

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Яков', with a long horizontal stroke extending to the right.

ЯКОВЛЕВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РИФЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧКИ ЛОКАЛЬНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: Кухарь Владимир Денисович
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты: Сосенушкин Евгений Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО МГТУ «Станкин», профессор;

Петров Павел Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет», доцент

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «10» декабря 2025 г. в 14⁰⁰ час. на заседании
диссертационного совета 24.2.417.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет» (300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте
<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-01/yakovlev-ss-24-2-417-01>

Автореферат разослан «14» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Платонов Валерий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной задачей развития машиностроения является вывод его на принципиально новые ресурсосберегающие технологии, обеспечивающие повышение производительности труда, экономию материальных и энергетических ресурсов и охрану окружающей среды. В значительной степени решению этих задач способствует внедрение в промышленность новых прогрессивных технологий нанесения рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек.

Существует большое число способов изготовления рифлей на поверхностях цилиндрических оболочек: обработка резанием, точное литье, электронно-лучевая обработка, накатывание, редуцирование. Однако применение данных технологий ограничено из-за низкой производительности процессов и невозможности получения требуемой геометрии на малогабаритных или крупногабаритных изделиях.

В связи с этим актуальной является разработка новых способов рифления и устройств, позволяющих путем локального пластического формоизменения осуществить нанесение рифлей с заданной геометрией инструментом ограниченной длины при совмещении поступательного и вращательного движения инструмента на прессовом оборудовании, обеспечивающих снижение технологической силы процесса рифления и съема.

Работа выполнена в соответствии с грантом Правительства Тульской области в сфере науки и техники № ДС/167 «Научное обоснование и разработка инновационных технологических процессов изготовления элементов осколочных боевых частей из трубных заготовок локальным пластическим деформированием» и грантом РНФ № 22-29-20212 «Инновационные технологические процессы изготовления изделий ответственного назначения методами локального пластического деформирования».

Цель работы. Повышение эффективности (снижение трудоемкости, уменьшение технологической силы) процесса рифления тонкостенных оболочек путем научно-обоснованного выбора рациональных технологических параметров его проведения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Разработать новые способы и устройства для получения оболочек с рифлями, увеличивающих производительность и снижающих трудоемкость процессов при меньшей требуемой технологической силе.

2. Осуществить теоретические исследования процессов формирования рифлей на внутренней поверхности оболочки поворотным инструментом ограниченной длины с помощью компьютерного моделирования. Выявить влияние технологических параметров, формы и размеров инструмента на напряженно-деформированное состояние заготовки, силовые режимы, повреждаемость материала, температуру материала, качество получаемого изделия.

3. Получить вторичные математические модели зависимости силовых и деформационных параметров процесса от геометрических параметров формируемой рифли и инструмента.

4. Провести экспериментальные работы по нанесению сетки рифлей на внутренней поверхности оболочек с целью оценки технологической силы, качества детали. Сравнить результаты компьютерных моделирований и экспериментальных данных.

5. Разработать научно-обоснованные рекомендации по проектированию технологических процессов получения сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек.

6. Использовать результаты исследования в учебном и производственном процессе.

Объект исследования: операция рифления внутренней поверхности заготовки локальным пластическим деформированием поворотным инструментом.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние материала, его повреждаемость, силовые режимы при проведении операции рифления трубной заготовки.

Методы исследования: В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов. Теоретический анализ процессов проводился с использованием современного лицензионного программного комплекса QForm, который основан на методе конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований использованы современный спектрометр эмиссионный МСАП V5, испытательная машина Р-5, испытательная машина ГМС-50, регистрирующая аппаратура и средства измерения.

Автор защищает:

- результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженного и деформированного состояния заготовки, силовых режимов, повреждаемости материала в зависимости от технологических параметров, глубины рифления, зазора между заготовкой и инструментом, углом подъема спиральных клиновых выступов;
- разработанные вторичные математические модели силовых режимов, интенсивности деформаций, средних напряжений, критерия разрушения от геометрии инструмента и параметров формируемых рифлей;
- способы и устройства для реализации новых технологических процессов рифления полых цилиндрических оболочек;
- практические рекомендации по разработке новых технологических процессов рифления полых цилиндрических оболочек.

Научная новизна заключается в:

- математической модели рифления внутренней поверхности тонкостенных осесимметричных заготовок поворотным инструментом ограниченной длины, позволяющей спроектировать технологический процесс и рабочий инструмент для его реализации;
- установленных закономерностях изменения силовых режимов рифления, характеристик напряженно-деформированного состояния и повреждаемости материала заготовки в зависимости от глубины рифления, зазора между заготовкой и инструментом и угла подъема рифлей.

Достоверность результатов обеспечивается применением известных программных комплексов компьютерного моделирования процессов

пластического формоизменения и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Практическая значимость. Разработаны и исследованы новые энергоэффективные способы и устройства для получения цилиндрических оболочек с рифлеными поверхностями.

