со второй собственной частотой колебаний нашей механической системы $k_2 = 100,5$ рад/с. При моменте инерции маятника в диапазоне $531,0 \leq I \leq 603,2$ г × см² угловая скорость вращения маятника $\omega = 44,0$ рад/с. Это значение угловой скорости совпало с первой собственной частотой колебания механической системы $k_1 = 44,0$ рад/с. Таким образом, при постоянном моменте трения в опоре маятника и при изменении момента инерции его массы, имеет место такой режим движения, при котором ротор вращается с угловой рабочей скоростью, а угловая скорость маятника близка или совпадает с одной из частот колебаний механической системы. Это явление было названо эффектом «застревания» маятника на вращающемся валу [25].

3. Выбор и описание движения модели механической системы с маятником на вращающемся валу. Исследуемая модель представляет собой корпус как симметричное твердое тело кубической формы, который закреплен на неподвижном основании с помощью симметрично расположенных четырех вертикальных и четырех горизонтальных невесомых упругих опор (Рис. 2).

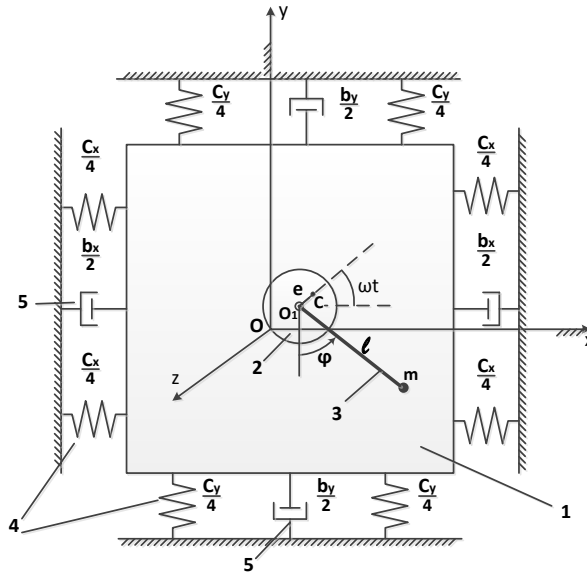


Рис. 2. Механическая модель маятника на вращающемся валу двигателя, установленного в корпусе: 1 – корпус; 2 – ротор с валом (точка C – центр масс ротора); 3 – маятник; 4 – невесомые упругие опоры корпуса; 5 – демпферы корпуса

В корпусе установлен ротор в форме диска, имеющий статическую неуравновешенность e , а на валу ротора установлен с возможностью вращения относительно вала маятник массой m и длиной l . Ось вращения ротора проходит через центр масс корпуса (точка O_1 на Рис. 2).

На Рис. 2 также изображены демпферы, условно обозначающие наличие сопротивления пропорционального скорости движения корпуса. Движение модели будем изучать по отношению к неподвижной системе координат $Oxyz$, начало которой (точку O) совместим с центром масс корпуса в положении его статического равновесия. Будем также считать, что движение вдоль оси z и повороты вокруг осей x, y, z отсутствуют. Тогда для описания движения модели можно использовать три обобщенных координаты: x_1, y_1 – перемещение центра масс корпуса O_1 и φ – угол отклонения маятника от его нижнего положения. Для вывода дифференциальных уравнений движения модели используем уравнение Лагранжа 2-го рода в форме [3]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_\varphi,$$

$$i = 1, 2, 3 \quad (q_1 = x_1; q_2 = y_1; q_3 = \varphi) \quad (1)$$

В этом уравнении: T – кинетическая энергия; Π – потенциальная энергия; Φ – функция Релея;

$Q_\varphi = k(\omega - \dot{\varphi})$. Здесь ω – угловая скорость ротора, k – коэффициент сопротивления относительно вращению маятника на валу ротора.

Кинетическая энергия механической системы T в нашем случае складывается из кинетической энергии корпуса T_k , кинетической энергии ротора T_p и кинетической энергии маятника T_m , и после преобразований имеет вид:

$$T = \frac{1}{2} M(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + M_p e \omega (-\dot{x}_1 \sin(\omega t) + \dot{y}_1 \cos(\omega t)) + \frac{1}{2} I_p \omega^2 + ml(\dot{x}_1 \dot{\varphi} \cos(\varphi) + \dot{y}_1 \dot{\varphi} \sin(\varphi)) + \frac{1}{2} ml^2 \dot{\varphi}^2, \quad (2)$$

В этом выражении $M = M_k + M_p + m$; M_k – масса корпуса; M_p – масса ротора; I_p – момент инерции ротора.

Потенциальная энергия механической системы Π складывается из потенциальной энергии деформации упругих опор в горизонтальном Π_x и в вертикальном Π_y направлениях и потенциальной энергии сил тяжести корпуса Π_k , ротора Π_p маятника Π_m . После преобразований с учетом условий статического равновесия выражение для потенциальной энергии примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_x x_1^2 + \frac{1}{2} c_y y_1^2 - mg l \cos(\varphi) \quad (3)$$

где c_x, c_y – коэффициенты жесткости упругих опор в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Выражение для функции Релея при наличии демпфирования только у корпуса будет иметь вид:

$$\Phi = \frac{1}{2} b_x \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} b_y \dot{y}_1^2, \quad (4)$$

где b_x, b_y – коэффициенты сопротивления движению корпуса в горизонтальном и вертикальном направлениях.

После процедуры составления дифференциальных уравнений движения модели, используя уравнения Лагранжа 2-го рода в форме (1) и выражения (2), (3), (4), получим систему трех дифференциальных уравнений второго порядка:

- 1) $M\ddot{x}_1 + ml\ddot{\varphi} \cos(\varphi) = M_p e \omega^2 \cos(\omega t) + ml\dot{\varphi}^2 \sin(\varphi) - c_x x_1 - b_x \dot{x}_1$;
- 2) $M\ddot{y}_1 + ml\ddot{\varphi} \sin(\varphi) = M_p e \omega^2 \sin(\omega t) - ml\dot{\varphi}^2 \cos(\varphi) - c_y y_1 - b_y \dot{y}_1$;
- 3) $ml^2\ddot{\varphi} + ml\dot{x}_1 \cos(\varphi) + ml\dot{y}_1 \sin(\varphi) = k(\omega - \dot{\varphi}) - mg l \sin(\varphi)$. (5)

4. Исследование влияния массы маятника на его угловую скорость. Суть данного эксперимента заключалась в исследовании закона разгона маятника при различных его массах и при неизменных других исходных данных. Численное интегрирование дифференциальных уравнений (5) осуществлялось в среде MATLAB с помощью функции ode15i при следующих исходных данных: $M_k = 8$ кг; $M_p = 2$ кг; $m = 0,02$ кг; $b_x = b_y = 25$ Нс/м; $c_x = 4 \times 10^5$ Н/м; $c_y = 1 \times 10^5$ Н/м; $e = 0$; $k = 1 \times 10^{-4}$ Нм/рад., $l = 0,05$ м. При приведенных выше исходных данных, наша механическая система имеет две собственные частоты колебаний: $k_1 = \sqrt{c_y/M} = 100$ рад/с; $k_2 = \sqrt{c_x/M} = 200$ рад/с. Примем, что при $0 \leq t \leq 10$ с ротор разгоняется по закону $\omega = 30t$, а при $t > 10$ с угловая скорость ротора $\omega = 300$ рад/с.

Результат численного интегрирования мы можем видеть на рис. 3.

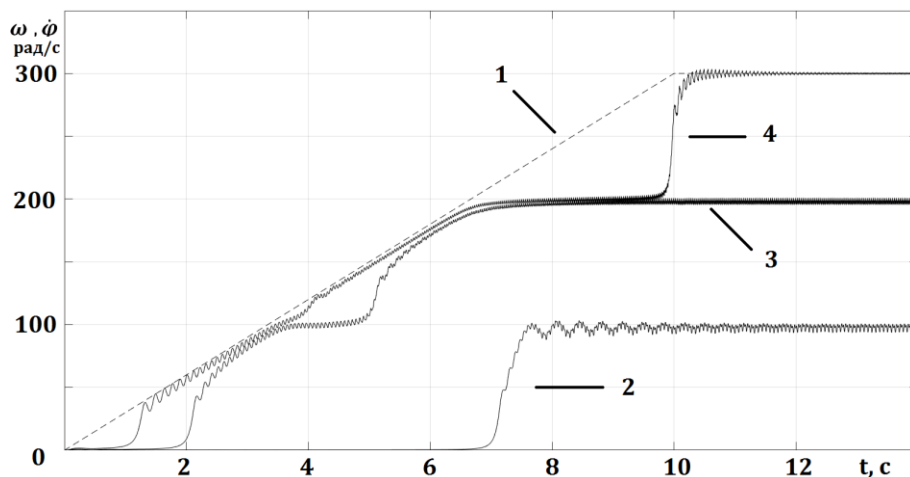


Рис. 3. Законы движения маятника при разной его массе: 1 – закон разгона ротора; 2 – при $0,0204 \leq m \leq 0,0614$ (кг); 3 – при $0,0053 \leq m < 0,0204$ (кг); 4 – $m < 0,0053$ (кг)

Установлено, что при изменении массы маятника в диапазоне: $0,0204 \leq m \leq 0,0614$ (кг) через 8 секунд после начала движения ротора, маятник разгоняется и начинает вращаться с угловой скоростью $\dot{\phi} = 100$ рад/с, которая равна первой собственной частоте колебаний механической системы $k_1 = 100$ рад/с (кривая 2 на Рис. 3). При изменении массы маятника в диапазоне: $0,0053 \leq m < 0,0204$ (кг), маятник через 8 секунд начинает вращаться с угловой скоростью $\dot{\phi} = 200$ рад/с, которая равна второй собственной частоте колебаний механической системы $k_2 = 200$ рад/с (кривая 3 на Рис. 3). При массе маятника $m < 0,0053$ кг, он разгоняется до угловой скорости $\dot{\phi} = 300$ рад/с, то есть до скорости вращения ротора $\omega = 300$ рад/с и вращается вместе с ротором (кривая 4 на Рис. 3). На этом же рисунке показан закон разгона ротора (прямая 1).

Примерно такой же характер носят графики разгона маятника при изменении момента трения в опорах маятника и постоянной массе маятника.

5. Построение областей режимов движения маятника. Результаты численного эксперимента по определению областей различных режимов движения маятников в зависимости от массы маятника и момента трения в его опоре приведены на Рис. 4.

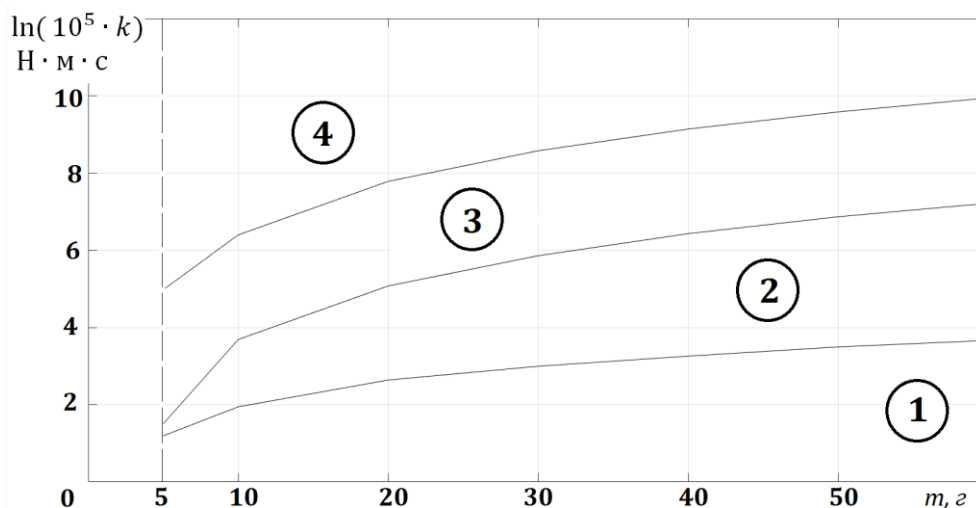


Рис. 4. Области режимов движений маятника на вращающемся валу в зависимости от массы маятника m и коэффициента трения k

Установлено, что в зависимости от массы маятника m (значения откладывались по оси абсцисс) и коэффициента трения k в опоре маятника (значения откладывались по оси ординат по логарифмической шкале) имеют место четыре режима движения.

1) Вал ротора вращается с угловой скоростью $\omega = 300$ рад/с, а маятник не вращается. Он совершает малые колебания около нижнего положения равновесия (область 1 на рис. 4).

2) Вал ротора вращается с угловой скоростью $\omega = 300$ рад/с, а маятник вращается с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 100$ рад/с, которая совпадает с первой собственной частотой колебаний механической системы (область 2 на рис. 4).

3) Вал ротора вращается с угловой скоростью $\omega = 300$ рад/с, а маятник вращается с угловой скоростью $\dot{\varphi} = 200$ рад/с, которая совпадает со второй собственной частотой колебаний механической системы (область 3 на рис. 4).

4) Вал ротора и маятник вращаются с угловой скоростью $\omega = \dot{\varphi} = 300$ рад/с (область 4 на рис. 4).

Таким образом, результаты численного эксперимента при моделировании движения маятника на вращающемся валу ротора двигателя, закрепленного в корпусе на упругих опорах, подтвердили результаты натурального эксперимента в работах [26], [27], что при одной и той же угловой скорости вращения ротора угловая скорость вращения маятника в зависимости от его массы может совпадать с одной из собственных частот колебаний механической системы.

6. Заключение. В результате моделирования движения маятника на вращающемся валу ротора двигателя, закрепленного в корпусе на упругих опорах, установлено, что при изменении массы маятника возможен такой

режим движения, когда ротор вращается с заданной угловой скоростью, а угловая скорость вращения маятника равна одной из собственных частот колебаний механической системы.

Список использованной литературы:

1. Галилей Г. Избранные труды в двух томах // М.: Наука, 1964. – Т.2. – 572 с.
2. Ньютон И. Математические начала натуральной философии// М.: ЛЕНАНАД, 2017. – 707с.
3. Гюйгенс Х. Три мемуара по механике // М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 578 с.
4. Stephenson A. On a new type of dynamic stability// Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society, 1908. – v.52. – №8. – pp. 1-10.
5. Erdelyi A. Uber die kleinen Schwingungen eines Pendels mit oszillierenden Aufhangepunkt// Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik, 1934 . – Bd.14. – s.235-247.
6. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике // Львов: Изд-во АН УССР, 1945. – 137 с.
7. Боголюбов Н.Н. Теория возмущений в нелинейной механике // Киев: Сб. трудов Ин-та строит. механики АН УССР, 1950. – Т.14. – с. 9-34.
8. Капица П.Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // Журнал эксперим. и теор. физики, 1951. – Т.21. – вып. 5 . – с. 588-597.
9. Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физ. наук, 1951. –Т. XLIV. – вып.1. – с.7-20.
10. Митропольский Ю.А. Метод усреднения в нелинейной механике // Киев: Наукова думка, 1971. – 440 с.
11. Челомей В.Н. Избранные труды // М.: Машиностроение, 1989. – 335 с.
12. Рагульскис К.М. Механизмы на вибрирующем основании (Вопросы динамики и устойчивости)// Каунас: Изд-во Ин-та энергетики и электротехники АН ЛитССР, 1963. – 232 с.
13. Стрижак Т.Г. Методы исследования динамических систем типа «маятник» // Алма-Ата: Наука, 1981. – 254 с.
14. Каудерер Г. Нелинейная механика // М.: Иностран. лит-ра, 1961. – 777 с.
15. Малкин И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний // М.: Физматгиз, 1956. – 492 с.

16. Акуленко Л.И., Нестеров С.В. Устойчивость равновесия маятника переменной длины // Прикладная математика и механика, 2009. – Т.73. – № 6. – с. 893-901.
17. Безгласный С.П. Управление движениями параметрического маятника // Изв. Саратовского ун-та. Математика, механика, информатика, 2015. – Т.15. – вып.1. – с. 67-73.
18. Буланчук П.О. Петров А.Г. Вибрационная энергия и управление маятниковыми системами // Прикладная математика и механика, 2012. – Т.76. – № 4. – с. 550- 562.
19. Бутиков Е.И. Маятник с осциллирующим подвесом (к 60-летию маятника Капицы) // Компьютерные инструменты в образовании, 2010. – № 5. – с. 1-42.
20. Красильников П.С. О нелинейных колебаниях маятника переменной длины на вибрирующем основании // Прикладная математика и механика, 2012. – Т.76. – вып. 1. – с .36-51.
21. Мартыненко Ю.Г., Формальский М.А. Управляемый маятник на подвижном основании // Изв. РАН. Механика твердого тела, 2013. – №1. – с. 9-23.
22. Сейранян А.А., Сейранян А.П. Об устойчивости перевернутого маятника с вибрирующей точкой подвеса // Прикладная математика и механика, 2006. – Т.70. – № 5. – с. 835-843.
23. Холостова О.В. Задачи динамики тел с вибрирующим подвесом // Изд-во ИКИ, 2016. – 308 с.
24. Артюнин А.И. Исследование движения ротора с автобалансиром // Изв. Вузов. Машиностроение, 1993. – № 1. – с. 15-19.
25. Артюнин А.И. Эффект «застревания» и особенности движения ротора с маятниковыми автобалансирами // Наука и образование. Научное издание МГТУ им.Н.Э.Баумана , 2013. – № 8. – с. 442-452.
26. Артюнин А.И., Ермошенко Ю.В., Попов С.И. Экспериментальные исследования эффекта «застревания» маятника на резонансных частотах механической системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2015. – № 2(46). – с. 20-25.
27. Artyunin A.I., Eliseev S.V., Sumenkov O.Y. Experimental Studies on Influence of Natural Frequencies of Oscillations of Mechanical system on Angular Velocity of Pendulum on Rotating Shaft // Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE-2018, Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. – pp. 159-166.

О влиянии связности внешних сил на режимы динамического гашения колебаний в технологических и транспортных устройствах

С.В. Елисеев¹, Н.К. Кузнецов², А.В. Елисеев³

^{1,3}Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Рассматриваются вопросы введения дополнительных связей в системы, динамические свойства которых могут определяться действием внешних силовых факторов. Показано использование передаточных функций механических колебательных систем в качестве эффективного средства изменения статических и динамических параметров в задачах вибрационной защиты.

Ключевые слова: *виброзащита, приведенные жесткости, режимы динамического гашения, передаточные функции.*

Введение. Динамическое гашение колебаний часто используется для формирования динамических состояний вибрационных технологических машин и защиты оборудования от действия вибрационных нагрузок [1-4]. Во многих работах рассматриваются условия динамических взаимодействий между отдельными элементами системы, сопровождающихся компенсацией силовых проявлений, что при фиксированных частотах гармонических внешних возмущений может обеспечивать неподвижность по одной из координат механической системы, что не исключает подходы по поиску возможностей расширения представлений о формах динамических процессов, в том числе, возможностей одновременного гашения по двум и более координатам механической колебательной системы [5]. Настройка динамических гасителей колебаний может обеспечиваться соответствующим выбором параметров самой системы. Вместе с тем существуют и другие возможности, связанные с учетом особенностей влияния системы внешних возмущений. В предлагаемом докладе рассматриваются подходы, позволяющие ввести в рассмотрение и учитывать при определении свойств механических колебательных систем при статических и периодических нагрузках особенности систем внешнего возмущения. Для проведения исследования вводятся понятия о комбинационном внешнем воздействии, при котором несколько внешних силовых факторов могут быть объединены в одну структуру, отражающую одновременно все доступные особенности внешних сил. Для оценки статических и динамических ситуаций ис-

пользуются передаточные функции системы (ПФ). Знаменатель передаточной функции – характеристическое уравнение является, в определенном смысле, инвариантным в отношении выбора пар точек «вход-выход», что учитывается для нахождения частот собственных колебаний, оценки устойчивости системы и др. [4].

I. Некоторые общие положения. Специфика задач виброзащиты и виброизоляции заключается в том, что, как правило, динамическое состояние связано с обобщенными координатами положения объекта, которые являются «выходными сигналами», а «вход» представляет собой смещение основания (кинематическое воздействие) или силу, прикладываемую к объекту защиты или фрагментам виброзащитной системы («силовое воздействие»). Отношения выходных и входных сигналов могут иметь различную физическую природу, а, следовательно, и размерность: отношение выхода в виде смещения к силе, как входному сигналу, характеризует податливость виброзащитной системы (ВЗС) в данной точке, инверсия отношения определяет упругие свойства (жесткость). Последнее дает возможность ввести в рассмотрение понятия динамической и статической жесткостей. Динамическая жесткость определяется через соответствующую передаточную функцию системы и является комплексной величиной, а характеристики динамической жесткости зависят от частоты внешнего воздействия. По-существу, механическая система между основанием и выбранным объектом защиты, состоящая из различных звеньев, в том числе из расширенного набора типовых элементов [1], может рассматриваться как обобщенная пружина.

Аналогично может рассматриваться и ситуация в статике, когда в передаточной функции (ПФ) принимается $p=0$ ($p=j\omega$ – переменная Лапласа) и оценивается статическая жесткость или коэффициент упругости для данной пары выбранных точек «вход-выход». Если в системе имеется несколько степеней свободы, то коэффициент упругости (или жесткости) может определяться не только в точке приложения силы, пару соответствия могут составить любые две точки, что предполагает в системе возможность оценивать различные виды коэффициентов упругости.

На рис. 1 приведена расчетная схема цепной системы с двумя степенями свободы.

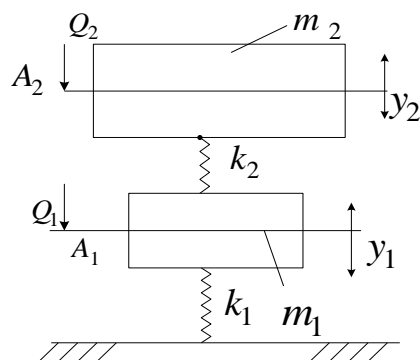


Рис. 1. Расчетная схема цепной виброзащитной системы (y_1, y_2 – обобщенные координаты; k_1, k_2 – упругости пружин; m_1, m_2 – массы элементов ВЗС)

Система дифференциальных уравнений движения имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 + k_2 y_1 - k_2 y_2 &= Q_1, \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 y_2 + k_2 y_1 &= Q_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Соответствующая (1) структурная схема представлена на рис. 2.

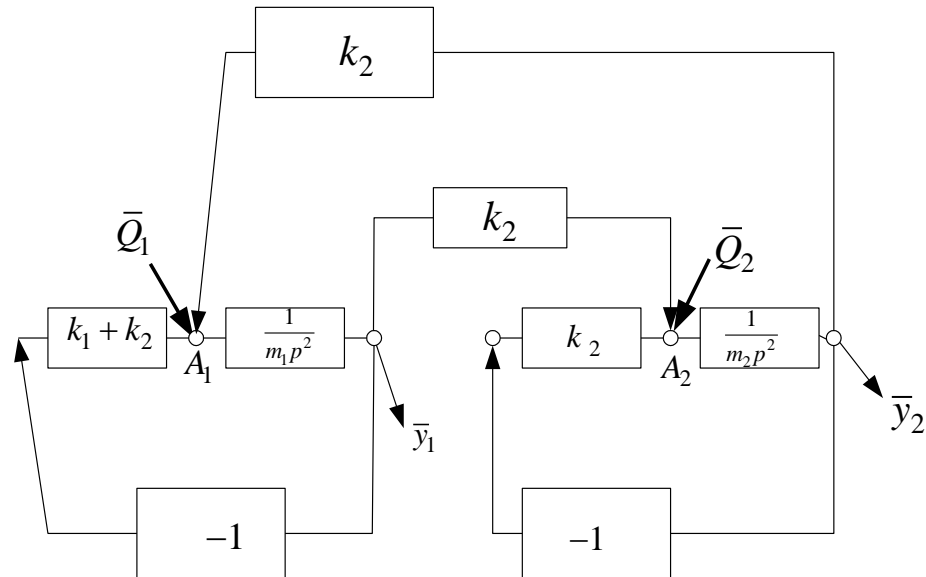


Рис. 2. Структурная схема ВЗС, соответствующая исходной расчетной схеме ВЗС

Будем полагать, что особенность системы заключается в том, что между внешними силами Q_1 и Q_2 существует связь, определяемая соотношением

$$Q_1 = \alpha Q_2 \text{ или } Q_1 = Q, Q_2 = Q\alpha. \quad (2)$$

Здесь α – коэффициент связи между силами (может быть положительным и отрицательным). Запишем передаточные функции системы для возможных пар «сила-смещение»:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{\bar{y}}{\bar{Q}} = \frac{m_2 p^2 + k_2(1 + \alpha)}{A_0}, \quad (3)$$

$$W_2^2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{\alpha(m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0}, \quad (4)$$

$$\text{где } A_0 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2) - k_2^2 - \quad (5)$$

характеристическое уравнение.

Полагая, что $p=0$, $Q_1 = const$, $Q_2 = const$, α изменяется в пределах от 0 до некоторого значения Q . Точки приложения сил Q_1 и Q_2 на рис. 1 и 2 обозначены как точки A_1 и A_2 . Если Q_1 приложена в точке A_1 и точка наблюдения совпадает с точкой приложения силы, то k_{11} определится из передаточной функции (3), тогда

$$k_{11} = \frac{k_1}{1 + \alpha}. \quad (6)$$

Если сила Q_1 приложена в т. A_1 , а наблюдается точка A_2 , то приведенная жесткость k_{12} может быть найдена из следующих соображений.

Система имеет два входных сигнала Q_1 и Q_2 , поэтому

$$\bar{y}_2 = w_1' Q_1 + w_2'' Q_2, \quad (7)$$

при этом

$$W_1' = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1 (\bar{Q}_2 = 0)} = \frac{k_2}{A_0}, \quad (8)$$

$$W_1'' = \frac{\bar{y}_2''}{\bar{Q}_2 (\bar{Q}_1 = 0)} = \frac{m_1 p^2 + k_1 k_2}{A_0}. \quad (9)$$

Так как $\bar{y}_2 = \bar{y}_2' + \bar{y}_2''$, то

$$\bar{y}_2 = \frac{k_2 \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 (m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0}. \quad (10)$$

II. Система с двумя степенями свободы балочного типа. В транспортных подвесках в качестве базовой модели часто используется система с двумя степенями свободы. Рассмотрим схему на рис. 3, где точки наблюдения (т. A_1 и A_3) вынесены за пределы твердого тела.

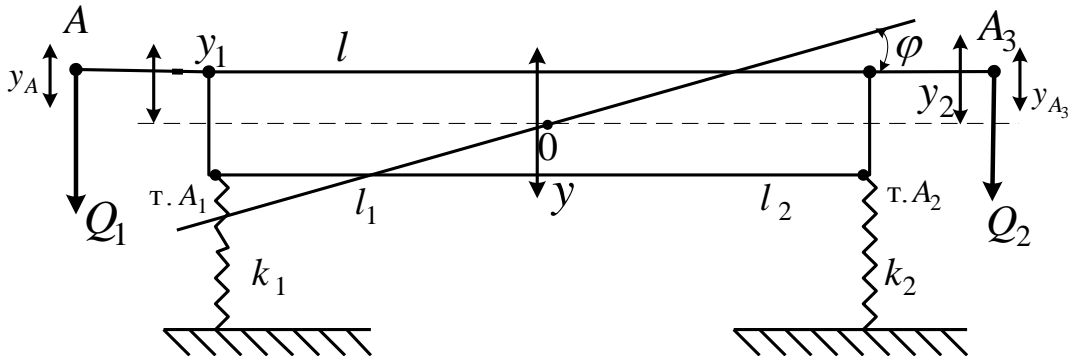


Рис. 3. Расчетная схема системы для определения её статической устойчивости

Примем для дальнейших расчетов ряд обозначений: $OA_1 = l_1$, $OA_2 = l_2$, $OA = l'$, $OA_3 = l''$; y, φ, y_1, y_2 – обобщенные координаты объекта в неподвижной системе координат; k_1, k_2 – упругости, M, I – массоинерционные параметры. Используя обычные приемы, составим систему уравнений движения в координатах y_1 и y_2 :

$$a_{11} y_1 + a_{12} y_2 = Q_1', \quad a_{21} y_1 + a_{22} y_2 = Q_2', \quad (11)$$

где Q_1', Q_2' – обобщенные силы, соответствующие координатам y_1, y_2 ;

$$a_{11} = (Ma^2 + Ic^2)p^2 + k_1, \quad a_{12} = (Mab - Ic^2)p^2, \quad a_{12} = a_{21}, \quad (12)$$

$$a_{22} = (Mb^2 + Ic^2)p^2 + k_2.$$

В выражении (12) приняты следующие обозначения и соотношения

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2},$$

$$y = y_1 a + y_2 b, \phi = c(y_2 - y_1),$$

$$y_1 = y - l_1 \phi, y_A = y - l_1' \phi, y_{A_3} = y + l'' \phi.$$
(13)

Обобщенные силы Q_1' и Q_2' в (11) зависят от выбора системы обобщенных координат и мест приложения силовых факторов.

Структурные схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления приведены для систем обобщенных координат y_1, y_2 и ϕ соответственно на рис. 4 а, б.

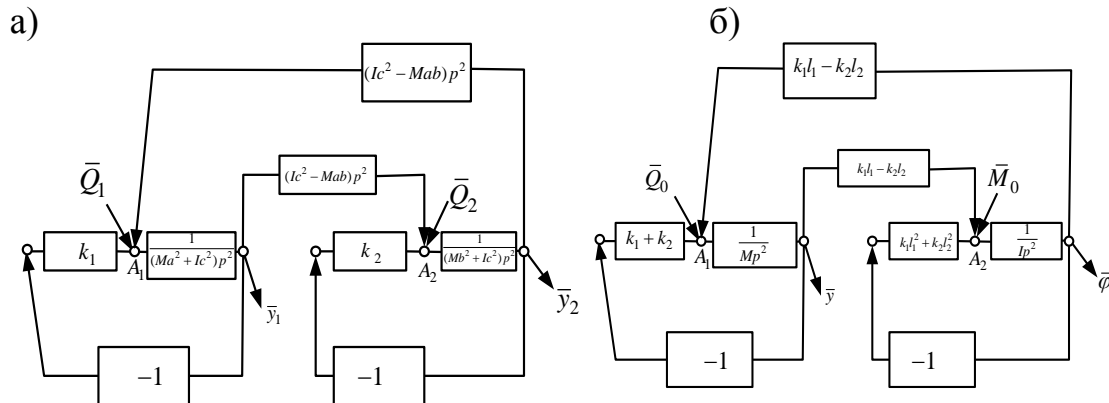


Рис. 4. Структурные схемы, соответствующие расчетной схеме системы на рис. 3: а) для системы координат y_1, y_2 ; б) для системы координат y и ϕ

III. Технология оценки динамических свойств. Авторами используется передаточные функции межпарциальных связей, которые определяются из структурных схем на рисунке 4 и позволяют определить динамические свойства механической колебательной системы. На основе развиваемого подхода можно получить необходимые соотношения для других случаев приложения силовых факторов, когда силы будут ориентированы на точки приложения, определяемые $l' = l_1$ и $l' = l_2$. В таблице 1 представлена сводная информация.

Табл. 1. Сводная таблица формул для определения частот динамического гашения при разных точках приложения силы

		Квадратные частоты динамического гашения			
№ п/п	Расстояние	Центр тяжести (y)	Угол поворота (ϕ)	Координата y_1	Координата y_2
1.	$r=0$	$\frac{\tilde{k}_1 I_1^2 + \tilde{k}_2 I_2^2}{I}$	Режим отсутствует	$\frac{\tilde{k}_2}{Ic^2 + Mb^2}$	$\frac{\tilde{k}_1}{Ma^2 + Ic^2}$
2.	$r=l_1$	$\frac{\tilde{k}_1 I_1^2 (1+\alpha) + I_1^2 (1-\beta) + \dots + \tilde{k}_2 [I_2^2 (1-\alpha) - I_2 I_2 (1-\alpha\beta)]}{I(1+\alpha)}$	$\frac{\tilde{k}_1 [I_1 (1+\alpha) - I_2 (1-\alpha\beta)] - \dots - \tilde{k}_2 [I_2 (1+\alpha) - I_2 (1-\alpha\beta)]}{-Ml_2 (1-\alpha\beta)}$	$\frac{\tilde{k}_2 [a(1+\alpha) - cl_2 (1-\alpha\beta)]}{Ic^2 (1+\alpha) - MbcI_2 (1-\alpha\beta)}$	$\frac{\tilde{k}_1 [b(1+\alpha) + cl_1 (1-\alpha\beta)]}{Ic^2 (1+\alpha) + MacI_1 (1-\alpha\beta)}$
3.	$r=-l_2$	$\frac{\tilde{k}_1 [I_1^2 (1+\alpha) - I_1 I_2 (1-\alpha\beta)] + \dots + \tilde{k}_2 [I_2^2 (1+\alpha) + I_2^2 (1-\alpha\beta)]}{I(1+\alpha)}$	$\frac{\tilde{k}_1 [I_1 (1+\alpha) + I_2 (1-\alpha\beta)] - \dots - \tilde{k}_2 [I_2 (1+\alpha) - I_2 (1-\alpha\beta)]}{Ml_1}$	$\frac{\tilde{k}_2 [a(1+\alpha) + cl_2 (1-\alpha\beta)]}{Ic^2 (1+\alpha) + Mb(1-\alpha\beta)}$	$\frac{\tilde{k}_1 [b(1+\alpha) - cl_1 (1-\alpha\beta)]}{Ic^2 (1+\alpha) - MbcI_2 (1-\alpha\beta)}$

Заключение. Таким образом, при действии на механическую систему нескольких сил при установлении между ними некоторых соотношений между величинами сил и геометрическими параметрами их приложения могут возникать ситуации расширения возможностей настроечных процессов. Учет особенностей системы внешних воздействий находит отражение в соотношениях, которые определяют, в частности, режимы динамического гашения колебаний, позволяя тем самым изменения границ частотных интервалов для эффективной виброзащиты. Поскольку параметры внешних сил входят в числитель передаточных функций системы, то параметры внешних силовых факторов оказывают влияние и на форму амплитудно-частотных характеристик, создавая основу для решения задач динамического синтеза.

Расширение набора настроечных параметров обеспечивает возможности новых направлений синтеза, в которых определенные условия накладываются одновременно на режимы динамического гашения по нескольким координатам виброзащитной системы. Такие ситуации можно рассматривать как проявление групповых или связанных режимов динамического гашения, а также как и одну из форм в подходах рационального конструирования виброзащитных систем.

При нескольких одновременно действующих факторах часть из них является внешними возмущениями, параметры которых могут быть заранее определены путем соответствующих измерений. Другие факторы могут быть сформированы искусственным путем, что требует разработки специальных средств формирования дополнительных сил, прикладываемых в соответствующих точках виброзащитной системы. Отметим, что предлагаемый подход в задачах виброзащиты и виброизоляции машин, оборудования и аппаратуры по сущности своей очень близок к тем направлениям изменения динамического состояния механических колебательных систем,

которые связаны с уравниванием и балансировкой вращающихся объектов.

Список использованной литературы

1. Елисеев С. В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С.В. Елисеев, А.И. Артюнин, Новосибирск: Наука, 2016. - 459 с.
2. Елисеев С.В. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования / С.В. Елисеев, А.П. Хоменко. Новосибирск: Наука, 2014.- 375 с.
3. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Трофимов А.Н. Задачи динамического гашения колебаний как задачи введения обратных дополнительных связей в управлении состоянием // Труды XVI Байкальской Всероссийской научной конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 2. Иркутск. 2010. С. 7-16.
4. Елисеев С.В. Ермошенко Ю.В., Гордеева А.А. Приведенная жесткость и передаточная функция виброзащитной системы при стационарных и периодических воздействиях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Вып. № 1(29). ИрГУПС. – Иркутск. – 2011. С. 74-80.
5. Елисеев С.В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко, А.А. Засядко. – Иркутск.: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. – 523 с.

