

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Скрипаленко Михаил Михайлович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХВАЛКОВОЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ И
РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАНА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПРОЦЕССА

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени доктора технических наук

Научный консультант - проф., д.т.н. Романцев Борис Алексеевич

Москва-2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для получения сплошных и полых круглых заготовок широко применяются процессы винтовой прокатки. При этом полые заготовки получают преимущественно прошивкой в двухвалковых станах, а сплошные – прокаткой в трёхвалковых станах. В силу особенностей напряжённо-деформированного состояния (НДС) при двух- и трёхвалковой схемах винтовой прокатки нет возможности получать одинаково качественные изделия и прошивкой, и прокаткой по какой-либо одной из схем. При прокатке в двухвалковом стане имеет место осевое разрушение, при трёхвалковой схеме заготовка склонна к кольцевому разрушению. Не разработано единой и экспериментально подтверждённой методики прогнозирования вероятного разрушения при двух- и трёхвалковой схемах винтовой прокатки.

Результаты отечественных и зарубежных исследований показывают, что в процессах винтовой прокатки, в первую очередь радиально-сдвиговой прокатки, происходит повышение прочностных и пластических свойств, измельчение зёрненной структуры. В связи с указанным интерес к процессам винтовой прокатки непрерывно растёт. Можно отметить две тенденции в проводимых исследованиях: оценка особенностей НДС, чаще всего без детальной экспериментальной оценки, а также исследование влияния процессов винтовой прокатки на формирование структуры и свойств. Перспективным представляется совмещение двух указанных направлений для подтверждения особенностей НДС путём анализа зёрненной структуры и свойств получаемого винтовой прокаткой металла. Целесообразно отметить также, что при оценке структуры и свойств, формируемых винтовой прокаткой, в опубликованных работах исследуется стационарная, то есть установившаяся стадия винтовой прокатки. При этом экспериментально доказано, что процесс разрушения начинается на нестационарной стадии прокатки и формоизменение на этой стадии приводит к появлению утяжины на торцах получаемых прутков. Сравнение свойств и особенностей зёрненной структуры детально не проводилось для стационарной и нестационарной стадий прокатки.

В рамках данной работы исследовано изменение свойств и особенностей НДС на стационарной и нестационарной стадиях двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки, при этом выявлена сильная корреляционная зависимость между изменением размера зерна и интенсивностью деформации. Предложена и проверена экспериментально методика прогнозирования вероятного разрушения при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке, двухвалковой прошивке. По результатам исследований предложен новый способ винтовой прокатки с использованием двух пар приводных валков, проведено компьютерное

моделирование и анализ результатов, создана действующая модель и в ней проведены опытные прокатки и прошивки, показаны преимущества предлагаемого способа по сравнению с существующими. На основе проведённых исследований создан лабораторно-промышленный четырёхвалковый стан горячей винтовой прокатки. Предложена и реализована для винтовой прокатки методика создания трёхмерной модели зерна, методика может быть использована для других процессов обработки металлов давлением. Для случая трёхвалковой винтовой прокатки выявлена взаимосвязь между кинематическим и структурным состоянием заготовки. На всех этапах исследования осуществлялось совместное использование компьютерного моделирования и экспериментальной оценки.

Диссертация выполнена в рамках:

- Проект «Старт-1» по теме «Разработка и изготовление макета четырёхвалкового стана винтовой прокатки» (договор №3211ГС1/48664 от 03.09.2019)

- Проект РНФ 23-19-00775 Исследование и разработка процесса пластической деформации труднодеформируемых сплавов путём прокатки сплошных и полых заготовок на многовалковом стане винтовой прокатки новой отечественной конструкции.

Степень разработанности темы. Вопрос разрушения металла заготовок в процессах винтовой прокатки исследовался, начиная с 1920-х гг. Этим вопросом занимались П.Т. Емельяненко, А.П. Чекмарев, И.А. Фомичев, K.Gruber, E. Siebel, В.С. Смирнов, Воронцов В.К., Белевитин В.А., Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Потапов И.Н., Полухин П.И., Тетерин П.К., Романцев Б.А., Галкин С.П., Никулин А.Н., Михайлов В.К., Зимин В.Я., Erman E. С появлением вычислительных сред конечно-элементного анализа появились новые возможности прогнозирования разрушения. В данном направлении проводили исследования Chiluveru S., Berazategui D.A., Fanini S., Chastel Y., Галкин С.П. При этом получаемые модели либо не верифицировались, либо не соответствуют имеющимся теоретическим представлениям и экспериментальным результатам, применимы только для одного режима/схемы прокатки, одной марки материала. Представляется актуальным разработка моделей, способных без дополнительной адаптации из-за смены режимов или марки прокатываемых материалов, эффективно оценивать и прогнозировать разрушение в процессах винтовой прокатки.

Важным направлением при исследовании процессов винтовой прокатки является оценка получаемой микроструктуры. Оценивали получаемую микроструктуру и её особенности при различных схемах прокатки Потапов И.Н., Полухин П.И., Романцев Б.А., Галкин С.П., Stefanik A., Pater Z., Богатов А.А., Панов Е.И., Лаповок Р.Е., Найденкин Н.В., Лопатин Н.В., Арбуз А.С., Найзабеков А.Б., Деревягина Л.С., Белов Н.А., Акопян Т.К., Добаткин С.В. Несмотря на большой объём проведённых исследований актуальной

остаётся задача оценки формы и ориентировки зерен при винтовой прокатке по различным схемам.

Оценка напряжённо-деформированного и кинематического состояния является одной из наиболее часто решаемых задач при исследовании процессов винтовой прокатки и прошивки. Для этой цели применяли физическое, математическое и компьютерное моделирование Потапов И.Н., Полухин П.И., Романцев Б.А., Галкин С.П., Богатов А.А., Гончарук А.В., Pater Z., Stefanik A., Найзабеков А.Б., Арбуз А.С., Гамин Ю.В., Fanini S., Komori K., Li Shengzhi. При этом на данный момент многим исследованиям не хватает экспериментального подтверждения, отсутствуют методики, позволяющие наглядно продемонстрировать связь между структурным, кинематическим и напряжённо-деформированным состоянием в процессах винтовой прокатки.

Ряд исследований посвящено возможности увеличения количества валков и осуществления прокатки по четырёхвалковой схеме. Данному вопросу посвящены исследования Ф.А. Данилова, А.З. Глейберга, В.Г. Балакина, Р.М. Голубчика, М.В. Новикова, Bartel E., Summund J., Connell P., а также специалистов компании Kocks (США). При этом в одной из схем только пара валков приводная, в остальных речь идёт о планетарной прокатке/раскатке, которая имеет существенные ограничения, в том числе конструкционные, технологические и по сортаменту. Актуальна задача разработки четырёхвалкового стана винтовой прокатки со всеми приводными валками, который мог бы применяться как для прокатки, так и для прошивки.

Цель диссертационной работы: Исследование и анализ различных деформационных схем процессов винтовой прокатки и разработка универсального четырёхвалкового стана винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования. Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ влияния существующих схем винтовой прокатки на характер изменения параметров напряжённо-деформированного состояния, кинематического состояния на структуру металла прокатываемых заготовок, для чего:

- для выявления отличительных особенностей осуществить опытные прокатки заготовок в двухвалковом и трёхвалковом станах винтовой прокатки, по результатам которых получить данные о характере изменения размера зерна и твёрдости в продольном и поперечном сечении, а также анизотропии размера зерна на нестационарной и стационарной стадиях винтовой прокатки;

- смоделировать опытные прокатки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа и оценить характер изменения параметров НДС на стационарной и нестационарной стадиях винтовой прокатки;

- сравнить данные об изменении размера зерна, твёрдости и анизотропии размера зерна, полученные по результатам опытных прокаток, с данными об изменении параметров НДС и кинематического состояния при компьютерном моделировании, оценить возможность применения компьютерного моделирования для прогнозирования изменения реологических и структурных параметров металлов и сплавов в процессах винтовой прокатки;

- разработать методику создания трёхмерной модели зерна и создать трёхмерные модели зерна до и после винтовой прокатки.

2. Провести анализ энергосиловых параметров, показателей НДС и кинематического состояния на стационарной и нестационарной стадиях винтовой прокатки при получении сплошной и полой заготовки с помощью моделирования. По результатам анализа существующих схем винтовой прокатки разработать новую деформационную схему.

3. На основе компьютерного моделирования разработать действующую модель универсального четырёхвалкового стана, провести опытные прокатки модельного материала. Создать новый универсальный четырёхвалковый стан винтовой прокатки и провести прокатку и прошивку заготовок.

4. Оценить эффективность применения различных критериев для прогнозирования разрушения при винтовой прокатке, для чего:

- провести компьютерное моделирование процессов винтовой двухвалковой и трёхвалковой прокаток и рассчитать значения коэффициента жёсткости напряженного состояния в исследуемых объёмах заготовки;

- сравнить результаты компьютерного моделирования по накопленной деформации и коэффициенту жёсткости напряженного состояния с экспериментальными данными по разрушению при двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатке;

- разработать методику прогнозирования разрушения при винтовой прокатке и прошивке с использованием данных об изменении накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряженного состояния и оценить её эффективность при двухвалковой и трёхвалковой прокатке, а также при двухвалковой прошивке.

Научная новизна:

- разработана новая универсальная энергосберегающая четырёхвалковая схема винтовой прокатки, включающая два грибовидных и два чашевидных валка, при этом все валки приводные, позволяющая осуществлять как прокатку, так и прошивку заготовок;

- показана принципиальная возможность осуществления четырёхвалковой винтовой прокатки и прошивки по схеме с приводными двумя грибовидными и двумя чашевидными валками;

- показано, что распределение среднего напряжения в пережиме, а также интенсивности деформации на нестационарной стадии при четырёхвалковой прокатке подобны распределению этих параметров при трёхвалковой винтовой прокатке и существенно отличаются от двухвалковой, при этом распределение осевой компоненты деформации в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии трёх- и четырёхвалковой прокатки имеет кольцевой характер;

- установлено, что нормализованный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма, как показало компьютерное моделирование и экспериментальная оценка, эффективен при прогнозировании вероятного разрушения заготовки из аустенитной стали при двухвалковой винтовой прокатке в стане с направляющими линейками и неэффективен при трёхвалковой винтовой прокатке медных заготовок;

- для прогнозирования вероятного разрушения в процессах винтовой прокатки и прошивки разработана методика, включающая построение траекторий точек в координатах «коэффициент жёсткости напряжённого состояния – накопленная деформация» по результатам конечно-элементного компьютерного моделирования ;

- установлено, что коэффициент анизотропии размера зерна Канз (отношение размера зерна в продольном сечении к размеру зерна в поперечном сечении) на стационарной стадии двухвалковой винтовой прокатки заготовки из аустенитной стали, полученной продольной прокаткой, преимущественно меньше единицы, а при трёхвалковой винтовой прокатке преимущественно больше единицы, при этом относительно исходной нагретой недеформированной заготовки, при двухвалковой прокатке на стационарной стадии Канз уменьшился до 2,1 раза, при трёхвалковой прокатке - до 1,7 раза, разброс значений Канз на нестационарных стадиях и двухвалковой, и трёхвалковой прокаток больше, чем на стационарной;

- выявлена взаимосвязь между кинематическим, напряжённо-деформированным и структурным состояниями заготовки из сплава ВТ6 при трёхвалковой винтовой прокатке с углом подачи 18 градусов и коэффициентом вытяжки 2,5 (за 3 прохода) ;

- разработана методика создания трёхмерной модели зерна при обработке металлов давлением, на основе методики получена трёхмерная модель зерна при трёхвалковой винтовой прокатке заготовки из аустенитной стали;

Практическая значимость работы

- разработана и экспериментально проверена методика прогнозирования вероятного разрушения при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке, двухвалковой прошивке;

- разработаны методики создания трёхмерной модели зерна, оценки устойчивости протекания процессов винтовой прокатки, оценки размеров поверхностной

мелкозернистой, переходной и центральной крупнозернистой области при винтовой прокатке;

- разработан способ горячей прокатки и прошивки в четырёхвалковом стане винтовой прокатки и показано, на основе компьютерного моделирования, что при четырёхвалковой прокатке, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой, наблюдается наименьший перепад значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния, что создаёт условия снижения неравномерности напряжений и, соответственно, снижает вероятность разрушения заготовок;

- создана действующая модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки и проведены прошивки и прокатки заготовок из модельного материала;

- спроектирован и создан универсальный лабораторно-промышленный четырёхвалковый стан винтовой прокатки, позволяющий осуществлять как прокатку, так и прошивку заготовок.

Практическая значимость подтверждена актами об использовании результатов работы в АО «Ступинская металлургическая компания» и в институте экотехнологий и инжиниринга НИТУ МИСИС, а также результаты исследований использованы при разработке действующей модели в ООО «МИП СТАН» и лабораторно-промышленного четырёхвалкового стана в ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, что подтверждается принятыми отчётами о проведённых исследованиях Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) и Российским научным фондом (РНФ).

Методы исследования

- 1) Моделирование процессов винтовой прокатки и прошивки осуществляли с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа DEFORM и QForm.

- 2) Создание 3D моделей валковых узлов для последующего моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки проводили с помощью SolidWorks.

- 3) Опытные прокатки проводили на действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки с использованием модельного материала.

- 4) Прокатки заготовок из аустенитной стали проводили в станах винтовой прокатки МИСиС-130Д и МИСиС-100Т. Прокатку непрерывнолитых медных заготовок проводили в мини-станах радиально-сдвиговой прокатки РСП 10-30 и РСП 14-40.

- 5) Исследование зёрненной структуры проводили с помощью оптических микроскопов Axio Scope A1 Carl Zeiss и Axio Observer D1m Carl Zeiss, измерения твёрдости с помощью REICHERTER UH250 и Micromet 5101.

6) Опытные четырёхвалковые прокатки и прошивки проводили на разработанном лабораторно-промышленном четырёхвалковом стане в ИМЕТ РАН.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании методов физического и математического моделирования, применения современных вычислительных систем и методик. Достоверность результатов моделирования подтверждена в ходе экспериментальных исследований на оборудовании кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» и ИМЕТ РАН.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований особенностей изменения зёрненной структуры и твёрдости на стационарной и нестационарной стадиях двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки;

- результаты исследований характера изменения интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки;

- методики создания трёхмерной модели зерна в процессах обработки металлов давлением, прогнозирования вероятного разрушения заготовок в процессах винтовой прокатки и прошивки;

- способы винтовой прокатки сплошной заготовки и прошивки в универсальном четырёхвалковом стане;

- результаты исследований напряжённо-деформированного, кинематического и теплового состояния при различных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования, в том числе, распределение накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния в объёме заготовки;

- анализ точности размеров сплошных и полых круглых заготовок, полученных при четырёхвалковой, трёхвалковой и двухвалковой схемах винтовой прокатки,

- результаты опытных прокаток и прошивок в универсальном четырёхвалковом стане винтовой прокатки.

Личный вклад соискателя. Определение особенностей зёрненной структуры и распределения твёрдости на нестационарной и стационарной стадиях двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки, выявлении взаимосвязи между размером зерна и интенсивностью деформации на нестационарной стадии двух- и трёхвалковой винтовой прокатки, разработке методики прогнозирования вероятного разрушения в процессах

винтовой прокатки и прошивки, разработке методики создания трёхмерной модели зерна, разработке методики оценки устойчивости протекания процессов винтовой прокатки, проектировании и изготовлении деформирующего инструмента для реализации четырёхвалковой винтовой прокатки, проектировании и изготовлении действующей модели и лабораторно-промышленного четырёхвалкового стана винтовой прокатки, выполнении экспериментальных исследований по прокатке и прошивке заготовок в двухвалковом, трёхвалковом и четырёхвалковом станах и анализе полученных результатов, выполнении компьютерного моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки по различным схемам, сравнительном анализе полученных результатов и выявление преимуществ четырёхвалковой схемы винтовой прокатки.

