

*На правах рукописи*



**Матлыгин Георгий Валерьевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ  
БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ  
ФРЕЗОТочЕНИЯ**

Специальность: 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

**Научный  
руководитель:**

**Савилов Андрей Владиславович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет», доцент  
кафедры «Технология и оборудование  
машиностроительных производств»

**Официальные  
оппоненты:**

**Васильков Дмитрий Витальевич**  
доктор технических наук, профессор, «Балтийский  
государственный технический университет  
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», профессор  
кафедры «Технология и производство  
артиллерийского вооружения»  
(г. Санкт-Петербург)

**Гимадеев Михаил Радикович**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Тихоокеанский государственный университет»,  
доцент кафедры «Технологической информатики и  
информационных систем» (г. Хабаровск)

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет» (г. Комсомольск-на-  
Амуре)

Защита состоится 6 июня 2024 года в 9<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул.  
Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО  
«ИРНИТУ» и на официальном сайте университета [www.istu.edu](http://www.istu.edu).

Автореферат разослан «15» апреля 2024 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью  
организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

E-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru)

Тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Анализ современных технологий изготовления осевого инструмента из быстрорежущих сталей показывает, что данный процесс может быть оптимизирован с помощью многозадачных станков, которые позволяют сосредоточить операции на одном рабочем месте. Этот метод отличается от традиционных подходов, требующих использования нескольких типов станков, таких как токарные, фрезерные, сверлильные и специализированные. Использование многозадачных станков может также сократить количество оборудования с ЧПУ (с числовым программным управлением) необходимого для производства, уменьшить площадь производственных помещений и количество персонала.

Наибольший эффект от интенсификации процессов резания получают в отраслях, где на высокопроизводительном оборудовании, изготавливаются детали из труднообрабатываемых материалов. К труднообрабатываемым материалам в инструментальном производстве относятся кобальтовые быстрорежущие стали увеличенной производительности. Лезвийный инструмент из быстрорежущей стали сегодня чрезвычайно востребован отечественной промышленностью для решения широкого спектра технологических задач, связанных с необходимостью обработки деталей машиностроения, изготавливаемых из титана, жаропрочных сплавов, нержавеющей и легированных сталей. Для обработки осевого режущего инструмента, в частности фрез, разверток, зенкеров, метчиков и т.п., применяется метод контурной обработки. Данная технология позволяет выполнять обработку поверхностей, образующих контур детали, за несколько установок заготовки. При этом возможности современного высокопроизводительного оборудования позволяют применять более прогрессивные технологии ортогонального, тангенциального, а также коаксиального фрезоточения. Указанные технологии позволяют сократить количество переустановок заготовки и снизить количество используемого в процессе обработки инструмента за счет концентрации операций точения и фрезерования на одном рабочем месте и используя только один инструмент - фрезу.

Важным фактором при выборе способов повышения качества и производительности обработки деталей является экономическая эффективность данных методов, которая позволяет снизить себестоимость готовой продукции. Это особенно важно в условиях единичного и мелкосерийного производства. Резервы повышения производительности технологического процесса изготовления осевого режущего инструмента из быстрорежущих сталей видятся в интенсификации режимов обработки и концентрации операций и инструмента на многозадачном станке.

В настоящий момент отсутствуют эффективные и широкодоступные изготовителям режущего инструмента технологические решения для повышения эффективности предварительной механической обработки осевого режущего инструмента до этапа термической обработки, которые могли бы обеспечить увеличение количества изготавливаемого инструмента в плановый период.

**Целью настоящей работы** является повышение эффективности обработки осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали за счет применения метода фрезоточения на 5-координатных многозадачных станках с ЧПУ и токарных обрабатывающих центрах с приводным инструментом.

Для достижения поставленной цели требуется решить **ряд основных задач.**

1. Разработать имитационную математическую модель ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, позволяющую прогнозировать шероховатость обработанной поверхности с учетом режимов резания. Достоверность моделирования оценить лабораторными исследованиями.

2. Установить эмпирические зависимости качества обработанной поверхности от параметров обработки при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали.

3. Выявить зависимости величины отклонения от круглости, именуемого «огранкой», формируемого при вращении заготовки в результате подачи режущего инструмента, при реализации операции ортогонального фрезоточения заготовок из быстрорежущей стали.

4. Исследовать влияние температуры в зоне резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, определить температурные зоны, позволяющие снизить критический износ инструмента, повысить его стойкость и производительность процесса.

5. Определить влияние структуры быстрорежущей стали, полученной классическим методом литья, и быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии, на ее обрабатываемость резанием.

6. Оценить эффективность использования фрезоточения в сравнении с классическим точением в технологических процессах изготовления осевого режущего инструмента.

7. Разработать технологические рекомендации по фрезоточению заготовок из быстрорежущей стали при производстве осевого режущего инструмента, направленные на достижение максимальной производительности.

**Научную новизну диссертационной работы** представляют следующие результаты:

- установленное влияние структуры быстрорежущей стали, полученной классическим методом и полученной методом порошковой металлургии на обрабатываемость резанием;

- математическая модель зависимости шероховатости поверхности при выполнении процесса ортогонального фрезоточения на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом от режимов резания. Математическая модель, в отличие от имеющихся аналогичных моделей, содержит расчет угла запаздывания и расчет мгновенного значения толщины срезаемого слоя;

- установленное влияние параметров процесса ортогонального фрезоточения на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом на температуру в зоне резания, границы возможного повышения температуры и допустимые уровни температуры при обработке быстрорежущей стали;

- закономерности, устанавливающие влияние технологических параметров процесса ортогонального фрезоточения быстрорежущих сталей на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом, на обеспечение заданного уровня точности формы и шероховатости поверхности.

