

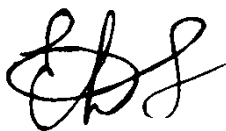
ЕВДОКИМОВ ДАНИЛА ВАЛЕРИЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКАТКИ ДВУХСТОРОННИХ
ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Евсюков Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологий обработки
давлением МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: Ерисов Ярослав Александрович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой обработки металлов
давлением ФГАОУ «Самарский университет»

Морозов Сергей Викторович,
кандидат технических наук, заместитель
директора филиала АО «ОДК» «НИИД»

Ведущая организация: НИТУ МИСИС

Защита состоится «_____» _____ 2026 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании
диссертационного совета 24.2.331.01 МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

Телефон для справок: 8-499-263-66-33, доб. 36-28

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

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



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Кольца из титановых сплавов благодаря высокой удельной прочности, отличной термостойкости и коррозионной стойкостью нашли широкое применение в аэрокосмической и авиационной отраслях. В свою очередь кольца из сплава ВТ6 можно встретить в ответственных узлах гражданских самолетов и ракет-носителей.

Основным способом изготовления подобных бесшовных колец является раскатка. Технологический процесс определяется кинематическими зависимостями валков раскатного стана, поиск корректного движения валков сложная задача, так как зависит от формы сечения кольца, габаритных размеров и свойств материала. Скорость подачи оправки значительно влияет на характеристики процесса: время раскатки, величину силы на оправке и осевых валках, распределение температуры и деформации по объему кольца.

Неоптимальное движение оправки стана является причиной возникновения технологических дефектов, таких как незаполнение профиля валков, поверхностные трещины и овальность. Овальность приводит к необходимости дополнительной операции правки, что снижает производительность процесса. В случае образования поверхностных трещин необходимо увеличивать припуски на механическую обработку, что повышает расход материала. Также значительное незаполнение профиля валков не подлежит исправлению и приводит к отбраковке изделия. Во время раскатки двухфазных титановых сплавов локальный перегрев из-за деформационного разогрева может привести к полиморфному превращению и ухудшению конечных механических свойств. Существующие методы определения скорости подачи оправки раскатного стана имеют существенные расхождения с реальным характером протекания процесса раскатки и не позволяют в должной мере контролировать размеры и свойства получаемых колец.

Целью работы является повышение производительности раскатки двухсторонних профильных колец из сплава ВТ6 за счет определения оптимальной скорости подачи оправки раскатного стана.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих технологических процессов и математических моделей радиально-осевой раскатки. Наметить направления исследований.
2. Определить ключевые кинематические параметры, влияющие на формирование дефектов, механические свойства и размеры конечного изделия.
3. Разработать математическую модель процесса деформирования колец из титанового сплава ВТ6 на раскатных станах с учетом изменения скорости подачи оправки.
4. Экспериментально подтвердить качество модели, оценив сходимость расчетных и фактических данных по геометрическим, силовым и кинематическим характеристикам процесса.
5. Определить технологические параметры процесса раскатки двухстороннего профильного кольца из титанового сплава ВТ6 для условий действующего производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Область исследования. Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки.

Объектом исследования является процесс пластического деформирования профильных колец из титанового сплава ВТ6 с внешним диаметром от 500 мм до 1000 мм, толщиной от 30 мм до 200 мм и высотой от 100 мм до 400 мм на раскатных станах. В рамках исследования делался акцент на кольцах с горизонтальной осью симметрии и постоянной высотой. К такой группе можно отнести кольца прямоугольного сечения, с двумя фланцами у торцов, с фланцем по середине сечения (Рисунок 1).



Рисунок 1. Исследуемые профили колец

В качестве **предмета исследования** выступает скорость подачи оправки раскатного стана.

Получены следующие результаты, имеющие **научную новизну**:

1. Математическая модель процесса раскатки, учитывающая формирование профиля кольца, возможный перегрев материала и деформацию кольца в радиальном направлении.
2. Зависимости скорости подачи оправки раскатного стана от геометрических и физических характеристик колец на разных этапах раскатки.

Практическая значимость исследования заключается в следующих результатах:

1. Рекомендациях по назначению скорости подачи оправки для раскатки колец с внешним диаметром от 500 мм до 1000 мм, толщиной от 30 мм до 200 мм и высотой от 100 мм до 400 мм.
2. Полученной кинематической зависимости движения оправки для технологии изготовления двухстороннего профильного кольца из сплава ВТ6 в условиях производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», обеспечивающих геометрическую форму и необходимые свойства за меньшее количество технологических переходов.

Методы исследования. Экспериментальные исследования на механические свойства осуществлялись на испытательной машине H50KS-M. Маятниковый копер IT406E использовался для оценки ударной вязкости. Определение твердости осуществлялось с помощью твердомера ZHB3000. Раскатка колец осуществлялась на стане RAW 400/200-3500/800, а измерение окончательных колец проводились штангенциркулем ШЦ-Ш-320-1000-0,1 и нутромером НМ 1250. Исследования микроструктуры проводились с использованием микроскопа Olympus GX5. Теоретические исследования осуществлялись на базе моделирования методом конечных элементов процессов раскатки в QForm.