Установлены границы бездефектного протекания процесса рифления в зависимости от геометрии спиральных клиновых выступов и зазора между рабочей оправкой и заготовкой.

Установлены рациональные геометрические параметры инструмента, обеспечивающие получение изделия требуемой геометрии с обеспечением заданного качества.

Получены вторичные математические модели, позволяющие оценить силовые и деформационные параметры процесса рифления в зависимости от технологических факторов.

Реализация работы. Разработаны способы и устройства для рифления поверхностей цилиндрических оболочек, практические рекомендации, математические модели приняты к внедрению в опытном производстве на АО «НПО «СПЛАВ», АО «ТОЗ-МЕТИЗ» и ПАО «Императорский Тульский оружейный завод».

Отдельные результаты исследований использованы на кафедре МиППФ ТулГУ в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение», магистров по направлению 15.04.01 «Машиностроение» и включены в разделы лекционных курсов.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на: всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2021, 2023 г.); IV Международной конференции «Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-IV 2022)» (Бухара, Узбекистан, 2022 г.); международной научно-практической конференции «Проблемы развития предприятий: теория и практика» (Пенза: ПГАУ, 2022-2023 гг.); международной научно-практической конференции «Управление, экономика и право: проблемы, исследования, результаты» (Пенза: ПГАУ, 2022 г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 14 работах, 5 из которых входят в базы данных Scopus и/или Web of Science, 9 работ опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 7 патентов на изобретения РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 88 источников, 4 приложений и включает 162 страницы машинописного текста, содержит 84 рисунка и 18 таблиц. Общий объем 162 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность и кратко раскрыто содержание разделов диссертационной работы.

В первом разделе описано назначение цилиндрических деталей с рифленой поверхностью, рассмотрено современное состояние технологий рифления, проведен анализ существующих технологических процессов изготовления цилиндрических деталей с внутренними рифлями (рис. 1).

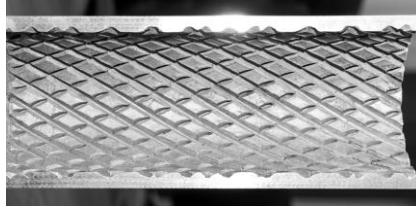


Рисунок 1 – Элемент рифленой оболочки

Рифли на внутренней поверхности детали могут быть изготовлены с помощью операций резания, сваривания листового проката, электрохимической обработки, ротационнойковки, накатыванием, однако данные технологии имеют ряд недостатков, включая высокую трудоемкость, низкую производительность.

Более эффективным является процесс редуцирования рифленым пуансоном цилиндрической заготовки через коническую матрицу. Возможны два варианта реализации этого процесса. Первый вариант предполагает использование рифленого пуансона меньшей длины, чем получаемый полуфабрикат. Второй – когда длина рифленого пуансона соответствует длине получаемого полуфабриката на каждом переходе.

Первый обладает рядом недостатков: не обеспечивается требуемая точность изделия в связи с неоднократным прохождением инструмента через одни и те же объемы деформированного материала; низкая производительность, из-за многократного возвратно поступательного движения инструмента; значительные энергозатраты при редуцировании

Технологический процесс получения рифлей вторым способом предполагает четыре операции: первая операция – редуцирование для получения винтовых рифтов одного направления; вторая операция – съем изделия с пуансона; третья операция – редуцирование для получения рифтов противоположного направления; четвертая операция – съем изделия с пуансона. Нанесение рифлей осуществляется пуансоном, на поверхности которого сформированы треугольные винтовые выступы, геометрия которых определяется углом вершины и высотой выступа, а также углом наклона направления выступа к образующей пуансона. Наружный диаметр пуансона соответствует внутреннему диаметру стакана. Этот метод редуцирования отличается большой трудоемкостью изготовления пуансона со спиральными выступами, высоким требуемым усилием съема, что вызывает трудности из-за того, что не все прессы способны выдавать большую силу при обратном ходе. Также формирование рифлений редуцированием на заготовках из цветных металлов сопровождается налипанием металла.

Проведенный обзор технологий показал, что вышеперечисленные методы получения рифленых оболочек имеют ряд недостатков, таких как низкая производительность, высокая трудоемкость, низкое качество изделий. Поэтому вопрос о разработке новых способов и устройств для нанесения рифлей на внутренней поверхности, отличающихся высокой производительностью и

низкой энергоемкостью, стоит довольно остро и является важной технической и научной задачей.

В конце раздела формулируются выводы и ставятся задачи исследования.

Во втором разделе приведен новый способ формирования рифленой внутренней поверхности с помощью локального пластического деформирования поворотным инструментом ограниченной длины, а также эскиз устройства для проведения этой операции (рис. 2, а).