Полученные в диссертационной работе результаты можно квалифицировать как решение проблемы интенсификации черновой и получистовой обработки осевого режущего инструмента.

**Теоретическая значимость работы** заключается в:

- установлении эмпирической зависимости шероховатости и точности формы обработанной поверхности от режимов резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

- определении влияния режимов резания на температуру в зоне резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали и получении аналитических выражений определения максимальных температурных полей тел, участвующих в резании;

- определении областей применения операции фрезоточения при изготовлении осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали в инструментальном производстве;

- установлении технологических параметров, позволяющих обеспечить заданный уровень точности и шероховатости при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали.

**Практическая значимость работы.** Установлены закономерности процессов ортогонального фрезоточения на операциях, представляющих собой комбинацию технологических переходов обработки осевого режущего инструмента, позволяющие интенсифицировать процессы механической обработки.

Определены закономерности реализации процесса ортогонального фрезоточения при выполнении операций и технологических переходов производства осевого режущего инструмента, позволяющие повысить эффективность механической обработки.

Установлено, что применение ортогонального фрезоточения позволяет обеспечить заданную точность, заданное качество обработанной поверхности, снижение температуры в зоне резания и снижение технологической себестоимости осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали, а учет влияния структуры быстрорежущей стали в зависимости от метода ее получения на обрабатываемость позволяет обеспечить максимальную производительность обработки.

Разработаны технологические рекомендации по выбору оборудования, режущего инструмента, средств измерения, режимов резания и стратегии обработки при ортогональном фрезоточении заготовок из быстрорежущей стали, обеспечивающие требуемые показатели точности и качества обработки деталей в условиях инструментального производства.

**Методология и методы исследования.** Работа представляет собой комплекс теоретических и экспериментальных исследований, имитационного моделирования. Исследования, выполненные в рамках работы, базируются на использовании фундаментальных положений технологии машиностроения, теории резания материалов, аналитической геометрии, линейной алгебры, многофакторного планирования эксперимента.

Теоретические исследования в предметной области выполнялись с применением теории модального анализа, математического моделирования, математической статистики и теории планирования экспериментов. Для выполнения математического моделирования исследуемого процесса использовалась интерактивная среда программирования численных расчетов и визуализации результатов MATLAB2011, наилучшим образом зарекомендовавшая себя для моделирования сложных технологических систем. Для проведения статистических расчетов и планирования эксперимента был применен пакет программного обеспечения Statistica 10.0.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях. Данные были получены на современном высокоточном оборудовании в ходе обработки заготовок из быстрорежущих сталей марок BÖHLER S390 MICROCLEAR, P6M5K5 и P6M5K5-МП на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом DMG NEF 400. Метрологическая обработка выходных параметров проводилась с использованием следующего измерительного оборудования:

– контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 для измерения шероховатости обработанной поверхности;

- тепловизионной камеры модели Flir Orion для измерения температуры в зоне обработки бесконтактным методом;
- оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 для измерения погрешности формы изделия;
- динамометра Kistler 9129AA для измерения сил резания.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. Функциональные зависимости факторов, связанных с обеспечением качества обработанной поверхности (шероховатость поверхности, «огранка», температура в зоне резания) и режимов резания для различных типов фрез (со сменными многогранными пластинами, монолитная), используемых при ортогональном фрезоточении осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали.

2. Результаты экспериментальных исследований зависимостей осевой и тангенциальной сил резания от величины подачи при обработке быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП.

3. Технологические рекомендации по определению оптимальных режимов резания, обеспечивающих заданное качество поверхности при изготовлении деталей в производственных условиях.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, обуславливается выполнением работ на современном высокоточном токарном обрабатывающем центре с применением измерительного оборудования с лицензионным программным обеспечением. Экспериментальные исследования, проведенные автором, подтверждают теоретические выкладки и математические расчеты, представленные в диссертации.

Основные положения диссертационной работы в период с 2019 по 2023 год были представлены автором в виде выступлений и докладов на 9 международных и всероссийских научно-технических конференциях. Основные положения диссертационной работы были вынесены для обсуждения на X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, 2020), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (г. Севастополь, 2021), XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, 2021), IV Международной конференции MIST: Aerospace – 2021 «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» (г. Красноярск, 2021), 6-й Дальневосточной конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого

твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2022), XII Всероссийской научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов» (от получения до утилизации) (г. Иркутск, 2022), XVI, Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (ICIE-2023) (г. Сочи, 2022); XIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием “Жизненный цикл конструкционных материалов” (от получения до утилизации) (г. Иркутск, 2023); XVI Международной научно-практической конференции по авиамашиностроению - International Conference on Aviation Engineering (г. Иркутск, 2023).

Результаты работы представлены в 11 публикациях. В том числе в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 3 статьи, в международном издании, индексируемом в базе Scopus, 2 статьи.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** включает в себя аннотацию содержания работы, обоснование актуальности проблемы влияния технологических режимов ортогонального фрезоточения на качество поверхности. Приведены научная и практическая ценность и положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** представлен детальный анализ метода обработки фрезоточением, а также описаны практические примеры его применения на основе соответствующих исследований. Основоположниками теоретических обоснований процесса являлись следующие отечественные и зарубежные исследователи: А.И. Каширин, Г.И. Грановский, А.О. Этин, O'Brien, Braiden P., Dugdale D. В работах по сравнению процесса фрезоточения с классическим точением принимали участие исследователи: Weber H., Jiang Z.H., Корас J., Pogacink M., Yong S.K., Sorge H.P.. Исследователи изучавшие образование стружки, силы резания, шероховатости поверхности, температуры в зоне резания и износа инструмента: Filho J., Pogacink M., Корас J., Choudhury S.K., Mangrulkar K.S. Jia C.D., Jiang Z.H., Sabahudin E., Savas V., Ozay C., Skoric S, Udiljak T., Ciglar D., Hiroyuki S., She C.H., Huang C.W., Kriangkrai W., Bohez E-L.J. и другие. Исследователи нашедшие практическое применение метода фрезоточения в обработке изделий из конструкционных сталей и цветных сплавов: Ozay C., Savas V., Jin C.Z., Блохин Д.А., Chen E.T., Zhu L.D., Li.H., Кольцов А.Г., Yang J.Y., Селиванов А.Н., Umut K., Mustafa B., Степаненко А.В., Erhan B., Budak E., Çomak A., Öztürk E, Uysal E. Грязев М.В. и другие. Также производились исследования формообразования резьбы методом фрезоточения следующими исследователями: Куликов М.Ю., Лашнев С.И., Ямников А.С., Ямникова О.А. Разработаны фрезы