Достоверность результатов обеспечивалась корректным использованием математического аппарата, известных методов экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, сходимостью математической модели процесса раскатки с экспериментальными данными (расхождение не более 11%), а также

применением полученных результатов в технологических процессах ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса раскатки двухсторонних профильных колец из сплава ВТ6, показывающие особенности заполнения профиля валков, перегрев материала и степень деформации.
2. Метод определения скорости подачи оправки раскатного стана на разных этапах раскатки, учитывающий геометрические и физические характеристики процесса раскатки.
3. Рекомендации по определению допустимой скорости подачи оправки, обеспечивающие устойчивый процесс раскатки, необходимые размеры и свойства конечного изделия.
4. Технологический процесс изготовления двухстороннего профильного кольца на радиально-осевом раскатном стане в условиях производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Личный вклад автора состоит в непосредственной постановке целей и задач исследования, формулировке основных допущений и выработке методики поиска решений, разработке математической модели процесса раскатки колец, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке экспериментальных данных и формулировке практических рекомендаций по назначению скорости подачи оправки раскатного стана.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены на научных конференциях: Тринадцатая всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2020), на XIV Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2022), на VIII Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки «Ульяновский НИАТ» (Ульяновск, 2023), на XVIII Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов

«Будущее машиностроения России» (Москва, 2025). II Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств (МашТех-2025)» (Москва, 2025).

Структура работы. Диссертация изложена на 145 страницах и состоит из введения, пяти глав основного текста и общих выводов, содержит в себе 87 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 134 наименований.

Публикации. В рамках исследовательской работы было опубликовано 7 научных трудов в том числе 2 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ и 1 научной статье, индексируемой в базе данных SCOPUS общим объемом 3,15 печ. л.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении раскрыта актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В Главе 1 представлен обзор существующих процессов раскатки колец и классификации номенклатуры изделий. Рассмотрены различные схемы раскатки, включая радиальную, радиально-осевую, закрытую и полузакрытую, а также их влияние на формирование профиля кольца. Описаны дефекты, возникающие при раскатке, такие как отклонение от округлости, конусность, «рыбий хвост» и методы их предотвращения.

Установлено значимое влияние скорости подачи оправки на основные характеристики процесса: распределение температуры и деформации по объему кольца, величину силы на оправке и осевых валков, качество микроструктуры, образование трещин, время раскатки, скорость роста внешнего диаметра, условие захвата и проникновения валков в заготовку, заполнение профиля валков, появление овальности.

Представлен способ определения движения валков на базе аналитических формул, которые учитывают условие захвата материала между валками. Подробно проанализированы современные подходы подбора оптимальных скоростей валков, использующие регрессионные уравнения. Подчеркивались недостатки

существующих подходов и необходимость дополнительных исследований для проверки качества моделей и их применения к различным типам колец.

Глава 2 посвящена построению и оценки качества математической модели процесса раскатки колец на базе метода конечных элементов в программном обеспечении QForm и анализу существующих подходов.

Моделирование позволяет анализировать все стадии процесса с точки зрения напряженно-деформированного состояния, образования дефектов, энергосиловых параметров. Возможно учитывать теплообмен между частями нагретой заготовки, разогрев металла за счет пластической деформации, теплообмен между заготовкой, окружающей средой и инструментом.