УДК 621.833.681

Анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) под статической нагрузкой волнового торцевого кинематического редуктора

М.А. Джасем

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

В этой статье обсуждается разработка статической модели конечных элементов для волнового торцевого кинематического редуктора. Конечно-элементная модель была создана с помощью программной системы конечно-элементного анализа ANSYS. Создание модели включало использование трехмерных конечных элементов, таких как сплошные цилиндры и контактные элементы, для моделирования зацепления между зубьями колес. Распределение контактных и изгибных напряжений исследу-

двумого редуктора было предсказано. Анализ методом конечных элементов помог определить, соответствует ли разработанный продукт его функциональным требованиям.

Ключевые слова: напряжённо-деформированного состояния, волновой торцевой кинематический редуктор, Конечно-элементная модель.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) зацепления зубчатых передач аналитическими методами приводит к большим погрешностям результатов, особенно для конических зубчатых передач с круговыми зубьями из-за сложной геометрии зацепления. С появлением численных методов, решения этой задачи стало проще особенно при применении метода конечных элементов [1].

Волновой редуктор, который характеризуется высоким передаточным отношением, высоким коэффициентом контакта зубьев, очень высоким отношением крутящего момента к массе / объему, тихой и плавной работой под нагрузкой и очень высокой эффективностью, предложена в работе [2] и [3].

Сегодня повышение допустимой грузоподъёмности и передаточного числа является одним из главных приоритетов развития отрасли редукторостроения [4]. В данной работе рассмотрена разработка статической модели конечных элементов для моделирования зацепления между зубьями волнового торцевого кинематического редуктора.

Трёхмерная геометрическая модель была построена для пар зубьев колес, которые входят в зацепление друг друга. В данном случае главные поверхности зубьев вводятся в контакт, а переходные поверхности используются как основание для задания граничных условий.

Контур зуба ABCD (рис. 1) состоит из полуокружности радиуса r и двух дуг радиуса r^* . Центры полуокружности и дуг лежат на делительной окружности зубчатого колеса. Контур основания задаёт линия EFGH. Рабочая поверхность зуба.

Использовались при построении структуры конечно-элементной сетки следующие элементы:

- solid 185 (объёмные элементы)
- target 170 (контактные поверхностные элементы)

Чтобы обеспечить более точное вычисление напряженно-деформированного состояния (НДС), создавалось сгущение сетки в области, покрывающей пятно контакта. На рис. 2 представлена конечно-элементная модель волнового торцевого кинематического редуктора, в таблице 1, подробно описаны свойства материала, физические размеры частей волнового торцевого кинематического редуктора и момент приложен к выходному колесу.

Таблица 1 – свойство материала, физические размеры элементов редуктора и характеристики конечно-элементной модели

Свойство материала				
Используемый материал		Сталь AISI 9310		
Коэффициент Юнга (E)		$1,9 * 10^5$ МПа		
Коэффициент Пуассона (μ)		0,3		
Физические размеры элементов редуктора				
Наименование	неподвижного колеса	шестерни	шестерни	выходного колеса
Z - число зубьев	$Z_1= 28$	$Z_2= 30$	$Z_3= 57$	$Z_4= 56$
d - внутренний диаметр, мм	304,8	304,8	304,8	304,8
D - внешний диаметр, мм	326,5	325,1	315,5	315,7
F - ширина лица зуба, мм	22,9	22,9	22,9	22,9
T - толщина зуба, мм	8,55	8,4	8,4	8,55
i- передаточное число	30			
Момент приложен к выходному колесу		$[1-7] * 10^5$ Н.мм		
Характеристики конечно-элементной модели				
Размер конечных элементов на поверхностях контакта		0,5 мм		
Размер конечных элементов на остальных поверхностях редуктора		1,5 мм		
Число объёмных КЭ типа solid 92		177392		
Число поверхностных КЭ типа target 170		2883842		

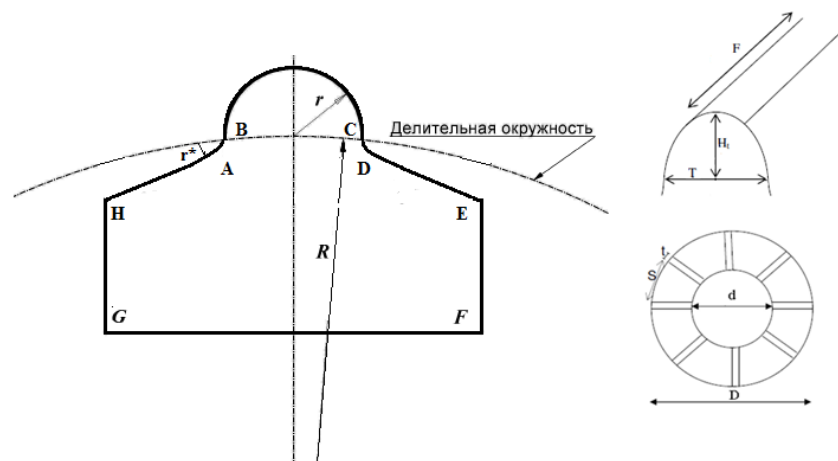


Рис. 1. Контур зуба в сечении



Рис. 2. Конечно-элементная модель редуктора

Затем к модели применяются граничные условия. На двух концах вала имеются два подшипника, которые упрощены как две петли на конце, имеющие нулевое смещение. Чтобы обеспечить момент, приложенный к колесу, прикладывалась нагрузка к узлам шестерни и колеса равномерно. На рис.3 представлены граничные условия.

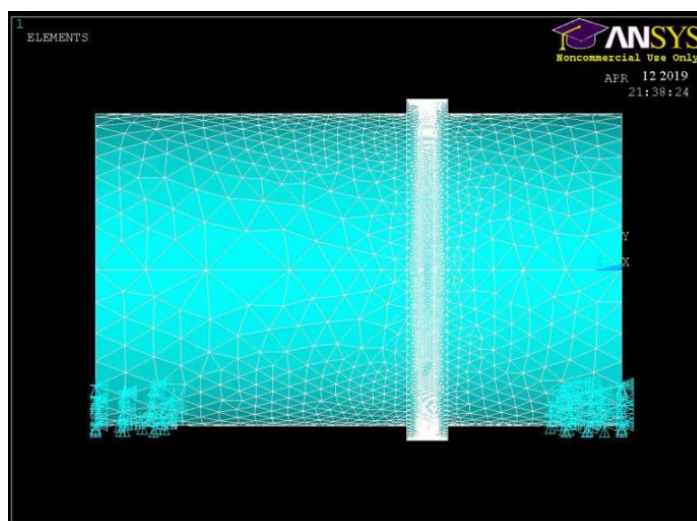


Рис. 3. Граничные условия

Предположения перечислены ниже:

- Предполагаемый статический анализ: смоделирован в статическом (устойчивом состоянии) конечно-элементном анализе;
- Подшипники [вместо использования подшипниковых опор мы использовали просто опорные соединения];
- Вал был просто поддержан на обоих концах;
- Моделирование зубов как поверхностных контактных элементов.

- Выбрал нулевое выравнивание по вертикали: реальный угол был 2,5 градуса;
- Модели цилиндрических зубчатых колес в виде сплошных цилиндров;
- Контактные элементы были созданы с использованием графического интерфейса в ANSYS.

Изгибные напряжения рассчитывает функция Максимального основного напряжения, а контактные напряжения - функция нахождения эквивалентных напряжений [Напряжение фон Мизеса], возникающих в результате сочетания главных напряжений в направлении x, y и z. Это значение можно сравнить с пределом текучести материала. Напряжение фон Мизеса определяется соотношением:

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 + \sigma_{ZZ}^2 - \sigma_{XX}\sigma_{YY} - \sigma_{YY}\sigma_{ZZ} - \sigma_{ZZ}\sigma_{XX} + 3\sigma_{XE}^2 + 3\sigma_{YZ}^2 + 3\sigma_{XZ}^2$$

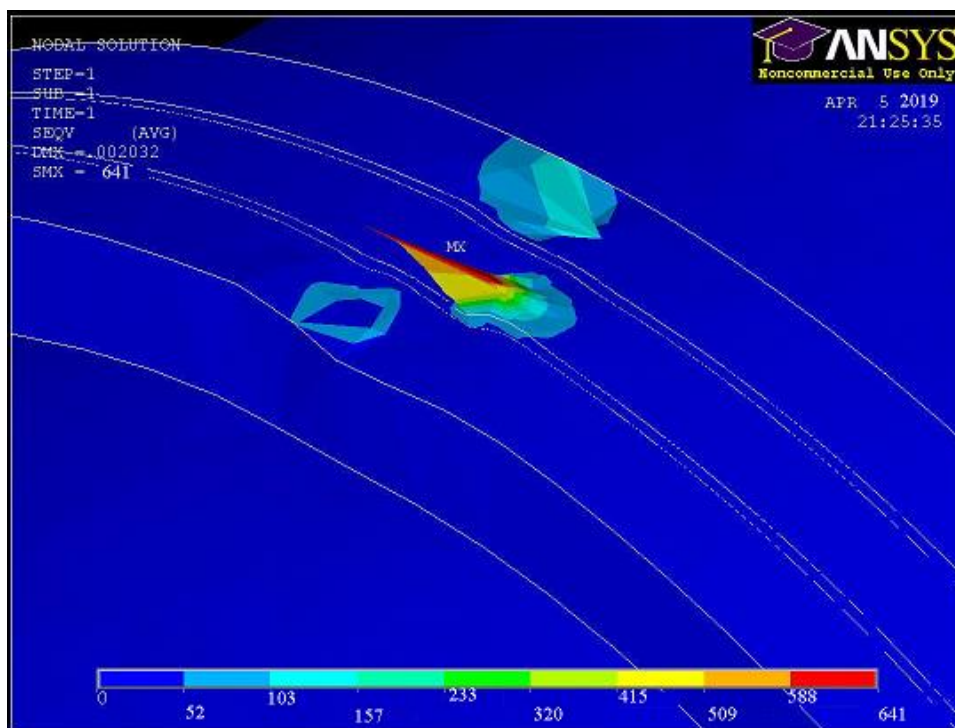


Рис. 4. Распределение контактных напряжений в зацеплении при крутящем моменте 700 Нм

На основе теории Герца (аналитическим методом) контактные напряжения были рассчитаны [5]. А расчет изгибных напряжений проводится при следующем допущении: всю нагрузку заменяют равнодействующей силой, приложенной в полюсе зацепления и направленной по линии зацепления. Равнодействующая сила передается одной парой зубьев[6].

Для сравнения результатов, полученных методом конечных элементов и аналитическим методом построим графики зависимости контактных и изгибных напряжений от крутящего момента (рис. 5 и 6).

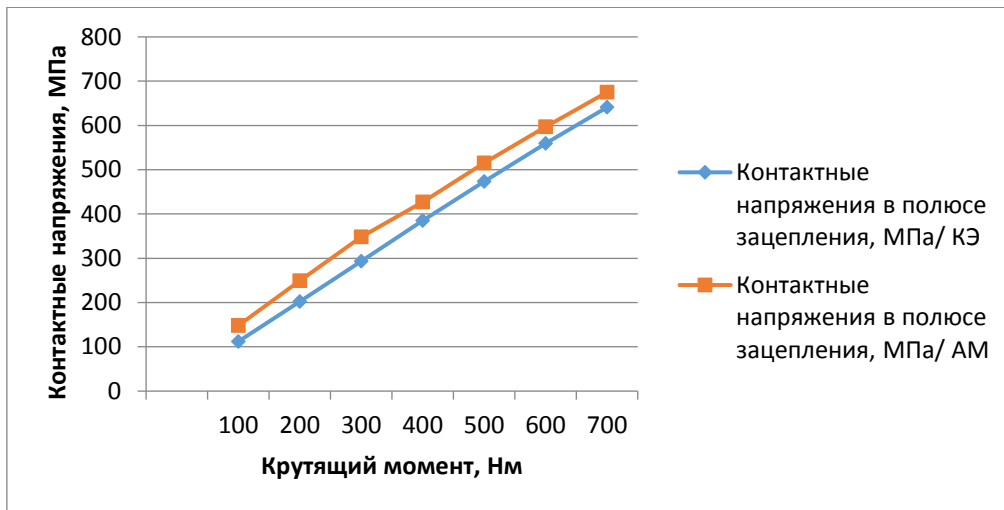


Рис. 5. График зависимости контактных напряжений от крутящего момента

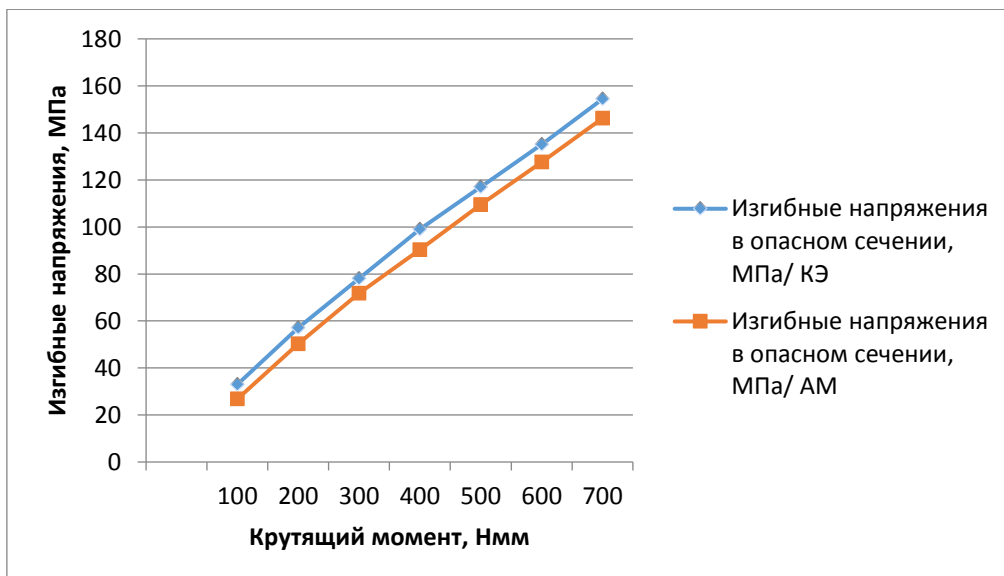


Рис. 6. График зависимости изгибных напряжений от крутящего момента

Сравнение полученных результатов показало, что разница между методом конечных элементов и аналитическим методом при расчете контактных напряжений (- 3%), а - при расчете изгибных напряжений равна (6,50%). Погрешность уменьшается по мере уменьшения размера конечного элемента, это с одной стороны приводит к улучшению качества конечно-элементной модели в зоне контакта, а с другой стороны использования такой сетки сложно из-за ограничений, накладываемых на конечно-элементной модель [7].

Таким образом, цель этой работы состояла в том, чтобы получить изгибные и контактные напряжения методом конечных элементов и сравнить их с аналитическим методом для выходного и входного колес и шестерни. Размеры зубчатых колес были одинаковыми, поэтому нагрузки на зубчатых колесах были практически одинаковыми. Зубчатые колеса предполагались как цилиндрические цилиндрические зубчатые колеса, так что они

могли быть смоделированы как сплошные цилиндры для простоты. В действительности можно использовать конические зубчатые колеса, и они будут смоделированы как конусы.

3Д модель, которую мы использовали, была валом, который был закреплен на обоих концах, на нем были установлены три шестерни. Зубы не были смоделированы из-за сложности. Тем не менее, контакт зубьев был смоделирован как контакт зубчатой поверхности. Значение напряжения, полученное с помощью трехмерного анализа, было на порядок больше теоретического результата. Причину такой высокой оценки можно объяснить тем, что анализ был нелинейным и из-за отсутствия зубьев на зубчатом колесе, что привело бы к более низкому значению напряжения, как показано в теоретическом уравнении. Полное моделирование волнового торцевого кинематического редуктора, как описано выше, привело бы к физически надежной и точной модели конечных элементов, которая дала бы результаты в превосходном согласии с теоретическими результатами. Этот анализ предполагался как анализ методом конечных элементов в статическом состоянии. Однако динамическая модель конечных элементов была бы более уместной, поскольку она учитывала бы вращение и собственные частоты зубчатых колес и была бы точным представлением зубчатых колес, сцепляющихся в режиме реального времени[8].

Список использованной литературы:

1. Нахатакян, Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте: дис. ... техн. наук: 01.02.06. – М., 2014.
2. M A Jasem and P Y Krauinsh 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 510 012022
3. Джасем М.А., Крауиньш П.Я. Особенности зацепления кинематического торцевого волнового редуктора / Сборник статей VII международной конференции «Проблемы механики современных машин»- Улан-Удэ, ВСГУТУ, 2018. - Улан-Удэ: Изд. ВСГУТУ, 2018. - С. 25-29.
4. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: В 3 т. Т.1.- М.: Машиностроение, 2001.-920 с.
5. Редукторы энергетических машин: Справочник/Б. А. Балашов, Р. Р. Гальпер, Л. М. Гаркави и др.; Под общ. ред. Ю. А. Державца. —Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985
6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник.– 4-еизд., перер.идоп.– М.: Машиностроение, 1993.– 640 с.
7. Каратушин С.И., Плешанова Ю.А., Бильдюк Н.А., Бокучава П.Н. Проверочный силовой расчет зубьев планетарной ступени редуктора с использованием пакета ANSYS. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2015, № 12, с. 48–55.
8. Современные методы компьютерного моделирования процессов деформирования конструкций: учеб. пособие / Я.М.Клебанов, В.Г.Фокин, А.Н.Давыдов. Самара: СамГТУ, 2004. 100 с.

Обоснование свойств сложных технических систем на основе принципов самоорганизации

А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин

Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Разработана иерархия междисциплинарных задач и предложен алгоритм самоорганизации для обоснования свойств сложных технических систем, в том числе, обеспечивающих надежность и техногенную безопасность, посредством постановки совокупности взаимосвязанных междисциплинарных задач, использования специализированных экспертных систем и обеспечения коллективных решений. Сформулирована, на основе понятий и определений различных предметных областей, совокупность иерархических целей, что повышает уровень взаимопонимания между специалистами различных областей знаний. Предложены локальные правила и специальные экспертные системы, необходимые для обеспечения самоорганизации в искусственных системах.

Ключевые слова: *принципы, модели, алгоритм, самоорганизация, свойства, междисциплинарные задачи, коллективные решения, техническое состояние, надежность, безопасность, катастрофические отказы.*

Введение. Особенностью задач проектирования и конструирования Сложных Технических Систем (СТС) являются многочисленные, в том числе недостаточно формализованные, варианты и итерации, как при обосновании проектных и конструктивных решений, так и при выборе материала, обосновании расчетных схем и выполнении расчетов различного назначения. Некоторая неопределенность и мультидисциплинарность проблемы является немаловажной причиной необходимости использования искусственного интеллекта и принципов самоорганизации для повышения эффективности и качества принимаемых решений, так как требуется не только обоснование вариантов и итераций, осуществленных с использованием знаний множества дисциплин, но и запоминание этих решений, причин их принятия или отклонения. Совокупность факторов, обуславливающих и сопровождающих нарушение безопасной эксплуатации, характеризуют проблему конструирования СТС как междисциплинарную и требует, как использования знаний значительного множества дисциплин, так и

привлечения для ее решения соответствующих экспертов. При этом необходимо обеспечить взаимопонимание и приемлемый компромисс при принятии решения [1-3].

Как отмечается в некоторых работах [4-12]: «...если достижение поставленных целей происходит в заранее неизвестных условиях, то алгоритм управления должен формироваться непосредственно в процессе управления». Одним из способов реализации подобного алгоритма является принцип самоорганизации, который выражаются в перестройке существующих и образовании новых связей между элементами алгоритма для достижения цели. Если рассматривать обоснование свойств СТС как процесс, то управление им можно с большей точностью обеспечить с помощью принципов самоорганизации.

Результаты. Для повышения эффективности и качества обоснования свойств СТС, в том числе, определяющих надежность, живучесть и техногенную безопасность, предлагаются принцип, алгоритм и модель, обеспечивающие постановку совокупности взаимосвязанных Междисциплинарных Задач (МДЗ), использование экспертных систем и некоторую формализацию коллективных решений. Каждое из рассматриваемых свойств характеризуется значительным числом параметров. Например, надежность характеризуется параметрами безотказности, долговечности и ремонтпригодности; живучесть-предвестниками нарушения безопасности и временем между критическим отказом и аварией; безопасность характеризуется риском аварии, являющимся произведением частоты отказов на их последствия.

Процесс и последовательность принятия решения формируется в зависимости от функций проектируемого объекта, требований надежности, живучести и безопасности, воздействующих на него факторов, а также - от промежуточных результатов решения задачи.

Предлагается, во-первых, представить свойства СТС в виде иерархии (рис.1), когда фактические свойства по значению параметров являются только частью проектных, а проектные, в свою очередь, представляют только часть идеальных свойств СТС. Во-вторых, представить процесс проектирования в виде трансдисциплинарной задачи отражающей иерархию МДЗ, которая определена на основе объективных признаков декомпозиции: структурных, физических и дисциплинарных, где каждый иерархический уровень представлен последовательностью задач отражающих требуемые свойства СТС для различных состояний. В-третьих, организовать самоорганизующийся процесс реализуемый локальными правилами, которые формируются на основе существующих знаний, а также опыта специалистов в области создания новой техники, и отражают последовательность формирования требуемых свойств в зависимости от воздействующих факторов, технических требований, типовых и экспертных решений. Локальные правила составляют соответствующие базы знаний, обеспечиваю-

щие управление обоснованием свойств СТС. Локальные правила определяют условия переходов от задачи к задаче и иницируются на основе оценки состояний решенности задач, а также промежуточных результатов решения.

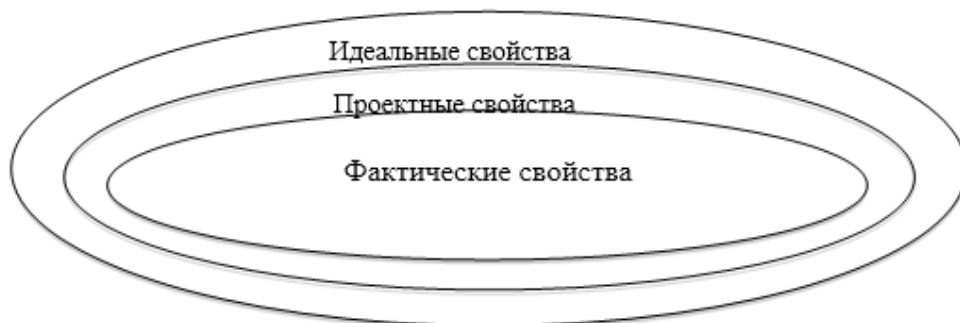


Рис. 1. Иерархия свойств объекта

Под идеальными – понимаются свойства без ограничения на материальные затраты и технологические возможности. Идеальные свойства могут в какой-то степени не учитывать существующие гипотезы, принятые для оценки несущей способности, прочности и ресурса деталей, когда материал представляют однородной, сплошной и изотропной и упругой средой. Идеальные свойства обеспечивают минимальную вероятность отказов, ошибок операторов и аварий вследствие природных воздействий.

Проектные – это свойства достижимые имеющимися конструктивными, металлургическими и технологическими методами и средствами получения материала, изготовления деталей и сборочных единиц при обоснованных материальных затратах.

Фактические – это свойства в максимальной степени соответствующие проектным, но имеющие отклонения от проектных вследствие несовершенства и нарушения технологических процессов изготовления, в том числе неконтролируемых дефектов, погрешностей измерения, несовершенства и ошибок контроля, сборки и т.п.

Сначала формируются идеальные свойства СТС, компонентов и элементов. Затем, осуществляется оценка возможности обеспечения этих свойств существующими технологиями при планируемых средствах и сроках создания СТС. Если средств недостаточно или сроки ограничены, то значение некоторых идеальных свойств понижаются до приемлемых (проектных), но они должны быть компенсированы свойствами контроля и защиты. Проектные свойства деталей обусловлены конструктивными, металлургическими и технологическими факторами и их изменением во времени, обусловленном режимами и условиями эксплуатации и множеством случайных факторов. В том случае, если предполагается, что проектные свойства могут быть нарушены и при этом факт этого трудно выявить, как на стадии изготовления, так и на стадии применения, то эти свойства также должны быть компенсированы свойствами контроля и защиты. Фактические свойства должны обеспечивать работоспособность, надежность и безопасность СТС при широком варьировании воздействующих факторов и состояний СТС, компонентов и элементов.

Принцип самоорганизации, используемый для обоснования идеальных, проектных и фактических свойств СТС, представлен локальными правилами, обеспечивающими формирование решений на основе специализированных экспертных систем и возможность принятия «прозрачных» коллективных решений заинтересованными экспертами и специалистами смежных отраслей знаний.

Набор локальных правил, отражает последовательность формирования требуемых свойств (рис.2) в зависимости от совокупности:

- ✓ воздействующих факторов;
- ✓ технических требований и технических условий;
- ✓ типовых проектных (конструктивных) решений;
- ✓ предложений экспертов и специалистов, направленных на совершенствование решений.

Локальные правила, обеспечивающие идеальные свойства: ЕСЛИ допустимый риск аварии более 10^{-5} ТО предусмотреть своевременное выявление предельного состояния всех критических элементов и компонентов СТС И обосновать требуемые для этого свойства элементов, компонентов и СТС; ЕСЛИ имеющихся средств недостаточно для обеспечения идеальных свойств ТО перейти к формированию проектных свойств.

Локальные правила обеспечивающие проектные свойства: ЕСЛИ допустимый риск аварии более 10^{-5} ТО предусмотреть своевременное выявление предельного состояния всех критических элементов и компонентов СТС И обосновать требуемые для этого свойства элементов, компонентов и СТС в целом; ЕСЛИ своевременное выявление предельного состояния не гарантировано ТО предусмотреть систему защиты и барьеров, в том числе возможность частичного или полного прекращения функционирования как отдельных компонентов, так и СТС в целом по функциональным или каким-либо признакам наступления предельного состояния.

Для обоснования свойств в соответствие с этими локальными правилами применяются правила нижестоящего уровня иерархии: например, ЕСЛИ на элемент (деталь) воздействует переменная нагрузка ТО необходимо вызвать вычислительный модуль и рассчитать предел выносливости И предел выносливости должен обеспечить работоспособность.

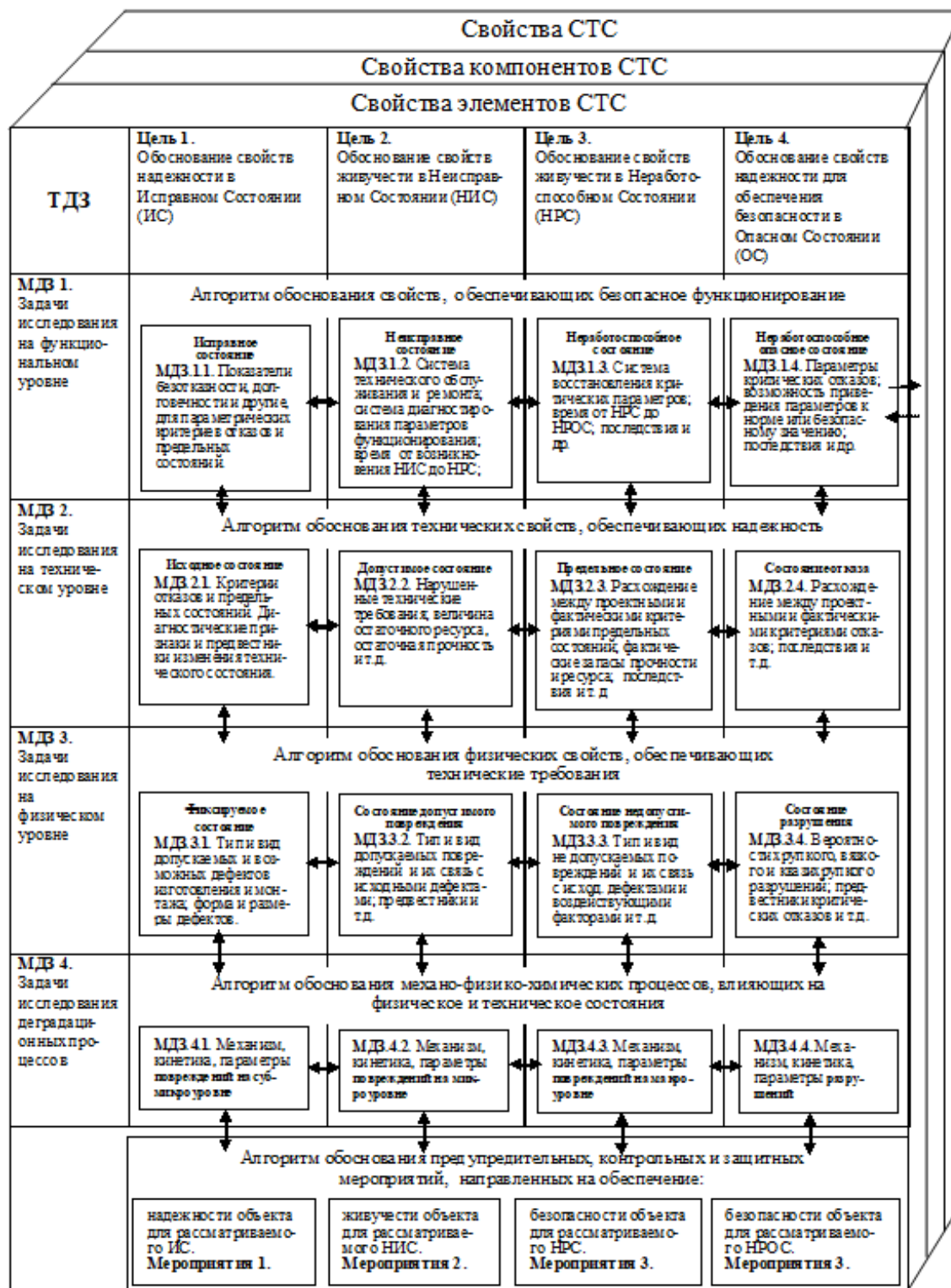


Рис.2. Модель Трансдисциплинарной Задачи (ТДЗ) обоснования свойств СТС, компонентов и элементов

При этом, например, свойство прочностной надежности (искомое свойство) задается некоторым набором параметров, методами и способами с помощью которых эти параметры определяются. Например, снижение вероятности прочностных отказов связано с повышением качества материа-

лов и технологий, совершенствованием расчетных схем, повышением коэффициентов запаса прочности и ресурса и поддержанием (восстановлением) прочностной надежности объектов в эксплуатации.

В том случае, если предполагается, что проектные свойства могут быть нарушены и при этом факт этого трудно выявить, как на стадии изготовления, так и на стадии применения (эксплуатации), то эти свойства также должны быть компенсированы свойствами контроля, защиты и барьеров. Фактические свойства должны обеспечивать работоспособность, надежность и безопасность СТС при широком варьировании воздействующих факторов и состояний СТС, компонентов и элементов.

Локальные правила определения фактических свойств: ЕСЛИ допустимый риск аварии более 10^{-5} ТО предусмотреть своевременное выявление предельного состояния И обосновать требуемые для этого свойства элементов, компонентов и СТС в целом; ЕСЛИ своевременное выявление предельного состояния не гарантировано ТО предусмотреть систему контроля, защиты и барьеров И возможность частичного или полного прекращения функционирования как отдельных компонентов, так и СТС в целом по функциональным или каким-либо косвенным признакам наступления предельного состояния; ЕСЛИ системы защиты и барьеров не обеспечивают предотвращение развития аварий ТО предусмотреть такие свойства систем мониторинга и диагностирования, которые позволяют оценивать фактическое техническое состояние и остаточный ресурс всех критических элементов.

Локальные правила обеспечивают интерпретацию произвольной совокупности (сочетаний) факторов и требований (условий) и формируют набор свойств необходимых для обеспечения надежности и техногенной безопасности на основе типовых проектных решений. Каждое правило формирует соответствующее качественное и количественное значение некоторого свойства, например, несущую способность конструкции или вероятность (частоту) отказов при переменных нагрузках.

Каждое локальное правило любого уровня иерархии обеспечивает возможность обращения к экспертным системам, отражающим знания смежных предметных областей, которые могут использоваться для решения рассматриваемой задачи. Это обеспечивает связь знаний.

Если рекомендованное свойство не удовлетворяет заданным техническим требованиям или техническим условиям, или необходимо это свойство улучшить, то полученную совокупность информации предъявляют экспертам, которые «on-line» либо совершенствуют и согласовывают используемые проектные методы, либо обоснованно изменяют воздействующие факторы, технические требования или технические условия.

Срабатывание Правила приводит к реализации некоторой совокупности процедур и проведения расчетов, инициируемых каждым правилом.

Трансдисциплинарная модель (рис.2) [13-15] отражает иерархию вза-

имоувязанной совокупности Междисциплинарных Задач (МДЗ) и обеспечивает формулировку конкретных задач на основе понятий и определений различных предметных областей. Это повышает степень понимания задач специалистами и экспертами различных научных направлений и дисциплин и обеспечивает принятие коллективных решений.

Таким образом, принцип самоорганизации представлен локальными правилами, которые каждый раз, в зависимости от объекта исследования и выбранной пользователем междисциплинарной задачи, формируют алгоритм самоорганизации вычислений и обращение к соответствующим базам знаний, вычислительным модулям и локальным правилам всех уровней и тем самым обосновывает требуемые свойства элементов, компонентов и СТС в целом.

Заключение. Особенностью инженерных задач обоснования свойств создаваемых СТС является неопределенность, как требований, так и путей удовлетворения этим требованиям. Существует множество стратегий и вариантов выбора оптимальных (рациональных) решений. Для повышения качества обоснования свойств СТС на основе современных методов исследования, а также возможности эффективного применения методов и средств искусственного интеллекта, предложены принципы и алгоритм самоорганизации, а также модель связи междисциплинарных задач. Принципы самоорганизации представлены локальными правилами. Сформулированы цели и задачи обеспечивающие единообразное представление исходных данных для повышение эффективности и качества принятия решений направленных на обоснование требуемых свойств СТС. Сформирована модель трансдисциплинарной задачи обоснования свойств надежности и безопасности СТС. Предложен алгоритм самоорганизации, формирующий взаимосвязанную совокупность релевантных баз знаний и вычислительных модулей с помощью локальных правил различного уровня иерархии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проекты РФФИ №18-08-00560 и №18-07-01164.

Список использованной литературы

1. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2013. - № 5. - С. 25–36.
2. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Структуризация процесса исследования безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. –1999, №6. – С. 3-12.
3. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Yurin A.Yu., Pavlov A.I. A methodology for the investigation of there reliability and safety of unique technical systems. PartO // Journal of Risk and Reliability. UK. February. - 2014. № 221.

(1). P. 29–38.

4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. Изд.1. М., Издательство ЛКИ, 2008. – 296с.

5. Хакен Г. Синергетика. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. Пер. с англ.// Изд. 3-е. – М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2014. –320 с.

6. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики: человек конструирующий себя и свое будущее. – Изд.2. - М.: Книжный дом «Либроком», 2014. –264 с.

7. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 240 с.

8. От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. – М.: КомКнига. - 2006. – 315 с.

9. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизация в мультиагентных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. –2010.- Выпуск № 3. – Том 104. — С.14-20.

10. Кириков И.А., Колесников А.В., Листопад С.В. Исследование эффекта самоорганизации в компьютерных системах поддержки принятия решений на примере многоагентных систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2010. – Выпуск № 10.– С.79-90.

11. Махутов Н.А., Берман А.Ф., Николайчук О.А. Некоторые принципы самоорганизации для управления риском техногенных катастроф // Проблемы анализа риска. - 2015. -Том 12. № 4. - С. 34–45.

12. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Интеллектуальная информационная система анализа отказов // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2012. - № 4. - С. 88–96.

13. Бажанов В., Шольц Р.В. Трансдисциплинарность: в поисках оснований синтеза научного знания // Трансдисциплинарность в философии и науке: подходы, проблемы, перспективы. М.: Изд. Дом «Навигатор». 2015.- С. 280–301.

14. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Тюленев Р.П. Трансдисциплинарная модель задач для обеспечения безопасности технических объектов // Междунар. науч.-практ. конф. «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» (г. Тула, 15–17 ноября 2017 г.). Тула, 2017. - С. 234–239.

15. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Трансдисциплинарная модель задачи обоснования свойств материалов и конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 8.-С.17-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-17-25>.

Создание конструкций манипуляционных систем для защиты струи стали при разливке и определение параметров пневматической системы на машине непрерывного литья заготовок

К.Н. Вдовин, Вас. В. Точилкин, В.И. Умнов, Викт. В. Точилкин

Разработано устройство, исключаящее прохождение воздуха в струю металла при разливке и обеспечивающее рациональные параметры подачи аргона в кольцевую выемку огнеупорной трубы. Представлены результаты математического моделирования прохождения металла через защитную трубу, удерживаемую манипулятором. Получены аналитические зависимости по определению параметров подачи аргона для эффективной работы системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш, оснащенной защитной трубой. В результате обеспечивается стабильность процесса разливки и повышение качества разливаемого металла.

Ключевые слова: *машина непрерывного литья заготовок, манипулятор, захват, защитная труба, огнеупорные конструкции, математическое моделирование*

Повышенное содержание азота приводит к старению металла. Надежной защитой металла от контакта с воздухом при непрерывной разливке является применение защитных труб с аргонной защитой мест подсоса воздуха [1]. В связи с этим актуальной задачей является разработка и совершенствование устройств и систем для защиты стали от вторичного окисления на пути сталеразливочный ковш – промежуточный ковш [2]. Для установки защитной трубы манипулятором используется захватное устройство (рис. 1) с ориентирующей степенью подвижности для совмещения оси защитной трубы относительно стакана сталеразливочного ковша.

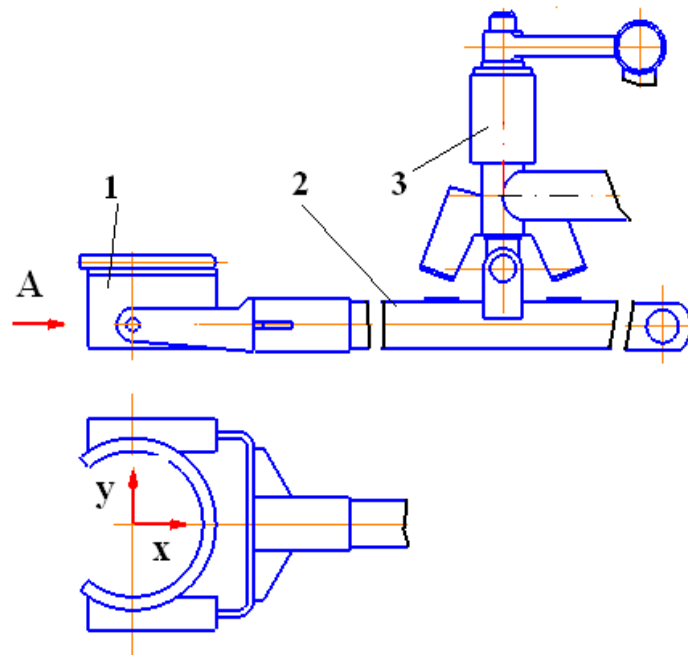


Рис. 1. Захват манипулятора для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ: 1 – захват манипулятора; 2 – стрела манипулятора; 3 – опорный узел

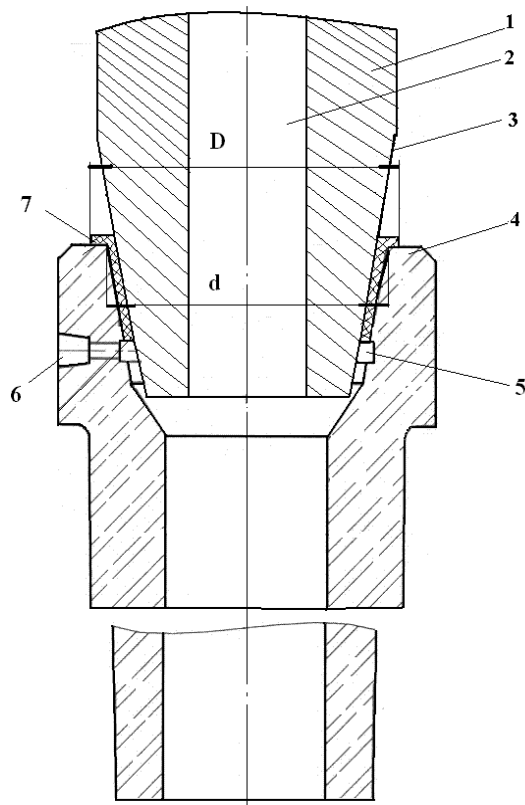


Рис. 2. Устройство для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ

Разработанное устройство для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ изображено на рис. 1 [3-5]. Устройство содержит огнеупорный

стакан 1, с подводным каналом 2, и наружной конусообразной поверхностью 3, огнеупорную трубу 4. Верхняя часть отверстия трубы 4 выполнена по форме контактирующего с ней участка конусообразной поверхности 3 стакана 1 и содержит кольцеобразную выемку 5 и отверстие 6 для подвода аргона, прокладку 7, расположенную по контактирующему участку стакана 1 и трубы 4. Верхняя часть прокладки 7 имеет верхнюю торцевую поверхность, расположенную по торцевой поверхности огнеупорной трубы 4. Нижняя торцевая поверхность прокладки 7 расположена над кольцеобразной выемкой огнеупорной трубы 4. Верхняя торцевая поверхность прокладки 7 выполнена с наружным диаметром (D) не менее 1,2 диаметра (d) отверстия огнеупорной трубы 4 в верхней своей части. Прокладка 7 выполнена из пластичного огнеупорного материала.

Отмеченное конструктивное выполнение прокладки 7 обеспечивает надежную фиксацию трубы 4 относительно стакана 1 исключение прохождения воздуха в струю металла и рациональные параметры подачи аргона в кольцевую выемку 5 трубы 4. Надежная фиксация трубы 4 исключает возможность смещения трубы 4 относительно стакана 1 в течение всего цикла разливки стали из сталеразливочного ковша, что также приводит к повышению качества разливаемого металла.

В процессе установки огнеупорной трубы 4 относительно конусообразной поверхности 3 стакана 1 происходит смещение нижней торцевой поверхности прокладки 7, что приводит к частичному или полному перекрытию кольцеобразной выемки 5 и отверстия 6 для подачи аргона. В результате происходит подсос воздуха в струю металла при разливке. Это приводит к интенсивному насыщению разливаемого металла газами, в частности азотом, и к снижению качества непрерывно литой заготовки. Выполнение верхней торцевой поверхности прокладки 7 диаметром D меньше 1,2 диаметра d отверстия огнеупорной трубы 4 в верхней своей части позволяет избежать указанных недостатков. При использовании данного устройства на МНЛЗ предварительно на трубу 4 в верхней части устанавливают прокладку 7. Используя манипулятор, трубу 4 фиксируют на стакане 1. При этом форма выполнения сопрягаемых поверхностей и соответствие геометрических размеров конструктивных элементов позволяет обеспечить надежную фиксацию трубы 4 в стакане 1. Затем из отверстия 6 подают аргон, а через подводный канал 2 стакана 1 подают жидкий металл.

Составлена модель системы сталеразливочный ковш-струя металла-промежуточный ковш (СРК – СМ - ПК), в которой использовано уравнение Навье-Стокса для нестационарных потоков жидкости (жидкого металла), уравнение неразрывности потока.

Геометрию модели определяют особенностью компоновки оборудования системы СРК - СМ - ПК. Масштаб модели составлял 1:1. Соответствующие уравнения имеют вид [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \vec{u} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор скорости жидкости; \vec{F} – вектор объёмных сил; p – давление жидкости; ∇p – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ – лапласиан \vec{u} ; ρ – плотность стали.

Вектор объёмных сил с учетом действующего гравитационного поля земли определяется в выбранной системе координат как

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \cdot g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

Допущение о постоянной плотности металла ρ может быть сделано для системы СРК - СМ - ПК в случаях, когда разница температур жидкой стали в СРК и ПК не слишком велики.

При расчете турбулентных течений металла в системе СРК - СМ - ПК используется ($k - \epsilon$)-модель турбулентной вязкости [6]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнения Навье-Стокса, включает молекулярную вязкость μ и турбулентную вязкость μ_t .

В математической модели процесса разлива металла были сделаны допущения [3]:

- Считаем, что моделируемый процесс протекает в объеме, ограниченным контуром области моделирования.
- Объемы, в которых происходит исследование (СРК и ПК), изначально заполнены жидкостью.
- Жидкость является вязкой и несжимаемой.
- Моделируем процессы разлива открытой и закрытой струями.
- Скорость истечения жидкости из СРК в ПК постоянна и задана.
- Расход жидкости из ПК в кристаллизаторы равен расходу жидкости из СРК в ПК.

Математическое моделирование осуществляли с учетом начальных и граничных условий [6]. Начальные условия дополняют уравнения (1): температура металла в промежуточном ковше 1555°C , скорость вытягивания заготовки $2,8$ м/мин, динамическая вязкость стали $0,006$ Па·с.

Каждую модель делили на конечные элементы. Количество элементов варьировали в зависимости от типа разлива стали из СРК [6].

Параметры сетки: суммарное количество конечных элементов сетки варьировали от 42875 до 682714 при различных способах подачи струи стали из СРК.

На входе расчетной области системы (вход струи стали из СРК открытой или закрытой струёй), задавали начальную скорость потока металла, для сечения заготовок 150x150 мм, скорость будет равна

$$\vec{u} = 1,11 \text{ м/с}.$$

На жидкую сталь, находящуюся вблизи твердых поверхностей (стенки: защитной трубы и ковша), действует пристеночное прилипание

$$\vec{u} = 0. \quad (3)$$

Принятые граничные условия устанавливаются на все внутренние стенки ПК (боковые стенки защитной трубы и ПК, дно ПК), поверхности защитной трубы.

Вдоль плоскости симметрии, проходящей через ось центрального ручья ПК, задается условие

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0, \quad (4)$$

где \vec{n} – орт, перпендикулярный к свободной поверхности или плоскости симметрии.

На свободной поверхности - зеркало металла в ПК также задается условие прилипания

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0.$$

На выходе расчетной области целесообразно задавать давление жидкости, как правило, нулевое

$$p = p_0 = 0 \text{ Па}.$$

При представлении результатов численного моделирования [6] в качестве параметров течения приняты поля скоростей в струе металла, перемещающегося из СРК в приемную камеру ПК. На рис. 2 представлены поля скоростей потоков металла в поперечном сечении приемной камеры ПК.

При разработке системы подачи аргона [7] для подсистемы защитной трубы при подаче стали в ПК следует обратить внимание на три аспекта, связанных с подачей газа:

- чистота подаваемого газа аргона;
- стабильность давления газа при продувке;
- минимальный расход газа при получении положительных результатов продувки.

Давление в системе подачи аргона определяем по зависимости

$$p = p_a + \rho_m g h_m + \rho_{ш} g h_{ш} + \Delta p_l + \Delta p_c + \Delta p_z,$$

где p_a – атмосферное давление; $\rho_m, \rho_{ш}$ – плотности металла и шлака соответственно; $h_m, h_{ш}$ – высоты уровней в сталеразливочном ковше металла и шлака соответственно; Δp_l – потери давления по длине трубопровода; Δp_c – потери давления на выходе из сопла; Δp_z – запас давления; g – ускорение свободного падения.

u, м/с

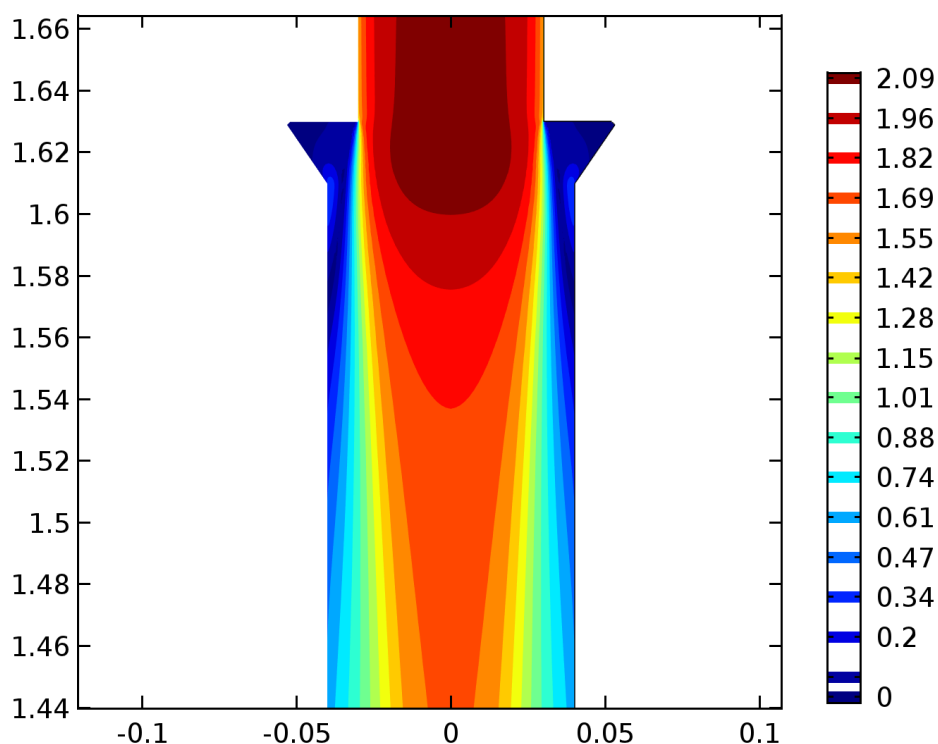


Рис. 2. Поля скоростей потоков стали в поперечном сечении подсистемы струя металла (закрытая струя) – промежуточный ковш

Задача, связанная с определением течения по трубопроводам аргона и истечения его через сопло в расплавленный металл, имеет некоторые сложности, связанные со сжимаемостью газа и, следовательно, меняющимся давлением и удельным объемом газа по трубопроводу. Поэтому в газодинамике предпочитают иметь дело при расчетах не с давлением, а с массовым расходом газа. При установившемся процессе в соответствии с уравнением неразрывности потока газа, массовый расход аргона плотностью ρ , протекающего через отверстие площадью f со скоростью u , определяется соотношением:

$$G = f u \rho = const.$$

Уравнения движения идеального газа при политропном режиме имеет вид [8]:

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + g z_1 = \frac{u_2^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} + g z_2,$$

где u_1, u_2 ; p_1, p_2 и ρ_1, ρ_2 – соответственно скорость, давление и плотность газа в сечениях газового потока на входе в трубопровод и на выходе из трубопровода в отверстие подсистемы защитной трубы; n – показатель политропы; z_1 и z_2 – нивелированные высоты рассматриваемых точек газового потока.

Пренебрегая разностью высот, получим

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2}.$$

Принимая $u_1 = 0$ (т.е. пренебрегаем скоростью газа в расходном резервуаре) и, учитывая для идеального газа соотношение $\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$, получим скорость газового потока на входе в отверстие подсистемы защитной трубы

$$u_2 = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)}.$$

Массовый расход газа

$$G = f \rho_2 \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)},$$

или учитывая вышеприведенное соотношение для идеального газа объемный расход газа:

$$Q = f \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot p_1 \rho_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right)}.$$

Для разрабатываемой подсистемы защитной трубы с подачей аргона определены параметры продувки. Подаваемое давление в аргонопроводе составит 0,25 – 0,3 МПа. Расход газа при этом должен составлять 0,25–0,4 л/мин.

Список использованной литературы:

1. Аверин В.В., Ревякин А.В., Федорченко В.И., Козина Л.Н. Азот в металлах. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
2. Вдовин, К. Н. Новые вставки из пластичных огнеупоров для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин [и др.] // Новые огнеупоры. – 2014. – № 7. – С. 41--43.
3. Vdovin, K. N. Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V.V. Tochilkin, I. M. Yachikov // Refractories and Industrial Ceramics. - 2016. - Т. 56, № 6. - P. 569--573.
4. Vdovin, K. N. New Plastic Refractory Linings for Protecting a Metal Stream During Pouring into a CBCM / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 318 – 320.
5. Патент на полезную модель 177994 РФ, МПК В22D 41/00. Устройство для защиты струи металла при разливке на машине непрерывного литья заготовок / К.Н. Вдовин, Е.А. Мельничук, В.И. Умнов, В.В. Точилкин. Заявлено 22.03.2017; Опубликовано 19.03.2018. Бюл. № 8.
6. Вдовин, К. Н. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. – 348 с.

7. Разработка систем подачи аргона для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К.Н. Вдовин, С.Н. Ушаков, О.А. Марочкин, В.В. Точилкин // Технология металлов. – 2013. – № 6. – С. 38 – 40.

8. Точилкин В.В., Филатов А.М. Пневмопривод металлургических манипуляторов: Монография.- Магнитогорск: МГТУ, 2005. – 211 с.

МЕХАНИКА КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 629.367

Развитие и эффективное применение экскаваторов при погрузочно-разгрузочных работах

А.С.Худченко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье рассматривается развитие экскаваторостроения с момента появления первого экскаватора до настоящего времени. По каким признакам их подразделяют, для каких видов работ используют. Каким дополнительным оборудованием в настоящее время могут быть оснащены экскаваторы.

Ключевые слова: *Одноковшовый экскаватор, экскаваторы непрерывного действия, оборудование экскаваторов, оборудование.*

В различных отраслях народного хозяйства ежегодно выполняются громадные объемы земляных работ и погрузочно-разгрузочных работ, обладающая часть которых производится экскаваторами.

Появлению первого экскаватора способствовало активное железнодорожное строительство в США, нехватка рабочих сподвигнула американца Отиса в 1832-1836гг разработать и создать модель первого парового экскаватора, который имел ходовую часть железнодорожного типа, ковш объёмом 1,14 м³, двигатель в 15 л.с., среднюю производительность в 45-50 м³/час. Такой экскаватор мог заменить около 50 строительных рабочих, а уже через несколько лет усовершенствованные модели Отиса могли заменить до 180 рабочих. Первым покупателем экскаватора стала Англия в 1842 году, после чего годом позже ещё четыре экскаватора были направлены в Россию для строительства Николаевской железной дороги. Но российские подрядчики не захотели использовать его при строительстве, и в 1848 году они были проданы на Урал, где в Нижнем Тагиле экскаватору нашли новое применение - для использования при добыче руды.

Крупномасштабное строительство каналов и железных дорог во второй половине девятнадцатого века, способствовало к активному развитию землеройных машин.

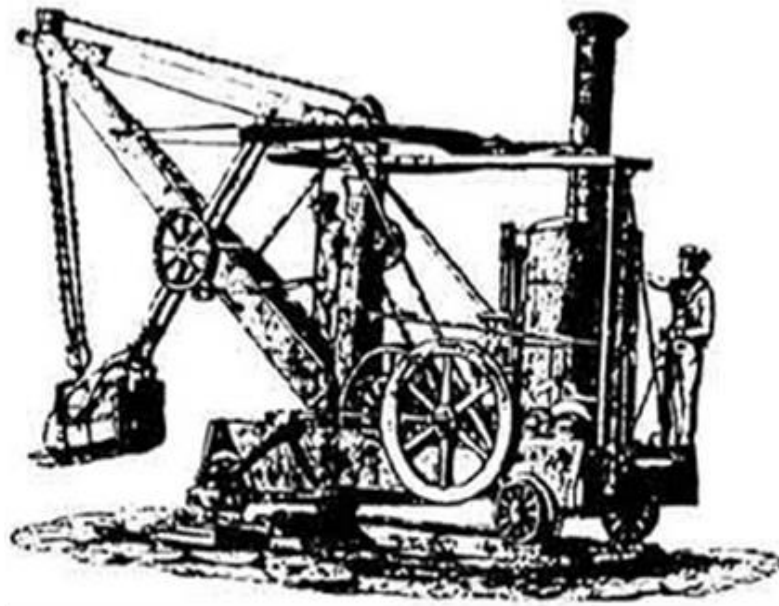


Рис.1. Первый паровой экскаватор на железнодорожном ходу

Германия в то время активно применяла "строительные локомотивы", на которых были установлены одноканатные грейферы.

Россия же, до конца девятнадцатого века продолжала пользоваться дешёвой рабочей силой и все землеройные работы выполнялись в ручную. И только при строительстве Транссибирской магистрали началось использование американских "землекопных машин".

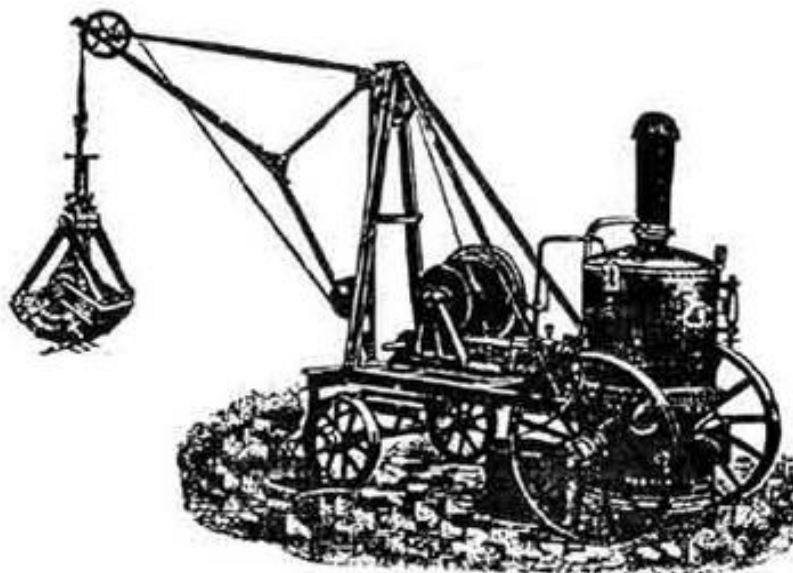


Рис.2. Строительный локомотив с одноканатным грейфером

В 1902 году на Путиловском заводе был построен первый русский неполноповоротный экскаватор железнодорожного типа, который оснащался сменным ковшом $2,3\text{ м}^3$ и $1,5\text{ м}^3$. Весом в 65-75 тонн экскаватор обладал производительностью $100\text{-}290\text{ м}^3/\text{час}$. Благодаря интенсивности использования экскаватора при земляных работах в России к 1917 году их было построено 35 единиц, а строились и использовались машины такого типа до 30-х годов.

Иногда использовались плавучие неполноповоротные экскаваторы с прямой лопатой.

Масштабное строительство огромных каналов во второй половине XIX и начале XX веков требовало перемещения гигантских масс грунта.

Суэцкий канал начал создаваться в 1859 году, конечная его длина насчитывала 160 км, при строительстве было перемещено 75 млн. кубометров грунта, а использовалась в основном ручная рабочая сила, что растянуло сооружение канала на 10 лет.

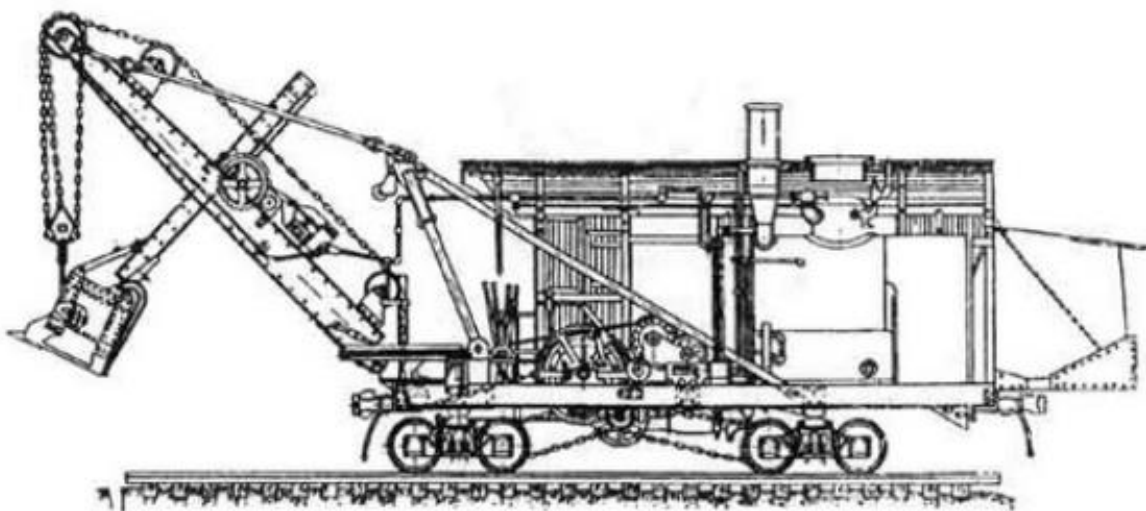


Рис. 3. Паровой неполноповоротный экскаватор «Ковровец»

Панамский канал строился с 1880 по 1913 гг. В период с 1903 по 1913 гг. было задействовано более 100 одноковшовых и около 20 многоковшовых экскаваторов. Объем грунта, перемещенного при строительстве, составил 160 млн. м^3 .

Конец первой Мировой войны стал началом общего развития техники, это сказалось и на экскаваторах. Экскаваторы начали оснащаться двигателями внутреннего сгорания и электроприводами, мощность и мобильность экскаваторов увеличилась за счет применения гусеничного и шагающего хода, вместе с увеличением видов дополнительного оборудования (прямая и обратная лопата, струг, драглайн...) увеличилась и сфера применения (тоннельные, вскрышные работы...). В то время, пока США и Россия пытались совершенствовать одноковшовые экскаваторы, Германия

активно занималась строительством более мощного многоковшового экскаватора и специальных машин.

К началу 50-х годов использовались экскаваторы ЭГЛ-15 (Ново-Краматорского завода), Марион и Бюсайрус (американского производства), имеющие гигантские размеры и ковш объёмом в 30 м³.

Применение новых машиностроительных технологий во второй половине XX века позволило существенно усовершенствовать экскаватор, наряду с разработкой дополнительного оборудования он стал действительно универсальной машиной.

Сейчас ручной труд при выполнении земляных работ используется очень редко, причиной могут быть либо чересчур стеснённые условия работы или при избытке бесплатной рабочей силы.

Современные экскаваторы, имеющие широкий диапазон типоразмеров и разное рабочее оборудование, находят применение при выполнении работ по разработке грунта при устройстве выемок и насыпей, резервов.

Как правило, их подразделяют на две группы: непрерывного действия - многоковшовые и периодического (циклического) действия - одноковшовые.

Экскаваторы непрерывного действия выполняют копание грунта и его перемещение – т.е. обе операции одновременно, а периодического действия - последовательно, прерывание копания во время перемещения грунта.

Наиболее широко распространены одноковшовые экскаваторы которые считаются универсальными, так как они могут использоваться на погрузочно-разгрузочных и других видов работ, а при рытье траншей в основном применяются многоковшовые экскаваторы.

Эффективное использование одноковшовых строительных экскаваторов требует от обслуживающего персонала постоянного повышения уровня знаний, овладения передовыми методами управления, эксплуатации и обслуживания. С организацией крупносерийного производства гидравлических экскаваторов, эти требования значительно возросли, которые отличаются сложным устройством различных механизмов и систем. Конструкция и оборудование экскаваторов с каждым годом совершенствуется.

Удлиненное оборудование применяется для поддержания в рабочем состоянии русел рек, выемок водоемов и каналов путем вычерпывания различных отложений и грязи и для обрезки водных растений. Для использования рабочего оборудования в режиме прямая лопата, ковш обратной лопаты устанавливаются на рукоять с поворотом на 180° относительно вертикальной оси.

Кроме экскаваторного оборудования экскаваторы ЕК270 могут быть оснащены рыхлителями, грейфером, шнековым буром, гидромолотом. Замена сменных рабочих органов осуществляется машинистом в полевых условиях с помощью быстросъемного устройства.

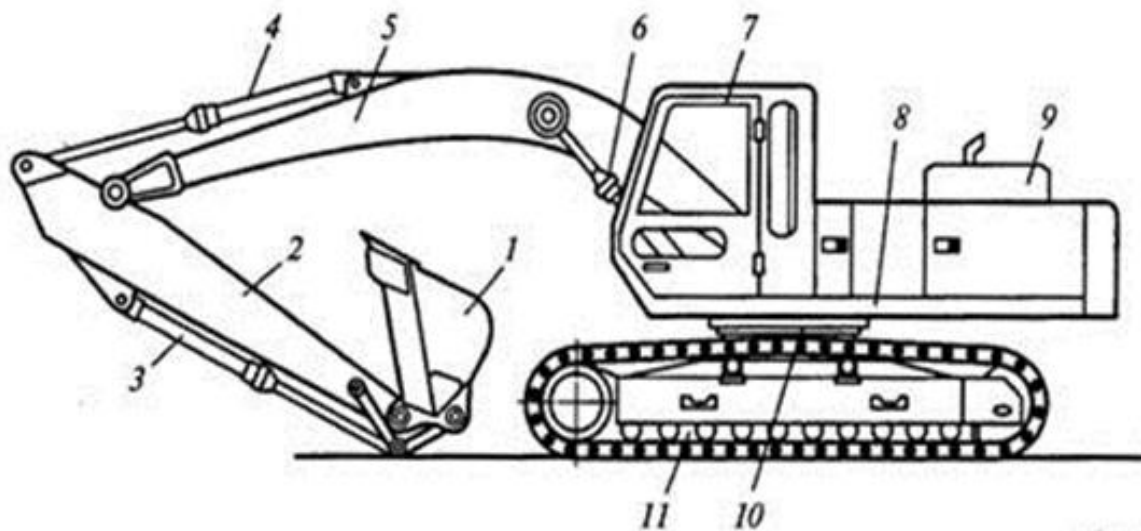


Рис. 4. Одноковшовый полноповоротный гусеничный экскаватор ЕК-270: 1. ковш; 2. рукоять; 3, 4, 5. гидроцилиндры; 6. стрела; 7. кабина оператора; 8. поворотная платформа; 9 - силовая установка; 10 - опорно-поворотное устройство; 11. гусеничное ходовое устройство

Основное направление развития экскаваторостроения - увеличение производительности экскаваторов за счёт применения машин всё большей единичной мощности.

Список используемой литературы:

1. Дроздова, Л.Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. Пособие /Л.Г. Дроздова, О.А. Курбатова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 235 с.
2. Сапоненко У.И. Машинист экскаватора одноковшового : учеб. пособие / У. И. Сапоненко. — М. : Издательский центр «Академия», 2008.
3. Сапоненко У.И. Машинист экскаватора одноковшового : учеб. пособие / У.И. Сапоненко. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 64 с.
4. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учебное пособие для вузов по направлению "Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов" / В. Б. Пермяков [и др.]. - Москва : БАСТЕТ, 2014. - 751 с.

Применение погрузчиков и эффективность их использования при погрузочно-разгрузочных работах

А.С. Худченко, К.А. Сериков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье рассматривается применение погрузчиков и эффективность их использования при погрузочно-разгрузочных работах. Для каких видов работ используются погрузчики. По каким факторам подбираются погрузчики для эксплуатации в складских помещениях, цехах и открытых площадках. Устройства, используемые для въезда погрузчиков в склад с прилегающих к нему площадок и в обратном направлении. Продолжительность цикла при эксплуатации погрузчика.

Ключевые слова: *погрузчики, эксплуатация погрузчика, продолжительность цикла, выбор погрузчика, захват груза, операции, погрузка и разгрузка.*

Погрузчики являются одним из самых востребованных видов специализированной техники. Благодаря своей высокой продуктивности и скорости работы они успешно используются в различных сферах экономики.

Самые первые погрузчики предшественники современных погрузчиков появились ещё в конце XIX — начале XX века. В 1906 году Pennsylvania Railroad представила первую платформу с электроприводом для перевозки багажа, которая использовалась на её станциях.

В Европе первый погрузчик (фирма Ransomes & Rapier, Ипсвич, Великобритания) был оснащен электроприводом и мачтой на тросах.

Компания Ransomes разрабатывает первый вилочный погрузчик с наклонной мачтой (около 1920 г.)

Развитие производства погрузчиков, в первую очередь в США ускорила Вторая мировая война. Изначально американская компания Hyster производила погрузчики для использования в армии США, после Второй мировой войны они остались работать в Европейских странах на восстановлении разрушенных городов и стали популярны так как были достаточно мощны и надежны.

В СССР в 1948 году был построен и введён в эксплуатацию свой собственный Львовский завод автопогрузчиков. С помощью погрузчиков, оснащенных различным навесным оборудованием, можно осуществлять погрузку и разгрузку, а также перевозку на непродолжительные расстояния самых разных видов грузов.

Вилочные погрузчики могут применяться для перевозки практически любых грузов, таких, как – медицинские товары, продукты питания, бытовую химию, косметическую продукцию и многое другое. Для небольших складов рационально использование электрических погрузчиков. Дизельные же рекомендованы для работ на более больших площадях площадок – например, на вокзалах, в морских портах, аэропортах.

Погрузчики предназначены для выполнения землеройно-транспортных операций с разработкой разрыхленных грунтов, для погрузки сыпучих и кусковых материалов в транспортные средства или в отвал, а со сменными рабочими органами - для обработки штучных грузов, в том числе длинномеров, контейнеров, валунов, для выполнения монтажных работ, на снегоочистке. Погрузчики могут использоваться для перемещения и подачи к месту производства работ в пределах рабочей площадки (до 150 м) различных материалов, строительных деталей и оборудования.



Рис. 1. Погрузчик

При выборе погрузчика необходимо определиться: для каких задач будет использоваться погрузчик, и какие технические характеристики наиболее важны. В каком режиме будет эксплуатироваться погрузчик, на складе или на улице, какой массы грузы нужно будет перевозить.

Для правильного выбора погрузчика необходимо проанализировать все его характеристики и оценить по следующим техническим показателям:

- требуемая максимальная грузоподъемность;
- необходимая высота подъема груза;
- ресурс работы погрузчика;
- безопасность условий эксплуатации;
- тип двигателя погрузчика;
- наличие дополнительных опций для нестандартных грузов;
- габаритные размеры погрузчика.

Данные показатели являются наиболее важными при выборе погрузчика, но всего технических характеристик конечно же гораздо больше, и их также придется проанализировать во время приобретения и перед пуском в эксплуатацию погрузчика. Какими же основными факторами, следует руководствоваться при подборе подходящего погрузчика? Если рассматривать электропогрузчики, то следует учитывать фактор зарядки либо разрядки аккумуляторной батареи. Также иметь ввиду, что у четырехопорных электропогрузчиков поворотными являются задние колеса, а у трехопорных заднее колесо может быть сдвоенное, либо одно вовсе. Применяются такие электропогрузчики преимущественно в закрытых помещениях.

Что же касается автопогрузчиков, то их можно конечно же использовать как на улице, так и в закрытых помещениях, но следует учитывать, что этот вид работает на дизельном топливе, бензине или газе что приводит к выхлопным газам и загрязнению окружающей среды. Автопогрузчики очень часто проходят техническое обслуживание.



Рис.2 Общий вид электропогрузчика

При использовании, например, автопогрузчиков в закрытых складах и производственных помещениях, должна быть обеспечена хорошая вентиляция закрытого помещения, а освещение составлять не менее 20 лк и располагаться на высоте 0,8 м над уровнем пола.

Наклонные дорожки для въезда погрузчиков в склад с прилегающих к нему площадок или автопроезда должны быть выполнены с уклоном к горизонту не круче 1 : 10. Так же, должны быть предусмотрены наклонные дорожки для въезда погрузчиков в крытые вагоны и выезда из них в склад, а при наличии, должны применяться простейшие переносные мостики в виде стального рифленого листа прямоугольной формы толщиной 7—8 мм.

