

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

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

Москва - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	21
1.1 Винтовая прокатка и способы её реализации.....	21
1.2 Особенности формоизменения в процессах винтовой прокатки.....	32
1.2.1 Двухвалковая винтовая прокатка.....	32
1.2.2 Трёхвалковая винтовая прокатка.....	35
1.3 Формирование свойств и зёрненной структуры металлов и сплавов в процессах винтовой прокатки.....	38
1.3.1 Формирование зёрненной структуры и свойств металлов и сплавов при двухвалковой винтовой прокатке.....	38
1.3.2 Формирование свойств и зёрненной структуры металлов и сплавов при трёхвалковой винтовой прокатке.....	41
1.4. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки.....	48
1.4.1. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки в двухвалковых станах.....	48
1.4.2. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки в трёхвалковых станах.....	52
1.5 Выводы по главе 1.....	58
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХВАЛКОВОЙ И ТРЁХВАЛКОВОЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК НА СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТАДИЯХ.....	60
2.1 Исследование напряжённо-деформированного состояния и оценка микроструктуры при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке заготовок из коррозионностойкой стали.....	60
2.2 Создание трёхмерной модели зерна до и после винтовой прокатки.....	93
2.3 Моделирование кинематического состояния при радиально-сдвиговой прокатке и оценка его влияния на формирование микроструктуры заготовок.....	104
2.4 Выводы по Главе 2.....	117
ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССАХ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ.....	120
3.1 Прогнозирование разрушение металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане...	120
3.2 Прогнозирование вероятного разрушения при радиально-сдвиговой прокатке непрерывнолитых медных заготовок на основе компьютерного моделирования.....	134

3.3 Прогнозирование разрушения заготовок при прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки.....	144
3.4 Выводы по Главе 3.....	153
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ В ЧЕТЫРЁХВАЛКОВОМ СТАНЕ.....	155
4.1 Компьютерное моделирование процесса прошивки в проектируемом четырёхвалковом стане винтовой прокатки.....	155
4.2 Исследование процесса винтовой прокатки в четырёхвалковой клетке.....	166
4.3 Исследование процесса винтовой прошивки в действующей модели четырёхвалкового стана.....	177
4.4 Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния заготовок при различных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования.....	185
4.5 Моделирование процессов трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатки при постоянном и переменном трении на контакте валков и заготовки.....	198
4.6 Выбор угла подачи для опытных прокаток.....	207
4.7. Выбор коэффициента овализации для опытных прошивок.....	211
4.8 Прокатка и прошивка заготовок в лабораторно-промышленном четырёхвалковом стане.....	215
4.9 Оценка скручивания гильз при двух- и четырёхвалковой винтовой прошивке.....	219
4.10 Выводы по Главе 4.....	228
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	231
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	233
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	259
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	260
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	261
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	263
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	264
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	271

ВВЕДЕНИЕ

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, B.C. 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 UN250 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:

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., Kapukina 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., Kolygin 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., Цюцур 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: G06T 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: B21B 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 (СМПТ-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.

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

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

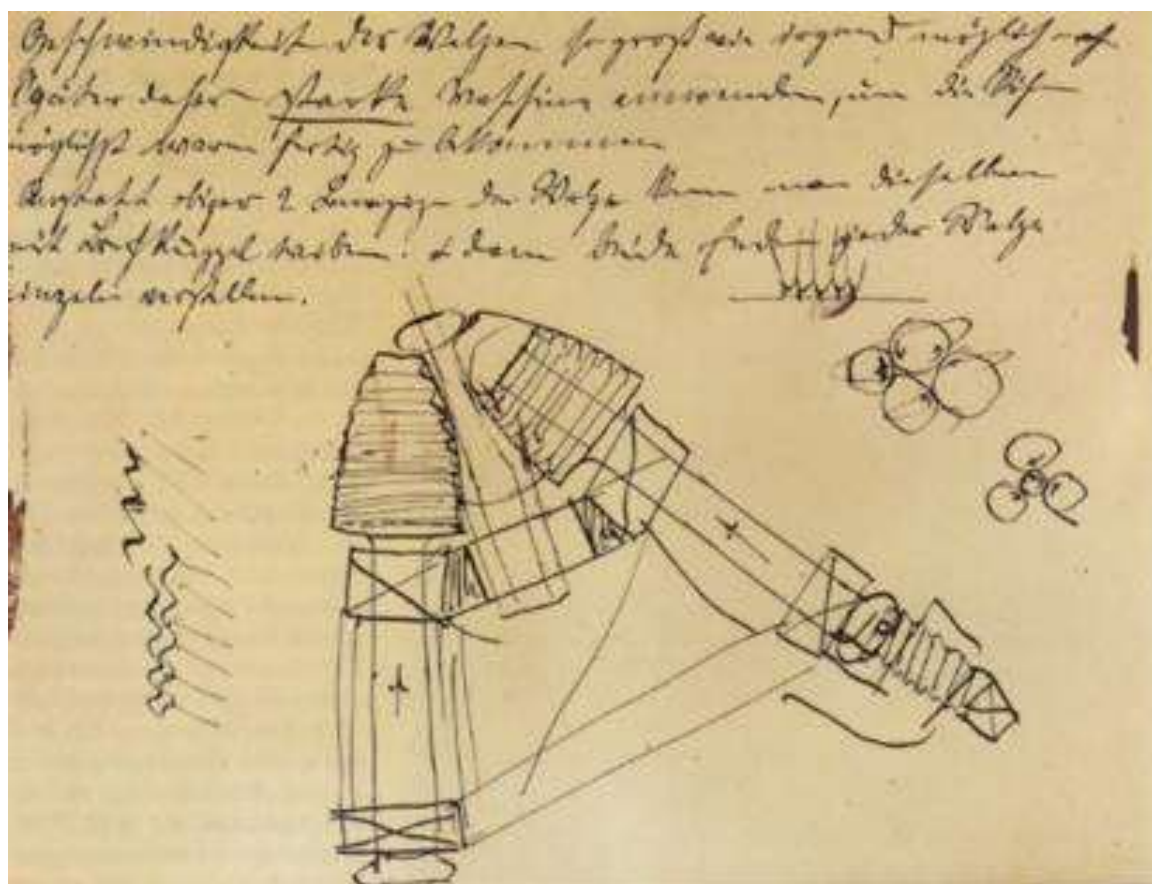
1.1. Винтовая прокатка и способы её реализации

Винтовая прокатка является одним из широко применяемых способов получения сплошных и полых изделий. Винтовой прокаткой получают прутки повышенной точности, бесшовные трубы, полые трубные заготовки (гильзы), а также специальные изделия (шары, кольца, втулки и др.) [1].

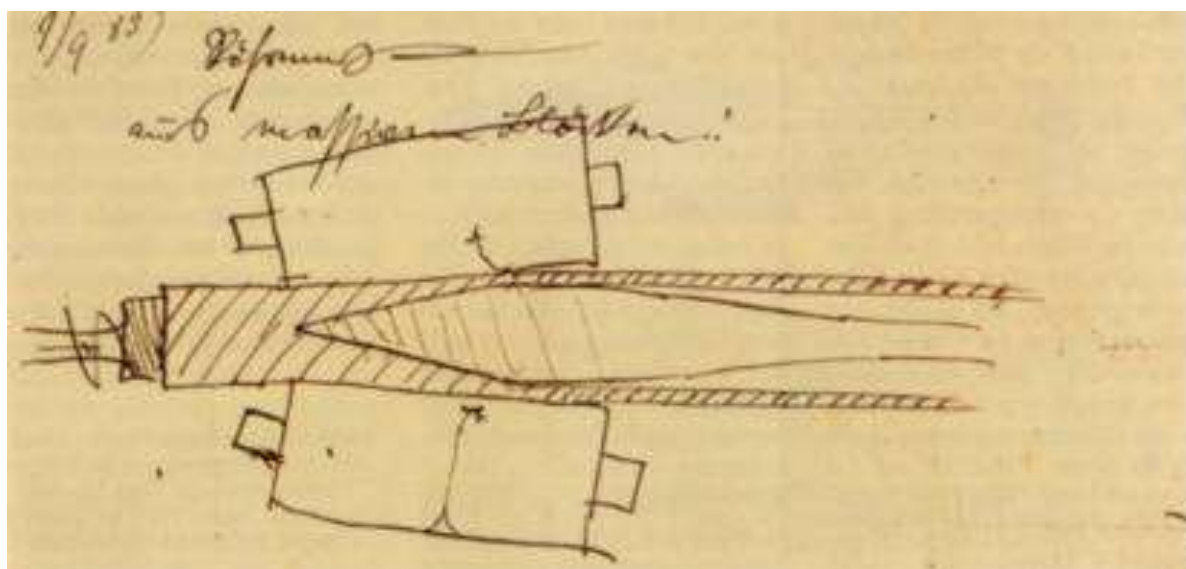
Принято считать, что впервые процесс винтовой прокатки реализовали братья Рейнхард и Макс Маннесманны в 1886 году (рис.1). При этом прокатка и прошивка осуществлялись с помощью двух косо расположенных валков. Спустя чуть более 130 лет с момента реализации первой винтовой прокатки её осуществляют различными способами и на различном оборудовании. Широко применяются для получения полых трубных заготовок (гильз) прошивкой двухвалковые станы винтовой прокатки. При этом могут быть использованы рабочие валки различной формы: бочковидной, грибовидной, чашевидной и дисковой [2,3] (рис. 2).

Двухвалковым станам винтовой прокатки для удержания заготовки в очаге деформации требуется направляющий инструмент. Это могут быть линейки, ролики или диски (рис.3) [1-3]. При использовании бочковидных валков могут быть применены ролики, неподвижные линейки (стан Маннесманна [4]) и приводные диски (стан Дишера [5]). Неподвижные линейки служат направляющим инструментом в двухвалковых прошивных станах с грибовидными и дисковидными валками [1,2,4].

Двухвалковые станы преимущественно используются для получения полых заготовок, при этом в силу особенностей процесса получаемые заготовки имеют разностенность и овальность [4]. Все используемые в традиционных схемах двухвалковой винтовой прошивки направляющие инструменты, в отличие от рабочих валков, не сообщают металлу геликоидального истечения [6].

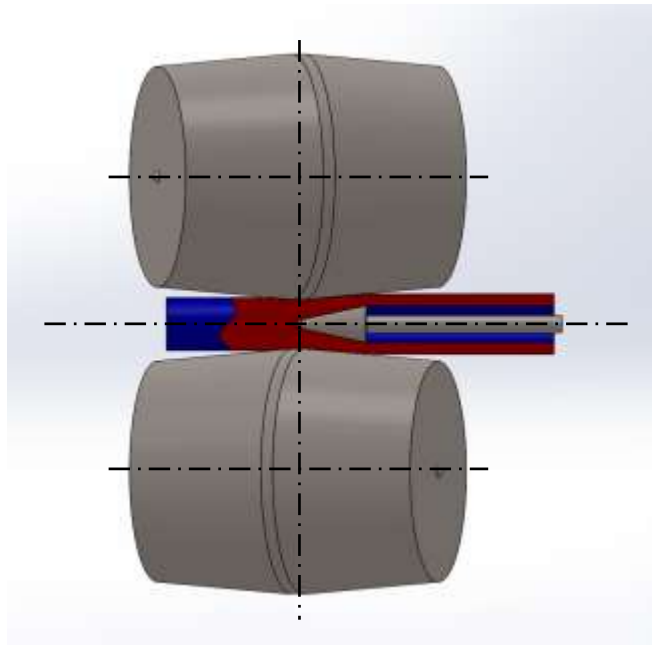


а

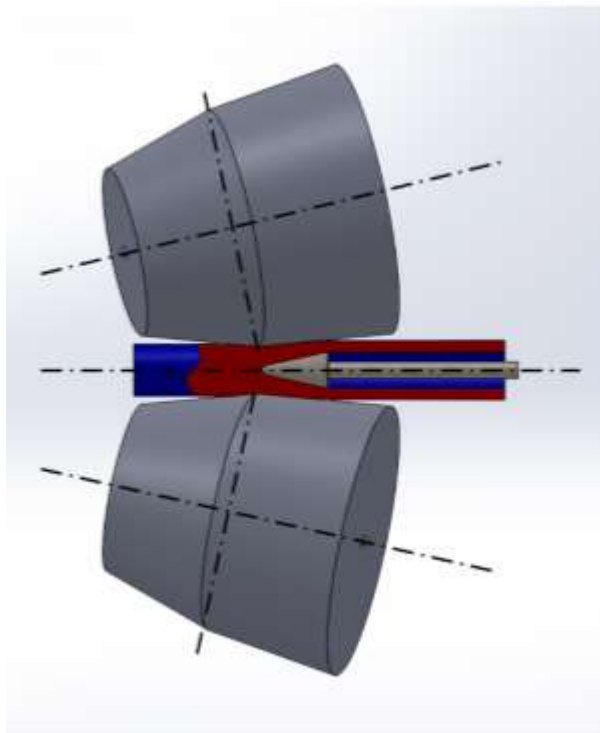


б

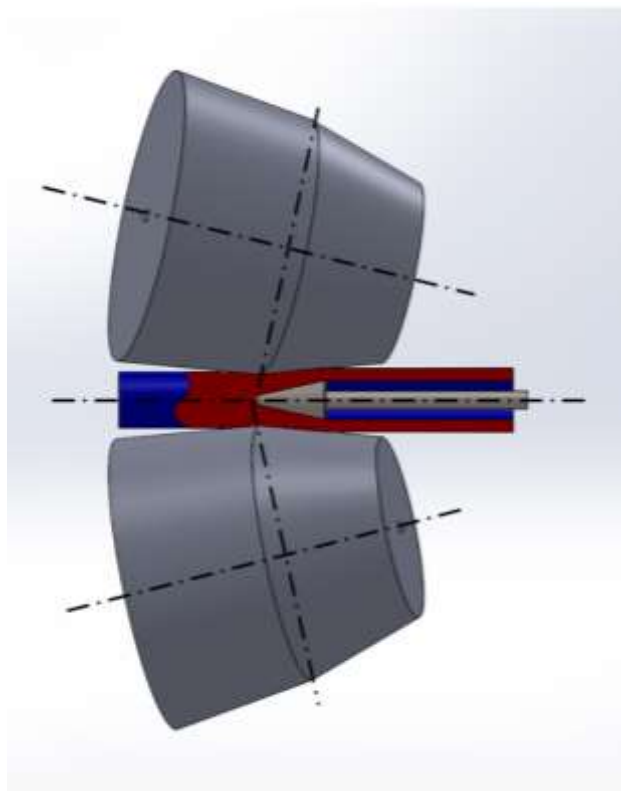
Рисунок 1. Эскизы братьев Маннесманн, иллюстрирующие винтовую прокатку (а) и прошивку (б) (копии эскизов предоставлены проф., д.т.н. С.П. Галкиным)



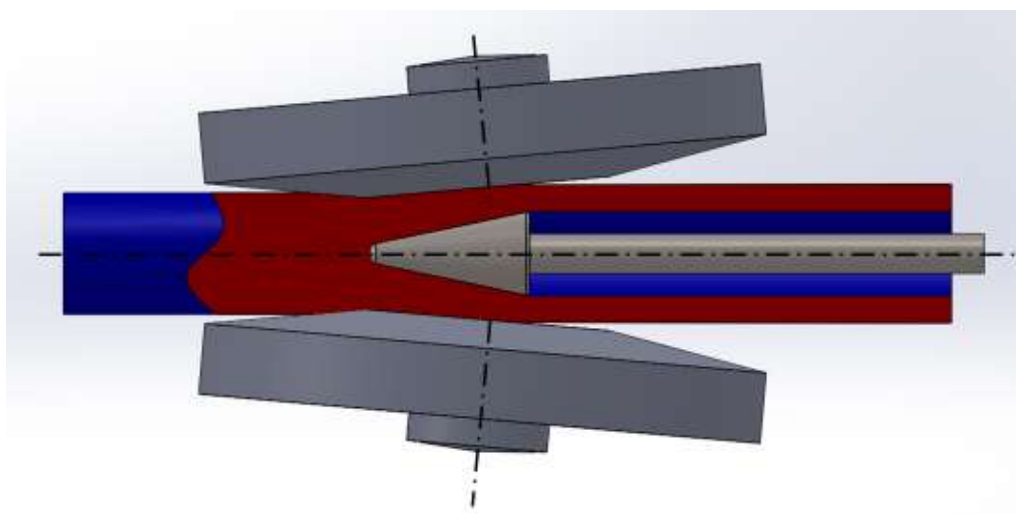
a



6

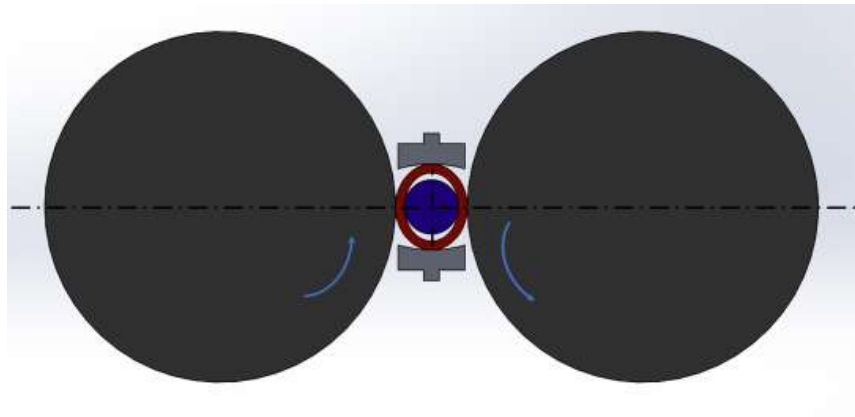


б

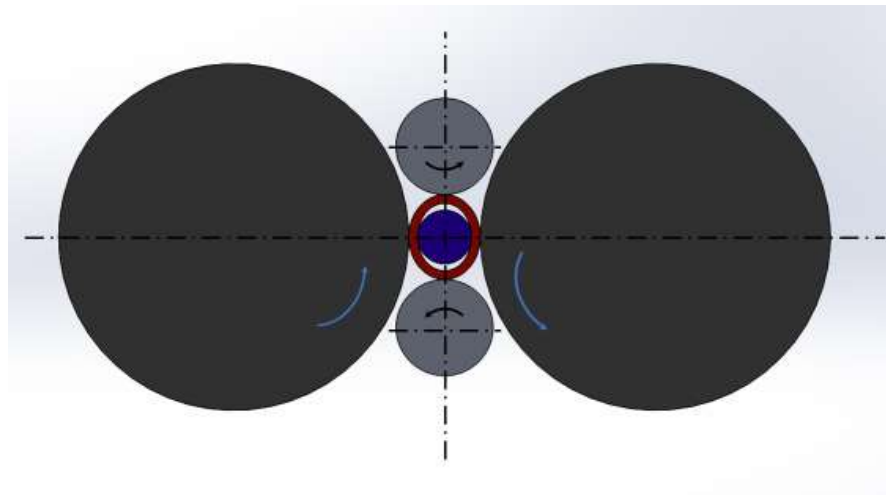


г

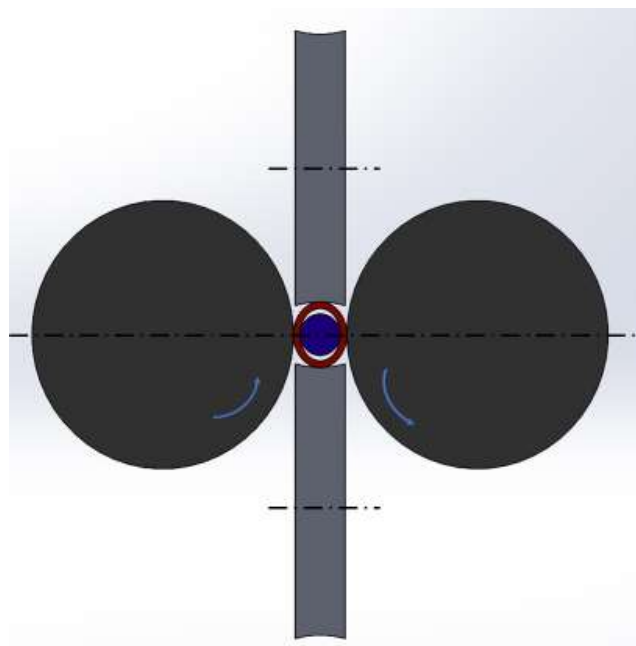
Рисунок 2. Схемы очага деформации при прошивке в станах с бочковидными (а),
грибовидными (б), чашевидными (в) и дисковыми (г) валками [2,3]



a



b



B

Рисунок 3. Схемы прокатки в двухвалковом стане с линейками (а), роликами (б) и дисками (в) [1-4]

Развитием процессов винтовой прокатки стало появление в конце 60-х – начале 70-х годов 20 века трёхвалковых станов винтовой прокатки. Существенным преимуществом трёхвалковой схемы, по сравнению с двухвалковой, является отсутствие направляющего инструмента и образование замкнутого калибра [5]. В силу особенностей напряжённо-деформированного состояния наибольшее распространение трёхвалковые станы получили при производстве сплошных заготовок [1].

Существуют схемы винтовой прокатки, когда деформация осуществляется четырьмя валками. Известен стан [7], в клети которого расположены два рабочих приводных валка и два холостых направляющих (рис. 4). По сравнению с двух- и трёхвалковой прокаткой указанная схема позволяет получить более замкнутый калибр, что создаёт условия для повышения точности получаемой продукции. При этом неприводные направляющие валки вращаются за счёт сил трения с заготовкой, происходит отвод энергии из очага деформации аналогично тому, как теряется энергия при трении о неподвижные линейки, неприводные диски или ролики при двухвалковой винтовой прокатке. В работе [8] предложена четырёхвалковая конструкция стана винтовой прокатки (рис. 5-6), при этом используется так называемая планетарная схема прокатки [9], которая применима и для трёхвалковых станов винтовой прокатки [10]. Среди существующего оборудования для реализации винтовой прокатки стоит отметить представленный в [11] непрерывный стан, состоящий из двух клетей, в одной из которых осуществляют прошивку, а в другой – раскатку (рис. 7), так называемый TSR (Tandem Skew Rolling – стан тандем винтовой прокатки) процесс. Коллективом японских авторов создан лабораторный стан для прошивки глиняных заготовок [12], при этом используется грибовидная схема расположения валков с углом подачи 20° (рис. 9). Стоит отметить, что подобные значения угла подачи относят к большим углам подачи. Именно благодаря использованию больших углов подачи появились процессы винтовой прокатки, которые выделяют в отдельную категорию.

В современной классификации процессов обработки металлов давлением (ОМД) радиально-сдвиговая прокатка определяется как винтовая прокатка в области больших углов подачи ($15-18^\circ$ и более) [13]. Преимущества и теоретические основы процесса подробно изложены в [6], особенности формоизменения – в [6,13,14]. Наибольшее распространение

получили мини-станы радиально-сдвиговой прокатки [15,16], которые используются как в России [17], так и за рубежом, в том числе в Германии [14] и Корее [18].

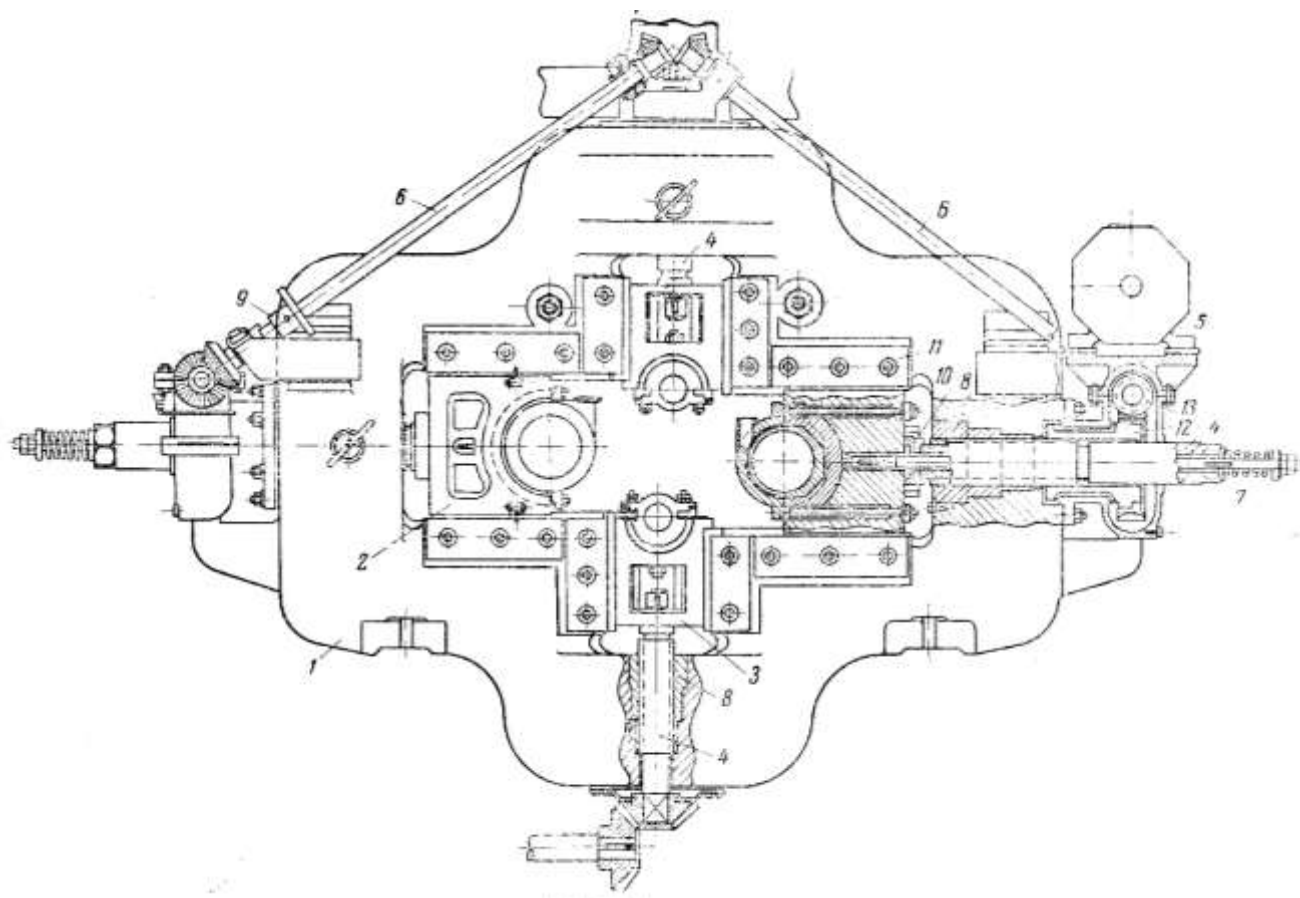


Рисунок 4. Прошивной стан для прошивки слитков [7]: 1 – станина; 2 – подушка рабочего валка; 3 – подушка направляющего валка; 4 – нажимные винты; 5 – электродвигатель; 6 – наклонные валы; 7 – тяга; 8 – нажимные гайки; 9 -муфта; 10 – предохранительный стакан; 11 – наличники; 12 – червячное колесо; 13 - червяк

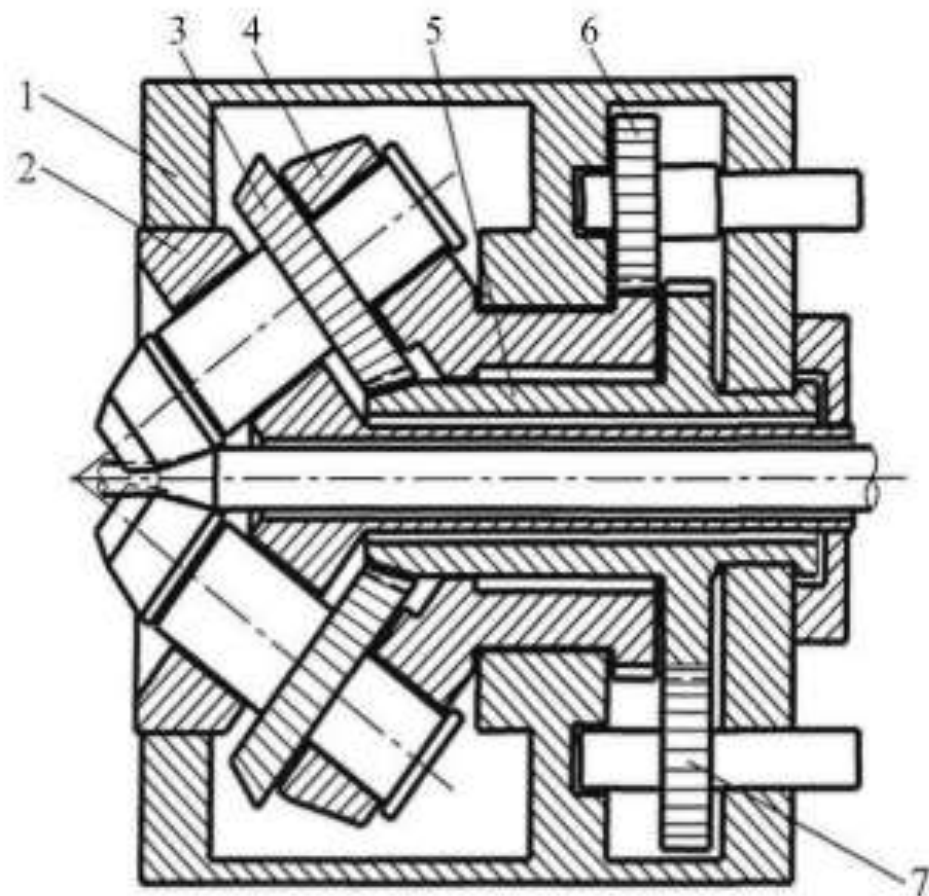


Рисунок 5. Схема четырёхвалкового планетарного стана: 1 – станина; 2,4 – обойма валков (ротор); 3,5,7 – привод валков; 4,6 – привод ротора [8].

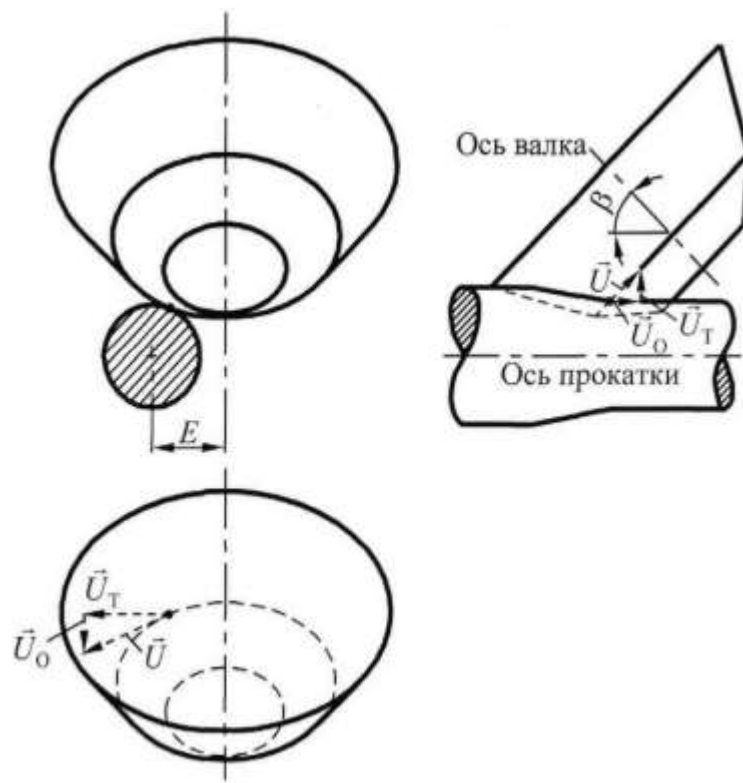
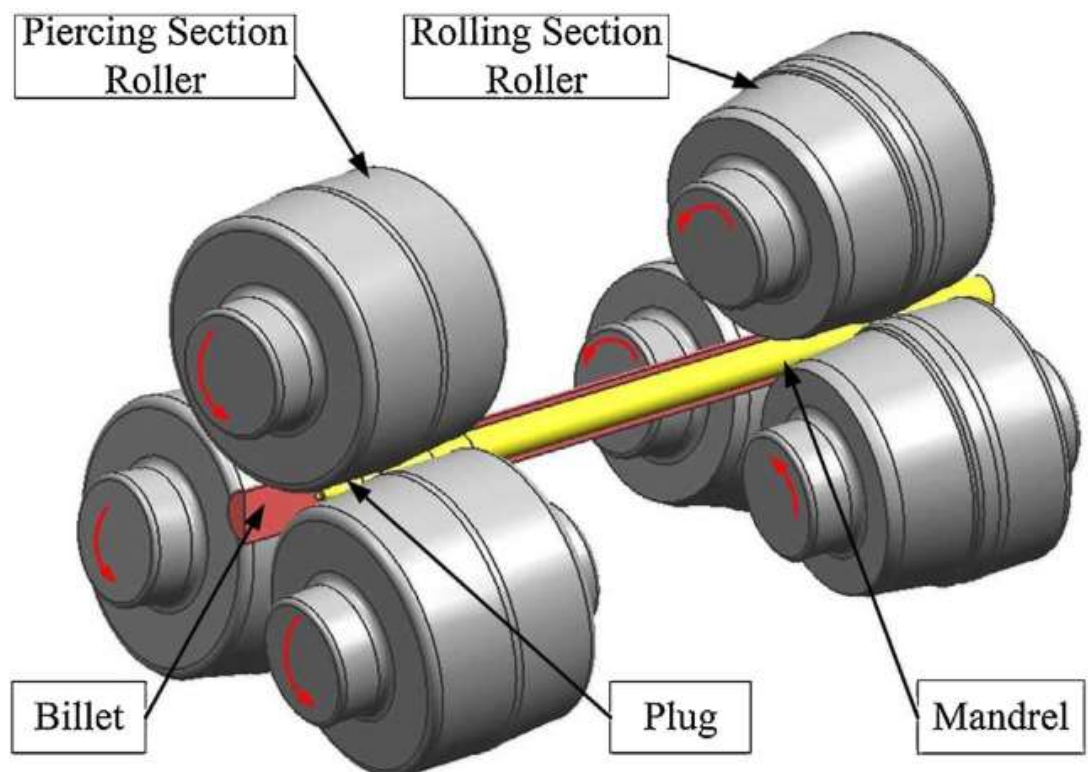


Рисунок 6. Взаимное пространственное положение вала и заготовки четырёхвалкового планетарного стана [8]



a



6

Рисунок 8. Схема TSR процесса [11] (а) и стан для его осуществления (б) (на рисунке (а) показаны прошивная оправка (plug), раскатная оправка (mandrel), заготовка (billet), валок прошивной клети (Piercing Section Roller) и валок раскатной клети (Rolling Section Roller), на рисунке (б) – прошивная клеть (piercing section) и раскатная клеть (rolling section))

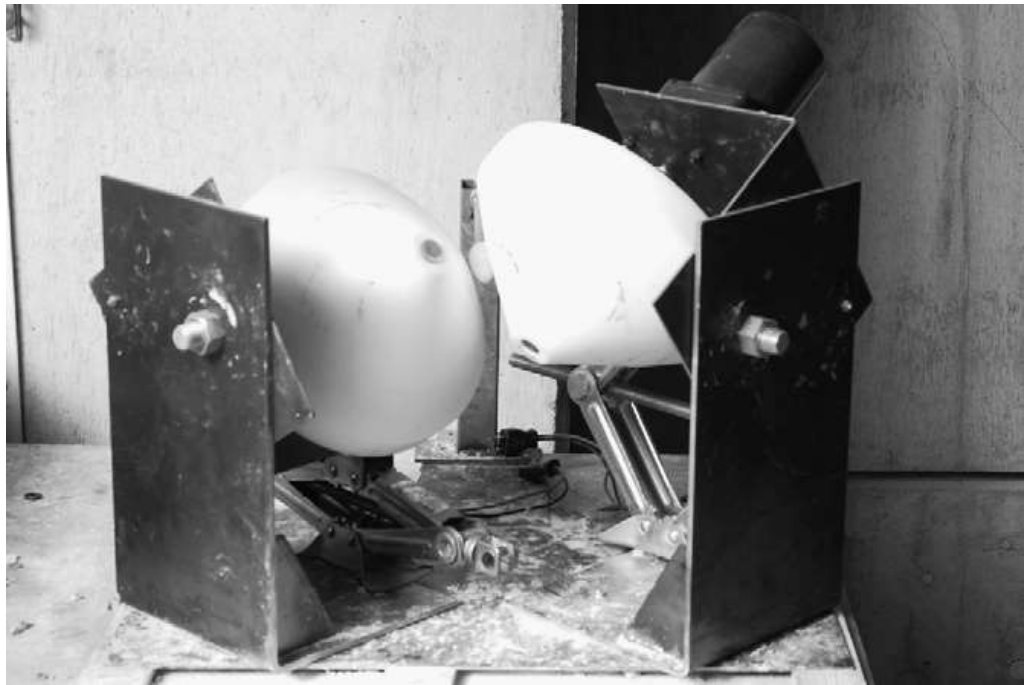


Рисунок 9. Лабораторный стан для прошивки глиняных заготовок

В работе [19] одним из вариантов образования замкнутого калибра при прошивке между двумя рабочими валками может быть произведено добавлением двух направляющих приводных валков, оси которых наклонены под некоторым углом к оси прокатки. При этом не указано, в каких пределах лежит значение этого угла. В работе [20] описывается конструкция рабочей клетки с четырьмя валками юез уточнения, какие валаки приводные, по какой схеме расположены, с какими углами подачи и раскатки.