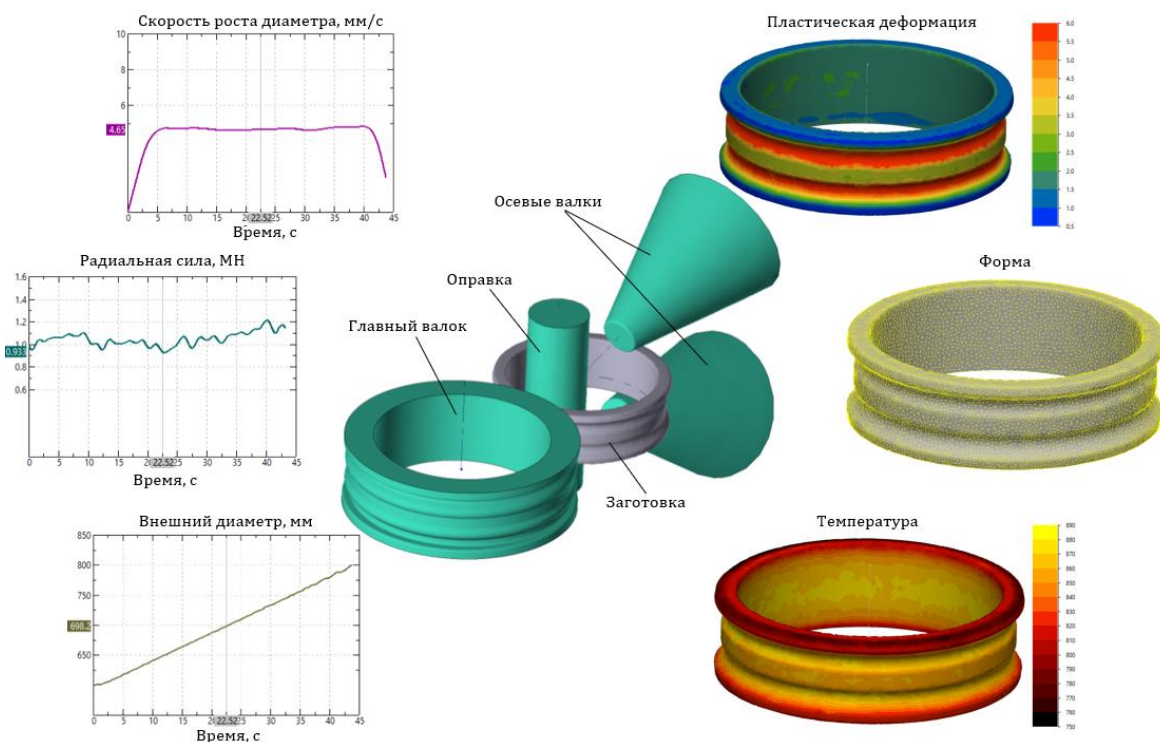


Рисунок 2. Анализ процесса раскатки в QForm

Проверка качества математической модели процесса раскатки осуществлялась сравнением расчетных величин с данными, полученными на раскатном стане по следующим параметрам: скорость роста диаметра, внешний диаметр кольца, толщина кольца, сила на оправки. В условиях производственной деятельности ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» исследовались многопереходные процессы раскатки профильных колец с горизонтальной осью симметрии из титанового сплава ВТ6 (Рисунок 3).

Технология №1Переход №1: $v_D = 2$ мм/с $D_1 = 430$ мм $H_1 = 211$ мм $d_1 = 276$ ммПереход №2: $v_D = 4,5$ мм/с $D_2 = 782$ мм $H_2 = 211$ мм $d_2 = 688$ мм

Заготовка №1: Заготовка №2:

 $D_0 = 388$ мм $D_0 = 375$ мм $H_0 = 211$ мм $H_0 = 200$ мм $d_0 = 208$ мм $d_0 = 215$ мм

Материал: ВТ6

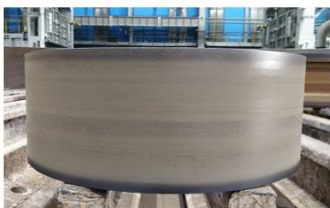
 $T_{min} = 800$ °С $T_{max} = 980$ °С $T_0 = 940$ °С v_D – скорость роста диаметра**Технология №2**Переход №1: $v_D = 2$ мм/с $D_1 = 555$ мм $H_1 = 193$ мм $d_1 = 460$ ммПереход №2: $v_D = 3$ мм/с $D_2 = 733$ мм $H_2 = 193$ мм $d_2 = 664$ ммПереход №3: $v_D = 3$ мм/с $D_3 = 947$ мм $H_3 = 193$ мм $d_3 = 857$ мм

Рисунок 3. Анализируемые технологии

Заготовки под раскатку изготавливались на трехпозиционном гидравлическом прессе с номинальным усилием 80МН. Раскатка осуществлялась на радиально-осевом раскатном стане RAW 400/200-3500/800, скорость холостого хода 5 мм/с, скорость выхода на кривую раскатки 1 мм/с. Температура предварительного нагрева 950 °С, время транспортировки от печи до стана 35 с.

Характер зависимостей, полученных из моделирований, повторяет данные с раскатного стана. Средняя погрешность по скорости роста диаметра 8,8 %, по толщине кольца 4,2 %, по внешнему диаметру кольца 1,9 %, по силе на оправке 10,4 %. С другой стороны, на установившейся стадии раскатки скорость роста диаметра равна своим максимальным значениям, погрешность для которой в среднем равнялась 5 %. Разница между максимальным значением силы для расчетов и экспериментальных данных не превышала 4 %.

Анализ существующих подходов подбора скоростей валков показал, что модели могут использоваться только для определенного типа размера кольца, представляя собой последовательный перебор вариантов моделирования с квадратичной аппроксимацией.

Глава 3 посвящена разработке собственной математической модели определения скорости подачи оправки, которая позволяет гибко подбирать

кинематические зависимости и не требует большого объема данных обеспечивая универсальный подход поиска параметров на основе решения задачи оптимизации, уравнение (1).

$$\min_{l(v)} G(v, p), \quad (1)$$

где G — целевая функция качества раскатки;

v — изменяемые кинематические параметры;

p — дополнительные параметры;

$l(v)$ — функции, ограничивающие значения v .

Решение оптимизационной задачи подразумевает наличие следующих компонент: целевую функцию и параметры, влияющие на неё, метод оптимизации, критерий останова, среда в которой можно вычислять целевую функцию.