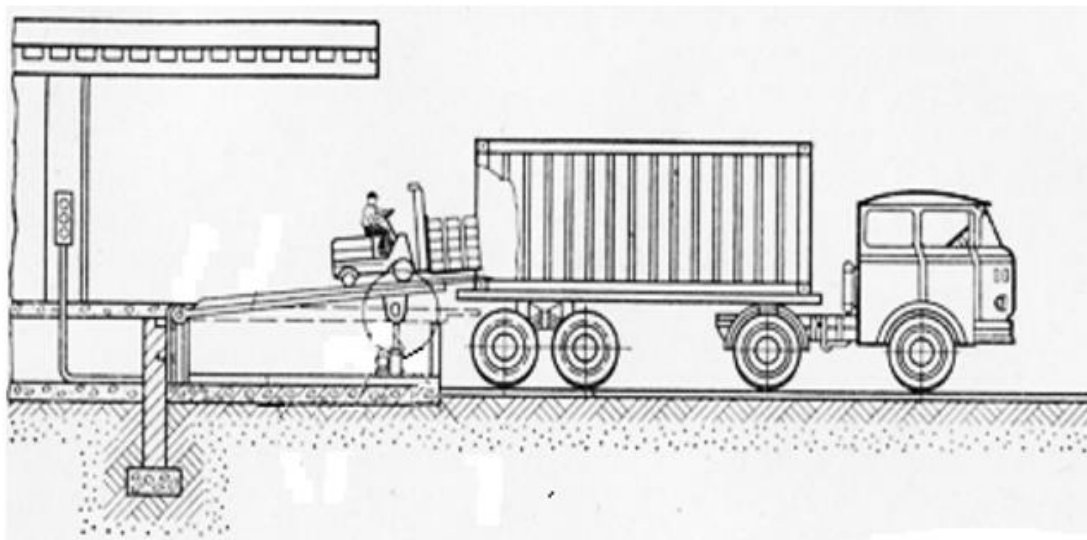


Рис.3. Автоматизированный встроенный мостик
Рис.1. Первый вилочный погрузчик с наклонной мачтой

При определении производительности авто- и электропогрузчиков в каких-либо условиях эксплуатации рассчитывается продолжительность цикла. Продолжительность цикла зависит от затраченного времени в основном на захватывание груза, установку его на место и на передвижение с грузом и в порожнем состоянии. При работе без замены грузозахватного приспособления продолжительность двух первых операций в средних условиях практически постоянна, кроме случаев при работе (захвата груза и установки на место) в стесненных условиях, а именно вблизи от дверей внутри крытого вагона. Установка ящичного поддона или пакета в этих условиях занимает даже при наличии механизма поперечного смещения вил у электропогрузчиков около 1—2 мин.

Время установки в вагоне поддонов первого яруса составляет в среднем 18—20 с. Для поддонов, устанавливаемых во второй ярус, время, указанное выше, увеличивается приблизительно на 20 с, а для устанавливаемых в третий ярус — на 40 с.

При работе погрузчиков на открытых складских площадках, они должны иметь покрытие, аналогичное принимаемому для автомобильных дорог с пониженной интенсивностью движения. Покрытие может устраиваться трех типов по типовым проектам, выполненным Союздорпроектом для автомобильных дорог.

Тип I применяется при выдержанном земляном полотне, благоприятных грунтовых и климатических условиях. Должен быть предусмотрен

трамбованный подстилающий слой выполняется из песка, ракушки, щебня либо грунта, обработанного битумом или цементным раствором. Покрытием служит цементобетонная плита толщиной 0,18—0,2 м.

Типы II и III рекомендуется применять в любых климатических зонах. Для наиболее распространенных грунтов (супеси, суглинки нормального увлажнения) толщина песчаного подстилающего слоя 0,15—0,2 м. Для основания применяются щебень из естественных камней и шлак.

При организации работ погрузчиками необходимо следить за соблюдением установленных режимов работы машин, не допускать перегрузок и выполнения работ, не соответствующих предназначению установленного рабочего оборудования.

Список используемой литературы:

1. Абгафоров В.А., Сатановский В.Г. Эксплуатация и ремонт погрузо-разгрузочных машин. М.: Транспорт, 1982. 241 с.
2. Волков, Д.П. Строительные машины / Д.П. Волков, В.Я. Крикун. – М.: АСВ, 2002. – 376 с.
3. Иванов Б.К. Водитель авто- и электропогрузчиков: учебное пособие / Б.К. Иванов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 308 с.
4. Игумнов, С. Г. Водителю погрузчика / С.Г. Игумнов. - М.: ДЕАН, 2011. - 184 с.
5. Гриневич Г.П., Мачульский И.И., Алепин Е.А. Вилочные погрузчики. М.: Машиностроение, 1974. 214 с.
6. Мачульский И.И. и др. Электропогрузчики: Справочник (И.И. Мачульский, В.И. Капырина, Е.А. Алепин) – М.: Транспорт, 1987. – 238 с.
7. Немченко В.В. Устройство и техническая эксплуатация автопогрузчиков (учебное пособие). Ильичевск : ИМК ОНМУ, 2013. – 352 с.

УДК 629.083

Стенд для определения наличия стружки в масле

***Решиков С. А., Короташ В. М., Денисов Д. С., Стрельников А. Н.,
Кокоуров Д. В.***

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, Лермонтова, 83.

Разработан стенд для оценки состояния рабочей жидкости двигателя внутреннего сгорания (масла), предназначен он для определения содержания металлической стружки в масле. Стенд работает по примеру метода диагностирования по параметрам рабочей жидкости на основе закона Ома. Результаты лабораторных испытаний подтвердили работоспособность этого стенда и подтвердили целесообразность применения

для диагностирования рабочей жидкости (масла) в двигателях строительных, дорожных машин и автомобилях.

Ключевые слова: диагностика двигателей, электропроводность, сила тока, загрязнение рабочей жидкости, мультиметр, электрическое сопротивление, продукты износа.

Для определения количества стружки в масле, предложен стенд, показанный на рис. 1, который основывается на законе Ома. На основе закона Ома можно сказать, что чем больше стружки в масле, тем меньше его электрическое сопротивление, соответственно больше сила тока в цепи.

Закон Ома гласит: «Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка».

$$I = U/R [1]$$

Где:

U – напряжение [В];

R – сопротивление в цепи [Ом].



Рис. 1 – Общий вид стенда

С помощью данной установки определяют состояние гидравлического масла. Стенд состоит из: заливной воронки; шестеренчатого насоса НШ-10; электрического двигателя на 220В/120 Вт; токопроводящих контактов; резиновых шлангов; аккумуляторной батареи 12V; электрических проводов; микроамперметра.

Методика проведения испытаний заключается в пропускании постоянного тока через масляную магистраль, тем самым определяя электропроводные свойства масла. Если учесть что масло имеет большое электрическое сопротивление, равное 2,9 кОм (замеры проводились на стенде с чистым моторным полусинтетическим маслом вязкостью 10W40). Как пока-

зывает практика стружка, попадая в масло, повышает его электропроводность. Показания, подтверждающие работу стенда, замеряли с помощью микроамперметра.

Таблица 1. Результаты проводимых опытов по определению частиц металла в масле на разработанном стенде

Номер опыта	Масса стружки, г	Сила тока, mA	Сопротивление масла, кОм
1	0	4,45	2,9
2	0,5	4,49	
3	1,0	4,54	
4	1,5	4,58	
5	2,0	4,61	
6	2,5	4,64	
7	3,0	4,67	
8	3,5	4,7	
9	4,0	4,74	
10	4,5	4,78	
11	5,0	4,82	2,67

Из приведенных в таблице 1 результатов работы стенда можно заметить, что как и предполагалось металлическая стружка при ее наличии в масле повышает его электропроводность, это видно из показания амперметра. Исходя из результатов замера сопротивления до начала опытов чистого масла и масла с содержанием металлической стружки в концентрации 2,5 г/л можно с уверенностью сказать, что наличие частичек металла способствует снижению электрического сопротивления масла. Наглядно результаты опытом можно увидеть на графике 1.

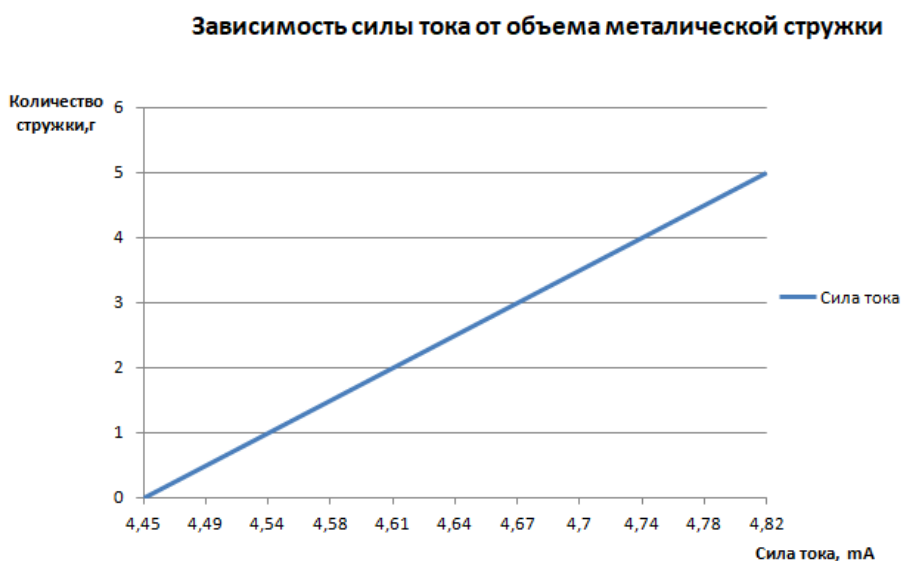


Рис.2. Зависимость силы тока от количества металлической стружки в масле

Исходя из всего вышесказанного предлагаем для определения количества стружки опытную формулу:

$$y = \delta \cdot (x_i - x_{\text{ном}})$$

где: y - количество стружки, г;

δ - коэффициент корреляции, равный;

x_i - показания амперметра, мА;

$x_{\text{ном}}$ - показания амперметра, полученные при замерах чистого масла, мА.

Для применения полученной формулы необходимо расчетным путем определить средний коэффициент зависимости. Значение коэффициента зависимости выражаем из выше упомянутой формулы:

$$\delta = \frac{y}{(x_i - x_{\text{ном}})}$$

Расчеты коэффициентов зависимости приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов коэффициента зависимости

Номер опыта	Значение коэффициента корреляции
1	0
2	12,5
3	11,11
4	11,58
5	12,5
6	13,15
7	13,64
8	14
9	13,8
10	13,6
11	13,9

В связи с погрешностью определения коэффициента зависимости принято решение найти среднее значение коэффициента. На графике 2 показан разброс рассчитанных величин коэффициентов зависимости и принятое среднее значение, равное 12,9.

Значение коэффициента зависимости

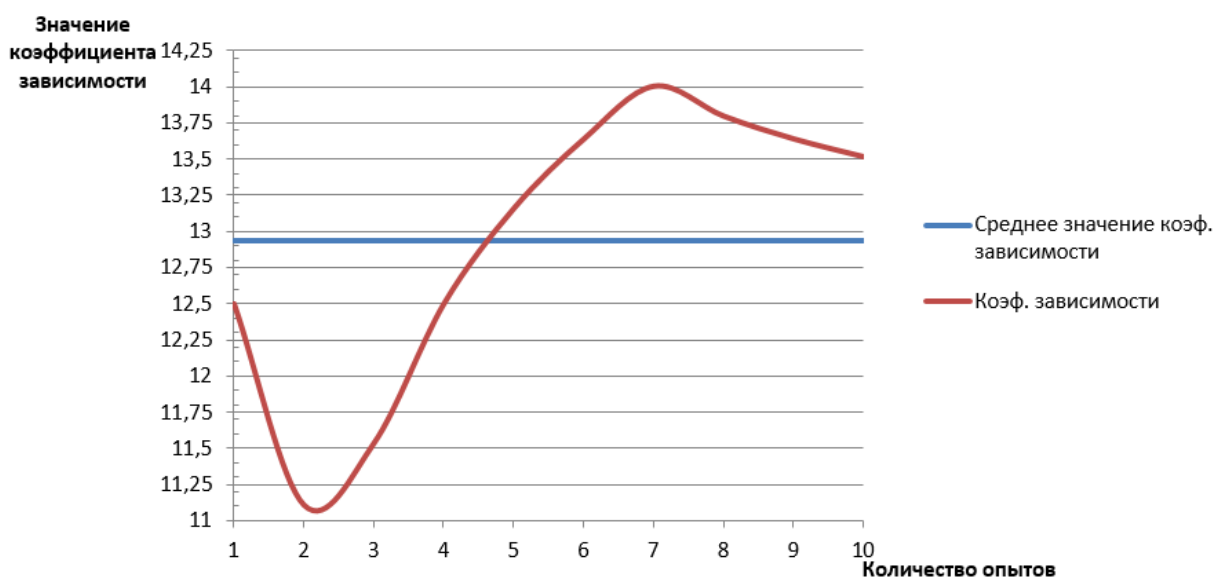


Рис.3 Коэффициент зависимости

Формула, приведенная выше, позволяет определить отклонения в работе двигателя, то есть показывает увеличение величины износа. Благодаря этой формуле нами была определена максимальное количество стружки в масле. Таким образом, после каждой замены масла можно отслеживать величину износа деталей двигателя.

В результате полученных теоретических и практических обоснований получен способ диагностирования состояния масла по таким параметрам, как содержание металла в рабочей жидкости. Разработанный стенд позволяет определять чистоту рабочей жидкости, а также отслеживать повреждение деталей двигателя при каждом плановом техническом обслуживании. Контролирование состояния рабочей жидкости позволяет облегчить эксплуатацию, снизить риск поломки двигателя и повысить его эффективность.

Список используемых источников

1. Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 112 с., ил.
2. Кельдышев В.А. Использование и контроль качества нефтепродуктов: учеб. пособие - Челябинск :, 2004. - 115 с. : ил. - Библиогр.: с. 113.
3. Корчуганова М.А. Топливо и смазочные материалы: учебное пособие / сост. А.П.Сырбаков,; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 159 с.
4. Новикова С.Ю., «Физика диэлектриков». Электронное издание, М: 2007 – 81 с
5. Чередников А. А. Автобусы: Устройство, техническое обслуживание, эксплуатация. – М.: Транспорт, 1999.-216 с.

УДК 624.131

Методика расчета рациональных параметров и режимов работы ковшей экскаваторов с активными зубьями

Р.Д. Абдурахманов, Ю.И. Чеботарёв

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, Лермонтова, 83.

В статье рассмотрена методика определения основных параметров и расчетных нагрузок при проектировании ковшей экскаваторов с активными рабочими органами. Для активизации зубьев ковшей гидравлических экскаваторов используются магнотстрикционные вибровозбудители. Активизация рабочих органов землеройных машин позволяет разрабатывать мерзлые грунты без предварительного рыхления. Это достигается за счет подвода дополнительной энергии в зону контакта рабочих органов с грунтом.

Ключевые слова: *активизация, рабочий орган, магнотстрикционный вибровозбудитель, ковш экскаватора, мерзлый грунт.*

При проектировании ковшей гидравлических экскаваторов с магнотстрикционным приводом активных зубьев необходимо иметь методику определения основных параметров и расчетных нагрузок на рабочем органе. Методика должна позволять рассчитать дополнительные элементы ковша для экскаватора конкретного типа размерного ряда. Расчет дополнительных параметров ковшей заключается в определении частоты колебаний активных зубьев, максимально возможной толщины стружки, касательной составляющей сопротивления копания, мощности, затрачиваемой на копание мерзлого грунта и удельной энергоемкости процесса. Расчет выполняется для определенных грунтовых условий и заданной емкости ковша, когда известны все конструктивные характеристики базового экскаватора.

Существенное влияние на работу ковшей активного действия оказывает толщина стружки. Поэтому за исходный параметр для расчета ковшей активного действия, помимо емкости ковша, необходимо принять максимально возможную толщину разрушаемого слоя мерзлого грунта. Для производительной работы экскаватора необходимо, чтобы его ковш полностью наполнялся за одно черпание на минимальной для данной машины высоте забоя, т.е. при максимальной толщине разрушаемого слоя грунта. Возникающее при этом сопротивление перемещению ковша по забою

должно быть меньше или равно максимальному усилию зубьев ковша, развиваемому данной машиной.

Емкость ковша g и его размеры связаны между собой выражением:

$$g = B \cdot H \cdot L, \quad (1)$$

где B - ширина ковша по внутреннему размеру, м;

H - высота ковша по внутреннему размеру, м;

L - длина средней часть ковша, м.

Отношение $B:H:L=1.2:0.95:0.9$

Частота собственных колебаний магнитострикционных вибровозбудителей ω_0 , предназначенных для активизации зубьев ковша, определяется из выражения

$$\omega_0 = \frac{3\pi c_2}{2\sqrt[3]{q}}, \quad (2)$$

где c_1 - скорость звука в материале, из которого изготовлен вибровозбудитель;

q - емкость ковша экскаватора.

Необходимое количество вибровозбудителей определяется исходя из оптимального расстояния между ними d , при котором их взаимодействие максимально. Известно, что при расстоянии между источниками высокочастотных колебаний d , равном длине волны λ_B , суммарная амплитуда колебаний равна удвоенной амплитуде каждого источника

$$d = \lambda_B = \frac{c_1}{f} = \frac{4 \cdot c_1}{3 \cdot c_2} \sqrt[3]{g}, \quad (3)$$

где c_1 - скорость звука в грунте, м/с;

c_2 - скорость звука в материале вибровозбудителя, м/с;

f - частота колебаний, Гц.

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (4)$$

Необходимо отметить, что во избежание заклинивания ковша в грунте, крайний зубья его следует устанавливать как можно ближе к боковым стенкам с тем, чтобы периметр резания превышал ширину ковша (Рис. 1).

Пусть известно, что ширина зубьев равна b . Допустив, что ширина ковша

$$B = \sqrt[3]{g},$$

что верно в первом приближении, и зная оптимальное расстояние между зубьями d , можно найти необходимое число вибровозбудителей n . Из рисунка 1 ширина передней стенки ковша определяется:

$$B = (n - 1)d + nb. \quad (5)$$

Отсюда, количество вибровозбудителей:

$$n = \frac{B+d}{d+b} = \frac{\sqrt[3]{g}(1+1.33\frac{c_1}{c_2})}{\frac{1.33c_1\sqrt[3]{g}}{c_2}+b} \quad (6)$$

Следует заметить, что дробные значения n округляются до ближайшего целого с учетом конструктивных соображений. Расчет вибровозбудителей ведется по методике, разработанной на кафедре «Строительные и дорожные машины и оборудование» ЛИСИ /1/.

Объем грунта в ковше, равный емкости ковша g в плотном теле определяется из выражения:

$$g = \frac{F \cdot l \cdot K_p}{k_H}, \quad (7)$$

где F - площадь поперечного сечения следа разрушения, m^2 ; l - длина хода ковша (высота забоя), м; K_p - коэффициент разрыхления; k_H - коэффициент наполнения ковша.

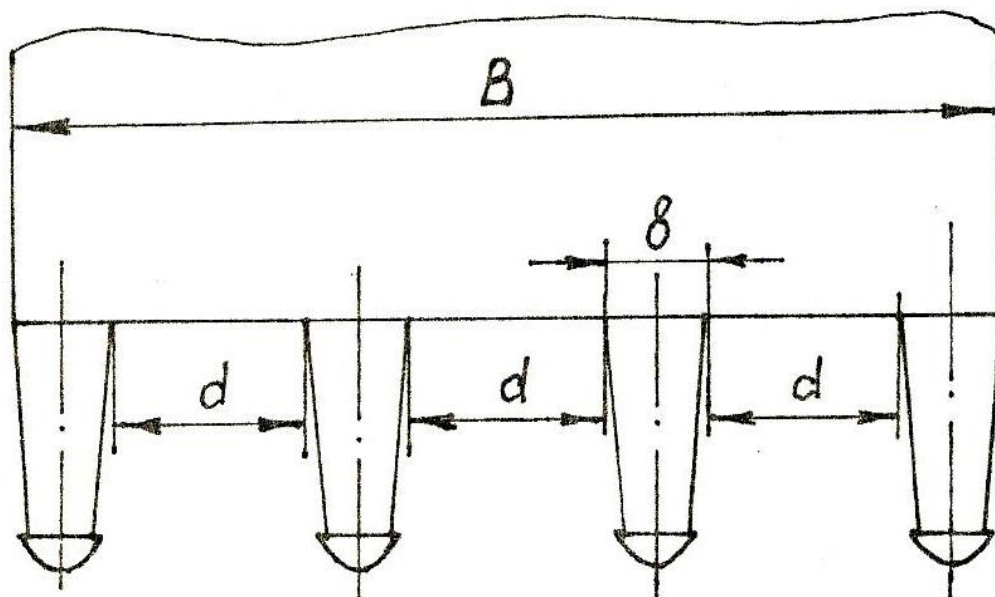


Рис. 1. Схема установки вибровозбудителей на передней стенке ковша

Площадь прямоугольного сечения следа разрушения равна произведению ширины ковша B на толщину разрушаемого слоя h , то есть

$$F = B \cdot h \quad (8)$$

Толщину слоя h , достаточную для наполнения ковша активного действия предварительно можно определить, используя выражения (7) и (8)

$$h = \frac{g \cdot k_H}{l \cdot B \cdot K_p} \quad (9)$$

Приведенная формула справедлива для случая прямоугольного сечения следа разрушения. Однако, при экскавации мерзлого грунта он имеет трапециевидальную форму. Площадь сечения следа разрушения в мерзлом грунте определяется, как площадь трапеции, нижнее основание которой равно ширине ковша, а верхнее – $(B + 2h \operatorname{ctg} \Psi)$, тогда можно записать

$$F = h(B + h \operatorname{ctg} \Psi)$$

Подставив это выражение в (7) и сделав соответствующие преобразования, получим уравнение:

$$h^2 + \frac{\sqrt[3]{g}}{\text{Ctg}\Psi} h - \frac{k_n \cdot g}{l \cdot K_p \cdot \text{Ctg}\Psi} = 0 \quad (10)$$

где Ψ - угол отрыва.

Решая его, найдем исходную толщину разрушаемого слоя:

$$h = -\frac{\sqrt[3]{g}}{2\text{Ctg}\Psi} \pm \sqrt{\left(\frac{\sqrt[3]{g}}{2\text{Ctg}\Psi}\right)^2 - \frac{k_n \cdot g}{l \cdot K_p \cdot \text{Ctg}\Psi}} \quad (11)$$

Это значение толщины стружки должно соответствовать верхнему пределу в блок – схеме алгоритма оптимизации рабочего процесса ковша экскаватора.

Основные характеристики мерзлого грунта можно определить, используя линейные зависимости с выборочным коэффициентом линейной корреляции 0,7-0,8 /2/:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сж}} &= (0,03 - 0,036)C; \\ \sigma_p &= (0,25 - 0,35)\sigma_{\text{сж}}; \\ \tau_p &= (0,5 - 0,6)\sigma_{\text{сж}}; \\ E &= (300 - 430)\sigma_{\text{сж}} \end{aligned} \quad (12)$$

Определив модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность грунта, можно найти остальные характеристики грунта, необходимые для расчета. Скорость распространения упругих волн в грунте определяется выражением:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}; \quad C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (13)$$

C_b, C_t – скорости распространения соответственно продольной и поперечной волн.

Остальные исходные данные необходимые для расчета принимаются из конструктивной характеристики базового экскаватора.

Касательную составляющую сопротивления разрушению определяем, используя выражение:

$$P_k = \frac{P_p}{\cos(\alpha - \frac{\gamma}{2})} \quad (14)$$

где P_p - сопротивление разрушению; α - угол резания; γ - угол заострения зуба.

Производительность разрушения Π определяем из выражения

$$\Pi = \frac{h^2 \cdot f \cdot V_n \cdot (B + 2hctg\psi) \cdot \sin(\alpha + \psi)}{2[ZV_n \sin \alpha \cdot \sin \psi + fhsin(\alpha + \psi)]}$$

Потребляемая вибровозбудителями мощность N_b определяется произведением силы F , с которой активный зуб ковша действует на грунт на колебательную скорость $A\omega$, поделенное на коэффициент полезного действия вибровозбудителя:

$$N_b = \frac{n \cdot F \cdot A\omega}{\zeta} = \frac{n6\pi b A^2 \omega E(1-\nu)}{(7-\nu-8\nu^2) \cdot \zeta}, \quad (15)$$

где n – количество вибровозбудителей.

Удельная энергоёмкость определяется как сумма энергозатрат на перемещение рабочего органа на привод вибровозбудителей:

$$E_y = \frac{P_k \cdot V_n}{\Pi} + \frac{N_b}{\Pi} \quad (16)$$

где V_n - скорость перемещения рабочего органа.

Список использованной литературы:

1. Карпов В. В., Рабодзей Р. И. Исследование высокочастотных вибраторов для разрушения мерзлого грунта. – Механизация строительства, 1978, №4, с. 17-18
2. Суриков В. В. Механика разрушения мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1979. -128с.
3. Бакатин Ю. П. и др. Прогнозирование развития дорожных машин с акустическим воздействием на среду. – В кн.: Повышение эффективности рабочих органов и агрегатов дорожно-строительных машин. М.: МАДИ, 1984, с.121-124.
4. Баловнев В. И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия. – М.: Машиностроение, 1981, 223 с.
5. Батулов А. И., Карпов В. В. Определение оптимальных параметров процесса вибрационного разрушения грунта. – В кн.: Совершенствование проектирования и строительства автомобильных дорог. – Л.: ЛИСИ, 1977, с. 104-106.
6. Абдуразаков А.А., Хасанов А.У., Хайитов К. Исследование влияния количества зубьев на энергоемкость копания экскаваторным ковшом активного действия. – В кн.: Исследование машин для земляных работ. Сб. научн. трудов. М.: Транспорт, 1984, с. 61-68.
7. Недорезов И. А. Экскаваторные ковши активного действия. – М.: Транспорт, 1974.-256с.
8. Недорезов И. А., Абдуразаков А. А. и др. Испытание экскаваторных ковшей активного действия. – Строительные и дорожные машины, 1982, №11, с.5-6

УДК 625. 768. 1

Экспериментальное определение эффективности уборки территории цилиндрической щеткой

В. Г. Зедгенизов, Л.В. Простакова, С.Н. Сякин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости эффективности уборки территории от соотношения поступательной скорости тележки и линейной скорости цилиндрической щетки.

Ключевые слова: поступательная скорость тележки, линейная скорости цилиндрической щетки, эффективность уборки.

Большую часть работ по механизированной уборке городских территорий, автодорог, покрытий аэропортов выполняется при помощи спецтехники с активным рабочим органом, оборудованным цилиндрическими щётками [1,2,3,4,5].

Цилиндрические щетки представляют собой ротор, по периметру которого крепится синтетический или металлический ворс. Расположение ворса может быть сплошным, метельчатым или пучковым. Цилиндрическая щетка при работе совершает два движения – вращается вокруг своей оси и вместе с машиной перемещается поступательно. Вращение щетки производится навстречу поступательному перемещению. Чтобы обеспечить эффект подметания, щетка пригружается. При этом ворс щетки в зоне контакта с очищаемой поверхностью деформируется, и удаление частиц загрязнений с очищаемой поверхности происходит за счет сил упругости ворса.

Машины с активным рабочим оборудованием отличаются разветвлением силового потока от основного двигателя на привод движителя и рабочего органа. От мощности, приходящейся на движитель, зависит скорость передвижения машины и ее производительность. Мощность на рабочем органе определяет эффективность выполнения рабочих операций. Для подметально-уборочных машин – это эффективность уборки территории.

Анализ литературы показывает, что на эффективность уборки оказывают влияние конструкция щетки, показатель удельной ворсистости, ширина пятна контакта, частота вращения и скорость движения подметально-уборочной машины. При этом наибольшее влияние оказывают частота вращения и скорость поступательного перемещения, которые могут меняться в процессе уборки территории. Остальные параметры щетки, влияющие на эффективность, приняты стандартными и остаются неизменными.

В [6] отмечается, что для оптимальной уборки требуется скорость движения машины в пределах 6...12 км/ч. Число оборотов щетки рекомендуется выбирать из расчета 120...150 об/мин. При отклонении от указанных параметров эффективность уборки снижается, а нагрузка на машину возрастает.

По другим данным частота вращения щетки может достигать 300 об/мин. Например, некоторые авторы [7,8] утверждают, что для эффективной работы щетки необходимо соблюдать соотношение:

$$V_2 = w * R = 2 * V_1,$$

где V_1 – скорость подметально-уборочной машины, м/с; w – угловая скорость щетки, рад/с;

R – радиус щетки, м;

V_2 –линейная скорость щетки, м/с.

Углубленных исследований в области эффективности уборки территорий от скоростей V_1 и V_2 в литературе не обнаружено. Поэтому целью представленного исследования является экспериментальное определение эффективности уборки территории от частоты вращения цилиндрической щетки и поступательного перемещения подметально-уборочной машины.

Для проведения исследований разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).



Рис. 1 Экспериментальная установка: 1 – цилиндрическая щетка; 2 – электродвигатель постоянного тока; 3 – ременная передача; 4 – самоходная тележка

Установка состоит из цилиндрической щетки 1, которая приводится в движение от электродвигателя 2 через ременные передачи 3. Рабочее оборудование смонтировано на самоходной тележке 4 грунтового канала.



Рис. 2 а) Очищаемая поверхность с распределенными загрязнениями, б) Очищаемая поверхность с остаточными загрязнениями

Частота вращения щетки измеряется тахогенератором, скорость движения тележки регистрируется на пульте управления грунтового канала.

В ходе эксперимента по очищаемой поверхности равномерным слоем распределялись первоначальные загрязнения $m_n = 300$ г (рис. 2). В качестве загрязнений использовался песок класса 1,25 естественной влажности. После прохода щеточного рабочего оборудования остаточные загрязнения взвешивались на электронных весах (рис. 2).

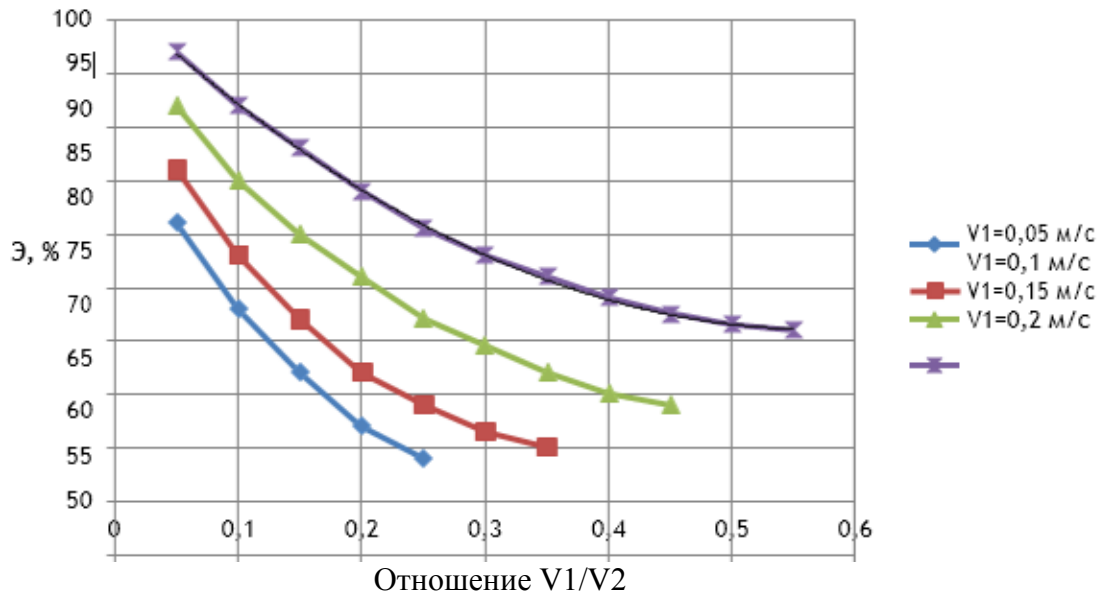


Рис. 3 Зависимость эффективности уборки от соотношения скоростей поступательного перемещения тележки и линейной скорости щетки

Эффективность уборки определялась:

$$\mathcal{E} = \frac{m_n - m_o}{m_n} \times 100\%$$

где m_n – масса начальных загрязнений на убираемом участке, кг; m_o – масса остаточных загрязнений, кг.

В результате выполненных исследований получены зависимости эффективности уборки от соотношения скоростей поступательного перемещения тележки и линейной скорости щетки (рис. 3).

В исследованном диапазоне параметров кривые наилучшим образом описываются квадратичной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2=0,99$:

$$V1=0,05 \text{ м/с } y = 95,1x^2 - 108,5x + 102$$

$$V1=0,1 \text{ м/с } y = 142,2x^2 - 139,3x + 98$$

$$V1=0,15 \text{ м/с } y = 257,1x^2 - 187,8x + 95$$

$$V1=0,2 \text{ м/с } y = 314,3x^2 - 204,3x + 90$$

Как видно из графиков, с увеличением отношения поступательной скорости тележки $V1$ и линейной скорости щетки $V2$ эффективность уборки значительно падает. Так, при изменении указанного отношения в 5 раз эффективность снижается в среднем на 25%. Это обусловлено тем, что время контакта ворсинок щетки с очищаемой поверхностью уменьшается, что приводит к снижению эффективности уборки.

В то же время при увеличении скорости V_1 и неизменном отношении V_1/V_2 эффективность уборки возрастает, так как часть загрязнений убирается за счет поступательной скорости тележки.

При заданной эффективности выгоднее повышать поступательную скорость с одновременным увеличением отношения V_1/V_2 .

Выводы.

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- в исследованном диапазоне изменения независимых факторов повышение линейной скорости щетки значительно увеличивает эффективность уборки. В связи с этим рекомендуется использование на подметально-уборочных машинах щеток увеличенного диаметра;

- с целью повышения эффективности уборки следует увеличивать поступательную скорость с сохранением постоянного отношения V_1/V_2 ;

- с целью повышения производительности машины следует увеличивать поступательную скорость с одновременным увеличением отношения V_1/V_2 .

Список использованной литературы:

1. Куксов М. П. Обзор конструкций малогабаритной подметально-уборочной техники для коммунального хозяйства // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей III Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 11-12 апреля, 2013 г.) – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. С.185-191.

2. Уборка на уровне прогресса и инноваций [Электронный ресурс]. URL: <https://os1.ru/article/9167-kombinirovannye-dorojnye-mashiny-schmidt-v-rossii-uborka-na-urovne-progressa-i-innovatsiy> (27.09.2016).

3. Павлов И. Субкомпактные подметально-уборочные машины // Основные средства. 2018. №3. С. 54-60.

4. Машины для уборки тротуаров в России [Электронный ресурс]. URL: <https://os1.ru/article/5428-mashiny-dlya-uborki-trotuarov-v-rossii-spros-rastet-a-predlojeniy-ne-hvataet> (07.10.2013).

5. Машины для летней уборки [Электронный ресурс]. URL: <http://stroy-technics.ru/article/mashiny-dlya-letnei-uborki>

6. Лепеш А. Г. Повышение эффективности щеточных агрегатов коммунальных уборочных машин. – Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Шахты, 2013. – 123 С.

7. Ермилов А. Б. Расчет и проектирование машин для летнего содержания дорог / МАДИ. – М., 1988.

8. Ахвледиани Х. Д. Определение рациональных конструкций и режимов работы цилиндрических подметальных щеток для малогабаритных машин: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1994. – 284 с.

9. Барашкова С.В. Моделирование работы подметального

устройства

10. / С.В. Барашкова // Вестник МАДИ (ГТУ), вып. 1 (12), 2008. – С.67-72

УДК 62-822

Гидростатическая трансмиссия и её применение на строительной технике

В.Г. Зедгенизов, В.Н. Ляпина

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Изучены понятия гидропривода и гидростатической трансмиссии. Проанализированы достоинства и недостатки гидростатической трансмиссии, рассмотрено ее применение на строительной технике. Представлены технические характеристики бульдозеров и погрузчиков с гидростатическим приводом.

Ключевые слова: *гидропривод, гидростатическая трансмиссия, гидрорепердача, гидронасос, гидростатический привод*

Гидропривод – это совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии.

Основным элементом гидропривода является гидрорепердача. Гидрорепердачей называется устройство, предназначенное для передачи механической энергии посредством жидкости. Рабочей жидкостью для гидрорепердач служат минеральные масла, а также специальные жидкости. В гидродинамических репердачах употребляется вода.

Гидравлические репердачи, входящие в систему гидропривода, подразделяются на две основные группы: гидродинамические и гидростатические или объемные репердачи [2].