Степень достоверности и апробации работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на научных семинарах кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»;
- лаборатории пластической деформации металлических материалов ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской академии наук.
- на научном семинаре Steel University, организуемом World Steel Association.

Материалы диссертационной работы также докладывались и обсуждались на 17 международных научно технических конференциях в Москве, Санкт-Петербурге, Минске, Витебске.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация по своей тематике, целям, задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по следующим пунктам:

п.1 Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов.

п.2 Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования.

п.3 Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации.

п.4 Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции.

п.5 Математическое описание процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с целью создания математических моделей, способов, процессов и технологий.

п.6 Разработка способов, процессов и технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 36 печатных работах, из них 3 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 28 в изданиях, входящих в систему цитирования WoS, Scopus; 13 тезисов докладов на международных конференциях. Получено 7 патентов.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка литературы (279 наименований). Работа содержит 272 страницы машинописного текста, 19 таблиц, 154 рисунка.

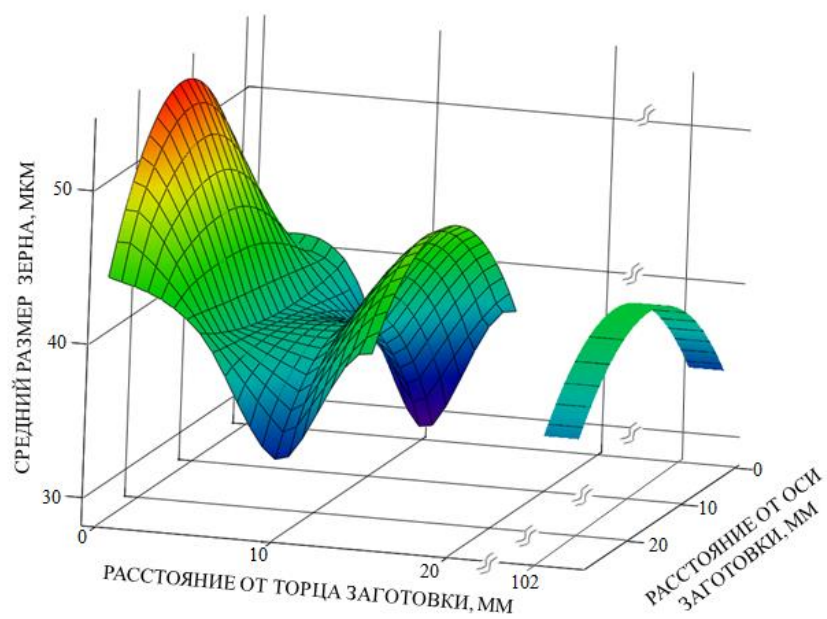
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложены основные направления исследований, связанных с процессами винтовой прокатки. Показана актуальность проведения исследований формирования зёрненной структуры и свойств для оценки особенностей и отличий в НДС при существующих схемах винтовой прокатки. Указано, что целесообразно осуществлять исследование процессов винтовой прокатки не только на стационарной, но и на нестационарной стадии. Показана актуальность создания экспериментально проверенной методики прогнозирования вероятного разрушения заготовок, а также создание нового способа винтовой прокатки, позволяющего осуществлять прокатку и прошивку заготовок в одной и той же клетки.

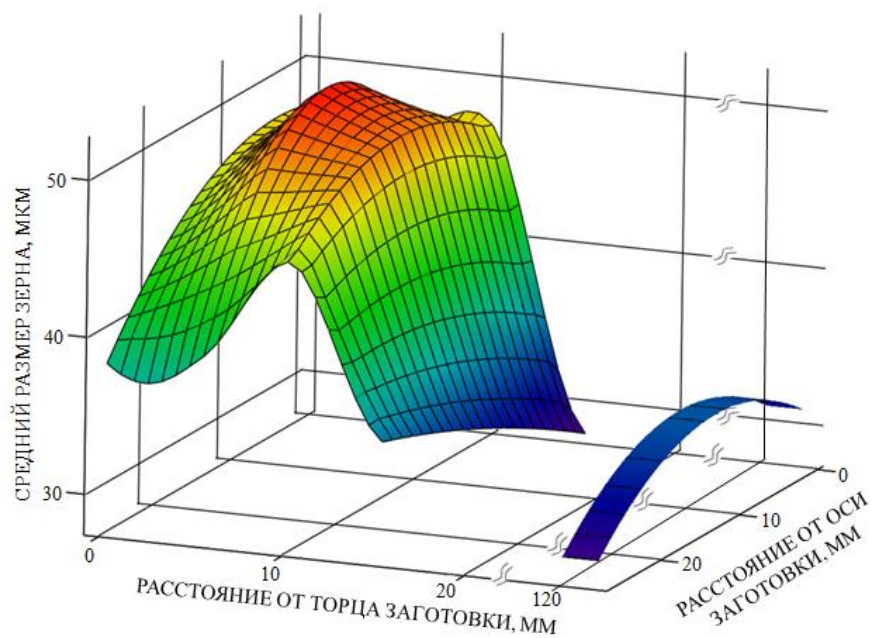
В первой главе проведён аналитический обзор существующих схем винтовой прокатки, изложены их преимущества и недостатки. Показано, что в силу особенностей

НДС на данный момент не предложено способа, позволяющего получать сплошные и полые заготовки в одной клети с соответствующими показателями точности размеров изделий. Показаны результаты исследований нескольких типов винтовой прокатки: определение влияния деформации в стане винтовой прокатки на формирование свойств и зёрненной структуры металла, оценка энергосиловых параметров, исследование особенностей формоизменения, в том числе разрушения, влияние режимов на точность изделий. Известно, что для исследования процессов винтовой прокатки используется компьютерное моделирование, но не всегда результаты компьютерного моделирования для подтверждения проверяют экспериментально. Изложен ряд актуальных для процессов винтовой прокатки задач: совместное исследование нестационарной и стационарной стадий двух- и трёхвалковой винтовой прокатки, анализ изменения зёрненной структуры и свойств и определение связи этих изменений с распределением параметров напряжённо-деформированного состояния и кинематического состояния, управление формоизменением и свойствами на нестационарной стадии винтовой прокатки, разработка методики прогнозирования вероятного разрушения при винтовой прокатке, разработка нового способа винтовой прокатки и прошивки заготовок.

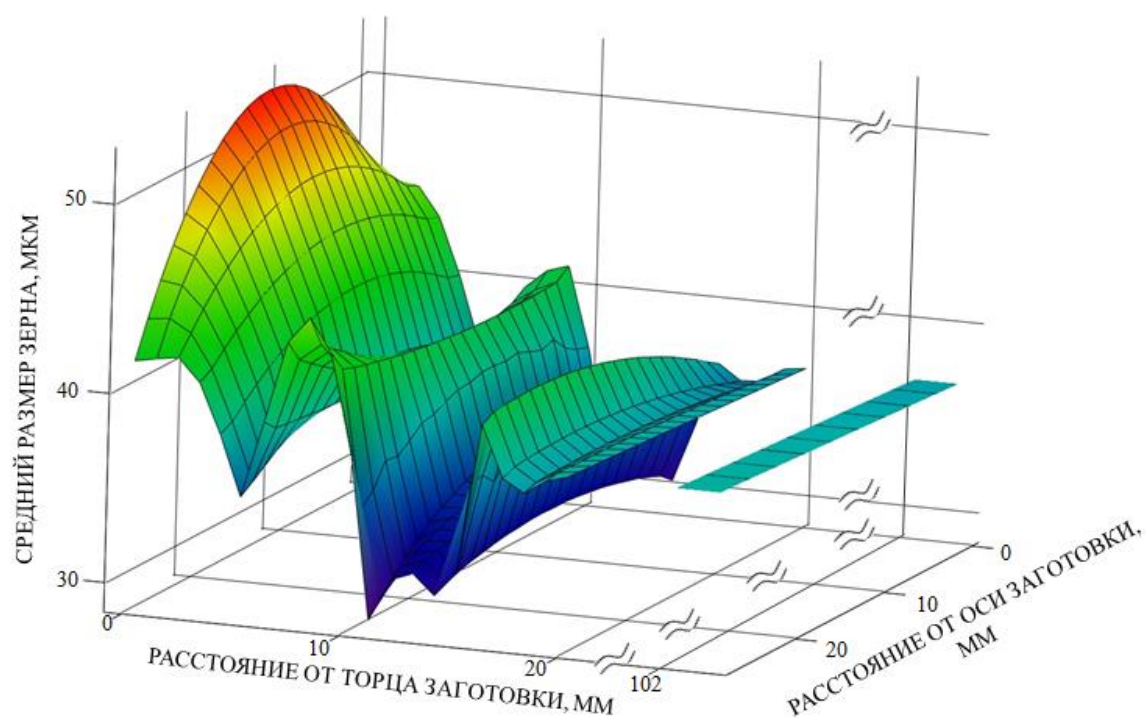
Во второй главе представлены результаты исследования стационарной и нестационарной стадий двух- и трёхвалковой винтовой прокатки заготовок из аустенитной стали. Установлено, что имеет место неоднородность зёрненной структуры и, особенно, твёрдости в сечениях образцов из приторцовой области заготовок, что отражает нестационарность процесса формоизменения и, соответственно, структурных процессов на соответствующей стадии двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки (рис. 1-2). Разброс значений среднего размера зерна и твёрдости на стационарной стадии меньше, чем на нестационарной.



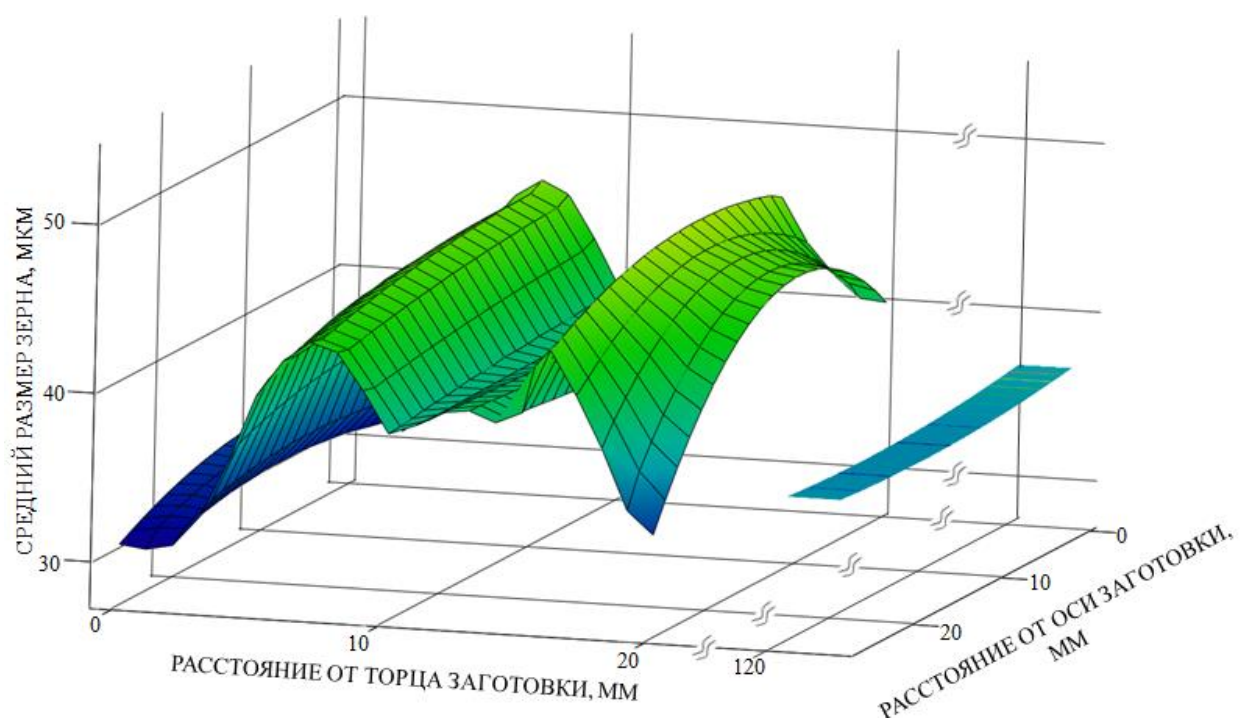
а



б

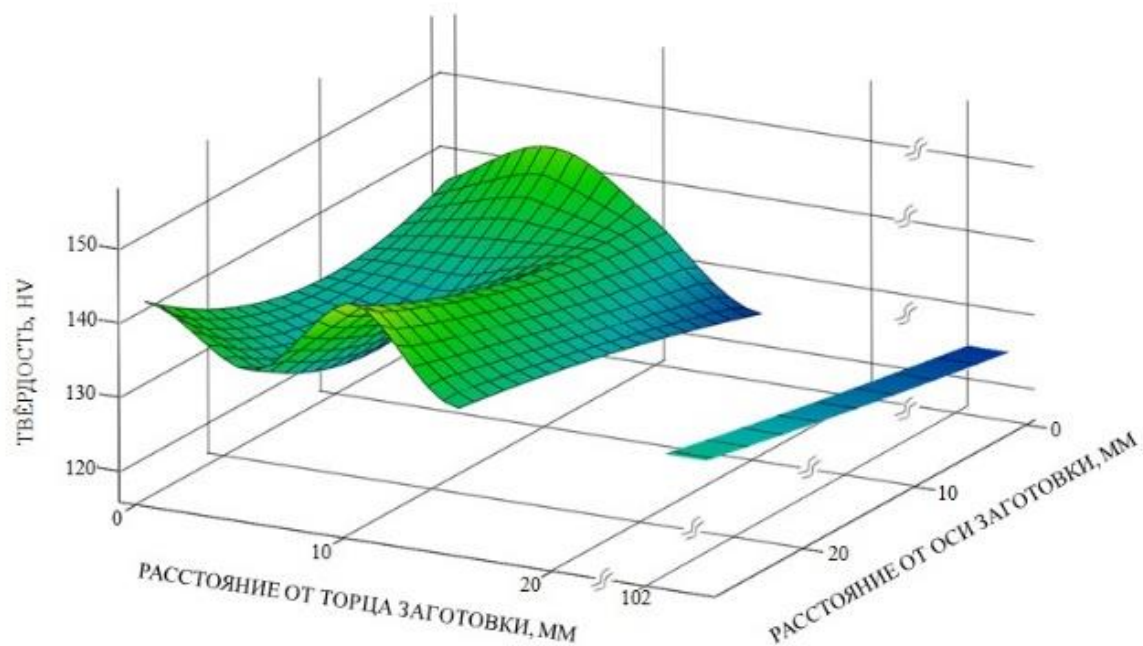


в

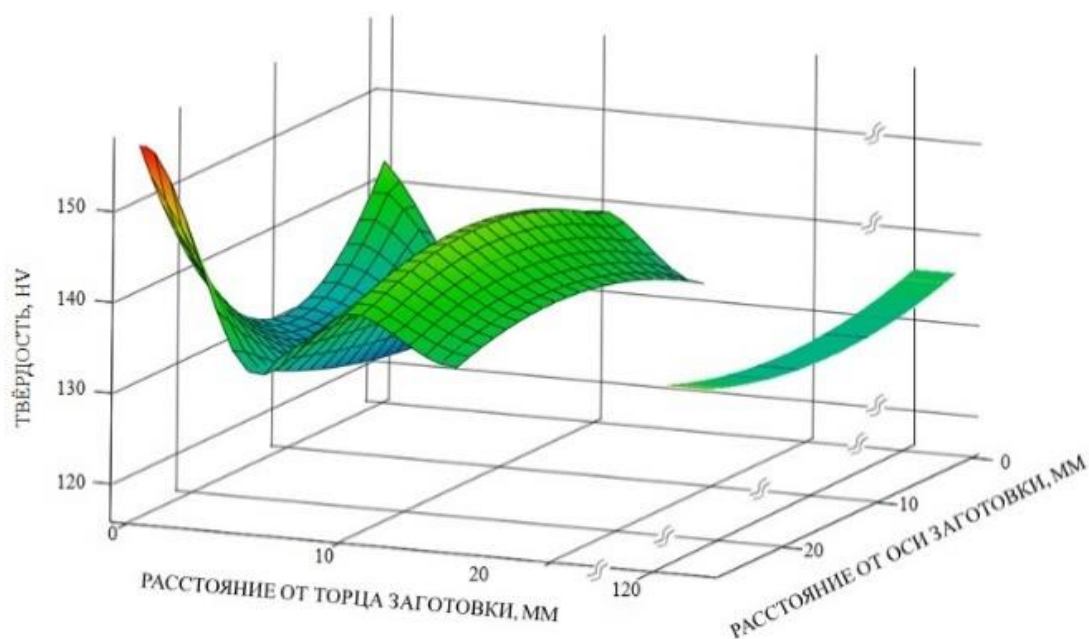


г

Рисунок 1. Распределение среднего размера зерна на нестационарной и стационарной стадии двухвалковой (а,в) и трёхвалковой (б,г) винтовой прокатки.