В качестве управляющего кинематического параметра была принята скорость подачи оправки, поскольку за счет движения оправки происходит непосредственное деформирование материала, что оказывает существенное влияние на устойчивое положение кольца в раскатном стане, точность геометрии и распределение температуры. Осевые валки не сближались во время раскатки, а только препятствовали уширению кольца. Была разработана кусочно-линейная параметризация скорости подачи оправки (Рисунок 4). Весь процесс раскатки разбивался на n участков равными t_i — время, за которое произойдет i -ый оборот кольца. На каждом таком участке зависимость скорости оправки от времени задавалась линейной функцией, уравнение (2). Свободный коэффициент равен величине скорости подачи оправки в начале оборота $v_{r(i-1)}$. Значение углового коэффициента определяет ускорение оправки a_i для текущего оборота кольца. Для каждого участка времени t_i независимо определяются значения коэффициентов функции аппроксимации путем решения задачи оптимизации.

$$v_{ri} = a_i t_i + v_{r(i-1)} \quad (2)$$

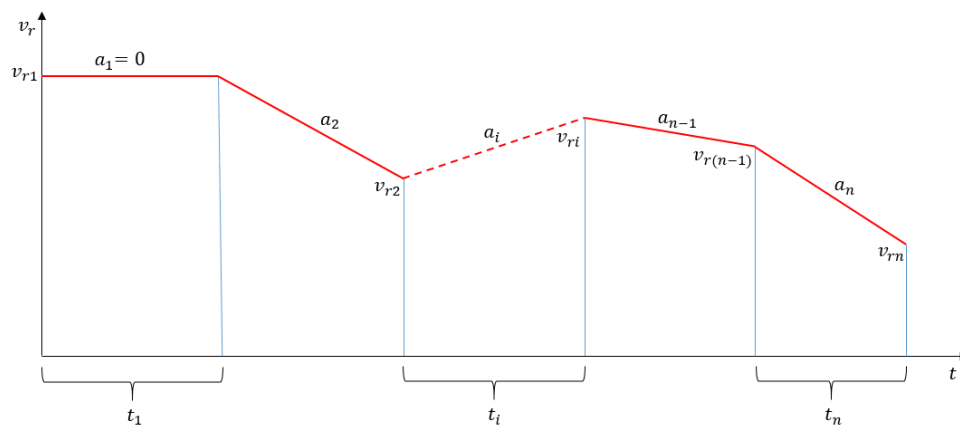


Рисунок 4. Формализация скорости подачи оправки

Использовались дополнительные параметры p , которые позволяли эффективнее определять скорость подачи оправки в зависимости от стадии процесса, формы профиля и силовых характеристик. К таким параметрам были отнесены текущий внешний диаметр D , площадь сечения кольца между главным валком и оправкой S_C , отношение периметра сечения кольца к периметру описанного прямоугольника L_P , стандартное отклонение диаметра кольца $\sigma(D)$, жесткость кольца как отношение толщины кольца S к диаметру D и отношение толщины кольца S к его высоте H , медиана температуры M_T , стандартное отклонение температуры в очаге пластической деформации $\sigma(T)$, 5-% и 95-% перцентиль распределения температуры T_{05} и T_{95} , текущая нагрузка на оправке P_F .

Были разработаны три целевых функции, чтобы получить необходимую форму кольца с заданными свойствами. Первая отвечает за устойчивое протекание процесса и связана с относительным изменением площади сечения кольца между оправкой и главным валком, уравнение (3). Допустимое значение относительного изменения площади сечения за один оборот кольца задавалось равным 15%. При превышении такого значения гарантированно появляются дефекты связанные с искажением формы кольца.

$$G_\varepsilon = \max(0, g_\varepsilon(a) - m_\varepsilon g_{\varepsilon max}), \quad (3)$$

где m_ε — коэффициент запаса по деформации;

$g_\varepsilon(a)$ — относительное изменение площади сечения кольца за оборот;

$g_{\varepsilon max}$ — допустимое относительное изменение площади сечения кольца за оборот.

Во время раскатки может происходить деформационный разогрев материала и полное полиморфное превращение титана в однофазную β – область, что приводит к ухудшению конечных свойств изделия. Поэтому одна из целевых функций связана с максимальной температурой материала, уравнение (4), которая позволила соблюдать температурный режим деформирования.

$$G_T = \max(0, T_{max}(a) - m_T T'_{max}), \quad (4)$$

где m_T – коэффициент запаса по температуре;

$T_{max}, ^\circ\text{C}$ – максимальная температура заготовки;

$T'_{max}, ^\circ\text{C}$ – верхняя граница температурного диапазона раскатки.

Контроль заполнения профиля осуществлялся в 8 сечениях, путем сравнения текущего и целевого контура кольца (Рисунок 5). Для каждого сечения вводилась характеристика δ , которая определялась средним расстоянием d для всех точек контура, уравнение (5).