специальной конструкции, в частности дисковой и винтовой конструкций. Представлены как достоинства, так и недостатки процесса. Рассмотрены современные сплавы, применяемые в инструментальном производстве при изготовлении режущего инструмента. Приведены типовые изделия и их конструктивные элементы, изготавливаемые из быстрорежущей стали в инструментальном производстве (рисунок 1).



Рисунок 1 – Типовые изделия из быстрорежущей стали

В главе представлен краткий обзор аспектов применения технологии фрезоточения в инструментальном производстве. Кроме того, в этой главе также дается обзор рынка быстрорежущей стали, с особым акцентом на конструктивные особенности изделий, изготовленных из этого типа материала.

**В рамках второй главы** для повышения эффективности процесса обработки разработаны и адаптированы динамические и статические математические модели ортогонального фрезоточения, разработанные для исследования влияния технологических режимов резания (подача на зуб  $S_z$ , мм/зуб; глубина резания  $t$ , мм; осевая ширина фрезерования  $B_{oc}$ , мм; скорость резания  $v$ , м/мин; частота вращения заготовки  $n_{заг}$ , об/мин; частота вращения инструмента  $n_{и}$ , об/мин) на качество поверхности (шероховатость поверхности  $Ra$ , мкм; отклонение формы типа «огранка»  $e_{с max}$ , мм) и температуру в зоне резания ( $T$ , °C). Также разработаны модели сил резания ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $H$ ) для исследования обрабатываемости быстрорежущих сталей. На рисунке 2 представлена схема ортогонального фрезоточения.

Входными параметрами для динамической модели ортогонального фрезоточения являются: осевая ширина резания  $B_{oc}$ , глубина резания  $t$ , подача  $S_z$ , частота вращения заготовки  $n_{заг}$ , частота вращения инструмента  $n_{и}$ , постоянные коэффициенты сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ . Выходными параметрами программы является шероховатость поверхности  $Ra$ . Математическая модель описывается тремя связанными между собой основными алгоритмами, расчета сил резания, расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя, и алгоритма расчета угла запаздывания. Схема регенерации поверхности приведена на рисунке 3.

Для оценки обработанной поверхности необходимо определить

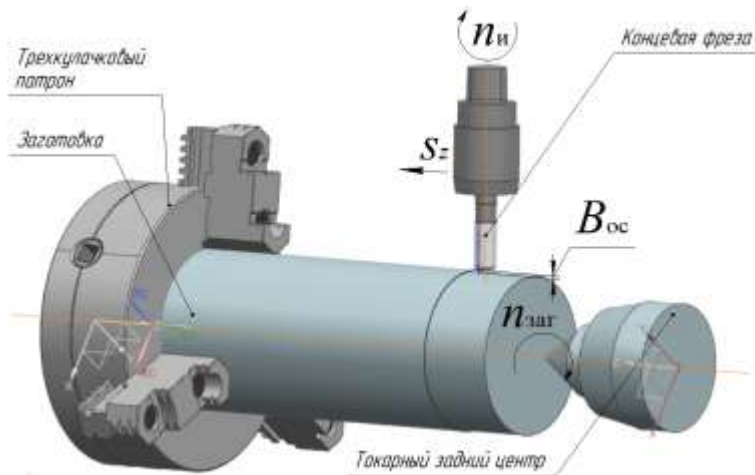


Рисунок 2 – Схема ортогонального фрезоточения



Рисунок 3 – Схема регенерации поверхности

мгновенное значение толщины срезаемого слоя в процессе обработки. Толщина срезаемого слоя меняется на каждом резе от нуля до максимума, а затем снова до нуля, что характерно для процесса фрезерования. При расчете этого параметра учитываются регенеративные вибрации. Их влияние на поверхность описывается на схеме, изображенной на рисунке 4.

В связи с тем, что в процессе фрезерной обработки поверхности в зоне режущей кромки инструмента происходят регенеративные вибрации, а также учитывая, что инструмент имеет угол наклона винтовой линии, точка на поверхности режущей кромки  $\kappa_i^{j+1}$  отстает от точки на предыдущем шаге  $\kappa_{i-dT}^{*j}$  вдоль оси инструмента, то есть имеет запаздывание.