Гидростатическая трансмиссия (гидростатическая или объемная репердача) – это гидравлический привод с закрытым (замкнутым) контуром, в состав которого входят один или несколько гидронасосов и гидромоторов. Гидростатическая трансмиссия (ГСТ) предназначена для передачи механической энергии вращения от вала двигателя к исполнительному органу машины, посредством бесступенчатого регулируемого по величине и направлению потока рабочей жидкости. Репердача энергии идет от двигателя к колесу плавно и без рывков через гидравлическую систему «насос-мотор». Данная схема позволяет максимально использовать мощность двигателя для выполнения различных операций и одновременно сохранять заданную скорость перемещения, плавность хода [5].

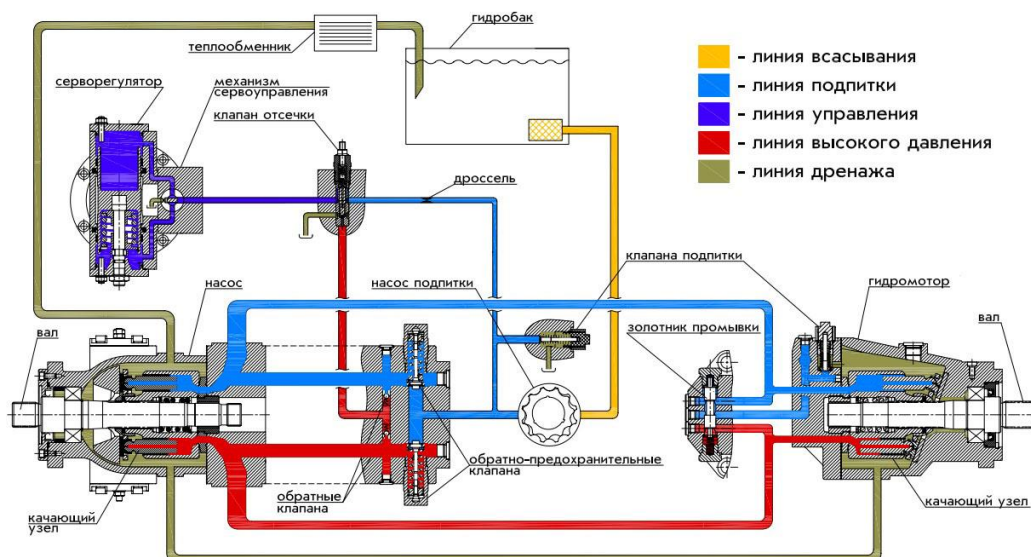


Рис. 1. Схема гидростатической трансмиссии (ГСТ 90)

Для гидростатической трансмиссии используют четыре основные схемы соединения насоса и двигателя:

1. Рабочие объемы насоса и гидромотора постоянны. Такая схема называется «гидравлическим валом», передаточное отношение трансмиссии постоянно. Насос и двигатель соединены трубопроводом, и передаточное отношение определяется отношением рабочих объемов насоса и гидромотора.

2. Рабочий объем насоса можно изменять, а рабочий объем гидромотора остается постоянным. Передаточное отношение и в этом случае определяется отношением рабочих объемов насоса и гидромотора при выбранном рабочем режиме.

3. Рабочий объем насоса постоянный, гидромотора – регулируемый.

4. И, наконец, насос и гидромотор имеют переменные рабочие объемы. Такой вариант трансмиссии отличается особо большим диапазоном регулировки передаточного отношения, однако он наиболее конструктивно сложен и поэтому применяется редко [3].

Главным достоинством гидростатической трансмиссии является возможность плавного изменения передаточного отношения в широком диапазоне частот вращения, что позволяет гораздо лучше использовать крутящий момент двигателя машины по сравнению со ступенчатым приводом. Поскольку выходную частоту вращения можно довести до нуля, возможен плавный разгон машины с места без применения сцепления. Малые скорости движения особенно нужны для различных строительных и сельскохозяйственных машин. Даже значительное изменение нагрузки не влияет на выходную частоту вращения, поскольку проскальзывание у данного типа трансмиссии отсутствует.

Большим достоинством гидростатической трансмиссии является простота реверсирования, которое обеспечивается простым изменением

наклона плиты или гидравлически, изменением потока рабочей жидкости. Это позволяет обеспечить исключительную маневренность транспортного средства.

По мере увеличения рабочего давления гидростатической передачи ее размеры и масса пропорционально уменьшаются. Максимальные рабочие давления могут достигать 45 МПа.

Следующее серьезное достоинство – упрощение механической разводки по машине. Это позволяет получить выигрыш в надежности, ведь зачастую при большой нагрузке на машину карданные валы не выдерживают и приходится ремонтировать машину. В северных условиях это происходит еще чаще при низких температурах. За счет упрощения механической разводки удастся так же освободить место для вспомогательного оборудования. Применение гидростатической трансмиссии может позволить полностью убрать валы и мосты, заменив их насосной установкой и гидромоторами с редукторами, встраиваемыми прямо в колеса. Либо, в более простом варианте, гидромоторы могут быть встроены в мост. Обычно удастся снизить центр тяжести машины и более рационально разместить систему охлаждения двигателя.

Гидростатическая трансмиссия позволяет плавно и сверхточно регулировать передвижение машины или плавно регулировать частоту вращения рабочих органов. Использование электропропорционального управления и специальных электронных систем позволяет достичь наиболее оптимального распределения мощности между приводом и исполнительными механизмами, ограничить нагрузку двигателя, снизить расход топлива. Мощность двигателя используется максимально даже на самых малых скоростях передвижения машины [4].

Недостатком гидростатической трансмиссии можно считать более низкий КПД по сравнению с механической передачей. Однако по сравнению с механическими трансмиссиями, включающими коробки передач, гидростатическая трансмиссия оказывается экономичнее и быстрее. Происходит это по причине того, что в момент ручного переключения передач приходится отпускать и нажимать педаль газа. Именно в этот момент двигатель тратит много мощности, а скорость машины меняется рывками. Все это негативно сказывается как на скорости, так и на расходе топлива. В гидростатической трансмиссии этот процесс происходит плавно и двигатель работает в более экономичном режиме, что повышает долговечность всей системы.

Применение унифицированных сборочных единиц (насосов, гидромоторов, гидроцилиндров, гидроклапанов, гидрораспределителей, фильтров, соединений трубопроводов и др.) позволяет снизить себестоимость привода, облегчить его эксплуатацию и ремонт [1].

Сравнительная характеристика гидромеханической и гидростатической трансмиссий представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика трансмиссий

Сравнение трансмиссий	Гидромеханика	Гидростатика
Производительность	Максимальное тяговое усилие, низкий КПД	Большая управляемость, маневренность, высокий КПД
Экономичность	Большее потребление топлива	Меньшее потребление топлива
Ресурс и общая надежность	Более простая система, ресурс больше, неприхотлива в эксплуатации	Более сложная система, ресурс меньше, требовательна к эксплуатации и сервису, особенно при низких температурах
Ремонтопригодность	Компоненты тяжелее, их физически сложнее и дольше заменять, ремонт и замена длятся дольше	Компоненты легче, их быстрее заменять, ремонт и замена длятся меньше
Затраты на эксплуатацию	Служит дольше	Служит меньше

Часто гидростатическую трансмиссию устанавливают на тракторах. Это позволяет управлять машиной с помощью джойстика, который служит и для заднего хода.

При проектировании гидростатических трансмиссий стремятся максимально использовать их преимущества и компенсировать недостатки. Такие трансмиссии применяются также в трансмиссиях с разветвлением силового потока. Соответствующим исполнением удается использовать в трансмиссии гидростатическую ветвь только при разгоне, а после окончания разгона она выключается. Это позволяет устранить шум, присущий работе этой трансмиссии, и снизить ее износ.

Наиболее частое применение гидростатической трансмиссии – привод хода машин на гусеничном ходу, где гидропривод предназначен для передачи механической энергии от приводного двигателя к ведущей звездочке гусеницы, посредством регулирования подачи насоса и выходной тяговой мощности за счет регулирования гидромотора.

Широкое распространение гидростатическая трансмиссия получила на бульдозерах. Некоторые специалисты называют это явление «гидростатической революцией». Производители данной землеройной техники не сразу признали целесообразность введения ГСТ. Возглавила гидростатическую революцию американская компания «John Deere». Именно она самой первой начала выпускать бульдозеры с ГСТ, а произошло это более 40 лет

назад. В настоящее время вся спецтехника среднего и тяжелого класса от производителей с мировым именем оснащена инновационной гидростатической трансмиссией.



Рис. 2. Бульдозер компании «John Deere»

Гидростатическая трансмиссия, в данном случае, позволяет задействовать дополнительные ресурсы мощности техники только тогда, когда это действительно необходимо, при совершении сложных маневров. Использование ГСТ способствует снижению нагрузки на двигатель машины и уменьшению расхода топлива, а также сокращению эксплуатационных расходов.

Все большее применение ГСТ находит на малогабаритных погрузчиках с бортовым поворотом; дорожных и тротуарных катках; асфальтоукладчиках; автобетоносмесителях, а также на фронтальных погрузчиках. Гидростатические трансмиссии широко применяются в экскаваторах, на железнодорожном транспорте – в тепловозах и путевых машинах, на сельскохозяйственной технике – в зерноуборочных и кормоуборочных комбайнах [6].

Таблица 2 Бульдозеры с гидростатическим приводом

Производитель	Модель, вес (т), мощность (л.с.)					
	Liebherr	PR 724L	PR 734L	PR 744L	PR 754L	PR 764L
16,8–20,3		18–22,1	24,6–30,9	35–42,4	45,2–53,6	64,7–73,2
163		204	252	340	422	768
John Deere	750J-II	850J-II	950K	1050K	–	–
	15,6–16,7	18,2–20,1	29,6–33,4	42,8–43,1	–	–
	155	205	265	350	–	–
ДСТ-УРАЛ	–	ГСТ9/ГСТ10	ГСТ12	ГСТ15	ГСТ20	–
	–	17,5/19	21	26	38,5	–
	–	180	240	300	412	–
Cat (Qingzhou) Ltd	SEM816	–	SEM822	–	–	–
	17	–	26	–	–	–
	160	–	220	–	–	–
Caterpillar	D6K2	–	–	–	–	–
	14,3	–	–	–	–	–
	160	–	–	–	–	–
Case	1650M	1850K	2050M	2550	3550	–
	17,9–18,8	20–22,4	20,2–22,8	30,4	39,1	–
	162	194	214	237	345	–
Shantui	DH17	–	–	–	–	–
	18,9	–	–	–	–	–
	173	–	–	–	–	–

Таблица 3 Погрузчики с гидростатическим приводом

Модель	Максимальная высота подъема, м	Грузоподъемность на максимальной высоте подъема, т	Минимальный радиус поворота, мм	Мощность двигателя, л.с.	Привод	Масса модели
AUSA CH280	6,80	1,4	4495,8	59	4WD	4,6
Manitou M30	6,85	1,6	4064,0	80	2WD/ 4WD	6,6/6, 8
Master Craft AE-6200	6,40	н.д.	3860,8	80	2WD/ 4WD	6,2/6, 2
Master Craft C-06-700	9,14	0,7	4292,6	78	2WD/ 4WD	6,9/7, 2
Master Craft HD-06-660	6,40	2,7	3987,8	80	2WD/ 4WD	7,0/7, 2
Master Craft RT/C-06-440	6,40	2,7	347,98	80	2WD	15,23 7
Waldon 6000C Fork-lift	4,57	1,81	3479,8	80	4WD	5,2

Вывод: В силу своих преимуществ гидростатические трансмиссии получили большое распространение на спецтехнике среднего и легкого класса.

Благодаря гидрообъемным передачам стало возможным реализовать передачу больших мощностей, создать высокий момент на выходном валу, осуществлять бесступенчатое регулирование скорости на различных видах техники, в том числе и на строительной-дорожной технике. Поэтому вполне возможно, что ГСТ заменят другие виды трансмиссий и на строительной-дорожной технике тяжелого класса.

Список использованной литературы:

1. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 301 с.
2. Гавриленко Б.А., Минин В.А., Рождественский С.Н. Гидравлический привод. – М.: Машиностроение, 1968. – 502 с.
3. Гидростатический привод. – URL: <http://dizelpapchast.narod.ru/27/> (дата обращения 25.03.2019).
4. Ходячих А.Н., Прохорова Е.В. Гидростатическая трансмиссия бульдозеров. // Материалы IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2017/article/2017030302/> (дата обращения: 25.03.2019).
5. Гидростатическая трансмиссия. – URL: <http://www.kemkran-dst.ru/dst/gst.php/> (дата обращения 25.03.2019).
6. Гидравлическая трансмиссия – способы регулирования в гидростатической трансмиссии. – URL: <http://www.hydro-pnevmo.ru/topic.php?ID=59/> (дата обращения 25.03.2019).

УДК 629.33

***Результаты физического моделирования неисправностей
автомобильного электробензонасоса***

Д.А. Чернышов, А.В. Пузаков

Оренбургский государственный университет, 460018 г. Оренбург, пр. Победы, 13

В работе представлены результаты изменения параметров электробензонасосов (ЭБН) при физическом моделировании неисправностей электродвигателя. Установлены критические значения сопротивления, соответствующие переходу насоса в неисправное состояние и его отказу. Разработана математическая модель работоспособности электродвигателя ЭБН, связывающая между собой значения силы тока, напряжения, сопротивление обмотки и противодействия. Разработаны критерии работоспособности электродвигателя ЭБН.

Ключевые слова: *автомобильный электробензонасос, физическое моделирование неисправностей, модель работоспособности.*

Электробензонасос (ЭБН)– это главный компонент топливной системы автомобиля, который подает топливо в топливную рампу, а из нее во впускной коллектор двигателя. Снижение его эксплуатационных свойств, связанное с износом механической части, ведет к потере давления в системе топливоподачи, повышению токсичности, снижению экономичности двигателя. Отсюда следует, что необходимо периодически диагностировать техническое состояние топливных насосов.

К причинам нарушения работоспособности бензонасоса можно отнести: некачественное топливо, нарушения правила эксплуатации (езда без бензина), низкое качество комплектующих, износ деталей [11].

К основным неисправностям ЭБН можно отнести: износ щеток, нарушение герметичности, обрыв или замыкания обмотки [14].

Вышеперечисленные неисправности проявляются следующим образом: повышенный расход топлива, затрудненный пуск двигателя, запах топлива и другие.

Исследования работоспособностью ЭБН занимались такие ученые как: А. В. Гриценко [1, 2, 5, 6], К. И. Лукомский, Д. Б. Власов [6, 7], К. В. Глемба, Rolf GRAF, Thomas Raymond Culbertson, Ross Dykstra Pursifull, Dennis McDonald и другие [8, 9, 10].

Таблица 1 – Ранее проведенные исследования

Автор исследования	Тема исследования	Издательство, город, год.
А. В. Гриценко, К. И. Лукомский, Д. Б. Власов, К. В. Глемба	Тестовое диагностирование электрических топливных насосов. [1]	«АПК России», Троицк, 2017 г.
А. В. Гриценко Д. Б. Власов	Определение технического состояния ЭБН на тестовых режимах его диагностирования [2]	«Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика», Воронеж, 2017 г.
Thomas Raymond Culbertson, Ross Dykstra Pursifull, Dennis McDonald,	Detection of fuel system problems [3]	Visteon Global Technologies, Inc., Van Buren Township, MI (US) 2007
Rolf GRAF	Method for monitoring an electromotively driven fuel pump and fuel feed unit having a fuel pump [4]	Glashutten (DE) 2012

Ими установлено, что производительность насосов можно оценить по величине падения напряжения и силе потребляемого тока, причем эти параметры зависят от наработки бензонасоса.

Для оценки технического состояния топливных насосов нами предложена конструкция стенда [13, 15], включающая: емкость тестовой жидкости, фильтры, бензонасос, ротаметр, манометр (рис. 1).

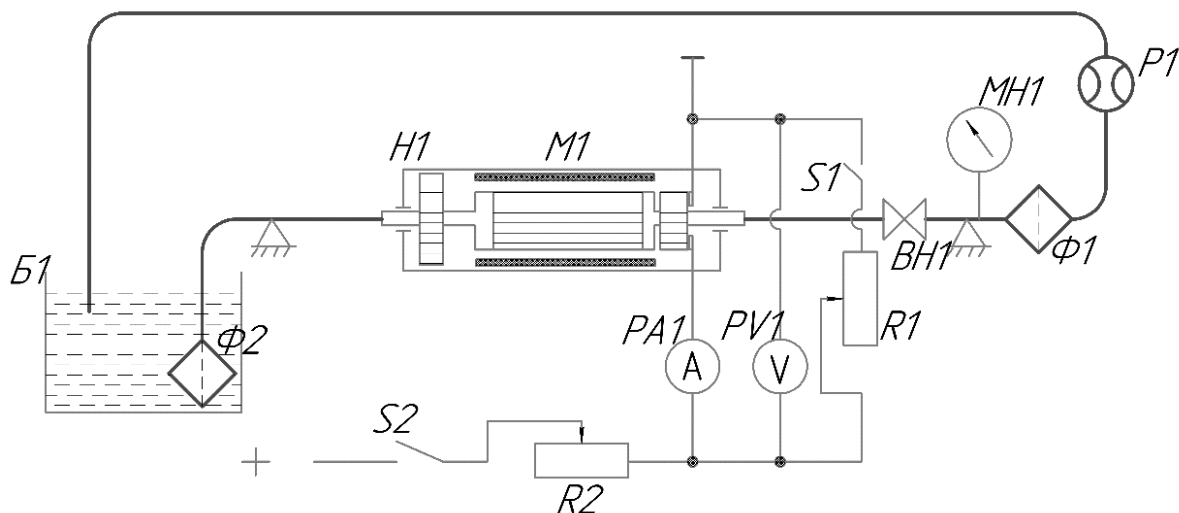


Рис. 1. Электрогидравлическая схема стенда На рисунке 1 обозначены :Н1 – насосная часть ЭБН; М1 – ЭБН; S1, S2 – выключатель; МН1 – манометр; Р1 – ротаметр; ВН1 – вентиль; Ф1, Ф2 – фильтр; РА1 – амперметр; РV1 – вольтметр; R1, R2 – реостат; Б1 – бак открытого типа.

Для моделирования обрыва обмотки электродвигателя последовательно с ним включается регулируемое активное сопротивление [12]. Увеличение которого приводит к снижению потребляемой насосом силы тока, а также снижению его производительности. На рисунке 2 обозначены области, соответствующие работоспособному, неисправному и полному отказу насоса.

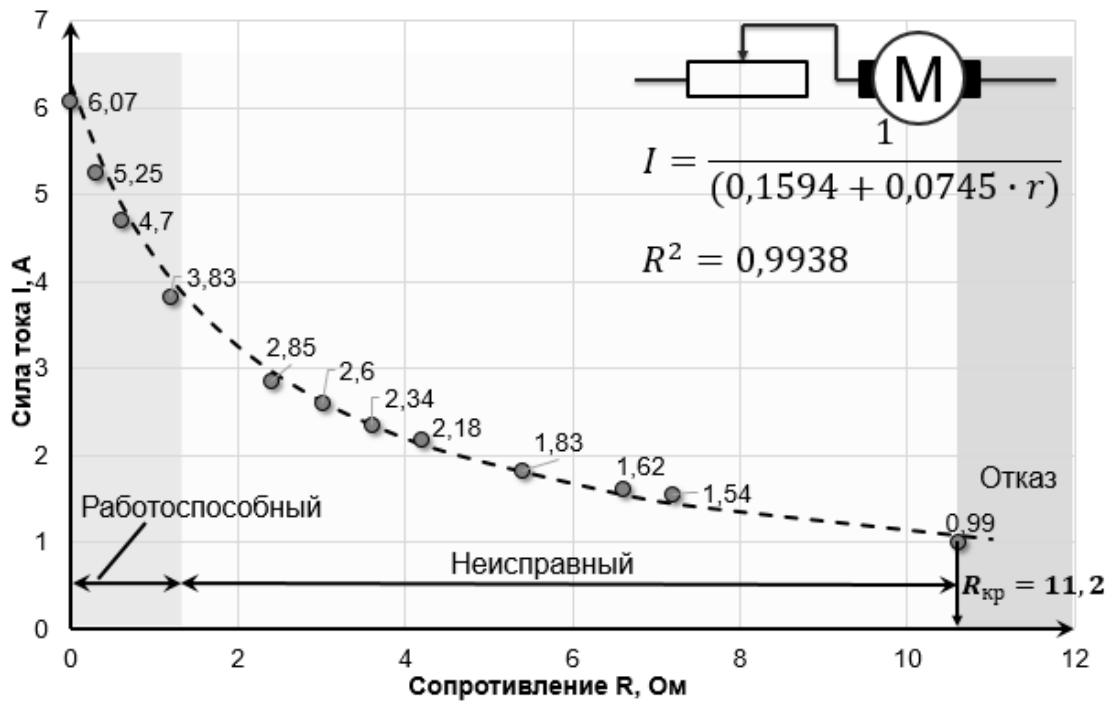


Рис. 2. Моделирование обрыва обмотки ЭБН

Критерием работоспособности электробензонасоса выступает развиваемое противодействие, снижение которого ниже величины 0,25 МПа является недопустимым.

При моделировании короткого замыкания обмотки электродвигателя, регулируемое активное сопротивление включалось параллельно. Уменьшение сопротивления приводило к уменьшению потребляемой силы тока насосом, поскольку значительная его часть проходила в обход электродвигателя через сопротивление. При достижении критического значения сопротивления 0,2 Ом насос переставал работать.

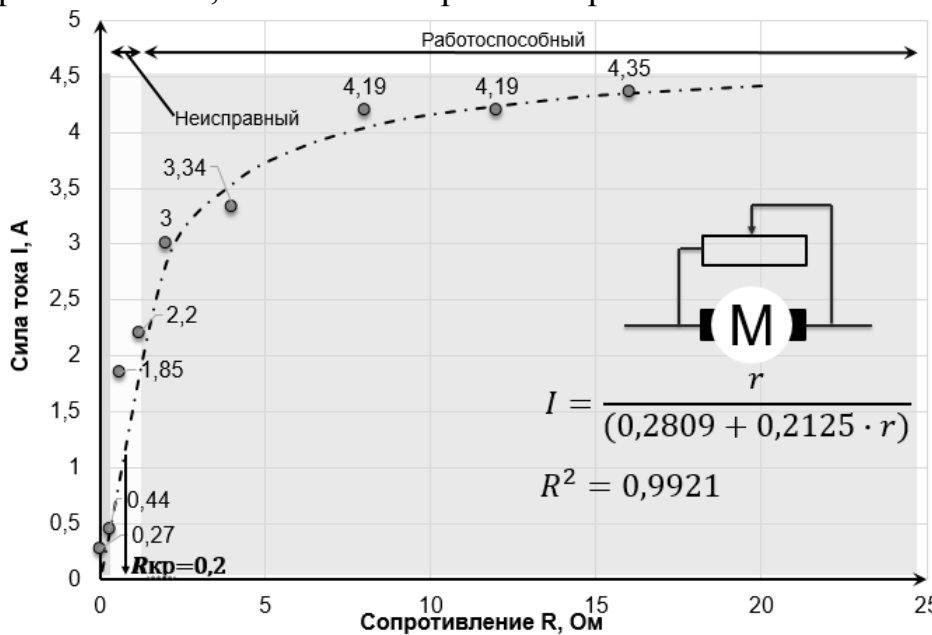


Рис. 3. Моделирование короткого замыкания обмотки ЭБН

Таким образом, основным диагностическим параметром работоспособности электродвигателя ЭБН можно считать силу тока (1), которая зависит от напряжения питания, сопротивления обмотки и противодействия.

Сила тока электродвигателя ЭБН, I , А

$$I = f(U, r, p) \quad (1)$$

где U – напряжение питания, В;

r – сопротивление обмотки, Ом;

p – противодействие, МПа.

Анализ регрессионных зависимостей позволил представить силу тока в виде математической модели (2).

$$I = \frac{U \cdot (a_1 + p) \cdot r}{a_2 + a_3 \cdot r} \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3 – коэффициенты уравнения регрессии.

Ограничения математической модели следующие: $I = (0,27 - 6,07)$ А, $U = (6 - 14)$ В, $r = (0,01 - 18)$ Ом, $p = (0 - 0,6)$ МПа.

Таблица 2 – Критерии работоспособности электродвигателя ЭБН

Состояние электродвигателя ЭБН		
Короткое замыкание	Исправный	Обрыв обмотки
$r = (0,6 - 0,4)$ Ом – работоспособный	$r = 0,6$ Ом	$r = (0,6 - 1,8)$ Ом – работоспособный
$r = (0,4 - 0,2)$ Ом – неисправный		$r = (1,8 - 11,2)$ Ом – неисправный
$r < 0,2$ Ом - отказ		$r > 11,2$ Ом - отказ

Согласно полученным результатам (таблица 2), величина сопротивления электродвигателя, изменяясь при возникновении неисправностей, так же может служить диагностическим параметром. Сопротивление исправного насоса составляет 0.6 Ом. При возникновении таких неисправностей как износ щёток, ослабление щеточных пружин происходит увеличение сопротивления, крайним случаем которых является обрыв.

Возникновение межвитковых замыканий обмотки и замыкание на корпус характеризуется уменьшением сопротивления обмотки.

Таким образом, диагностическими параметрами электродвигателя ЭБН могут выступать структурный параметр – сопротивление обмотки и диагностический параметр – сила потребляемого тока, причем измерение силы тока можно производить непосредственно на автомобиле без снятия ЭБН.

Список использованной литературы:

1. Гриценко, А.В. Тестовое диагностирование электрических топливных насосов / А.В. Гриценко, К.И. Лукомский, Д.Б. Власов, К.В. Глемба // АПК России – 2017. - №5 – С. 1161-1167

2. Гриценко, А.В. Определение технического состояния ЭБН на тестовых режимах его диагностирования / А.В. Гриценко, Д.Б. Власов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – № 6. – С. 190-196.

3. Patent. US 7487761B1, united states patent. Detection of fuel system problems / Thomas Raymond Culbertson, Ross Dykstra Pursifull, Dennis McDonald; заявитель и правообладатель: Visteon Global Technologies, Inc; опубл. 24.07.2007

4. Patent. US 0245819A1, united states patent. Method for monitoring an electromotively driven fuel pump and fuel feed unit having a fuel pump / Rolf Graf; заявитель и правообладатель: Continental Automotive GmbH; опубл. 23.03.2012.

5. Гриценко, А.В. Исследование режимов работы электрических бензиновых насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления / А.В. Гриценко, К.В. Глемба, О.Н. Ларин // Вестник уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – №2(30). – С. 47-55.

6. Гриценко, А.В. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования / А.В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Б. Власов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – №11. – С. 50-57.

7. Власов, Д.Б. Комплексное диагностирование электрического бензонасоса системы топливоподачи / Д.Б. Власов, А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Д. Бакайкин, С.П. Хвостов, Д.А. Абросимов, К.А. Цыганов // Фундаментальные исследования – 2014. – №11-12. – С. 2610-2614.

8. Хвостов, С.П. Диагностирование ЭБН (электробензонасос) при изменении параметров пропускной способности и тока подачи /С.П. Хвостов // Достижения науки - агропромышленному производству материалы LIV международной научно-технической конференции. Под редакцией П.Г. Свечникова. – Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2015. – С. 143-150.

9. Бабашев, К.А. Modeling and optimal control of the processes of functioning of the electric system fuel pump / К.А. Бабашев, М.Б. Азимов // Проблемы вычислительной и прикладной математики – 2017. – №1(7). – С. 35-40.

10. Pattipati, B. Electronic Returnless Fuel System Fault Diagnosis and Isolation: A Data-Driven Approach. / B. Pattipati, K. Pattipati, Y. Ghoneim, M. Howell, M. Salman // Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2013.

11. Electric Fuel Pumps – Models, Damage, Reasons. 4th Edition. MS Motorservice International GmbH, 2015. – 52 p.

12. Чернышов Д.А. Разработка метода диагностирования элементов топливной системы автомобиля / Д.А. Чернышов, Х. Ф. Насретдинов // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. - Чита: ЗабГУ, 2018. – С.146-150.

13. Чернышов Д.А. Разработка стенда для параметрических испытаний топливных насосов автомобильных двигателей / А.В. Пузаков, Д.А. Чернышов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции - Оренбург: ОГУ, 2019. – С.1590-1594

14. Чернышов Д.А. Методы диагностирования электробензонасосов / Д.А. Чернышов // Управление качеством в транспортной и социальной сферах: сборник научных трудов студентов / под ред. В.И. Рассохи. – Оренбург: ОГУ, 2018. – С.40-43.

15. Чернышов, Д.А. Параметрические испытания автомобильных электробензонасосов / Д.А. Чернышов, А.В. Пузаков // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции (18 апреля 2019 года) / отв. ред. Н. С. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2019. – С.351-355

УДК 656.211

К вопросу владения индивидуальным транспортом

А.Б. Бутузова, Е.А. Потылицын

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В статье представлен обзор параметров модели владения индивидуальным транспортом. В сложившихся условиях роста автомобилизации российские города столкнулись с проблемой затруднения дорожного движения. Улично – дорожная сеть давно не справляется с большим количеством автомобилей, что, естественно, приводит к необходимости мер по улучшению ее состояния.

Моделирование владения легковым автомобилем – это один из возможных способов прогноза транспортного спроса и вследствие загрузки улично – дорожной сети.

Ключевые слова: *уровень автомобилизации, индивидуальный транспорт, домохозяйство, транспортный спрос, подвижность.*

Характерной чертой развития современного общества становится рост уровня автомобилизации в стране. За прошедший десять лет в России

количество легковых автомобилей приходящихся на одну тысячу жителей непрерывно растет. В начале 2006 года в России насчитывалось 27 млн. единиц, на 1 января 2018 года их число возросло до 42,4 млн. автомобилей [11].

Уровень автомобилизации в России на 1 января 2018 года в среднем составляет 293 единицы на 1000 жителей. При этом в 38 регионах страны данный показатель выше общероссийского [10].

Что касается Европейских городов, то в среднем показатель обеспеченности автомобилями приближается к отметке в 500 единиц на 1000 жителей (рис.1). Среди ведущей четверки европейских стран самая низкая обеспеченность автомобилями во Франции – 479 единиц на 1000 жителей. В Великобритании – 501 автомобиль, в Германии – 544 машины. Самый высокий этот показатель в Италии: здесь на 1000 жителей здесь приходится 618 легковых автомобилей [12].

В Иркутской области насчитывается порядка 290 единиц легковых автомобилей на 1000 жителей [10].

Расматривая марочную структуру парка автомобилей, можно отметить, то здесь 10 марок обладают парками, превышающими 1 млн экземпляров. Самым большим парком обладает отечественная LADA (13,87 млн шт.), а среди иномарок первенствует Toyota (3,76 млн шт.). Также в эту группу попадают Nissan, Hyundai, KIA, Renault, Chevrolet, Volkswagen, Ford и Mitsubishi, показатели которых составляют 1 – 2 млн единиц. Всего же иномаркам принадлежит 61% парка[11].



Рис.1. Динамика автопарка России и Европейских стран

Парка легковых автомобилей российских городов довольно стар, 54% легковых автомобилей находится в возрасте старше 10 лет. Доля автомобилей, соответствующих экологическим стандартам не ниже «Евро-5», всего составляет 13% от общего объема (рис.2). Примерно каждый пятый

автомобиль в России – это внедорожник или кроссовер (22%). А дизельных легковых автомобилей насчитывается числится около 5% [11].

В сложившихся условия роста автомобилизации российские города столкнулись с проблемой затруднения дорожного движения. Улично – дорожная сеть давно не справляется с большим количеством автомобилей, что, естественно, приводит к необходимости мер по улучшению ее состояния.

Моделирование владения легковым автомобилем – это один из возможных способов прогноза транспортного спроса и вследствие загрузки улично – дорожной сети.

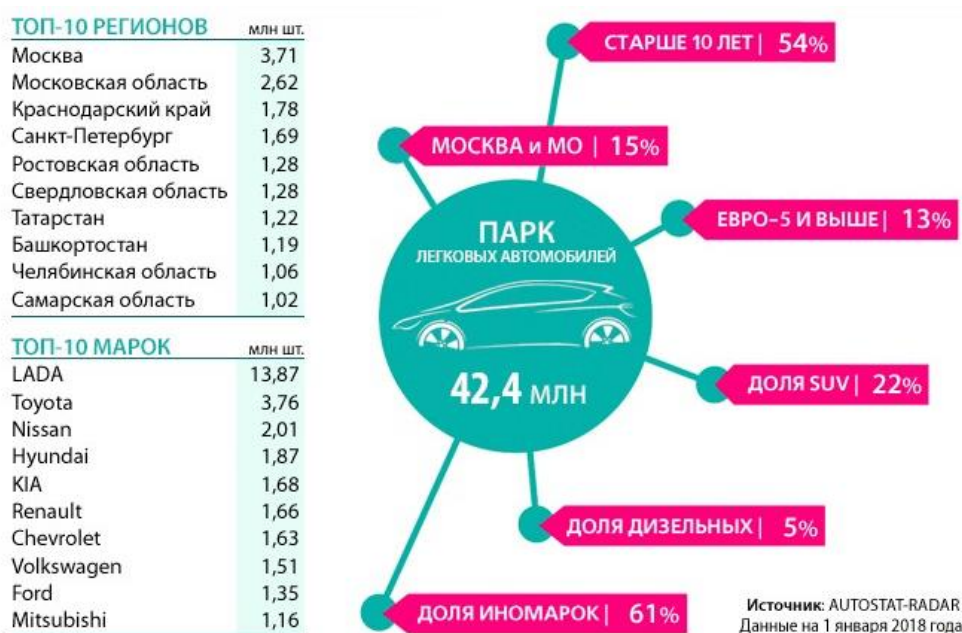


Рис.2. Российский парк легковых автомобилей: основные показатели

Для разработки модели требуются различные данные, например такие как:

- 1) данные домохозяйства - количество членов семьи, уровень образования, доход, характеристики жилья и другие демографическая информация;
- 2) информация о транспортном средстве, включая марку, год, модель и пробег и т.д.;
- 3) данные о водителях, в том числе о передвижениях с использованием индивидуального транспорта.

Домохозяйство — это, в соответствии с распространенным в научной среде определением, институциональная социальная единица, которая состоит из относительно небольшой группы граждан, проживающих вместе, в той или иной степени объединяющих свои доходы и ресурсы, а также совместно потребляющие ряд товаров и услуг [5].

Наиболее значимыми факторами можно считать: доход домохозяйства, количество взрослых, количество работающих, количество водителей, структура домохозяйства, образование, местоположение.

Доход домохозяйства используется для объяснения владения индивидуальным автомобилем. Так как, наличие легкового автомобиля напрямую связано с доходом. В феврале 2019 года средняя начисленная заработная плата работников Иркутской области по полному кругу организаций (с учетом субъектов малого предпринимательства) составила 41502 рубля [8].

Рост уровня автомобилизации во много связан с ростом благосостояния населения (рис.3). Так, например, в 2000 году уровень автомобилизации в России был 132,4 авто/1000чел. при среднемесячной заработной плате 6750 рублей, а в 2018 году уже 293 авто/1000чел. при среднемесячной заработной плате 37100 рублей [13].

Количество транспортных средств в домохозяйстве зависит и от количества членов, достигших 18 лет, а так же лиц, имеющих водительское удостоверение. То есть, численность взрослых членов семьи, может привести и к увеличению числа легковых автомобилей в домохозяйстве.