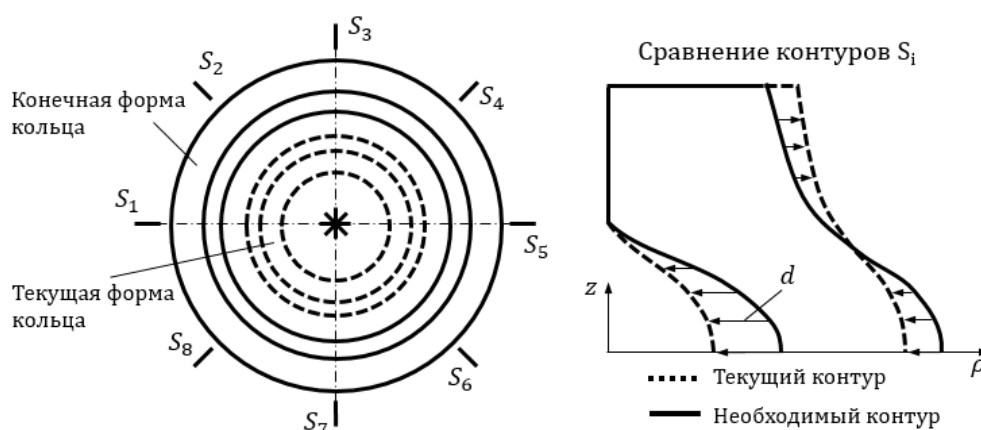


Рисунок 5. Анализ заполнения профиля кольца

$$\delta = \frac{1}{m} \sum_j^m d_j, \quad (5)$$

где m – количество точек на контуре.

Целевая функция формируется как сумма двух компонент, уравнение (6). Первая компонента G_F соответствует среднему приближению текущего контура к целевому и равна средней дельте по всем сечениям. Вторая компонента G_σ показывает неравномерность заполнения профиля и вычисляется как стандартное отклонение дельты.

$$G_C = G_F + G_\sigma; G_F = \frac{1}{n} \sum_i^n \delta_i; G_\sigma = \sigma(\delta), \quad (6)$$

где n – количество рассматриваемых сечений.

В итоге сформировалась задача минимизации по трем целевым функциям для каждого оборота кольца, уравнение (7).

$$\min_a (G_\varepsilon(a), G_T(a), G_C(a)) \quad (7)$$

Для расчета целевых функций использовалось программное обеспечение QForm. В работе применялись следующие методы оптимизации – байесовская оптимизация, бинарный поиск и метод секущих, что обусловлено унимодальностью целевых функций и отсутствием возможности аналитического вычисления производных.

Критерий остановки оптимизации состоял из трех групп. Первая соответствовала критерию оптимальности Парето, если значения целевых функций принадлежат Парето-фронту, то найденное решение считается оптимальным. Вторая определяла количество итераций для каждого оборота кольца, чтобы ограничить количество моделирований. Третья группа отвечала за остановку процесса при не валидном состоянии системы. Например, проверка на наличие вращения кольца, оценка переохлаждения материала. Рассмотренные критерии используются для каждого участка времени t_i , при этом процесс раскатки считается полностью завершенным, когда внешний диаметр кольца равен требуемому значению диаметра.

Таким образом был сформулирован итеративный метод определения кусочно-линейной зависимости скорости подачи оправки от времени, представленный на блок-схеме (Рисунок 6). На каждой итерации осуществляется автоматическое взаимодействие метода оптимизации с QForm, анализ целевых функций и параметров движения оправки.

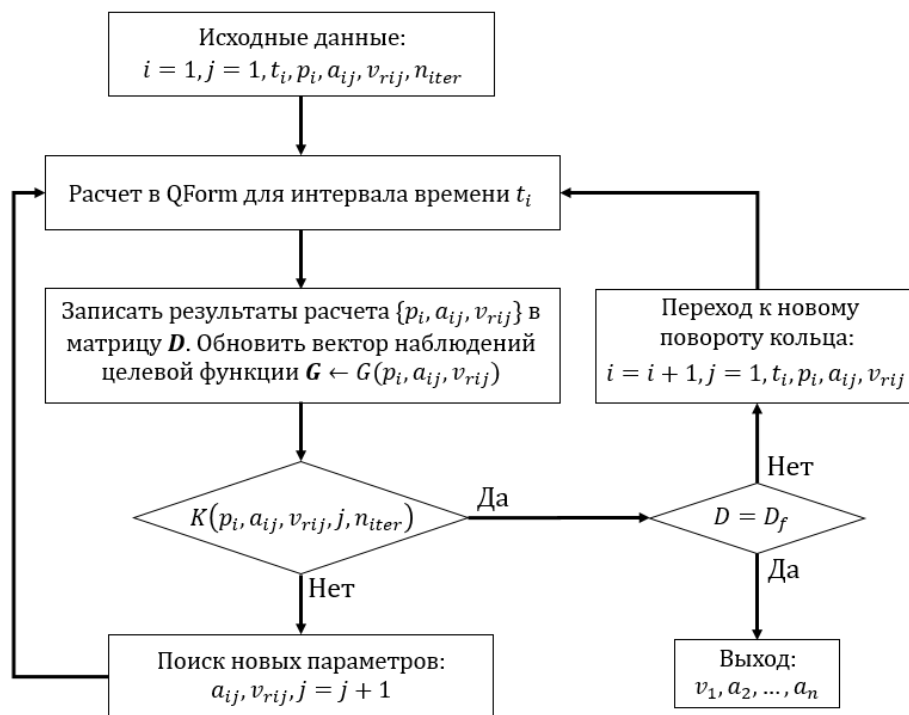


Рисунок 6. Схема определения скорости подачи оправки

Глава 4 посвящена анализу поведения характеристик кольца во время раскатки, а также выявлению взаимосвязей между геометрическими и температурными характеристиками процесса и скоростью подачи оправки.