Особенности формоизменения при винтовой прокатке в определённом смысле ограничивают использования того или иного оборудования. Так, двухвалковые станы винтовой прокатки используются преимущественно для прошивки, а трёхвалковые – для прокатки. Планетарные станы винтовой прокатки могут быть использованы только для узкого марочного и размерного сортамента. Представляется актуальной задача разработки и создания такого стана винтовой прокатки, который мог бы осуществлять прокатку, прошивку и, возможно, раскатку. Разработка подобного стана невозможна без детального исследования формоизменения металла заготовки в станах существующих конструкций. Описание того, как отличается характер деформации металла в зависимости от стана винтовой прокатки изложено в следующем разделе.

1.2 Особенности формоизменения в процессах винтовой прокатки

1.2.1 Двухвалковая винтовая прокатка

Отличительной особенностью при прокатке в двухвалковом стане является осевое разрушение заготовки, имеющее место при определённых режимах деформации [2]. Ранее однозначно считалось, что осевое разрушение, а также ослабление осевой зоны в плане прочности и её разрыхление, является необходимым условием осуществления двухвалковой прошивки, так как именно благодаря осевому разрушению облегчается внедрение оправки в прошиваемую заготовку [4]. Однако, в дальнейшем появилась точка зрения, заключающаяся в том, что осевое разрушение может негативно сказаться на качестве получаемых полых трубных заготовок (гильз), в том числе на качестве внутренней поверхности [1]. Осевое разрушение крайне сложно прогнозировать, экспериментально проверенных методик практически нет. Также стоит отметить трудности при осуществлении экспериментальных исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) заготовок в процессах винтовой прокатки вследствие сложной картины течения металла. В работе [21] проведён детальный обзор и анализ исследований по разрушению в процессах винтовой прокатки, в том числе [5,22,23] (рис. 10). Отмечается [21], что нет единой точки зрения касательно причин возникновения и природы осевого разрушения, так называемого «эффекта Маннесманна» [24], при винтовой прокатке: наблюдали как вязкое разрушение путём среза, так и хрупкое путём отрыва. Показано [21], что осевое разрушение заготовок начинается зарождением пор на расстоянии больше, либо равном радиусу прокатанной заготовки (рис. 11), то есть, вероятнее всего, на нестационарной стадии винтовой прокатки [6]. Отечественными учёными был проведён колоссальный объём исследований НДС при двухвалковой винтовой прокатке. Сложно сделать более детальный их обзор, чем проведённый в работе [21]. С точки зрения актуальности для проведенных в рамках данной работе исследований целесообразно отметить работу [25], в рамках которой удалось прокатать в двухвалковом стане винтовой прокатки слоистые заготовки. При этом без расслоения и разрушения прокаталась только одна заготовка из пяти (рис. 12). Важным результатом работы стало то, что экспериментально подтверждено снижение вероятности осевого разрушения при увеличении угла подачи валков при двухвалковой винтовой прокатке. Показано, что с ростом угла подачи уменьшается значение коэффициента жёсткости напряжённого состояния [26] (рис. 13), что означает более благоприятную, с точки зрения снижения вероятности разрушения, схему НДС [27].

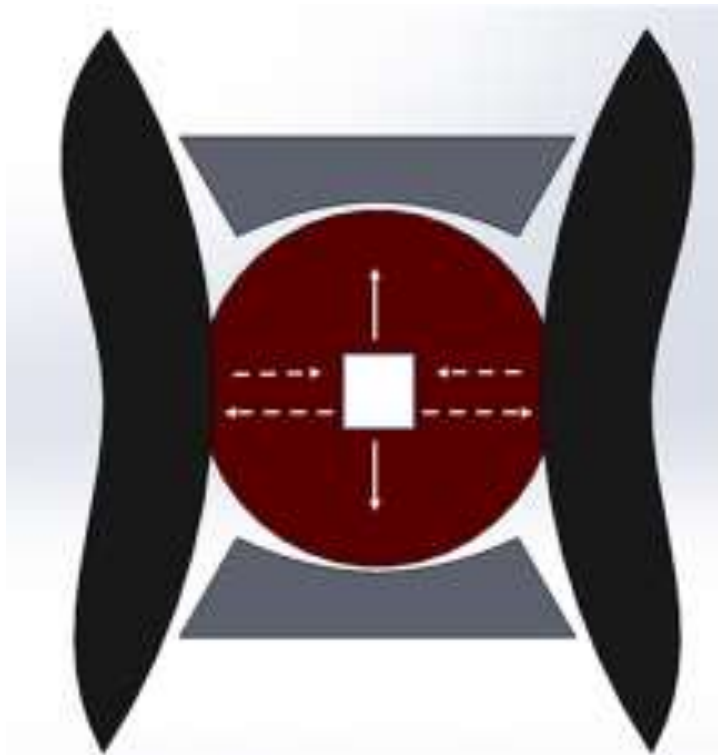


Рисунок 10. Схема очага деформации и напряженного состояния металла в осевой зоне заготовки при двухвалковой прокатке [5,24]

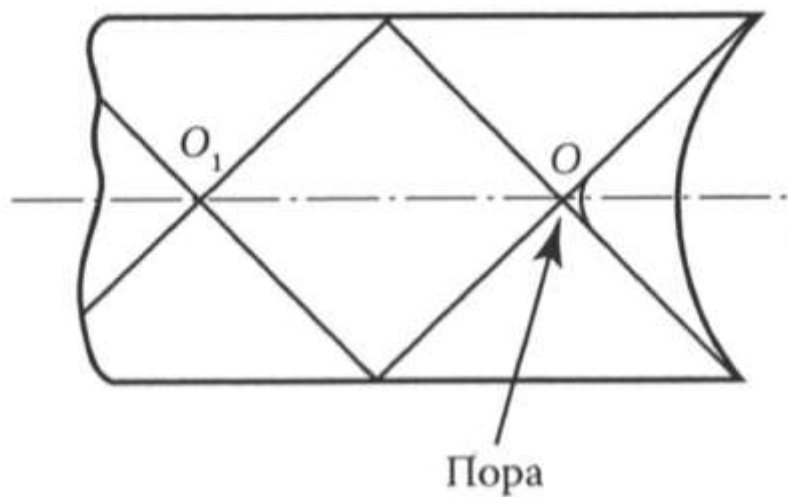


Рисунок 11. Схема формирования осевой утяжины в зависимости от геометрических соотношений физического очага деформации [21]



Рисунок 12. Общий вид образца для исследования процесса винтовой прокатки [23,25]

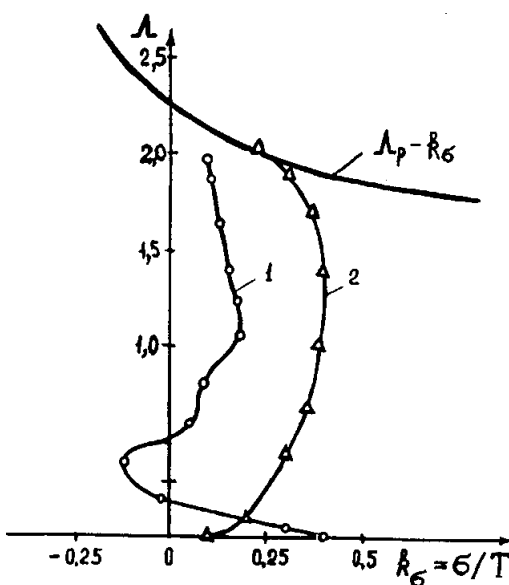


Рисунок 13. Кривые истории деформирования при углах подачи 16° (1) и 12° (2) [23,25]

Поиск зарубежных экспериментальных исследований формоизменения и НДС при двухвалковой винтовой прокатке в электронных реферативных базах данных Web of Science, Scopus и Sciencedirect [28] не позволил обнаружить большое количество публикаций. Зарубежные исследователи предпочитают концентрироваться на технологических задачах [29-30], уделяя заметно меньше внимания исследованию непосредственно деформационных аспектов [31-32]. Трудность поиска публикаций в англоязычных изданиях заключается в том, что, в отличие от отечественных публикаций, где преимущественно используются термины «винтовая прокатка» и «радиально-сдвиговая – прокатка» (как отдельный случай винтовой прокатки), а иногда – косовалковая прокатка или прокатка в косовалковых станах [33], для отсылки к винтовой прокатке используется целый набор терминов и определений. Многие из

них не сразу позволяют понять, о какой именно прокатке идёт речь. Помимо таких, в целом понятных, как «Mannesmann rolling/piercing» (прокатка/прошивка в двухвалковом стане с направляющими линейками, так называемом «стане Маннесманна» [1]), «screw rolling» (дословно – «винтовая прокатка»), «helical rolling» (дословно – «геликоидальная прокатка»), употребляются «skew rolling» («косовалковая прокатка», что применяется для отсылки как к винтовой прокатке, так и продольной прокатке со скрещивающимися валками [34, 35]), «two-high tube rolling/piercing» (дословно – «прошивка/прокатка в двухвалковом стане», при этом не всегда идёт речь о двухвалковом стане винтовой прокатки), «rotary rolling/piercing» (дословно – «ротационная прокатка/прошивка»).

1.2.2 Трёхвалковая винтовая прокатка

Формоизменение при прокатке в трёхвалковых станах таково, что при определённых режимах имеет место разрушение. Согласно исследованиям [5,22,36,37] наблюдается кольцевое разрушение и расслоение заготовок как при трёхвалковой прокатке, так и при прошивке (рис.14).

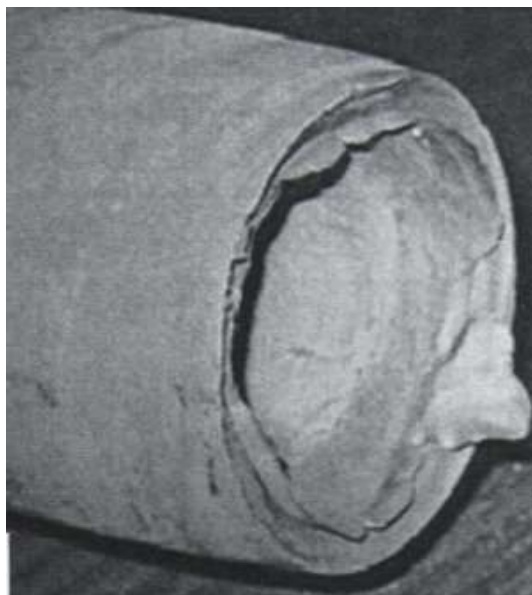


Рисунок 14. Расслоение заготовки после прошивки в трёхвалковом стане [5]

Особенностью формоизменения при трёхвалковой винтовой прокатке ограничивается её применение. Отмечают, что при прошивке заготовок в трёхвалковом стане, образуется кольцевая область растягивающих напряжений [1] и в эту ослабленную, в плане сопротивления деформации, область смещается оправка, что способствует появлению разностенности

получаемых гильз. Также отмечают более высокую, по сравнению с двухвалковой прокаткой, вероятность разрушения металла в близких к поверхности заготовки слоях и появления наружных плён [13,38]. В отличие от двухвалковой прокатки, при которой, как принято считать, в осевой зоне заготовки действуют поперечные растягивающие напряжения [5] (рис.10), однако знак напряжений, действующих в плоскости, совпадающей с линией действия валков не уточнён (рис. 10), при трёхвалковой прокатке предполагается наличие поперечных сжимающих напряжений [5,22] (рис. 15).

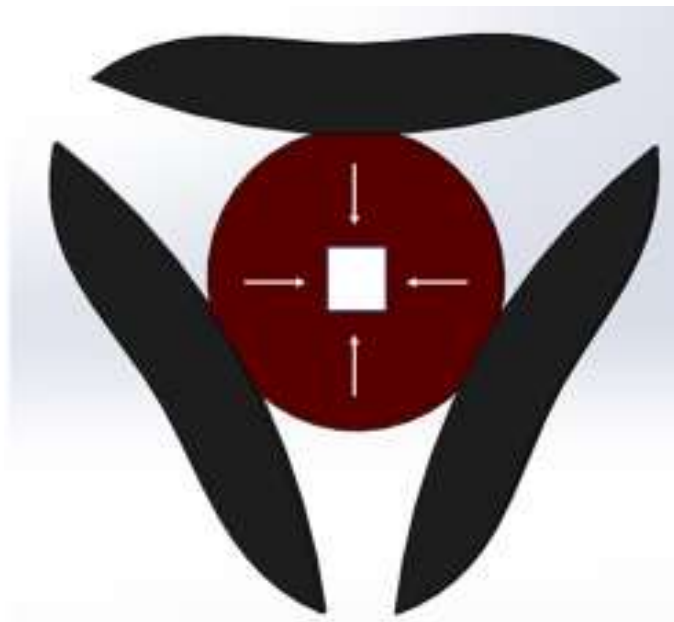
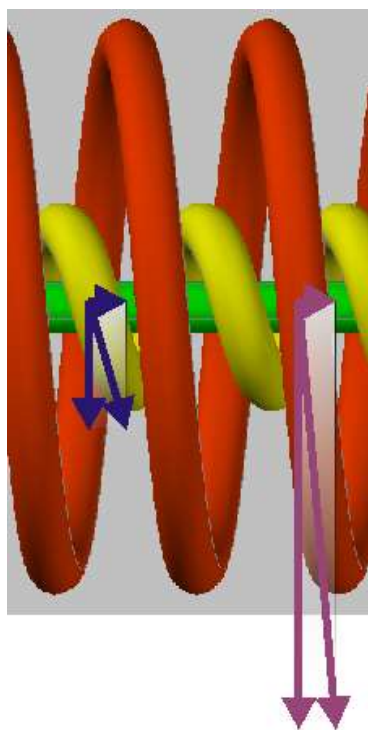


Рисунок 15. Схема очага деформации и напряженного состояния металла заготовки в режиме трёхвалковой прокатки [5,22]

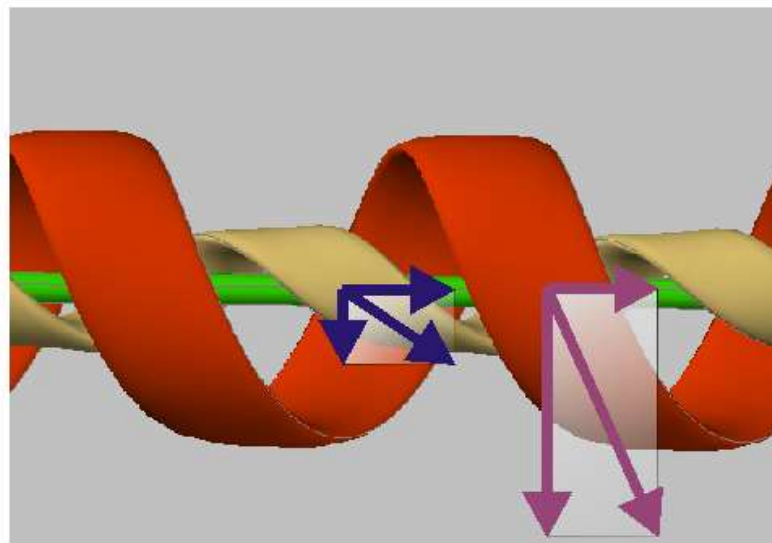
По результатам исследований [39] показано наличие разрушения в осевой зоне заготовки из сплава системы Cu-Cr-Zr после прокатки в трёхвалковом планетарном стане и предложена модель зарождения и развития разрушения. В указанной работе не отмечено качество исходной заготовки – литая, ковкая, катаная или прессованная. Вероятно, делать однозначный вывод о том, что осевое разрушение имеет место по причине применяемой схемы винтовой прокатки в данном случае не совсем корректно. В работе [40] исследованы особенности деформации литых заготовок при винтовой прокатке в трёхвалковом стане и в зависимости от угла подачи валков указано залечивание или образование несплошностей в осевой зоне. При радиально-сдвиговой прокатке (РСП) слитков из различных магниевых сплавов в рамках исследований, проводимых сотрудниками кафедр «Обработка металлов

давлением» и «Литейный технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС», а также при исследованиях, проводимых под руководством Анджея Стефаника (Andrzej Stefanik) из Политехнического университета г. Ченстохова (Польша), наблюдали несплошности в осевой зоне заготовок, однако выявление причин, связанных с появлением этих несплошностей не проводилось.

Процессы РСП детально исследованы в работах [6,14,15,16]. Отмечают, что процессы РСП обладают уникальными особенностями, среди которых формирование локально-расширяющихся трубок тока в интегрально сужающемся очаге деформации (рис. 16), замедление внешних слоёв металла при ускорении движения центральных (рис. 16-17), наведение объёмного макросдвига.



а



б



в

Рисунок 16. Особенности истечения металла при РСП перед очагом деформации (а), на выходе из него (б) и кинематическая схема течения металла с торможением внешних слоёв и образованием расширяющихся трубок тока (в) [14]

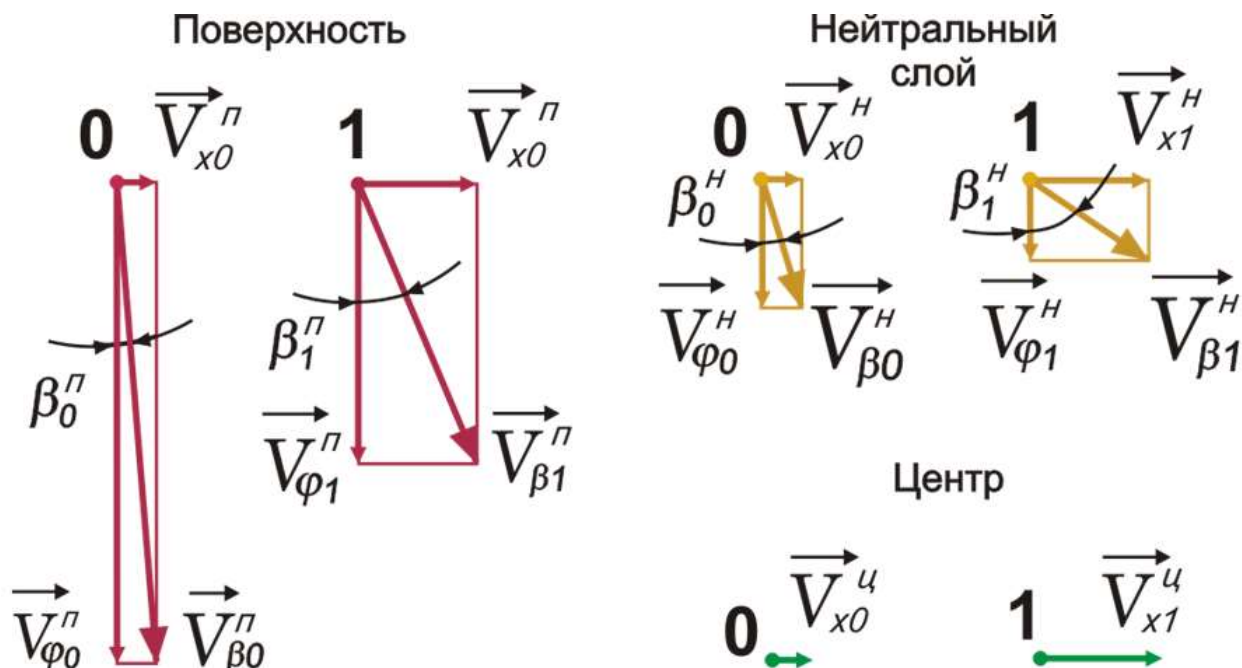


Рисунок 17. Скорости движения металла заготовки при РСП вне очага деформации (0 – перед очагом деформации, 1 – после выхода из очага деформации) [5,14,15,16]

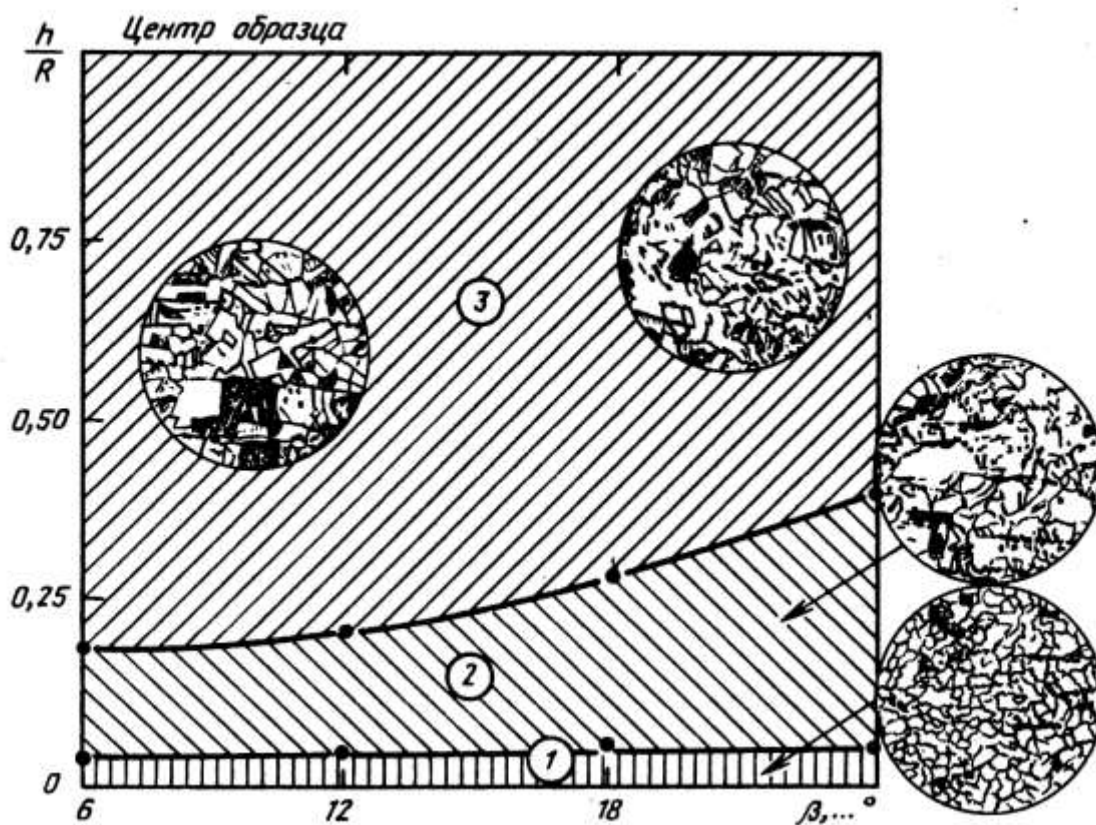
Особенности течения металла и НДС, имеющие, как показывают исследования, для некоторых способов винтовой прокатки, уникальный характер, отражаются на изменении свойств металла прокатываемой заготовки и эволюции её микроструктуры. Обзор исследований, связанных с тем, как различные схемы винтовой прокатки формируют свойства металла и его зёрненную структуру, приведен в следующем разделе.

1.3 Формирование свойств и зёрненной структуры металлов и сплавов в процессах винтовой прокатки

1.3.1 Формирование зёрненной структуры и свойств металлов и сплавов при двухвалковой винтовой прокатке

По результатам проведённого обзора удалось обнаружить небольшое количество исследований, связанных с влиянием двухвалковой винтовой прокатки на изменений свойств сплошных и полых заготовок, в том числе твёрдости, прочности, пластичности, ударной

вязкости и др. В работах [1,2,4] исследовали влияние угла подачи на микроструктуру стали 12X18H10T (рис. 18). Оценку (качественную) зёрнистой структуры до и после прошивки заготовки из титанового сплава в двухвалковом стане осуществляли в рамках [31]. Установили, что полученная труба имеет равномерную двухфазную структуру (рис. 19). Комплексному исследованию свойств прутков и гильз из сплавов Titanium Gr. 2 (отечественный аналог – ВТ1-0) и Titanium Gr.5, он же Ti-6Al-4V (отечественный аналог ВТ-6) после деформации в двухвалковом стане винтовой прокатки посвящена работа [43]. Произведена оценка значений предела текучести при растяжении и кручении после прокатки и прошивки, а также твёрдости вблизи внутренней и наружной поверхности трубы и в середине стенки полученной гильзы. Работа [44] посвящена влиянию прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками на изменение формы и размеров дефектов на поверхности гильзы (полый трубной заготовки).



а

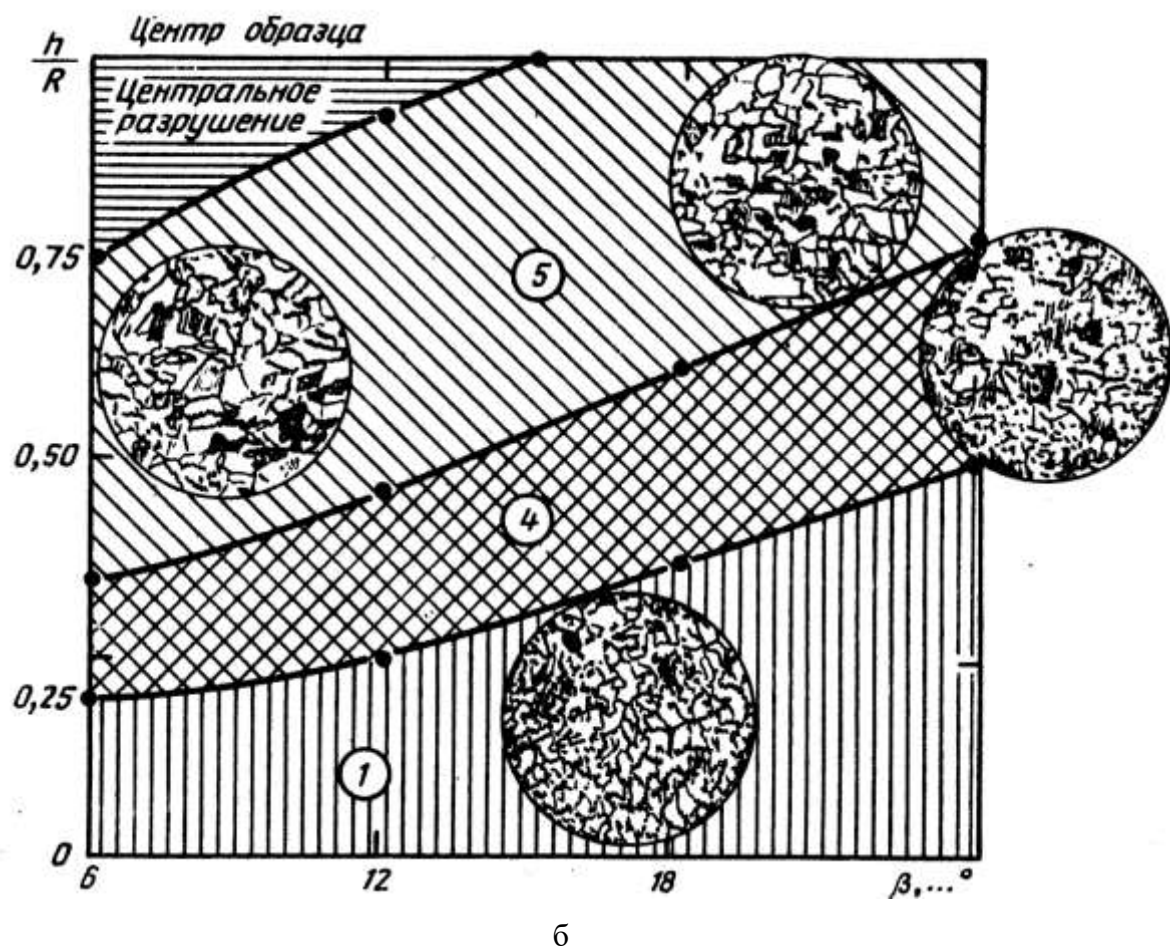


Рисунок 18. Влияние угла подачи на микроструктуру стали 12Х18Н10Т при обжати
10% (а) и 20% (б) [1,2,4]

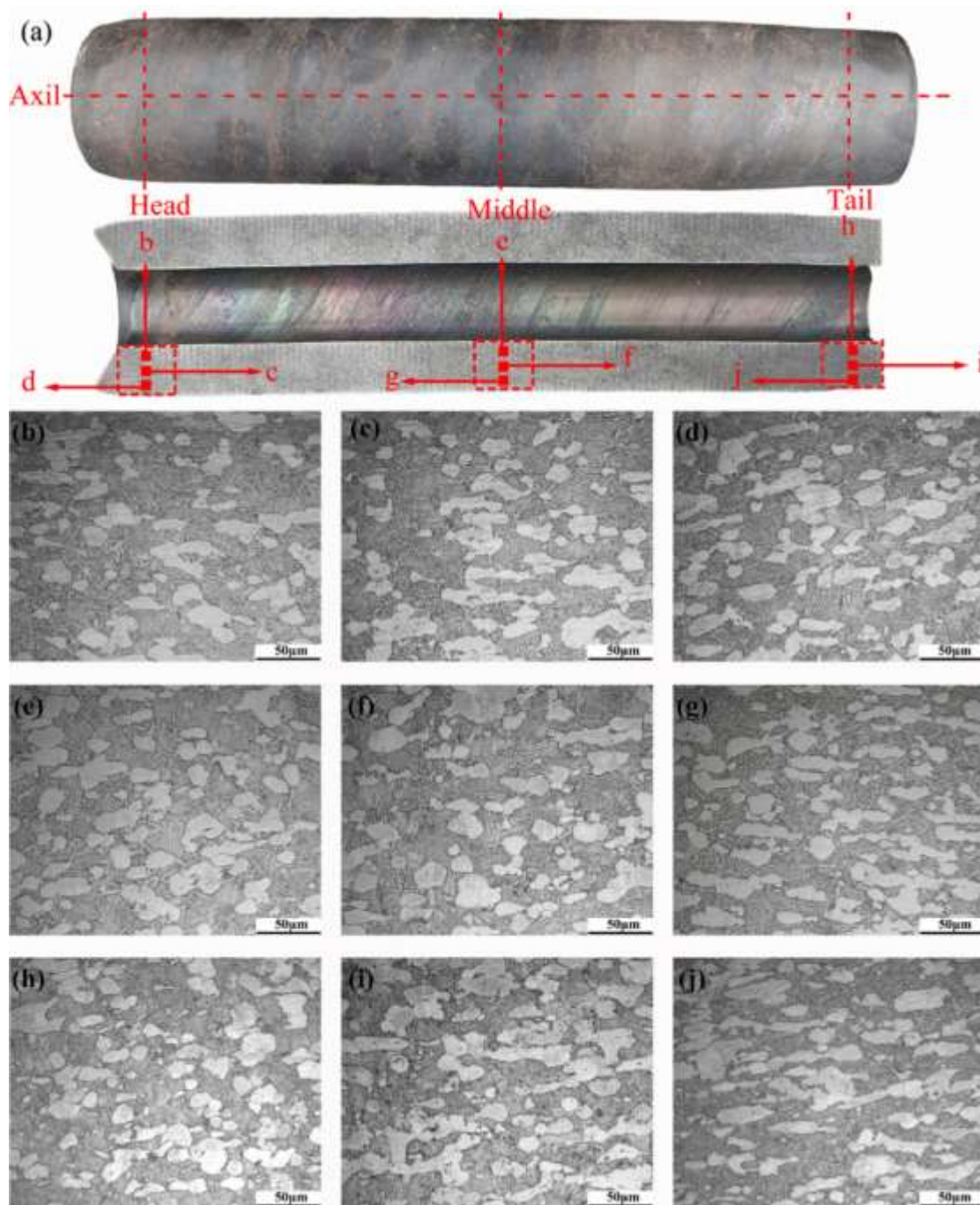


Рисунок 19. Фото структуры металла в точках b-j гильзы (Axil – ось, Head – передний торец, Middle – середина заготовки, Tail – задний торец) [31]

1.3.2 Формирование свойств и зёрненной структуры металлов и сплавов при трёхвалковой винтовой прокатке

По сравнению с двухвалковой прокаткой, трёхвалковая прокатка широко применяется для изменения свойств и формирования зёрненной структуры различных металлов и сплавов.