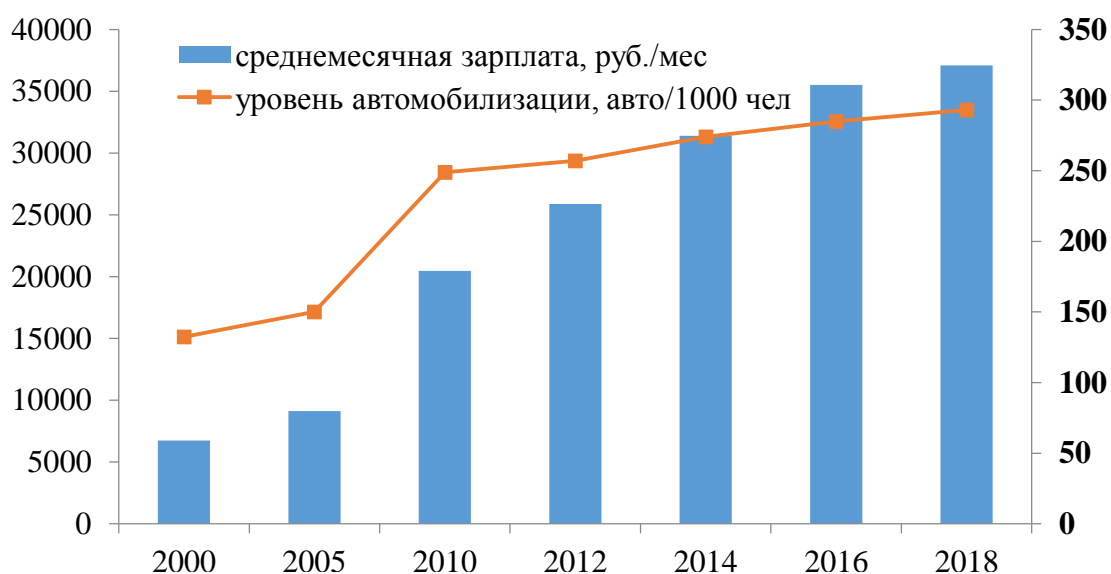


Рис.3. Изменение уровня среднемесячной заработной платы и уровня автомобилизации в России

Число работающих членов домохозяйства, как места приложения труда, так же является значимым фактором в модели, так как от этого зависит количество передвижений по трудовым целям.

Владение индивидуальным автомобилем связано и с образованием старших членов домохозяйства. В свою очередь, образование связано с уровнем дохода. Как показали итоги переписи населения 2010 г., численность лиц, имеющих высшее (включая послевузовское) профессиональное образование, увеличилась по сравнению с 2002 г. в 1,4 раза, составив 234 чел. расчете на 1000 чел. населения в возрасте 15 лет и старше против 162

чел. Незначительно выросла численность лиц, имеющих среднее профессиональное образование. В расчете на 1000 чел. населения указанной возрастной группы численность лиц со средним профессиональным образованием увеличилась с 275 чел. до 312 чел.

По данным переписи населения 2010 года 720 тыс. человек указали на наличие ученой степени кандидата наук или доктора наук. Среди кандидатов наук почти две трети (64,6%) составляли лица в трудоспособном возрасте, среди докторов наук более половины – лица старше трудоспособного возраста (51,4%) [15].

Местоположение домохозяйства – это еще один важный параметр определяющий владение легковым автомобилем. Так, население проживающее за городом, скорее предпочтет наличие индивидуального автомобиля в домохозяйстве, чем проживающие в черте города. Но и положение стоимости жилья на рынке недвижимости, в свою очередь влечет за собой возможность выбора и предпочтения владения индивидуальным транспортом.

Дальнейшим этапом исследования становится формулировка математической модели владения индивидуальным автомобилем и сбором необходимых исходных данных.

Определив набор соответствующих переменных, следующий этап разработки модели заключается в определении подходящей основы моделирования.

Список использованной литературы:

1. Automobile Ownership Model. The National Center for Smart Growth Research and Education at the University of Maryland Cinzia Cirillo, PhD, March 2010.

2. Modeling and Forecasting Passenger Car Ownership. Wen Tian, Hongfeng Xu and Menglan Zheng School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, 2 July 2018.

3. Yangwen Liu. Modeling car ownership, type and usage for the state of Maryland [Электронный ресурс] Режим доступа URL:<http://hdl.handle.net/1903/10317>.

4. Бутузова А.Б. Оценка транспортного спроса с помощью современных информационных технологий / А.Б. Бутузова, Е.А. Потылицын // Образование и наука в современных условиях : материалы VI Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 26 февр. 2016 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 253-255. – ISSN 2412-0537.

5. Домохозяйство [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <http://fb.ru/article/246263/domohozyaystvo---eto-chto-takoe-vidyi-struktura-funktsii-domohozyaystva>

6. Куприянова А.Б. Оптимизация транспортного обслуживания центра крупного города в условиях приоритета общественного транспорта и системы перехватывающих стоянок : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Куприянова Александра Борисовна; ИрГТУ. -Иркутск, 2008.-20 с.

7. Методы изучения транспортной подвижности населения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberpedia.su/5x46d.html>
8. О размере заработной платы в Иркутской области за февраль 2019 года [Электронный ресурс] Режим доступа URL: http://irkutskstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/irkutskstat/resources/2b90e280447494b8be58fe68838f846c/zar_plata_2.html
9. Перепись населения в России [Электронный ресурс] Режим доступа URL: www.tadviser.ru/index.php/Статья:Перепись_населения_в_России
10. Рейтинг российских регионов по обеспеченности легковыми автомобилями [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/34032/>
11. Российский парк легковых автомобилей: основные показатели [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://www.autostat.ru/news/33675/>
12. Рост автопарка в России за последние 10 лет – 51% [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://www.autostat.ru/infographics/26425>
13. Средняя зарплата по региону Иркутская область [Электронный ресурс] Режим доступа URL: https://www.audit-it.ru/inform/zarplata/index_old.php?id_region=145
14. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/documents/3/1009>
15. Уровень образования населения России [Электронный ресурс] Режим доступа URL: https://memo.hse.ru/ind_w10_0_01

УДК 656.078

Вопросы реализации эффективной модели формирования транспортных коридоров на территории Республики Саха (Якутия).

Т. П. Егорова, А. М. Делахова

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, д.1.

В статье анализируется формирование транспортно-экономического коридора «Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилюйск – Якутск» на территории Республики Саха (Якутия), обосновывается значимость развития транспортных коридоров в целом для региона. Наряду с тем, что транспортные коридоры рассматриваются как способ усиления единства экономического пространства страны, улучшения межрегиональных транспортно-экономических связей, развивают предпринимательство и межрегиональное сотрудничество, выявлены угрозы, которые могут привести к непредвиденным последствиям. Авторами предложен

ряд мер, способствующих эффективной модели формирования транспортного коридора на территории Якутии.

Ключевые слова: *транспортный коридор, предпочтения, транзитный потенциал, транспортная политика, стратегическое планирование.*

В 2016 году разработана Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2030 года с определением целевого видения до 2050 года (далее – Стратегия), в которой определены ключевые проекты и направления долгосрочного социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) [1]. Стратегией предусмотрен комплекс проектов для усиления каркаса пространственного развития республики. Развитие транспортных путей предполагает пять направлений, среди которых Лено-Вилуйское кольцо: Якутск – Покровск – Олекминск – Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилуйск – Якутск с выходом на Иркутск.

Транспортно-экономический коридор, который свяжет Западную и Центральную зоны, будет включать автомагистрали в виде федеральной дороги «Вилуй», региональной автодороги «Умнас», а также река Вилуй с сопутствующей инфраструктурой. Предполагается, что транспортно-экономический коридор обеспечит более тесные устойчивые социально-экономические связи между двумя экономическими зонами: Центральной и Западной. Вдоль указанной транспортной артерии расположены такие точки роста как: Ленск, Мирный, Сунтар, Нюрба, Вилуйск, Верхневилуйск.

Организация регионального транспортного пространства предопределяет определение понятийного аппарата с целью выработки наиболее точных решений. По определению ряда исследователей, под термином «транспортный коридор» понимается совокупность всех видов магистрального транспорта с сопутствующей инфраструктурой, функционирующего в определенном направлении для обеспечения перевозки конкретного грузопотока (пассажиропотока) [2]. В транспортных коридорах требования к перевозочному процессу, к параметрам средств транспорта, транспортной инфраструктуре унифицируются. Выработка единых требований обусловлена цифровизацией процессов и информационным обменом [3]. Стержневым вопросом создания транспортного коридора является ускорение грузопотоков (пассажиропотоков) за счет обеспечения четкой и слаженной работы всех участников транспортного коридора. В случае нахождения в транспортном коридоре дублирующих транспортных магистралей возникает дополнительный экономический эффект за счет перераспределения грузопотока и ускорения скорости оборота товарной массы.

Как отмечают исследователи, эффективность данного транспортно-экономического коридора достигается за счет вышеперечисленных преимуществ, плюс эффект от взаимодействия заинтересованных в его создании сторон [4]. Взаимодействие сторон может заключаться в регулировании транспортной, торговой и экономической деятельности. Создание транспортно-экономического коридора предполагает помимо решения транспортно-технологических задач, введение административных режимов, благоприятных налоговых преференций, предоставления комплекса дополнительных логистических услуг [5].

В экономическом и социальном развитии региона (или нескольких регионов) транспортно-экономическому коридору предстоит выполнить системообразующую роль. Исторически транспортные коммуникации (реки, тракты) становились естественными местами притяжения, вдоль которых размещались поселения, развивалась промышленность. Приведем в пример создание Иркутско-Якутского почтового тракта, образование которого стимулировалось введением различных льгот: освобождение от налогов (ясака), бесплатным предоставлением земельных угодий и т.д. При всей противоречивости введения тех льготных режимов, определенную роль в экономически очень сложном ведении почтовой службы в суровых условиях Якутии это выполнило.

Общее расстояние транспортно-экономического коридора «Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилюйск – Якутск» составляет 1 409 км. Учитывая календарное время работы ледовых и паромных переправ через р. Вилюй, Марха, Тюкян и Таннары на участках федеральной автомобильной дороги «Вилюй», сроки бесперебойного сообщения на протяжении транспортного коридора в настоящее время составляет 259 суток (таблица 1). В автотранспортном комплексе назрела необходимость использования передовых методов функционирования сезонных дорог, как в организационном плане, так и в техническом, с разработкой новых подходов их обустройства, строительства зимников продленного действия и т.д.

Таблица 1 – Сроки действия транспортно-экономического коридора «Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилюйск – Якутск»

Транспортная схема	Расстояние, км	Паромная/ледовая переправа	Средние сроки работы паромных переправ	Средние сроки работы ледовых переправ
Ленск – Мирный	234	-	-	-

Мирный – Сунтар	219	через р. Вилюй 1048-й км через р. Вилюй 956- й км.	с 15.06 до 05.10	с 15.11 по 15.04
Сунтар – Нюрба	167	через р. Вилюй 808- й км	с 15.06 до 05.10	с 15.11 по 15.04
Нюрба – Вилюйск	214	через р. Марха 752- й км. через р. Тюкян, 702- й км через р.Вилюй, 660- й км понтонная пере- права через р.Чы- быда, 609-й км	с 15.06 до 05.10	с 15.11 по 15.04
Вилюйск - Якутск	575	понтонная пере- права через р. Тангнары, 456-й км	с 15.06 до 05.10	с 15.11 по 15.04

В настоящий момент завоз грузов в Западную экономическую зону осуществляется с использованием транспортных схем, которые включают в себя два сезонных участка: речные/ледовые переправы и автозимники, являющиеся наиболее дорогими по совокупности логистических затрат. Завершение строительства автодороги «Вилюй» дает выход республики к Байкало-Амурской ж/д магистрали, что полностью изменяет транспортные схемы доставки грузов в Западную экономическую зону и увеличивает уровень ее транспортной доступности до 98%. Разработка транспортных схем доставки грузов в муниципальные районы Западной экономической зоны при вводе в эксплуатацию жд/станции Нижний Бестях показывает, что для группы муниципальных районов Западной экономической зоны в доставке грузов большого объема остаются наиболее выгодными традиционные речные перевозки. Расчеты показывают, что для отдельных видов грузов возможна переориентация из г. Ленск в г. Якутск, новые транспортные схемы доставки грузов значительно снизят общие логистические затраты, что позволит транспортно-экономическому коридору «Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилюйск – Якутск» стать наиболее конкурентоспособным при выборе маршрута перевозчиками.

Реализация крупных проектов развития нефтегазового комплекса будет сопровождаться большими объемами грузовых перевозок для нужд предприятий промышленности Западной Якутии. Как показывают расчеты, увеличение грузопотоков ожидается до 930 тыс. тонн в год всеми видами транспорта [6]. В период эксплуатации месторождений грузопотоки стабилизируются на уровне 700-300 тыс. тонн в год. Общий размер потенциального роста грузовой базы в районы Западной Якутии для обеспечения

работы промышленности и вновь образуемых производств оценивается в размере 2,5-1,6 млн. т. [7].

На территории Западной Якутии основным перевалочным пунктом является Ленск, однако в нем не применяют в полной мере логистические технологии, деятельность ограничена функциями перевалочного транспортного узла. Технологические процессы поставки материальных ресурсов для обеспечения промышленности и населения будут изменяться по мере ввода новых участков транспортной системы. Отмечается, что транспортные узлы на базе речных портов могут стать логистическими тримодальными центрами распределения грузов, выполняющие функции стыкования водного, а также железнодорожного и автомобильного транспорта [8, 9]. После завершения реализации запланированных мероприятий Стратегии [2] Ленский транспортный узел приобретет значение мультимодального транспортно-логистического центра, его воздействие распространится на Западную группу районов, отчасти на районы Вилюйской группы и районы развития нефтегазового сектора.

Эффективность данного направления можно рассматривать в сочетании с решением задач формирования круглогодичных транспортных коммуникаций и проведения на водном транспорте комплекса работ по углублению русла на верхнем участке р. Лены и модернизации транспортного флота. Потенциальные возможности для транспортировки прогнозируемых объемов грузов допустимы при условии кардинальной модернизации, наращивании мощностей, оснащении современным оборудованием, наличии достаточного количества специализированных судов [10].

Необходимые для этого мероприятия, включая строительство современного флота нового поколения, создание навигационной и сервисной инфраструктуры, системы обеспечения безопасности нужно начинать реализовывать сейчас. Совершенствование уровня организации перевозок водным транспортом с целью сокращения дальности плавания, простоев под погрузкой-выгрузкой актуально и при невысоких объемах грузопотока. Как отмечают исследователи [11, 12], применение барже-буксирных составов, когда на один толкач приходится 2-3 баржи, кратно повышает загрузку, позволяет достигать максимальной грузоподъемности. В России данная практика применяется редко, к тому же, большая часть нового судостроения представлена не составными судами (толкач+баржа), а танкерами классического типа [7]. В условиях периодов маловодности Верхнеленского бассейна данная организация перевозок весьма актуальна.

Завершение реконструкции федеральной автодороги «Вилюй», строительство мостов активизирует круглогодичную доставку грузов для потребителей вилюйской группы районов. Наряду с тем, что транспортные коридоры рассматриваются как способ усиления единства экономического пространства страны, развития предпринимательства и межрегионального сотрудничества, выявлены угрозы, которые могут привести к непредвиденным последствиям (табл.2).

Таблица 1. SWOT-анализ транспортно-экономического коридора «Ленск – Мирный – Сунтар – Нюрба – Вилюйск – Якутск»

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> - основная транспортная артерия Западной экономической зоны со стабильными грузопотоками; - рост уровня транспортной доступности территорий МР, входящих в группу Западной экономической зоны; - круглогодичный доступ к Байкало-Амурской ж/д магистрали; - повышение качества жизни населения; - конкурентное преимущество при перевозках: сокращение сроков хранения и доставки грузов, сокращение времени доставки грузов; - внедрение системы взимания платы с грузовых автомобилей по системе «Платон»; 	<ul style="list-style-type: none"> - сезонные участки дорог: ледовые и паромные переправы; - размывание грунтовых участков дорог общего пользования в период сильных осадков; - низкий уровень обеспеченности транспортного коридора придорожным сервисом и инфраструктурой; - слабый сигнал сотовой связи; - отсутствие экономических стимулов ведения бизнеса в сфере транспорта и придорожного сервиса.
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> - переориентация навигационных накоплений хозяйствующих субъектов в целях сокращения логистических затрат; - реконструкция мостовых переходов, капитальный ремонт линейных объектов и мостов; - реконструкция участка дороги г. Якутск - Магарас; - развитие предпринимательства в сфере придорожного сервиса; 	<ul style="list-style-type: none"> - возможны ограничения движения по участкам дорог, прилегающих к ВСТО; - из-за климатических изменений возможны увеличения сроков межсезонных перерывов; - недостаток финансовых инструментов для поддержания автодорог в нормативном состоянии; - сокращение налоговых поступлений вследствие перетока рынка перевозок к транспортным компаниям соседних регионов с более выгодными экономическими условиями ведения бизнеса.

Одним из возможных направлений административного стимулирования [13] может стать снижение налогового бремени на транспортные средства, которое в настоящее время не благоприятствует ведению бизнеса (Рис. 1).

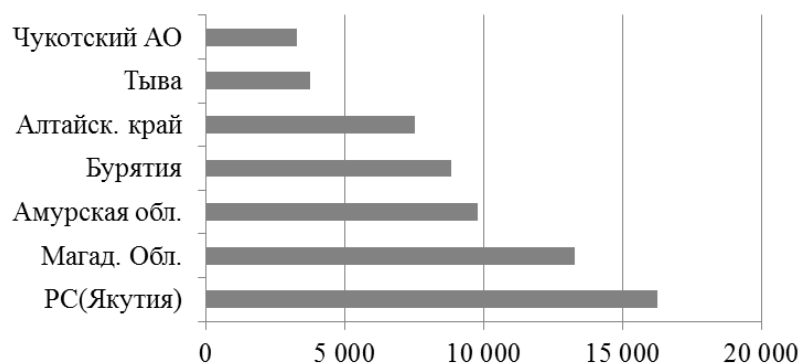


Рис. 1. Сравнение ставок транспортного налога в 2018 г. на грузовые автомобили мощностью 250 л.с. по регионам РФ, руб. [14].

Ключевыми направлениями развития транспортных коридоров, применительно к условиям Республики Саха (Якутия), являются:

- сбалансированность развития участков транспортного коридора, отсутствие инфраструктурных ограничений;
- развитие транспортно-логистической инфраструктуры;
- устранение технологических барьеров, связанных с пропуском дополнительных грузопотоков;
- внедрение технологий скоростных перевозок;
- формирование конкурентоспособной тарифной политики на перевозки грузов/ пассажиров;
- разработка финансовых механизмов безубыточного функционирования организаций транспорта и сопутствующих услуг.

Организация транспортно-экономического коридора предполагает помимо решения транспортно-технологических задач, предоставления комплекса дополнительных логистических услуг [15], способствующих как ведению бизнеса в сфере транспортных услуг, так и товарообмену между регионами и развитию экономики того региона, где проходит данный коридор. Формирование транспортно-экономического коридора будет способствовать расширению и интенсификации межрайонного сотрудничества, повышению мобильности населения.

Список использованной литературы:

1. Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2030 года с определением целевого видения до 2050 года/ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://mineconomic.sakha.gov.ru/Strategiya-2030>. Дата обращения: 26.03.2019.

2. Щербанин Ю.А. Транспортные коридоры: еще модно? / Транспорт Российской Федерации.- 2006.- № 5.- С.7-9.

3. Куприяновский В.П., Куренков П.В., Мадяр О.Н. Грузопассажирские транспортные коридоры в евро-азиатском цифровом пространстве/ Транспорт: наука, техника, управление. - 2017. - № 11. - С. 8-17.

4. Пехтерев Ф. С., Замковой А. А. О формировании научных задач по созданию интегральной евроазиатской транспортной системы в контексте развития международных транспортных коридоров / Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». - 2018. - № 1. - С. 28–36.
5. Trip, J.J., Bontekoning, Y. Integration of small freight flows in the in-termoal transport system / Journal of Transport Geography. – 2002. - 10 (3). - pp. 221-229.
6. Кугаевский А.А. Формирование перспективных грузопотоков на транспорте Северо-Востока России / Регион: Экономика и Социология. - 2012. - № 2(74). - С.144-160.
7. Щербанин Ю.А., Голубчик А.М. Перевозка грузов по внутренним водным путям России: Стратегия развития до 2030 г. и некоторые новые возможности для нефтегазового сектора / Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. - 2016. - № 7. - С. 8-11.
8. Kurenkov P., Astafiev A., Kaplina O. Different exegesis of the concepts related to mixed transport / Komunikacie. - 2016. - Т. 18. - № 2. - С. 148-152.
9. Bierwirth, C., Kirschstein, T., Meisel, F. On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks / Business Research. – 2012. - 5 (2). - pp. 198-219.
10. Lyovin B.A., Davydov A.M., Kurenkov P.V. and others The development of criteria for evaluating energy efficiency and the choice of the optimal composition of the subsystems in the Russian integral transit transport system/ LDIA 2011. 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications 11. - 2017. - С. 8097237.
11. Жабин И.С., Астафьев А.В., Преображенский Д.А. Зарубежный опыт доставки грузов в системе контейнерных перевозок/ Вестник транспорта. - 2018. - № 11. - С. 12-16.
12. Вакуленко С.П., Куренков П.В. Интермодальные и мультимодальные перевозки в транспортных коридорах Европы и Азии / Железнодорожный транспорт.- 2016.- № 6.- С.73-77.
13. Santos, B.F., Limbourg, S., Carreira, J.S. The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness - The case of Belgium / Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. - Т34. - pp. 230-244.
14. Калькулятор налога на авто по регионам РФ. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://110km.ru/nalog/?calc\[power\]=242&calc\[region_id\]=29](https://110km.ru/nalog/?calc[power]=242&calc[region_id]=29). Дата обращения: 26.03.2019.
15. Reis, V. Analysis of mode choice variables in short-distance intermodal freight transport using an agent-based model / Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2014. – 61. - pp. 100-120.

**Применение метода дискретных элементов для решения задачи
повышения проходимости автомобильного транспорта**

Д. С. Тесленко, В. В. Беляков, В. С. Макаров

Добыча полезных ископаемых с каждым годом становится труднее и дороже из-за исчерпания месторождений в близкорасположенных регионах. Задача освоения труднодоступных территорий, перебазирования персонала и оборудования сильно затруднена из-за сложных дорожно-климатических условий и значительно повышает стоимость извлекаемых из под земли ресурсов. Кроме полного бездорожья для северных регионов России также затрудняет передвижение снег. Даже в европейской части нашей страны продолжительность залегания снежного покрова порой превышает 160 дней. Применение гусеничных машин далеко не всегда приемлемо по экологическим и экономическим причинам. Авиационный транспорт довольно дорог и сильно зависит от метеоусловий. Оптимальным решением в этих условиях видится повышение подвижности автотранспортных средств (АТС), которые обладают достаточно высокой экономичностью, меньше повреждают дорожное покрытие и практически всепогодны. Решение данной задачи невозможно без достоверного математического моделирования взаимодействия АТС с деформируемым дорожным покрытием (снегом). В статье рассматриваются возможности дискретно-элементного метода моделирования взаимодействия корпуса АТС со снегом на примере простейших тел.

Ключевые слова: *Дискретно-элементное моделирование, автотранспортные средства, снег, сопротивление движению.*

До недавнего времени конечно-элементный метод (КЭМ) оставался фактически единственным способом высокоточного моделирования задач террамеханики (Тесленко, Беляков, Макаров, & Зезюлин, 2014). Применительно к движению транспортных средств он позволяет, например, рассчитать напряжения в грунте при качении колеса (Madsen, et al., 2012). Данный метод представляет грунт как сплошное, неделимое тело, состоящее из большого, но конечного числа элементов. При задании условия разрушения элементы, напряжения в которых превысили заданное значение, исключаются из пространства задачи.

По этой причине КЭМ неприменим для решения задач, связанных с переносом грунта после его разрушения – например, оптимизация конструкции ножа бульдозера с целью уменьшения затрат энергии. Также КЭМ неприменим для расчёта величины сопротивления погруженных в снег элементов АТС при его движении.

С развитием вычислительных мощностей и программных продуктов появилась возможность использовать дискретно-элементный метод (DEM, от англ. discrete element method) (O'Connor, Troczynski, Preece, Klosek, & Williams, 1997). В нём грунт представляется как массив частиц, соединённых между собой связями. Изменяя массу, форму (она может отличаться от сферы), размер и характер связей между частицами, возможно смоделировать практически любой грунт. Грунт может состоять также из разных типов частиц, в этом случае характер взаимосвязи задаётся индивидуально для каждой пары частиц. Такой метод представляется перспективным для решения задачи расчёта сопротивления погружённых в снег элементов, так как позволяет описать взаимодействия не только между частицами снега, но и между частицами снега и поверхностью АТС с учётом влияния веса АТС.

DEM очень требователен к вычислительным ресурсам, так как число взаимодействий, а, следовательно, и ресурсоёмкость расчёта возрастает с увеличением количества частиц. Метод дискретных элементов поддерживают специализированные расчётные пакеты, такие как AMBER, Chute Maven (Hustrulid Technologies Inc.), PFC2D и PFC3D, EDEM (DEM Solutions Ltd.) GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE®/DEM, Bulk Flow Analyst, Rocky. Также дискретно-элементное моделирование возможно в таких КЭМ-пакетах, как LS-Dyna (<http://www.dynaexamples.com/dem/injection-analysis>).

Для решения задачи моделирования движения АТС в снегу была выбрана система EDEM, так как в настоящее время она активно развивается, имеет наглядный интерфейс, снабжена учебными материалами от компании-производителя. Немаловажно, что DEM Solutions Ltd. предоставляет академическую лицензию, которая была получена автором специально для данного исследования.

В системе EDEM существует возможность отдельного задания свойств взаимодействия для каждой пары материалов. Минимальный набор взаимодействий – между телом и грунтом («body-equipment»), а также между частицами грунта («bulk-bulk»). При этом характеристики взаимодействия внутри материала (грунта) независимо задаются на нескольких «уровнях» (рис. 1). Уровень *материала* в целом описывает прочностные характеристики до момента разрушения. Уровень *свойств частиц* задаёт их массогабаритные параметры, что важно для скорости расчёта симуляции – чем меньше габариты отдельных частиц и чем выше их число, тем точнее модель, но и медленнее идёт расчёт симуляции. Также имеется возможность задавать случайное или же подчиняющееся определённому закону распределение частиц по массе, размеру.



Рис. 1. Карта свойств грунта в EDEM

Уровень взаимодействия между частицами представлен коэффициентами взаимодействия, описывающими характер связей (коэффициенты трения, упругости). Также к этому уровню относится наиболее важный для симуляции параметр – контактная модель. В EDEM существует определенное количество контактных моделей, при этом для каждого взаимодействия возможно выбрать одну из них либо скомбинировать несколько по определенным правилам.

Если ввод остальных значений для материала обычно не представляет сложности, так как они представлены в справочниках, то подбор наиболее подходящей для материала контактной модели – нетривиальная задача, требующая базовых знаний реологии исследуемого грунта. Рассмотрим подробнее предлагаемые в ПО модели.

Основной моделью в EDEM является контактная модель по теории Герца-Миндлина без учёта скольжения (Hertz, 1882), (Mindlin, Compliance of elastic bodies in contact, 1949), (Mindlin & Deresiewicz, Elastic spheres in contact under varying oblique forces, 1953), которая описывает сухие сыпучие материалы, такие как щебень.

Модель Герца-Миндлина без скольжения с RVD-трением качения (Relative Velocity Dependent, зависимое от относительной скорости) добавляет к предыдущей модели учёт трения качения (Zhou, Wright, Yang, Xu, & Yu, 1999). Модель может применяться для таких материалов, как, например, тела качения подшипников.

Модель Герца-Миндлина с JKR (Johnson-Kendall-Roberts) склеиванием учитывает влияние ван-дер-ваальсовых сил в контактной зоне и позволяет моделировать адгезионные системы, такие как сухие порошки или влажные материалы (Johnson, Kendal, & Roberts, 1971).

Модель Герца-Миндлина со склеиванием частиц позволяет учитывать связи между частицами, которые могут сопротивляться тангенциальному и нормальному движению вплоть до максимального нормального и касательного напряжения сдвига, после чего связь разрушается (Potyondy

& Cundall, 2004) и частицы взаимодействуют как твердые сферы. Модель применяется для моделирования бетонных и скальных структур.

Нужно отметить, что среди всех рассмотренных выше моделей только модель без скольжения и модель с JKR поддерживают возможность расчёта при помощи графического акселератора, что значительно повышает скорость расчёта. Остальные модели используют только процессорные мощности ПК. Также в EDEM существуют контактные модели для модификации основных: модель когезии (сцепление частиц внутри материала), линейная пружина, гистерезисная пружина (Cundall & Strack, 1979).

Рассмотрим основы реологии снега. Теория снежного покрова как полотна пути, разработанная в ОНИЛВМ, представляет снежный покров как полирельефную анизотропную дисперсную слоистую термодинамическую среду, образованную из вещества единой химической природы, но находящегося в разных агрегатных состояниях, и имеющего вязкоупруго-пластичный отклик на внешнее воздействие, изменяемый во времени (Беляков & Молев). С точки зрения реологии снег представляется как совокупность имеющих вязкоупругопластичные связи ледяных кристаллов (Епифанов & Кузьменко, 1986). Процесс его разрушения идёт в несколько стадий.

Для описания напряжений, возникающих при деформации и разрушении снега, наиболее часто используются модели Максвелла, Кельвина-Фойгта и Бюргерса (рис. 2), в которых связи размещены в различных комбинациях. Модель Максвелла (Рис. 2 а) состоит из последовательно соединённых упругого и вязкого элемента и применяется для моделирования начальной упругости и последующей вязкой деформации. Эта модель не описывает первую стадию ползучести снега. Модель Кельвина-Фойгта (рис. 2 б), наоборот, удовлетворительно описывает первую стадию ползучести с уменьшающейся со временем скоростью деформирования. Модель Бюргерса (рис. 2 в) является комбинацией двух предыдущих моделей, соединяющая их преимущества. Но практическое её использование затруднено из-за большого количества параметров. Для длительной нагрузки, которой является движение АТС в снегу, рекомендуется применение моделей, учитывающих в первую очередь вязкие свойства снега и его способность к уплотнению (Войтковский, 1977).

Исходя из вышесказанного, среди моделей, предоставляемых EDEM, для моделирования снега наиболее подходят комплексная модель, состоящая из компонентов склеивания и гистерезисной пружины, а также модель Герца-Миндлина со склеиванием. Модель Герца-Миндлина с JKR (Johnson-Kendall-Roberts) склеиванием также представляется перспективной из-за её поддержки видеоакселератором, что может повысить скорость расчёта.

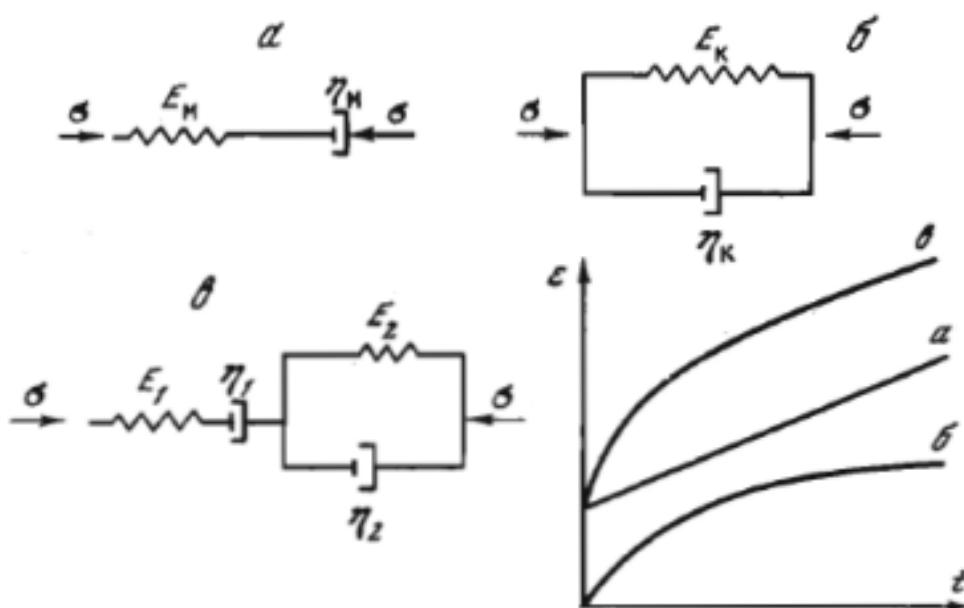


Рис.2 Реологические модели снега (Войтковский, 1977).

Вычислительная мощность современных компьютеров не позволяет смоделировать контакт и разрушение каждой отдельной снежинки, но на практике это и не требуется, так как снежная масса при разрушении разделяется на довольно крупные фрагменты, размер которых зависит от характеристик снега. Поэтому возможно использовать конечные элементы размеров, на один-два порядка меньших, чем размеры движущегося в снегу тела.

Изучение возможности моделирования движения тела в снегу с целью получения значения величины сопротивления удобно проводить на хорошо изученных телах простой формы, таких как клинья и лыжи (Шишкин, 1953). При этом важно отметить, что EDEM не даёт возможности напрямую получить значение усилия сопротивления движению, являющуюся целью данного исследования. Система позволяет только оценить величину сжимающего тело усилия со стороны грунта, которая в первом приближении равна силе сопротивления со стороны грунта по 3 закону Ньютона.

Для оценки влияния типа контактной модели на получаемый результат) была построена простейшая модель клиновидного тела (рис. 3), движущегося в виртуальном грунтовом канале. Размеры модели канала и тела показаны в табл. 1, с характеристики имитатора грунта - в табл.2.

Таблица 1. Параметры модели

Параметр	Значение	Размерность
Длина канала	2,5	М
Ширина канала	0,5	М
Глубина канала	0,2	М
Длина клина	0,5	М
Ширина клина	0,2	М

Высота клина	0,1	М
Скорость движения	0,1	м/с

Таблица 2. Параметры имитатора грунта

Параметр	Значение	Размерность
Плотность	300	кг/м ³
Коэффициент Пуассона (Shapiro, Johnson, Sturm, & Blaisdel, 1997)	0,25	
Модуль Юнга (Shapiro, Johnson, Sturm, & Blaisdel, 1997)	3e ⁺⁰⁹	Па
Коэффициент трения снега по стали (Шалман, 1973)	0,8	
Угол внутреннего трения (Тушинский, 1971)	40	град
Радиус частицы	0,005	М
Объём частицы	9,47118e ⁻⁰⁶	м ³
Масса частицы	0,014	Кг
Момент инерции (X,Y,Z)	1,0013e ⁻⁰⁶	кг*м

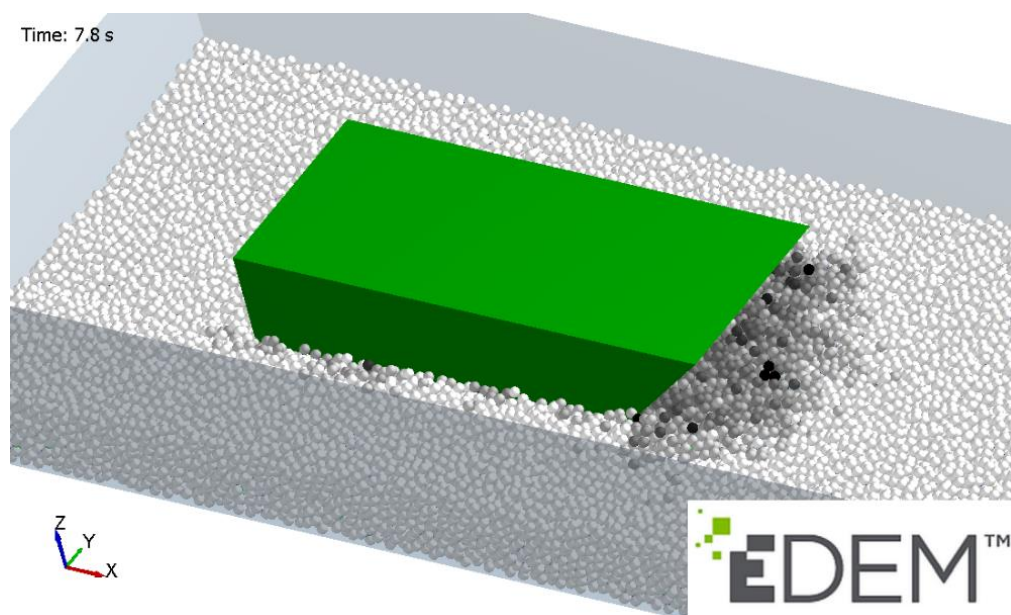


Рис. 3. Простейшая модель движения клиновидного тела в дискретно-элементном грунте

Для испытаний были выбраны следующие имитаторы грунта: комплексная модель, состоящая из компонентов склеивания и гистерезисной пружины, а также модели Герца-Миндлина со склеиванием, Герца-Миндлина с JKR склеиванием и модель Герца-Миндлина без скольжения.