а



б

Рисунок 2. Распределение твёрдости в поперечных сечениях заготовок на нестационарной и стационарной стадиях двухвалковой (а) и трёхвалковой (б) прокатки

Распределение коэффициента анизотропии размера зерна ($K_{анз}$) в приторцовых областях, наряду с данными рис. 1-2, также явно отражают нестационарность и неодинаковость характера формоизменения, сложности сопутствующих структурных процессов. На стационарной стадии можно выявить такое отличие зёрненной структуры в зависимости от схемы прокатки: значение $K_{анз}$ при двухвалковой винтовой прокатке от оси

заготовки к её поверхности увеличивается, а при трёхвалковой винтовой прокатке – уменьшается. При этом, при двухвалковой винтовой прокатке $K_{анз}$ преимущественно меньше единицы, а при трёхвалковой винтовой прокатке преимущественно больше единицы. $K_{анз}$, относительно исходной нагретой недеформированной заготовки, при двухвалковой прокатке на стационарной стадии уменьшился до 2,1 раза, при трёхвалковой прокатке - до 1,7 раза. Можно также отметить, что разброс значений $K_{анз}$ на нестационарных стадиях и двухвалковой, и трёхвалковой прокаток больше, чем на стационарной. Таким образом и на стационарной стадии прокатки сохраняются, даже в условиях прохождения частичной динамической рекристаллизации, различия в структуре, включая анизотропию размера зерна, а, следовательно, и различия в свойствах горячекатаных по разным схемам винтовой прокатки заготовок. Учитывая известное соотношение между твёрдостью и пределом прочности:

$$\sigma_B = k \cdot HV \quad (1)$$

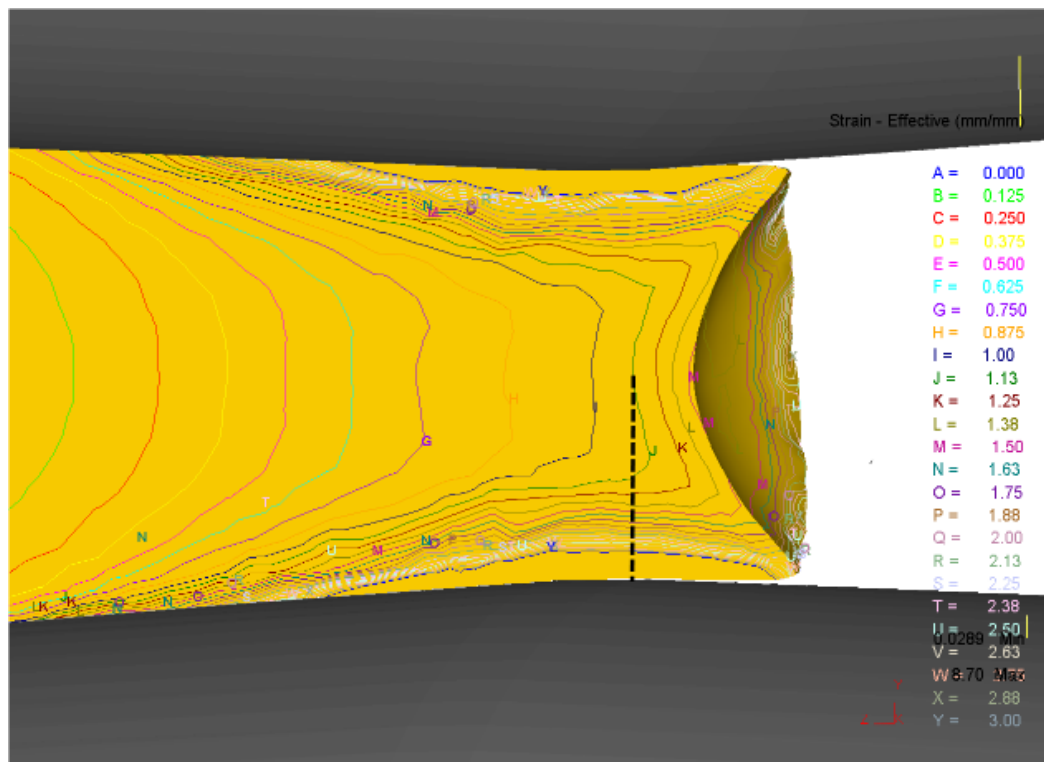
где HV – твёрдость по Виккерсу, HV, k – коэффициент пропорциональности, варьирующийся в зависимости от марки стали, σ_B – предел прочности, МПа, можно предположить, что при двухвалковой прокатке наименьшая прочность в центре, при трёх – в кольцевой области некоторого радиуса.

По результатам моделирования в DEFORM оценили характер изменения интенсивности деформации на нестационарной стадии прокатки (рис. 3). Интенсивность деформации в DEFORM рассчитывается по следующей формуле:

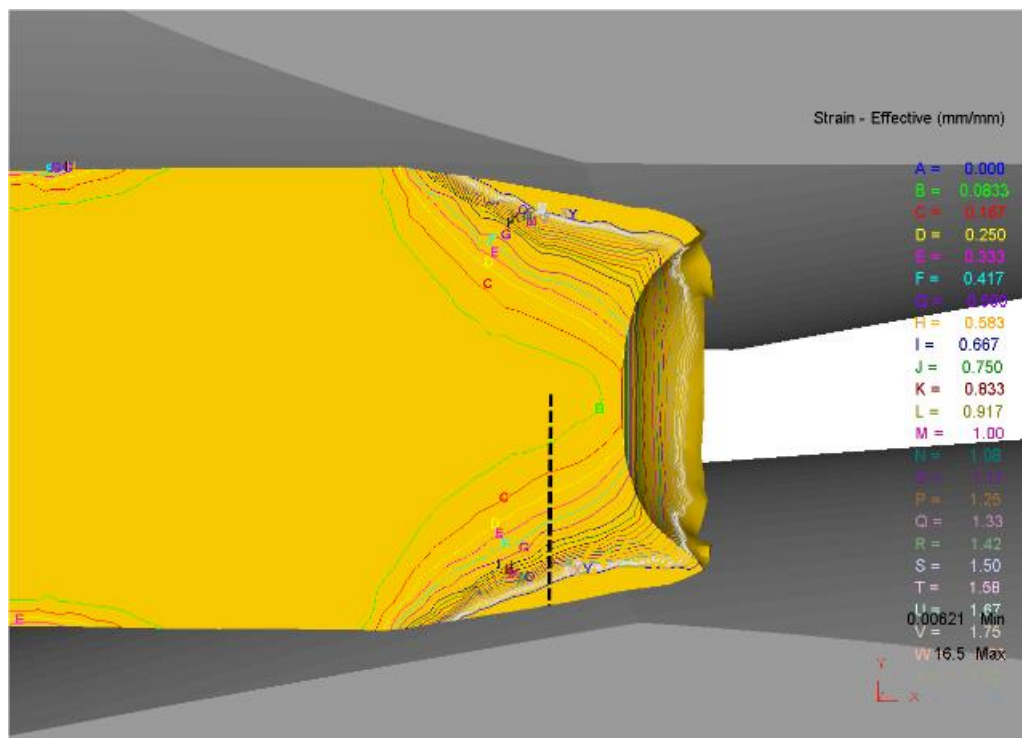
$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации, $\bar{\varepsilon}$ – интенсивность деформации.

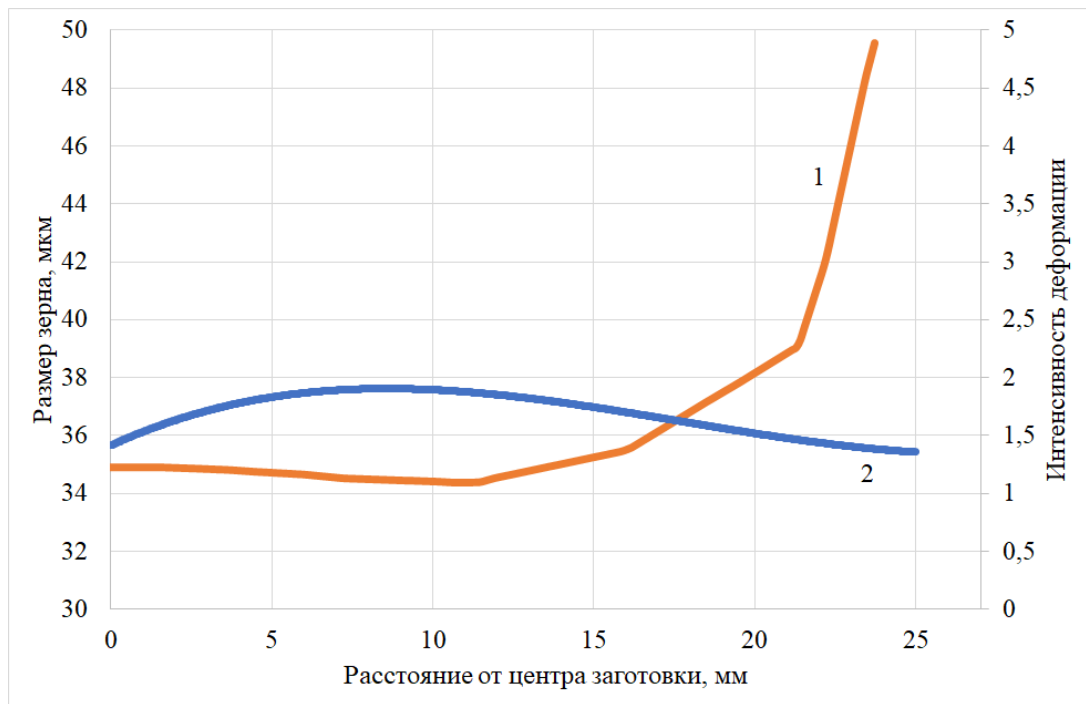
Если провести радиус заготовки (показан пунктиром на рис. 3 (а,б)), то для двухвалковой прокатки одна из изолиний будет пересекаться дважды (изолиния J), в то время как при трёхвалковой прокатке каждая изолиния пересекается только один раз. То есть при двухвалковой прокатке по радиусу интенсивность деформации уменьшается, а затем растёт, при трёхвалковой – только увеличивается. По указанным на рис. 3 (а,б) радиусам при двухвалковой прокатке размер зерна сначала должен увеличиваться, а затем – уменьшаться, при трёхвалковой – только уменьшаться. Указанное подтверждается данными рис.3 (в,г). По данным, отображающим изменение размера зерна и интенсивности деформации, рассчитали коэффициенты корреляции, которые составили -0,80 для двухвалковой и -0,89 для трёхвалковой прокатки, соответственно, и подтверждают обратную корреляционную зависимость.



