



Акционерное общество
"Ульяновский научно-исследовательский институт
авиационной технологии и организации производства"
АО "Ульяновский НИАТ")
ИНН 7328049049 КПП 732801001
432010 г. Ульяновск, ул. Врача Михайлова, 34
тел./факс (8422) 55-13-48, 55-02-82, 52-46-81, 52-00-11, 52-67-47, 52-53-76
E-mail: info@ulniat.ru www.ulniat.ru



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
доктор технических наук

Марковцев В. А.

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Минаева Николая Владимировича

«Совершенствование технологии формообразования оребрѐнных
панелей раскаткой роликами и дробеударной обработкой»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности
2.5.6. – «Технология машиностроения»

Актуальность темы диссертационного исследования

В современных условиях развития авиационной, ракетно-космической и судостроительной отраслей машиностроения наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения крупногабаритных монолитно-фрезерованных панелей сложной пространственной конфигурации с продольным оребрением. Использование данных деталей позволяет существенно повысить прочностные характеристики изделий при одновременном снижении их массы.

Особую технологическую сложность представляет процесс формообразования длиномерных панелей двойной кривизны. Существующая на большинстве отечественных предприятий технология гибки на прессах с ручным управлением характеризуется значительной трудоѐмкостью, нестабильностью получаемых результатов и высокой зависимостью от квалификации производственного персонала, что не позволяет в полной мере обеспечить требуемую точность геометрических параметров готовых изделий.

Перспективным направлением решения данной проблемы является применение комбинированной технологии, объединяющей операции дробеударного формообразования (ДУФ) и раскатки роликами (РР) рёбер панелей. Данный подход обеспечивает разделение сложного процесса формообразования на независимые и управляемые операции: ДУФ формирует поперечную кривизну, а РР — продольную кривизну с одновременной компенсацией деформаций, возникающих при дробеобработке.

Сравнительный анализ технологических методов показывает, что процесс раскатки роликами обладает значительными преимуществами перед традиционной прессовой гибкой. К числу таких преимуществ относятся отсутствие эффекта пружинения, широкий диапазон регулирования технологических режимов, возможность формообразования деталей практически неограниченных размеров с использованием компактного оборудования, а также высокая стабильность получаемых результатов. Тем не менее, широкое внедрение данной технологии в производство сдерживается отсутствием специализированного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Существующие расчётные методы, базирующиеся на использовании эмпирических коэффициентов, характеризуются необходимостью проведения значительного объёма дорогостоящих экспериментальных исследований на конструктивно-подобных образцах, что существенно ограничивает их практическую применимость в производственных условиях.

Диссертационная работа Минаева Н.В. направлена на решение комплекса научно-технических задач, связанных с совершенствованием технологического процесса формообразования крупногабаритных монолитно-фрезерованных панелей с продольным оребрением на основе комбинированного метода, сочетающего раскатку роликами и дробеударное формообразование, что определяет актуальность выполненного исследования.

Содержание диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 110 наименований и приложений. Общий объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста, включая 104 рисунка и 24 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, выполнен анализ современного состояния научной проблемы, сформулированы цель и задачи работы, изложены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу конструктивных и технологических особенностей монолитно-фрезерованных панелей. Рассмотрены существующие способы их формообразования и применяемое оборудование. Проведен обзор теоретических и экспериментальных исследований в области процессов раскатки рёбер роликами и дробеударного формообразования. На основе выполненного анализа обоснованы цель и задачи исследования.

Вторая глава содержит результаты конечно-элементного моделирования операций комбинированного процесса формообразования панелей, включающего операции ДУФ и РР. С целью определения исходных данных для расчета режимов РР выполнено моделирование процесса ДУФ на конструктивно-подобном образце (КПО) участка панели. Это позволило оценить величину нежелательной продольной кривизны детали, возникающей при ДУФ и подлежащей последующей компенсации при РР.

Моделирование процесса РР на плоских образцах (пластинах) дало возможность исследовать напряженно-деформированное состояние материала. Установлено, что в результате раскатки в материале формируются остаточные сжимающие напряжения, что оказывает положительное влияние на его усталостную долговечность и ресурсные характеристики. Достоверность разработанных моделей подтверждена сопоставлением расчетных данных с экспериментальными результатами, а именно с эпюрами остаточных напряжений, полученными механическим методом полосок.