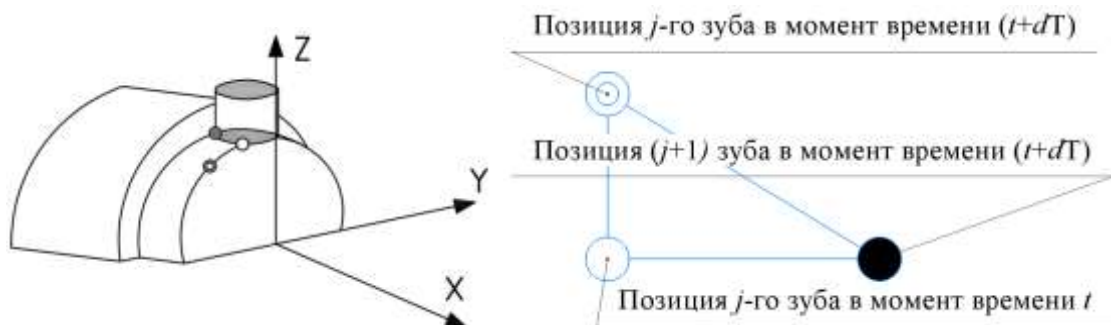


Рисунок 4 – Положения зубьев ( $j, j + 1$ ) в момент времени ( $t, t + dT$ )

На рисунке 5 изображен процесс запаздывания режущей кромки, где  $\kappa_i^{j+1}$  – положение зуба в момент времени  $i$ ;

$\kappa_{i-dT}^{*j}$  – обновленная точка траектории после зуба  $j$  в момент времени  $i-dT$ ;

$\alpha_i$  – фазовый угол между положениями зубьев  $\kappa_i^{j+1}$  и  $\kappa_{i-dT}^{*j}$ .

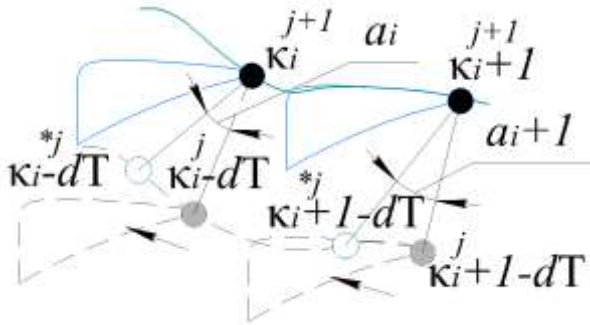


Рисунок 5 – Схема запаздывания зуба фрезы

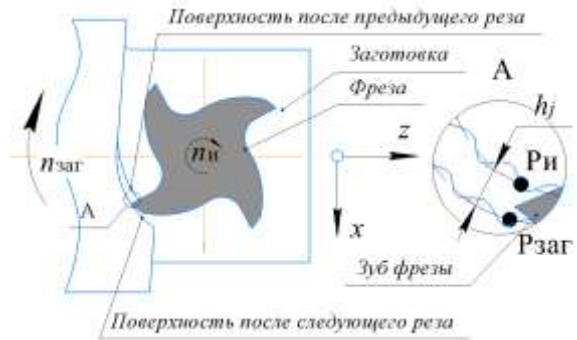


Рисунок 6 – Схема определения толщины срезаемого слоя

Общая величина запаздывания при регенерации поверхности рассчитывается по формуле:

$$\tau_{j,i} = \frac{\alpha_i \cdot Z \cdot dT}{2 \cdot \pi} + dT, \quad (1)$$

где  $dT$  – период врезания зуба.

Для расчета сил резания необходимо также определить мгновенное положение зуба фрезы и величину срезаемого слоя  $h_j$ , где  $P_i$  и  $P_{заг}$  – сила порождаемая работой инструмента и сила совершаемая во время вращения заготовки (рисунок 6).

Мгновенное значение угла  $j$ -ого зуба определяется по формуле:

$$\phi_j(Z) = \phi + (j - 1)\phi_p - \psi(Z), \quad (2)$$

где  $\phi_p = \frac{2 \cdot \pi}{z}$  – угол одного зуба фрезы;

$$\psi(Z) = \frac{z \cdot \tan \beta(Z)}{R} - \text{угол запаздывания};$$

где  $\beta(Z)$  – угол наклона канавки на глубине  $z$ ;

$\phi$  – угол поворота инструмента.

Толщина срезаемого слоя определяется по формуле:

$$h_j(\phi_j, Z) = \frac{\phi_p}{2 \cdot \pi \cdot n_i} f_t(Z). \quad (3)$$

Мгновенное значение толщины срезаемого слоя  $h$  в момент времени  $t$  складывается из статической  $h_j^s$  и динамической величины  $h_j^d$ , приведенных в формуле:

$$h(t) = h_j^s(\phi_j, t) + h_j^d(\phi_j, t), \quad (4)$$

Модель, предложенная Altintas, взята за основу для адаптации под формулы, которые описывают в общем виде каждую составляющую сил резания в радиальном, тангенциальном и аксиальном направлениях соответственно:

$$dP_r(\phi_j, Z) = k_{rc} h_j(\phi_j, Z) dZ + k_{re} dS, \quad (5)$$

где  $k_{rc}$  – коэффициент радиальной силы резания;

$k_{re}$  – коэффициент радиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

$$dP_t(\phi_j, Z) = k_{tc} h_j(\phi_j, Z) dZ + k_{te} dS, \quad (6)$$

где  $k_{tc}$  – коэффициент тангенциальной силы резания;

$k_{te}$  – коэффициент тангенциальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

$$dP_a(\phi_j, Z) = k_{ac}h_j(\phi_j, Z)dZ + k_{ae}dS, \quad (7)$$

где  $k_{ac}$  – коэффициент аксиальной силы резания;

$k_{ae}$  – коэффициент аксиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Результаты расчетов по модели позволяют построить микрогеометрию обработанной поверхности. Поверхность на рисунке 7 представляет собой цилиндр после обработки торцом фрезы с радиусом сопряжения (радиус режущей кромки фрезы) и торцевой поверхности (снятый боковой частью фрезы). На рисунке 7 на виде А изображен обработанный слой материала в виде треугольников, из вида Б можно сделать вывод о том, что материал снят не полностью, а обработанная поверхность имеет отклонение формы – «огранку».

Параметры резания были вычислены с использованием метода имитационного моделирования, а затем экспериментально проведена проверка адекватности разработанных моделей.