Цилиндрическая оболочка (2) устанавливается в контейнер (1) и инструментальный стержень (3) с рабочей оправкой (4) вводятся в полость оболочки (2), производя локальное деформирование внутренней поверхности на требуемую глубину. В процессе локального деформирования происходит поворот рабочей оправки и инструментального стержня (3) относительно контейнера (1) и заготовки (2) путем создаваемого крутящего момента в процессе пластического формоизменения. При обратном ходе также совершается поворот инструментального стержня (3) и рабочей оправки (4) с вывинчиванием из цилиндрической оболочки (2) без повреждения внутренней поверхности.

Математическое моделирование операции рифления было выполнено в предположении, что материал жесткопластический, несжимаемый, изотропный, изотропно упрочняющийся.

При этом определяющая система уравнений включала в себя:

- условие текучести: $f(\sigma_{ij}) = \sigma_u + f(\varepsilon_u) = 0$;
- уравнения равновесия: $\sigma_{ij,j} = 0$;
- соотношения связи компонентов скоростей деформаций с компонентами вектора скорости перемещения: $\xi_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2$;
- условие несжимаемости: $\xi_{ii} = 0$;
- уравнение теории пластического течения: $\xi_{ij} = \lambda' \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$.

В приведенных выражениях σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты скоростей деформаций; v_i – компоненты вектора скоростей; f – функция, определяющая закон пластичности; λ' – некоторый положительный скалярный множитель.

Связь между инвариантами σ_u , ε_u и ξ_u может определяться уравнением состояния в общем виде: $\sigma_u = \sigma_u(\varepsilon_u, \xi_u, T)$, где ε_u – интенсивность деформаций; T – температура. Прямое интегрирование таких систем уравнений оказывается возможным лишь в простейших случаях. Для преодоления возникающих трудностей разработан ряд альтернативных постановок и приближенных методов решения. Из них наибольшее развитие получили вариационные методы, которые положены в основу метода конечных элементов.

В этом случае дифференциальное уравнение в частных производных заменяют системами алгебраических уравнений, выписанных для последовательности узлов, а специальные функционалы – функциями конечного числа узловых переменных. Последующие вычисления искомых величин и определение параметров состояния было выполнено стандартными методами численного анализа, с использованием целого ряда созданных программных продуктов. В работе при анализе процессов пластического формоизменения использован программный комплекс QForm 2D/3D.

Трение между заготовкой и инструментом выбиралось из встроенной библиотеки QForm и коэффициент трения Кулона составлял 0,05. На границах заготовка-корпус трение отсутствовало, что является допущением для данного моделирования. Оно обусловлено тем, что в реальном процессе рабочая оправка, установленная на подшипниках, вращается под действием формоизменяющих сил, а заготовка и корпус – нет. В моделировании же рабочая оправка не имеет возможности вращения и происходит вращение заготовки относительно инструментов, и для снижения фактора вращения заготовки было установлено отсутствие трения при контакте заготовки с корпусом.

Процесс рифления моделировался на заготовке из стали 10 с внутренним диаметром 110,7 мм, высотой 50 мм, толщиной стенки 3,55 мм. Число рифлей – 28 шт., с углом подъема – 30° , углом при вершине рифли 60° .

Трехмерная модель инструмента приведена на рисунке 2, а. При этом высота выступов на рабочей оправке равнялась глубине внедрения или была больше глубины внедрения на 0,15, 0,3 и 0,45 мм, в результате чего соответственно обеспечивался зазор Z (рис. 2, б) между внутренней поверхностью заготовки и основной поверхностью рабочей оправки на величину 0, 0,15, 0,3 и 0,45 мм.

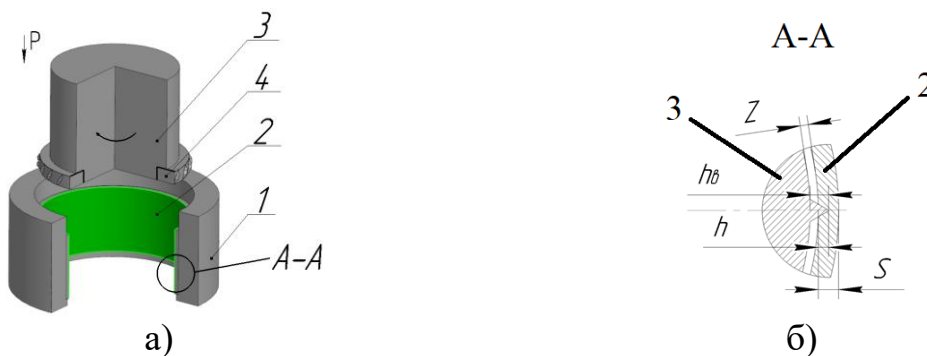


Рисунок 2 – Схема процесса (а): 1 – контейнер, 2 – заготовка, 3 – инструментальный стержень, 4 – рабочая оправка; зазор между заготовкой и инструментом (б)

Были выбраны 3 вида рабочих оправок, которые отличаются формой заходной части спиральных клиновых выступов, то есть теми частями выступов, которыми начинается формоизменение. Рабочая оправка типа I (рис. 3, а) имеет плоскую заходную часть с углом 45° к торцевой поверхности заготовки; тип II (рис. 3, б) обладает клиновой формой, с ребром, параллельным торцевой поверхности рабочей оправки; тип III (рис. 3, в) выполнен с ребром, расположенным под углом относительно торцевой поверхности рабочей оправки. Высота рабочей оправки составляла 10 мм.