На базе проведенных моделирований определено, что большие значения ускорения оправки приводили к искажению формы кольца, но позволяли уменьшить интенсивность охлаждения. При этом изменение скорости значительно влияет на форму кольца при больших диаметрах в конце процесса раскатки. Небольшие значения скоростей обеспечивали более устойчивый процесс раскатки, но могли привести к большому охлаждению материала. С точки зрения поиска оптимальной скорости подачи оправки, необходимо найти максимальное значение, при котором размеры и форма кольца не будут искажаться, а деформирование будет проходить в требуемом диапазоне температур.

Существующие оценки возможного диапазона изменения скорости подачи оправки существенно завышены и не соответствуют особенностям протекания процесса раскатки, что приводит к нарушению формы колец. Поэтому определены улучшенные значения максимальной скорости подачи оправки для колец с внешним диаметром от 500 мм до 1000 мм, толщины от 30 мм до 200 мм и высоты

от 100 мм до 400 мм на базе решения поставленной задачи оптимизации (Рисунок 7). Так было произведено 2463 моделирования оборотов кольца с изменением скорости подачи оправки от 0 мм/с до 4 мм/с.

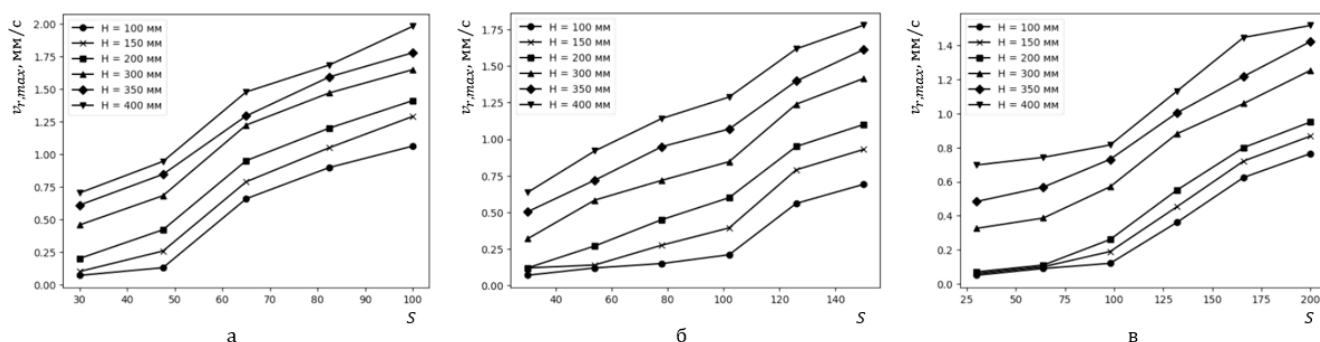


Рисунок 7. Зависимость максимальной скорости подачи оправки от толщины S и высоты H кольца при разных внешних диаметрах:

а) 500 мм, б) 750 мм, в) 1000 мм

Были проведены расчеты раскаток для наиболее востребованных профилей колец в производственной деятельности ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» с внешними фланцами у торцов, с внутренним центральным фланцем, а также кольца с внутренними и внешними фланцами. Результаты показали, что разработанная модель определения скорости подачи оправки сходится к зависимостям, которые согласуются с теоретическими данными и позволяет получить стабильный процесс раскатки с полным заполнением профиля в необходимом температурном диапазоне. При этом из предложенных методов оптимизации наилучшими характеристиками обладала байесовская оптимизация. С другой стороны, полученные результаты подтверждают корректность использования кусочно-линейной функции для скорости подачи оправки.

В Главе 5 описывалось практическое использование результатов работы на базе ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА». Во время изготовления профильного кольца технология 2 (Рисунок 3) к концу третьего перехода температура на поверхности опустилась до 750 °С, что привело к образованию трещин, глубина которых в среднем составила 2-3 мм (Рисунок 8).