На рисунке 8 представлен микропрофиль, рассчитанный в Matlab при ортогональном фрезоточении заготовки из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП диаметром  $\varnothing 100$  мм концевой твердосплавной фрезой диаметром  $D = 16$  мм с четырьмя зубьями.

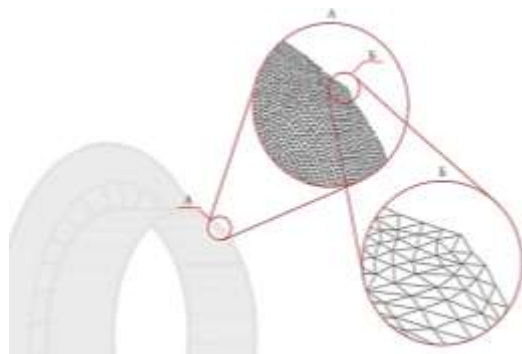


Рисунок 7 – Результаты моделирования поверхности

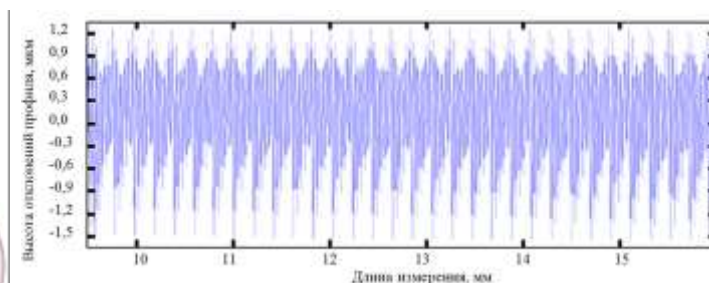


Рисунок 8 – Рассчитанный микропрофиль обработанной поверхности

Учитывая кинематику процесса ортогонального фрезоточения, врезание должно происходить в радиальном направлении, при этом скорость вращения заготовки должна соответствовать подаче на зуб, рекомендованной для используемого инструмента. Данное условие позволяет учитывать возможности инструмента и оборудования при выборе оптимальной частоты вращения заготовки.

При моделировании шероховатости поверхности при ортогональном фрезоточении использовалась интерактивная среда программирования и

визуализации результатов Matlab, зарекомендовавшая себя наилучшим образом при моделировании сложных технических систем.

Анализ результатов проведенных работ по математическому моделированию процесса фрезоточения позволил установить следующее.

1. Разработанная динамическая математическая модель позволяет отобразить и определить геометрические параметры обработанной поверхности при снятии технологического припуска каждым зубом фрезы. Ее применение позволяет прогнозировать состояние поверхности при ортогональном фрезоточении и отражает общую картину процесса резания.

2. Алгоритм расчета мгновенной толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при ортогональном фрезоточении разработан на основе математических моделей, используемых механизм запаздывания, который проявляется в результате регенерации поверхности. Алгоритм учитывает геометрические параметры режущего инструмента, что обеспечивает высокую точность и качество обработки поверхности изделия.

3. Основным преимуществом разработанных статических матмоделей является возможность своевременного выявления факторов, влияющих на качество поверхности (шероховатость и «огранку»), температуру в зоне резания, а также сил резания с последующей статистической обработкой информации, что позволяет технологу без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований в производственных условиях назначить оптимальные параметры процесса обработки и режимы ортогонального фрезоточения.

**В третьей главе** для проверки адекватности разработанных математических моделей представлена методика проведения экспериментальных исследований, а также определены режущие инструменты, средства измерения, заготовки, оборудование и средства технологического оснащения. Для выбранных режущих инструментов назначены режимы резания. По результатам подготовительных работ для осуществления экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы:

- в качестве объекта исследования определен технологический процесс механообработки инструмента из быстрорежущей стали, реализуемый на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 с приводными блоками;

- для проведения эксперимента выбран токарный обрабатывающий центр, обладающий высокой точностью, а приводные блоки, позволяют производить обработку концевыми фрезами перпендикулярно к оси детали с возможной частотой вращения инструмента  $n_n$  до 4500 об/мин, что позволяет выполнить полноценную реализацию кинематической схемы ортогонального фрезоточения;

– в качестве материала заготовок выбраны стали марок Böhler S390 MICROCLEAN, P6M5K5-МП, полученные методом порошковой металлургии; сталь марки P6M5K5, полученная обычным методом. Выбор марок материала определен на основе потребностей реального инструментального производства, что обеспечивает практическую значимость проводимого исследования;

– в ходе проведения анализа режущего инструмента определено, что высокую эффективность при выполнении операции ортогонального фрезоточения могут обеспечить: фреза для обработки прямоугольных уступов Sandvik Coromant CoroMill R390 диаметром  $D = 20$  мм, оснащенная тремя сменными многогранными пластинами; монокристаллическая твердосплавная радиусная фреза YG-1 GMG19910  $D = 12$  мм; монокристаллическая твердосплавная фреза ФКЦ 4321  $D = 16$  мм;

– предложенная методика применения измерительного оборудования позволяет обеспечить точностной анализ геометрических параметров деталей и параметров микрогеометрии их поверхностного слоя.

**В четвертой главе** на базе разработанных и адаптированных к исследуемому процессу ортогонального фрезоточения математических моделей по методике, представленной в третьей главе, проведены экспериментальные исследования по определению влияния технологических режимов резания на качество обработанной поверхности: шероховатость (рисунок 9, 10), отклонение формы типа «огранка» (рисунок 11), температуру в зоне резания (рисунок 12), а также проведено исследование влияния сил резания на обрабатываемость быстрорежущих сталей полученных методом классического литья и методом порошковой металлургии.