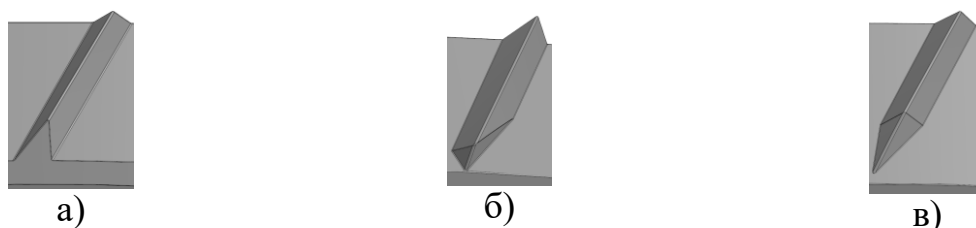


Рисунок 3 – Фрагмент выступов рабочей оправки: а – тип I, б – тип II, в – тип III

Моделирование проводилось в 4 этапа: 1 – рифление одного направления; 2 – сьем; 3 – рифление встречного направления; 4 – сьем изделия.

Установлено, что при использовании оправки типа I наблюдается фронтальный наплыв, при рифлении оправками типа II и III с зазором $Z=0$ также выявлен наплыв. При рифлении рабочей оправкой типа II и III с зазором $Z>0$ значительных наплывов или иных дефектов не наблюдается, однако технологическая сила рифления оправкой типа III меньше относительно оправки типа II для зазоров $Z>0$ и всех глубин внедрения. Поэтому дальнейшие исследования проводятся для рабочих оправок типа III с зазором $Z>0$.

С целью оценки влияния геометрических параметров инструмента на силовые и деформационные параметры процесса были проведены численные эксперименты, в результате которых были получены вторичные математические модели оценки силовых и деформационных параметров процесса. В которых в качестве факторов выступали относительный зазор x_1 , относительная глубина внедрения выступа x_2 , относительный угол подъема рифлей x_3 . Было получено уравнение регрессии, которое имеет вид:

$$P_B = 2,596 - 0,6185x_1 + 1,508x_2 + 0,289x_3 - 0,42x_1x_2 - 0,292x_2x_3 + 0,136x_1x_3 + 0,22x_1^2 + 0,176x_2^2 + 0,201x_3^2.$$

Качество регрессионной модели оценивалось по критериям Фишера и Кохрана, которые не превышает предельно допустимых значений, что свидетельствует об адекватности математической модели. С помощью полученного уравнения регрессии были построены поверхности отклика и их сечения, отражающие зависимость (рис. 4).

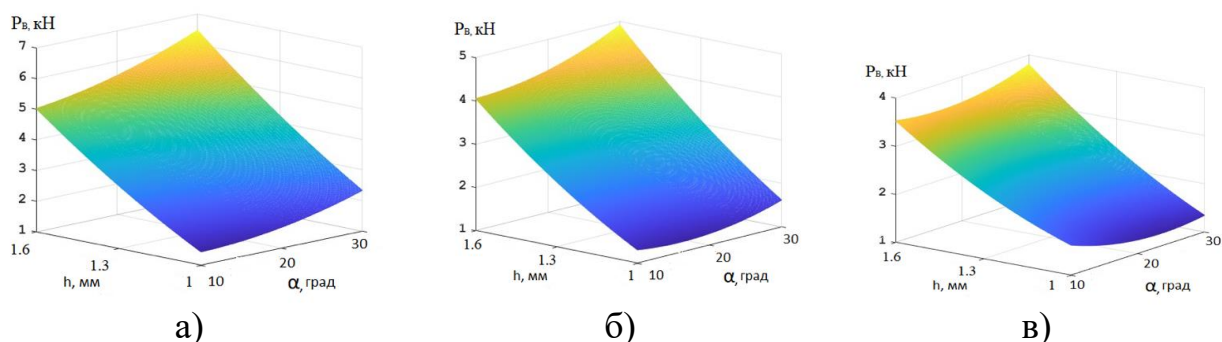


Рисунок 4 – Зависимость силы на один выступ (P_B) от величин (α , h) при рифлении с зазором 0,15 (а), 0,3 (б), 0,45 мм (в)

Установлено, что с увеличением глубины рифления оправкой типа III с 1 мм до 1,6 мм увеличивается технологическая сила формоизменения на 250% с 42 кН до 105 кН.