Вероятно, наиболее часто трёхвалковой винтовой прокатке подвергают титановые сплавы. Отмечая, что исследование механизмов формоизменения при трёхвалковой прокатке находится на начальной стадии [45], установили оптимальную температуру прокатки сплава Ti6Al4V, определили важность последеформационной термообработки, а также отметили повышение значения предела прочности на 13%. Радиально-сдвиговая трёхвалковая прокатка российского аналога Ti6Al4V, то есть ВТ-6, при 940°C позволила получить глобулярную микроструктуру со средним размером α -фазы 10 мкм на поверхности заготовки и 13 мкм в центра заготовки [46-47], а также установить, что разрушение глобулярной структуры составляет 31% по объёму в центральных слоях заготовки и 95% по объёму вблизи поверхности заготовки.

Помимо сплава ВТ-6, исследовали влияние радиально-сдвиговой прокатки в трёхвалковом стане на формирование структуры и свойств сплава ВТ-22 [48-50]. Установили, что предел прочности получаемого после РСП сплава достигает 1640 МПа, а условный предел текучести – 1350 МПа. При этом зёрнистая структура характеризуется размерами элементов не более 0,5 мкм.

В работе [51] осуществили РСП прутка из ещё одного титанового сплава – ВТ1-0. Отмечают [51], как и ряд других исследователей [52-54], что радиально-сдвиговая прокатка относится к процессам так называемой интенсивной пластической деформации (ИПД). Установили [51], что применение РСП позволило получить высокодисперсные карбидные частицы, что, в свою очередь, привело к увеличению предела текучести, предела прочности, модуля Юнга и др.

Слиток никелида титана (сплав, демонстрирующий эффект «памяти формы» [55]) 90-100 мм диаметром подвергали РСП до диаметра 20 мм за несколько проходов при температуре 850-900°C в рамках исследования [56]. По результатам исследований установили оптимальное сочетание режимов деформации и последующей термообработки для осуществления мартенситных превращений.

Исследования, проведённые в рамках [57], показали, что радиально-сдвиговая прокатка является эффективным методом для получения ультрамелкозернистой структуры сплава ВТ-30, однако для сплава Ti-28Nb-8Mo-12Zr однородную ультрамелкозернистую структуру с размером зерна 2 мкм получить удалось только вблизи поверхности прутка. Наблюдали микропоры и микротрещины в центре заготовки (рис.20).

Помимо титановых сплавов, трёхвалковую радиально-сдвиговую прокатку часто используют для изменения свойств и структуры различных магниевых сплавов. В работе [58]

оценивали, как влияет продольная прокатка и РСП на деформационную проработку структуры и изменение свойств слитка. Материал слитка имел предел текучести 107,6 МПа, предел прочности – 166,8 МПа. После продольной прокатки значения составили 169,9 МПа и 239,4 МПа, после РСП – 229,2 МПа и 263,5 МПа соответственно. В работе [18] проведено детальное исследование влияния трёхвалковой РСП на изменение размера зерна в поперечном сечении заготовки и увеличение предела текучести. Стоит отметить, что, с одной стороны, авторы ссылаются на процесс прокатки, определяемый термином PSW (от немецкого Planetenschragwalzen) и ссылаются на источники [59-61], в которых описывается трёхвалковая планетарная схема [39] (рис. 21). С другой стороны, авторы ссылаются на [46,62,63], в которых речь идёт о процессах РСП. При этом схема процесса, приводимая в [18], относится всё-таки к трёхвалковой РСП (рис. 22). Продолжением работы [18] может считаться исследование [64], посвященное детальному анализу того, как трёхвалковая РСП измельчает зерно, изменяет текстуру и механические свойства сплава системы Mg-Al-Zn-Mn, а также сравнению влияния на механические свойства процесса трёхвалковой РСП и равноканального углового прессования [65].

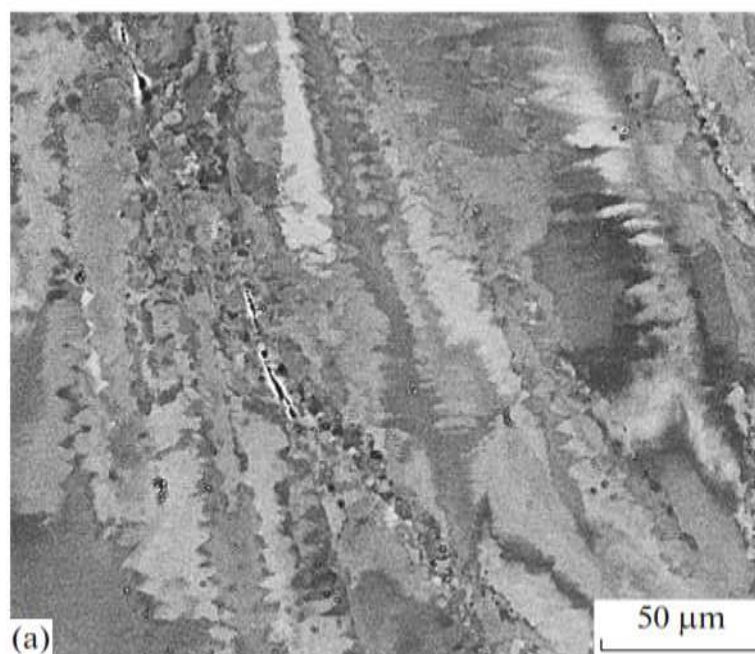


Рисунок 20. Изображение структуры сплава Ti–28Nb–8Mo–12Zr, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, на оси прутка после РСП при температуре 950°

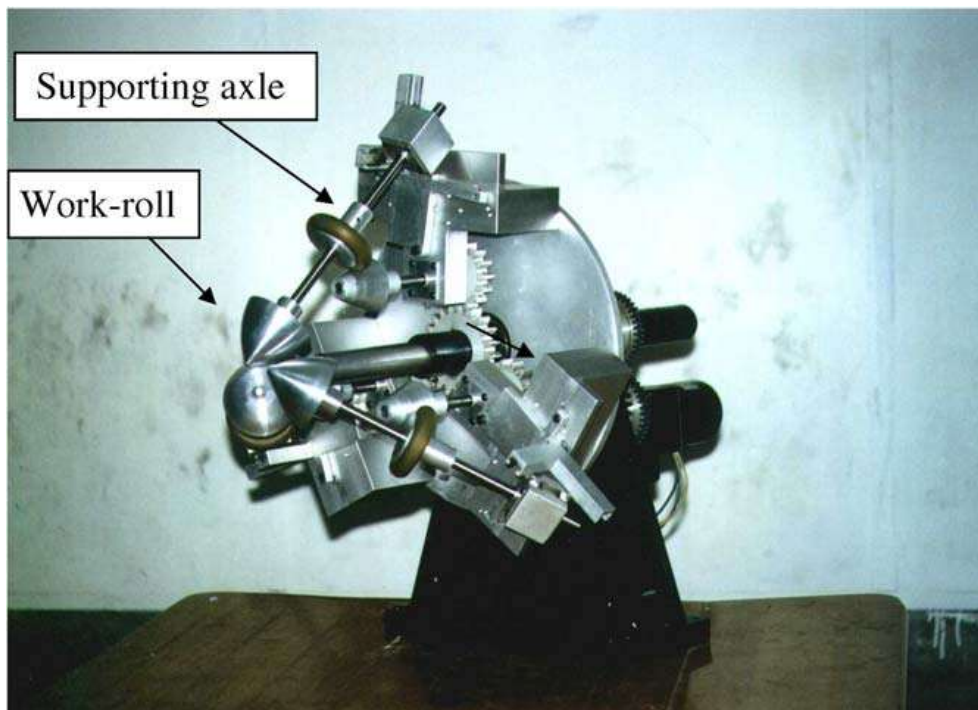


Рисунок 21. Фото макета трёхвалкового планетарного стана: work-roll – рабочий валок, supporting axle – вспомогательный вал [60]

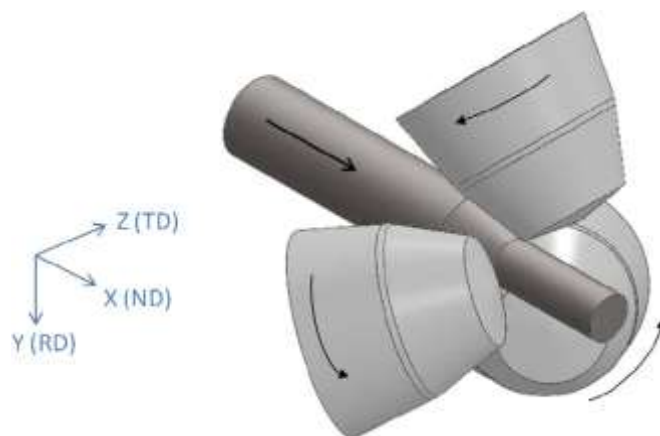


Рисунок 22. Схема процесса винтовой прокатки, используемая в [18]

При обзоре были обнаружены исследования, в ходе которых трёхвалковая РСП применялась для деформации заготовок из сталей, главным образом аустенитного класса, после чего проводились исследования микроструктуры получаемых изделий и осуществлялись различные стандартные испытания для оценки свойств материала получаемых сплошных и полых изделий. Наряду с [51-54] авторы работы [66,67] отмечают, что РСП относится к процессам ИПД и позволяет получать ультрамелкозернистую структуру, при этом для

исследования выбирают сталь AISI 321 (российский аналог – 08X18H10T). Отмечают, что данный материал широко применяется в атомной промышленности, главным образом для получения труб, используемых в конструкции топливных элементов реакторов на быстрых нейтронах. Также отмечают, что исследуемая сталь применяется для изготовления оборудования, работающего при высоких температурах и в агрессивных средах. По результатам опытных прокаток установили более чем двукратное увеличение твёрдости (290-320 HV) по сравнению с твёрдостью исходной недеформированной заготовки. Выявили превышение значений твёрдости поверхностных слоёв на 10,2 % (33 HV) по сравнению с центральными слоями. Сталь марки AISI-304 (российский аналог – 08X8H10) прокатывали при 850°C (для данной марки это тёплая деформация) в несколько проходов в рамках [68]. Методика исследований близка к указанной в [66,67], оценили изменение твёрдости в поперечном сечении, установили наличие мелкозернистого слоя в поверхностных слоях заготовки, при этом зёрна равноосные с размером около 1 мкм. Ещё одна сталь аустенитного класса – 12X18H10T – подвергалась прошивке в трёхвалковом стане [2]. Три партии заготовок диаметром 85 мм были прокатаны с торможением (прошиты не насквозь) на оправке диаметром 50 мм при углах подачи 6, 12 и 15°C с обжатием перед носиком оправки и в пережиме валков 11%; температура нагрева перед прокаткой 1200...1220°C. Заготовки после прокатки охлаждали в проточной воде. Анализ микроструктуры показал, что по поперечному сечению гильз-заготовок наблюдалась характерная неравномерность деформации, которую оценивали по изменению размера зерна аустенита. В непрошитої части заготовки образуется поверхностный мелкозернистый слой (5-6 балл по шкале ГОСТ 5639-82), проникающий на глубину 1-2 мм, далее на глубину 5-6 мм распространяется зона с размером зерна 4-5 баллов. В осевой зоне деформация не получила развития и зерно в этой зоне характеризуется 2-3 баллом, то есть качество металла перед носиком оправки соответствует качеству металла в исходном состоянии (рис. 23).

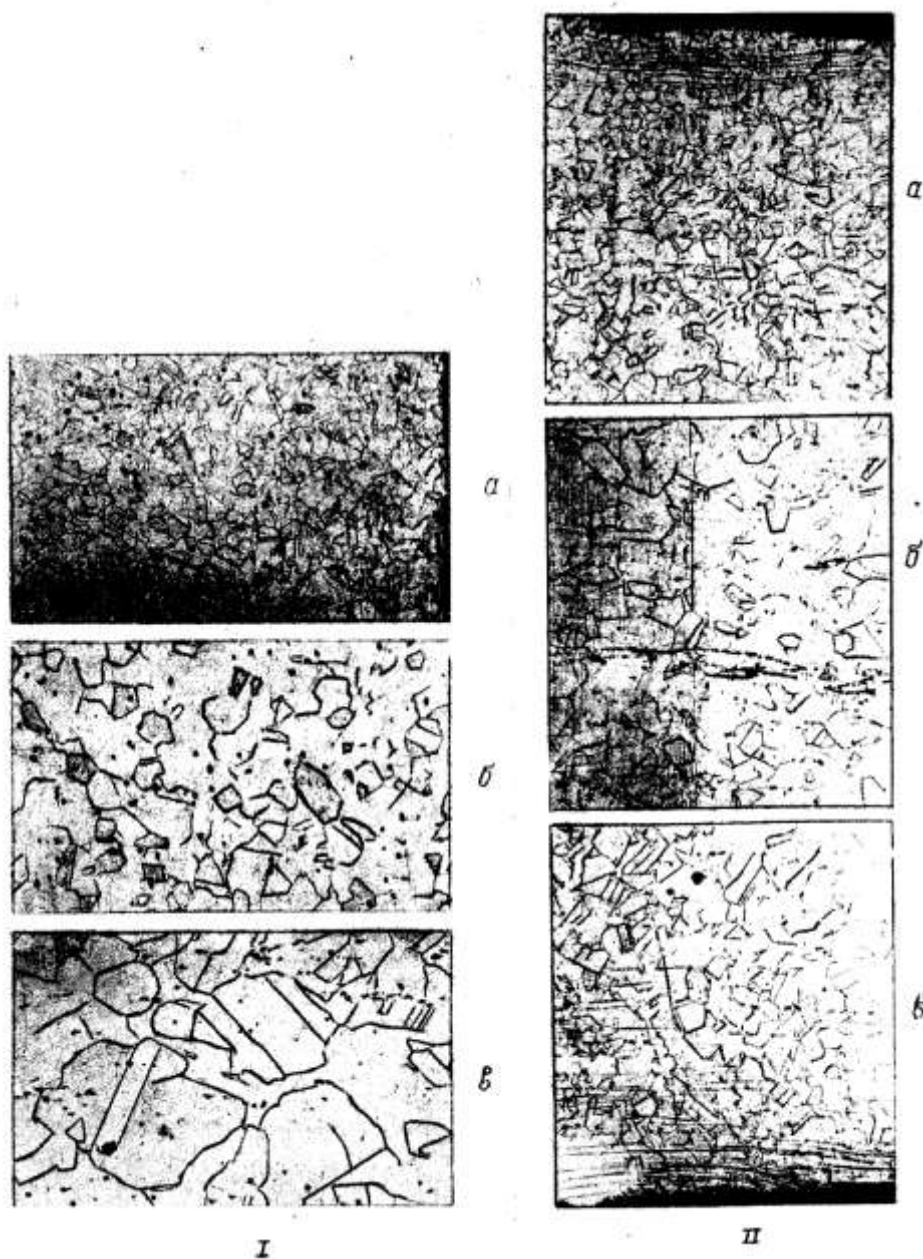


Рисунок 23. Микроструктура заготовки из стали 12Х18Н10Т в сечении перед носиком оправки (I), гильзы (по толщине стенки) из стали 12Х18Н10Т (II), прокатанной в трёхвалковом стане МИСиС-130Т [2]

Низкоуглеродистая сталь 10Г2ФБЮ подвергалась термомеханической обработке в ходе исследований, осуществлённых в [69]. Обработка давлением осуществлялась в трёхвалковом стане РСП. Ферритные зёрна измельчились с 12 мкм до 5 мкм, прочностные характеристики повысились на 18%, величина ударной вязкости при температуре -40°C выше значений в состоянии поставки в 8 раз.

Отечественные и зарубежные авторы также использовали трёхвалковую винтовую прокатку в качестве способа обработки давлением меди и её сплавов. Медь марки Т2, по китайскому стандарту, (согласно стандарту EN 1652:1998 это марка Cu-ETP, что соответствует отечественной М1) подвергалась прошивке в трёхвалковом планетарном стане [70], благодаря своим пластическим свойствам медь является едва ли не единственным материалом, который можно подвергать именно этому способу ОМД. Подробно проанализирована микроструктура получаемой полой заготовки. В осевом направлении она меняется от вытянутых (до очага деформации) до равноосных зёрен (на выходе из очага деформации), при этом микротвёрдость, по сравнению с недеформированной заготовкой, увеличилась до 2 раз. Медь марки ETP (такой же материала как и в [70]), деформировали в трёхвалковом РСП стане, хотя указывали схему как планетарную, аналогично [18], измеряли микротвёрдость в поперечном сечении после одного, трёх и шести проходов. Размер зерна после прокаток уменьшился с 28 мкм до значений менее 1 мкм. Влияние РСП в трёхвалковом стане на микроструктуру и микротвёрдость меди М1 также исследовали в работе [71]. Планетарную трёхвалковую прокатку, без приведения непосредственно калибровки валков или общей схемы валкового узла, сплава Cu-10Ni-1Fe-1Mn (российский аналог - МНЖМЦ10-1.5-1) осуществили в работе [72] с целью определить как в деформационном плане прорабатывается структура исходной литой заготовки.

Коллектив авторов [71] принимал участие в проведении исследований [73] с целью подбора режимов трёхвалковой РСП для деформации горячепрессованных прутков из алюминиевого сплава Д16. Сплавы на основе алюминия и кремния – силумины – подвергали РСП в рамках [74], отметив по результатам исследований, что РСП по трёхвалковой схеме можно рассматривать как наиболее эффективный способ ОМД для улучшения механических свойств материалов, которые трудно деформировать другими способами.

Кроме изменения свойств и формирования зёрненной структуры при винтовой прокатке исследуют изменение энергосиловых параметров, влияние настроек стана и различных технологических факторов на особенности формоизменения заготовки. Для этих целей используют различные вычислительные среды конечно-элементного анализа, т.е. применяют компьютерное моделирование или FEM [75] (finite element method – метод конечных элементов [76-77]) моделирование как его называют в зарубежных публикациях. Обзор исследований процессов винтовой прокатки с применением компьютерного моделирования приведён в следующем разделе.

1.4. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки

1.4.1. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки в двухвалковых станах

По результатам обзора исследований, связанных с компьютерным моделированием процессов винтовой прокатки в двухвалковых станах, целесообразно выделить работы, посвящённые прогнозированию и оценке вероятного разрушения заготовки. В работе [78] с помощью Abaqus/Explicit [79] моделировали осевое разрушение заготовок с использованием GTN (Gurson, Tvergaard, Needleman) модели [80-83] (рис. 24).

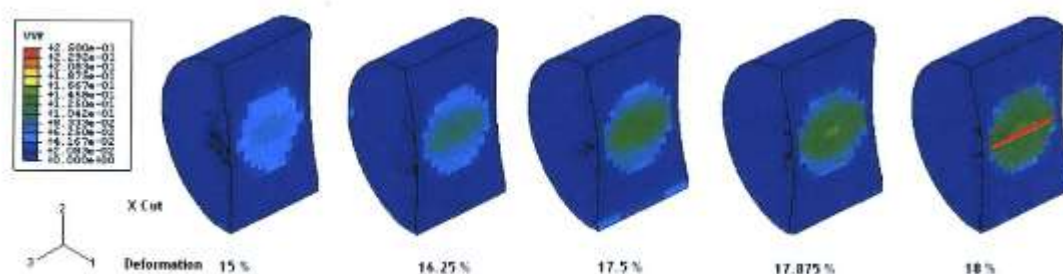


Рисунок 24. Поле распределение значения параметра объёмной доли пор (VVF) в абсолютных единицах после моделирования двухвалковой прокатки [78] при различных степенях деформации (слева направо): 15%, 16,25%, 17,5%, 17,875%, 18%

В работе [84] показана возможность компьютерного моделирования, с помощью программного продукта METFOR, процесса разрушения заготовки при прошивке в двухвалковом стане (рис. 25). При этом авторы отмечают, что несмотря на достигнутые ранее результаты [85-89], получаемые компьютерные модели процессов двухвалковой винтовой прокатки и прошивки могут быть улучшены для повышения точности получаемых результатов.

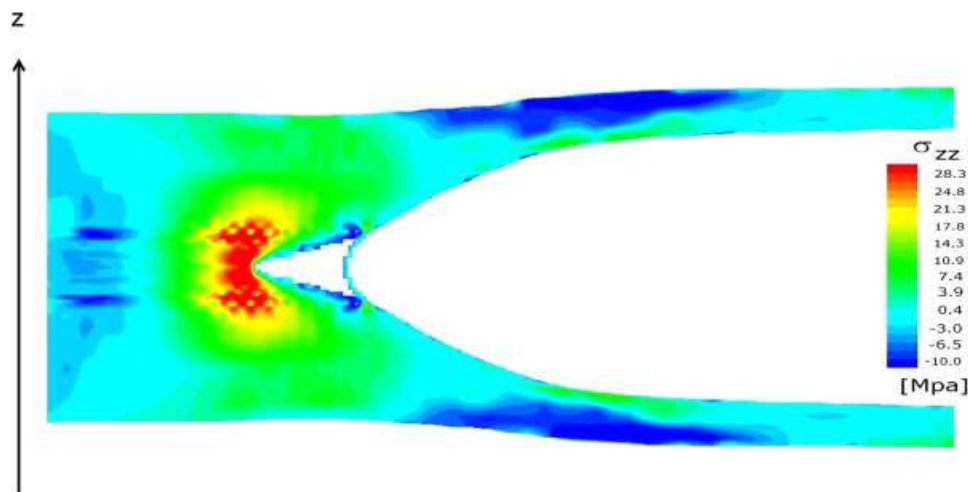


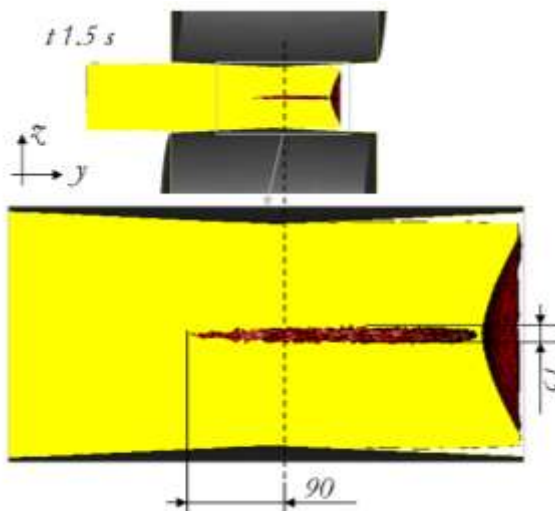
Рисунок 25. Поле значений напряжения σ_{zz} в осевом сечении заготовки при моделировании прошивки в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками [84]

Вычислительная среда Forge [90] использовалась в рамках исследования процесса осевого разрушения при прокатке в двухвалковом стане с дисками [91]. Оригинальный способ оценки вероятного разрушения предложен в [92], заключающийся в моделировании двухвалковой винтовой прокатки заготовки с полостью с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM [93]. Компьютерное моделирование с помощью ANSYS [94] применялось для исследования осевого разрушения при поперечно-клиновой прокатке в рамках [95].

Результаты исследований [78,84,91,92] не противоречат экспериментальным данным об осевом разрушении заготовок при двухвалковой винтовой прокатке. Однако ни в одной из указанных работ оценка полученных результатов не производилась путём сранения с экспериментальными данными. Единственным исследованием, по результатам которого подобная проверка осуществлялась является описанное в [96-97]. Авторы модифицировали модель разрушения Лемэтра [98-100], написали подпрограмму для её реализации в Forge [90] и провели сравнение результатов моделирования с результатами опытных прокаток (рис. 26). По результатам опытных прокаток длина поры составила 100 мм, диаметр – 15 мм, по результатам компьютерного моделирования длина – 90 мм, диаметр – 15 мм. По результатам обзора не удалось обнаружить проверку созданной авторами модели при каких-либо других технологических режимах или других материалов.



а



б

Рисунок 26. Осевое разрушение после прокатки в двухвалковом стане (а) и полученное по результатам моделирования в Forge (б) [97]

Учитывая важность осевого разрушения с точки зрения процессов винтовой прокатки, представляется актуальным разработка моделей, способных без дополнительной адаптации из-за смены режимов или марки прокатываемых материалов, эффективно оценивать и прогнозировать осевое разрушение при двухвалковой винтовой прокатки. В работе [101] показано, что, если не учитывать осевое разрушение, то снижается точность результатов при оценке усилия на оправку. Несмотря на это при компьютерном моделировании процессов двухвалковой прокатки была показана точность получаемых результатов по ряду параметров путём сравнение с экспериментальными данными.

В работах [102,103] моделировали процесс прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками с помощью программного продукта MSC.SuperForm [104]. Оценили как изменяется интенсивность деформации в поперчном сечении гильзы по длине очага деформации. Сравнили энергосиловые параметры при компьютерном моделировании и

опытных прокатках. Отличие значений усилия на валках не превысило 15%, на дисках – 4%, момента на валке – 7%, момента на диске – 3%. Продолжением исследований [102,103] является работа [105], в рамках которой по результатам сравнивали толщину стенки гильзы при компьютерном моделировании и после опытных прошивок в стане Дишера: отличие не превысило 5%. При оценке усилий на оправку установили, что отличие экспериментальных от данных компьютерного моделирования составляет 8%. В рамках [106] моделировали процесс прошивки в клети ТПА 70-270, которая используется в составе технологического оборудования участка по производству горячекатаных бесшовных труб ТЭСЦ №3 АО «ВМЗ». Использовали вычислительную среду конечно-элементного анализа QForm [107]. Провели оценку разностенности гильз в поперечных сечениях по результатам компьютерного моделирования и опытных прошивок. Момент на установившейся стадии отличался на 15-20% при компьютерном моделировании и опытных прошивках, мощность - на 5-7%. Полученные погрешности по энергосиловым параметрам и разностенности гильз авторы связывают с неопределённостью входных данных модели. Рекомендуется выбирать размер конечного элемента таким, чтобы он равнялся допуску на линейные размеры гильзы.

Эффективность компьютерного моделирования процессов винтовой прокатки проявляется благодаря возможности отслеживания изменения широкого перечня параметров напряжённо-деформированного состояния. В работе [108] с помощью Abaqus/Explicit показано как при прошивке в двухвалковом стане изменяются напряжения и деформации, по результатам исследований [109] определено влияние скорости вращения валков на формирование поля значений интенсивности деформации с использованием MSC.SuperForm.

Согласно [110] наиболее популярными программными для исследования процессов обработки металлов давлением являются DEFORM, QForm, Forge, MSC.SuperForm (теперь это Simufact.forming), ANSYS. Проведённый обзор показал, что указанное в [110] справедливо и для процессов винтовой прокатки. DEFORM применялся для оценки овальности гильз при двухвалковой прошивке [111], точности размеров получаемых при двухвалковой прошивке гильз [85,112], влиянии угла подачи на параметры НДС и формирование показателей качества полых заготовок при деформации в стане Дишера [113] и Маннесманна [114]. QForm применяли для оценки напряжённого состояния при прошивке в двухвалковом стане с линейками [115], а также для исследования так называемых сквозных технологических процессов обработки металлов давлением [116-120], в которых в качестве одной из операций являлась прошивка в стане Маннесманна [121-123]. Прошивку в этом же стане моделировали в [124,125] с помощью MSC.SuperForm для исследования усилия на оправку и валок [124], а

также для определения траекторий перемещения частиц деформируемой заготовки [125]. ANSYS использовали для оценки НДС [126], влияния калибровки на формоизменение при прошивке [127]. В качестве добавления к указанным в [110] программным средствам, как используемым при исследовании процессов винтовой прокатки, целесообразно указать Abaqus. Оценка эффективности применения данного продукта продемонстрирована авторами [128]. Стоит также отметить эффективность применения MARC/Autoforge [129] для исследования процессов двухвалковой винтовой прокатки [130-132]. Эффективность конечно-элементного моделирования при исследовании процессов двухвалковой винтовой прокатки показана в [133-135]. Не менее часто, чем для двухвалковой прокатки, конечно-элементное моделирование используется для исследования процесса деформации в трёхвалковых станах винтовой прокатки. Обзору исследований в данной области посвящен следующий раздел.

1.4.2. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки в трёхвалковых станах

Вероятное разрушение заготовки прогнозировали, как и при двухвалковой прокатке, при прокатке в трёхвалковом стане с помощью конечно-элементного компьютерного моделирования. В работе [136] авторы использовали вычислительную среду MSC.SuperForm. Для прогнозирования разрушения использовали критерий Ойена (Oyane). Полученные данные о распределении значений используемого критерия показывают, что наибольшая вероятность разрушения соответствует области, находящейся между поверхностью и центром заготовки (рис. 27). То есть имеет место некоторая ослабленная, в плане прочности, кольцевая зона. Считают, что именно кольцевое разрушение характерно для трёхвалковой винтовой прокатки [1,4-6, 13,19]. Несмотря на то, что результаты [136] не противоречат существующим теоретическим представлениям о характере разрушения при прокатке в трёхвалковом стане, не осуществляли проверку полученных при компьютерном моделировании данных сравнением с экспериментальными данными. По результатам обзора не удалось обнаружить иных публикаций, связанных с прогнозированием вероятного разрушения заготовок при трёхвалковой винтовой прокатке. Имеется ряд публикаций, в которых, по аналогии с исследованием [125], получали траектории перемещения точек деформируемой заготовки. Применяя ANSYS, авторы [137], вероятно, первыми в России, смогли с помощью компьютерного моделирования продемонстрировать, по каким траекториям перемещаются

точки, лежащие на оси, расстоянии половины радиуса, поверхности заготовки при прокатке в трёхвалковом стане (рис. 28,29).

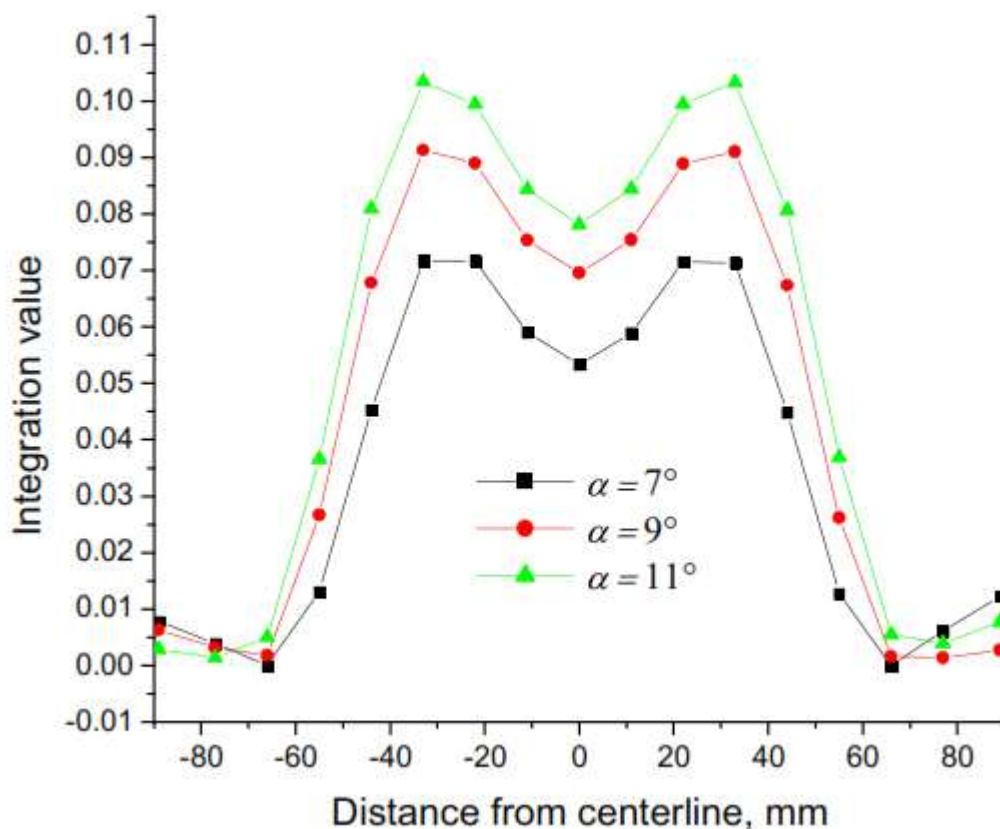


Рисунок 27. Изменение значений критерия разрушения (по оси Y) в зависимости от расстояния от центра заготовки (мм, по оси X) для углов подачи 7,9 и 11° [136]

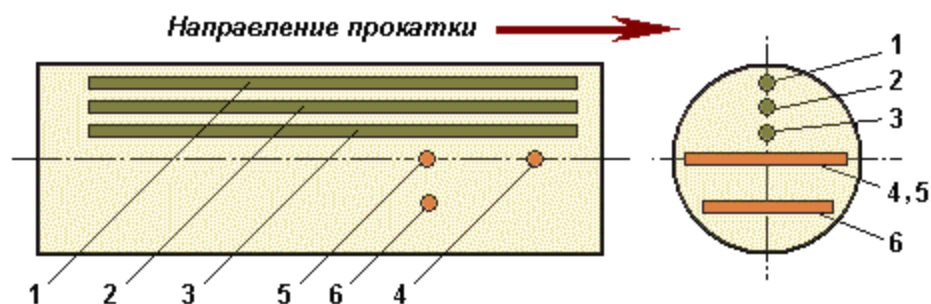


Рисунок 28. Размещение моделей штифтов-вставок в конечно-элементной модели заготовки и их нумерация: 1...3 – продольные штифты; 4...6 – поперечные штифты [137]

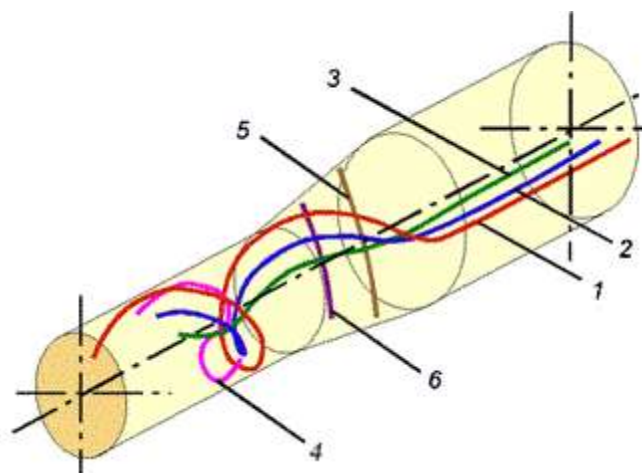


Рисунок 29. Вид штифтов-вставок после ПВП по результатам моделирования на основе эйлеровой постановки МКЭ (1...6 – номера штифтов-вставок в соответствии с рис. 28) [137]

Схожие с изображёнными на рис. 29 траектории были получены при использовании DEFORM в рамках [138] при исследовании процесса проката в трёхвалковом стане (рис. 30).

