В диссертационный совет 24.2.307.01
ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский
технический университет»
Ученому секретарю совета,
к.т.н., доценту
Вулых Н.В.

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертационную работу Минаева Николая Владимировича на тему:
«Совершенствование технологии формообразования оребрённых панелей раскаткой роликами и дробеударной обработкой»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Совершенствование технологии изготовления крупногабаритных монолитно-фрезерованных панелей является важным направлением авиа, судо- и ракетостроения, поскольку применение таких деталей позволяет существенно улучшить весовые и прочностные характеристики конструкций. В то же время формообразование панелей двойной кривизны является сложной технологической задачей. На большинстве отечественных предприятий указанный процесс до сих пор реализуется методом гибки на гидравлических прессах с ручным управлением, отличается высокой трудоёмкостью, не обеспечивает требуемой точности и зависит от квалификации исполнителей.

Перспективной альтернативой является комбинированный метод, разделяющий процесс на две стадии: формирование продольной кривизны раскаткой роликами рёбер детали (РР) и получение поперечной кривизны дробеударным формообразованием (ДУФ). Автоматизированные установки для ДУФ уже апробированы в производстве, однако для внедрения полного цикла РР-

ДУФ необходимо специализированное оборудование и научно обоснованная методика расчёта технологических параметров операции РР.

Таким образом, диссертационная работа, направленная на комплексное решение обозначенной проблемы путём разработки методик расчёта на основе электронных моделей деталей и создания специализированного оборудования с ЧПУ для реализации операции раскатки рёбер панелей роликами является актуальной и имеет практическую ценность для отечественного производства.

2. Общие сведения о диссертации

Диссертационная работа изложена на 148 страницах, содержит 104 рисунка, 24 таблицы и включает следующие структурные элементы: введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложения.

Во введении обоснована актуальность исследования, проведён анализ состояния проблемы, сформулированы цель и задачи работы, описаны научная новизна, практическая значимость и положения исследования, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ конструктивных и технологических особенностей монолитно-фрезерованных панелей, рассмотрены способы их формообразования и применяемое для их изготовления оборудование. Проведён обзор теоретических и экспериментальных исследований, в т.ч. зарубежных, посвящённых процессам раскатки рёбер роликами и дробеударного формообразования. Глава построена вполне логично, поэтому сформулированные на основе выполненного научно-технического анализа цель и задачи диссертационной работы воспринимаются убедительно.

Вторая глава посвящена конечно-элементному моделированию операций комбинированного процесса формообразования панелей дробеударной обработкой и раскаткой роликами. Для определения исходных данных, необходимых для расчёта режимов РР, было выполнено моделирование процесса ДУФ на конструктивно-подобном образце участка панели. Это позволило

определить нежелательную составляющую продольной кривизны детали, возникающую при ДУФ и подлежащую компенсации при РР и исследовать напряжённо-деформированное состояние материала. Показано, что в результате РР в материале формируются остаточные сжимающие напряжения, что положительно влияет на его ресурсные характеристики. Достоверность моделирования подтверждена путём сравнения расчётных данных с результатами экспериментальных исследований (эпюрами остаточных напряжений), полученными механическим методом полосок. Обоснована возможность применения методики расчёта формоизменения деталей при РР путём нагружения эквивалентной растягивающей силой (ограничением данной методики является требование полного геометрического подобия между моделируемым образцом и реальной деталью). Кроме того, доказано, что взаимовлияние соседних рёбер при последовательной раскатке становится существенным только при различии их стрел прогиба более чем в два раза. На основании этих выводов обоснована методика определения параметров процесса РР для элементарных расчётных участков, включающих одно ребро с прилегающими зонами полотна (ширина участков принимается равной расстоянию до соседнего ребра или до края детали).

В третьей главе представлены результаты исследования технологического процесса формообразования панелей в последовательности РР-ДУФ. Технологические режимы РР определялись с помощью тарировочного уравнения, связывающего глубину внедрения роликов с регулировочными параметрами оборудования, и деформационного уравнения, представляющего зависимость величины прогиба расчётных участков от глубины внедрения роликов. Данный подход позволяет перейти от трудоёмкого эмпирического метода, требующего изготовления дорогостоящих КПО, к прямому расчёту технологических параметров. Для этого используются специализированные базы данных, сформированные на основе результатов конечно-элементного моделирования и экспериментальной обработки образцов-пластин. Достоверность предложенной методики подтверждена экспериментальным исследованием процесса формообразования КПО панелей с рёбрами прямоугольного и Г-образного

сечений по технологии РР-ДУФ, показавшим удовлетворительное соответствие расчётных и экспериментальных данных.