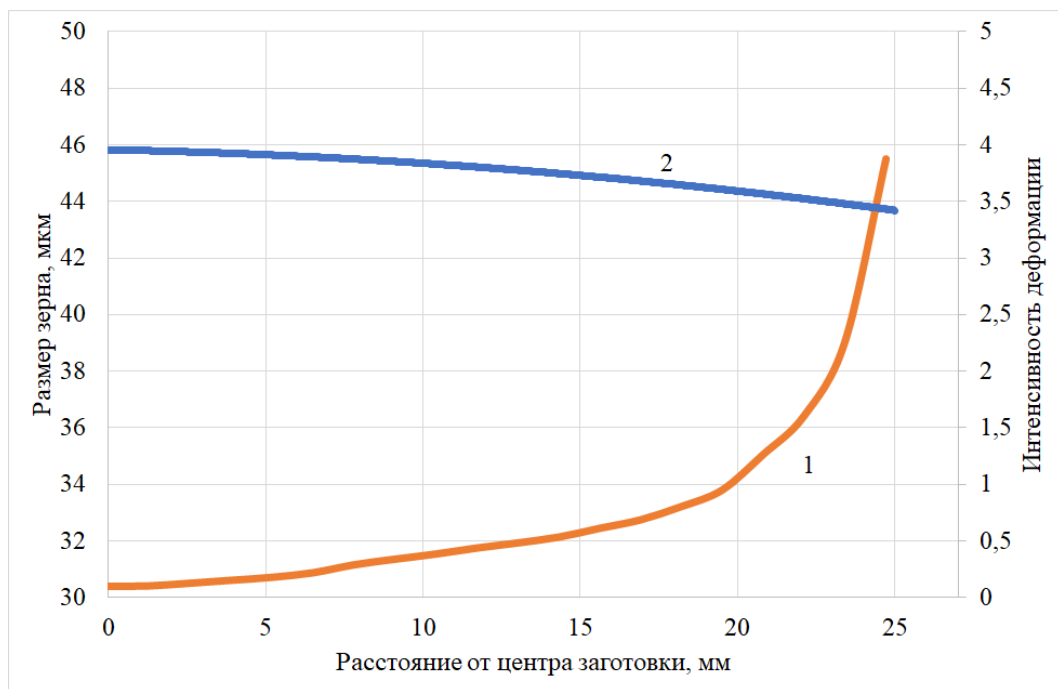
a



6



б

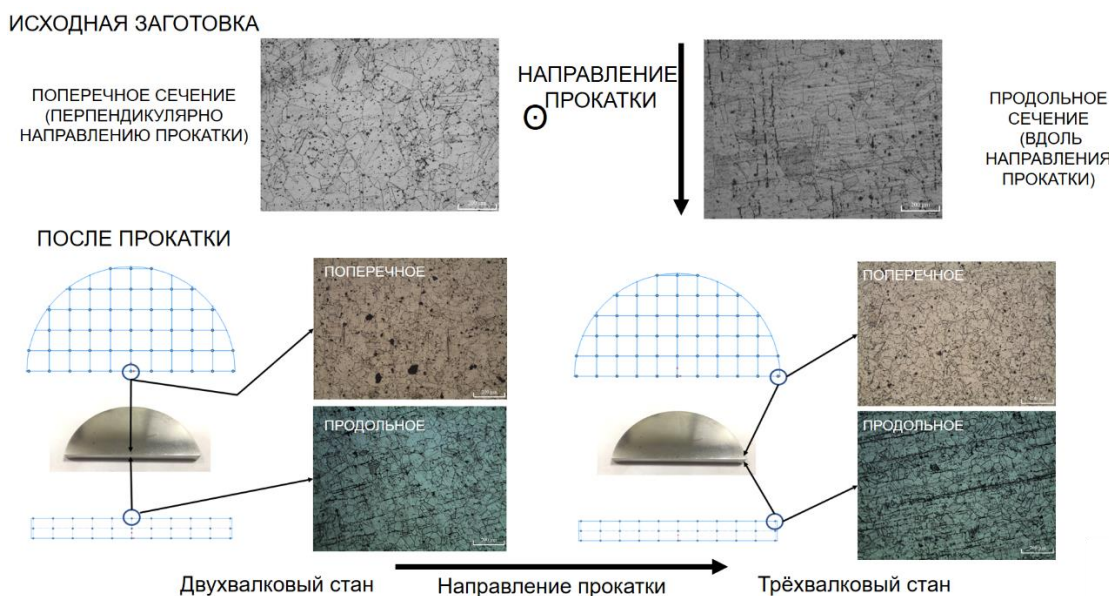


г

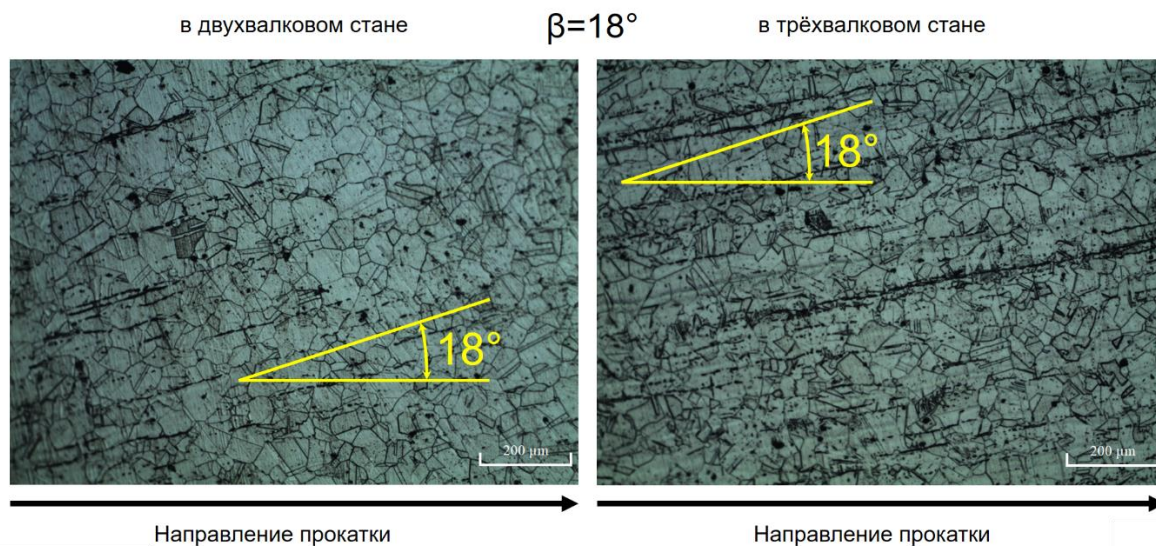
Рисунок 3. Поля интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой (а) и трёхвалковой винтовой прокатки (б), изменение интенсивности деформации (1) и размера зерна (2) по радиусу в продольном сечении на нестационарной стадии двухвалковой (в) и трёхвалковой (г) винтовой прокатки

Данные рис.3 демонстрируют экспериментально подтверждённую разницу в распределении интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокаток.

При анализе данных об изменении размера зерна, твёрдости, а также фотографий структуры установили, что строчечность, которая в исходной заготовке ориентировалась вдоль направления прокатки ориентирована по другому (рис.4).



а



б

Рисунок 4. Строчечность в исходной и заготовках после прокатки по обеим схемам (а), ориентировка строчечности в продольном сечении на неустановившейся стадии при обеих схемах прокатки и угол подачи (б)

На основе результатов прокатки в трёхвалковом стане разработали методику создания трёхмерной модели зерна материала. С помощью предложенной методики создали модели зерна прокатанной и исходной заготовок в области, близкой к поверхности. Полученные модели позволили продемонстрировать, что до прокатки зерно ориентировано (вытянуто) в одном направлении, что объясняется тем, что исходная заготовка была получена продольной прокаткой. Модель зерна заготовки после винтовой прокатки позволила продемонстрировать, что зерно «скручено», а также, что оно вытянуто под углом к направлению прокатки. При этом величина этого угла сопоставима по величине с углом подачи валков. Анизотропия формы моделей зерна характеризуется значениями коэффициентов анизотропии, которые не более чем на 5% отличаются от оценок значений коэффициентов анизотропии зерна до и после прокатки, полученных на основании исследования плоских шлифов.

Выявленные по результатам компьютерного моделирования и экспериментальной оценки взаимосвязи между структурным и напряжённо-деформированным состоянием использовали при исследовании процесса трёхвалковой винтовой прокатки заготовок из титанового сплава ВТ-6. Проводили опытные экспериментальную оценку и компьютерное моделирование в QForm. По результатам прокатки наблюдали двухфазную структуру – светлые зерна α -фазы и пластинчатая β -фаза. Размер зерна β -фазы в центре заготовки до 5 раз больше, чем вблизи поверхности. То есть имеются два слоя заготовки с мелкозернистой структурой вблизи поверхности и более крупной в центре (рис. 5).

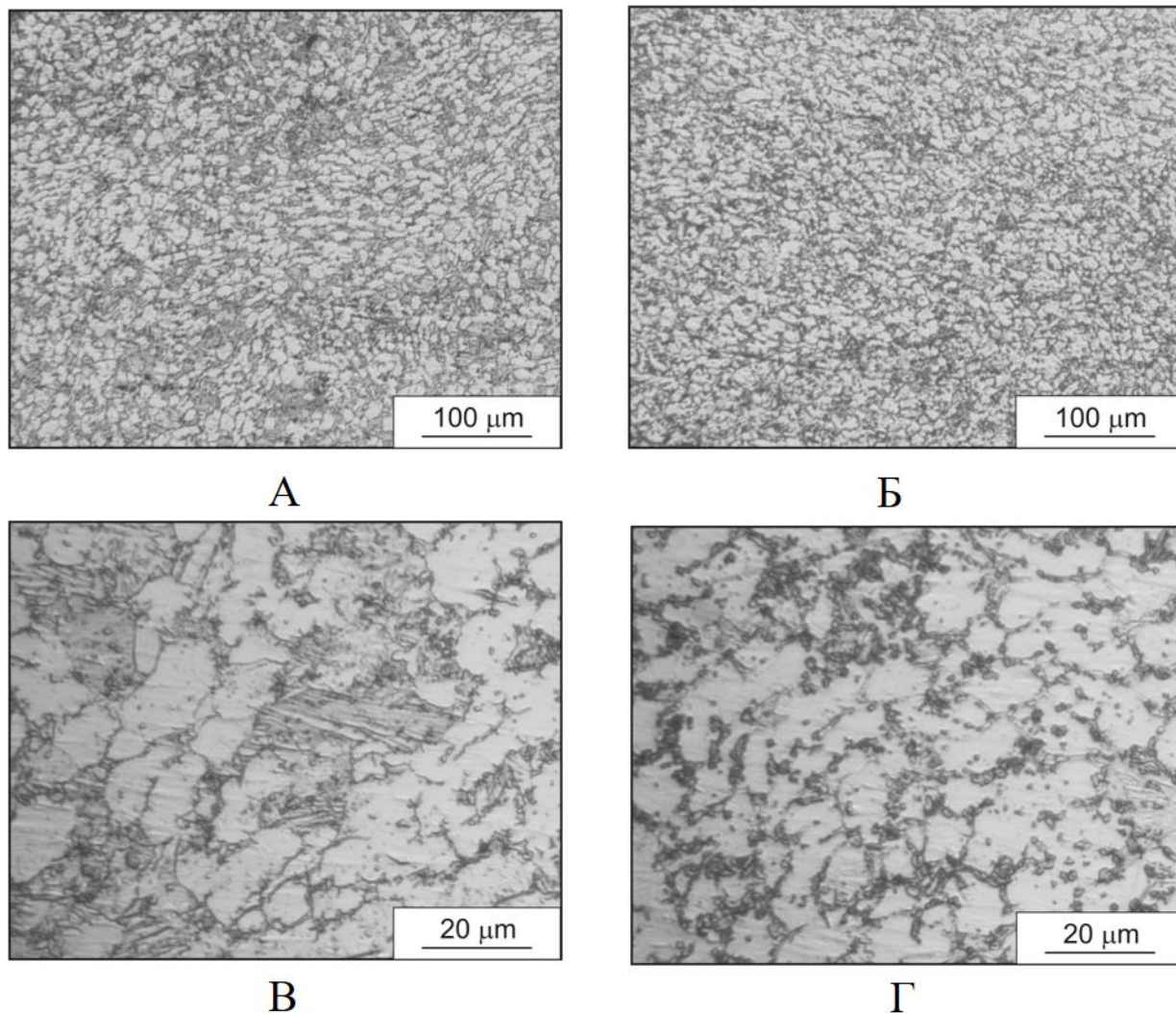


Рисунок 5. Структура образца сплава ВТ6 в поперечном сечении: а,в – центр заготовки, б,г – вблизи поверхности

Разработан способ определения границ, внутри которых расположена нейтральная поверхность. Способ заключается в следующем. Долю от общей выборки значений размера зерна, соответствующую левому из двух наибольших столбцов-максимумов и всем столбцам, лежащим слева от него (сумма частот указанных столбцов), приняли равной доле, занимаемой периферийным мелкозернистым слоем в общей площади поперечного сечения заготовки на установившейся стадии прокатки (рис. 6).

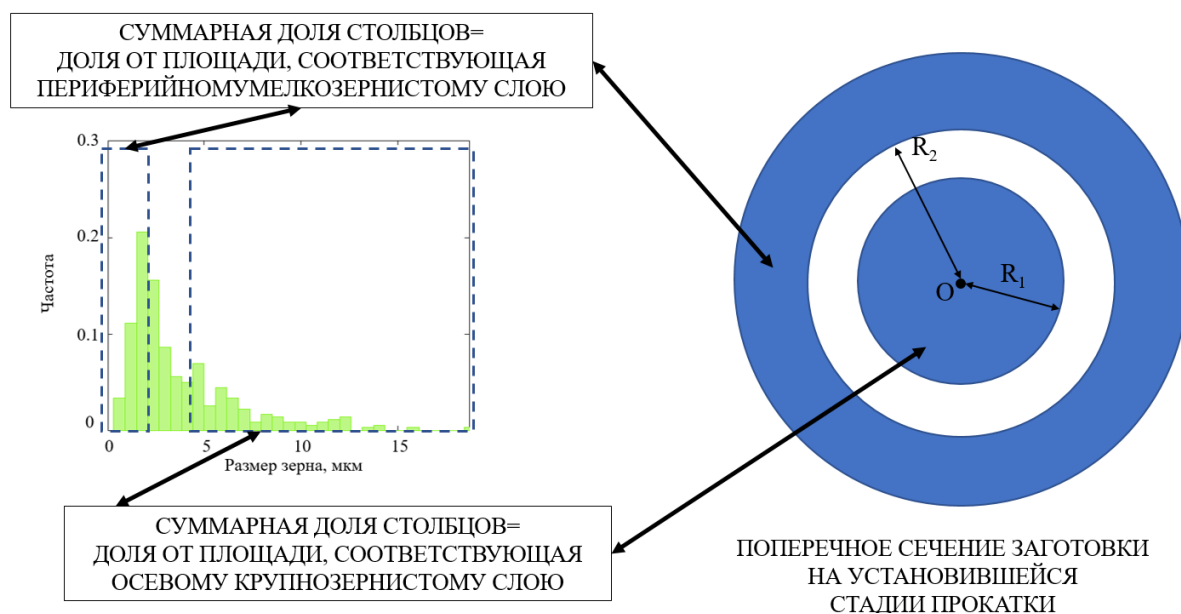


Рисунок 6. Определение границ области, в которой расположена нейтральная цилиндрическая прослойка, на основе данных гистограммы распределения размера зерна β -фазы (О-центр окружности, являющейся поперечным сечением заготовки на установившейся стадии прокатки)

По аналогии, долю от общей выборки значений размера зерна, соответствующей правому из двух наибольших столбцов-максимумов и всем столбцам, лежащим правее него, приняли равной доле от площади поперечного сечения заготовки на установившейся стадии прокатки, соответствующей осевому крупнозернистому слою. По значениям долей можно найти, используя формулу площади круга, значения радиусов R_1 и R_2 , соответствующие границам крупнозернистой и мелкозернистой структур. R_1 оказался равным 8,4 мм, R_2 равным 19,5 мм. Эти радиусы ограничивают нейтральную цилиндрическую прослойку, разделяющую периферийный мелкозернистый и осевой крупнозернистый слой. Другими словами, радиус нейтральной цилиндрической поверхности на основе анализа данных гистограммы распределения размера зерна β -фазы лежит в пределах 8.4-19.5 мм. По предложенной методике рассчитали пределы, в которых лежит значение радиуса нейтральной цилиндрической поверхности, используя данные гистограммы распределения размера зерна α -фазы.

Предложены способы оценки радиуса нейтральной зоны на основе изменения размера зерна β -фазы, твёрдости, полной скорости и прироста накопленной деформации. Полная скорость точки в QForm рассчитывается по формуле:

$$V_{total} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}, \quad (3)$$

где V_x , V_y , V_z – скорости точки по координатным осям, м/с, V_{total} – полная скорость, м/с.

Накопленная деформация в QForm рассчитывается по формуле:

$$\bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt, \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}^p$ - накопленная деформация, а $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скоростей деформации, с^{-1} . При этом, интенсивность скоростей деформации рассчитывается по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}, \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ – главные скорости деформации, с^{-1} .

Объединяя данные по всем интервалам, получили пределы изменения радиуса нейтральной зоны 8-19,7 мм. Сравнивая результаты компьютерного моделирования и опытных прокаток (рис. 7), можно заметить, что интервал значений радиуса нейтральной цилиндрической поверхности, рассчитанный на основе изменения относительного прироста накопленной деформации, полностью находится внутри соответствующих интервалов, определённых на основе анализа гистограмм распределения размера зерна α - и β -фазы. Интервал значений радиуса нейтральной цилиндрической поверхности, определённый на основе изменения значений полной скорости трассируемых точек при прохождении пережима на 65% перекрывается интервалом, определённым на основе анализа гистограммы распределения размера зерна β -фазы и на 60% перекрывается интервалом, определённым на основе анализа гистограммы распределения размера зерна α -фазы. Стоит отметить, что границы и, соответственно, размер интервалов при компьютерном моделировании можно уточнить (в сторону уменьшения), увеличивая количество трассируемых точек, лежащих на радиусе заготовки.