При анализе влияния угла подъема на силу рифления установлено, что при зазорах $Z=0,15$ мм и $Z=0,3$ мм с увеличением угла подъема от 10° до 30° сила увеличивается на 20-50% для всех глубин внедрения. При зазоре $Z=0,45$ мм угол подъема практически не влияет на силу формоизменения.

С увеличением зазора сила рифления оправкой типа III снижается для глубин внедрения 1,3 и 1,6 мм почти в 2 раза, при глубине внедрения 1 мм сила уменьшается на 30%.

При анализе силы съема установлено, что с увеличением глубины рифления при всех зазорах сила съема увеличивается. Так, увеличение глубины

внедрения с 1 до 1,6 мм приводит к повышению силы съема при зазорах 0,3 и 0,45 мм примерно на 250%.

Далее проводится анализ напряженного и деформированного состояния во впадине рифли (рис. 5).

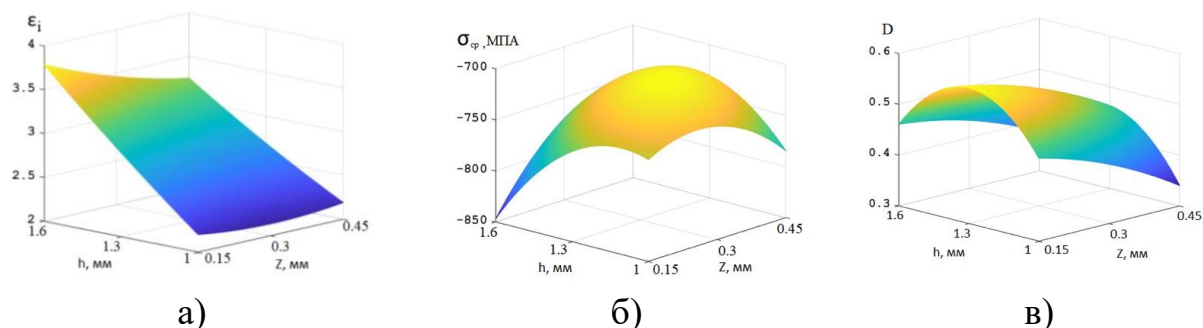


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности деформаций (а), средних напряжений (б), повреждаемости (в) от величин (Z , h)

Во впадине формируемых рифлей интенсивность деформаций наибольшая (рис. 5, а), при этом с увеличением глубины рифления интенсивность деформаций растет. Максимальные интенсивности деформации достигают достаточно высоких значений – порядка 3,6. Однако наличие высоких сжимающих напряжений (рис. 5, б) в области деформаций позволяет осуществлять процесс формирования рифлей без разрушения, о чем свидетельствуют значения параметра повреждаемости по критерию Колмогорова, которые не превышают 0,6 во всех рассматриваемых случаях.

Глубина рифлей, а также зазор влияют на повреждаемость (рис. 5, в). Так, с увеличением зазора Z от 0,15 до 0,45 мм для всех глубин внедрения повреждаемость уменьшается на 10-25%. При этом выявлено, что наименьшая повреждаемость для глубин внедрения 1, 1,3 и 1,6 мм соответствует наибольшему зазору 0,45 мм.

Для получения сетки рифлей необходимо использовать рабочую оправку с противоположным углом подъема спиральных клиновых выступов. Установлено, что максимальная сила встречного рифления в среднем на 10% меньше, чем при первом рифлении, из-за небольшой раздачи полуфабриката. Однако при встречном рифлении происходят колебания силы около 30%, так как выступы попадают в уже сформированные рифли. При этом напряженное и деформированное состояние на второй операции рифления аналогично первой операции рифления.

Проводится сравнение локального пластического формоизменения и редуцирования (рис. 6).

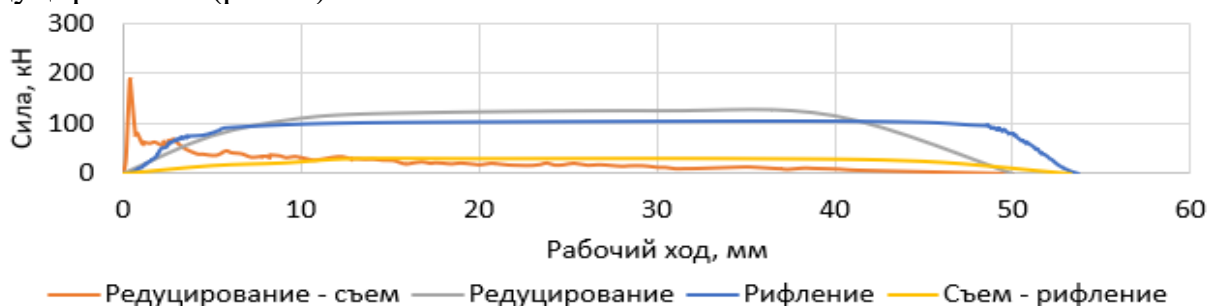


Рисунок 6 – График сил редуцирования и рифления

Сила получения рифленых оболочек при редуцировании на 20% выше относительно формообразования локальным пластическим деформированием инструментом ограниченной длины. Также установлено, что сила съема при локальном рифлении ниже на 85% относительно редуцирования.