В четвёртой главе изложены практические аспекты реализации результатов исследования. Представлена методика расчёта технологических параметров процесса РР при формообразовании панелей в последовательности РР-ДУФ. Методика основана на конечно-элементном моделировании с использованием исходных данных: электронной модели детали, результатов моделирования процесса ДУФ, а также тарировочных и деформационных уравнений. В результате расчёта определяются режимы и условия реализации операции РР, включая расположение роликов относительно ребра, давление в гидросистеме и длина зоны обработки; формируется управляющая программа для установки с ЧПУ. Также в главе приведено описание конструктивного решения специализированной установки с ЧПУ, разработанной для реализации процесса РР. В завершении главы сформулированы технологические рекомендации по внедрению процесса формообразования панелей по технологии РР-ДУФ на оборудовании с ЧПУ, применение которого обеспечивает повышение производительности и точности изготовления деталей.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

3. Достоверность полученных результатов и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационном исследовании, обоснованы использованием корректного математического аппарата, методов исследования, современного программного и аппаратного обеспечения, а также согласованностью разработанных автором математических моделей с полученными экспериментальными данными.

Экспериментальная часть исследований выполнена с применением современного технологического и контрольно-измерительного оборудования. Сформулированные в работе общие выводы являются достоверными и

непосредственно вытекают из материалов проведённых теоретических и экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечиваешься большим объемом данных расчётного и натурного эксперимента, полученных с привлечением современных методов исследования, как известных и принятых в рассматриваемой области науки, так и специально разработанных. Моделирование процессов РР рёбер панелей и ДУФ осуществлялось в среде нелинейного конечно-элементного анализа LSTC LS-Dyna. Обработка данных моделирования велась с использованием постпроцессора LS-Prepost, программы Microsoft Excel и языка программирования Python. Достоверность результатов подтверждена экспериментальным исследованием с помощью современных средств измерения: цифровых измерительных головок Mitutoyo Digimatic ID-S; исследовательского комплекса ИРНИТУ на базе установки УДИОН-2 для изучения остаточных напряжений механическим методом удаления слоев. Такой комплексный подход позволяет получить надежные и воспроизводимые результаты, подтверждающие адекватность предложенных методик.

Материал диссертации изложен системно, с использованием корректной научной терминологии, что дополнительно подтверждает обоснованность представленных положений.

4. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке комплексного подхода к управлению процессом формообразования монолитных панелей с продольным оребрением в рамках комбинированной технологии РР-ДУФ:

выявлена и количественно оценена технологическая наследственность операции ДУФ, проявляющаяся в формировании нежелательной продольной кривизны детали; **предложен принцип упреждающей компенсации** путём

целенаправленной корректировки режимов предшествующей операции раскатки роликами;

установлен критерий существенного взаимовлияния соседних рёбер при последовательной раскатке (превышение двукратной разницы в стрелах прогиба); **обоснована методика членения панели** на элементарные расчётные участки, моделирующие одно ребро с прилегающей зоной полотна;

определено ключевое условие применимости расчётной модели, основанной на замене воздействия роликов эквивалентной растягивающей силой, в виде **полного геометрического подобия** между технологическим образцом и реальной деталью;

разработана параметрическая расчётная модель и методология, связывающая глубину внедрения роликов с регулировочными параметрами оборудования и позволяющая определять оптимальные режимы РР путём конечно-элементного моделирования на представительных образцах, заменяя дорогостоящую и трудоёмкую обработку опытных деталей.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработанном методе расчёта технологических параметров комбинированного процесса формообразования (РР–ДУФ) для монолитных панелей двойной кривизны с продольным оребрением. Применение предложенного метода в комплексе с автоматизированным оборудованием обеспечивает повышение точности и эффективности изготовления панелей сложной формы за счёт перехода от эмпирического подхода к расчётному. Практическими результатами работы является спроектированная, изготовленная и используемая в производственных условиях филиала ПАО «Ил» - Авиастар установка с ЧПУ для формообразования и правки подкреплённых деталей методом раскатки роликами, а также технологические рекомендации по реализации комбинированного метода обработки РР-ДУФ на оборудовании с ЧПУ.

5. Положительные стороны работы

Работа выполнена на хорошем методическом уровне и отвечает современным требованиям к кандидатским диссертациям. Во-первых, исследование основано на комплексном подходе, который сочетает теоретическое моделирование, экспериментальные испытания и промышленную апробацию. Такой методический подход позволяет не только проверить корректность выдвинутых гипотез, но и подтвердить их применимость в реальных условиях производства.