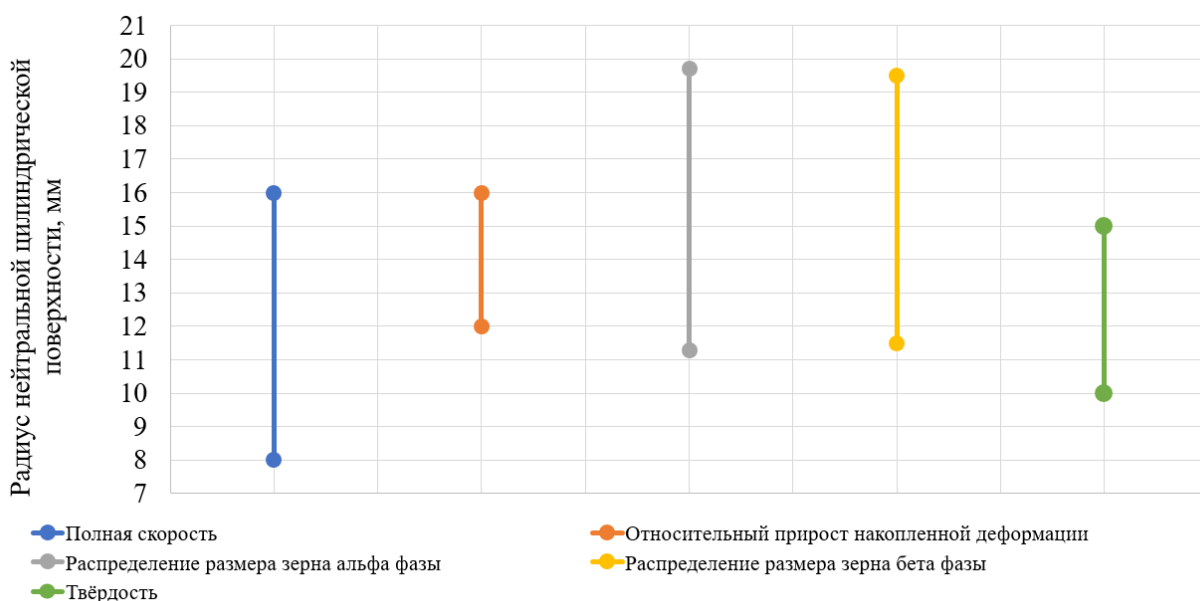


Рисунок 7. Интервалы, в пределах которых лежит значение радиуса нейтральной поверхности, определённые с помощью компьютерного моделирования и опытных прокаток

В третьей главе представлены результаты прогнозирования вероятного разрушения при двухвалковой винтовой прокатке заготовок из аустенитной стали и при трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатке (РСП) непрерывнолитой заготовки из анодной меди, а также двухвалковой прошивке заготовки из углеродистой стали. При двухвалковой винтовой прокатке с увеличением угла подачи разрушение уменьшалось в объёме, затем исчезло полностью. По окончании прокаток медных заготовок на мини-стане РСП 10-30 установили, что заготовка, начальная температура которой была 750°С, имеет большую длину – 800 мм - по сравнению с заготовкой, начальная температура которой составляла 800°С, и длина которой оказалась равной 730 мм. Заготовки после прокатки имели несквозное разрушение периодического характера. Опытные прокатки моделировали с помощью DEFORM.

Для прогнозирования разрушения учитывали взаимосвязь накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния:

$$\eta = \frac{3\bar{\sigma}}{T}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}$ - среднее напряжение, Па, T - интенсивность напряжений, Па. При этом среднее напряжение определяется по формуле:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (7)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, Па, $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение, Па.

В свою очередь интенсивность напряжений определяется как:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (8)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, Па, T – интенсивность напряжений, Па.

Построили, по результатам моделирования двухвалковых прокаток, траекторию точки, которая находилась на расстоянии 75 мм от переднего торца заготовки перед прокаткой (передний торец – торец, который первым контактирует с валками, диаметр исходной заготовки составлял 60 мм, длина 200 мм, конечный диаметр – 50 мм) в координатах «коэффициент жёсткости напряжённого состояния – накопленная деформация» для прокатки с разными углами подачи (рис. 7). Установили, что правее всех, а, следовательно, наиболее вероятное разрушение имеет место при угле подачи 6 градусов.

С ростом угла подачи вероятность разрушения уменьшается, что не противоречит результатам опытных прокаток.

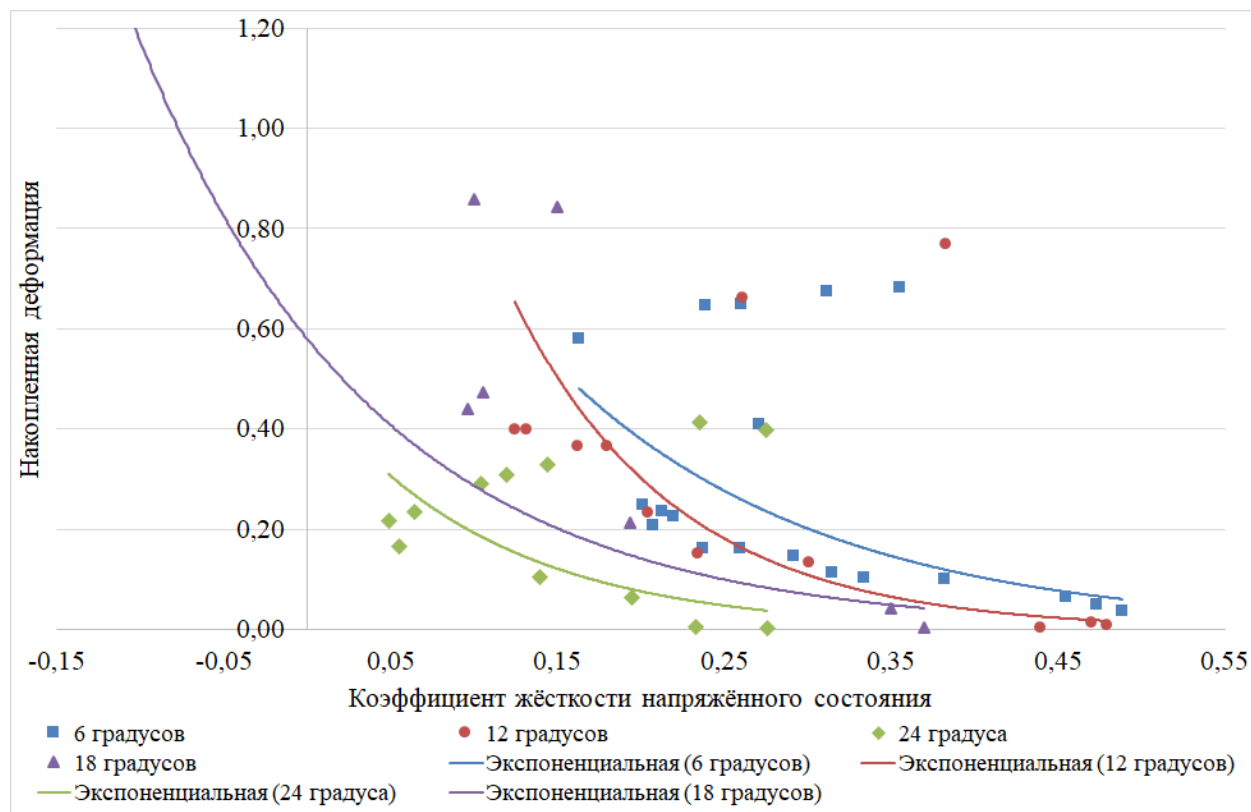
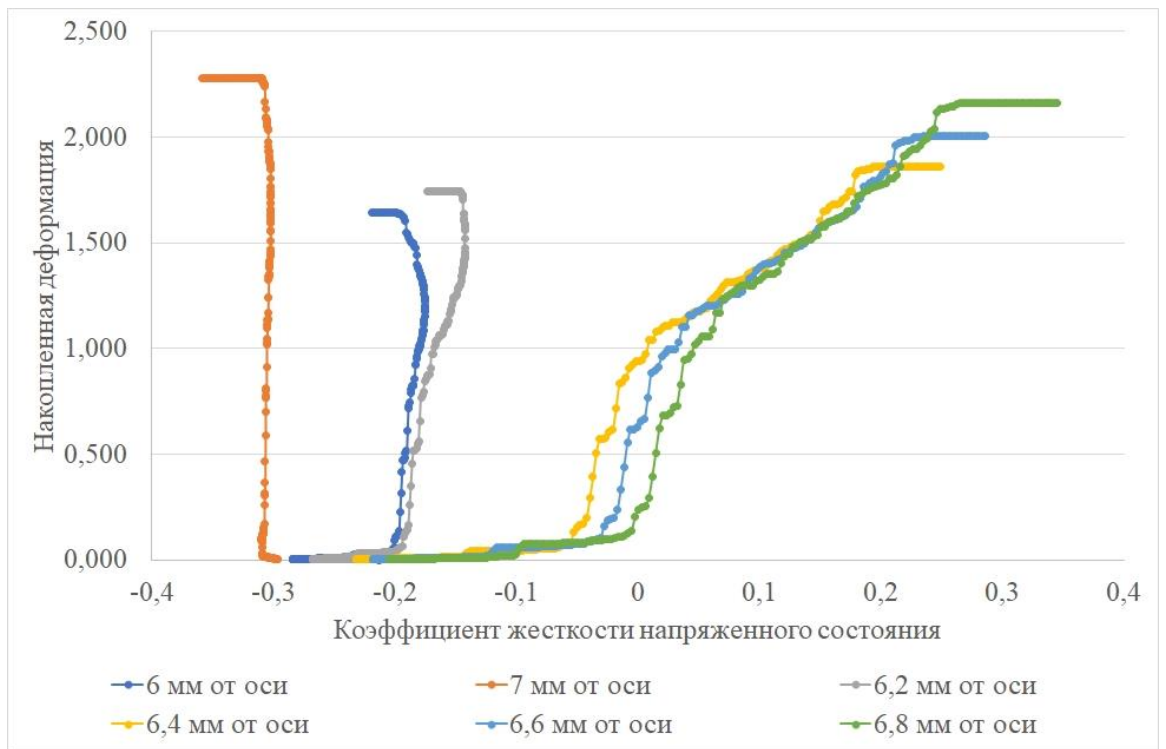
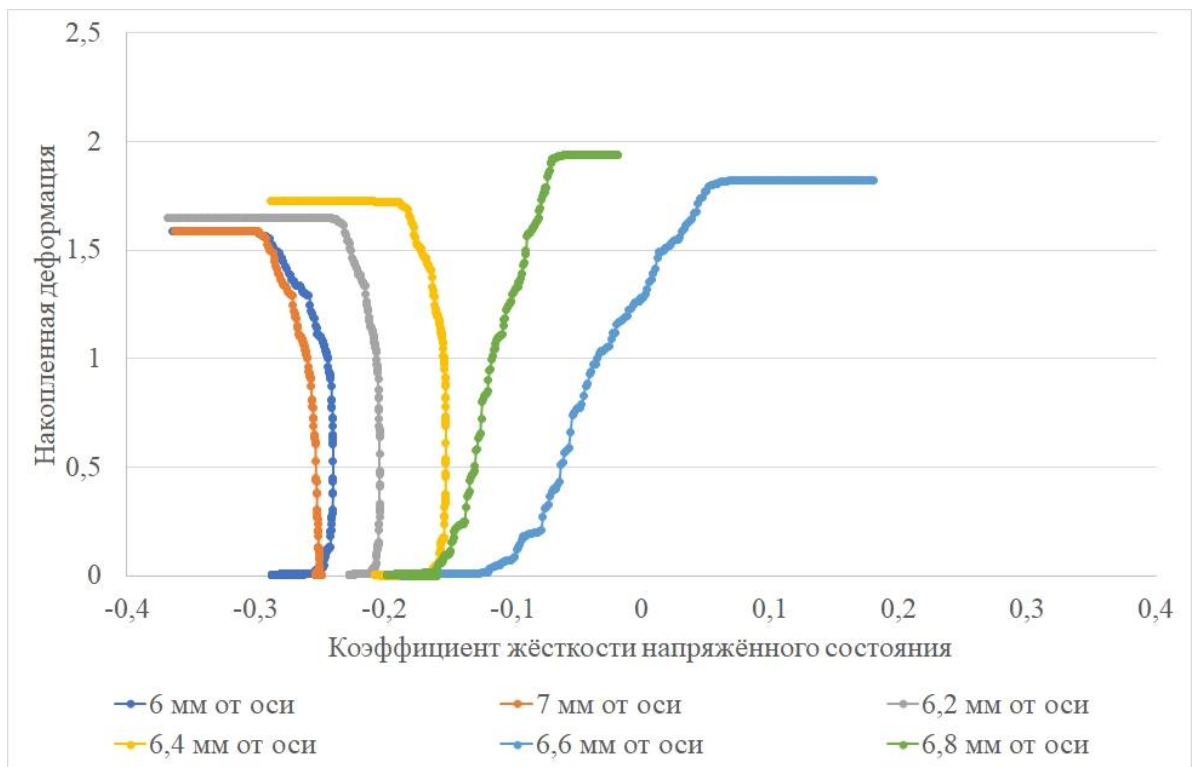


Рисунок 8. Зависимость накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния для траектории точки, находящейся на расстоянии 75 мм от переднего торца заготовки на её оси при прокатке с различными углами подачи

По результатам построения подобных траекторий для трёхвалковой РСП медных заготовок (рис. 9) установили, что для температуры 750°C правее всех лежит траектория точки, находящейся на расстоянии 6,8 мм от оси заготовки. Для температуры прокатки 800°C правее всех лежит траектория точки, находящейся на расстоянии 6,6 мм от оси заготовки. Чем правее лежит траектория точки в координатах коэффициент жёсткости напряжённого состояния – накопленная деформация, тем вероятнее разрушение.



а



б

Рисунок 9. Зависимость накопленной деформации от коэффициента жёсткости для точек находящихся на расстоянии от 6 до 7 мм от оси заготовки при прокатке при 750°C (а) и 800°C (б)

Результаты моделирования, представленные на рис. 9, показывают, что можно говорить о так называемой кольцевой зоне растягивающих напряжений, которая при 800°C имеет меньший, чем при 750°C размер. Учитывая, что для крайней правой траектории при 750°C коэффициент жёсткости принимает большие значения, чем при 800°C, то разрушение при 750°C более вероятно и будет большего объёма, чем при 800°C, что соответствует картине разрушения при опытных прокатках при двух указанных температурах. Оценку адекватности компьютерного моделирования провели следующим образом. При 750°C точка, траектория которой лежит правее других (рис. 9а), находится на расстоянии 6,8 мм от оси заготовки перед прокаткой. После выхода из очага деформации, как показало применение функции отслеживания точек (point tracking) в DEFORM, она лежит на окружности с радиусом 3,5 мм. Для 800°C аналогичная точка – 6,6 мм от оси исходной заготовки (рис. 9б) – после выхода из очага деформации принадлежит окружности радиусом 3,4 мм. Учитывая эти данные, а также, что по результатам опытных прокаток объём полостей составил 16 см³ при 750°C и 8,9 см³ при 800°C, рассчитали суммарную длину полостей, которая для 750°C составит 416 мм, а для 800°C – 245 мм. Получили, что при компьютерном моделировании для полученных радиусов полостей суммарная длина полостей при обеих температурах прокатки меньше конечной длины заготовок (730 мм для 800°C и 800 мм для 750°C), то есть разрушение, спрогнозированное при компьютерном моделировании - несквозное, что согласуется с результатами опытных прокаток.

Провели прошивку заготовок из стали 50 в двухвалковом стане винтовой прокатки при углах подачи валков 15 и 18 градусов. Прошивку останавливали на расстоянии 10-12 мм от заднего торца заготовки. При угле подачи 15 градусов перед носком оправки наблюдали осевое разрушение, в то время как при угле подачи 18 градусов разрушение отсутствовало (рис. 10). Прошивки по аналогичным параметрам смоделировали с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM. По результатам моделирования в DEFORM для точек, лежащих в центре заготовки, при прошивке при угле подачи 15 градусов и 18 градусов построили траектории в координатах «накопленная-деформация – коэффициент жёсткости напряжённого состояния» аналогично траекториям рис. 8-9. Используя результаты испытаний на сжатие и растяжение образцов построили линию тренда с использованием экспоненциальной зависимости, получив гипотетический вид линии предельной пластичности (линия 3 на рис.11). Линия предельной пластичности делит координатную плоскость на две области: деформации (ниже линии) и разрушения (выше линии). Если траектория оказывается выше линии, то вероятность разрушения близка к единице. По данным рис. 10 при прошивке при угле подачи валков 15 градусов в

центре заготовки наступает разрушение, при угле подачи 18 градусов разрушение отсутствует, что соответствует опытным прошивкам.