В третьем разделе диссертационной работы изложены результаты выполненных экспериментальных исследований технологических процессов изготовления цилиндрических оболочек с внутренними рифлями.

Для проведения экспериментальных работ по нанесению рифлей на внутренней поверхности цилиндрических оболочек был спроектирован и изготовлен экспериментальный штамп.

Для нанесения рифлей и проверки данных, полученных компьютерным моделированием, были проведены экспериментальные работы по получению спиральных рифлей (сетки спиральных рифлей) на внутренней поверхности цилиндрических оболочек из стали 20 и алюминиевого сплава АМг5. Наружный диаметр заготовок составлял 117,8 мм, внутренний диаметр 111,8 мм, толщина стенки 3 мм, высота – 60 мм. На внутренней поверхности оболочек изготавливались спиральные клиновые рифли с углом при их вершине 60° , глубиной 1 мм, углом их подъема 30° , число спиральных рифлей составляло 28 шт.

Для получения сетки рифлей ромбовидной формы с углом подъема 30° использовались рабочие оправки, на наружной поверхности которых были выполнены спиральные клиновые выступы с углом при вершине 60° в количестве 28 шт. и углом подъема относительно оси 30° и -30° . Для осуществления локального деформирования высота клиновых выступов равнялась 1,5 мм.

Для проведения экспериментов использовалась испытательная машина ГМС-50 с поверенной регистрирующей аппаратурой и развиваемым усилием 490 кН. Процесс рифления внутренней поверхности оболочки осуществлялся в несколько операций: 1 – рифление с одним направлением рифлей; 2 – съем изделия, рабочая оправка с углом подъема 30° извлекается из заготовки и на инструментальный стержень устанавливается вторая оправка с углом подъема -30° ; 3 – рифление со встречным направлением рифлей; 4 – съем изделия, рабочая оправка извлекается из заготовки.

В разделе описаны результаты спектрометрического анализа заготовок и исследования их механических характеристик, полученных в результате растяжения образцов.

В результате экспериментов по нанесению рифлей на внутренней поверхности оболочки установлено, что рабочая оправка типа I и типа II не позволяет достичь нужного результата. С помощью оправки типа III получают как стальные, так и алюминиевые (рис. 7) требуемые изделия с заданной геометрией.



Рисунок 7 – Образец с сеткой рифлей, полученной при рифлении рабочей оправкой типа III

В результате проведения серии экспериментов установлено, что сила съема намного меньше силы рифления как на первой операции (в 3,4 раза), так и на второй (в 2,5 раза). Также установлено, что на встречном рифлении происходит колебание силы, связанное с тем, что при встречном рифлении инструмент попадает в область уже сформированных первоначальных рифлей. В итоге установлено, что средняя сила нанесения рифлей (левых) составляет 70,85 кН, средняя сила съема для первой и второй операций – 21,5 и 20,1 кН соответственно. Средняя сила встречного (правого) рифления составила 56,6 кН. Разница в силах между первым и вторым рифлением объясняется тем, что после первой операции рифления происходит небольшая раздача (калибровка) заготовки в корпусе, а на второй операции такой раздачи уже нет. Так, сила рифления на первой и второй операции отличается более чем на 20%, сила же съема на первой и второй операции практически не отличается. Похожая картина наблюдается при рифлении стальных образцов. При получении всех полуфабрикатов и деталей фронтальный наплыв и значительный боковой наплыв не наблюдаются. Визуальная оценка инструмента по завершении испытаний никаких деформационных изменений или повреждений не выявила.

Было проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими (рис. 8).