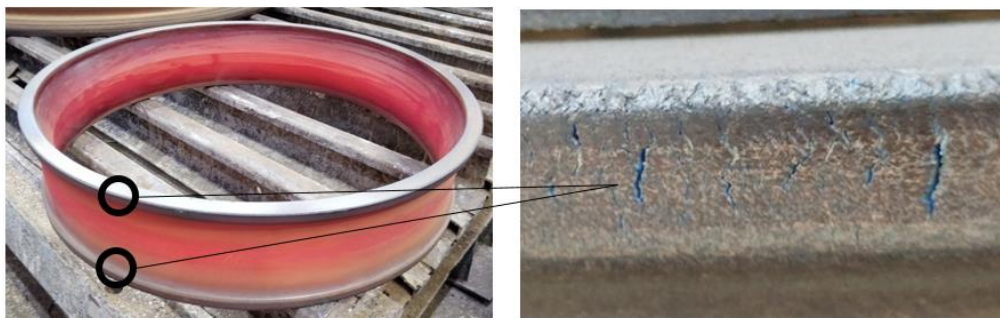


Рисунок 8. Образование трещин на поверхности

Для такой технологии были подобраны скорости подачи оправки с помощью разработанного метода, что позволило избежать переохлаждения поверхности и образованию трещин, а также объединить 2 и 3 переход в один, увеличивая производительность процесса. Максимальное значение скорости роста диаметра почти достигало 6 мм/с, скорость подачи оправки постепенно уменьшалась от 0,65 мм/с до 0,05 мм/с (Рисунок 9). Средняя погрешность для внешнего диаметра, толщины кольца и силы на оправке были равны 2%, 5% и 11% соответственно; максимальные значения скорости роста диаметра отличались не более чем 2,3 %.

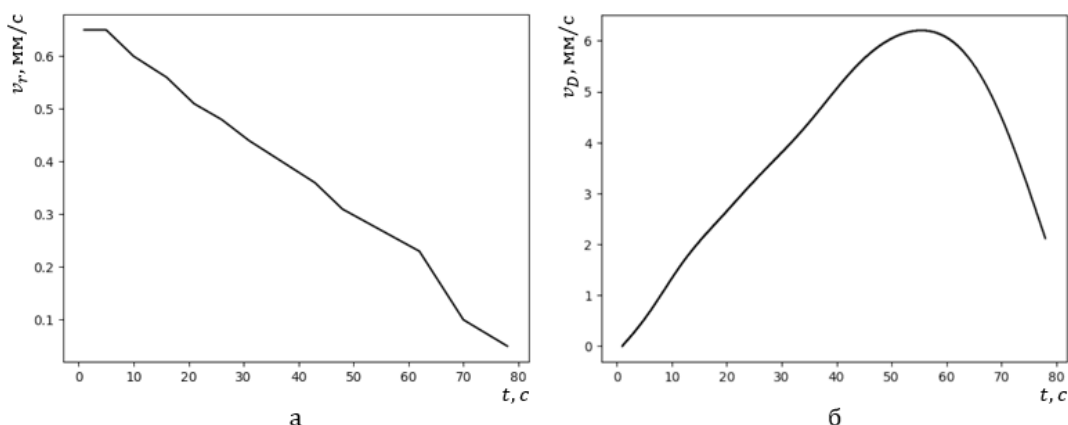


Рисунок 9. Подобранные кинематические зависимости: а) скорость подачи оправки, б) скорость роста диаметра

После раскатки кольца по новой кинематикой схеме проводились измерения геометрических параметров кольца, осуществлялись испытания на механические свойства, оценивалась макро- и микроструктура. Размеры кольца находились в необходимом допуске (Таблица 1). Испытания на механические свойства проводились при комнатной температуре на 2-х образцах, вырезанных в тангенциальном направлении. Все свойства соответствовали необходимым значениям (Таблица 2). Визуальный анализ макроструктуры показал отсутствие

нарушений сплошности, металлических и неметаллических включений, участков с резко выраженными линиями интенсивного течения металла (Рисунок 10). Микроструктура после раскатки кольца получилась глобулярная структура с незначительно вытянутой α -фазой, что соответствует баллу 2, согласно инструкции ВИАМ № 1054.

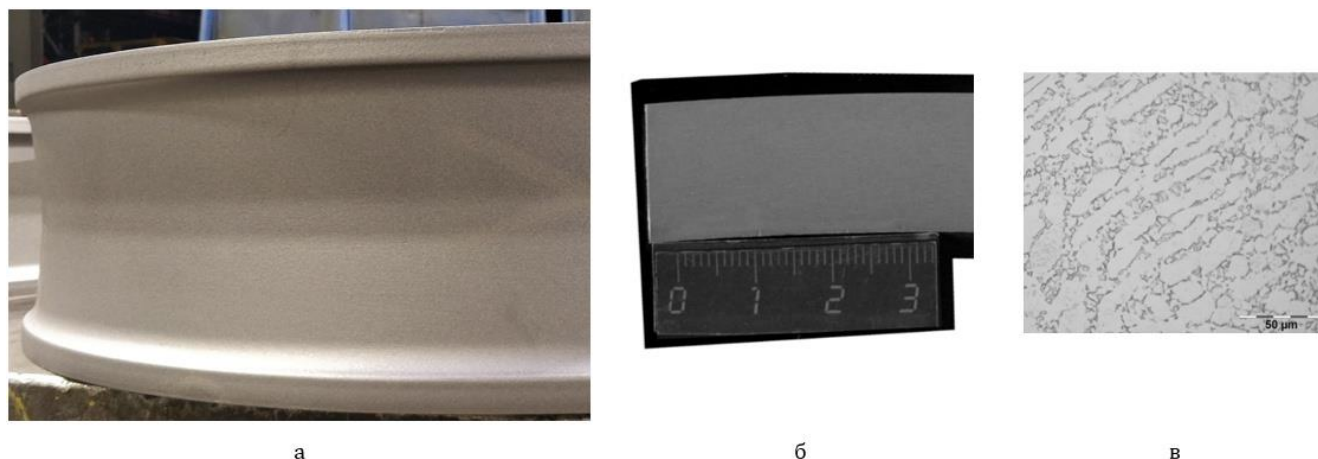


Рисунок 10. Результаты раскатки: а) состояние поверхности окончательного изделия, б) макроструктура, в) микроструктура

Таблица 1.