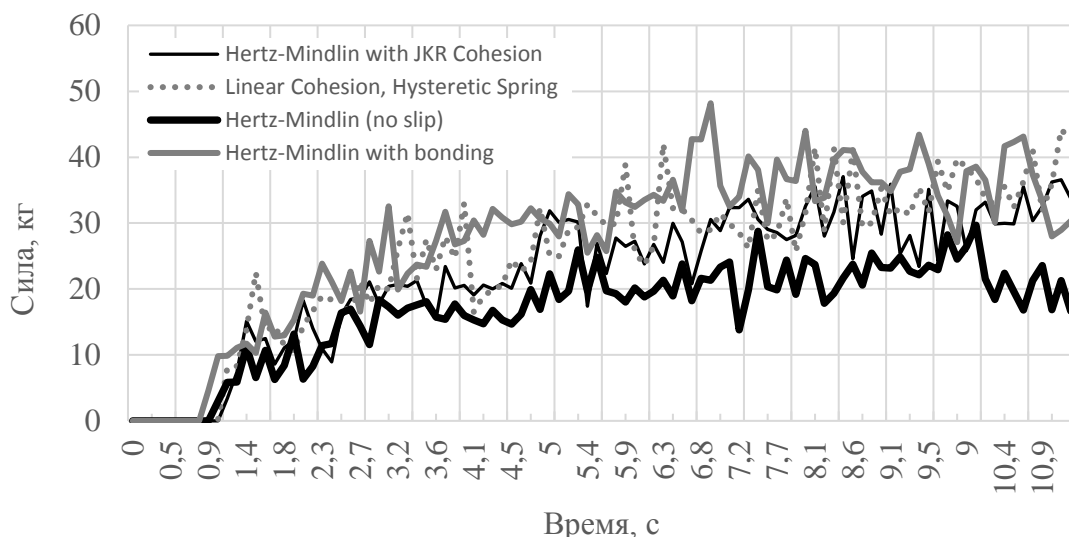


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления от типа взаимодействия между частицами

По результатам виртуального эксперимента была построена зависимость силы сопротивления от времени (рис. 4). Наибольшие значения и наиболее быстрый рост силы показали комплексная модель, состоящая из компонентов склеивания и гистерезисной пружины, а также модель Герца-Миндлина со склеиванием. Данный эффект наблюдается из-за того, что фактор склеивания частиц позволяет призме волочения перед движущимся телом приобретать больший размер, что и наблюдается в реальных условиях. Модель же Герца-Миндлина без скольжения ограничивает размер создаваемой призмы и после достижения определённого объёма она перестаёт расти. Для дальнейших предварительных тестов целесообразно применять модель Герца-Миндлина с JKR склеиванием, так как она показывает сходные с наиболее достоверными моделями результаты, но обчисляется быстрее за счёт использования ресурсов графического акселератора.

При создании модели движения реального тела (лыжи) для упрощения расчёта использовались следующие допущения:

- Движение лыжи – параллельно горизонту, с постоянной скоростью
 - Характеристики грунта (снега) постоянны по всему объёму
- В EDEM создана упрощённая модель движения тела (лыжи) в грунтовом канале со следующими параметрами (табл. 3):

Таблица 3. Параметры модели

Параметр	Величина	Размерность
Длина канала	5	м
Ширина канала	0,8	м
Глубина канала	0,4	м
Длина подошвы лыжи [15]	1	м
Радиус носка лыжи [15]	1	м
Ширина лыжи [15]	0,2	м
Скорость движения [15]	2	м/с

Параметры, связанные с моделируемым телом (лыжей), взяты из отчётов об испытаниях реальных лыж, характеристики снега – из данных по гляциологии и механике снега, остальные параметры назначались пропорционально габаритам испытуемого тела либо выводились исходя из известных величин.

Таблица 4. Свойства создаваемого материала (снег)

Параметр	Величина	Размерность
Плотность	450	кг/м ³
Коэффициент Пуассона (Shapiro, Johnson, Sturm, & Blaisdel, 1997)	0,35	
Модуль Юнга (Shapiro, Johnson, Sturm, & Blaisdel, 1997)	10	МПа
Коэффициент трения снега по стали (Шалман, 1973)	0,08	
Угол внутреннего трения (Тушинский, 1971)	29	град
Радиус частицы	0,02	м
Объём частицы	3,34933E-05	м ³
Масса частицы	0,011722667	кг
Момент инерции (X,Y,Z)	1,87563E-06	кг*м

На графике (рис. 5) показаны значения силы сопротивления, полученные при движении реальной лыжи в снегу по данным (Шишкин, 1953) и полученные с дискретно-элементной модели (рис. 4). Следует отметить, что как в эксперименте с реальной лыжей, так и на компьютерной модели не учитывался вес лыжи и перевозимого ей груза. В первом случае это объясняется тем, что лыжа испытывалась на специальном стенде, позволяющем механически задавать глубину погружения и таким образом имитировать вес. Во втором случае – тем, что EDEM сам по себе не может задавать вес тел, позволяя указать для них только скорость (и/или ускорение) и взаимное расположение. Таким образом, в обоих исследованиях задавалась глубина погружения, что и позволяет сравнивать их результаты.

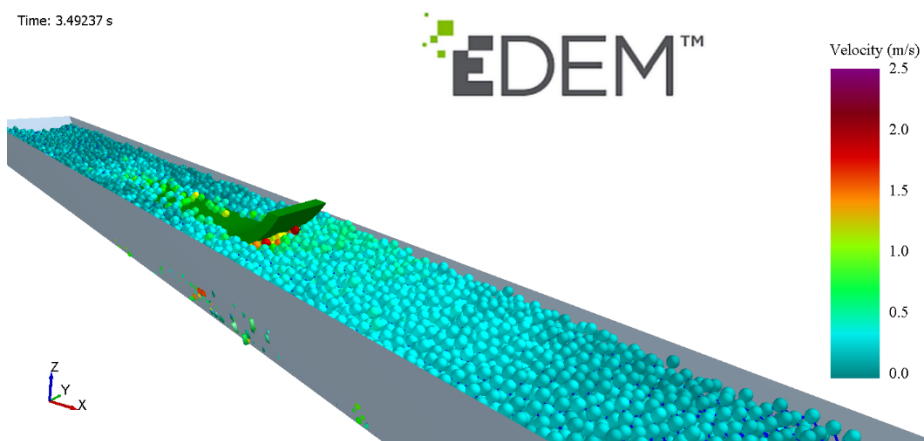


Рис. 4. Дискретно-элементная модель движения лыжи в снегу

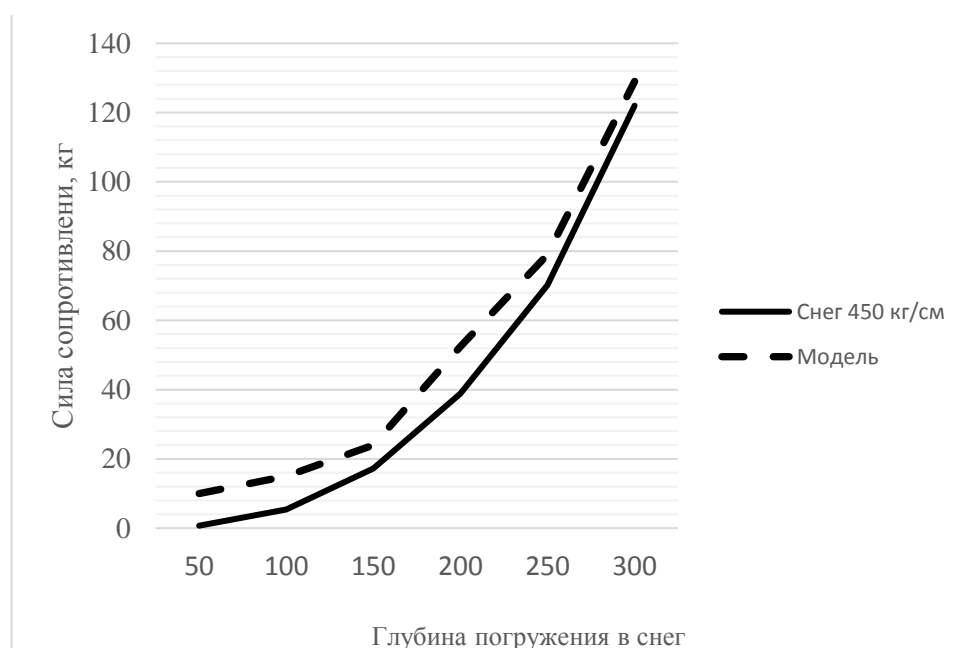


Рис. 5. Сравнение испытаний реального тела и данных виртуального моделирования

Измеренная на виртуальной модели сила сопротивления близка к полученным экспериментально значениям, причём чем больше глубина погружения, тем больше сходимость результата. Расхождение на малом заглублении объясняется тем, что материал лыж и выбранная смазка, влияющие на коэффициент трения, не были указаны авторами эксперимента, по этой причине коэффициент трения выбирался по табличному значению для стали без смазки.

Данное исследование показывает принципиальную возможность моделирования движения тел в снегу с получением значений сопротивления. Вместе с тем, использование изолированного ПО EDEM не позволяет получить полную картину движения, так как в нём реализуется только задание линейной, угловой скорости движущегося тела без учёта его массы и прочих сил, действующих на тело.

Для более полного моделирования террамеханической системы целесообразно использовать MBD-пакеты (Multi body Dynamics, динамика

множества тел), такие как MSC ADAMS, LMS VL Motion. В этом случае моделирование подвески, трансмиссии и т.д. осуществляется в MBD – пакете, а модель грунта в результирующий расчёт предоставляет ПО дискретно-элементного моделирования.

Список использованной литературы:

1. Тесленко Д.С., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В. Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Т. 5, № 107, 2014. С. 52-58.
2. Madsen J., Negrut D., Reid A., Seidl A., Ayers P., Bozdech G., Freeman J., O'Kins J. A Physics-Based Vehicle-Terrain Interaction Model for Soft Soil Off-Road Vehicle // SAE International Journal of Commercial Vehicles, No. №5(1), 2012. pp. 280–290.
3. O'Connor R.M., Troczynski J.R., Preece, Klosek J.T., Williams. Discrete Element Modeling of Sand Production // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 34, No. 3-4, 1997.
4. <http://www.dynaexamples.com/dem/injection-analysis>
5. Hertz H. Uber die Berührung Fester Elastischer Korper // J. Reine und angewandte Mathematik, 1882.
6. Mindlin R.D. Compliance of elastic bodies in contact // Journal of Applied Mechanics, No. 16, 1949. pp. 259-268.
7. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces // ASME, No. September, 1953. pp. 327-344
8. Zhou Y.C., Wright B.D., Yang R.Y., Xu B.H., Yu A.B. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation // Physica A, No. 269, 1999. pp. 536–553.
9. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // Proc. R. Soc. Lond, No. 324, 1971. pp. 301-313
10. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 41, 2004. pp. 1329-1364.
11. Cundall A., Strack O.D. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique, No. 29, 1979. P. 517.
12. Беляков В.В., Молев Ю.И. Снег как опорное основание для движения транспортных средств // Известия академии инженерных наук им А.М. Прохорова, Т. 5 "Транспортно-технологические машины и комплексы". С. 203-220.
13. Епифанов В.П., Кузьменко В.П. Механика разрушения снега // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела, № 4, 1986. С. 190-197.
14. Войтковский Ф. Механические свойства снега. Москва: Наука, 1977
15. Шишкин Б.В. Исследование движения лыжи снегоходного автомобиля. Москва: МАМИ им. М.В. Ломоносова, 1953.

16. Shapiro L.H., Johnson J.B., Sturm M., Blaisdel G.L. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. New Hampshire: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1997.
17. Шалман Д.А. Снегоочистители. Ленинград: Машиностроение, 1973.
18. Тушинский Г.К. Инженерная гляциология. Москва: Издательство Московского университета, 1971.
19. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe // Powder Technology, No. 71, 1992. pp. 239-250.
20. Sakaguchi E., Ozaki E., Igarashi T. Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo // Int. J. Mod. Phys., No. 7, 1993. pp. 1949-1963.
21. Walton O.R., Braun R.L. Stress Calculations for Assemblies of Inelastic Spheres in Uniform Shear // Acta Mechanica, No. 63, 1986. pp. 73-86.
22. Беккер М.Г. Вверение в теорию систем местность-машина. Москва: Машиностроение, 1973.
23. Келлер А.В., Карпов Н.А., Шафиков Д.В. Обоснование путей повышения подвижности многоцелевых колёсных машин.
24. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. Москва: Машиностроение, 1993.
25. Макаров В.С. Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования, № 1, 2013.

УДК 621.791

Восстановление дефектных стыков рельсов электродуговой наплавкой

Д.А. Неживляк¹, А.Е. Неживляк¹, М.В. Гречнева²

- 1) Иркутский государственный университет путей сообщения
- 2) Иркутский национальный исследовательский технический университет

Одной из главных причин выхода из строя рельсов бесстыкового пути, выполненного электроконтактной сваркой, являются дефекты смятия и износа в зоне стыка. Представлены результаты исследования восстановленных наплавкой дефектных рельсов.

Ключевые слова: *дефекты смятия и износа стыков рельсов, электродуговая наплавка, металлографические исследования*

В настоящее время в России и за рубежом остро стоит проблема повышения работоспособности рельсов. Во многих случаях выход рельсов из

стройка происходит из-за дефектов контактно-усталостного происхождения, смятия, износа, а также вследствие термомеханических повреждений [1].

На сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется свыше 92 тыс. км бесстыкового пути, имеющим около 10 млн. сварных стыков рельсов. Наиболее широко применяется электроконтактный способ сварки. В результате нарушений технологии термообработки, применяемой после сварки, образуются участки с пониженной твердостью металла в зоне сварного стыка. В процессе эксплуатации поверхностных слоев головки рельса возникают значительные деформации и температуры в зоне сварного стыка, приводящие к изменениям структуры и свойств металла и снижающие контактную прочность и износостойкость рельсов. В результате происходит их износ и смятие и образование обширных участков пониженной твердости длиной до 200 мм. Только в текущем году на сети дорог зарегистрировано 19 тыс. смятий, что вдвое превысило показатель прошлого года. За пять последних лет доля износа и смятий в общем количестве дефектов пути возросла на 70%. Соответственно растет число изломов рельсов в области сварных швов. Этим определяется актуальность совершенствования способов восстановления изношенных рельсов и повышения их эксплуатационных свойств. Одним из способов восстановления является электродуговая наплавка (далее – наплавка) [2–6]. С целью разработки технологии устранения дефектов смятия и износа рельсов в зоне электроконтактного сварного стыка проведены исследования электродуговой наплавки, выполненной в один и в два слоя.

В исследовании использовались рельсы, изъятые из эксплуатации из-за сверхнормативного износа в сварных стыках [7]. Пропущенный тоннаж до изъятия составлял от 510 до 580 млн. т брутто. Анализировались структуры металла в зоне сварного стыка и в зоне термического влияния (ЗТВ) до и после наплавки и выяснялись различия между ними. Измерялась твердость металла рельса в стыке и ЗТВ и наплавленного металла и контролировались равномерность её распределения и отсутствие скачков.

Исследовались образцы с дефектами, вырезанные из действующего пути. Перед наплавкой дефектный участок обрабатывался шлифовкой абразивными кругами. Отсутствие поверхностных дефектов контролировалось капиллярной (цветной) дефектоскопией. Наплавку проводили автоматом «ПУНАР» с источником питания Megatronic FOCUS. Для наплавки использовалась самозащитная порошковая проволока ОК Tubrodur 15.43 диаметром 1,6 мм (ТУ 1274-115-55224353-2013). Перед наплавкой использовали предварительный подогрев при температуре 400...450°C.

Металлографические исследования и измерение твердости сварного соединения [8] проводили на образцах, вырезанных из трёх рельсов, сваренных контактным способом, два из которых были восстановлены наплавкой. Схема вырезки образцов для изготовления шлифов показана на рисунке 1. Исследование проводили: а) на продольном шлифе, вырезанном из участка рельса, сваренного контактным способом; б) на продольном и двух

поперечных шлифах, вырезанных из участка рельса, сваренного контактным способом, и восстановленного наплавкой в один слой.

Макроисследование проводили на стереоскопическом микроскопе МБС-1. Травление образцов проводили 25%-ым водным раствором азотной кислоты (ГОСТ 10243-75). Травление образцов для макроисследования осуществляли 4%-ым спиртовым раствором азотной кислоты. Микроисследование проводили на оптическом микроскопе «Axiovert 40 MAT», при увеличении $\times 100$ и $\times 500$.

Макроисследование шлифа, вырезанного из рельса, сваренного контактным способом (Рис. 2), показало, что ширина сварного шва составляет около 0,8 мм, ширина ЗТВ – 18,0 мм в каждую сторону. Ширина ЗТВ от последующей термообработки после контактной сварки составляет 100,0 мм, а ее глубина в зоне сварки – 27,0 мм. В исследуемом макрошлифе обнаружены эксплуатационные трещины, получившие развитие с поверхности катания рельса. На поверхности катания головки рельса имеются сколы металла, а также пластическая деформация у поверхности катания, образовавшаяся в процессе эксплуатации.

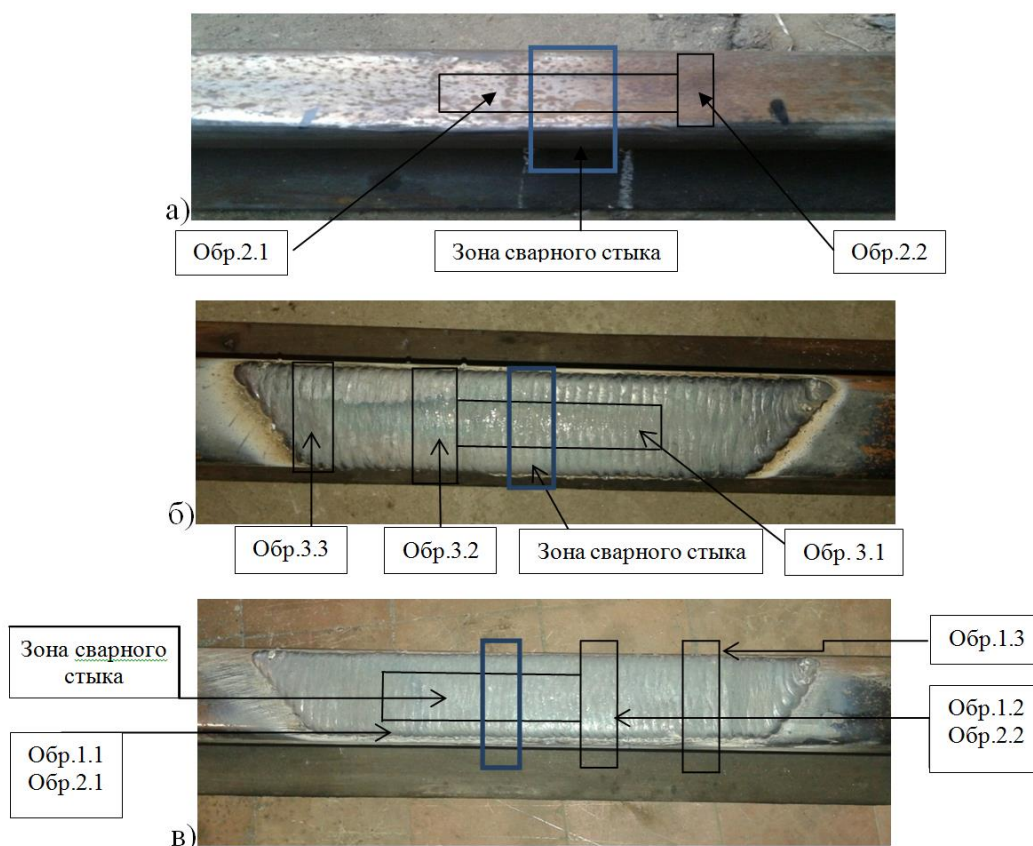


Рис. 1. Схема разрезки шлифов для исследования
 а) – рельс №1 без наплавки; б) – рельс №2 с наплавкой в 1 слой; в) – рельс №3 с наплавкой в два слоя

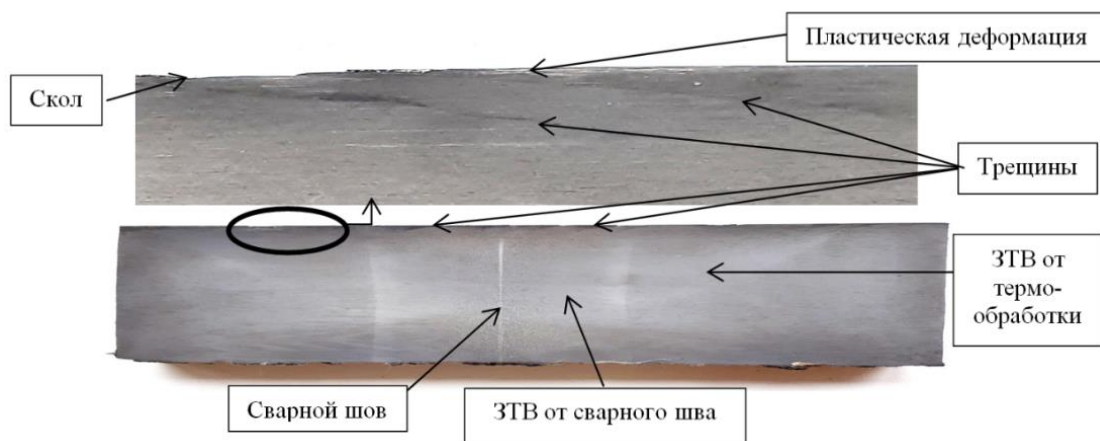


Рис. 2. Макроструктура сварного соединения рельса, сваренного контактным способом

Твердость металла рельсов определяли на твердомере TIMEGROUP-INS, модель HVS-10 по ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу». Шаг составлял 2,0 мм, нагрузка – 10 кгс (HV10). В ЗТВ стыков рельсов распределение твердости равномерное, повышений или низких значений не обнаружено.

Исследование макрошлифов (Рис. 3) показало, что толщина наплавленного металла в один слой составляет 4,0 мм, глубина ЗТВ – 5,0...10,0 мм. Ширина ЗТВ от сварного шва – 17,0 мм на сторону. Макродефектов в наплавленном металле и ЗТВ не обнаружено.

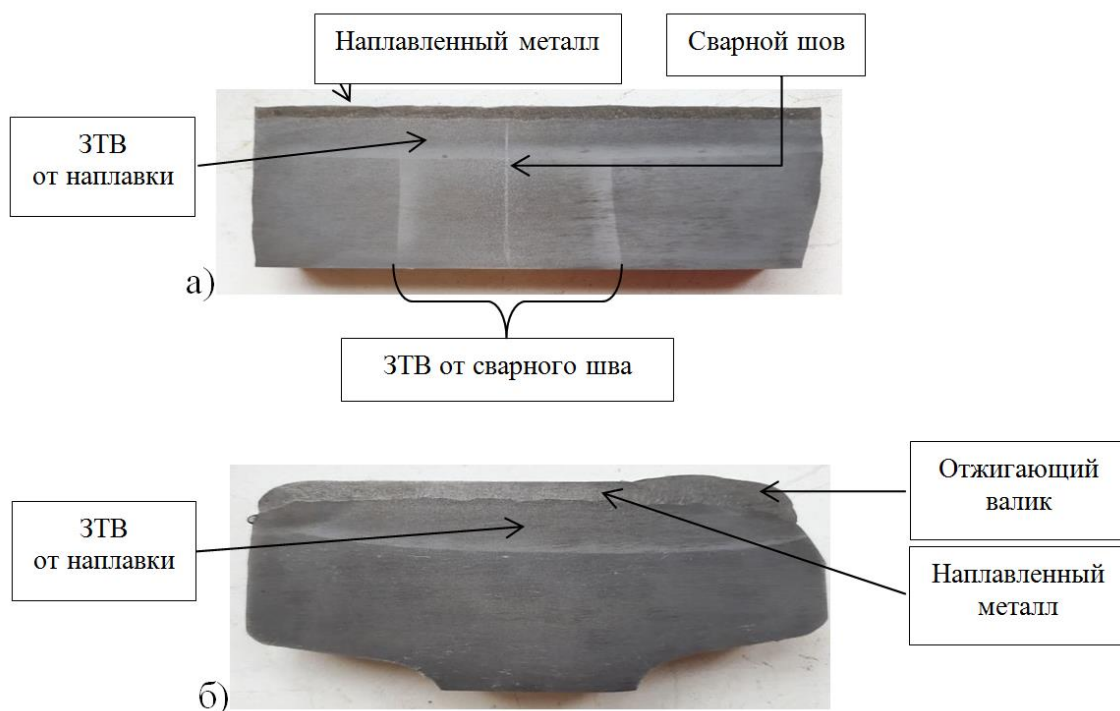


Рис. 3. Макроструктура сварного соединения рельса, наплавленного в один слой: а) – продольный шлиф; б) – поперечный шлиф

Результаты замера твердости на продольном макрошлифе № 2.1 показали, что в зоне термического влияния от сварного шва и от наплавленного металла высоких значений твердости нет, но в наплавленном металле имеется повышенное значение твердости 385HV_{10} ; данная точка твердости расположена у границы сплавления наплавленного металла с основным.

Микроисследование шлифа рельса, сваренного контактным способом, показало, что микроструктура металла сварного шва состоит из тонкопластинчатого перлита и феррита (Рис. 4). Структура ЗТВ состоит из тонкопластинчатого перлита и феррита (Рис. 5). В зоне сварного шва у поверхности катания головки рельса имеется пластическая деформация металла шва и ЗТВ, образовавшаяся в процессе эксплуатации, а также эксплуатационные трещины и сколы. Такие же дефекты наблюдаются и рядом со сварным швом (Рис. 6).

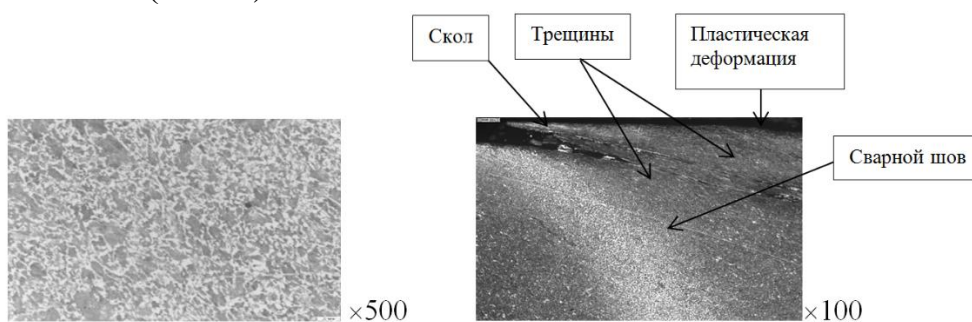


Рис. 4. Микроструктура сварного шва

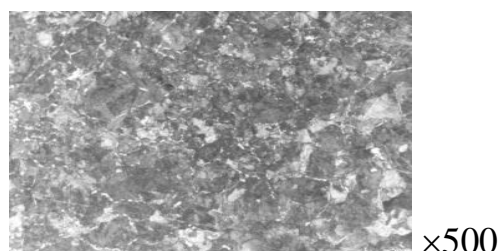


Рис. 5. Микроструктура зоны термического влияния

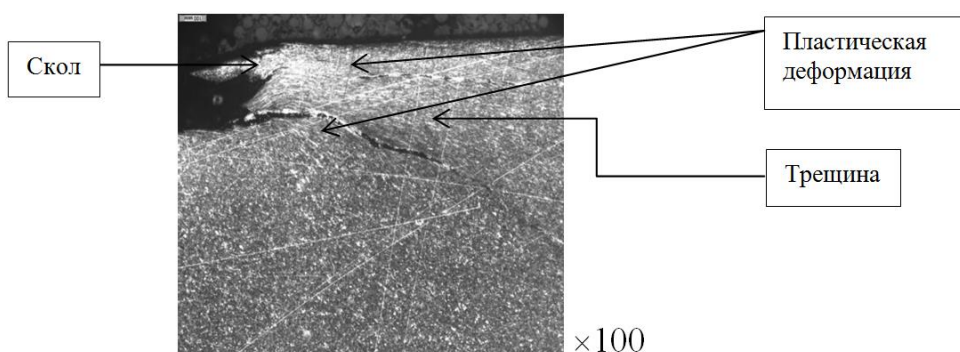


Рис. 6. Дефекты у поверхности катания головки рельса

Твердость металла сварного шва у поверхности катания головки рельса – 368HV_{10} , далее, вглубь головки рельса твердость уменьшается от 320 до 268HV_{10} , и на расстоянии $25,0$ мм от поверхности катания головки

рельса – 256 HV₁₀. Твердость в ЗТВ у поверхности катания – 349...381 HV₁₀, вглубь головки рельса уменьшается от 359 до 286 HV₁₀, на расстоянии 25,0 мм от поверхности – 274...280 HV₁₀. Повышенная твердость у поверхности катания обусловлена наличием пластической деформации. Твердость на расстоянии 10,0 мм от сварного шва – 378...398 HV₁₀.

Микроисследование шлифов рельса с наплавленным металлом в один слой показало, что микроструктура состоит из тонкопластинчатого перлита, феррита и бейнита (Рис. 7). Твердость наплавленного металла – 343...399 HV₁₀. В краевых участках наплавки у границы сплавления наплавленного металла с основным и под отжигающим валиком наблюдаются небольшие участки бейнита с твердостью 399...401 HV₁₀.

Структура отжигающего валика состоит из тонкопластинчатого перлита, феррита и бейнита с твердостью 394 HV₁₀. В ЗТВ закалочных структур не обнаружено, структура участка перегрева состоит из тонкопластинчатого перлита, феррита и обрывков ферритной сетки (Рис. 8а). Твердость – 316...369 HV₁₀. Микроструктура участка перегрева ЗТВ под отжигающим валиком мелкодисперсная, состоит из тонкопластинчатого перлита и феррита (Рис. 8б). Твердость – 345...351 HV₁₀.

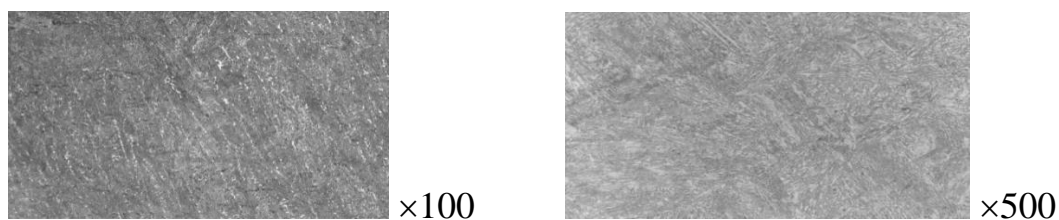


Рис. 7. Микроструктура наплавленного металла в один слой

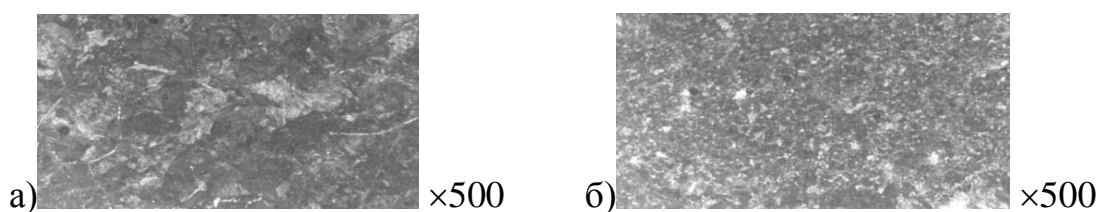


Рис. 8. Микроструктура участка перегрева зоны термического влияния: а – Участок перегрева ЗТВ – тонкопластинчатый перлит, феррит, обрывки ферритной сетки; б – Участок перегрева ЗТВ под отжигающим валиком – тонкопластинчатый перлит и феррит.

На рисунке 9 представлена граница сплавления наплавленного металла с зоной сварного шва. Структура участка перегрева ЗТВ в зоне сварки – тонкопластинчатый перлит, феррит и ферритная сетка. Твердость участка перегрева ЗТВ в зоне сварного шва – 282 HV₁₀, в ЗТВ от сварного шва – 316...327 HV₁₀. Трещин или других дефектов в ЗТВ не обнаружено.

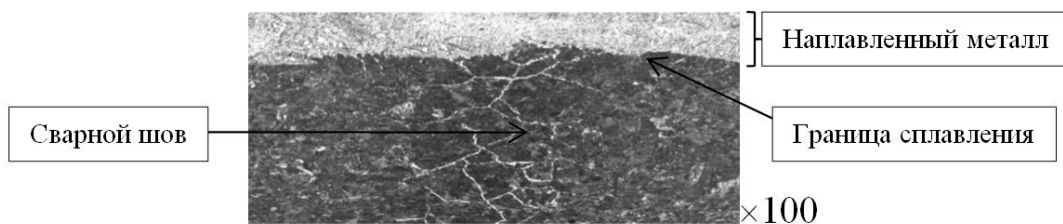


Рис. 9. Граница сплавления наплавленного металла в зоне сварного шва (наплавка в один слой)

Микроисследование шлифов с наплавленным металлом в два слоя (Рис. 10) показало, что структура наплавленного металла нижнего слоя и краевых участков наплавки состоит из бейнита, имеются участки с твердостью 380...404 HV₁₀. Структура верхнего слоя состоит из тонкопластинчатого перлита, феррита и бейнита. Твердость – 328...364 HV₁₀. Трещин в наплавленном металле не обнаружено.

В ЗТВ закалочных структур не обнаружено. Структура участка перегрева (ОШЗ) ЗТВ состоит из тонкопластинчатого перлита, феррита и обрывков ферритной сетки. Под краевыми участками наплавленного металла структура имеет мелкодисперсное строение тонкопластинчатого перлита и феррита. Твердость металла на участке перегрева ЗТВ – 310...371 HV₁₀.

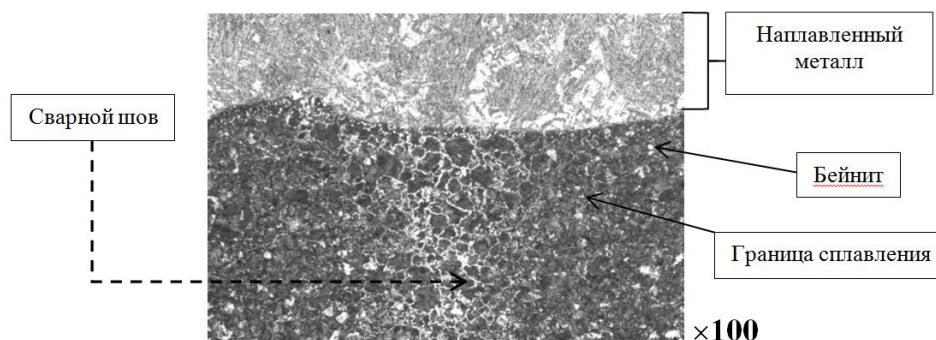


Рис. 10. Граница сплавления наплавленного металла в зоне сварного шва (наплавка в два слоя)

Исследование темплета рельса, сваренного контактным способом без наплавки, показало: у поверхности катания головки рельса и в зоне сварного шва имеется пластическая деформация структуры металла шва, трещины и сколы, образовавшиеся в процессе эксплуатации; наличие повышенной твердости у поверхности катания вызвано пластической деформацией; закалочных структур в зоне сварного шва не обнаружено.