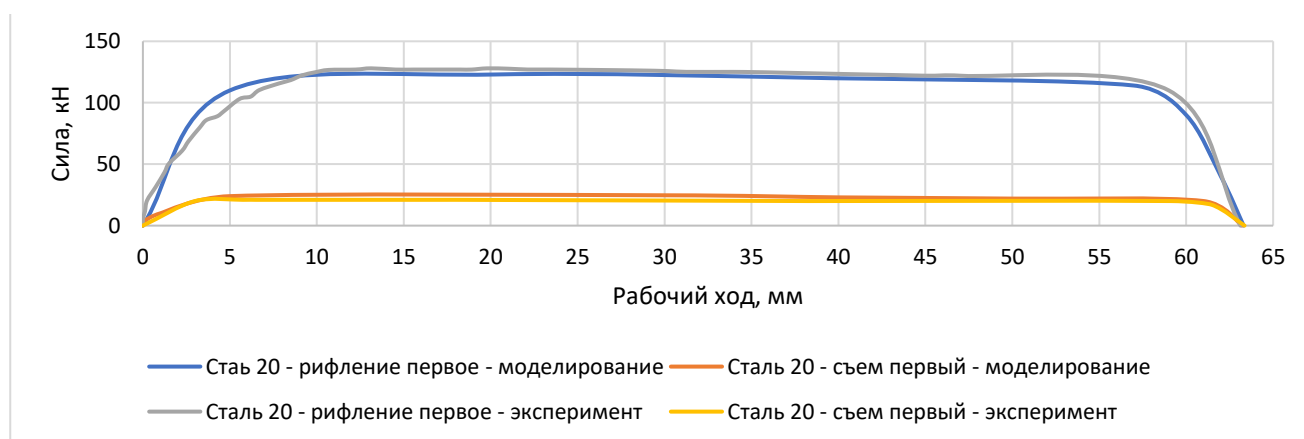


Рисунок 8 – График силы рифления

Исследование показало расхождение не более 15%, что позволяет судить об адекватности математической модели.

В четвертом разделе приводятся новые разработанные способы и устройства для получения рифленых поверхностей цилиндрических оболочек:

1. Устройство для формирования рифленой внутренней поверхности при принудительном вращении формоизменяющего инструмента;

2. Способ и устройство для формирования рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки при совмещении операции рифления и раздачи;

3. Способ и устройство формирования рифленой внутренней поверхности с совмещением операции дорнования;

4. Способ и устройство для одновременного получения рифленых наружных и внутренних поверхностей оболочек.

Предложенные способы и устройства позволяют использовать энергосберегающие технологии изготовления рифлей или сетки рифлей на внутренней поверхности или на внешней и внутренней поверхностях одновременно.

В пятом разделе приведены основные практические рекомендации для проектирования технологического процесса рифления внутренней поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим формоизменением, а также сведения об использовании результатов исследования в промышленности и учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе **решена актуальная задача**, которая заключается в разработке новых способов и устройств, позволяющих локальным пластическим формоизменением осуществить нанесение рифлей поворотным инструментом ограниченной длины, а также проведено теоретическое и экспериментальное исследование данного процесса.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**:

1. Предложены способ и устройство для реализации рифления локальным пластическим деформированием поворотным инструментом ограниченной длины, что позволяет повысить производительность и снизить трудоемкость процесса получения рифленых оболочек вследствие отсутствия промежуточных операций термообработки.

2. На основе анализа получаемой геометрии изделия, технологических сил, напряженно-деформированного состояния из рассмотренных типов оправок наиболее рациональной для реализации процесса рифления локальным пластическим деформированием является оправка типа III.

3. Получены вторичные математические модели, которые позволяют определить силовые характеристики процесса при различных начальных условиях: угле подъема спиральных рифлей, глубине рифлей, зазоре между внутренней поверхностью цилиндрической заготовки и рабочей оправкой.

4. Установлено, что наибольшее влияние на силовые параметры процесса оказывают глубина внедрения и зазор между рабочей оправкой и заготовкой. Так, с увеличением глубины рифления с 1 мм до 1,6 мм увеличивается технологическая сила формоизменения на 250% с 42 кН до 105 кН. С увеличением зазора между рабочей оправкой и заготовкой сила снижается для

глубин внедрения 1,3 мм и 1,6 мм почти в 2 раза, при глубине внедрения 1 мм сила уменьшается на 30%.

5. Максимальная интенсивность деформаций достигается во впадине формируемых рифлей и может составлять порядка 3,6. Однако наличие значительных сжимающих напряжений в области деформаций позволяет осуществлять процесс формирования рифлей без разрушения, о чем свидетельствуют значения параметра повреждаемости по критерию Колмогорова, который не превышает 0,6 во всех рассматриваемых случаях.

6. Экспериментально доказано, что технология формирования рифлей локальным пластическим деформированием позволяет получать рифли на внутренней поверхности оболочек из разных металлических материалов и сплавов. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных силовых характеристик процесса, которое показало, что отличие составляет не более 15% для всех операций, что свидетельствует об адекватности компьютерной модели.

7. Установлено, что формообразование локальным пластическим деформированием имеет преимущества по сравнению со способом редуцирования, так как сила получения рифленых оболочек при редуцировании на 20% выше относительно формообразования локальным пластическим деформированием инструментом ограниченной длины. Также установлено, что сила съема ниже на 85% относительно процесса редуцирования.