а



б

Рисунок 10. Продольные темплеты прошитых заготовок: а) угол подачи валков 15 градусов; б) 18 градусов

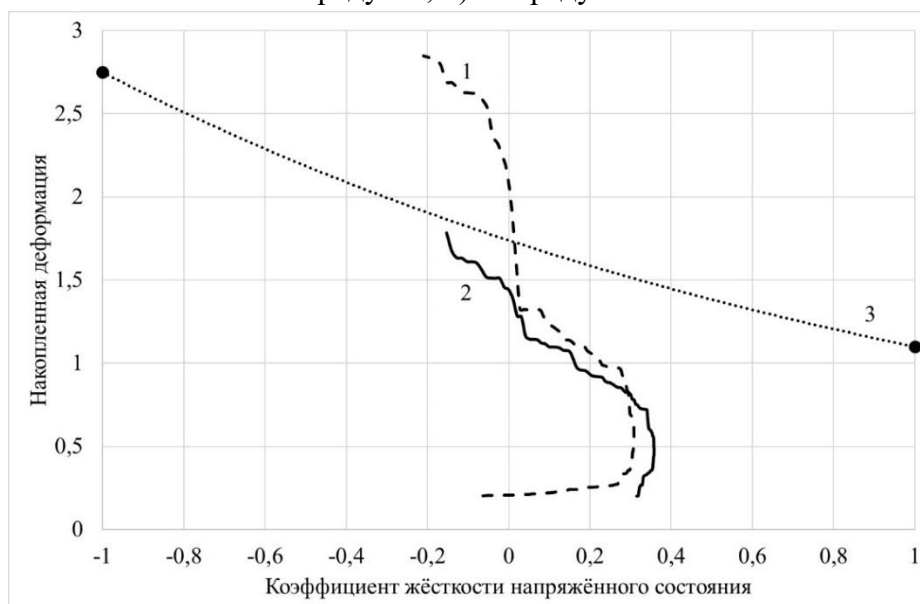


Рисунок 11. Траектории точек, расположенных на оси заготовки, в координатах «накопленная деформация - коэффициент жёсткости напряжённого состояния» при моделировании прошивки с углом подачи 15 (1) и 18 (2) градусов и гипотетический вид линии предельной пластичности (3)

В четвёртой главе изложены результаты исследования нового процесса четырёхвалковой винтовой прокатки. Для оценки возможности осуществления процесса прошивки по четырёхвалковой схеме с двумя чашевидными и двумя грибовидными валками (рис. 12) провели компьютерное моделирования с помощью QForm. С целью дальнейшего качественного сравнения также провели моделирование двух- и трёхвалковой прошивки (рис. 13).

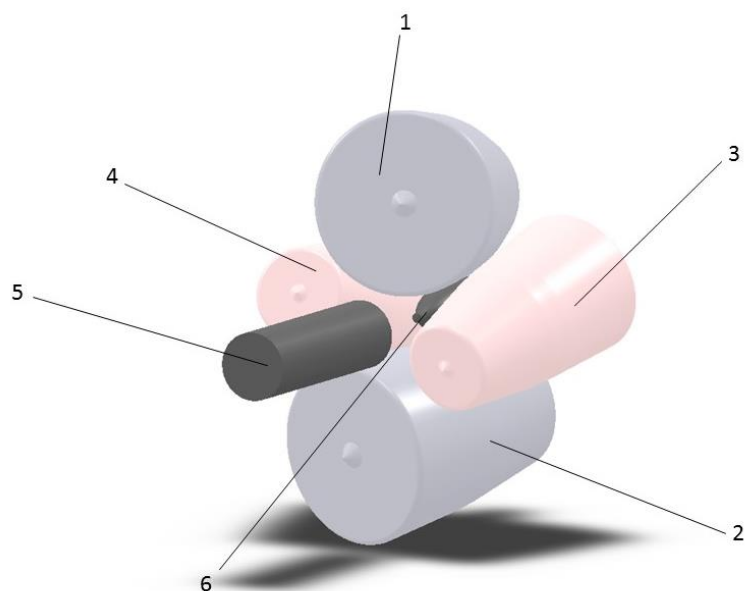
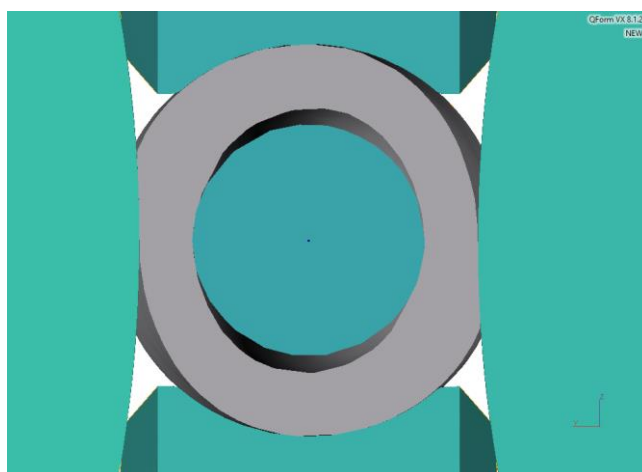


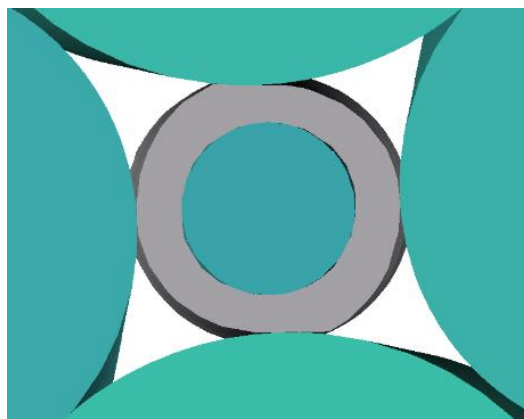
Рисунок 12. Объёмная модель, подготовленная в Solidworks, для компьютерного моделирования в QForm процесса прошивки в четырёхвалковом стане: 1,2 – основные валки, 3,4 – вспомогательные валки, 5 – заготовка, 6 – оправка



а



б



в

Рисунок 13. Формоизменение заготовки-гильзы в пережиме: а – двухвалковый стан с линейками, б – трёхвалковый стан, в – четырёхвалковый стан

По рис. 13 можно предположить, что характер формоизменения в пережиме, с точки зрения формирования качества получаемых гильз, наиболее благоприятный при прошивке в четырёхвалковом стане: меньше овальность и нет течения в зазоры между валками.

По результатам моделирования оценили овальности для сечений гильз, полученных прошивкой в двух-, трёх- и четырёхвалковом станках (рис. 14).

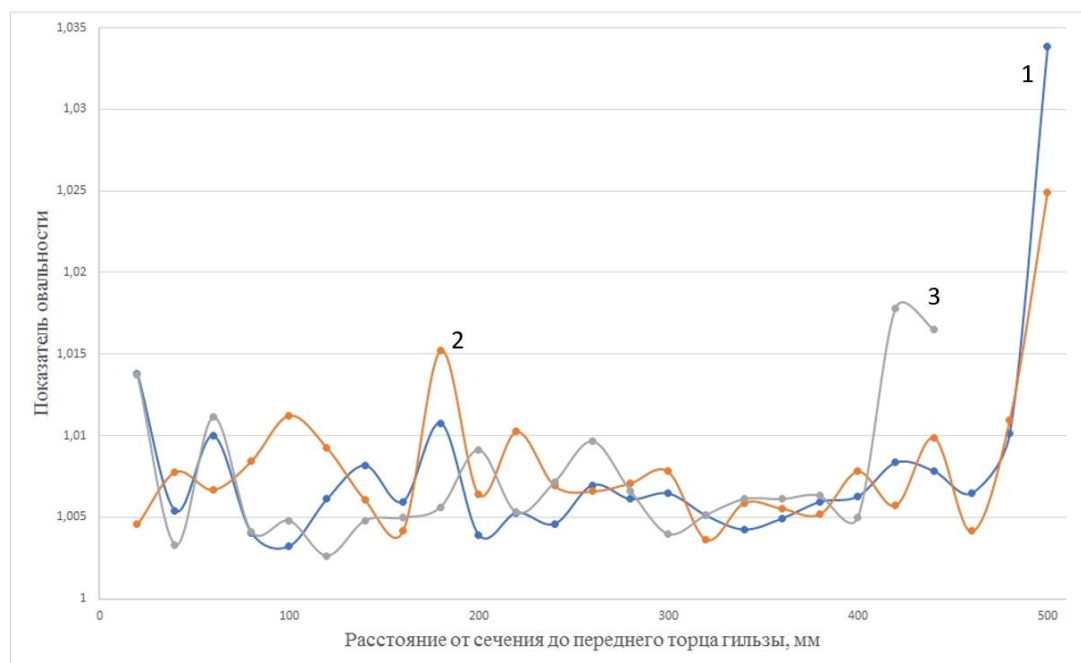


Рисунок 14. Изменение показателя овальности по длине гильз, полученных при моделировании прошивки в двух- (1), трёх (2) и четырёхвалковом (3) станках

Сравнили также изменение толщины стенки по длине прошитых гильз. На рис. 15 показано как это отношение изменяется по длине гильз после прошивок по различным схемам.

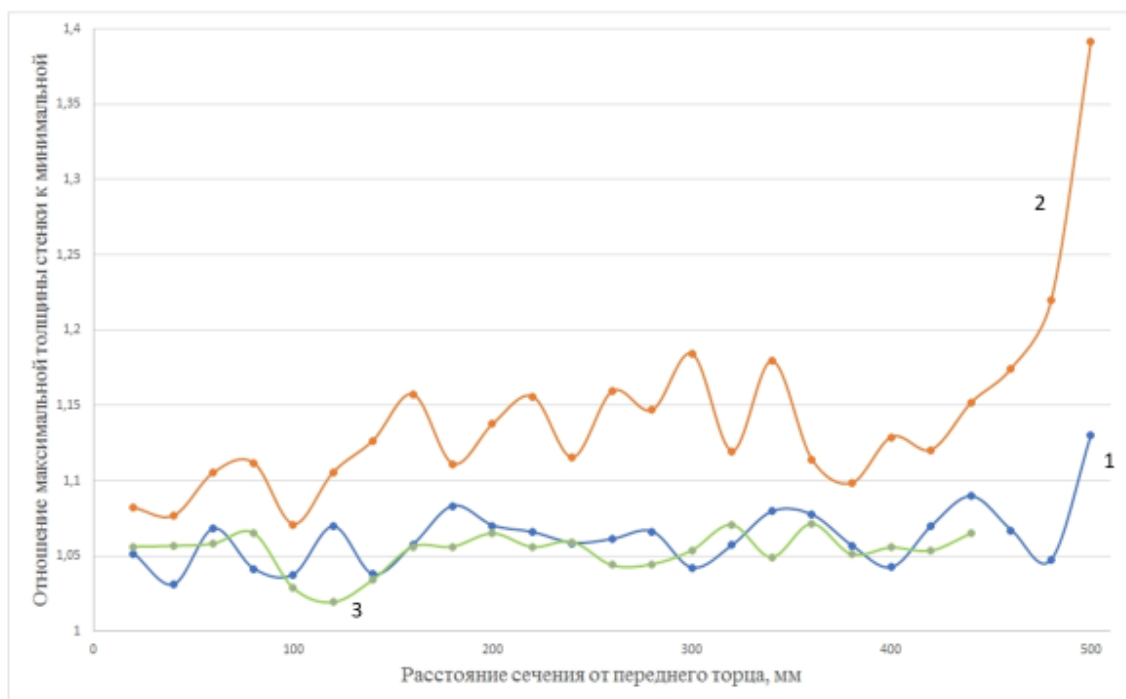


Рисунок 15. Изменение разностенности по длине гильз по результатам моделирования двух- (1), трёх- (2) и четырёххвалковой (3) прошивок

По рис. 15 видно, что среди трёх смоделированных способов прошивка в стане без направляющего инструмента позволяет получить гильзу с наименьшей разностенностью.

Для демонстрации возможности осуществления четырёххвалковой прокатки создали действующую модель (рис. 16) и осуществили прокатку и прошивку заготовок из пластилина. Процессы прошивки и прокатки протекали стабильно, получаемые заготовки имели характерные для процессов винтовой прокатки утяжины на переднем и заднем торцах и, как и полученные гильзы (полые заготовки), винтовые линии на цилиндрических поверхностях.

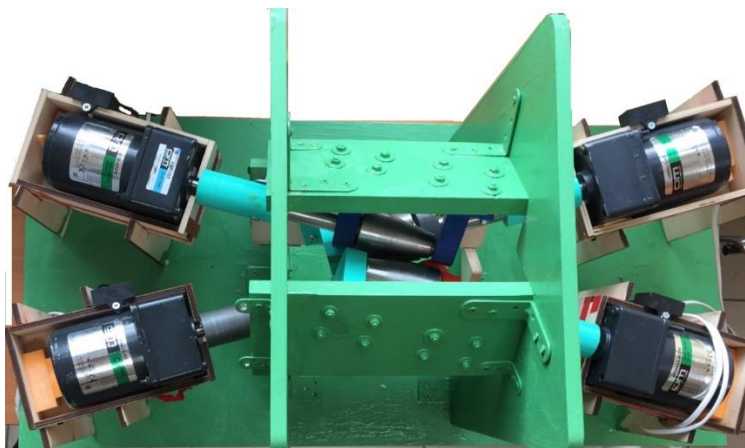


Рисунок 16. Четырёхвалковый лабораторный стан винтовой прокатки
(действующая модель)

В SolidWorks создана модель лабораторного стана (рис. 17), целиком, с входной, выходной стороной, валковыми узлами и вспомогательными механизмами. Создали лабораторно-промышленный стан и провели прокатку, прошивку и раскатку стальных заготовок (рис. 18а). Процессы протекали стабильно, полученные сплошные и полые заготовки имели характерные для процессов винтовой прокатки утяжины на переднем и заднем торцах заготовок, а также слабовыраженные винтовые линии на цилиндрических поверхностях (рис. 18б).

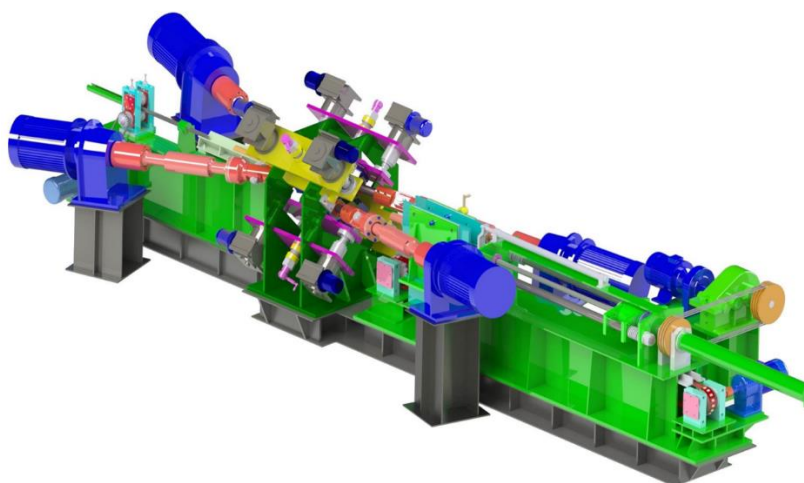
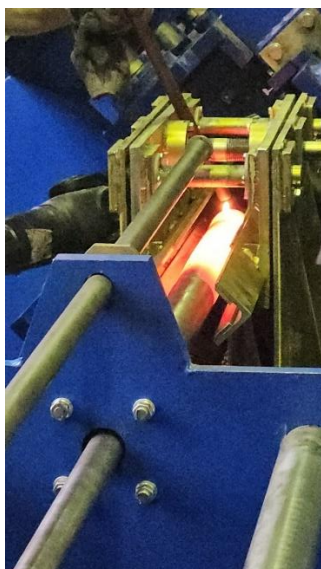


Рисунок 17. Модель лабораторного стана в SolidWorks



а



б

Рисунок 18. Вид лабораторно-промышленного стана с выходной стороны (а) и полученные сплошные и полые заготовки (б)

Для количественного сравнения параметров НДС при двух-, трёх- и четырёхвалковой прокатки и прошивок провели компьютерное моделирование с помощью DEFORM и QForm. Моделировали процессы при равных диаметрах валков, обжатии в пережиме и перед носиком оправки, одинаковых размерах исходной заготовки, частоте вращения валков (табл. 1). Рассчитали изменение накопленной деформации на стационарной стадии винтовой прокатки вдоль радиуса заготовки. Выбрали 6 точек с шагом 2 мм и с помощью пост-процессора DEFORM получили значения интенсивности скоростей деформации, загрузили данные в Microsoft Excel, численно проинтегрировали их по времени и получили значения накопленной деформации. Перепад значений накопленной деформации при двухвалковой прокатке составляет 2,95, при трёхвалковой – 4,09, четырёхвалковой – 2,71 (рис. 19).