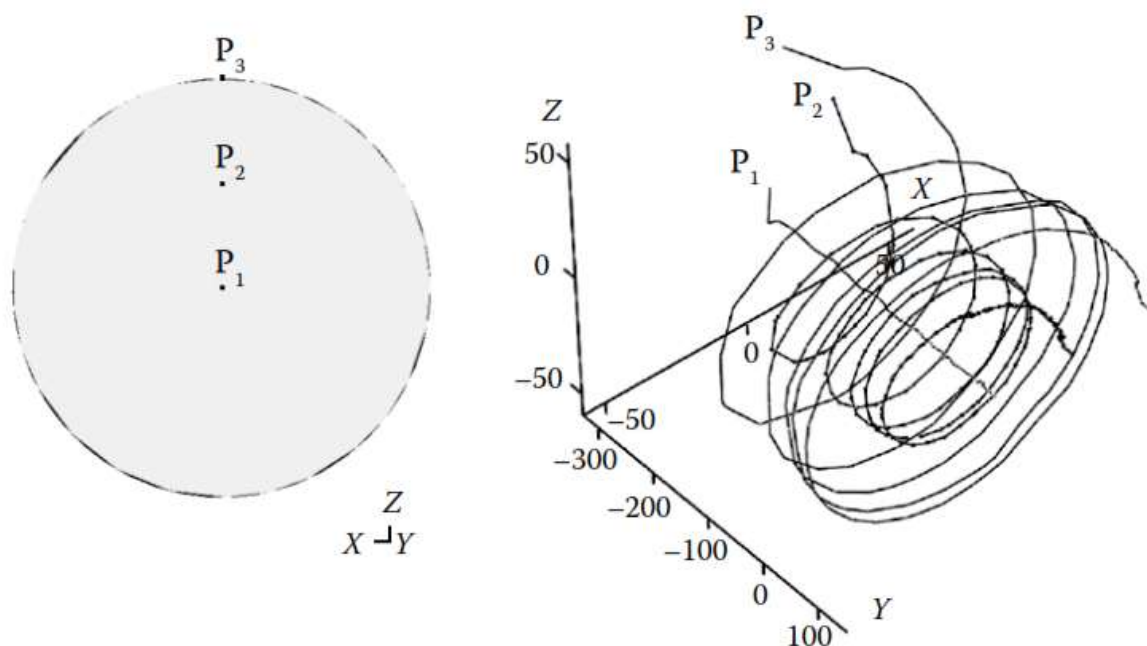


Рисунок 30. Траектории перемещения частиц при винтовой прокатки в трёхвалковом стане: P1- точка, расположенная на оси заготовки, P2- точка, находящаяся на расстоянии половины радиуса от оси заготовки, P3 – точка, лежащая на поверхности заготовки [138].

Отслеживание точек с помощью соответствующей функции (“point tracking”) в пост-процессоре DEFORM позволило оценить формоизменение при прошивке полрой оправкой в трёхвалковом стане [139]. Как показал обзор, программа DEFORM, как для двухвалковой прокатки, так и для трёхвалковой прокатки широко используется исследователями. В рамках [140] исследовали процесс прошивки в трёхвалковом стане для получения полых заготовок из магниевого сплава. Одной из первых публикаций, продемонстрировавших эффективность моделирования трёхвалковой винтовой прокатки с помощью DEFORM является [141], а [60] – трёхвалковой планетарной. В работе [142] DEFORM использовали для моделирования совмещённого процесса прокатки-прессования прутка в трёхвалковом стане, а в работе [143] – для оценки НДС и формы прутка из титанового сплава при трёхвалковой винтовой прокатке. Трёхвалковую РСП прутка из титанового сплава моделировали с помощью ANSYS [46,47], при этом в [46] данные об интенсивности деформации позволяют сделать вывод о наличии некоторой критической области между осью и поверхностью заготовки, так как кривая имеет явный перегиб (рис.31).

Программный продукт Forge, созданный компанией Transvalor, применялся польскими специалистами в области трубного производства: моделировали процесс трёхвалковой РСП магниевого сплава AZ31 (ближайший российский аналог – МА2) [144-145], в работе [146] – РСП алюминиевых сплавов 1050А (ближайший российский аналог АД0) и 2017А (ближайший российский аналог Д1), при этом подобно [137,138] получили траектории перемещения точек деформируемой заготовки (рис.32).

Процесс прокатки осей колесных пар железнодорожного транспорта в трёхвалковом стане винтовой прокатки детально исследовался с помощью Simufact.Forming в работах польских [147-149] и китайских учёных [150].

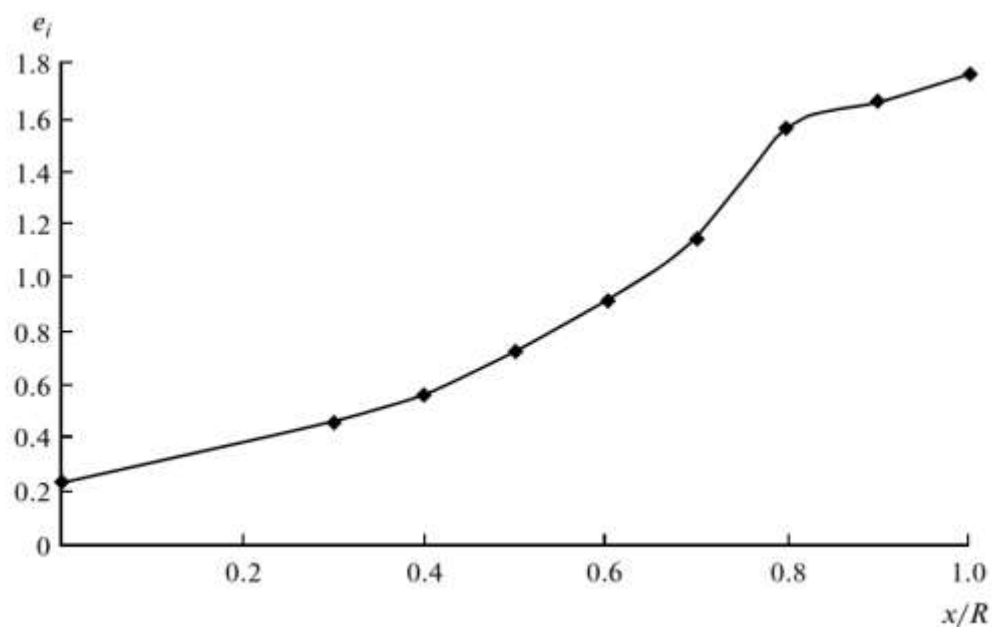


Рисунок 31. Изменение интенсивности деформации (ось Y) в зависимости от расстояния от оси заготовки (по оси X отложены значения отношения расстояния от точки до оси заготовки к радиусу заготовки) [46]

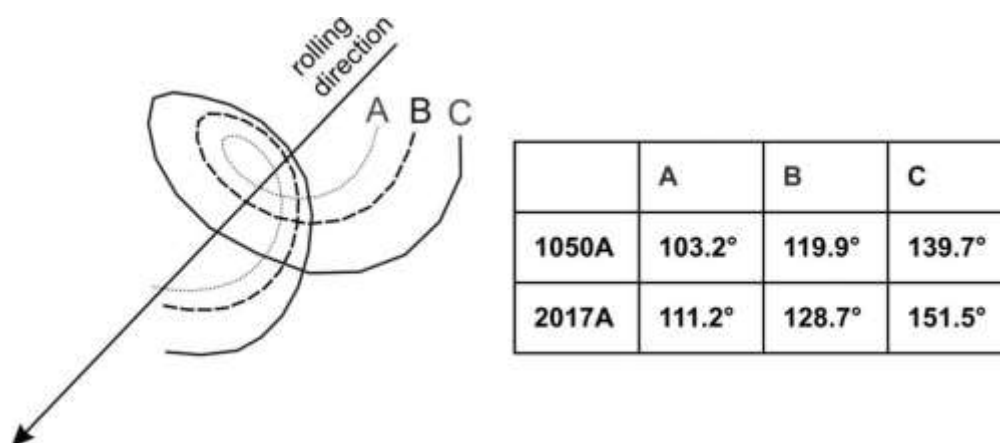


Рисунок 32. Траектории перемещения точек заготовок из двух алюминиевых сплавов и значением температуры в этих точках во время РСП в трёхвалковом стане 14-40 [146]

Среди названных в [110] была программа QForm, которую использовали в [10] для исследования РСП в трёхвалковом стане, получив по результатам зависимость интенсивности деформации от расстояния от оси заготовки (рис. 33), частично подобную полученной в [46].

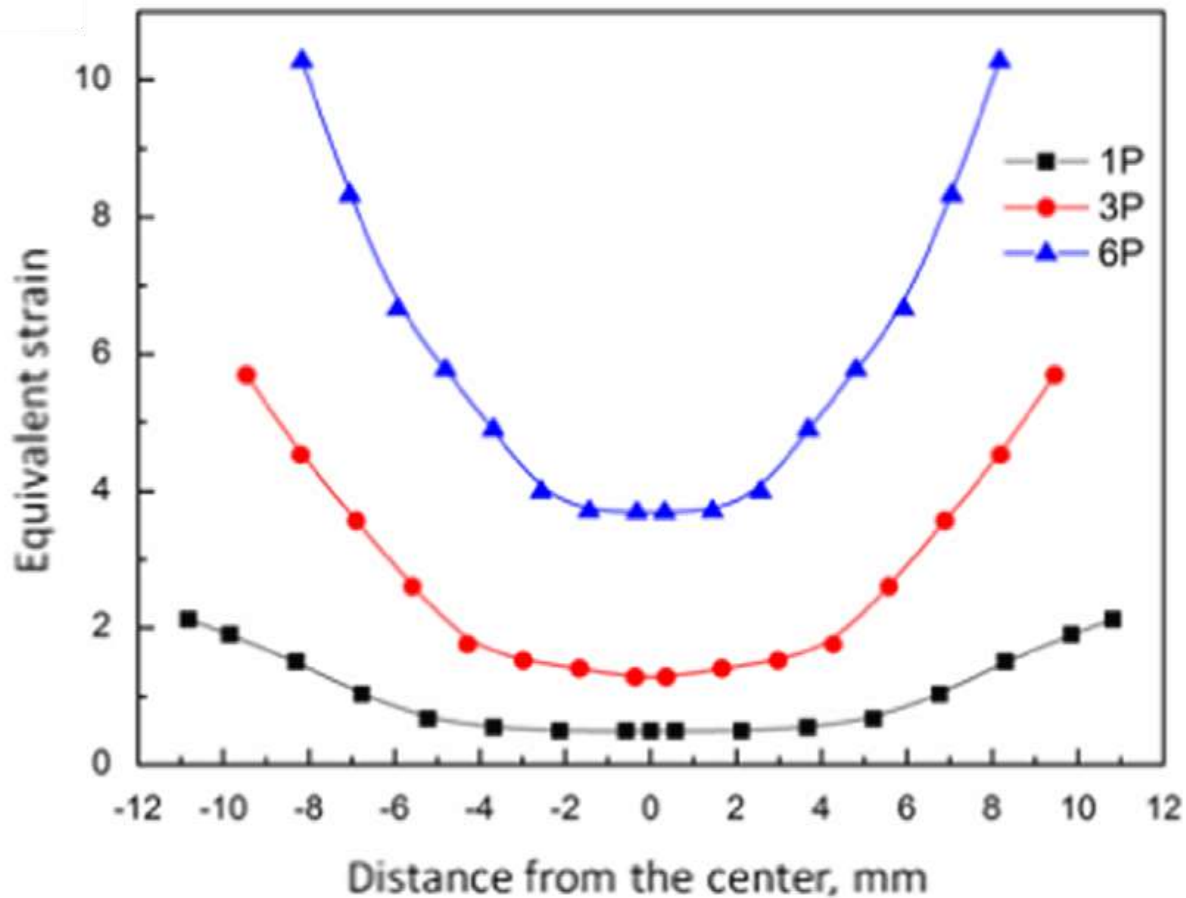


Рисунок 33. Зависимость интенсивности деформации (ось Y) от расстояния от оси заготовки (ось X) при трёхвалковой РСП после первого (1P), третьего (3P) и шестого прохода (6P)

Среди результатов проведённого обзора целесообразно отметить использование Abaqus для компьютерного моделирования процесса прошивки в трёхвалковом планетарном стане с целью оценки влияния калибровки на формоизменение металла [151] (рис. 34), при этом аналогичный процесс моделировали с использованием MSC.Marc [152] при деформации медных заготовок [153].

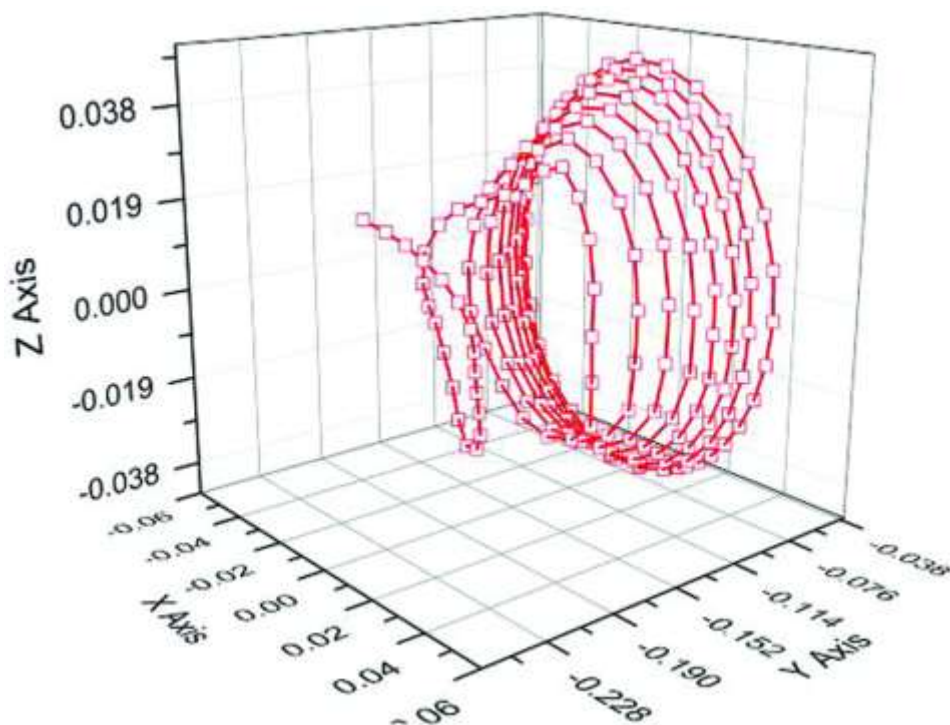


Рисунок 34. Траектория перемещения точки прошиваемой в трёхвалковом планетарном стане заготовки [151]

В завершении обзора стоит отметить, что, вероятно, самым первым исследованием, связанным с компьютерным моделированием процесса трёхвалковой винтовой прокатки, и вероятно, любого процесса винтовой прокатки, является работа отечественных авторов в ходе которой использовали приложение для MS Windiows [154].

1.5 Выводы по главе 1

Проведённый обзор исследований в области винтовой прокатки позволил обозначить ряд задач, решение которых представляется актуальным. Обзор схем винтовой прокатки показал, что нет на данный момент способа, позволяющего получать в одной и той же клети сплошную и полуую заготовку с требуемыми показателями качества. Двухвалковая прокатка позволяет получать гильзы, но не используется при производстве сплошных заготовок, только для узконаправленных исследовательских задач. Трёхвалковая прокатка наоборот – для производства сплошной заготовки, а для прошивки – в исключительных случаях. Обзор показал, что планетарная трёхвалковая схема хоть и используется для проакти и прошивки, но имеет существенные ограничения по размерному и марочному сортаменту. Для разработки

схемы, позволяющей получать качественную сплошную и полую заготовку необходим тщательный сравнительный анализ существующих способов, в первую очередь двухвалковой и трёхвалковой прокатки для определения деформационных особенностей, демонстрации преимуществ и недостатков. Для детального понимания сути процессов винтовой прокатки необходимо разработать способ прогнозирования вероятного разрушения заготовок, который был бы одинаково эффективен как для двух-, так и для трёхвалковой прокатки. Представляется целесообразным разработка такого способа с помощью компьютерного моделирования и проверка способа сравнением с результатами опытных прокаток. Имеющийся обширный материал проведённых исследований по формированию зёрненной структуры и твёрдости частично, но в неявном виде, позволяет оценить НДС заготовки, но только при трёхвалковой прокатке. Актуальным является сравнительный анализ влияния двух- и трёхвалковой схемы на эволюцию микроструктуры и твёрдости металла заготовок. При исследовании эволюции микроструктуры и формировании свойств винтовой прокаткой подавляющее количество исследований посвящены стационарной, то есть установившейся стадии прокатки. С точки зрения как теоретической, так и практической, представляет интерес оценка формирования структуры и свойств как на стационарной, так и на нестационарной стадии, выявление отличий и определение области вероятного перехода от одной стадии к другой в объёме заготовки. Для повышения эффективности процессов винтовой прокатки является актуальным разработка способов управления течением металла на нестационарных стадиях для минимизации утяжины и вероятно, уменьшения неравномерности свойств приторцовой области, а следовательно, увеличения выхода годного. Это приобретает особую важность при производстве коротких заготовок и из дорогостоящих металлов и сплавов.

Решение указанных выше задач позволит разработать методику, как с использованием компьютерного моделирования, так и экспериментальной оценки, для совершенствования существующих и разработки новых процессов винтовой прокатки.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХВАЛКОВОЙ И ТРЁХВАЛКОВОЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК НА СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТАДИЯХ

2.1 Исследование напряжённо-деформированного состояния и оценка микроструктуры при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке заготовок из коррозионностойкой стали

Отличительной особенностью процессов винтовой прокатки является геликоидальный характер истечения металла деформируемой заготовки в очаге деформации [6]. Винтовую прокатку, наряду с равноканальным угловым прессованием, относят к процессам интенсивной пластической деформации [18,49,69]. Винтовая прокатка позволяет повышать целый ряд характеристик материала получаемой заготовки [6], в том числе, прочность и пластичность [58,155]. Наибольшее распространение получили двухвалковые и трёхвалковые станы винтовой прокатки [1]. Двухвалковые станы винтовой прокатки преимущественно используют в трубном производстве для прошивки заготовок с целью получения гильз [1] из различных материалов, в том числе, сталей [4], сплавов на основе алюминия [121], титана [31,43] и других. Кроме того, двухвалковая прокатка используется в других операциях трубного производства: раскатке, обкатке и калибровке. Трёхвалковая схема широко используется в способе и министанах винтовой (радиально-сдвиговой) прокатки [6,15,16] для получения сплошных заготовок из сталей [69], титановых сплавов [46,47,51,155], магния и сплавов на его основе [18,58], меди и медных сплавов [10,39,70], силуминов [74], а также в некоторых случаях и для получения гильз [140].

Структура горячедеформированного металла формируется в результате одновременно протекающих процессов упрочнения и разупрочнения (возврата, полигонизации, рекристаллизации). Скорость и степень развития этих процессов обусловлены свойствами и структурой исходного металла, а также условиями деформации: температурой, скоростью и степенью деформации, схемой напряжённо-деформированного состояния, особенностями течения металла. Последние во многом определяют неоднородность параметров деформации по объёму металла, что влечёт за собой неоднородность и неравномерность протекающих структурных процессов и соответственно получаемой конечной структуры и свойств материала. Прогнозируемость результата зависит также от общего характера или стадии любого процесса. Наиболее предсказуемыми при небольших колебаниях параметров, и отсюда технологически предпочтительными, являются стадии установившихся (стационарных) процессов.

Изменение зёрненной структуры в результате собственно деформации влечёт изменение формы и ориентировки зёрен. Развитие рекристаллизации приводит к существенному изменению размера зерна, при этом зерно тем мельче, чем выше степень и скорость деформации и ниже температура.

Прочность металлических материалов, в частности стали, при прочих равных условиях, растёт с повышением плотности дислокаций за счёт деформационного наклёпа и измельчения зерна. Твёрдость как одна из характеристик прочности отражает сопротивление большой пластической деформации, в большей степени коррелирует с пределом прочности σ_B , то есть суммарно учитывает исходное состояние и деформационное упрочнение в ходе испытаний. Деформационное упрочнение в большей степени растёт с повышением исходной плотности дислокаций, т.е. в случае меньшего развития процессов рекристаллизации, особенно статической. При анализе характера изменения структуры [46,58,70,74] материала заготовки и микротвёрдости [10,46,51,70,] после трёхвалковой винтовой прокатки выявлены отличительные черты: зерно интенсивно измельчается вблизи поверхности заготовки, заметно менее интенсивно – в центре заготовки [18, 74]. При этом характер изменения микротвёрдости описывается обратной тенденцией – наибольшие значения в центре заготовки, наименьшие – вблизи поверхности. При двухвалковой схеме винтовой прокатки аналогичных исследований существенно меньше, в связи с чем и выявленных закономерностей меньше. В работе [2] определено влияние угла подачи на глубину мелкозернистого слоя в заготовках и утонение полос δ -феррита и измельчение зерна аустенита. В работе [43] показано, как меняется твёрдость по толщине стенки гильзы, в работе [31] отображен характер изменения микроструктуры без выявления причин, которые влияют на её формирование.

Анализ изменения формы и размера зерна, ориентировки зёрен, твёрдости может служить дополнительной информацией о влиянии технологических параметров на характер формоизменения материала. Например, в работах [10,18,69,70] без объяснения причин показано, что, после винтовой прокатки наблюдается «поворот» структурных элементов (границ) на определённый угол. В работах [6,15] отмечается, что подобное явление связано с геометрией геликоидальных траекторий истечения металла в очаге деформации и, соответственно, с конструктивными параметрами деформирующего инструмента, настройками стана, определяющими эту геометрию. При этом уточняется, что для выявления более определенной взаимосвязи необходимы дополнительные исследования. Описывая влияние схемы винтовой прокатки на деформируемость заготовок обычно, полагают, что при двухвалковой схеме имеет место осевое [1,4,21,156], а при трёхвалковой схеме – кольцевое [6,

157, 158] разрушение. В то же время отмечают, что единого мнения касательно причин и условий возникновения разрушения и других характерных явлений в процессах винтовой прокатки у исследователей нет [1,6,21,156]. Так в работе [21] отмечают, что при трёхвалковой винтовой прокатке может иметь место не только кольцевое, но и осевое разрушение. Практически нет систематических исследований и сравнения формирования структуры и свойств на разных стадиях (нестационарной и стационарной) винтовой прокатки по различным схемам. В работе [6] отмечают различное изменение свойств материала для разных стадий винтовой прокатки. Авторы [136] на основе компьютерного моделирования оценили различия в характере распределения интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой и трёхвалковой прокатки. Согласно [1,6,21,96,156,161] разрушение заготовок в процессах винтовой прокатки по любой схеме начинается именно вблизи торца, то есть в той области, деформация которой осуществляется на нестационарной стадии. Конкретные положения несплошностей могут быть разными [156-158].

В связи с изложенным представляется актуальным исследование особенностей в характере формоизменения заготовок при прокатке по двухвалковой и трёхвалковой схемам и их влияния на характер изменения микроструктуры прокатанных заготовок и их твёрдости, в том числе для выявления координат областей, риск разрушения в которых наибольший.

Целью работы являлось исследование особенностей изменения зёрненной структуры и твёрдости на стационарной и нестационарной стадиях винтовой прокатки заготовок из стали 12X18H10T при их деформации в двухвалковом и трёхвалковом станах, установление взаимосвязи процесса структурообразования с параметрами напряжённо-деформированного состояния (НДС), температурными и температурно-скоростными режимами деформации при двухвалковой и трёхвалковой схемах винтовой прокатки, компьютерное моделирование опытных прокаток, сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Для определения влияния схемы винтовой прокатки на формирование зёрненной структуры и твёрдости получаемых заготовок провели опытные прокатки заготовок из аустенитной стали 12X18H10T (табл. 1) в двухвалковом и трёхвалковом станах. Исходная заготовка, полученная продольной прокаткой, и недеформируемый образец, т.н. свидетель, имели диаметр 60 мм и длину 200 мм. Перед прокаткой исходные заготовки нагревали до температуры 1150°C, выдержка составляла 2 часа. После двухвалковой прокатки диаметр заготовки составлял 54 мм, после трёхвалковой – 52 мм. По окончании прокатки все заготовки охлаждали в воде. Двухвалковую прокатку осуществляли в стане винтовой прокатки МИСиС-

130Д с направляющими линейками [1,2,4,121,156-158], трёхвалковую – в стане МИСиС-100Т [1,6]. Угол подачи валков при прокатке в стане МИСиС-130Д составлял 18 градусов, угол раскатки – 0 градусов, в стане МИСиС-130Т угол подачи валков составлял – 18 градусов, раскатки – 10 градусов. Частота вращения валков составляла 55 оборотов в минуту. Прокатанная в двухвалковом стане заготовка имела утяжину глубиной 11,2 мм на переднем и 11,8 мм на заднем торце. Размеры годной области (то есть после обрезки утяжин) заготовки при двухвалковой прокатке: диаметр 54,0 мм, длина – 205,0 мм. Прокатанная в трёхвалковом стане заготовка имела утяжины глубиной 10,2 мм на обоих торцах и годную область диаметром 52,0 мм и длиной 241,2 мм.

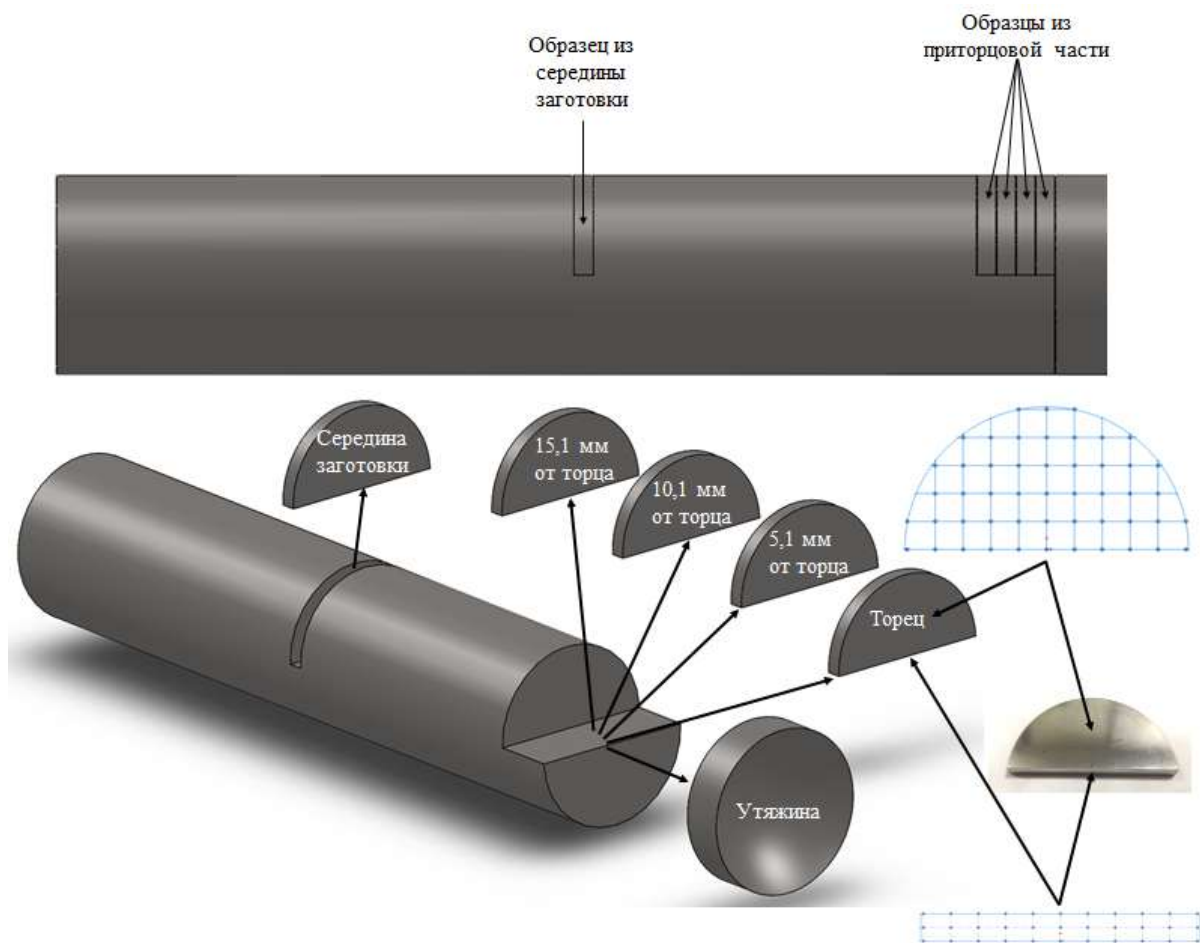
Таблица 1. Химический состав в % стали 12Х18Н10Т

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 2	9-11	≤ 0,02	≤ 0,035	17-19	≤ 0,3	0,4-1	~67

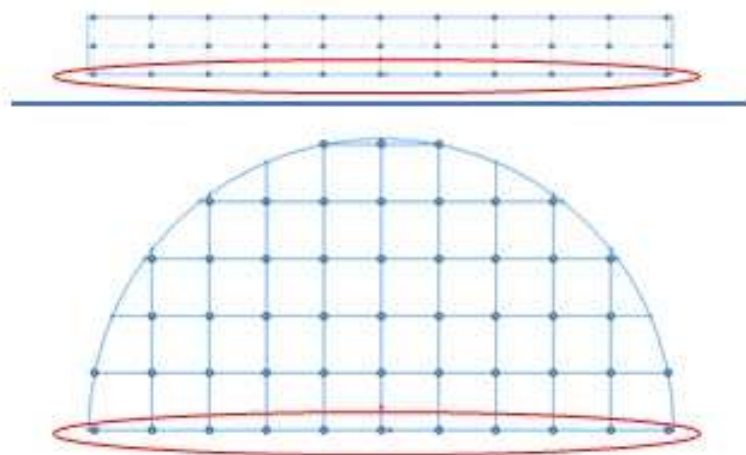
На рис. 35 показано как вырезались образцы для проведения измерений твёрдости и исследования зёрненной структуры. Отталкиваясь от результатов обзора исследований в области эволюции микроструктуры металла заготовок в процессах винтовой прокатки, и опыта авторов данной статьи, стоит отметить, что отсутствуют экспериментальные данные о реальной форме и размере зёрен металла заготовок после деформации в станах винтовой прокатки. В работах [18,49,58,69,155] при упоминании о размере зерна металла заготовки после винтовой прокатки речь идёт о размере сечения зерна поперечной или осевой (продольной) плоскостью.

Для исследования неустановившейся стадии прокатки вырезали четыре образца из приторцовой части, как показано на рис.35. Резку вели с охлаждением водой, толщина образцов составляла 5 мм, ширина реза – 0,1 мм. Установившейся стадии соответствует аналогичный полукруглый образец из середины каждой заготовки. Для каждого образца делали шлиф, плоскость которого совпадала с поперечным сечением заготовки и шлиф, плоскость которого совпадала с осевым сечением заготовки (рис. 35а). На каждом из поперечных шлифов проводили измерения в точках, как это показано на рис. 35а: точки находились на расстоянии 5 мм друг от друга по вертикали и горизонтали. Приводимые значения размера сечения зерна или твёрдости для каждой области есть среднее из 250 и 3 замеров, соответственно, в области площадью 1,3 мм² (прямоугольник размером 1х1,32 мм). По результатам измерений в точках образцов из приторцовой области получили данные в

четырёх поперечных сечениях и данные для 12 линий (диаметров) в осевом сечении (соответственно на каждом образце из приторцовой области было три линии, расположенных в осевом сечении на расстоянии 2,5 мм друг от друга, (рис.35)). Для образца, оказавшегося крайним после обрезки утяжины, приняли, что его поперечное сечение и первая из трёх линий в осевом сечении соответствуют торцу, и расстояния для остальных поперечных сечений и линий в осевом сечении рассчитывались в миллиметрах от торца. Коэффициент анизотропии размера сечения зерна (в дальнейшем $K_{анз}$) рассчитывали делением среднего размера сечения зерна в точках у кромок шлифов в осевой плоскости на среднее значение размера сечения зерна в соответствующих точках у кромок в поперечных шлифах (рис.35б). Для удаления выбросов в выборках данных по размеру сечения зерна и твёрдости использовали метод Д. Тьюки [159]. Фотоснимки микроструктуры получали с помощью оптических микроскопов Axio Scope A1 Carl Zeiss и Axio Observer D1m Carl Zeiss с использованием программного обеспечения Thixomet [160], твёрдость по Виккерсу (HV5) измеряли с помощью твердомера REICHERTER UN250. Электролитическое травление поверхности шлифов для выявления микроструктуры проводили в 10% водном растворе $C_2H_2O_4$ (щавелевой кислоты).