В ходе исследования обоснована возможность применения методики расчета формоизменения деталей при РР путем нагружения эквивалентной растягивающей силой. Основным ограничением данного подхода выступает требование полного геометрического подобия между моделируемым образцом и реальной деталью. Кроме того, доказано, что взаимовлияние соседних ребер при последовательной раскатке становится существенным лишь при различии их стрел прогиба более чем в два раза.

На основе полученных результатов моделирования предложена методика определения параметров процесса РР для расчетных участков (РУ) деталей, включающих одно ребро с прилегающими зонами полотна, ширина которых принимается равной расстоянию до соседнего ребра либо до края детали.

Третья глава посвящена экспериментально-теоретическому исследованию технологического процесса формообразования панелей в последовательности РР-ДУФ. Технологические режимы РР определены с использованием двух основных зависимостей: тарировочного уравнения, связывающего глубину внедрения роликов с регулировочными параметрами оборудования и деформационного уравнения в виде зависимости величины прогиба расчетных участков от глубины внедрения роликов.

Предложенный подход позволяет отказаться от трудоемкого эмпирического метода, требующего изготовления дорогостоящих конструктивно-подобных образцов, и перейти к прямому расчету технологических параметров. Для этого предложено применять специализированные базы данных, сформированные на основе результатов конечно-элементного моделирования и экспериментальной обработки дешевых образцов-пластин.

Достоверность разработанной методики подтверждена экспериментальными исследованиями процесса формообразования КПО панелей с ребрами прямоугольного и Г-образного сечений в технологическом сочетании РР-ДУФ.

Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует о корректности предложенных теоретических положений.

Четвертая глава посвящена практической реализации результатов исследования. Представлена инженерная методика расчета технологических параметров процесса РР при формообразовании панелей в последовательности РР-ДУФ. Методика базируется на конечно-элементном моделировании с использованием исходных данных: электронной геометрической модели детали, результатов моделирования процесса ДУФ, а также тарировочных и деформационных уравнений.

Результатами расчета являются режимы и условия выполнения операции РР, включая положение роликов относительно ребра, давление в гидросистеме и длину зоны обработки. На этой основе формируется управляющая программа обработки детали на установке с ЧПУ.

Приведено описание конструктивного решения специализированной установки с ЧПУ, разработанной для реализации процесса раскатки роликами.

Сформулированы технологические рекомендации по внедрению процесса формообразования панелей с использованием комбинированной технологии РР-ДУФ на оборудовании с ЧПУ, обеспечивающей повышение производительности и точности изготовления деталей.

Основные результаты и научная новизна.

Научная новизна работы, сформулированная соискателем, не вызывает сомнений. Достигнутые результаты являются значимыми. Наиболее значимыми результатами следует признать:

1. Установлены закономерности взаимного влияния соседних продольных ребер в процессе их последовательной раскатки роликами, на основе чего обоснована возможность определения технологических параметров обработки для элементарных расчётных участков, рассматриваемых как независимые.

2. Разработана конечно-элементная модель процесса раскатки роликами, позволяющая исследовать закономерности формирования напряжённо-деформированного состояния материала в зоне контакта с роликами. Достоверность результатов моделирования подтверждена сопоставлением расчётных данных с экспериментальными эпюрами остаточных напряжений, полученными механическим методом с использованием установки УДИОН-2.

3. Предложена расчётная модель управления процессом раскатки роликами, основанная на тарировочных зависимостях, связывающих настроечные параметры технологического оборудования с глубиной внедрения деформирующих роликов.

4. Создан специализированный программный комплекс, автоматизирующий расчёт технологических параметров и генерацию управляющих программ для оборудования с ЧПУ, реализующего процесс раскатки роликами.

Степень достоверности и апробация работы.

Актуальность темы, а также предмет и объект исследования обоснованы автором на основе всестороннего анализа и систематизации литературных данных по рассматриваемой проблематике.

Разработанные в диссертации расчётные модели базируются на применении метода конечных элементов, широко апробированного и зарекомендовавшего себя в инженерной практике. Достоверность и адекватность предложенных моделей подтверждены результатами экспериментальных исследований, выполненных на конструктивно-подобных образцах, максимально приближённых к натурным деталям, в производственных условиях. Экспериментальные данные получены с применением современного сертифицированного оборудования и аттестованных методик измерений.