Таблица 1. Параметры моделируемых процессов

	Двухвалковый стан с направляющими линейками	Трёхвалковый стан	Четырёхвалковый стан
Диаметр валка, мм	50	50	50 (основной)

Частота вращения валков, об/мин	60	60	60 (основной) 83 (вспомогательный)
Фактор трения (DEFORM/QForm)	1/7	1/7	1/7
Диаметр исходной заготовки, мм	25	25	25
Обжатие в пережиме, %	12	12	12
Обжатие перед носиком оправки, выдвинутой перед пережимом, %	7	7	7
Овальность в пережиме	1,1	1	$1 \leq \xi \leq 1,05$

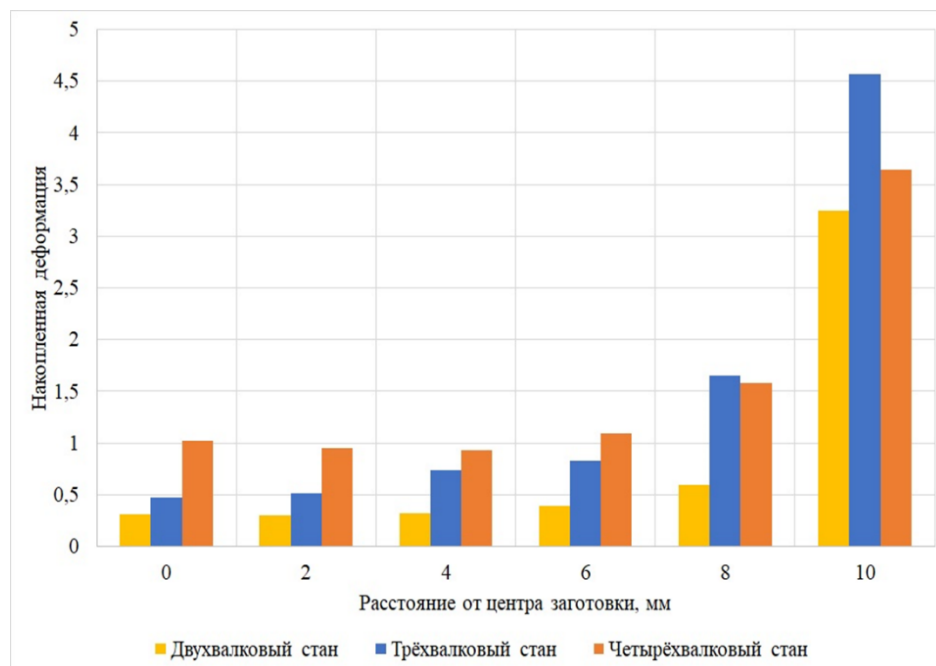


Рисунок 19. Изменение накопленной деформации по радиусу заготовки на стационарной стадии по результатам компьютерного моделирования в DEFORM

По результатам моделирования в QForm оценили значения энергосиловых параметров при различных схемах прошивки. Установлено, что при четырёхвалковой прошивке стационарная стадия наступает быстрее всех, и весь процесс занимает 5,9 с, в то время как для двухвалковой прошивки в стане с линейками процесс длится 6,8 с, в стане с

дисками – 6,7 с, при трёхвалковой прошивке – 6,5 с. Компьютерное моделирование показало, что при прошивке в четырёхвалковом стане усилие на основном – чашевидном валке меньше на 40% и на 33% по сравнению с усилием на валок двухвалкового стана с направляющими линейками и двухвалкового стана с направляющими дисками, соответственно, а также на 28% - по сравнению с трёхвалковым станом. Для эффективности процесса прошивки важно, насколько легко оправке внедряться в заготовку. Для облегчения внедрению оправки необходимо наличие растягивающих напряжений в поперечном сечении заготовки. С помощью инструментария QForm оценили распределение напряжений в поперечном сечении перед носиком оправки на установившейся, то есть стационарной, стадии прошивки. В табл.2 показаны минимальное и максимальное значения среднего напряжения, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

С точки зрения математического ожидания, чем больше его значение, тем больше в сечении растягивающих напряжений. При двух- и четырёхвалковой прошивке значения математического ожидания практически одинаковые и на 20% больше, чем при трёхвалковой прошивке.

Таблица 2. Статистические показатели распределения среднего напряжения на установившейся стадии прокатки

	Двухвалковый стан (линейки)	Двухвалковый стан (диски)	Трёхвалковый стан	Четырёхвалковый стан
Минимальное значение, МПа	-137,4	-135,1	-166,4	-120,1
Максимальное значение, МПа	4,8	4,7	5,5	27
Математическое ожидание, МПа	-19,9	-20,0	-24,0	-20,0
Среднеквадратичное отклонение, МПа	26,6	27,7	30,37	28

Провели компьютерное моделирование процессов трёх- и четырёхвалковой прокатки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm. Параметры моделируемых процессов соответствуют ранее используемым и представленным в табл. 1. При этом угол подачи валков составлял 15 градусов для обеих

схем прокатки. Моделирование проводили при постоянном и переменном факторе трения (рис. 20).

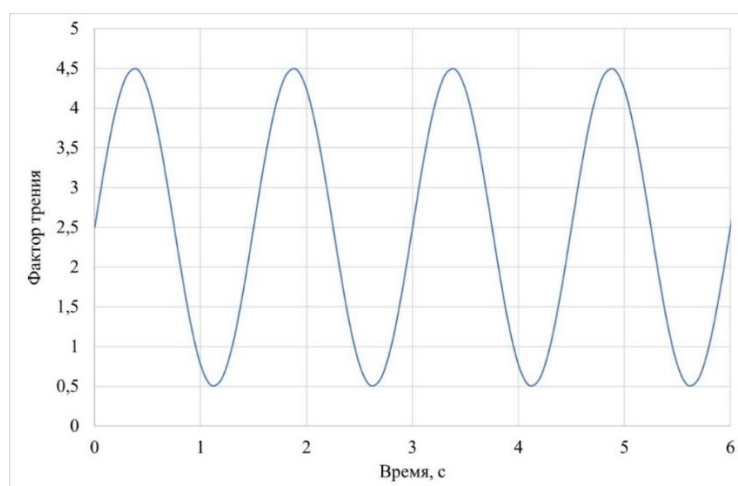


Рисунок 20. Изменение фактора трения во времени при моделировании процессов винтовой прокатки в QForm

По окончании компьютерного моделирования с помощью инструментария QForm оценили распределение значений накопленной деформации в продольном сечении заготовок после трёхвалковой и четырёхвалковой прокаток при постоянном значении фактора трения. Согласно результатам моделирования видно, что наименьшие значения накопленной деформации имеют место в центральной области заготовок. Аналогичное было продемонстрировано и по результатам моделирования в DEFORM. Установлено, что средние значения накопленной деформации в продольном сечении заготовки, определённые с помощью инструментария QForm, после трёхвалковой прокатки составляет 0,83, после четырёхвалковой прокатки – 1,02. При этом в сечении заготовки после трёхвалковой прокатки области со значениями накопленной деформации не более 0,5 составляют 42% от общей площади продольного сечения, после четырёхвалковой прокатки – 33% от общей площади сечения. При четырёхвалковой прокатке деформация глубже проникает в заготовку по сравнению с трёхвалковой прокаткой, что ранее было показано и при моделировании в DEFORM, то есть осевая зона заготовки в деформационном плане будет прорабатываться интенсивнее при четырёхвалковой прокатке, что особенно существенно при деформации литых заготовок.

Оценили усилия на валки при переменном факторе трения при трёх- и четырёхвалковой прокатке. При периодическом характере изменения фактора трения четырёхвалковая прокатка протекает на 0,3 с быстрее, чем трёхвалковая прокатка.

Оценили изменение скорости точки, лежащей на переднем торце заготовки и принадлежащей оси заготовки (рис. 21). Скорость точки при обеих прокатках дважды

падает до значений 3 мм/с – это прокатка, когда часть заготовки ещё находится внутри области граничного условия «толкатель» и в связи с этим скорость заготовки не падает до нуля. В то время как третье резкое падение скорости точки до нуля связано с тем, что заготовка полностью покинула область граничного условия «толкатель». Длительность интервалов, при которых точка не имеет скорости перемещения, сообщаемой валками, то есть когда скорость перемещения точки вдоль оси прокатки падает либо до 3 мм/с, либо до нуля, при трёхвалковой прокатке больше 0,6 с (0,62 с, 0,62 с и 0,65 с), при четырёхвалковой прокатке – меньше 0,6 с (0,53 с, 0,53 с и 0,55 с), что свидетельствует об эффективности процесса прошивки в четырёхвалковом стане.

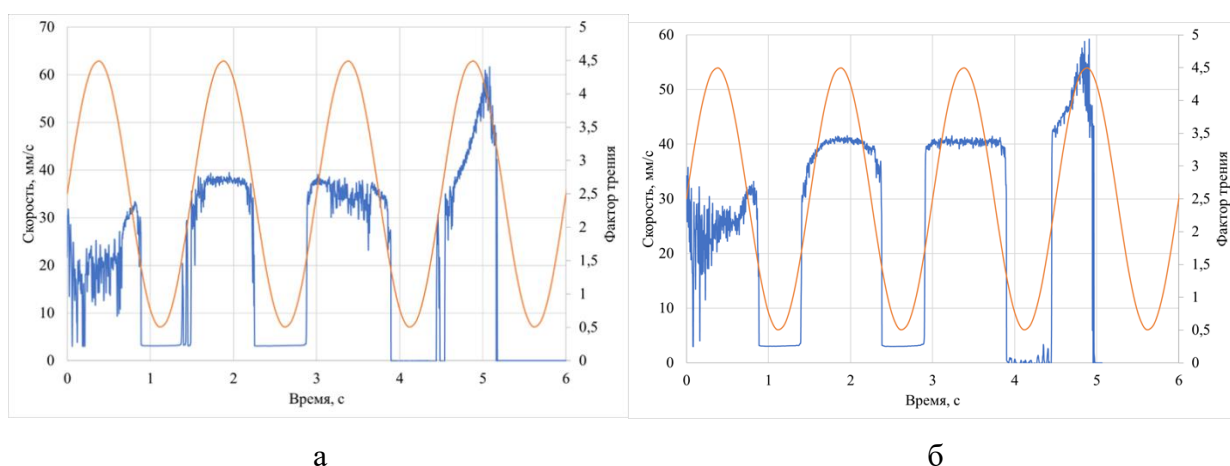


Рисунок 21. Изменение скорости точки на переднем торце заготовки при трёхвалковой (а) и четырёхвалковой (б) прокатке при периодическом характере изменения фактора трения

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана и смоделирована четырёхвалковая прокатка в клети с двумя чашевидными и двумя грибовидными валками. Создана действующая модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки по разработанной схеме. Показано, на основе компьютерного и физического моделирования, что по предложенной схеме можно осуществлять как прошивку, так и прокатку заготовок без замены валков и изменения углов подачи и раскатки. Создан лабораторно-промышленный универсальный четырёхвалковый стан винтовой прокатки, в нём проведены опытные прокатки и прошивки стальных, титановых заготовок, а также заготовок из алюминиевого сплава и бронзы.

2. Проведено моделирование винтовой прокатки и прошивки по двух-, трёх- и четырёхвалковой схемам при равенстве обжатий в пережиме и диаметрах валков. Компьютерное моделирование показало, что при прошивке в четырёхвалковом стане усилие на основном – чашевидном валке меньше на 40% и на 33% по сравнению с усилием

на валок двухвалкового стана с направляющими линейками и двухвалкового стана с направляющими дисками, соответственно, а также на 28% - по сравнению с трёхвалковым станом. Оценили, как изменяются интенсивность деформации, накопленная деформация и среднее напряжение в объёме деформируемых заготовок. Показано, что наиболее равномерно как в поперечном, так и в продольном сечении, параметры деформированного состояния распределены при использовании четырёхвалковой схемы. Разброс значений накопленной деформации в поперечном сечении на установившейся стадии при двухвалковой прокатке составляет 2,95, при трёхвалковой – 4,09, четырёхвалковой – 2,71. Разность значений интенсивности деформации на исследуемой длине 30 мм при четырёхвалковой схеме – наименьшая, составляет 1,5, при двухвалковой схеме – 1,8, при трёхвалковой – 2. В продольном сечении заготовки после трёхвалковой прокатки области со значениями накопленной деформации не более 0,5 составляют 42% от общей площади продольного сечения, после четырёхвалковой прокатки – 33% от общей площади сечения. При прокатке с переменным фактором трения на контакте валков и заготовки длительность интервалов, при которых заготовка не имеет скорости перемещения, сообщаемой валками при трёхвалковой прокатке больше 0,6 с (0,62 с, 0,62 с и 0,65 с), при четырёхвалковой прокатке – меньше 0,6 с (0,53 с, 0,53 с и 0,55 с).

3. Сравнительный анализ существующих схем винтовой прокатки позволил установить, что стационарная горячая винтовая прокатка аустенитной стали по двух- и трёхвалковой схемам при обычных температурах и с небольшим коэффициентом вытяжки (не более 1,33) ведёт к существенному (до 9 раз) измельчению и повышению однородности исходной неоднородной зёрненной (дисперсия среднего размера зерна уменьшается до 10 раз) структуры по всему поперечному сечению проката. Анализ изменения твёрдости на стационарной стадии подтвердил наличие ослабленной, в плане прочности, осевой зоны при двухвалковой и кольцевой зоны при трёхвалковой винтовой прокатке аустенитной стали. На нестационарной стадии прокатки характер распределения параметров напряжённо-деформированного состояния, полученных при компьютерном моделировании двухвалковой и трёхвалковой схем, соответствует характеру распределения размера зерна, полученному по результатам опытных прокаток заготовок из стали 12X18H10T. При этом коэффициент корреляции между интенсивностью деформации и размером зерна при двухвалковой прокатке составляет -0,80, при трёхвалковой -0,89. Зерно и строчечность заготовок после прокатки ориентированы к направлению прокатки под углом, близким к углу подачи валков. По результатам исследований предложена методика и создана трёхмерная модель зерна до и после трёхвалковой винтовой прокатки. Также

определена взаимосвязь между кинематическим, напряжённо-деформированным и структурным состоянием заготовок при трёхвалковой винтовой прокатке.

4. На основе компьютерного моделирования и проведённых физических экспериментов предложена методика прогнозирования вероятного разрушения металла при винтовой прокатке на основе построения графических зависимостей накопленной деформации от коэффициента жёсткости напряжённого состояния. Применимость предложенной методики показана для случая двухвалковой прокатки заготовок из аустенитной стали, радиально-сдвиговой прокатки заготовок из анодной меди, а также двухвалковой прошивки заготовки из стали 50. Методика прогнозирования разрушения позволяет разрабатывать режимы двух-, трёх- и четырёхвалковой прокатки, обеспечивающих сплошность изделий и сокращения брака по причине разрушения. Методика построения трёхмерной модели зерна позволяет разрабатывать режимы для управления формированием структуры металла при двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатке, а также может быть использована и в других процессах ОМД.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Tran Ba Huy, Skripalenko M.N., Gladkov Yu.A., Gartvig A.A. Computer Simulation of Piercing in a Four-High Screw Rolling Mill. Metallurgist. 2018. vol. 61, number 9-10. pp 729-735.