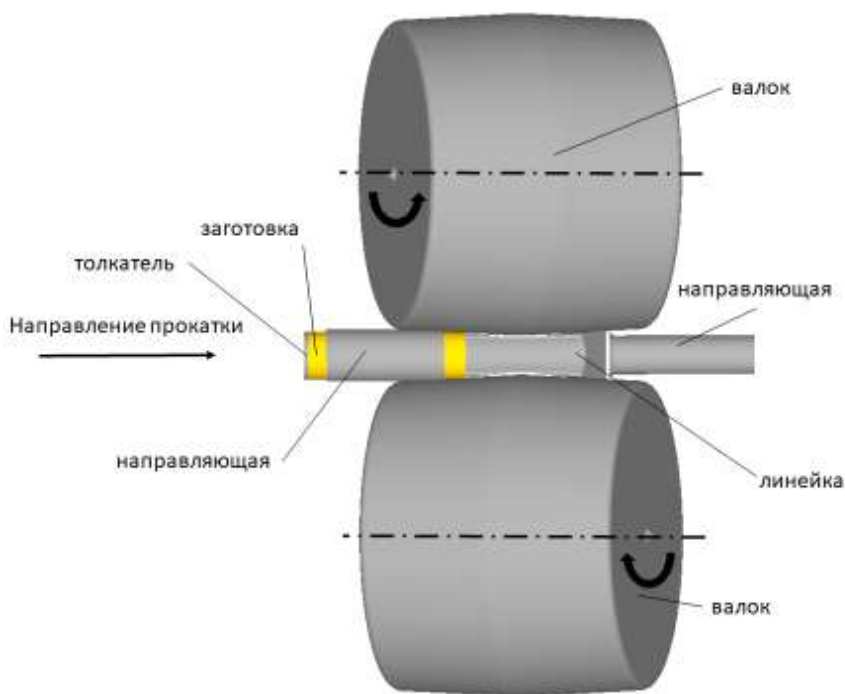
а



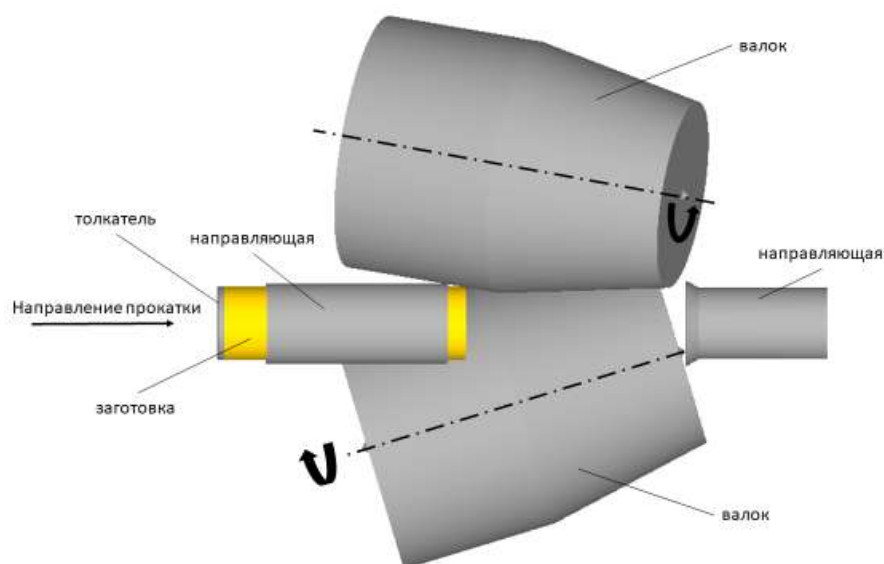
б

Рисунок 35. Схема вырезки образцов и расположение областей (точек) для проведения измерений твёрдости и размеров сечений зёрен (а); точки в осевом и поперечном сечении образцов, значения размера сечения зерна в которых использовались для расчёта $K_{анз}$ (б)

Опытные прокатки смоделировали с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM. Предварительно в SolidWorks создали сборки, состоящие из валков, линейек, направляющих, толкателя и заготовки. Сборки сохранили в формате .stl и загружали в препроцессор DEFORM. На рис.36 показаны загруженные в препроцессор DEFORM сборки с указанием осей и направления вращения валков, а также направления прокатки. На рис 36б третий валок для удобства не показан. После загрузки сборок в препроцессор DEFORM задавали начальные и граничные условия, согласно данным опытных прокаток. Моделирование осуществляли без учёта теплообмена между заготовкой и валками, а также линейками, направляющими и толкателем. Заготовка имела сетку из 100000 тетраэдральных конечных элементов, фактор трения для пар «валок-заготовка» задавали равным 1 (по Зибелю), для пар «линейка-заготовка» и «толкатель-заготовка» – 0,3, «направляющая-заготовка» - 0,12. Материал заготовки задавали сталь AISI-321, близкой к экспериментально исследованной (табл. 2).



а



б

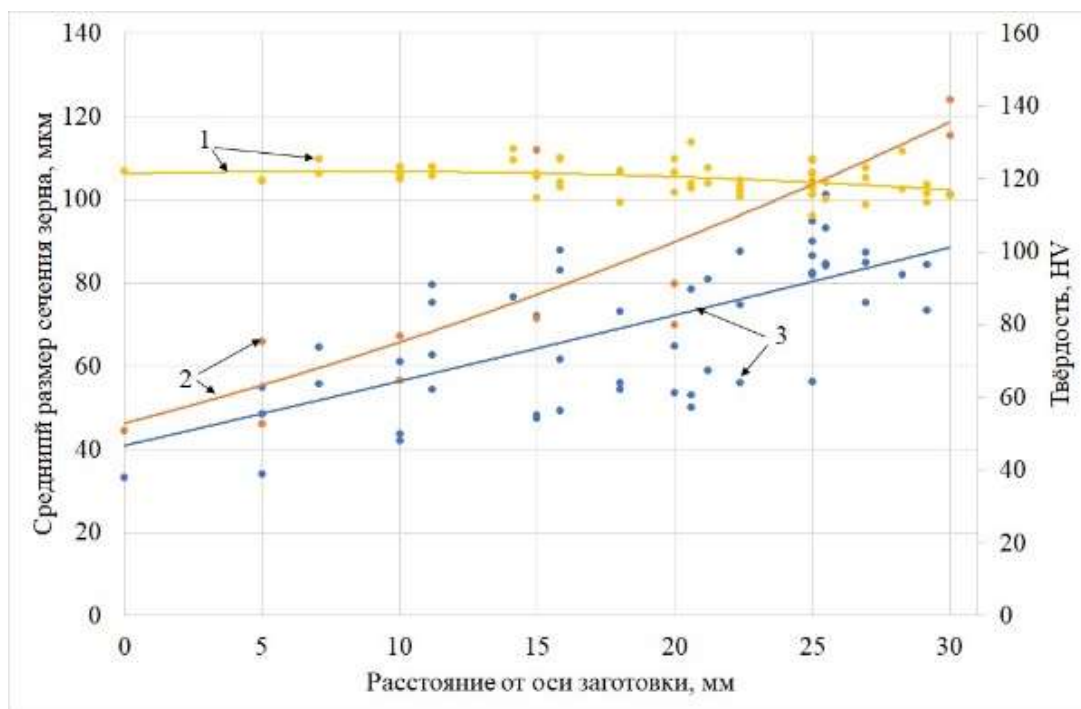
Рисунок 36. Сборки, загруженные в препроцессор DEFORM для моделирования двухвалковой (а) и трёхвалковой (б) винтовой прокатки с указанием направления вращения валков и направления прокатки

Таблица 2. Химический состав стали AISI-321

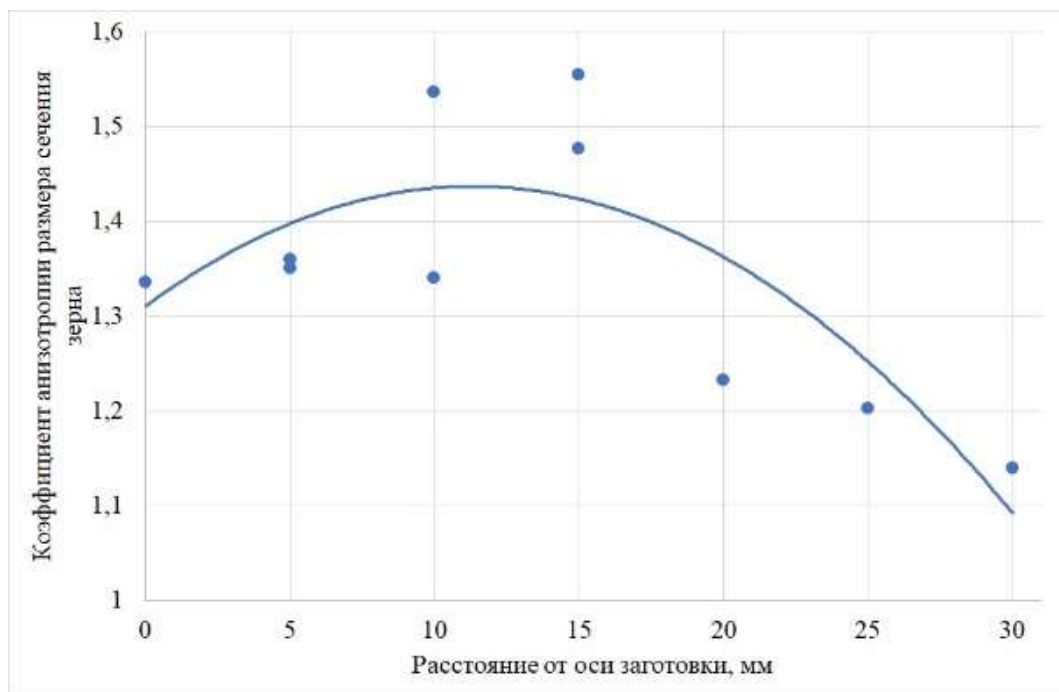
Элемент	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Ti
Содержа- ние, %	до 0,08	до 2	до 0,045	до 0,03	до 0,75	17-19	9-12	до 0,1	до 0,7

На рис. 37а данные о твёрдости и размере сечения зерна осевым и поперечным сечениями свидетеля нанесены в виде маркеров и линий тренда, построенных на основе полинома второй степени, на рис. 37б – изменение $K_{анз}$ свидетеля в виде маркеров и линия тренда, построенная на основе полинома второй степени.

Фотографии микроструктуры, полученные по результатам исследований, проведённых согласно схеме рис. 35 представлены в Приложении 5.



а

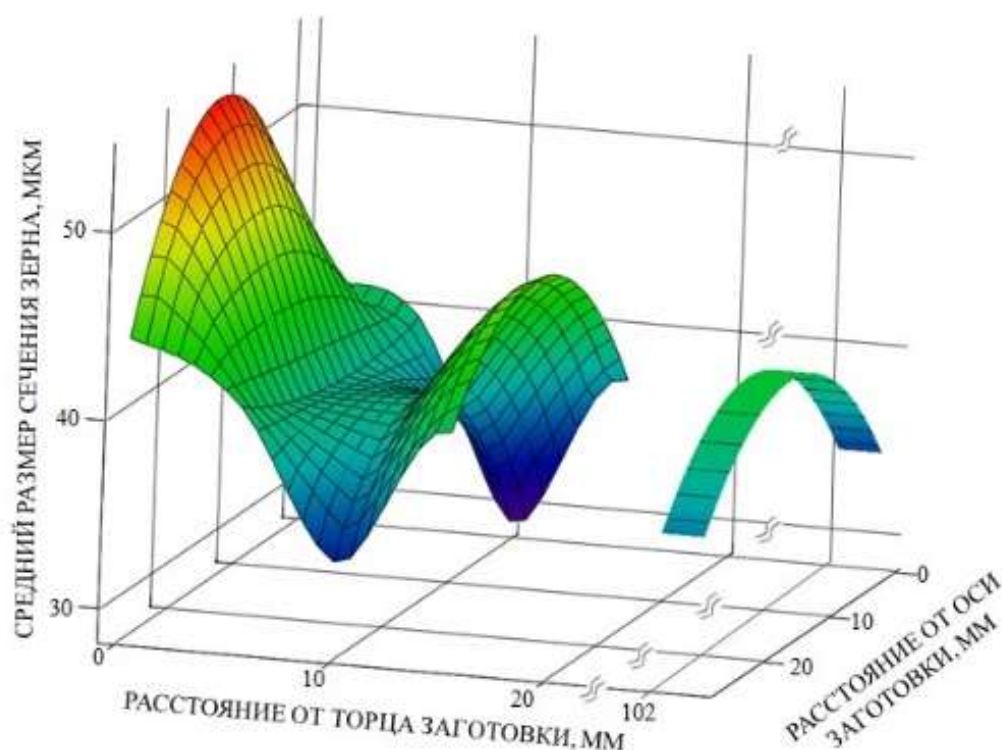


б

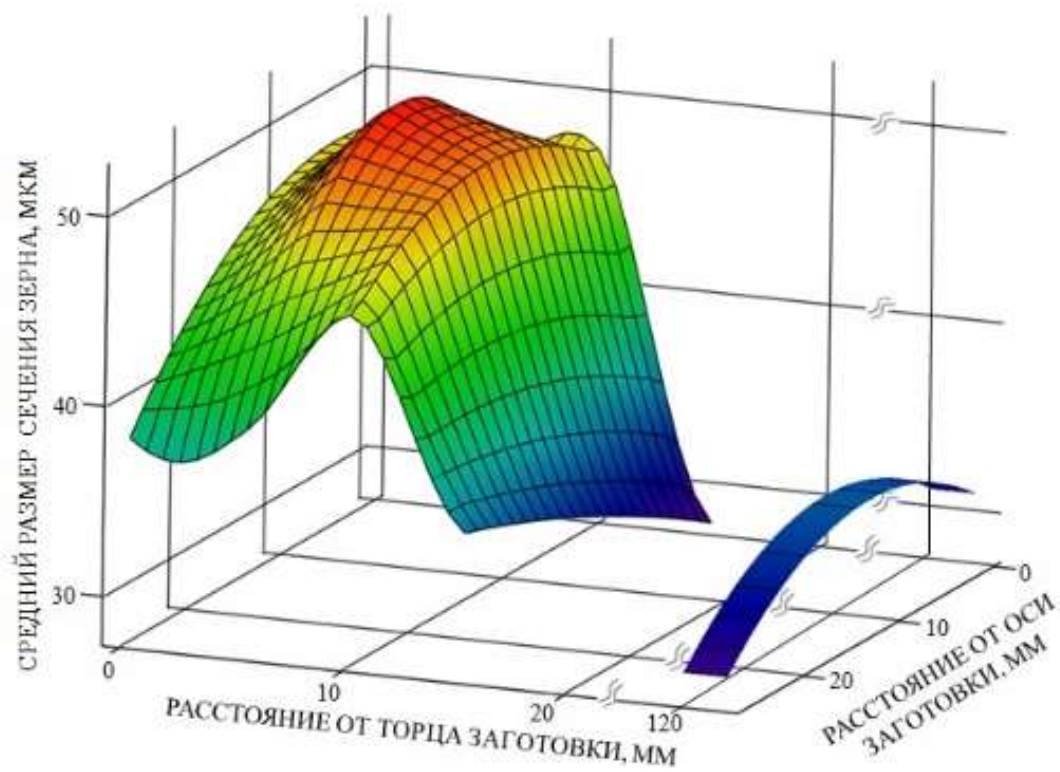
Рисунок 37. Данные и линии тренда (а), иллюстрирующие распределение твёрдости (1) в поперечном сечении заготовки свидетеля, среднего размера сечений зерна осевой (2) и поперечной (3) плоскостями; данные и линии тренда, иллюстрирующие изменение значений $K_{анз}$ (б)

Согласно рис. 37а размер сечения зерна растёт от 35-42 мкм в центре заготовки до 90-125 мкм на поверхности заготовки, а твёрдость, наоборот, практически одинакова или немного уменьшается от 120-122 HV в центре заготовки до 116-118 HV на поверхности заготовки. Изменение коэффициента анизотропии размера сечения зерна в зависимости от расстояния от оси заготовки свидетеля позволяет сделать вывод о том, что зёрна заготовки перед винтовой прокаткой были немного вытянуты и имели размер в продольном направлении до 1,55 раза больше, чем в поперечном. Кроме того, на шлифах в осевом сечении наблюдалась строчечность, в поперечном сечении включения видны лишь отдельными точками. Вероятной причиной анизотропии зерна и наличия строчечности в осевом сечении является то, что исходная заготовка была получена продольной прокаткой.

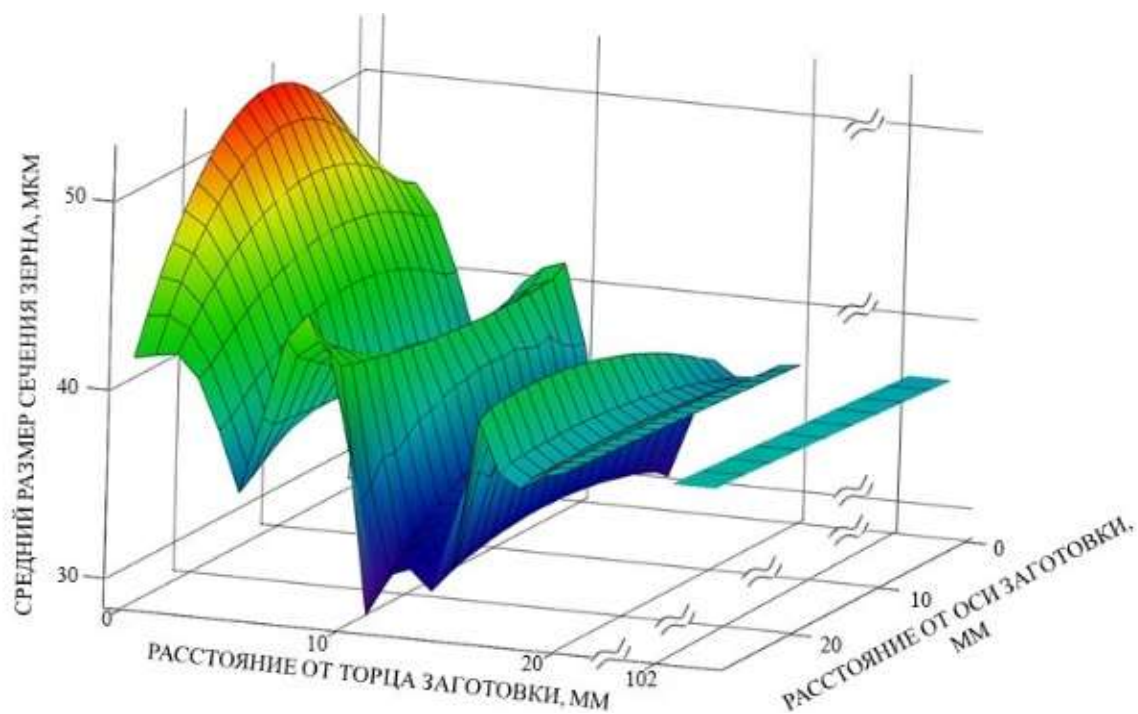
По данным о размере сечения зерна и твёрдости прокатанных в двухвалковом и трёхвалковом станах заготовок, после удаления выбросов из массивов данных, с помощью метода наименьших квадратов получали зависимости значений исследуемого параметра от расстояния от оси заготовки в виде полиномов второй степени. Полученные зависимости использовали при построении поверхностей с помощью Mathcad. На рис. 38-39 показано, как меняется твёрдость и размер сечения зерна осевой и поперечными плоскостями. При этом на каждом из рисунков имеются две поверхности: одна – для неустановившейся стадии (четыре образца из торцевой области). Вторая – для установившейся стадии (образец из середины заготовки).



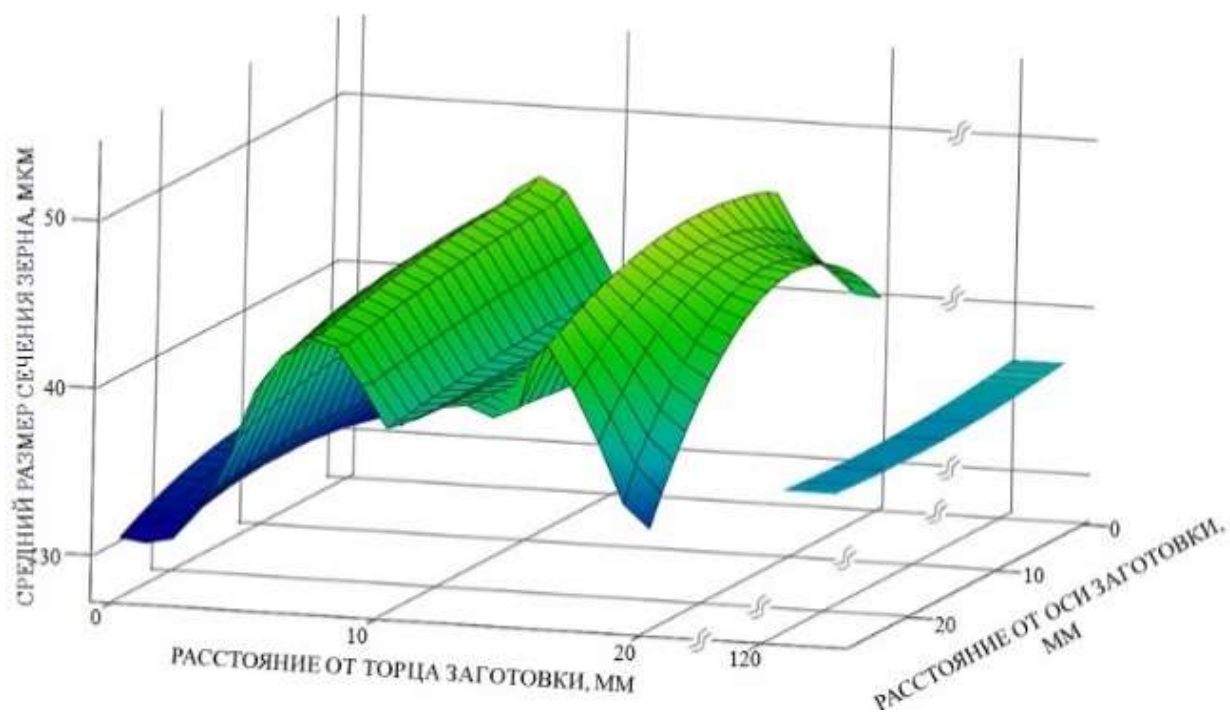
а



б

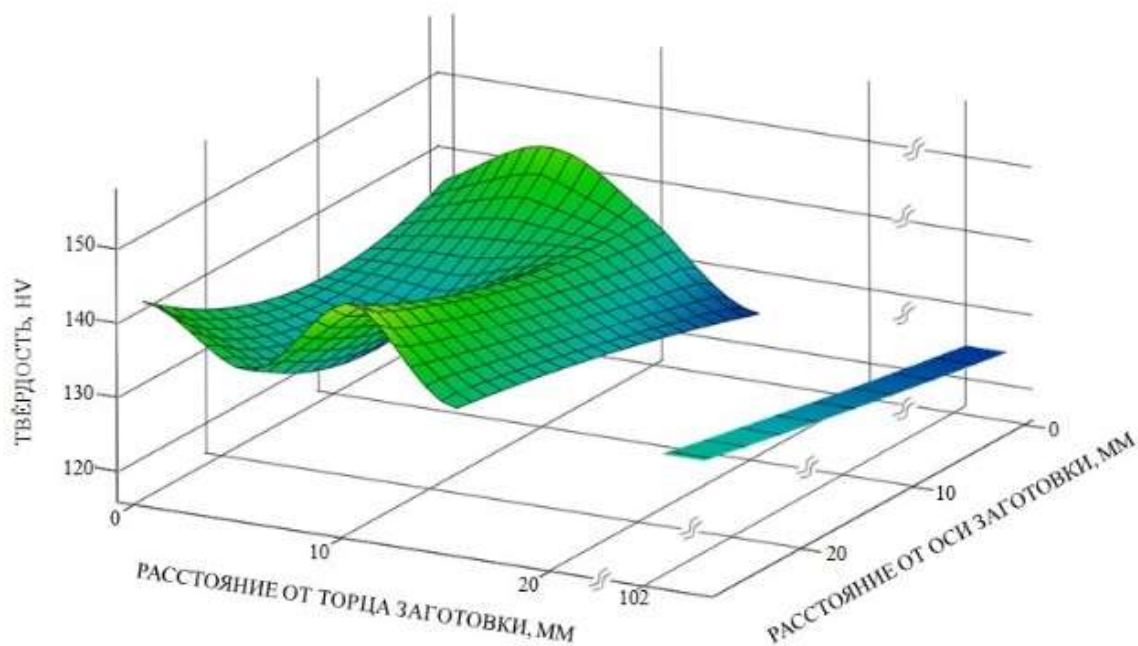


в

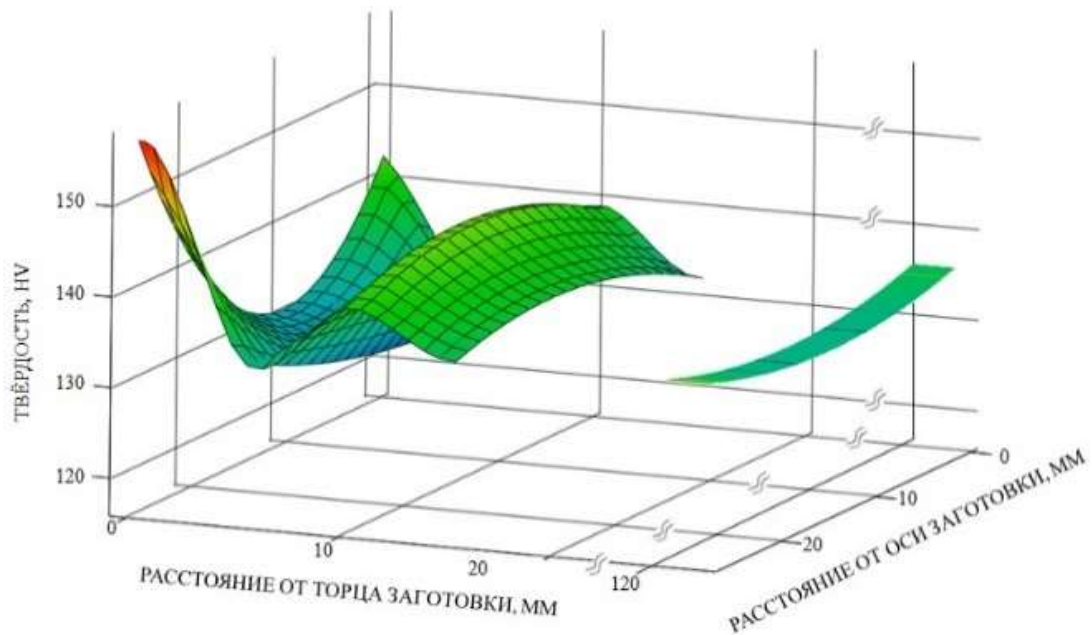


Г

Рисунок 38. Распределение среднего размера сечения зерна поперечными и осевой плоскостями на нестационарной и стационарной стадии двухвалковой (а,в) и трёхвалковой (б,г) винтовой прокатки.



а



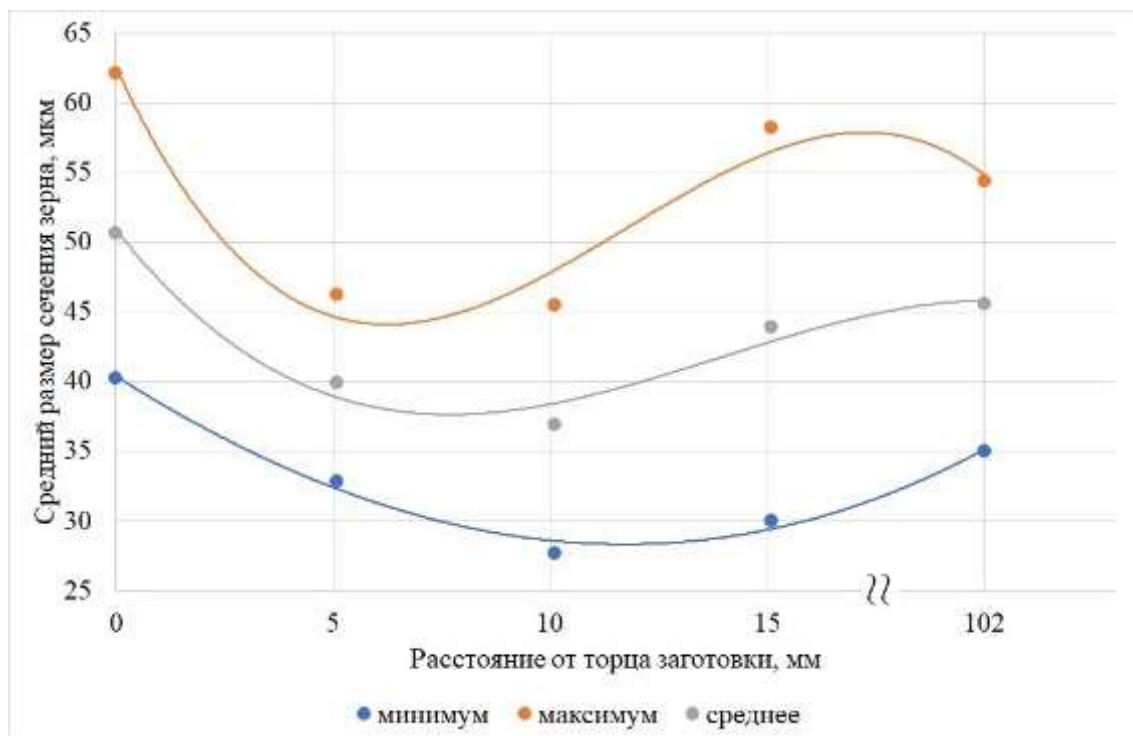
б

Рисунок 39. Распределение твёрдости в поперечных сечениях заготовок на нестационарной и стационарной стадии двухвалковой (а) и трёхвалковой (б) прокатки

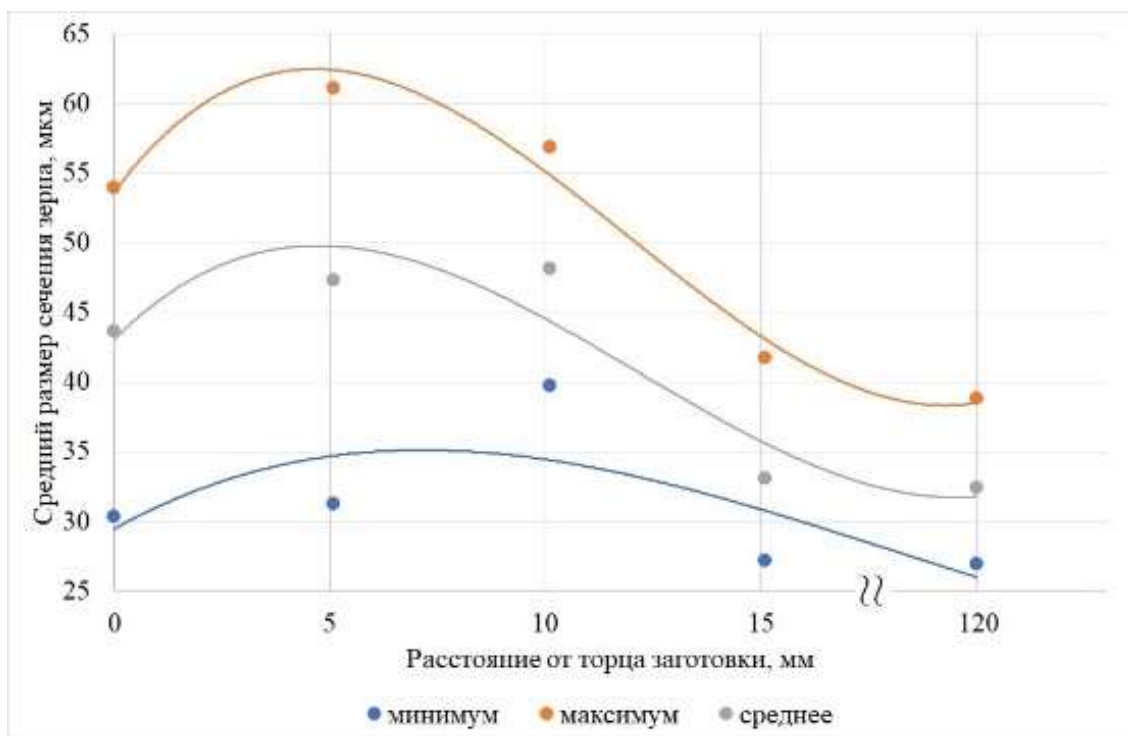
Неоднородность зёрненной структуры и, особенно, твёрдости в сечениях образцов из приторцовой области заготовок отражает нестационарность процесса формоизменения и, соответственно, структурных процессов на соответствующей стадии двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки (рис. 38-39). Разброс значений среднего размера сечения зерна и твёрдости на стационарной стадии меньше, чем на нестационарной.

На рис.38а, 38в, 39 для наиболее удалённых от торца областей форма поверхности распределения среднего размера сечения зерна и твёрдости совпадает или близка к форме аналогичной поверхности для образцов, отвечающих стационарной стадии прокатки. Исходя из этого можно предположить, что вероятная граница между нестационарной и стационарной стадией двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки находится на расстоянии около 20 мм от переднего торца заготовки. Распределение твёрдости по поперечному сечению для двухвалковой прокатки (рис. 39а) на стационарной и тенденция изменения твёрдости на нестационарной стадии показывают, что наименьшая твёрдость и, следовательно, прочность, наблюдается в центре каждого образца. К поверхности твёрдость увеличивается. Как уже ранее отмечалось, для двухвалковой схемы винтовой прокатки характерно осевое разрушение заготовок [1,2,4,6,21,156-158]. При трёхвалковой прокатке, согласно рис. 39б, для стационарной стадии и в части сечений для нестационарной стадии наименьшая твёрдость

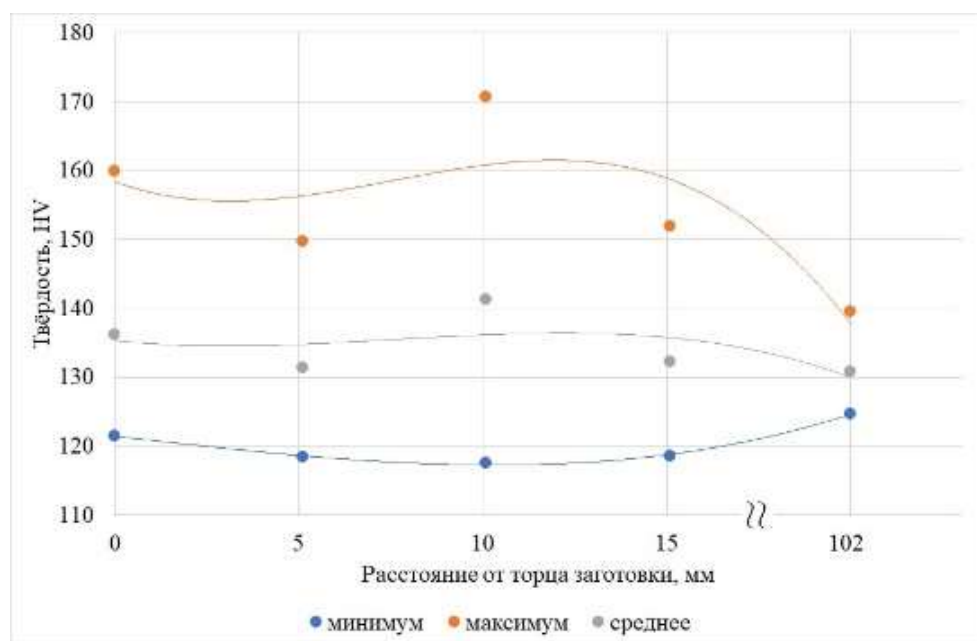
(или локальные минимумы) и, следовательно, прочность, достигаются в областях, расположенных между центром и поверхностью заготовки. При прокатке сплошной заготовки в трёхвалковом стане, согласно результатам, изложенным в [1,6,157,158], происходит кольцевое разрушение и расслоение заготовок. Для оценки неоднородности среднего размера сечения зерна и твёрдости на стационарной и нестационарной стадиях двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки построили графические зависимости, в виде точечных графиков и линий тренда в Excel, иллюстрирующие разброс значений твёрдости и среднего размера сечений зерна поперечными плоскостями (рис. 40).