№	Величина	Измерения		Моделирование		Допуск
		Min	Max	Min	Max	
1	D_{out} , мм	947	950	946	948	947^{+5}_{-2}
	D_{in} , мм	897	899	896	898	897^{+2}_{-5}
2	D_{out} , мм	949	951	946	948	947^{+5}_{-2}
	D_{in} , мм	896	897	895	897	897^{+2}_{-5}
3	D_{out} , мм	915	917	915	917	916^{+5}_{-2}
	D_{in} , мм	853	854	855	857	857^{+2}_{-5}
—	H , мм	194	194	197	198	195^{+5}_{-2}

Таблица 2.

Образец	№1	№2	Допуск
σ_B , МПа	993,7	990,5	≥ 883
δ , %	16	16,7	≥ 8
ψ , %	44,9	44,7	≥ 22
KCU , Дж/см ²	53,3	51,1	$\geq 29,4$
HRB , мм	3,5	3,5	3,3-3,8

Таким образом использование технологического процесса с повышенной скоростью подачи оправки, полученной с помощью разработанного метода, позволило получить кольцо без поверхностных дефектов за меньшее количество переходов с требуемыми механическими свойствами и высоким качеством микро- и макроструктуры.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения производительности процесса радиально-осевой раскатки с получением необходимых эксплуатационных свойств конечного изделия за счет определения оптимальной скорости подачи оправки раскатного стана.

Научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что существующие рекомендации определения скорости подачи оправки раскатного стана имеют существенные расхождения с реальным характером протекания процесса раскатки и не позволяют в должной мере контролировать размеры и микроструктуру получаемых колец.

2. Разработанная математическая модель радиально-осевой раскатки колец позволяет определять геометрические и силовые характеристики процесса в среднем со следующей точностью: толщину кольца с погрешностью, не превышающей 4,2 %, внешний диаметр кольца с погрешностью, не превышающей 1,9 %, максимальную силу деформирования с точностью 4 %.

3. Разработанный подход определения скорости подачи оправки раскатного стана позволил оптимизировать процесс раскатки для каждого оборота, обеспечив температурный режим деформирования и необходимую геометрическую точность изделия. Погрешность расчета скорости роста диаметра не превышала 8,8 %.

4. Проведенное исследование показало, что оптимальная скорость подачи оправки для колец с внешним диаметром от 500 мм до 1000 мм, толщиной от 30 мм до 200 мм и высотой от 100 мм до 400 мм не должна превышать 2,5 мм/с.

5. Использование разработанного метода определения скорости подачи оправки для раскатки двухстороннего профильного кольца из сплава ВТ6 в условиях производственной деятельности ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» обеспечило получение изделия необходимой формы и размеров с требуемыми механическими свойствами за меньшее количество переходов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Евдокимов Д. В. Исследование влияния кинематических параметров валков на качество раскатки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. №2. С. 23-28. (0,4 п.л.).
2. Евдокимов Д. В. Исследование способа оценки отклонения от округлости кольца во время раскатки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. №7. С. 11-15. (0,25 п.л.).
3. Alimov A., Evdokimov D., Evsyukov S. Temperature and strain rate dependent friction model for hot forming of Ti-6Al-4V titanium alloy // Materialstoday: Proceeding. 2019. V 19, № 5. P. 1994-1997. (0,87 п.л./ 0,27 п.л.).
4. Евдокимов Д. В., Евсюков С. А. Построение модели рекристаллизации сплавов для моделирования // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России. Материалы VIII Всероссийской научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки. 2023. С. 59 - 69. (0,52 п.л./ 0,26 п.л.).
5. Евдокимов Д. В. Особенности прогнозирования микроструктуры крупногабаритных поковок // Сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Т. 1. 2022. С. 108 – 114. (0,32 п.л.).
6. Евдокимов Д. В. Разработка методов деформирования крупногабаритных колец из титановых сплавов // [Электронный ресурс] Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции. 2020. URL: studvesna.ru?go=articles&id=2786. (0,18 п.л.).
7. Евдокимов Д.В., Тарасов И.С., Евсюков С.А. Совершенствование способа определения скорости подачи оправки во время раскатки // Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств (МашТех-2025): II Международная научно-техническая конференция: сборник материалов. 2025. С. 189-194. (0,61 п.л./ 0,21 п.л.).