8. Разработан ряд новых способов и устройств для получения рифленых оболочек. Предложенные способы и устройства позволяют получать рифли или сетку рифлей на внутренней поверхности (патенты № 2789639, 2787911, 2758351, 2796090, 2654410) или на внешней и внутренней поверхностях одновременно (патенты № 2753075, 2755137).

9. Разработанные новые способы и устройства для пластического формоизменения, вторичные математические модели, а также практические рекомендации по расчету технологических процессов рифления цилиндрических оболочек, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, апробированы и используются в производстве предприятий ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева», АО «ТОЗ-МЕТИЗ». Отдельные результаты выполненной диссертационной работы использованы на кафедре «Механика и процессы пластического формоизменения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» в научно-исследовательской работе студентов и лекционных курсах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в изданиях по списку ВАК.

1. Corrugation of the Inner Surface of a Cylindrical Shell by Local Plastic Deformation / V. D. Kukhar', V. A. Korotkov, S. S. Yakovlev, A. A. Shishkina // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 3. – P. 278-280.

2. Corrugation by Local Plastic Deformation / V. D. Kukhar, V. A. Korotkov, S. S. Yakovlev [et al.] // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, No. 3. – P. 343-345.

3. Формование рифленой внутренней поверхности стальной цилиндрической оболочки локальным деформированием / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Черные металлы. – 2023. – № 5. – С. 72-75.

4. Исследование процесса рифления внутренней поверхности алюминиевой цилиндрической оболочки / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Цветные металлы. – 2024. – № 4. – С. 92-96.

5. Пасынков, А. А. Исследование повреждаемости и полей Гартфилда в стальном полуфабрикате при рифлении внутренней поверхности / А. А. Пасынков, С. С. Яковлев, А. И. Гасанов // Черные металлы. – 2022. – № 10. – С. 83-86.

6. Кухарь, В. Д. Штамповая оснастка для реализации процесса рифления / В. Д. Кухарь, С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 38-41.

7. Яковлев, С. С. Влияние глубины внедрения пуансона на температуру в заготовке и инструменте при локальном формировании рифель / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 135-138.

8. Кухарь, В. Д. Получение рифлей по способу их изготовления на внутренней поверхности цилиндрической оболочки / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 11(137). – С. 3-7.

9. Комплексное исследование рифления внутренней поверхности цилиндрической оболочки локальным пластическим деформированием / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 1. – С. 62-64.

10. Изготовление сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 120-122.

11. Яковлев, С. С. Построение вторичных математических моделей процесса локального формирования рифлей на внутренней поверхности оболочек / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, А. Е. Лазаренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 299-302.

12. Экспериментальное исследование процесса рифления локальным пластическим деформированием / В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103, № 1. – С. 55-57.

13. Яковлев, С. С. Способ получения рифлей на внутренней и наружной поверхностях оболочки / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 134-137.

14. Яковлев, С. С. Способ получения сетки рифлей на внутренней поверхности заготовки / С. С. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 182-186.

Патенты на изобретения.

1. Патент № 2654410 Российская Федерация. Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки и

устройство для его осуществления : № 2017117118 : заявл. 16.05.2017 : опубл. 17.05.2018, бюл. № 14 / Иванов Ю.А., Коротков В.А., Кухарь В.Д., Ларин С.Н., Митин О.Н., Трегубов В.И., Яковлев С.С.

2. Патент № 2796090 С1 Российская Федерация. Устройство для получения рифлений на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2022122700 : заявл. 22.08.2022 : опубл. 16.05.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

3. Патент № 2758351 С1 Российская Федерация. Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2020140573 : заявл. 08.12.2020 : опубл. 28.10.2021 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, С. Н. Ларин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

4. Патент № 2787911 С1 Российская Федерация. Способ изготовления сетки рифлей на внутренней поверхности цилиндрической оболочки : № 2022111661 : заявл. 27.04.2022 : опубл. 13.01.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

5. Патент № 2789639 С1 Российская Федерация. Устройство для получения сетки рифлей на внутренней поверхности оболочки : № 2022110698 : заявл. 19.04.2022 : опубл. 06.02.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

6. Патент № 2755137 Российская Федерация. Способ получения рифлей ромбовидной формы на наружной и внутренней поверхностях цилиндрической оболочки : № 2020140223 : заявл. 07.12.2020 : опубл. 13.09.2021, бюл. № 26 / Яковлев С.С., Коротков В.А., Ларин С.Н., Кухарь В.Д., [и др].

7. Патент № 2753075 Российская Федерация. Устройство для получения рифлей ромбовидной формы на наружной и внутренней поверхностях цилиндрической оболочки : № 2020140669 : заявл. 08.12.2020 : опубл. 11.08.2021, бюл. № 23 / Яковлев С.С., Коротков В.А., Ларин С.Н., Кухарь В.Д., [и др].

Подписано в печать 07.10.25.

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. .

Тираж 100 экз. Заказ № .

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95