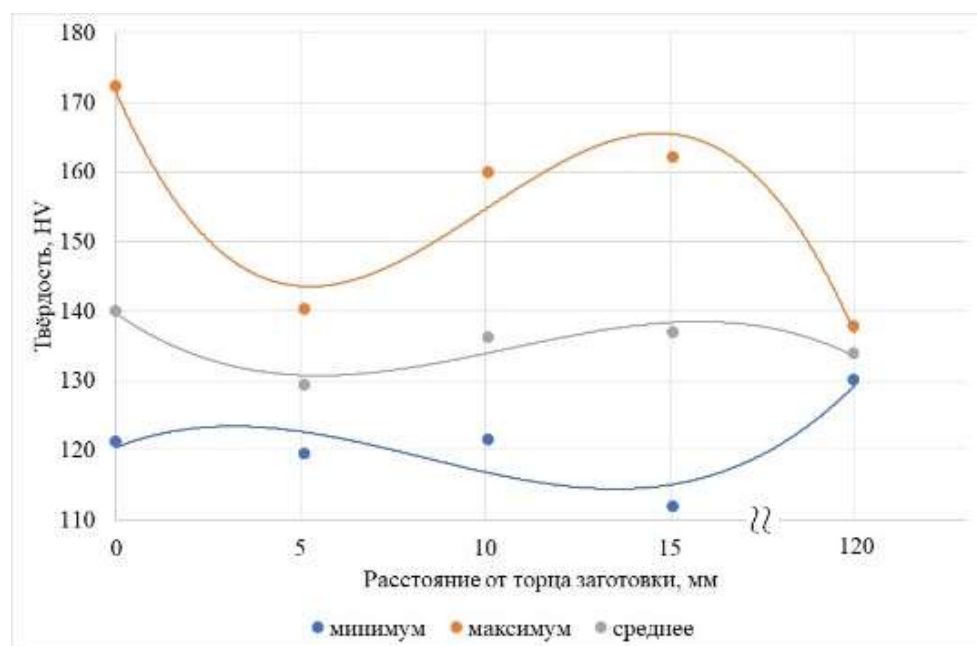
а



б



в

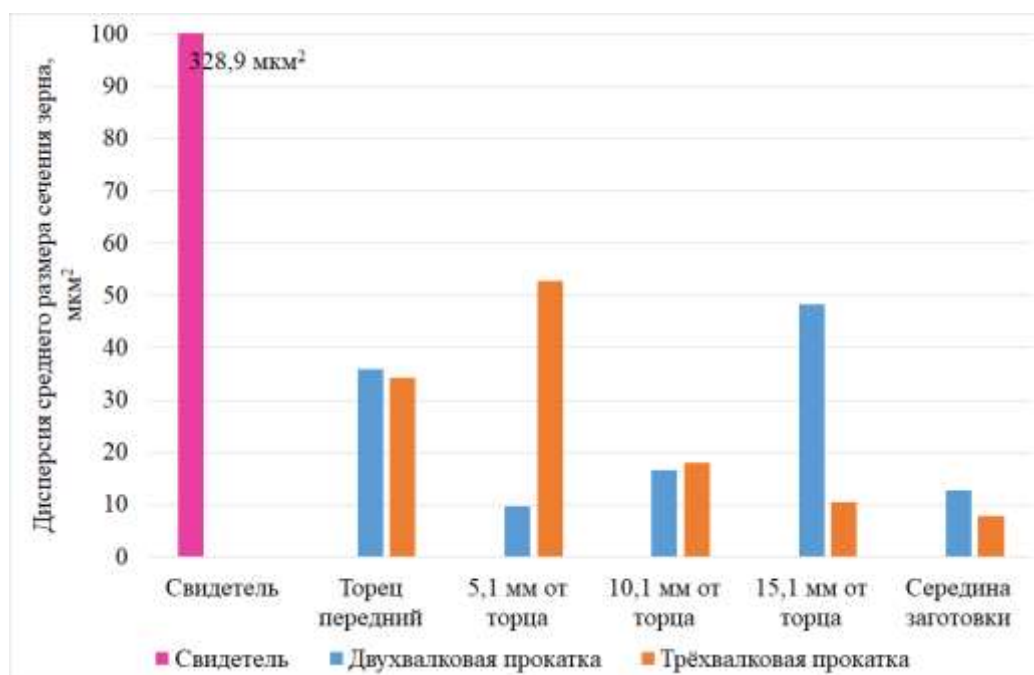


г

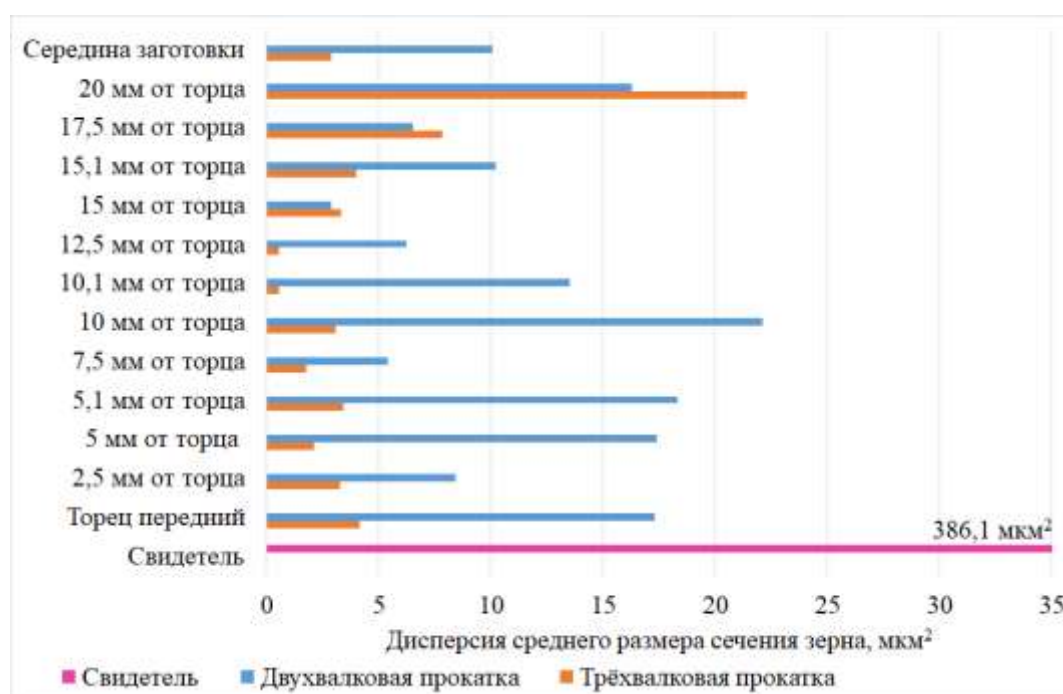
Рисунок 40. Пределы изменений и средние значения твердости и среднего размера сечений зерна поперечными плоскостями на нестационарной и стационарной стадиях после прокатки в двухвалковом (а,в) и трёхвалковом (б,г) станах соответственно

По данным рис. 40 видно, что изменение разброса значений среднего размера сечения зерна и твердости для образцов приторцевой области имеет немонотонный, неоднозначный и различный для разных схем прокатки характер и, наряду с данными рис. 38-39, отражают нестационарность деформации исследуемой области заготовки. Явное отличие границ изменения значений среднего размера сечения зерна и величины твердости в поперечных сечениях в середине заготовки от торцевой области отображено на рис. 40(в-г). Переход к стационарной стадии прокатки по обеим схемам сопровождается уменьшением разброса по сечению заготовки значений твердости (рис. 40(в,г)), а при трёхвалковой прокатке и существенным (до 2,5 раз) уменьшением различий значений среднего размера сечения зерна (рис. 40б). На стационарной стадии трёхвалковой прокатки твердость по всему сечению заготовки практически одинакова (рис. 40г).

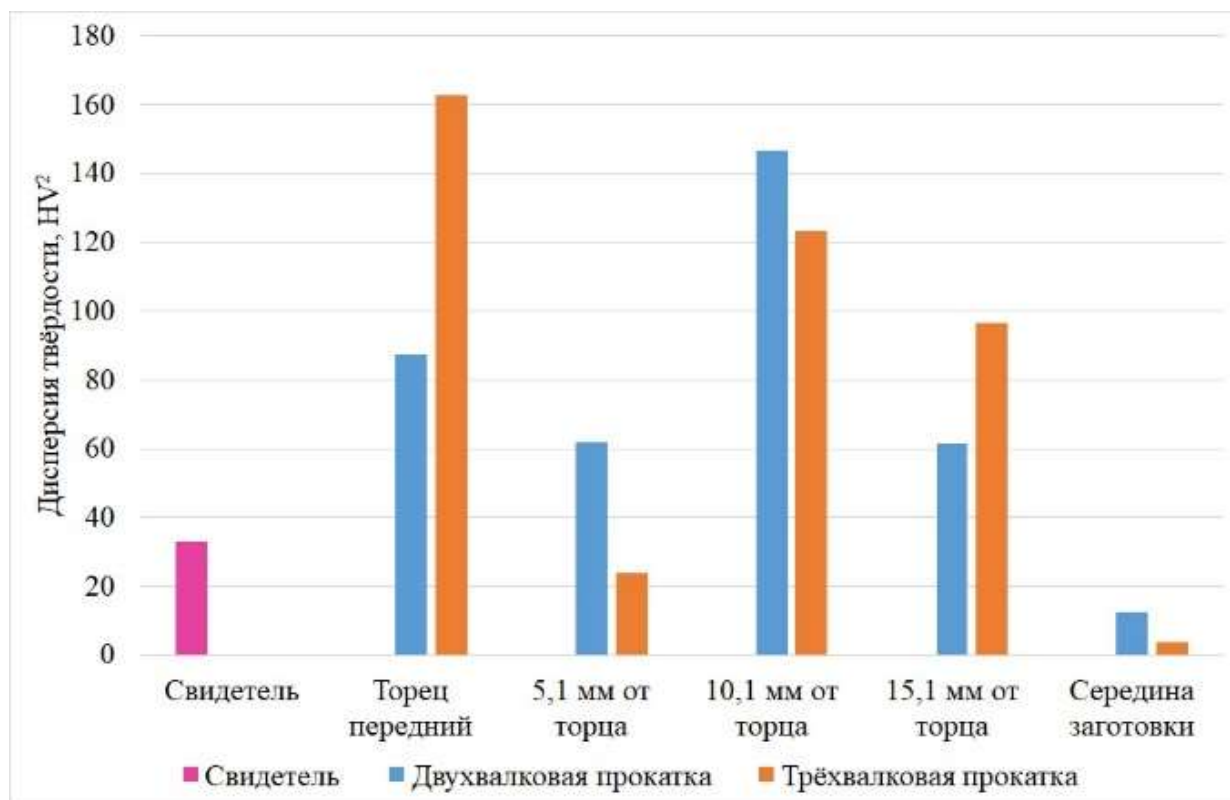
Рассчитали дисперсию распределения среднего размера сечения зерна в поперечных и продольном сечениях, а также дисперсию распределения значений твердости в поперечных сечениях после прокатки в двухвалковом и трёхвалковом станах (рис.41).



а



б



в

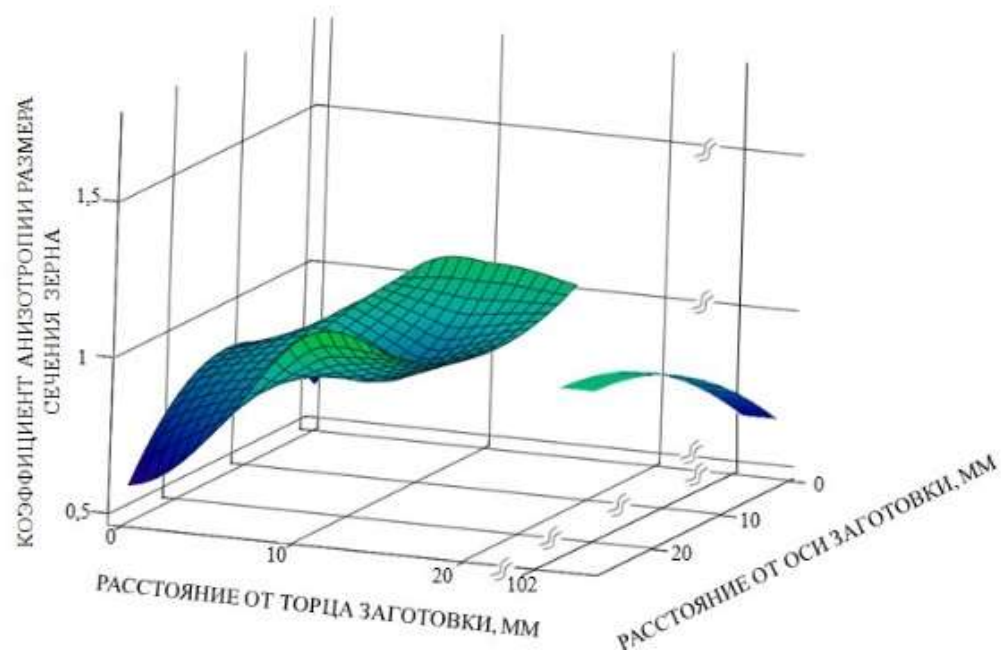
Рисунок 41. Дисперсия распределения среднего размера сечения зерна поперечными (а) и осевой (продольной) (б) плоскостями, дисперсия распределения значений твёрдости (в) и поперечных сечениях после двухвалковой и трёхвалковой прокатки

Согласно данным рис. 41а и рис. 41б, при двухвалковой прокатке дисперсия размера сечения зерна, по сравнению со свидетелем, в поперечных сечениях уменьшается до 34 раз, в продольном – до 133, при трёхвалковой прокатке в поперечных сечениях до 42 раз, в продольном – до 700 раз. При этом стоит отметить, что имело место сравнительно небольшое, для процессов винтовой прокатки, обжатие: 10% при двухвалковой прокатке и 13% - при трёхвалковой. Качественно схожие результаты по уменьшению размера зерна при трёхвалковой винтовой прокатке приведены в работах [10,21,48,58,64,155], в то время как для двухвалковой винтовой прокатки по результатам обзора подобных исследований не обнаружили.

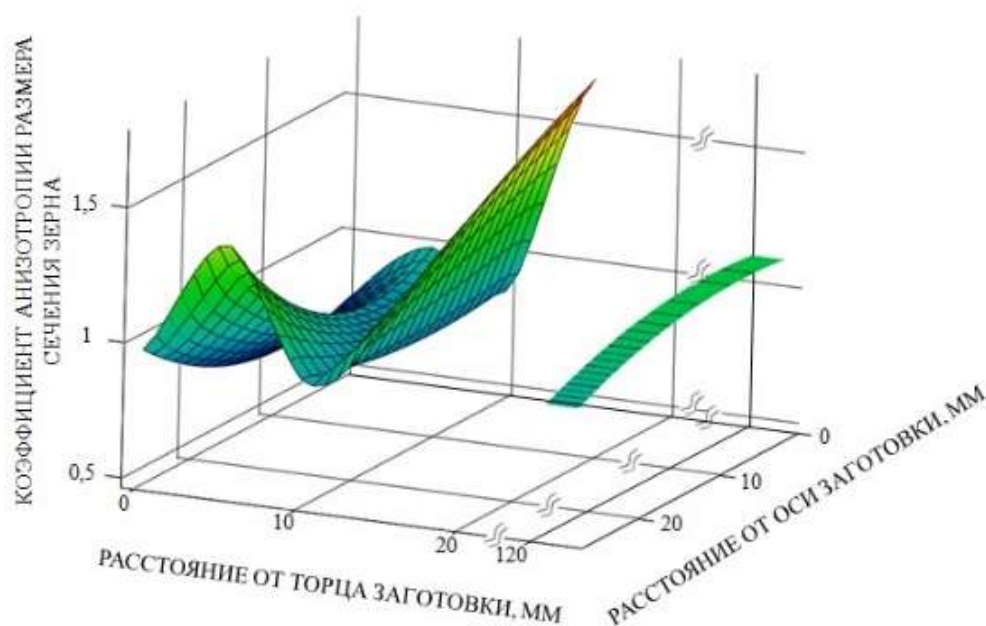
В поперечных сечениях дисперсия твёрдости (рис. 41в) на нестационарной стадии при двухвалковой прокатке увеличивается, по сравнению с недеформированной заготовкой, до 4,9 раз при двухвалковой прокатке, до 5 раз – при трёхвалковой. Однако, на стационарной стадии

при двухвалковой прокатке дисперсия значений твёрдости уменьшилась в 2,6 раза при двухвалковой и в 9,2 раза при трёхвалковой прокатке.

Анализируя данные рис. 41, выявили различия в том, как изменяется размер зерна и твёрдость на стационарной и нестационарной стадиях обеих прокаток. Для обеих схем прокатки на стационарной стадии, по сравнению с нестационарной, разброс значений размера зерна близок или меньше: в поперечных сечениях дисперсия распределения среднего размера зерна для двухвалковой прокатки на стационарной стадии составляет $12,71 \text{ мкм}^2$, на нестационарной – от $9,71$ до $48,23 \text{ мкм}^2$, для трёхвалковой прокатки на стационарной стадии $7,82 \text{ мкм}^2$, на нестационарной – от $10,41$ до $52,85 \text{ мкм}^2$ на нестационарной стадии; в продольном сечении дисперсия распределения среднего размера зерна для двухвалковой прокатки на стационарной стадии составляет $10,30 \text{ мкм}^2$, на нестационарной – от $2,89$ до $22,1 \text{ мкм}^2$, для трёхвалковой прокатки на стационарной стадии $2,88 \text{ мкм}^2$, на нестационарной – от $0,55$ до $21,35 \text{ мкм}^2$ на нестационарной стадии. Разброс значений твёрдости для обеих схем прокатки на стационарной стадии, по сравнению с нестационарной стадией, меньше: в поперечных сечениях дисперсия распределения значений твёрдости для двухвалковой прокатки на стационарной стадии составляет $12,65 \text{ HV}^2$, на нестационарной – от $61,93$ до $146,81 \text{ HV}^2$, для трёхвалковой прокатки на стационарной стадии $3,59 \text{ HV}^2$, на нестационарной – от $23,93$ до $162,83 \text{ HV}^2$ на нестационарной стадии. Указанное позволяет предположить, что распределение свойств в объёме заготовки на стационарной стадии будет более равномерно, по сравнению с нестационарной. Подавляющая часть публикаций, связанных с исследованием влияния винтовой прокатки на свойства деформируемого материала, оценивает их изменение только на стационарной стадии [58,64,155]. Целесообразно отметить, что нестационарные стадии различных процессов ОМД детально исследованы в работе [162]. В рамках исследований данной работы различия между стационарной и нестационарной стадией винтовой прокатки определены при сравнении распределения $K_{\text{анз}}$ в разных зонах прокатанных по разным схемам заготовок (рис. 42).



а



б

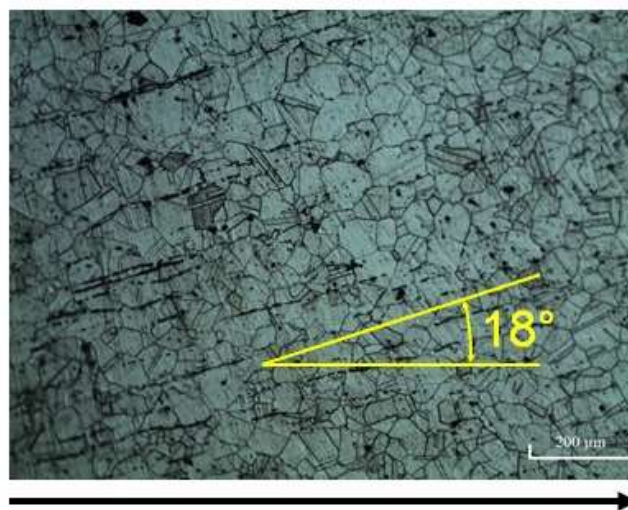
Рисунок 42. Изменение $K_{анз}$ на нестационарной и стационарной стадиях двухвалковой (а) и трёхвалковой (б) прокаток

Распределение $K_{анз}$ в приторцовых областях (рис.42), наряду с данными рис. 38-41, также явно отражают нестационарность и неодинаковость характера формоизменения,

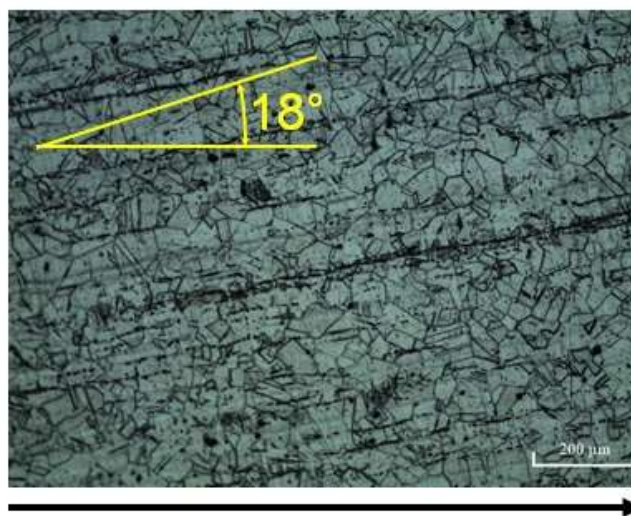
сложности сопутствующих структурных процессов. На стационарной стадии можно выявить такое отличие зёрненной структуры в зависимости от схемы прокатки: значение $K_{анз}$ при двухвалковой винтовой прокатке от оси заготовки к её поверхности увеличивается, а при трёхвалковой винтовой прокатке – уменьшается. При этом, при двухвалковой винтовой прокатке $K_{анз}$ преимущественно меньше единицы, а при трёхвалковой винтовой прокатке преимущественно больше единицы. Согласно рис.37б и рис. 42, $K_{анз}$, 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 (рис. 42) 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 сечений зерна, а следовательно, и различия в свойствах горячекатанных по разным схемам винтовой прокатки заготовок. При этом особенно следует обратить внимание на анизотропию свойств и неоднородность по сечению. Полученные данные об изменении твёрдости и размера сечения зерна (рис. 38-41) при трёхвалковой прокатке качественно совпадают с результатами исследований [10,18,21,46,47,49,66,69,136], подтверждая связь между изменением размера зерна и интенсивностью деформации на стационарной стадии: от центра к поверхности интенсивность деформации увеличивается, размер зерна - уменьшается. Данные об изменении твёрдости при двухвалковой прокатке по результатам обзора обнаружить не удалось. Полученные в ходе данной работы результаты не противоречат теоретическим представлениям об НДС металла, связанным с наличием ослабленной, в плане прочности, осевой зоны прокатываемой заготовки и осевым разрушением, так называемом «эффекте Маннесманна» и экспериментальными данным об изменении структуры, изложенным в [2,6,21,96,156-158].

Можно также отметить, что в ходе винтовой прокатки по обеим схемам изменяется ориентировка строчечной структуры. В наших условиях в осевом сечении образцов «Торец» (см. рис. 35) для всех областей заготовки за исключением лежащих вблизи поверхности, как после двухвалковой, так и после трёхвалковой прокатки, включения расположены под некоторым углом в 15-17 градусов к оси заготовки (рис. 43). При этом угол подачи валков составлял 18 градусов для обоих использованных в исследованиях станов. При трёхвалковой винтовой прокатке схожее явление отмечали только вблизи поверхности заготовки в продольном сечении [69], в работах [10,18] вблизи поверхности, но в поперечном сечении. При двухвалковой схеме винтовой прокатки, но для получения полой заготовки (гильзы), то есть

при прошивке, поворот структуры на некоторый угол отмечали в поперечном сечении гильзы [70], между её внутренней и наружной поверхностями.



а



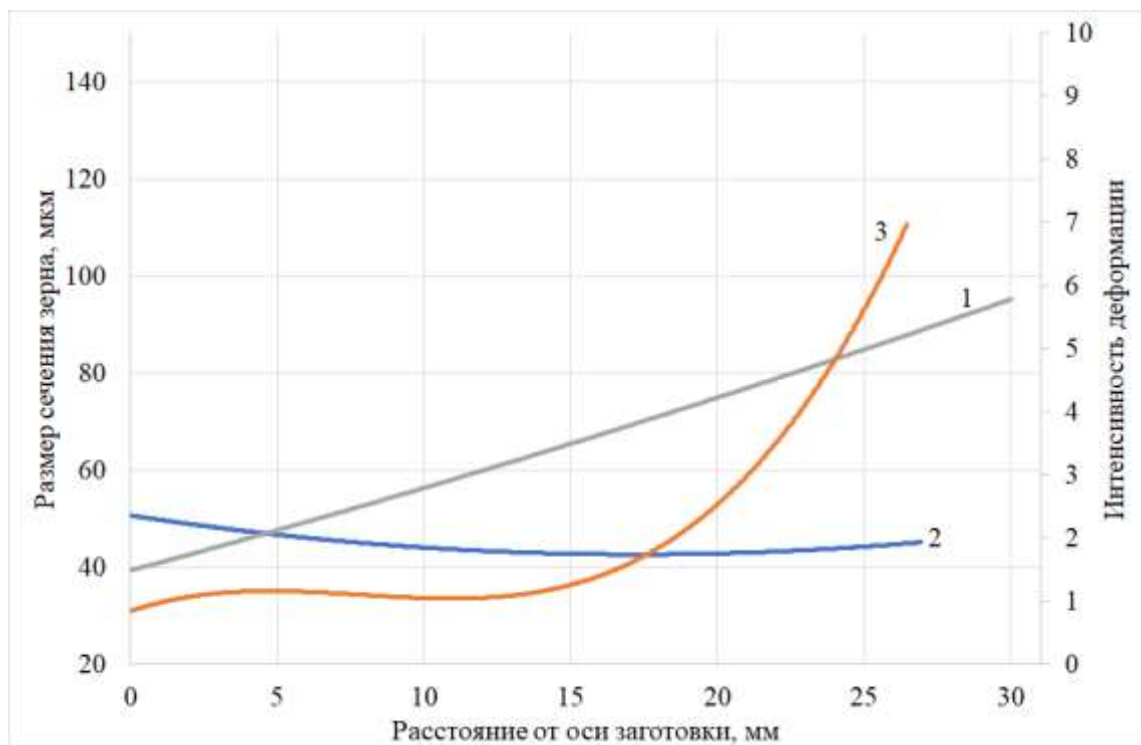
б

Рисунок 43. Строчечность и её ориентировка в продольном сечении при двухвалковой (а) и трёхвалковой (б) прокатках

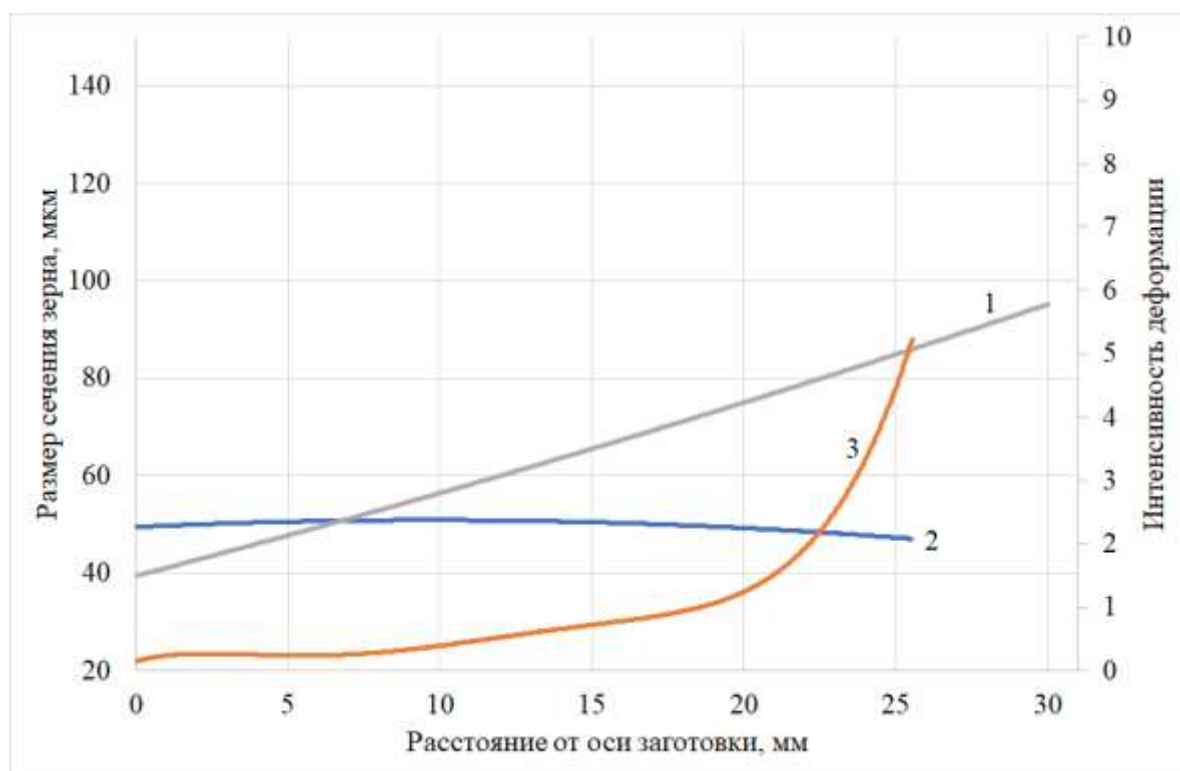
Результаты опытных прокаток и компьютерного моделирования позволили определить взаимосвязь между характером изменения размера сечения зерна и интенсивностью деформации. Установили, что, относительно недеформированной заготовки (свидетеля), уменьшение размера сечения зерна вблизи поверхности до 4 раз больше, чем в центре

заготовки. Это предполагает существенное превышение значений интенсивности деформации вблизи поверхности заготовки по сравнению с её центром. Указанное продемонстрировано на рис. 44 для поперечного сечения, находящегося на расстоянии 15,1 мм от торца (нестационарная стадия) и в поперечном сечении в середине заготовок.

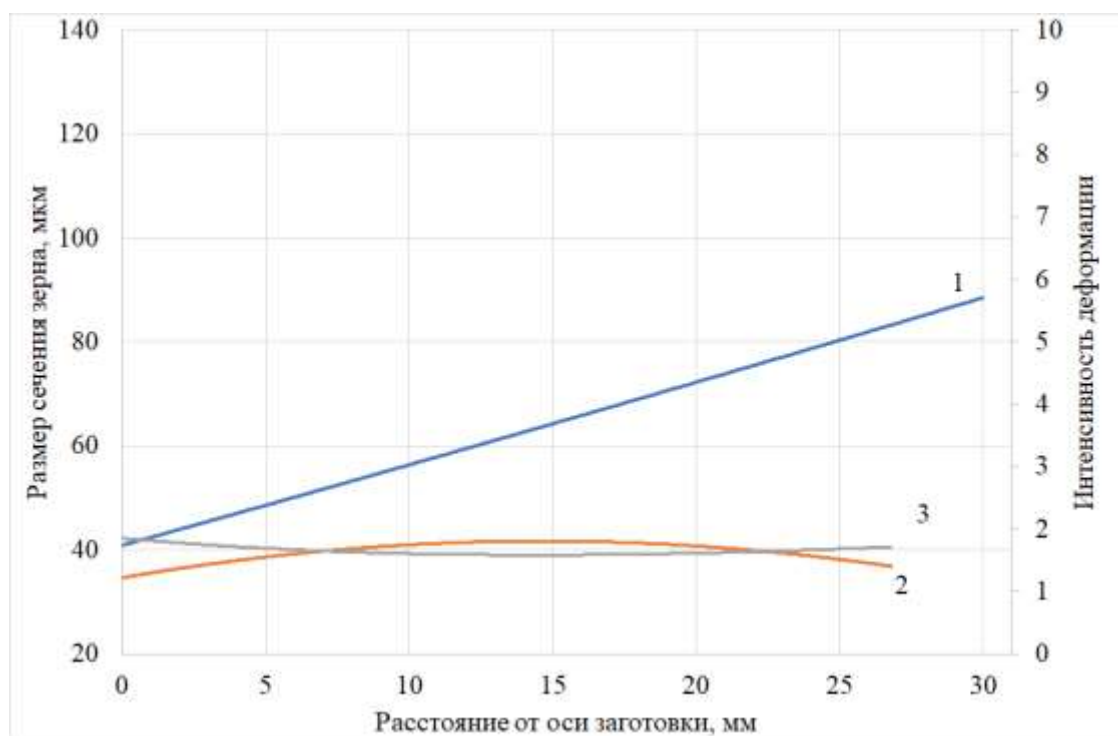
В поперечных сечениях на нестационарной стадии и стационарной стадиях оценили изменение твёрдости и интенсивности деформации (рис.45), аналогично представленному на рис. 44.