На рельсах, восстановленных наплавкой, структура наплавленного металла и ЗТВ в целом благоприятная, однако имеются участки повышенной твердости и отдельные участки со структурой бейнита на границах сплавления наплавленного металла с основой, указывающие на высокую скорость охлаждения в этих зонах. Следует скорректировать технологию наплавки – повысить температуру предварительного подогрева для снижения скорости охлаждения металла в зоне наплавки.

Проведены эксплуатационные испытания рельсов, восстановленных электродуговой наплавкой. На поверхности катания восстановленных стыков дефекты отсутствуют. Высоких значений твердости не обнаружено; твердость наплавленного слоя составляет 328НВ. Эксплуатационные испытания подтвердили перспективность данной технологии восстановления для продления жизненного цикла рельса.

Выводы

Результаты проведенных металлографических исследований и эксплуатационных испытаний показали, что наплавка не оказывает неблагоприятного влияния на структуру и свойства металла рельса, сварного шва и ЗТВ. Полученный положительный результат показывает целесообразность использования электродуговой наплавки для восстановления дефектов смятия и износа рельсов в зоне электроконтактного сварного стыка.

Список использованной литературы:

1. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов» от 23.10.2014 №2499.
2. Medvedev S.I., Nezhivlyak A.E., Grechneva M.V., Balanovsky A.E., Ivakin V.L. Optimization of plasma hardening conditions of the side surface of rails in PUR-1 experimental equipment. *Welding International*. 2015. Т. 29. № 8. С. 643-649.
3. Неживляк Д.А., Неживляк А.Е., Гречнева М.В., Габитов А.Г. Исследование возможности использования электродуговой наплавки для устранения дефектов смятия и износа рельсов в зоне электроконтактного сварного стыка. – В сб.: «Жизненный цикл конструкц. материалов: мат-лы VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Иркутск, 2018 г.). Под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2018. С. 156-165.
4. Павлов Н.В., Неживляк А.Е., Гречнева М.В., Кирьяков В.М. Наплавочные материалы для восстановления пар трения деталей железнодорожного подвижного состава // Сварка и контроль – 2005: Мат-лы докладов 24-ой научно-технической конференции сварщиков Урала и Сибири. Челябинск, 2005. - с. 137-142.
5. Абраменко Д.Н., Неживляк А.Е., Гречнева М.В., Юсупов Е.З. Структурно-трибологические особенности поверхностей трения деталей железнодорожного подвижного состава, восстановленных износостойкой наплавкой. Труды ГОСНИТИ. Том 108. М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2011. С.170-174.
6. Павлов Н.В., Неживляк А.Е., Гречнева М.В., Кирьяков В.М. Наплавочные материалы для восстановления деталей железнодорожного транспорта. – В кн.: Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат-лы 5-й международной научно-технической конференции. Киев, 2005, с. 175-177.
7. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути / МПС РФ. - М.: Транспорт, 2001. – 223 с.
8. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. - М.: Металлургия. 1970. – 335 с.

УДК518.5:681.3

Адаптированное обучение геометро-графическим дисциплинам

И. И. Кострубова, А. В. Иванов.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Изучение начертательной геометрии и графических дисциплин повышает уровень развития когнитивных функций для формирования инженерной интуиции и конструктивных способностей. Выполнение курсовой работы по дисциплине «Инженерная и компьютерная графика» способствует развитию пространственного мышления, вырабатывает знания и навыки, необходимые для выполнения и чтения технических чертежей, повышения качества усвоения теоретического материала. Приведены примеры трёхмерных моделей, выполненных на базе пакета графических программ AutoCAD.

Ключевые слова: инженерная и компьютерная графика, трёхмерное моделирование, графические программы, образование поверхностей и линий пересечения поверхностей.

Проблема качества высшего образования была и остаётся актуальной. При ускорении роста технического прогресса подготовка достойных профессиональных кадров, обладающих требуемыми компетенциями, является важнейшей задачей и источником развития современной цивилизации. На первый план выходят ценности развития творческой деятельности, которая связана с процессом пространственного мышления, необходимого для формирования инженерной интуиции и конструктивных способностей. Растёт престижность высшего образования, а его доступность в настоящее время порождает проблему неоднородности поступающего в вузы контингента. По этой причине возникает проблема качества подготовки выпускников. Предмет «Черчение» исключён из обязательной школьной программы средней школы, из-за чего многие абитуриенты не имеют даже азов графической грамотности и не обладают достаточным уровнем развития когнитивных функций, а именно внимания, памяти, мышления, и не в состоянии овладеть требуемым объёмом знаний. Выход один – развить когнитивные функции до необходимого уровня. Эту задачу и решает графическая дисциплина «Инженерная и компьютерная графика».

По мнению психологов, немногие люди имеют врожденное чувство пространства, которое в дальнейшем легко развивать и усилить. Для дру-

гих требуется толчок в этом направлении. Знакомство с такими дисциплинами как начертательная геометрия, черчение, инженерная и компьютерная графика поможет развить пространственное представление и воображение. Графический язык - язык образов, незаменим в инженерной, дизайнерской и архитектурной деятельности. Освоение этого языка и пространственного мышления может и должно быть постепенным и непрерывным, что соответствует парадигме непрерывного образования, направленной на развитие будущего специалиста, его мышления, воображения и творческих способностей.

Качество организации учебного процесса: организация и проведение лекций, лабораторных и практических занятий, курсовых работ и проектов, практик определяет качество подготовки специалиста. Соблюдение прикладного характера процесса обучения отражено в ФГОС-3 по направлению 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств «Автоматизация технологических процессов и производств» и в учебных планах этого направления, которые предусматривают выполнение уже в первом семестре курсовой работы по дисциплине Инженерная и компьютерная графика. Дисциплина является фундаментальной и одной из основных обще-профессиональных дисциплин, так как обеспечивает знание общих методов: построения и чтения чертежей, решения разнообразных инженерно-геометрических задач, возникающих в процессе проектирования, конструирования, автоматизации, изготовления и эксплуатации различных машин, механизмов, приборов, изучение технической документации. Одним из основных требований к дисциплине является её целостность по изучаемым модулям: начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика. Начертательная геометрия развивает у человека пространственное мышление, без которого немислимо никакое инженерное творчество; специальный тематический подбор графических задач развивает логическое мышление, склонность к анализу и т.п. (общие методы решения задач способствуют усвоению алгоритмов, помогая решать сложные задачи, анализировать процесс, представлять результаты). Предметом инженерной и компьютерной графики является автоматизация процесса построения графических моделей инженерной информации, их преобразования и исследования. Теоретической основой формирования графических моделей является геометрическое моделирование, т.е. представление информации с точки зрения геометрических свойств объекта.

Выполнение курсовой работы является одной из важных форм обучения дисциплине. Уже на этом образовательном этапе она позволяет начать формирование таких профессиональных компетенций как способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, способности проводить сбор, анализ информации, выбор оптимальных решений и составлять обзоры и отчёты.

Основная цель курсовой работы «Основы выполнения графических изображений» – выработка знаний и навыков, необходимых для выполнения и чтения технических чертежей, а также повышение качества усвоения теоретического материала. Тема курсовой работы охватывает круг позиционных задач: положение поверхностей относительно плоскостей проекций и друг друга с построением линий их взаимного пересечения. Основу пространственного мышления составляет понятие проекций (от наглядного изображения объекта к плоскостному и обратно).

Построение комплексных чертежей геометрических образов предполагает создание мысленных пространственных образов, способствующее развитию соответственного мышления, что и является одной из основных целей курса. Однако при 2-х мерном отображении пространства многие обучающиеся затрудняются представить геометрический образ – им ещё предстоит развить эти способности. Значительно облегчить решение и улучшить понимание графических задач позволяют современные графические системы автоматизированного проектирования, такие как «AutoCAD». Пример решения задачи на построение линии пересечения поверхностей с помощью графической системы приведен на рис. 1.

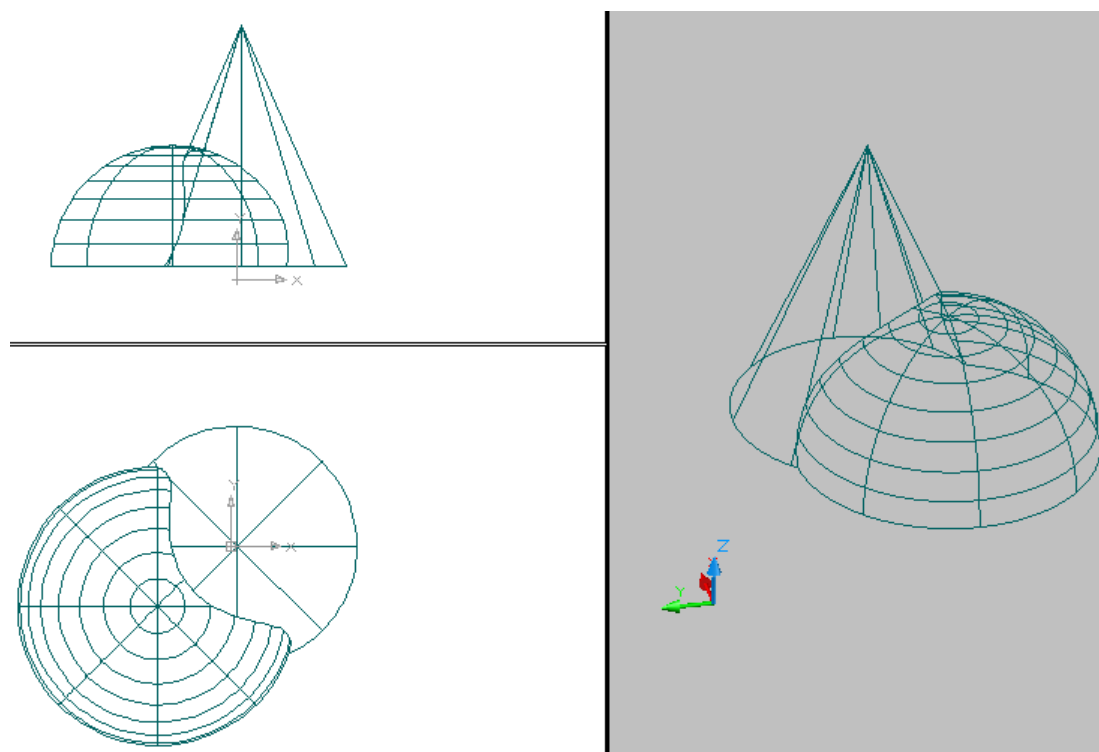


Рис. 1. Пример построения линии пересечения поверхностей (AutoCAD)

Благодаря использованию с самого начала обучения средств машинной графики и 3D-моделирования с их основным упором на анализ и синтез геометрических форм, когда полученную объёмную модель объекта можно, вращая, рассмотреть со всех сторон, развивается пространственное воображение студента, без которого невозможен процесс творческий. Для

решения задачи на построение линии пересечения поверхностей студенты первоначально создают трёхмерные модели поверхностей, учитывая законы их образования, и определяют искомый элемент, а затем выполняют работу на ватмане формата А3 после проведённого анализа заданных поверхностей, их пространственного расположения и выбора алгоритма решения.

После освоения способов задания поверхностей и решения позиционных задач на принадлежность классическим способом (вручную на ватмане) применяются 3D - технологии и создаётся пространственная геометрическая модель технической детали. Построение начинается с простых геометрических, затем более сложных тел, построенных с применением команд ВЫДАВЛИВАНИЕ и ВРАЩЕНИЕ (рис. 2). Следующим логическим шагом является создание теоретического чертежа детали к курсовой работе. При этом процесс его создания разбивается на следующие этапы:

1 - мысленная разбивка наружной формы детали на поверхности (простейшие трёхмерные примитивы) и рассмотрение их относительного положения (сочетание, пересечение, вычитание);

2 - последовательное построение этих примитивов;

3 - выполнение логических операций над примитивами (объединение, вычитание, пересечение).

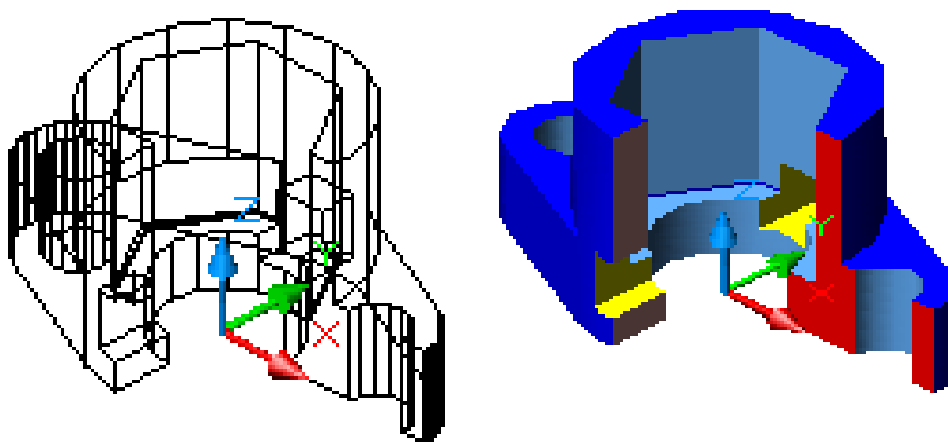


Рис. 2. Пример построения 3D модели (AutoCAD)

При формировании моделей пересекающихся поверхностей и отдельной заданной детали следует учесть последовательность выполнения логических операций:

1 - организовать рабочее пространство (графическую зону и соответствующие панели инструментов);

2 - выполнить анализ поверхностей, закон их образования, относительное положение и продумать какие команды и операции потребуются для создания трёхмерных 2моделей этих геометрических образов. Затем объединить внешние поверхности и объединить внутренние поверхности – вертикальные и горизонтальные отверстия;

3 - вычесь пазы и отверстия из тел, образующих внешнюю поверхность.

Для придания большей наглядности можно каркасное задание детали дополнить тонированием (рис.2). Такой подход к визуализации обеспечивает целостность восприятия, помогает представить реальное изображение предмета в пространстве и является надёжным способом активизации познавательной деятельности студентов.

В объём курсовой работы входит также построение линии пересечения поверхностей (на ватмане формата А3); проекционного чертежа заданной детали с необходимыми разрезами, её изометрическое изображение с вырезом, простановка необходимых размеров. В пояснительной записке студент должен дать полный и последовательный анализ задания, обоснованно объяснить все графические и компьютерные построения.

В целом же, выполнение курсовой работы требует от обучающегося не только работы с ПК, но и с конспектом лекций, учебной литературой, ГОСТами ЕСКД, что положительно влияет на понимание и лучшее усвоение предмета.

Процесс творческого интерактивного выполнения задания курсовой работы позволяет создать ситуацию повышения мотивационно - творческой деятельности студентов, что стимулирует и активизирует их самостоятельную работу при изучении начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики, позволяя сформировать основные компоненты персональной компетенции будущего специалиста.

В процессе обучения студенты изучают материал необходимый будущему инженеру; систематизируют и углубляют знания, изучают правила оформления и выполнения чертежей, приобретают навыки работы с учебной и справочной литературой, графической программой. Тематический подбор графических задач развивает логическое мышление, склонность к анализу и т.п. (общие методы решения задач способствуют усвоению алгоритмов, помогая решать сложные задачи). У студентов формируется самостоятельность в принятии решений, способность довести это решение до результата, внимательность, а также самодисциплина при оформлении чертежей в соответствии с требованиями стандартов.

Таким образом, мы видим, что адаптированное обучение геометрографическим дисциплинам, а именно изучение графических дисциплин – составная часть образовательной структуры и способствует формированию общей культуры личности обучающихся на основе усвоения содержания образовательных программ, адаптации и формированию основы для осознанного и последующего освоения уже на старших курсах профессиональных образовательных программ, формированию профессиональных компетенций.

Список использованной литературы:

1. Амирджанова И.Ю. Современное состояние развития геометро-графической культуры и компетентности будущих специалистов // Вектор науки ТГУ, 2015. -2-2. - С. 26-31.

2. Клименкова С.Б., Иванова М.А. Особенности преподавания дисциплины «Начертательная геометрия. Инженерная и компьютерная графика» у студентов 21.05.04 Горное дело // Педагогические и социологические аспекты образования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 25 апр. 2018 г.) / Под ред. Л. А. Абрамовой, И. Е. Поверинова. – Чебоксары: ИД «Среда», 2018. – С. 75-77.
3. Гузенков В.Н. Преподавание информационных технологий в графических дисциплинах технического университета // Открытое образование, 2013. - № 1. –С. 4-7.
4. Дегтярев В. М. Инженерная и компьютерная графика : учеб. для студентов вузов по техническим направлениям / В. М. Дегтярев, В. П. Затыльников, 2012. - 238 с.
5. Белокрылова О.В., Иванова М.А. Решение прикладных задач методами начертательной геометрии // АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ - 2017: Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. - Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. – С. 504-507.
6. Кравцова Л.И., Кострубова И.И. Развитие личностных и профессиональных компетенций в процессе изучения графических дисциплин. Инновационное развитие современной науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции: в 9 частях. Ответственный редактор А.А. Сукиасян, 2014. С. 177-179.
7. Белокрылова О.В. Опыт и перспективы использования электронного обучения графическим дисциплинам. Эволюция современной науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4 частях, 2016. С. 116-119.
8. Клименкова С.Б., Иванова М.А. Роль самостоятельной работы студентов при изучении графических дисциплин // Наука и образование в XXI веке сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 17 ч., 2014. С. 46-48.
9. Иванова М.А., Верхотурова Е.В. Ситуационные задачи как интерактивный метод обучения при изучении графических дисциплин // Качество подготовки специалистов в техническом университете: проблемы, перспективы, инновационные подходы: Сборник статей IV Международной научно-методической конференции. – Могилев: МГУП, 2018. – С.62-64.
10. Иванова М.А., Клименкова С.Б. Проблемы преподавания графических дисциплин в современном техническом вузе и некоторые аспекты их разрешения // Качество подготовки специалистов в техническом университете: проблемы, перспективы, инновационные подходы: Сборник статей IV Международной научно-методической конференции. – Могилев: МГУП, 2018. – С.64 - 65.
11. Bolshakova MS. Axonometric Constructions in Graphic Design // Visual Culture: Design, Advertising, Information Technologies: Materials of the

XVII Vseros. Scientific Practical conf. (Omsk, April 22–24, 2018) / OmGTU [and others]; [Editorial: I. G. Pendikova (scientific ed.) et al.]. - Omsk: Omsk State Technical University Publishing House, 2018. P.13 – 16.

12. Kravcova L.I. et al. Technical drawing. Tutorial. Irkutsk ISTU. 2014. P. 88

13. Efimov D.I. Construction of axonometric projections // Journal E-learning in continuing education: Publishing house: Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk) Number: 1-2, 2014. P. 263-264

14. Eliseev N. A. Development of the Axonometry in Works of Scientists of Petersburg / N. A. Eliseev // XXX Symposium of the Intern. Committee for the History of Technology. ICOHTEC, St. Pet .. -M.-SPb.: ICONTEC, 2013. P.9-10.

Данные авторов

А

Асылбаев Александр Владиславович, магистрант каф. технол. машиностроения, e-mail: st.alex542@gmail.com

Артюнин Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», тел.: +79025117764, e-mail: artyunin_ai@irgups.ru

Абдурахманов Равшан Дильшодбекович, студент гр. СДМ-15-1, тел.: 8-(902)-173-53-40, E-mail: scinceme.istu@gmail.com

Б

Белокрылова Ольга Вениаминовна, ст. преподаватель кафедры начертательной геометрии и технического черчения, тел.89149038379, e-mail: belokrylova9@yandex.ru

Бакурова Наталья Сергеевна, преподаватель цикловой комиссии Аэродинамики и конструкции летательных аппаратов факультета Эксплуатации летательных аппаратов, тел.: 89501261980, e-mail: shcheglova_n_s@mail.ru

Балашов Александр Антонович, к.т.н., старший научный сотрудник 41 научно-исследовательского отдела, тел.: 89057899987

Бобин Константин Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения

Бутузова Александра Борисовна, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта, тел.: 89501116232, e-mail: alexa.kupriyanova@gmail.com

Брюханов Евгений Александрович, магистрант кафедры Технология машиностроения, тел.: +79177608390, e-mail: darklion19@mail.ru

Большаков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, тел.: 8(908) 6614263, e-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Балбаров Вячеслав Самбуевич, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой «Механика и основы конструирования», тел. +7(924) 657-73-70, e-mail: garmas@mail.ru

Борсоев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела исследований перспективных направлений аэронавигационной системы;

Белокрылова Ольга Вениаминовна, ст. преподаватель кафедры начертательной геометрии и технического черчения, тел. 89149038379, e-mail: belokrylova9@yandex.ru

Берман Александр Фишелевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН), тел.: 8(914)892-5548, e-mail: bafbam@mail.ru

Беломестных Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89641171354, e-mail: berkut1@mail.ru

Бухаров Сергей Викторович, д.т.н., профессор кафедры Технология композиционных материалов, конструкций и систем тел.: +79254695232 e-mail: bukharovsv@mail.ru

В

Вольф Игорь Эдуардович, к.т.н., доцент кафедры Электрооборудования (и оптико-электронных систем), тел.: 89805490180, e-mail: Volfigor71@mail.ru

Вафин Руслан Каримович, доцент каф. технол. машиностроения, канд. техн. наук, e-mail: vafinrk@mail.ru

Вшивков Юрий Федорович, аспирант кафедры математического анализа и дифференциальных, заведующий компьютерными классами, e-mail: 1988ufv@mail.ru.

Выонг Куанг Чык, аспирант ИрГУПС, e-mail: trucvq1990@gmail.com

Варданын Эдуард Леонидович, к.т.н., доцент кафедры Технология машиностроения, тел.: +79177337877, e-mail: vardanyaned@gmail.com

Вдовин Константин Николаевич, д.т.н., проф., Магнитогорский государственный технический университет;

Ветлугин Артур Всеволодович, студент группы СМ-14-1, тел.: +79025687206, e-mail: arturvetlugin@mail.ru

Г

Гречнева Мария Васильевна, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, тел.: 83952405247, e-mail: mgrech@irk.ru

Грешилов Анатолий Дмитриевич, к.т.н., доц., декан машиностроительного факультета, тел.: 89085911155, e-mail: agreshilov@mail.ru

Галушко Егор Александрович, аспирант ИМЭИ ИГУ, тел.: 89500711355, e-mail: photon_91@mail.ru

Гармаева Валентина Валерьевна, преподаватель кафедры прикладной математики, тел. +79516230344, e-mail: gfixsiv@gmail.com

Рамазанов Камиль Нуруллаевич, д.т.н., профессор кафедры Технология машиностроения, тел.: +79273177066, e-mail: kamram@rambler.ru

Галактионова Арина Владимировна, аспирант кафедры общей физики Уфимского государственного авиационного технического университета, тел.: 8 917 4687790, e-mail: g-arina@yandex.ru.

Гусенко Сергей Михайлович, Начальник бригады отдела прочности ОКБ им. А. Люльки филиала ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва, тел. (499)-755-04-61.

Д

Детинцов Максим Борисович, аспирант кафедры самолето- и вертолетостроения, тел.: 89529194281, e-mail: punishmentmail@yandex.ru

До Мань Тунг, канд. техн. наук, доцент Ханойского университета, тел.: 89500610243, e-mail: rin111@list.ru

Джасем Мохамед Али, аспирант инженерной школы новых производственных технологий, тел.: 89832330454, e-mail: Eng.mjasem85@gmail.com

Денисов Дмитрий Сергеевич, студент гр. СДМ-14-1, тел.: 89996836627, E-mail: Dmitry9-99@mail.ru

Долгих Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем, тел.: 89500656480, e-mail: dolgih.evgeny@yandex.ru

Делахова Анна Михайловна, старший научный сотрудник НИИРЭС СВФУ им. М.К. Аммосова, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Ленина, 1, , e-mail: am.delakhova@s-vfu.ru

Демин Сергей Сергеевич, доктор экономических наук, доцент, заместитель генерального директора, e-mail: ssdemin@mail.ru;

Добровольский Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры Управление эксплуатацией ракетно-космических систем тел.: +79164432810 e-mail: dobrovolskiy_s@mail.ru

Е

Елистратов Виктор Сергеевич, студент кафедры технология и оборудование машиностроительных производств, тел.: 89834187529, e-mail: vitya.elistratov.98@mail.ru

Евсин Александр Олегович, к.т.н., Врио начальника 41 научно-исследовательского отдела, тел.: 89262827789.

Егорова Татьяна Поликарповна, к.э.н. ведущий научный сотрудник НИИРЭС СВФУ им. М.К. Аммосова, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Ленина, 1, тел.: 8(4112) 49-67-36, , e-mail: tp.egorova@s-vfu.ru

Елисеев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, советник при ректорате по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, тел.:(3952)665129, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Елисеев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, тел.: 8 (983) 4071553, e-mail: eavsh@ya.ru

Емалетдинов Алик Камирович, д.ф.-м.н., проф. кафедры общей физики Уфимского государственного авиационного технического университета, тел.: 8(905)3546374, e-mail: emaletd@mail.ru.

Ж

Журавлёв Диомид Алексеевич, профессор кафедры ТОМП, тел.: +79021719546, , e-mail: dio@istu.irk.ru

З

Зедгенизов Виктор Георгиевич, д.т.н., профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел.: 89149309684, e-mail: vigez@istu.edu

Зуев Александр Сергеевич, студент гр. ММб-16-2, ИрННТУ, тел. 89834109544, e-mail: nauka4879@gmail.com

Зеньков Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, тел.: 89086526251, e-mail: jovanny1@yandex.ru

Зинин Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры Сопротивление материалов, динамика и прочность машин тел.: +79166529209 e-mail: allzin@yandex.ru

Зотов Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: +79643568050, e-mail: zegor-2008@yandex.ru

И

Иов Иван Алексеевич, кандидат технических наук, инженер ООО «СЛСи - Джи Эйч», Москва, тел. 8(904) 114-80-16, e-mail: iovivan@rambler.ru

Иванов Евгений Анатольевич, студент группы ММб-16-1, тел.: 89501273117 e-mail: leev.serega@mail.ru, mail: ivnik@istu.edu

Иванов Андрей Викторович, магистрант группы ЭУм-17 Института энергетике, тел.: 89041112159, e-mail: beyond-the-limit@yandex.ru

К

Кобелева В.О., студентка группы АСУ-18-1, e-mail: valeria.eclerchig@yandex.ru

Казимиров Денис Юрьевич, доцент кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: kazimirov@fromru.com

Короташ Владимир Максимович, студент гр. СДМ-14-1, тел.: 89248322508, e-mail: korotash2016@yandex.ru

Кокоуров Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы», тел.: 40- 51-34 e-mail: kokourovdv@istu.edu

Кузнецов Николай Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и стандартизации в машиностроении, тел.: (3952) 405434, e-mail: knik@istu.edu

Курлаев Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры самолето- и вертолетостроения

Кривель Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Институт математики, экономики и информатики, Иркутский государственный университет, тел.: 89027615178, e-mail: krivel66@mail.ru

Королев Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении ИрННТУ, тел.: 8-914-880-00-40, e-mail: tpwood@rambler.ru

Кривель Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений, e-mail: krivel66@mail.ru.

Карлина Юлия Игоревна, аспирант кафедры ТОМП, тел.: +79148798505, e-mail: karlinigor@mail.ru

Колосов Александр Дмитриевич, магистрант кафедры ЭиЭ, тел. 89027681326, e-mail: akolosov.irk@gmail.com

Кострубова Ирина Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и технического черчения, тел.: 89027632769, e-mail: iriko139@yandex.ru

Л

Ляпина Валентина Николаевна, аспирант кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел.: 89041140686, e-mail: liapinavalentina@yandex.ru

Ледянкина Ольга Анатольевна, старший преподаватель кафедры аэрогидродинамики, тел: +79033406131, e-mail: OALedyankina@kai.ru

Ляпин Сергей Сергеевич, магистрант гр. ТАСм-18-1, тел.:89501198814, e-mail: sergej_lypin22@mail.ru

Лебедев Александр Константинович, инженер кафедры Технология композиционных материалов, конструкций и систем e-mail: alebedev.job@gmail.com +79175359214

Леонович Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры ТОМП, тел.: +79501273117, e-mail: dmitriy.leonovich@mail.ru

М

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович, к.т.н., с.н.с. ЦКП «Прогресс» ВСГУТУ, тел.: 89644024252, e-mail: druh@mail.ru

Май Динь Ши, аспирант кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: mdsmm07@gmail.com

Майзель Игорь Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра технология и оборудование машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: baik-@mail.ru

Мижидон Арсалан Дугарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, тел.: +79025633204, e-mail: miarsdu@mail.ru

Москвитин Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89648136554, e-mail: mvn.irk@yandex.ru

М.В. Сафонов, начальник технологического бюро агрегатно-сборочного производства, ИАЗ e-mail: muxon-nextgen@ya.ru

Н

Нгуен Ши Хьен, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: +7-(924)-611-02-45, e-mail: syhiendk35@gmail.com

Николаев Алексей Александрович, магистрант кафедры Технология машиностроения, тел.: +79996228840, e-mail: alnikolaev.usatu@gmail.com

Нгуен Динь Дьонг, канд. техн. наук, доцент Ханойского университета, тел.: 89500610243, e-mail: rin111@list.ru

Нагимов Рустем Шамилевич, магистрант кафедры Технология машиностроения, тел.: +79991314294, e-mail: r.sh.nagimov@gmail.com

Назаров Алмаз Юнирович, аспирант кафедры Технология машиностроения, тел.: +79273163864, e-mail: nazarov_almaz15@mail.ru

Николайчук Ольга Анатольевна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН), тел.: 8(914)882-8155, e-mail: nikoly67@mail.ru

П

Павлов Павел Владимирович, к.т.н., доцент кафедры Электрооборудования (и оптико-электронных систем), тел.: 89102876023, e-mail: pavlov.pave@yandex.ru

Пономарев Борис Борисович, д.т.н., профессор, кафедра технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: +7-(3952)-40-50-20, e-mail: pusw@istu.edu

Прокопьева Альбина Валерьевна, старший преподаватель кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: albanoisa@yandex.ru

Пузаков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, тел.: 89128432651; e-mail: and-rew78@yandex.ru

Платонов Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, кафедра автомобильного транспорта и машиностроения, Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», e-mail: pvv_hti@mail.ru

Потылицын Евгений Андреевич, аспирант кафедры автомобильного транспорта, тел.: 89148990640, e-mail: potilycin_j@mail.ru

Прохоров Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела исследований перспективных направлений аэронавигационной системы;

Пятунин Кирилл Романович, начальник конструкторского отдела систем инженерного анализа ПАО «НПО «Сатурн» e-mail: kirill.pyatunin@ues-saturn.ru

Р

Рыжиков Игорь Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, тел.: 89500610243, e-mail: rin111@list.ru

Решиков Сергей Александрович, студент гр. СДМ-14-1, тел.: 892996861612, E-mail: reshikovsergei@yandex.ru

Ратинер Михаил Моисеевич, кандидат технических наук, директор фирмы «Эбилити» Лтд, г. Тель-Авив, Израиль, e-mail: michael@ability.co.il

Рабданова Наталья Михайловна, старший преподаватель кафедры «Механика и основы конструирования», тел. +7(902) 530-45-12, e-mail: esstu2012@mail.ru

Рашид Хадиатович Ахатов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия e-mail: axatob@istu.edu

С

Солер Яков Иосифович, профессор кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: (3952)405459, e-mail: solera@istu.irk.ru

Сериков Константин Алексеевич, студент группы СДМ-16-1, кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел. 89647361002

Стрельников Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы», тел.: 40- 51-34 , e-mail: strelnikov077@rambler.ru

Суменков Олег Юрьевич, студент Национального исследовательского Томского политехнического университета, тел.: +79021650779, e-mail: Artunina2107@yandex.ru

Стрельников Александр Васильевич, магистрант кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 89834669853, e-mail: dcdgg94@mail.ru

Спрысков Владимир Борисович доктор технических наук, начальник сектора-главный научный сотрудник отдела перспективных средств ЕС ОрВД;

Сокольников Роман Анатольевич, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: +7 (914) 928-55-52, e-mail: sokolnikroman@gmail.com

Сольский Максим Борисович, студент группы МРб-15-1, кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89994206153, e-mail: msolsky@yandex.ru

Суханов Александр Сергеевич, магистрант кафедры ЭиЭ, тел.: +79149569359, baizile94@gmail.com

Старшинов Дмитрий Станиславович, Начальник бригады отдела прочности ОКБ им. А. Люльки филиала ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва, тел. (499)-755-08-44.

Т

Тагиров Айнур Фиргатович, магистрант кафедры Технология машиностроения, тел.: +79373317856, e-mail: ainurtagirov@mail.ru

Тихонов Александр Геннадьевич, м.н.с. каф.ТОМП, НИЛ исследования технологических остаточных напряжений и деформаций, тел.: 89041423252, e-mail: tihonovalex90@mail.ru

Тараканов Андрей Александрович старший научный сотрудник отдела перспективных средств ЕС ОрВД;

Тесленко Дмитрий Сергеевич, ведущий конструктор ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ". Г. Москва, ул. Автомоторная, 2., тел.: +7(495)456-57-00 , e-mail: info@nami.ru

Точилкин Василий Викторович, аспирант, Магнитогорский государственный технический университет;

Точилкин Виктор Васильевич, д.т.н., проф., Магнитогорский государственный технический университет

Терешко Антон Герольдович, Заместитель начальника отдела прочности ОКБ им. А. Люльки филиала ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва, тел. (499)-755-08-44.

У

Улаханов Николай Сергеевич, старший преподаватель кафедры технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы, тел.: 89644010497, e-mail: nulahanov@mail.ru

Умнов Виктор Иванович, ст. преподаватель, Иркутский национальный исследовательский технический университет, тел.: 89148701122, e-mail: umnovvi61@rambler.ru

Ф

Фалеев Сергей Юрьевич, студент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, e-mail: serega.faleeff@yandex.ru

Фоломеев Валерий Андреевич, студент гр. МРБ-15-1, тел.: +79016657175, e-mail: folomeev.valera98@gmail.com

Х

Хвощевская Любовь Фёдоровна, программист кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89086569706, e-mail: xvlf@mail.ru

Худченко Александр Сергеевич, старший преподаватель, кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел. 89647306144, e-mail: Alex122809@rambler.ru

Харахинов Алдар Владиславович, аспирант кафедры прикладной математики, тел.: +79246547727, e-mail: comma967@gmail.com

Ходунаев Александр Юрьевич, аспирант кафедры общей и экспериментальной физики физического факультета ИГУ; инженер НИЧ ИРНИТУ, тел. 8-964-2177441; e-mail: dead7simple@gmail.com

Ч

Чоккой Владимир Захарьевич, к.т.н., доцент кафедры Летательных аппаратов и двигателей факультета Эксплуатации летательных аппаратов, тел.: 89149044086, e-mail: chiokov@mail.ru

Чернышов Даниил Алексеевич, магистрант кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, тел. 89877989169; e-mail: danil16m@mail.ru

Чеботарёв Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные, дорожные машины и гидравлические машины» тел.: 8-(902)-175-10-01

Ш

Ширькалов Владислав Андреевич, студент 2-го курса института авиационного машиностроения и транспорта, тел.: 89996848331, e-mail: vlad.shirykalov@icloud.com

Широколов Вячеслав Андреевич, студент кафедры Технология и оборудование машиностроительных производств, тел.: 89041258750, e-mail: shirokolobov.slavick@yandex.ru

Шестаков Иван Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры организации и управления в транспортных системах, тел. 89046110206, e-mail: shin63@mail.ru

Ю

Юрин Александр Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией ИДСТУ СО РАН, доцент кафедры автоматизированных систем ИрННТУ, тел.: 8(914)884-0743, e-mail: j80@yandex.ru

Я

Ямщикова Евгения Александровна, магистрант кафедры машиностроительных технологий и материалов, тел.: 89086428896, e-mail: ecosvar@mail.ru.

Научное издание

АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ

**Сборник статей
XII Международной научно-технической конференции**

(Иркутск, 27 мая – 1 июня 2019 г.)

Подписано в печать 16.05.2019. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 29,0.

Тираж 300 экз. Зак. 133. Поз. плана д/п.

Отпечатано типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83