Экспериментальные исследования позволили сделать ряд выводов: зависимость шероховатости от глубины резания  $t$  имеет линейный характер в диапазоне  $t = 0,8..2$  мм, приобретая гиперболический характер при увеличении  $t$  от 2 до 3,2 мм (рисунок 9а, 9б), при увеличении  $t$  растет производительность обработки, в данном случае в 1,6 раза, при этом шероховатость находится в пределах  $Ra=3,2..3,5$  мкм, что соответствует установленным требованиям к качеству поверхности при чистовой обработке, при изменении скорости резания  $v_c$  наблюдается параболическая зависимость от уровня шероховатости поверхности (рисунок 10), максимумы которой достигаются в диапазоне скоростей резания 90..95 м/мин.

Последнее объясняется тем, что на режущей кромке инструмента в этом диапазоне скоростей резания возникает эффект нароста материала, что и приводит к увеличению шероховатости поверхности.

В результате проведенного исследования «огранки» (рисунок 11) было определено, что наибольшее влияние на «огранку» оказывает глубина резания  $t$  при значениях  $t$  больших, чем 2,5 мм. Следует



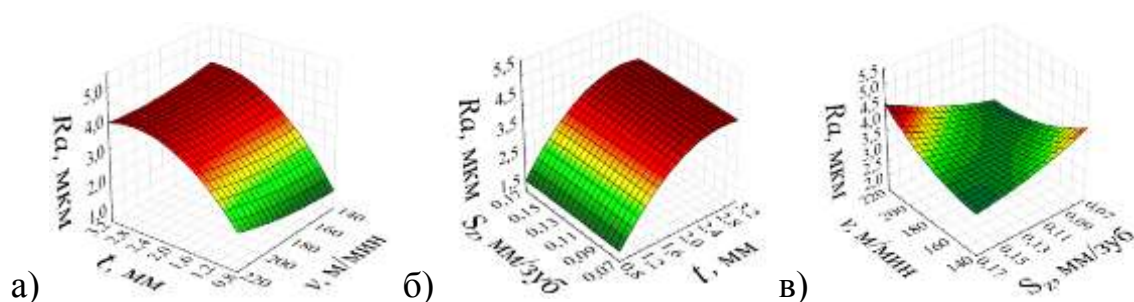


Рисунок 9 – Зависимости отклонения параметра шероховатости  $Ra$  (фреза со сменными многогранными пластинами): а – от скорости резания  $v$  и глубины резания  $t$ ; б – от подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$ ; в – от подачи инструмента  $S_z$  и скорости резания  $v$

учитывать, что при увеличении  $t$  свыше половины диаметра инструмента могут возникнуть вибрация, что приведет к повышенному износу режущей кромки.

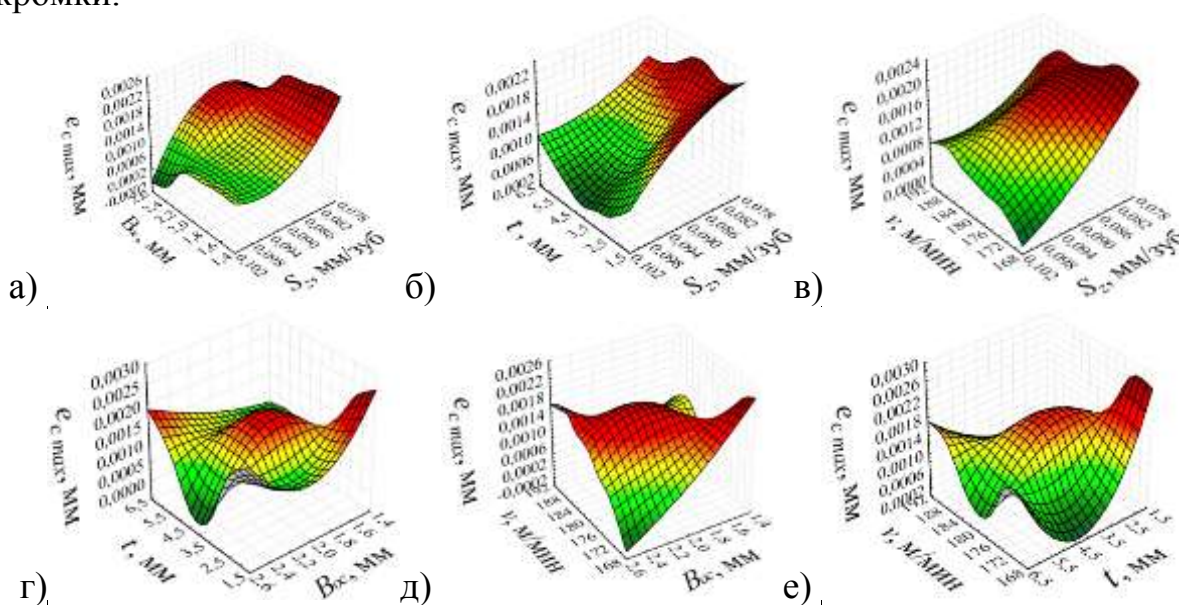


Рисунок 10 – Зависимости отклонения параметров высоты пика «огранки»  $e_{c\ max}$ : а – от осевой ширины фрезерования  $B_{oc}$  и подачи на зуб  $S_z$ ; б – от глубины резания  $t$  и подачи на зуб  $S_z$ ; в – от скорости резания  $v$  и подачи на зуб  $S_z$ ; г – от глубины резания  $t$  и осевой ширины фрезерования  $B_{oc}$ ; д – от скорости резания  $v$  и осевой ширины фрезерования  $B_{oc}$ ; е – от скорости резания  $v$  и глубины резания  $t$

В результате анализа зависимостей температуры в зоне резания от режимов резания (рисунок 12) сделаны следующие выводы:

- температурные поля поверхности обрабатываемой детали и инструмента имеют одинаковый характер и линейную зависимость;
- при увеличении продолжительности действия теплового источника температура инструмента приближается к максимальному значению;

– большая часть тепла, выделяемого при резании, рассеивается в срезаемые слои металла и не оказывает существенного влияния на формирование поверхностного слоя детали.