Во-вторых, автор демонстрирует высокий уровень владения методами математического моделирования, теории обработки металлов давлением, что проявляется в глубоком теоретическом обосновании работы. Кроме того, диссертация отличается четкой структурой, логичной последовательностью изложения и обоснованностью выводов. Полученные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, что свидетельствует о признании их научного значения в профессиональном сообществе. Особую ценность работы представляет то, что полученные научные результаты имеют высокую практическую значимость и нашли применение на действующем промышленном объекте - филиале ПАО «Ил» - Авиастар.

6. Замечания по работе

По работе имеются следующие замечания:

1. нарушен порядок ссылок на литературные источники по тексту диссертации;

2. было бы крайне полезно представить в диссертации расчёт экономического эффекта от разработанных и внедрённых решений;

3. в разделе актуальности темы исследования автореферата автор представляет прессовую гибку как исключительно ручную операцию, требующую высокой квалификации исполнителей; при этом, автор не учитывает наличие

прессового оборудования с ЧПУ, которое при соответствующем оснащении и программном обеспечении не уступает по возможностям предлагаемому автором решению; в таком случае требования к квалификации исполнителей при выполнении автоматизированной прессовой гибки будут не выше, чем в предлагаемом автором способе формообразования;

4. предложенные автором методики базируются на применении программного обеспечения производства недружественных стран, что может существенно ограничить область их применения в отечественной практике;

5. при изучении взаимовлияния соседних ребер автор сам вводит условия, определяющие расстояния между ними при разбиении детали на расчетные участки, при этом остается непонятным, как действовать в случае, если эти условия в реальной детали конструктивно не обеспечиваются;

6. в третьем разделе работы автором в достаточном количестве приводятся регрессионные зависимости; было бы крайне полезно представить в тексте диссертации параметр оценки качества модели - коэффициент детерминации R^2.

7. все проведенные автором исследования ограничены только прямоугольной и Г-образной формой подкрепляющих ребер, что является лишь частным случаем общей конструкторской практики для авиационных деталей и может служить причиной ограниченности применения методик, предложенных автором исследования;

8. в разделе диссертации, отражающем апробацию работы, отсутствуют конкретные данные об участия в научно-технических конференциях (эти данные частично представлены в тексте автореферата).

Указанные замечания не снижают общую ценность, высокий уровень исполнения диссертационного исследования, и значимость теоретических и практических результатов работы, которые могут быть использованы предприятиями авиастроения, судостроения и др.

7. Заключение

Диссертационное исследование Минаева Н.В. «Совершенствование технологии формообразования оребрённых панелей раскаткой роликами и дробеударной обработкой» представляет собой законченную самостоятельную работу, в которой решена актуальная задача повышения производительности и качества формообразования сложноконтурных оребрённых панелей. Автором разработана методика расчёта параметров комбинированного процесса, сочетающего раскатку рёбер роликами и дробеударное формообразование. Практическая значимость подтверждена внедрением созданной установки с ЧПУ для раскатки роликами и соответствующих технологических рекомендаций.

Результаты работы обладают научной новизной и прошли успешную апробацию в производственных условиях филиала ПАО «Ил» – Авиастар, что свидетельствует об их перспективности для предприятий авиа- и судостроения.

Положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны. Работа структурирована, изложена грамотным научным языком. Содержание диссертации адекватно отражено в автореферате. Материалы исследования представлены на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 15 работах, (6 статей в изданиях из перечня ВАК, 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Web of Science). Получены патент на полезную модель и три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация соответствует требованиям паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения по пунктам «3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения» и «6. Технологическая наследственность в машиностроении».

С учетом высказанных замечаний считаю, что диссертационная работа на тему «Совершенствование технологии формообразования оребрённых панелей раскаткой роликами и дробеударной обработкой» по своему содержанию, объёму, актуальности, научной и практической значимости полностью соответствует

требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор Минаев Николай Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, и. о. зав. кафедрой «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «УлГТУ»

Морозов Олег Игоревич
«03» апреля 2026 г.

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «УлГТУ», кандидат физико-математических наук

Климовский Андрей Борисович
«03» апреля 2026 г.

Телефон: +79656934897
Телефон рабочий: +78422417888
Адрес электронной почты: olmorozov-rabota@yandex.ru, oi.morozov@ulstu.ru
Почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

Личную подпись О.И. Морозова заверяю
Начальник управления кадрового обеспечения
О.Н. Бурмакина

Личную подпись А.Б. Климовского заверяю
Начальник управления кадрового обеспечения
О.Н. Бурмакина