Сформулированные в работе выводы являются обоснованными: они опираются на фундаментальные научные положения, результаты численного моделирования и комплекс экспериментальных исследований. Принятые при построении моделей допущения не вносят существенных погрешностей и не оказывают критического влияния на конечные результаты. Корректность заимствования результатов других авторов подтверждена наличием соответствующих библиографических ссылок.

Связь работы с производственными задачами и апробация результатов.

Результаты диссертационного исследования получены в рамках выполнения договорных работ по заказу филиала АО «Ил» – Авиастар (г. Ульяновск), что свидетельствует об их практической значимости и востребованности в авиастроительной отрасли.

Основные положения и результаты работы прошли апробацию на научных конференциях различного уровня, включая международные. По теме диссертации опубликовано 15 научных статей, в которых отражены основные результаты исследования.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана комплексная методика расчёта технологических параметров процесса формообразования монолитно-фрезерованных панелей двойной кривизны с продольным оребрением, базирующаяся на рациональном сочетании операций раскатки рёбер роликами и дробеударного формообразования. Практическая реализация предложенной методики совместно с применением автоматизированного технологического оборудования позволяет существенно повысить эффективность изготовления панелей сложной пространственной формы.

Значимым практическим результатом работы является создание и внедрение в производство специализированной установки с ЧПУ для формообразования и правки подкреплённых деталей методом раскатки роликами, что подтверждает высокую степень технологической готовности разработанных решений. Полученные

результаты могут быть тиражированы на предприятиях машиностроительного профиля, выпускающих крупногабаритные панели с продольным оребрением.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные в диссертации результаты могут найти применение при проектировании технологических процессов формообразования оребренных панелей в авиа-космической и судостроительной отраслях промышленности. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методов, основанных на алгоритмах машинного обучения, для определения параметров ДУФ и РР, что позволит повысить точность расчётов и снизить требуемые вычислительные ресурсы.

В качестве общих замечаний можно отметить следующее:

1. Моделирование процесса раскатки роликами (глава 2), определение критической глубины внедрения роликов, необходимой для сквозного деформирования ребра, а также формирование базы данных внутренних силовых факторов процесса выполнены только для одного типоразмера ребра, что придаёт полученным результатам частный характер. Для иных толщин рёбер проведение аналогичных исследований, включая построение деформационных уравнений и соответствующих баз данных, требует повторной реализации в полном объёме. Данное обстоятельство свидетельствует об ограниченности разработанной автором модели.

2. Проверка разработанной методики проведена для сплава В95пчТ2. Возникает вопрос о её применимости для других высокопрочных алюминиевых или, например, титановых сплавов, используемых в аналогичных конструкциях.

3. Влияет ли последовательность обработки рёбер внутри расчётного участка (например, от края к центру или наоборот) на конечную форму панели, и если да, то даёт ли методика рекомендации по оптимальной последовательности?

4. В работе отсутствует методика применения результатов исследования при реализации комбинированной технологии РР-ДУФ для деталей с переменными геометрическими параметрами сечений (изменение толщины полотна, высоты и толщины рёбер) в направлении раскатки.

Заключение

Указанные выше замечания не снижают общей положительной оценки теоретических и практических результатов диссертационной работы. Полученные автором результаты и выводы в полном объёме отражены в тексте диссертации и автореферате, который соответствует её содержанию. Диссертация написана ясным научным языком. Основные результаты работы представлены в 15 научных публикациях, в том числе в шести статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и одной статье в издании, индексируемом в международной базе Web of Science. Получены патент на полезную модель и три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа Минаева Николая Владимировича является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, соответствует

паспорту научной специальности 2.5.6 – Технология машиностроения и отражает результаты деятельности автора по исследованию и разработке технологического процесса и оборудования для формообразования продольно-оребрённых панелей при сочетании операций раскатки роликами и дробеударной обработки.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней ВАК РФ, а её автор, Минаев Николай Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании научно-технического совета АО “Ульяновский НИАТ” 7.04.2026, протокол №1.

Заместитель генерального директора
по науке, к.т.н.

М.В. Илюшкин

Тел. (8422) 55-13-48

*Луртов Милокша Максимовна
Валерьевича заверяю. Петр*

Удостоверяю



О.А. Петрова

*Телефон рабочий: 8(8422) 36-30-45
Адрес электронной почты: fzvt@mail.ru
Почтовый адрес: 442010, г. Ульяновск, ул. Врзга
Михайлова, д. 34*