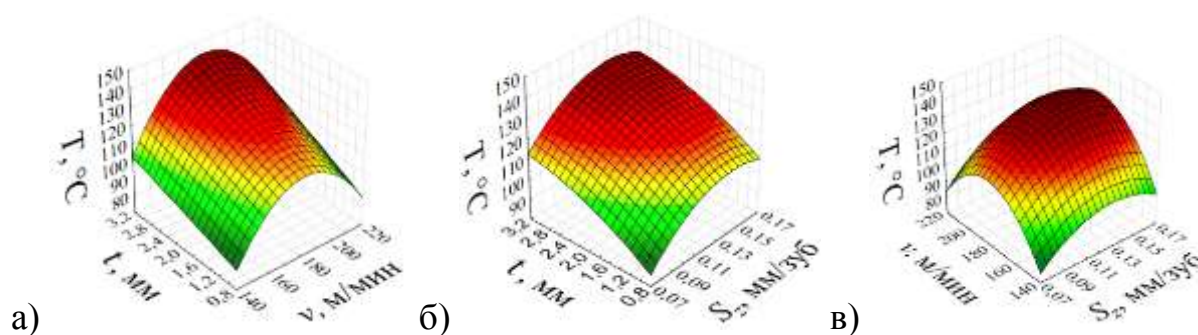


Рисунок 11 – Зависимости отклонения параметров температуры  $T^{\circ}\text{C}$ :  
 а – от скорости резания  $v$  и глубины резания  $t$ ; б – от подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$ ; в – от подачи инструмента  $S_z$  и скорости резания  $v$

Результаты анализа графиков и полученных коэффициентов сил резания позволяют сделать заключение о том, что при обработке стали Р6М5К5, полученной методом литья силы резания меньше, чем при обработке стали Р6М5К5-МП, полученной порошковым методом. Это относится как к осевому, так и тангенциальному направлению сил резания. При увеличении подачи уменьшается различие между силами резания, а при подаче равной 0,2 мм/об разницы между силами практически нет. При подаче равной 0,1 мм/об зафиксирована максимальная разница. Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что полученную литьем сталь более эффективно обрабатывать резанием, при ее обработке можно использовать более высокие режимы резания, чем при обработке порошковой быстрорежущей стали Р6М5К5-МП. Следует отметить, что у таких сталей схожий химический состав, разница в содержании некоторых легирующих элементов, минимальная составляет не более 5%.

На основе проведенных исследований разработаны технологические рекомендации по применению операции ортогонального фрезоточения в инструментальном производстве.

По результатам проведенного комплекса экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы:

– экспериментальные данные подтвердили адекватность математических моделей, предназначенных для оценки влияния параметров обработки и глубины резания на шероховатость поверхности. Результаты моделирования могут использоваться для определения рациональных режимов резания, обеспечивающих требуемое качество поверхности при производстве осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали в инструментальном производстве;

– исследования проводились в соответствии с трехфакторными и четырехфакторными планами, которые позволяют определить



взаимодействие факторов при помощи меньшего количества экспериментов и дает возможность определить наилучшее сочетание технологических параметров для достижения заданных значений точности формы и шероховатости;

– при использовании монолитной концевой фрезы с заданными режимами резания удалось достигнуть шероховатости поверхности не выше  $Ra = 1,09$  мкм без сокращения производительности процесса. Это качество поверхности можно считать удовлетворительным по сравнению с поверхностью, полученной с помощью фрезы со сменными многогранными пластинами;

– установлены закономерности изменения температуры в зоне резания в зависимости от режимов резания. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на температуру оказывает глубина резания. При увеличении глубины резания происходит значительный рост температуры. Изменение подачи незначительно влияет на рост температуры. Тем не менее, при увеличении подачи происходит рост температуры, который замедляется при работе на подачах  $S_z = 0,13..0,17$  мм/зуб. Установлено неоднозначное влияние скорости резания на температуру. Зафиксированы экстремальные значения температуры при скорости  $v$  резания 170 м/мин. Подтвержден прерывистый характер резания, при переходе режущей кромки. При смене режущей кромки происходит скачкообразное изменение температуры. Достигнутая в ходе экспериментов по фрезоточению максимальная температура резания значительно ниже температуры, возникающей при обычном точении быстрорежущей стали, что позволяет интенсифицировать режимы резания;

– определено влияние составляющих подачи инструмента, таких как собственно минутная подача фрезы и подача, определяемая частотой вращения заготовки на формирование «огранки» поверхности. Достигнутое в ходе проведения работ максимальное значение находится в пределах 0,002 мм, что является удовлетворительным результатом, так как соответствует 3 степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения по ГОСТ 24643-81. Установлено, что оптический профилометр является эффективным средством измерения «огранки», позволяющим получить объективные результаты с минимальной трудоемкостью;

– установлено, что быстрорежущая сталь, полученная литьем, имеет лучшую обрабатываемость резанием, чем сталь аналогичной марки, полученная методом порошковой металлургии, структура материала оказывает влияние на процесс лезвийной обработки, что требует корректировки режимов резания для каждой марки быстрорежущей стали в зависимости от структуры материала с целью обеспечения высокой производительности процесса резания.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований в рамках диссертационной работы проанализированы основные технологические параметры процесса ортогонального фрезоточения, влияющие на точность формы и качество поверхности. Научные выводы и практические результаты вносят вклад в развитие отечественного инструментального производства и представлены:

1. Алгоритмом и математической моделью, учитывающей:
  - взаимное расположение режущих кромок и обрабатываемой поверхности с учетом одновременного вращения инструмента и заготовки;
  - упругие перемещения инструмента в момент вхождения зуба фрезы в обрабатываемый материал;
  - переменную толщину срезаемого слоя при вхождении зуба в заготовку и возникающие при этом регенеративные вибрации при резании;

Применение адаптированной математической модели процесса ортогонального фрезоточения позволяет прогнозировать микрогеометрию обработанной поверхности.