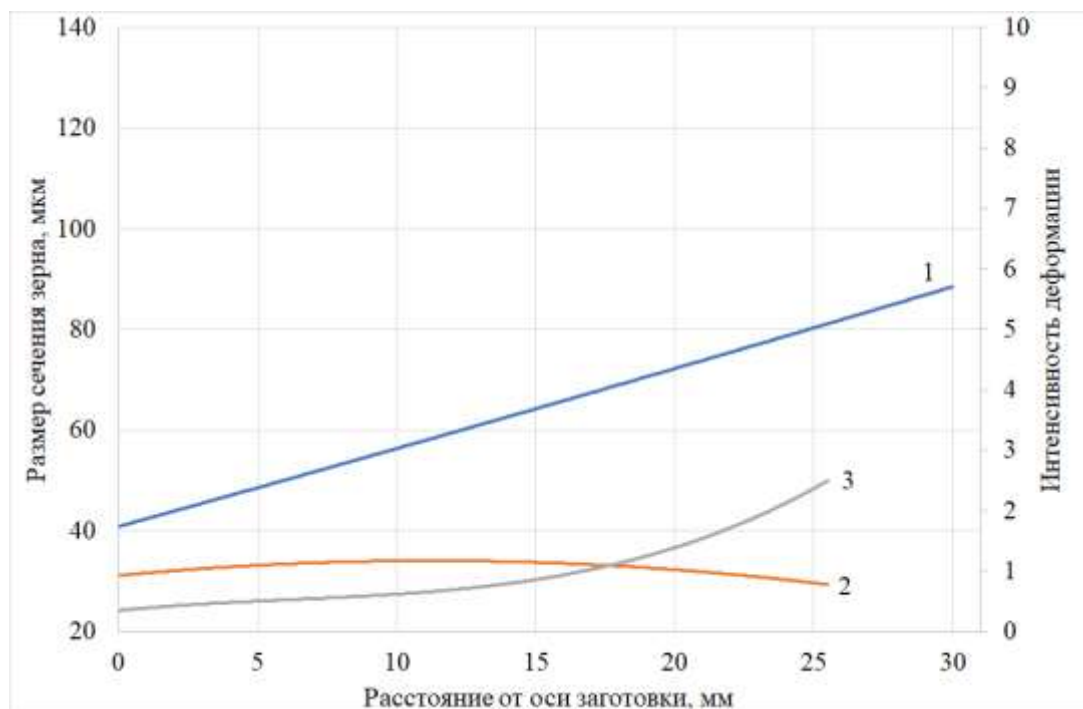
а



6



B

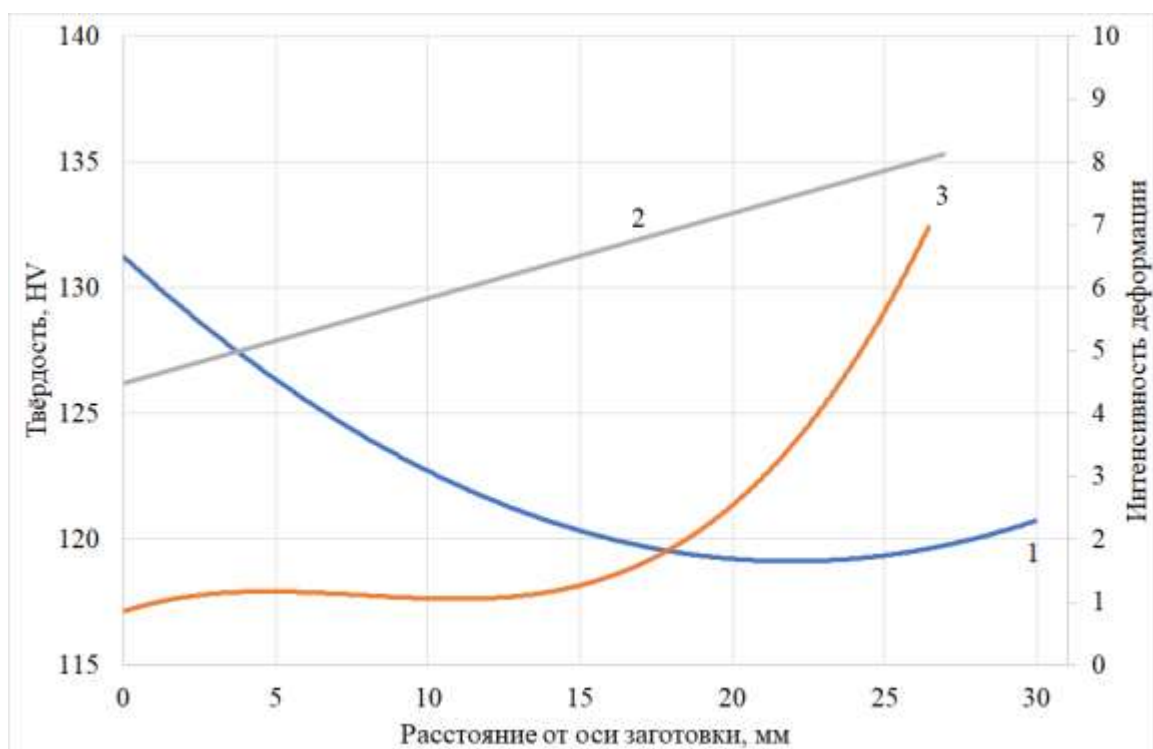


Г

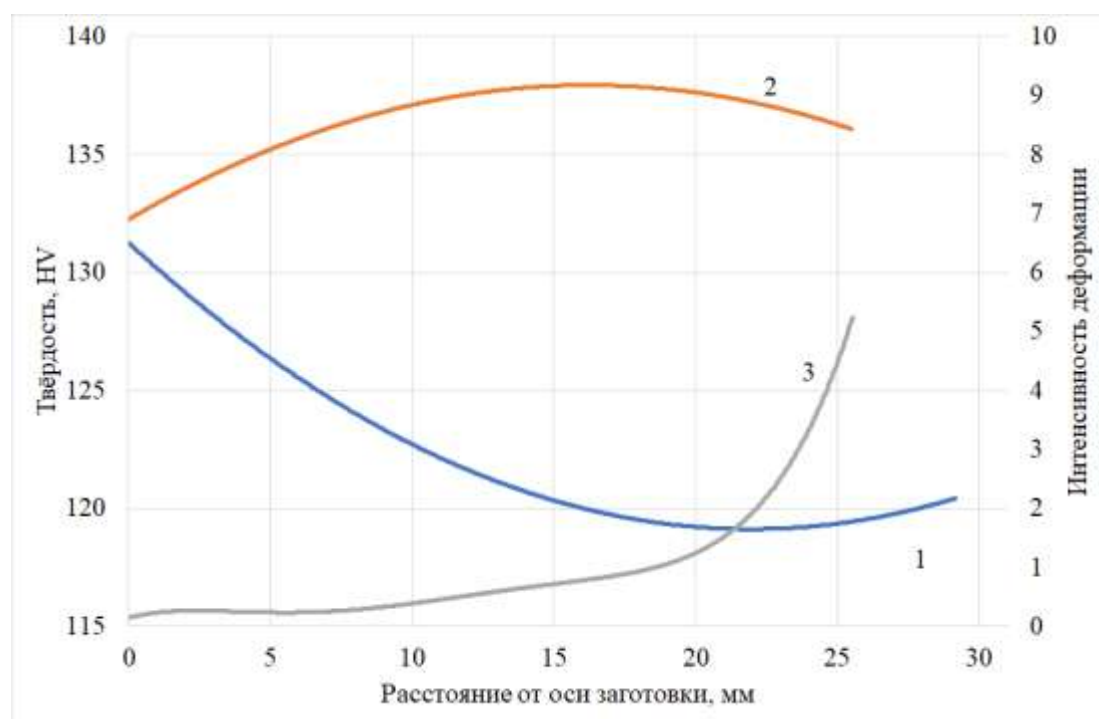
Рисунок 44. Изменение по радиусу интенсивности деформации (3), размера сечения зерна до (1) и после (2) двухвалковой (а,в) и трёхвалковой (б,г) прокатки в поперечной плоскости на нестационарной и стационарной стадии соответственно

Твёрдость на поверхности заготовки увеличивается гораздо более существенно, чем в центре заготовки, относительно значений твёрдости нагретой и охлажденной без деформации заготовки.

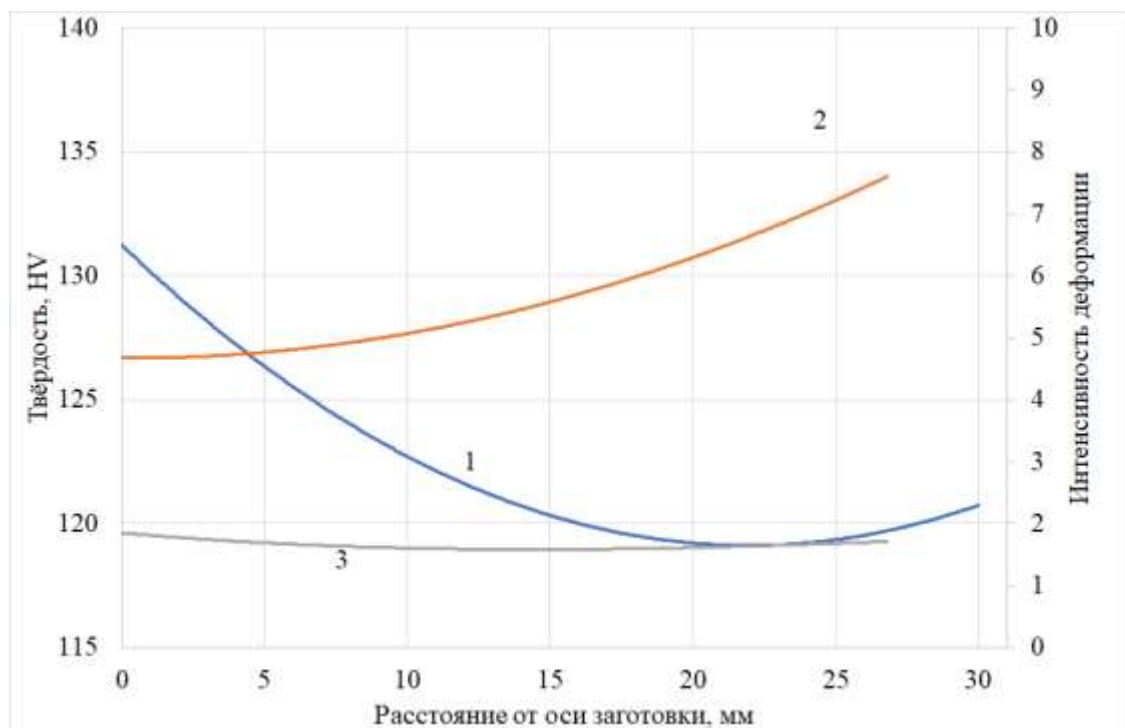
Согласно рис. 44-45 разброс значений интенсивности деформации на стационарной стадии, по сравнению с нестационарной стадией, при двухвалковой прокатке уменьшается до 12 раз, при трёхвалковой – до 2,4 раза. Уменьшение разброса значений интенсивности деформации во многом объясняет то, что на стационарной стадии, по сравнению с нестационарной, уменьшается дисперсия распределения значений твёрдости и среднего размера зерна (рис. 41).



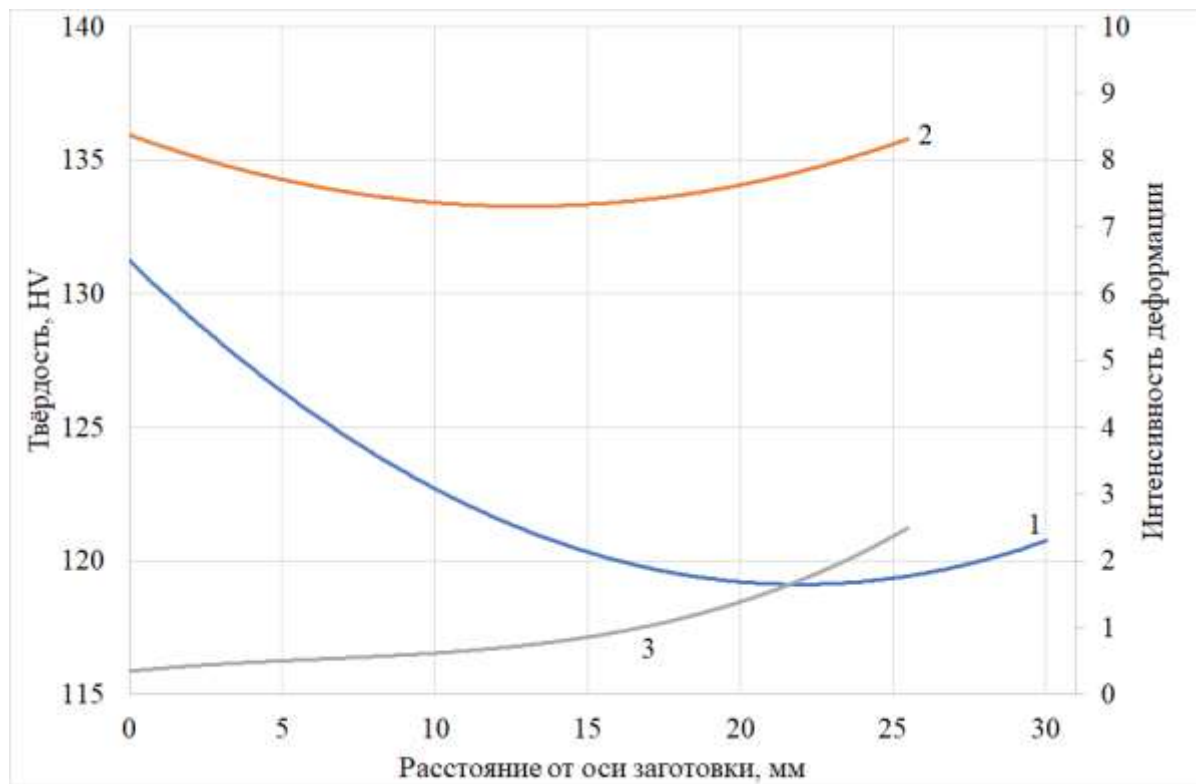
а



б



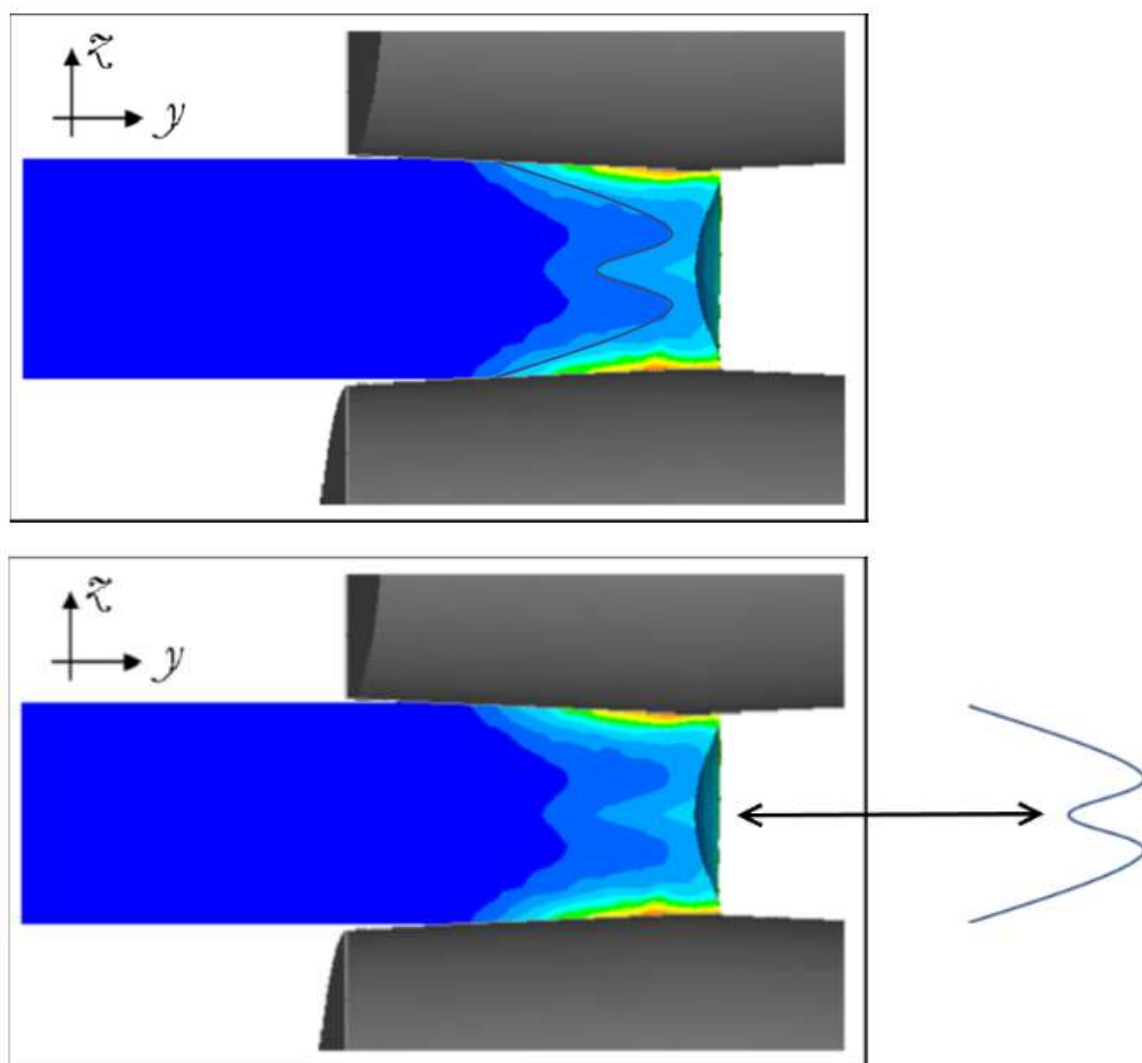
В

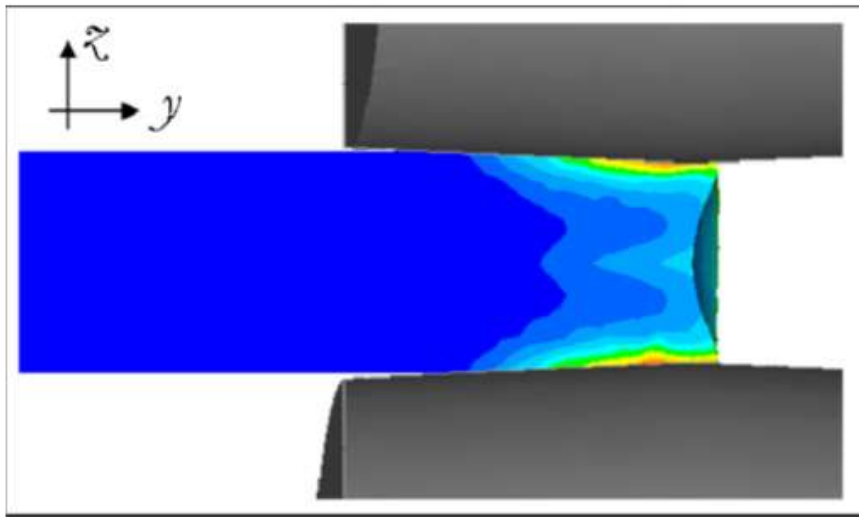


Г

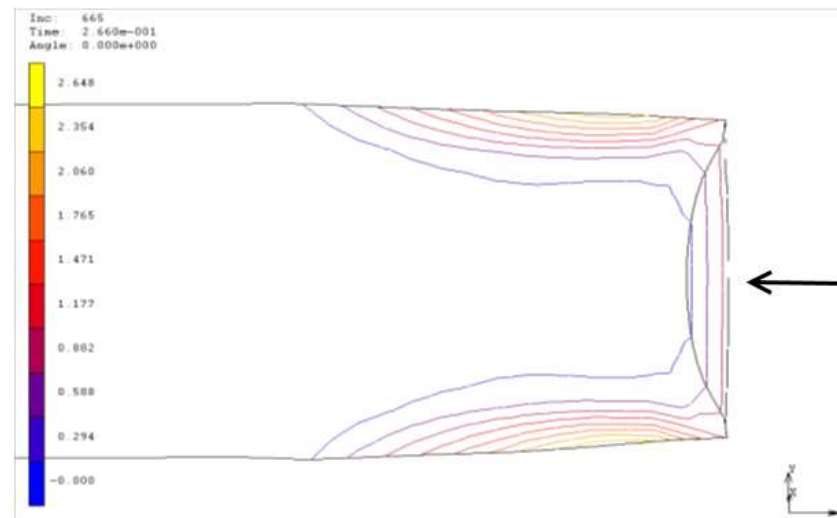
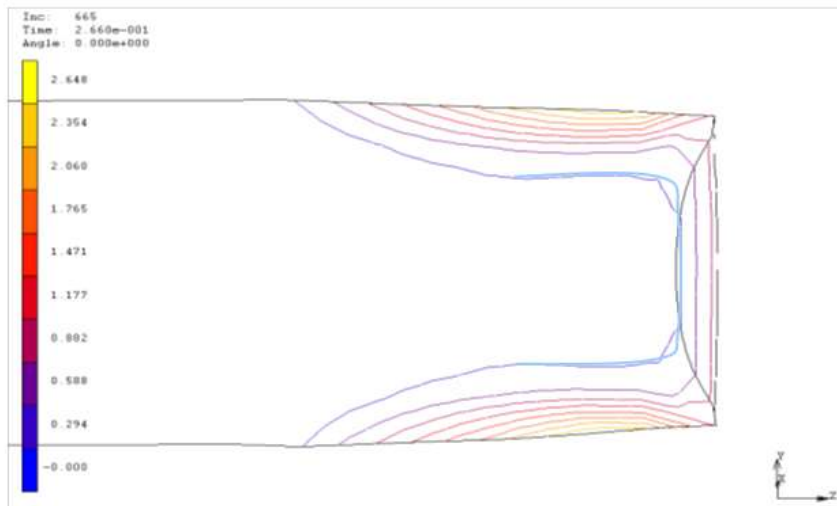
Рисунок 45. Изменение по радиусу интенсивности деформации (3), твёрдости до (1) и после (2) двухвалковой (а,в) и трёхвалковой (б,г) прокатки в поперечном сечении на нестационарной и стационарной стадии соответственно

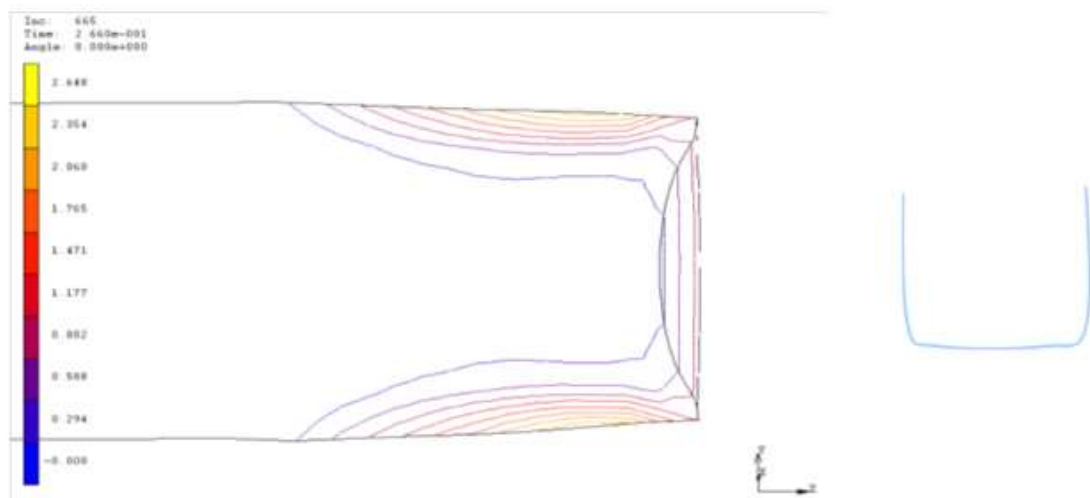
Исследование изменения размера зерна при винтовой прокатке представляет интерес не только с точки зрения прогнозирования свойств получаемых изделий, но и с точки зрения понимания сути самого процесса винтовой прокатки. Авторами работ [96] и [136] на основе компьютерного моделирования без экспериментального подтверждения определены отличия в распределении интенсивности деформации в продольном сечении на нестационарной стадии: при двухвалковой винтовой прокатке – W-образное распределение, при трёхвалковой – U-образное (рис. 46 (а,б)). Также стоит отметить, что похожее отличие, но на стационарной стадии, можно частично определить по результатам компьютерного моделирования процессов двух- и трёхвалковой прошивки, которое проводили в работе [163] (рис. 46 (в,г)).



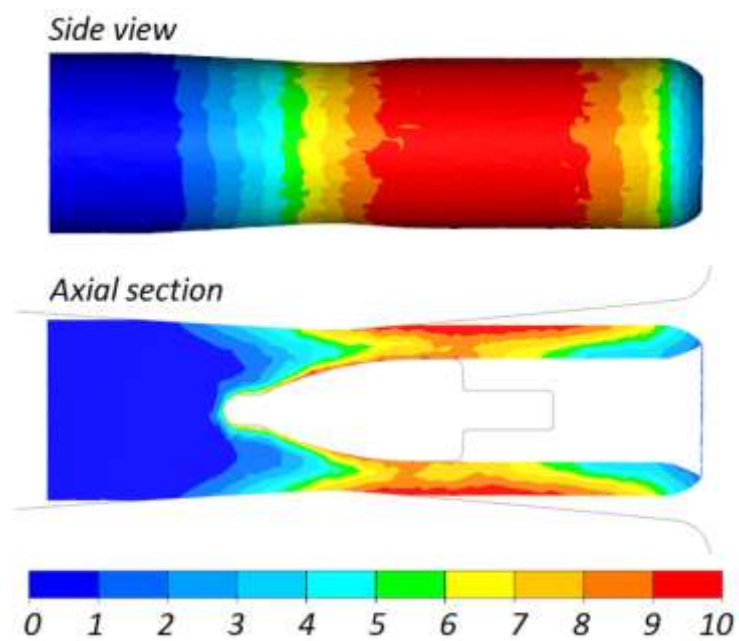


a





B



B

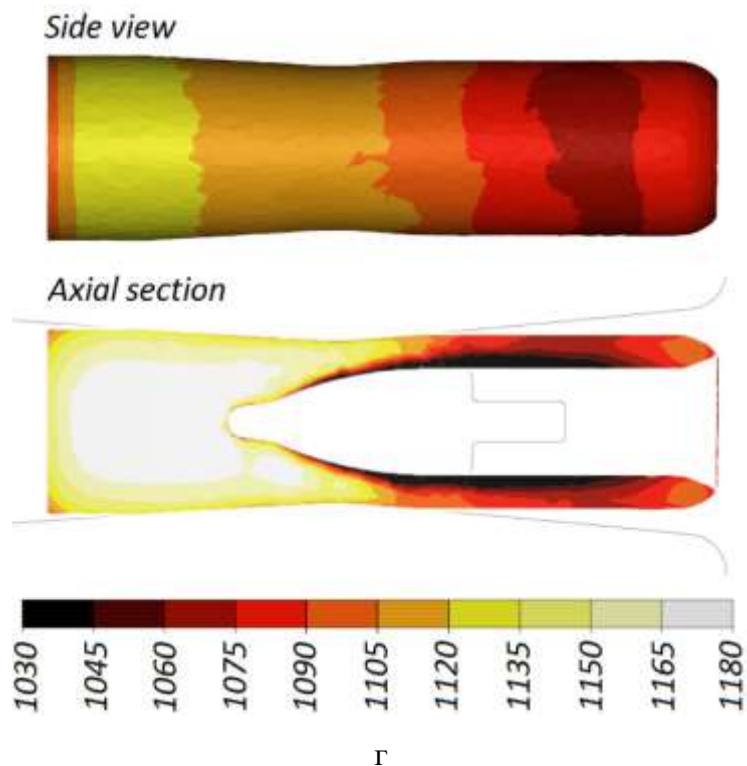
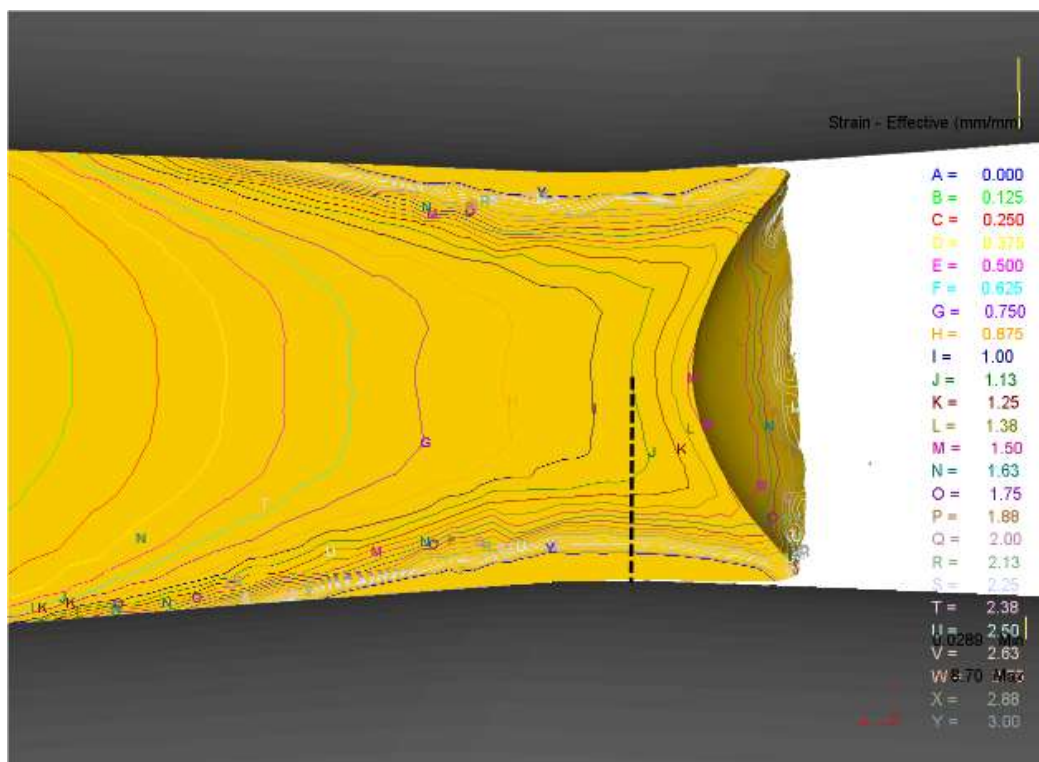


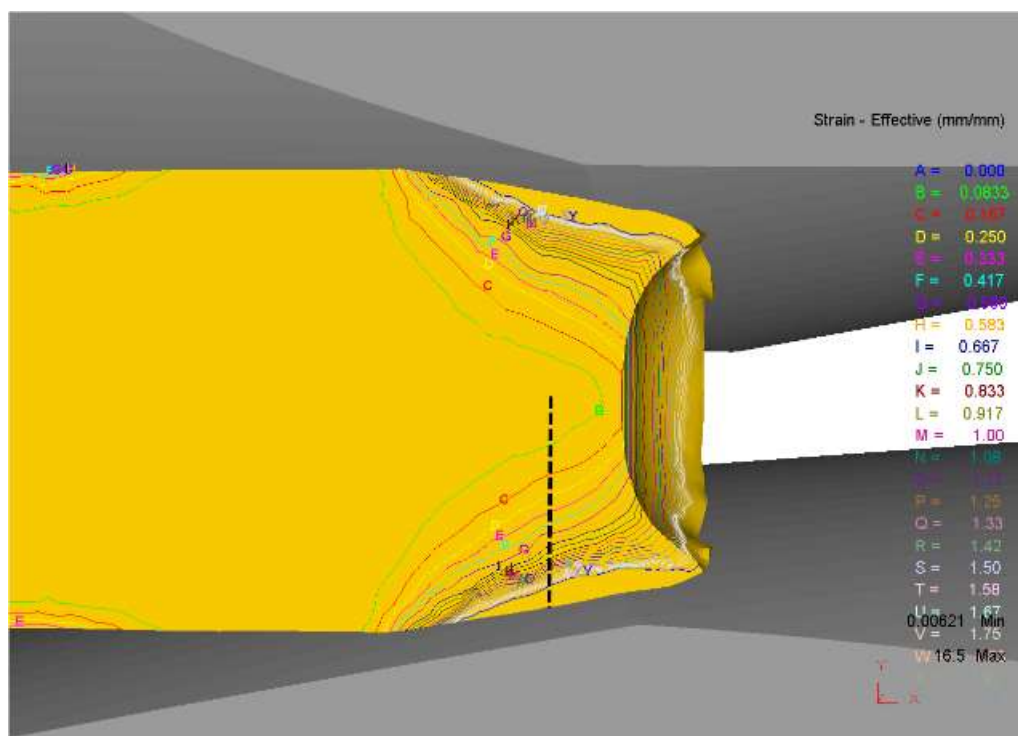
Рисунок 46. Изменение интенсивности деформации в продольном сечении на нестационарной стадии двухвалковой (а) [96] и трёхвалковой [136] (б) винтовой прокатки, а также на стационарной стадии двухвалковой (в) и трёхвалковой (г) прошивки [163].

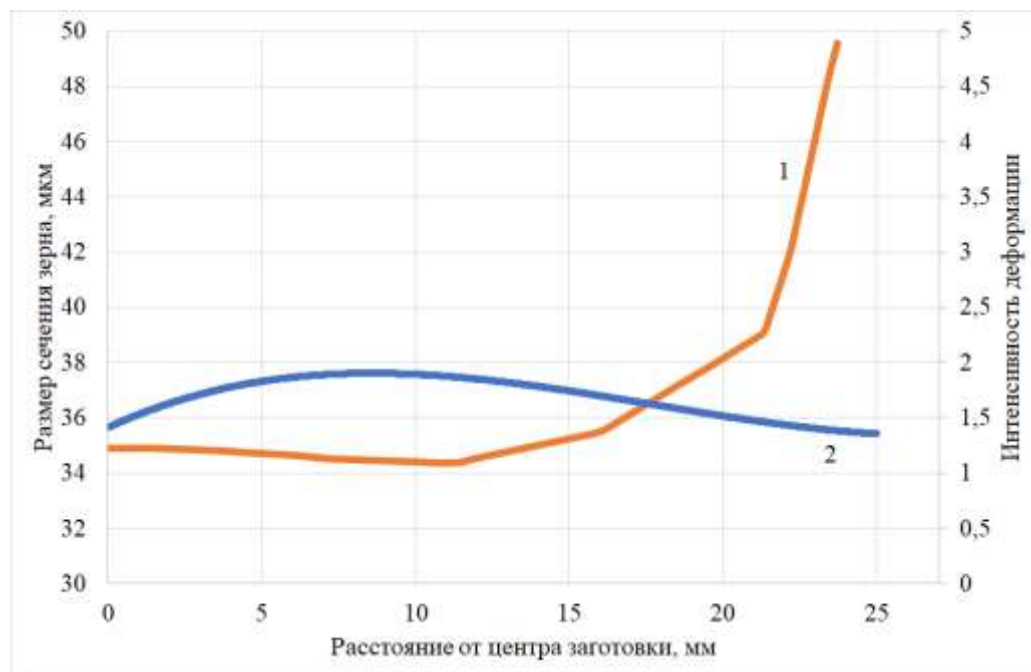
Характер изменений интенсивности деформации, подобный отображённым на рис. 46 (а,б), получили по результатам компьютерного моделирования опытных прокаток в DEFORM (рис. 47). Если провести радиус заготовки (показан пунктиром на рис. 47 (а,б)), то для двухвалковой прокатки одна из изолиний будет пересекаться 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. Учитывая тенденцию, отображённую на рис.45, по указанным на рис. 47 (а,б) радиусам при двухвалковой прокатке размер сечения зерна сначала должен увеличиваться, а затем – уменьшаться, при трёхвалковой – только уменьшаться. Указанное подтверждается данными рис. 47 (в,г). По данным, отображающим изменение размера сечения 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.

Данные рис.47 демонстрируют экспериментально подтверждённую разницу в распределении интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатки.