2. Skripalenko, M. M., Romantsev, B. A., Galkin, S. P., Skripalenko, M. N., Kaputkina, L. M. and Huy, T. B. Prediction of the Fracture of Metal in the Process of Screw Rolling in a Two-Roll Mill. Metallurgist. 2018. Vol. 61. № 11-12. pp 925-933.

3. Romantsev B. A., Tran Ba Huy, Skripalenko M. M., Skripalenko M. N., Gartvig A. A. and Gladkov YU. A. Investigation of the Process of Screw Rolling in a Four-Roll Stand by Simulation. Metallurgist, 2018, Volume 62, Issue 7, pp 618-626.

4. M. M. Skripalenko, S. P. Galkin, Her Jae Sung, B. A. Romantsev, Tran Ba Huy, M. N. Skripalenko, L. M. Kaputkina, A. A. Sidorow. Prediction of Potential Fracturing During Radial-Shear Rolling of Continuously Cast Copper Billets by Means of Computer Simulation. Metallurgist, Vol. 62, Nos 9-10, January, 2019, pp 849-856

5. Романцев Б. А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М. М., Скрипаленко М. Н., Гладков Ю. А., Однокозова С. А. Моделирование процесса винтовой прошивки в четырехвалковой клетки. Сталь, №8, 2018, с. 32-35

6. Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи, Романцев Б.А., Галкин С.П., Самусев С.В. Исследование особенностей напряжённо-деформированного состояния заготовок при разных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования. *Сталь*, №2, 2019, с. 35-39
7. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Kaputkina L.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Cheverikin V.V. Study of transient and steady-state stages during two-high and three-high screw rolling of a 12KH18N10T steel workpiece. *Metallurgist*, Vol. 63, Nos. 3-4, July, 2019, pp 366-375.
8. Skripalenko M.M., Galkin S.P., Romantsev B.A., Kaputkina L.M., Danilin A.V., Skripalenko M.N., Patrin P.V., Karpov B.V. Forming features and properties of titanium alloy billets after radial-shear rolling. *Materials*. 2019. T. 12. № 19. C. 1-12.
9. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Kaputkina L.M., Skripalenko M.N. Study of strain and structural peculiarities in different stages of two- and three-high screw rolling. *Steel in Translation*. 2019. T. 49. № 10. C. 709-715.
10. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Kaputkina L.M., Skripalenko M.N., Danilin A.V., Rogachev S.O. Forming features at screw rolling of austenitic stainless-steel billets. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. T. 29. № 6. C. 3889-3894.
11. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Kaputkina L.M., Skripalenko M.N., Danilin A.V., Zavyalova T.V., Pater Z., Rogachev S.O. Statistical research of stainless austenitic steel grain size distribution after screw rolling. *Materials*. 2020. T. 13. № 21. C. 1-9.
12. Gamin Y.V., Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Kadach M.V. Prediction of billet fracture at two-high screw rolling piercing. *Metallurgist*, 64, 2021, pp. 1020-1028.
13. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Danilin A.V. Comparative analysis of damage criteria for screw rolling using computer simulation. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. T. 20. C. 29-32.
14. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Wójcik Ł., Skripalenko M.M. Prediction of ductile fracture in skew rolling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. T. 163. 103706.
15. Юсупов В.С., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Андреев В.А., Ерохин А.В., Мышечкин А.А., Касумов А.Э. Моделирование особенностей напряженно-

деформированного состояния заготовок в процессах винтовой прокатки. Сталь. 2021. № 6. С. 17-19.

16. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P., Kaputkina L.M., Skripalenko M.N., Danilin A.V., Fadeev V.A., Rogachev S.O. Creation of 3D Model of Stainless-Steel Billet's Grain after Three-High Screw Rolling. *Materials*, 2022, 15(3).

17. Skripalenko M.M., Karpov B.V., Rogachev S.O., Kaputkina L.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Huy T.B., Fadeev V.A., Danilin A.V., Gladkov Yu.A. Simulation of the Kinematic Condition of Radial Shear Rolling and Estimation of Its Influence on a Titanium Billet Microstructure. *Materials* 2022, 15, 7980.

18. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Gartvig A. A., Skripalenko M. N., Yusupov V. S., Andreev V. A., Danilin A. V., Gladkov Yu. A. Simulation of Screw Rolling Processes at Constant and Variable Friction Along the Contact Surface Between Roll and Billet. *Metallurgist*, 2023, 67(7–8), 1021–1028.

19. Andreev V. A., Rogachev S. O., Romantsev B. A., Skripalenko M. M., Yusupov V. S. Effect of Screw Rolling on the Structure and Mechanical Properties of Titanium Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2024(2), pp. 289–297.

20. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Yusupov V. S., Andreev V. A., Rogachev S. O., Gartvig A. A., Gladkov Yu. A., Kuprikov, M. P. Simulation of the Deformation Zone and Stress-Strain State during Screw Rolling of Billets from Hard-Deformed Alloy. *Steel in Translation*, 2023, 53(10), 886–891.

21. Skripalenko M. M., Rogachev S. O., Bazhenov V. E., Romantsev B. A., Skripalenko M. N., Karpov B. V., Titov A. Y., Koltygin A. V., Danilin A. V. Research of Three-High Screw Rolling of Aluminum Billets with Copper Inserts at Different Rolls Feed Angles. *Metals*, 2023, 13(10).

22. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Yusupov V. S., Andreev V. A., Skripalenko M. N., Rogachev S. O., Vorotnikov V. A., Gartvig A. A., Gladkov Y. A. Computer-Simulation Assessment of the Stress–Strain and Kinematic States of a Titanium Nickelide Billet during Screw Rolling. *Metallurgist*, 2024, 67(9–10), 1523–1531.

23. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А. Оценка влияния параметров деформированного состояния и температуры на микроструктуру заготовок из коррозионностойкой стали при двухвалковой винтовой прокатке. *Черные металлы*, 2024, №5, с. 81-86.

24. Romantsev B. A., Skripalenko M. M., Vorotnikov V. A., Skripalenko M. N., Yusupov V. S., Andreev V. A., Rogachev S. O., Kuprikov M. P., Hartwig A. A., Gladkov Yu. A. Assessing Strained, Kinematic and Thermal States in Steel Billets under Three-Roll Screw Rolling. *Steel in Translation*, 2024, 54(6), 559–564.
25. Andreev V. A., Karelin R. D., Komarov V. S., Kuprikov M. P., Skripalenko M. M., Cherkasov V. V., Laisheva N. V., Yusupov V. S. Deformation Behavior and Properties of Titanium Nickelide Rods after Hot Screw Rolling. *Steel in Translation*, 2025, 55(7), 750–759.
26. Romantsev B. A., Skripalenko M. M., Skripalenko M. N., Yusupov V. S., Vorotnikov V. A., Sidorov, A. A. (2024). Assessment of shear strains, kinematic state, and deformation zone in two-high screw rolling processes. *Metallurgist*, 2024, 68(7), 1059–1064.
27. Skripalenko M. M., Andreev V. A., Romantsev B. A., Yusupov V. S., Rogachev S.O., Kuprikov M.P, Kuznetsov V. P., Skripalenko M.N, Shuster E. V. Evaluation of the stress-strain and thermal states of Ni-Ti-alloy billets subjected to screw piercing. *Metallurgist*, 2025, Volume 68, pages 1364–1370.
28. B.A. Romantsev, Skripalenko M.M., Budnikov A.S., Yusupov V.S., Andreev V.A., Kuznetsov V.P. Balance of Pulling Forces in Roll Piercing. *Steel in Translation*, 2025, Vol. 55, No. 9, pp. 944-947
29. Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Skripalenko M. N., Yusupov V. S., Andreev V. A., Kuznetsov, V. P. Assessment of Stress–Strain and Thermal State of the Billet during Three- and Four-Roll Screw Rolling and Its Influence on Microstructure Formation. *Steel in Translation*, 2024, 54(12), 1172–1175.
30. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Vorotnikov V.A. Evaluation of deformed, thermal and kinematic states and their influence on the microstructure of a stainless steel billet during three-high screw rolling. *Chernye metally*, 2025, No. 1, pp. 31–36
31. Rogachev S. O., Andreev V. A., Naumova E. A., Skripalenko M. M., Shcherbakov V. A. Behavioral Features of a Multicomponent Hypereutectic Aluminum Alloy under Hot Three-High Radial-Shear Rolling. *Steel in Translation*, 2025, 55(9), pp. 948–956.
32. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Rogachev S.O., Skripalenko M.N., Yusupov V.S., Andreev V.A., Onuchin A.B. Current Research Trends in Three-High Screw Rolling and Piercing of Steel Billets. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2025, No. 9, pp. 1790–1803.

33. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Yusupov V.S., Rogachev S.O., Andreev V.A. Current Directions in Computer Modeling of Three-Roll Screw Rolling Processes: A Review. Steel in Translation, 2026, Vol.56, No. 3, pp. 307-315.

34. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Кузнецов В.П. Актуальные направления исследований процессов двухвалковой винтовой прокатки и прошивки на основе компьютерного моделирования. Металлург, №5, 2026, с. 114-120.

35. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Панасюк В.В., Стебунов С.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Кузнецов В.П. Оценка скручивания гильз в процессах винтовой прошивки с помощью компьютерного моделирования. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025, №8, с. 17-21

36. Скрипаленко М.М., Завьялова Т.В., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Кузнецов В.П. Статистическая и геометрическая оценка геликоидальности истечения металла в процессах трёхвалковой винтовой прокатки. Металлург, 2026, №1, с. 50-59.

37. Способ прошивки в стане винтовой прокатки: Пат. RU 2635685 С1. Рос. Федерация: В21В 19/04 (2006.01). Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" - № 2016147341, заявл 02.12.2016, опубл. 15.11.2017, Бюл. №32 – 9 с.

38. Способ определения площади контакта оправки и заготовки при винтовой прошивке: Пат. RU 2714225 С1. Рос. Федерация: G01В 21/28 (2006.01), G06Т 19/00 (2011.01). Скрипаленко М.М., Комлев В.С., Юсупов В.С., Андреев В.А., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Цюцура В.Ю. Сидорова Т.Ю., Карелин Р.Д. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) - №2019119312, заявл 20.06.2019, опубл. 13.02.2020, Бюл. №5 – 9 с.

39. Способ раскатки трубных заготовок: Пат. RU 2722952 С1. Рос. Федерация: В21В 19/00 (2006.01) Комлев В.С., Юсупов В.С., Андреев В.А., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Будников А.С., Карелин Р.Д.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения

им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) - № 2019119313, заявл. 20.06.2019, опубл. 05.06.2020, Бюл. №16 – 10 с.

40. Способ прогнозирования разрушения заготовок в процессе обработки металлов давлением: Пат. RU 2748138 С1. Рос. Федерация: В21В 1/00 (2006.01) G06N 7/06 (2006.01). Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Карелин Р.Д., Лайшева Н.В., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кадач М.В. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) - № 2020121948, заявл. 02.07.2020, опубл. 19.05.2021, Бюл. № 14 – 10 с.

41. Стан винтовой прокатки: Пат. RU 2764066 С2. Рос. Федерация: В21В 19/02 (2006.01). Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А. заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "МИП "Стан" (RU) - № 2020115423, заявл. 06.05.2020, опубл. 08.11.2021 Бюл. № 31 – 8 с.

42. Способ создания трёхмерной модели зерна металлоизделия. Пат. RU 2778276 С1. Рос. Федерация: G06Т 15/00 (2011.01), G01N 33/20 (2006.01) Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Романцев Б.А., Андреев В.А., Галкин С.П., Капуткина Л.М., Карелин Р.Д., Фадеев В.А., Скрипаленко М.Н., Рогачев С.О., Сидорова Т.Ю. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) - № 2021135514, заявл. 03.12.2021, опубл. 17.08.2022 Бюл. № 23 – 17 с.

43. Способ винтовой прошивки в четырёхвалковом стане: RU 2821416 С1. Рос. Федерация: В21В 19/04 (2006.01). Юсупов В.С., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Андреев В.А., Гончарук А.В., Карелин Р.Д. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) - № 2023125705, заявл. 09.10.2023, опубл. 24.06.2024 Бюл. № 18 – 8 с.

44. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Капуткина Л.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Чан Ба Хюи. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки с целью прогнозирования разрушения заготовок. VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 7-10 ноября 2017 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2017, с. 854-855

45. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А., Скрипаленко М.Н. Оценка энергосиловых параметров и напряжённо-деформированного состояния полых трубных заготовок при различных способах винтовой прошивки. VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 19-22 ноября 2019 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2019 с. 697-698.

46. Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Романцев Б.А., Андреев В.А., Скрипаленко М.Н., Карелин Р.Д. Оценка особенностей деформированного состояния в процессах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования. Третья международная научно-техническая конференция, посвященная 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «ПАВЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва. 27-28 мая 2021 г./Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2021, с. 80-81

47. Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи, Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Сидоров А.А. Моделирование в DEFORM-3D процесса прошивки в четырёхвалковом стане винтовой прокатки. Инженерные системы-2017. Труды Международного форума. 2017. С. 170-176.

48. Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи, Хе Ч.С., Романцев Б.А., Галкин С.П., Капуткина Л.М., Скрипаленко М.Н. Прогнозирование деформируемости заготовок в процессах винтовой прокатки на основе компьютерного моделирования и экспериментальной оценки. Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2018. Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции. 2018. С. 144.

49. Комлев В.С., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С. Преимущества нового четырёхвалкового стана по сравнению с существующим оборудованием винтовой прокатки на основе компьютерного моделирования. Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019). Тезисы докладов международной научной конференции. 2019. С. 46-47.

50. Андреев В.А., Карелин Р.Д., Комаров В.С., Куприков М.П., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Черкасов В.В., Шустер Е.В. Перспективы разработки отечественной технологии производства труб из никелида титана. Сплавы с памятью формы (СПФ-2023). Материалы V Международной конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 6.

51. Андреев В.А., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Рогачев С.О., Будников А.С. Оценка деформационного поведения и вероятности разрушения заготовок из титановых сплавов при различных схемах винтовой прокатки с помощью

компьютерного моделирования. Актуальные проблемы прочности (АПП-2023). Материалы LXVI Международной конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 46.

52. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Воротников В.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А. Оценка влияния напряженно-деформированного состояния на формирование микроструктуры заготовок из коррозионностойкой стали в процессах двухвалковой винтовой прокатки. Научные технологии в машиностроении. Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Москва, 2024. С. 171-173.

53. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Скрипаленко М.Н., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А., Мыльников Ю.С. Исследование процессов винтовой прокатки заготовок из никелида титана с помощью компьютерного моделирования. Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024, №7, с. 15-17.

54. Андреев В.А., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Рогачев С.О., Куприков М.П. Сравнительная оценка распределения параметров напряжённо-деформированного и теплового состояния в процессах прошивки заготовок из труднодеформируемого титанового сплава. Актуальные проблемы прочности. Материалы LXVIII международной научной конференции. Посвящается 75-летию со дня рождения члена-корреспондента НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора Рубаника В.В.. Минск, 2024. С. 146-148.

55. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А. Оценка деформированного, кинематического и теплового состояния стальной заготовки при двухвалковой винтовой прокатке и их влияние на формирование микроструктуры. Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 12-14.

56. Андреев В.А., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Рогачев С.О., Куприков М.П., Кузнецов В.П. Повышение качества сплошных и полых заготовок из труднодеформируемого сплава при использовании нового четырёхвалкового стана винтовой прокатки. Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов. Сборник научных трудов участников научно-технического семинара, посвященный 105-летию со дня рождения Марка Львовича Бернштейна. Москва, 2024. С. 111.