2. Математической моделью и разработанной программой для выполнения численных расчетов в среде MatLab, позволяющим прогнозировать микрогеометрию поверхности при ортогональном фрезоточении быстрорежущих сталей при изменяющихся режимах резания и геометрические параметры получаемых деталей. Программа зарегистрирована, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669839.

3. Установленными зависимостями влияния параметров резания на шероховатость и «огранку» поверхности, а также на температуру в зоне резания при обработке быстрорежущей стали ортогональным фрезоточением. Полученные функциональные зависимости могут использоваться в качестве удобного инструментария для прогнозирования выходных параметров в процессе назначения режимов резания.

4. Зависимостями «огранки» поверхности от подачи инструмента и частоты вращения заготовки, что позволяет назначать режимы резания, гарантирующими получение минимальных высот пика огранки.

5. Обоснованием применения при фрезоточении фрез, оснащенных сменными пластинами, как наиболее эффективным инструментом обеспечения операции при условии правильного выбора режущей геометрии и корректно установленного положения фрезы относительно заготовки, позволяющих уменьшить погрешность формы и достичь требуемой шероховатости поверхности.

6. Полученными в работе результатами, позволяющими определить технологические операции, используемые при механообработке осевых режущих инструментов из быстрорежущих сталей, в которых фрезоточение может дать наибольший технико-экономический эффект.

7. Доказательством в лабораторных и производственных условиях факта рациональности использования ортогонального фрезоточения, позволяющего повысить производительность резания по сравнению с классическим точением на 17,3%.

8. Разработанными технологическими рекомендациями по ортогональному фрезоточению быстрорежущей стали, позволяющими выполнять обработку достигая шероховатости поверхности не более  $Ra = 1,09..1,74$  мкм, которые содержат требования к оборудованию, средствам технологического оснащения, режущему инструменту, а также к траектории его пути. Приведенные режимы резания, позволяют без потери производительности получить установленную шероховатость поверхности.

*Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.*

Рекомендуется продолжение исследований в направлении изучения контактных процессов в зоне резания и процесса формирования стружки. Также следует исследовать влияние геометрических параметров режущего инструмента, варьирование переднего угла  $\gamma$ , а также взаимного варьирования заднего  $\alpha$  и переднего  $\gamma$  углов режущей кромки.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Матлыгин, Г.В.** Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов / **Г.В. Матлыгин**, А.В. Савилов, Т.В. Зарак // *iPolytech Journal*. – 2020. – № 24(3). – С. 498–513.
2. **Матлыгин, Г.В.** Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с ЧПУ / **Г.В. Матлыгин**, А.В. Савилов, А.Ю. Николаев, С.А. Тимофеев // *Научные технологии в машиностроении*. – 2023. – № 7(145). – С. 15–23.
3. Матлыгин, Г.В. Исследование влияния режимов резания на выходные параметры при точении фрезерованием быстрорежущей стали / **Г.В. Матлыгин**, А.В. Савилов, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 99–106.

*Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus*

4. **Matlygin, G.** The Impact of Cutting Modes on the Output Turn-Milling Parameters for High-Speed Steel / **G. Matlygin**, A. Savilov, A. Pyatykh, S. Timofeev // *Key Engineering Materials*. – 2022. – No. 910. – P. 129–137.
5. **Matlygin, G.** Effect of cutting parameters on temperature in the cutting zone in a high-speed steel turn-milling process / **G. Matlygin**, A. Savilov, A. Pyatykh, S. Timofeev // *Journal of Physics: Conference Series 2373*. – 2022. 032009.

*Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ*

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669839, Российская Федерация. Программа расчета микрогеометрии поверхности при ортогональном точении-фрезерованием: № 2023668394: заявл. 06.09.2023 : опубл. 21.09.2023 / А. Ю. Николаев, **Г. В. Матлыгин**, А. В. Савилов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

*Другие публикации*

7. **Матлыгин, Г.В.** Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов / **Г.В. Матлыгин** // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)». – 2020. – С. 141–145.

8. **Матлыгин, Г.В.** Технологическое обеспечение качества изготовления концевых фрез из быстрорежущей стали на многооперационном станке / **Г.В. Матлыгин** // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)». – 2021. – С. 153–157.

9. **Матлыгин, Г.В.** Исследование влияния режимов резания на выходные параметры при точении фрезерованием быстрорежущей стали / **Г.В. Матлыгин** // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2022. – № 5(61). – С. 88–91.

10. **Матлыгин, Г.В.** Технологические аспекты применения точения фрезерованием при изготовлении режущих инструментов / **Г.В. Матлыгин**, А.В. Савилов, А.С. Пятых, В.А. Ушаков // Вестник современных технологий. – 2022. – № 1(25). – С. 16–22.

11. Савилов, А.В. Исследование обрабатываемости резанием быстрорежущей стали. / А.В. Савилов, С.А. Тимофеев, **Г.В. Матлыгин**, В.А. Ушаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, – № 1. – С. 14–18.

12. **Матлыгин, Г.В.** К вопросу обеспечения качества поверхности при точении фрезерованием / **Г.В. Матлыгин**, А. В. Савилов, С.В. Алферов // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2023. – С. 21–24.

Подписано в печать 21.03.2024. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Зак. 16. Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83