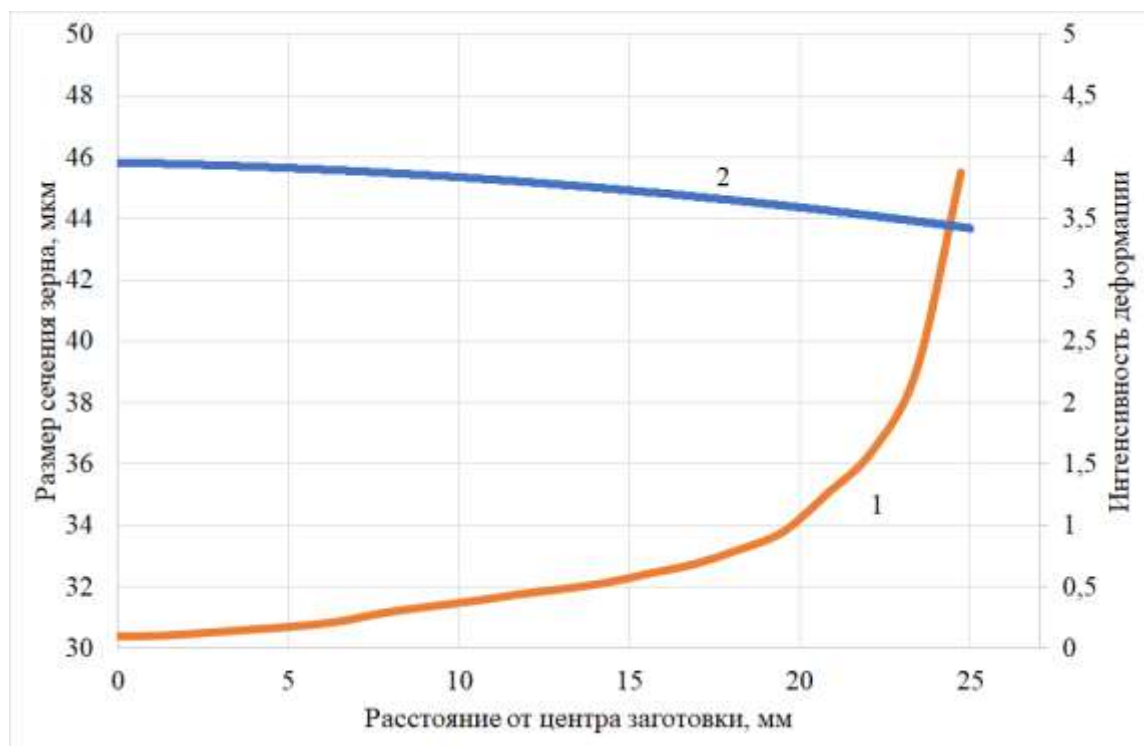


a





в



г

Рисунок 47. Поля интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой (а) и трёхвалковой винтовой прокатки (б), изменение интенсивности деформации (1) и размера

сечения зерна (2) по радиусу в продольном сечении на нестационарной стадии двухвалковой (в) и трёхвалковой (г) винтовой прокатки

Актуальным, для дальнейших исследований, представляется выявление чёткой взаимосвязи между распределением параметров НДС и размером сечения зерна и твёрдости не только на стационарной, но и на их нестационарных стадиях винтовой прокатки, причём желательно провести прямые структурные и текстурные исследования при прокатке в условиях, исключающих протекание процессов рекристаллизации, и, напротив, при прохождении полной рекристаллизации во всём объёме.

2.2 Создание трёхмерной модели зерна до и после винтовой прокатки

Исходя из результатов опытных прокаток, в частности, строчечности и её ориентировки (рис. 43), представляет интерес создание трёхмерной модели зерна, используя представленные выше данные по микроструктуре. Модель строили для случая трёхвалковой прокатки.

Создание трёхмерной модели зерна осуществляли при исследовании области заготовки, расположенной на стационарной стадии прокатки, в 5 мм от поверхности заготовки. В указанной области сделали два первичных шлифа во взаимноперпендикулярных плоскостях. Один из них в плоскости, перпендикулярной оси прокатки, второй – в плоскости, параллельной оси прокатки. Оценили максимальный размер зерна в каждом из шлифов. Оценка максимального размера зерна в исследуемой области для шлифа (рис.48а) в плоскости, перпендикулярной оси прокатки, составила 150 мкм. Оценка максимального размера зерна для шлифа в плоскости, параллельной оси прокатки, составила 130 мкм (рис. 48б). Из двух оценок наибольшей является 150 мкм. Изготовили 11 вторичных шлифов в плоскостях, перпендикулярных оси прокатки и, соответственно, параллельных плоскости одного из первичных шлифов. Расстояние между первым и одиннадцатым шлифом составило 150 мкм, то есть соответствующим максимальной оценке размера зерна. Расстояние между соседними шлифами составляло от 5 до 25 мкм. Во всех шлифах искали сечения, соответствующие одному и тому же зерну. Установили зерно, сечения которого видны на 6 шлифах (рис. 49), при этом расстояние между первым и шестым шлифом составляло 113 мкм. Контуры сечений создали в SolidWorks. При этом на фото микроструктуры в сечении фиксировали 12 точек, которые располагались на прямых, угол между соседними прямыми составлял 30 градусов (рис. 50). Прямые проходили через точку, которая являлось центром описанного

прямоугольника вокруг контура сечения зерна (рис. 50). При изготовлении шлифа №1 в него вдавливали инденторы в виде пирамид и отпечатки были настолько глубоки, чтобы их след был виден на всех шлифах. Центр левого нижнего отпечатка (рис. 51) на каждом шлифе принимали за начало координат, и, исходя из этого, каждая из 12 точек имела свои координаты. Сечения зерна в каждом из шлифов воссоздали по 12 точкам в SolidWorks, соединил точки линиями, получив эскизы (рис. 52). Всего создали 6 эскизов в параллельных плоскостях, расстояние между которыми равнялось расстоянию между плоскостями соответствующих шлифов. Используя команду «Бобышка по сечениям» во вкладке «Элементы» по шести эскизам получили трёхмерную модель зерна (рис. 53)

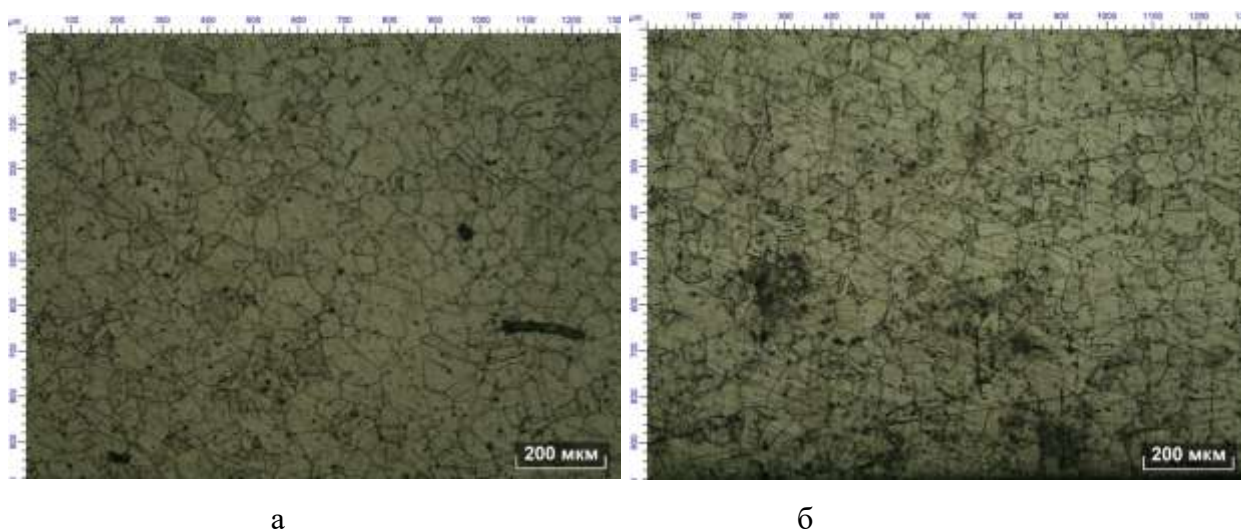
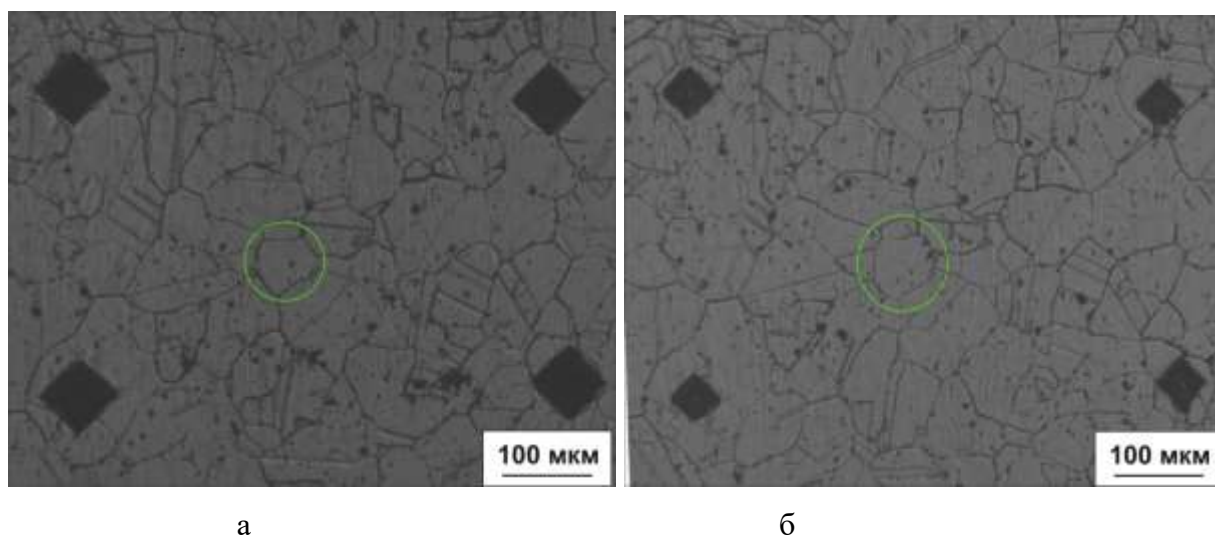
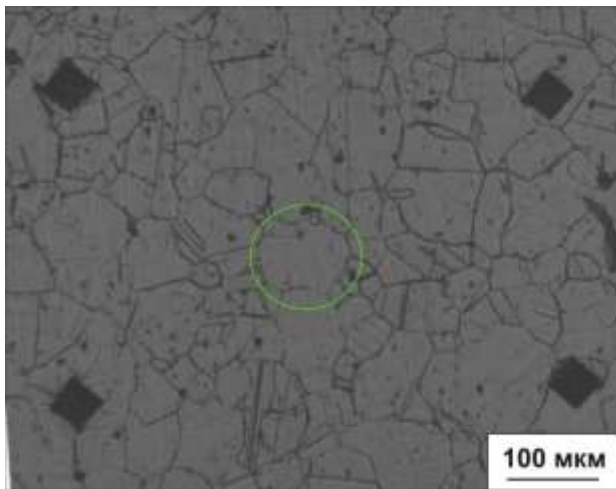
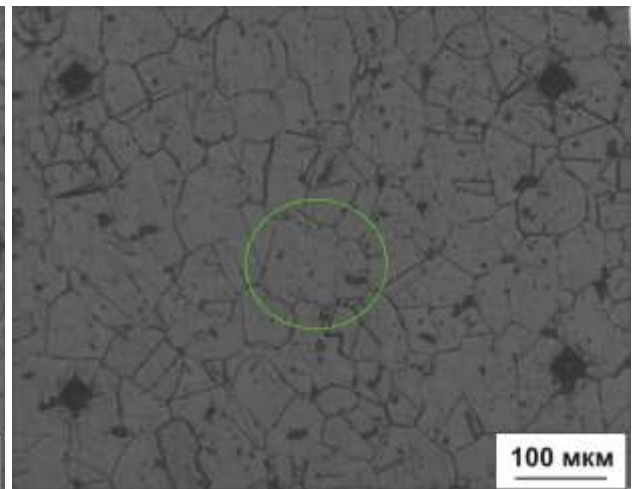


Рисунок 48. Микроструктура заготовки вблизи поверхности в сечении, перпендикулярном оси прокатки (а) и параллельном оси прокатки б)

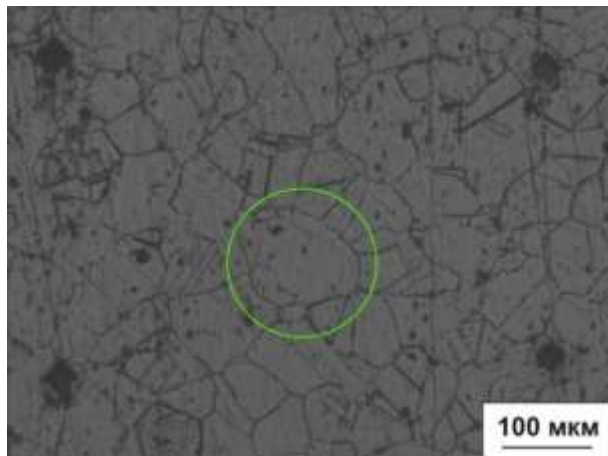




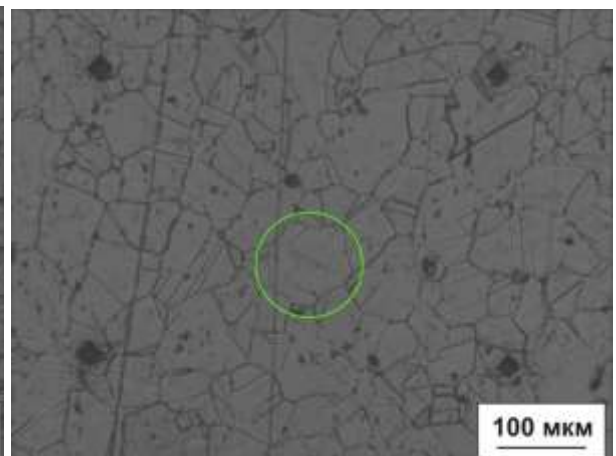
В



Г



Д



е

Рисунок 49. Шлифы с поперечным сечениями одного и того же зерна, используемыми для создания модели

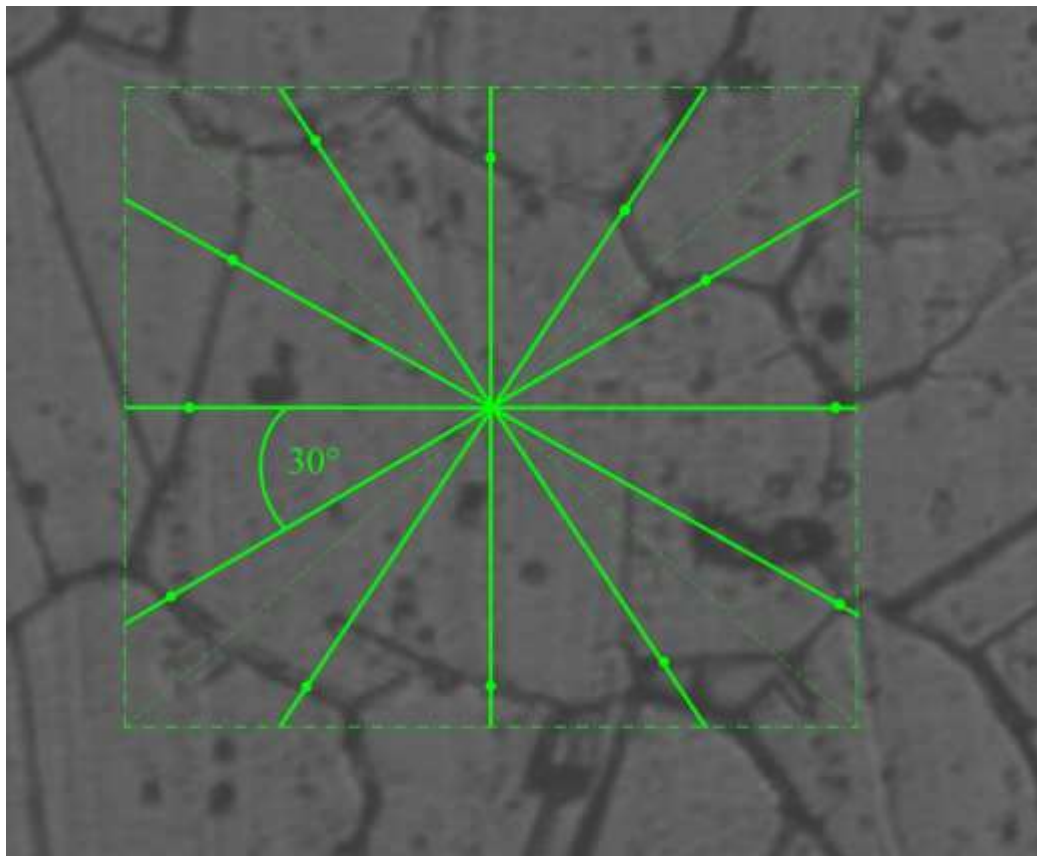


Рисунок 50. К получению 12 точек на контуре зерна

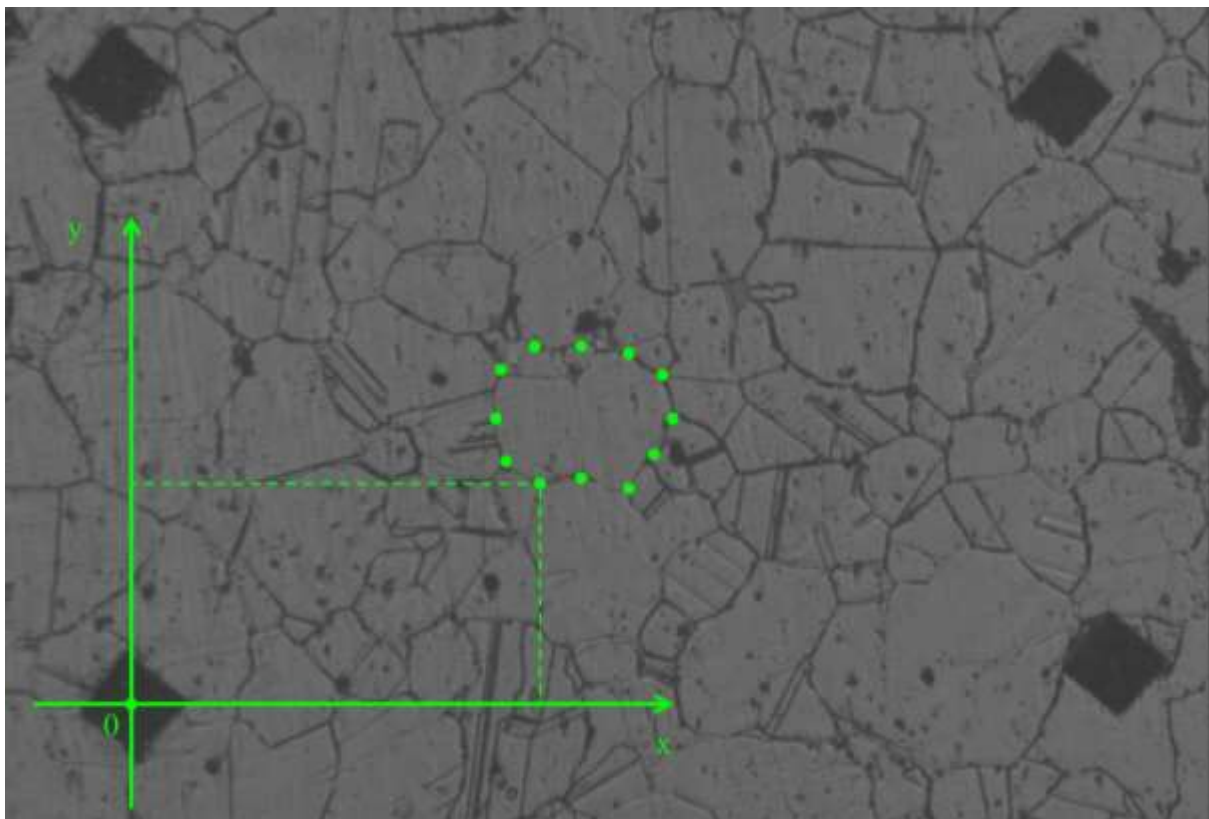
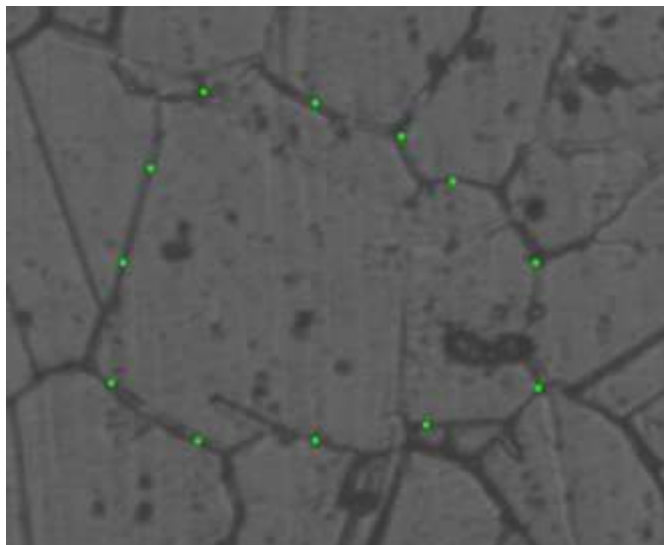
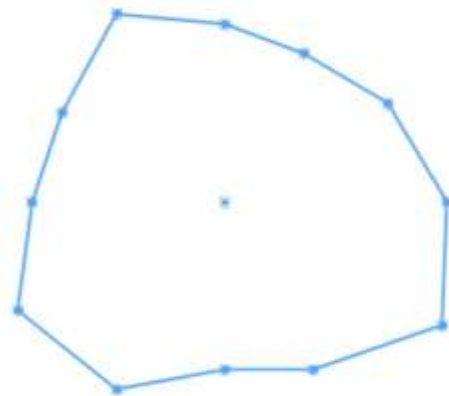


Рисунок 51. Начало координат и положение относительно него точек на контуре шлифа



а



б

Рисунок 52. Сечение зерна (а) и его контур в виде эскиза в SolidWorks (б)

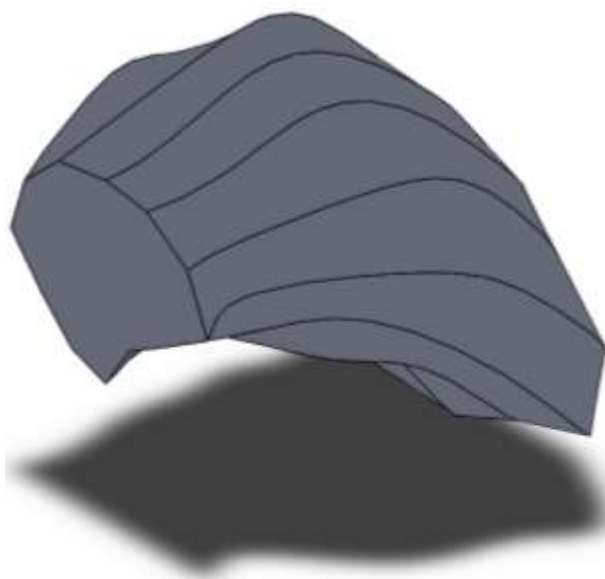


Рисунок 53. Модель зерна в области на расстоянии 5 мм от поверхности заготовки после трёхвалковой винтовой прокатки

Используя методику построения, изложенную в предыдущем разделе, создали модель зерна заготовки до прокатки. Исследуемая область располагалась на расстоянии 6 мм от поверхности заготовки. Сделали два первичных шлифа во взаимноперпендикулярных плоскостях. Оценка максимального размера зерна в плоскости шлифа, перпендикулярного оси прокатки, составила 250 мкм, а в плоскости, параллельной оси прокатки – 270 мкм. Для построения модели зерна сделали 25 шлифов на длине 270 мкм в плоскостях, перпендикулярных

оси прокатки. Одно зерно имело сечения на всех шлифах. Из 25 шлифов выбрали 6 для построения модели зерна, так как этих шлифов было достаточно для отображения тенденций изменения размера сечения зерна (увеличения и уменьшения). Полученная модель представлена на рис. 54.

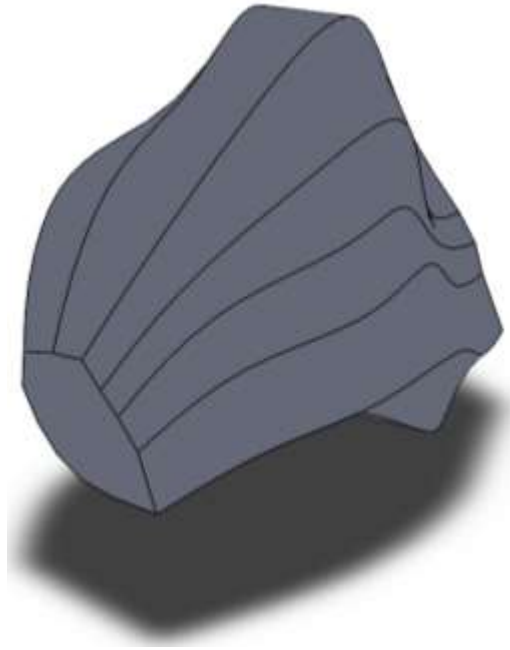
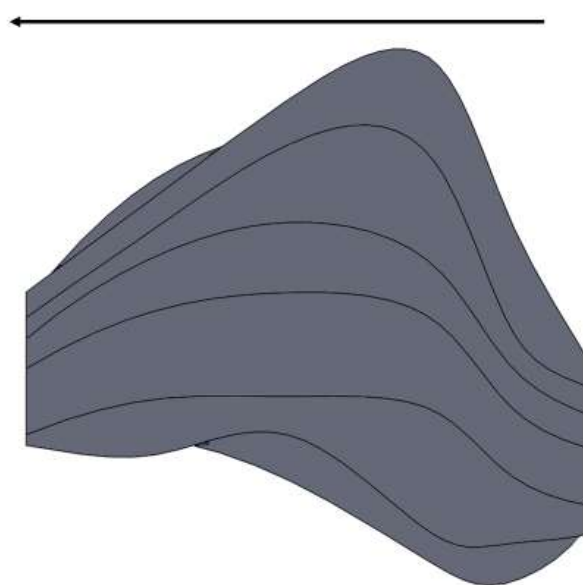


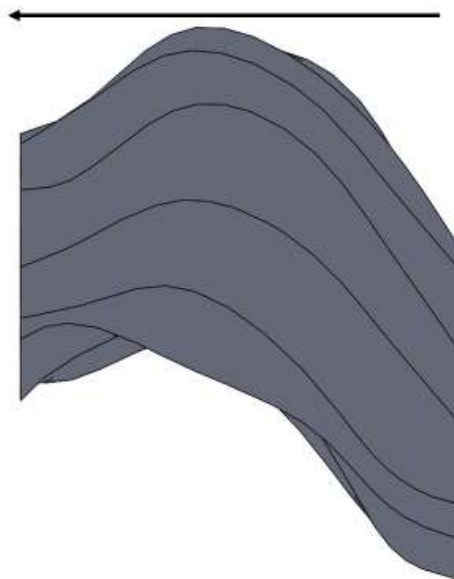
Рисунок 54. Модель зерна в области на расстоянии 6 мм от поверхности заготовки до трёхвалковой винтовой прокатки

Для оценки влияния трёхвалковой винтовой прокатки на форму и размеры зерна с помощью инструментария SolidWorks создали три вида для каждой из моделей: сбоку, спереди и сверху (рис. 55).



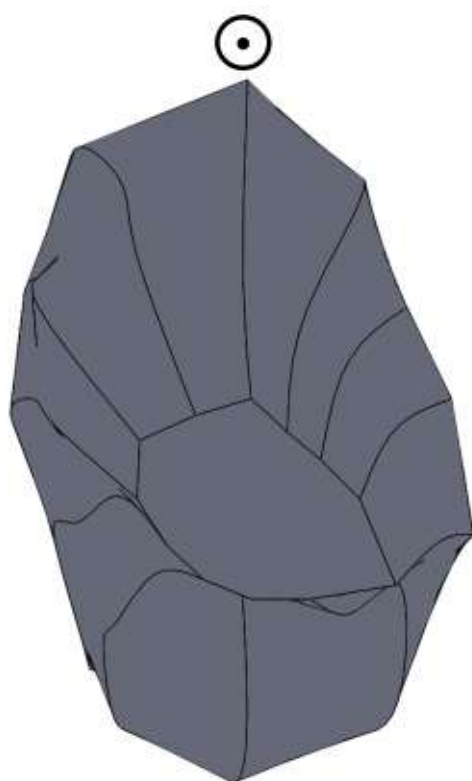
100 MKM

a



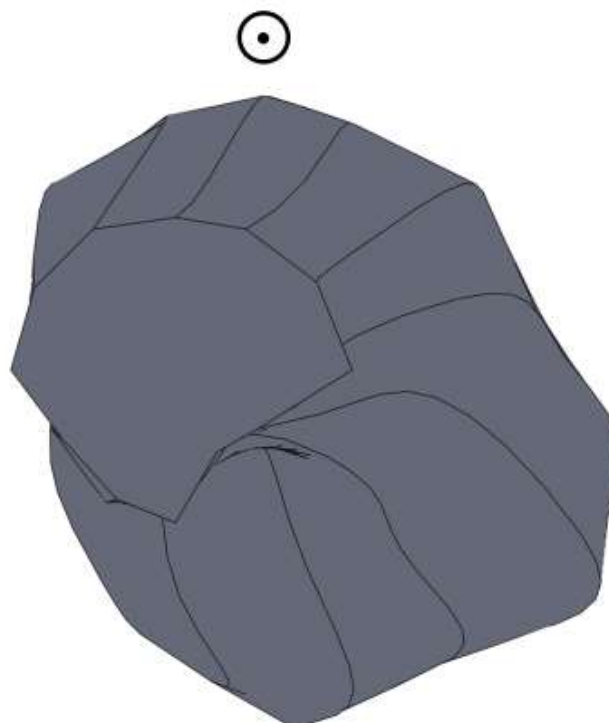
100 MKM

б



100 MKM

в



100 MKM

г

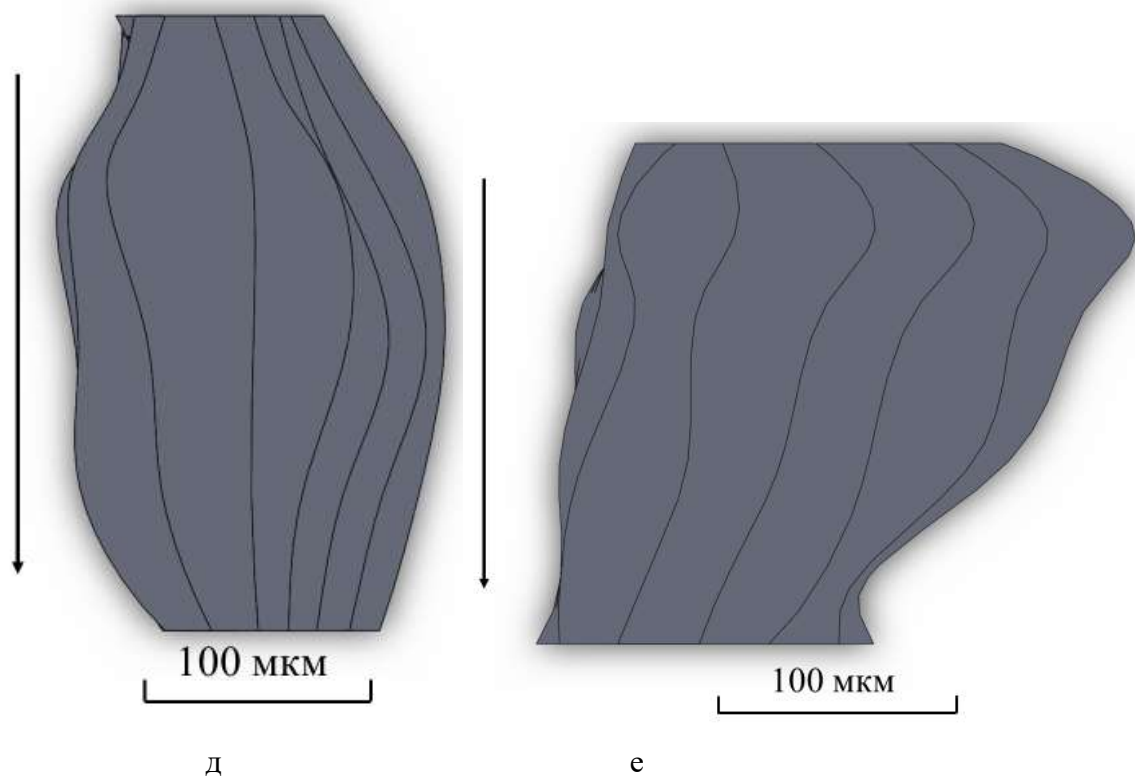


Рисунок 55. Виды сбоку (а), спереди (в) и сверху (д) трёхмерной модели зерна до прокатки и виды сбоку (б), спереди (г) и сверху (е) трёхмерной модели зерна после прокатки (стрелками показано направление прокатки)

Представленные на рис. 53-55 модели зерна позволяют заключить, что в приповерхностной области заготовки после трёхвалковой винтовой прокатки происходит «скручивание» зерна, есть изменение формы как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Модель зерна заготовки перед трёхвалковой винтовой прокаткой чётко вытянута в одном направлении, это связано с тем, что исходная заготовка была получена продольной прокаткой. Полученные модели зерна позволяют также оценить анизотропию размера зерна. Согласно измерениям, проведённым для каждой из моделей с помощью инструментария SolidWorks (длину делили на толщину зерна), коэффициент анизотропии размера зерна для исходной заготовки составляет 1,19, для прокатанной – 0,95. По данным рис. 42 получили оценку значений коэффициента анизотропии размера зерна для исходной и прокатанной заготовки, которые составили 1,25 и 0,97 соответственно.

Для дальнейшей качественной и количественной оценок полученных моделей создали линии, соединяющие центры сечений, использованных при создании модели. Центр каждого

сечения определяли как точку, которая являлась центром описанного вокруг сечения зерна прямоугольника (рис. 49). Для получения линии, соединяющей центры сечений создали в SolidWorks трёхмерный эскиз, в котором с помощью инструментария SolidWorks через центр сечений провели сплайн. Положение сплайна относительно модели и три вида сплайна для каждой из моделей зерна представлены на рис. 56-57.

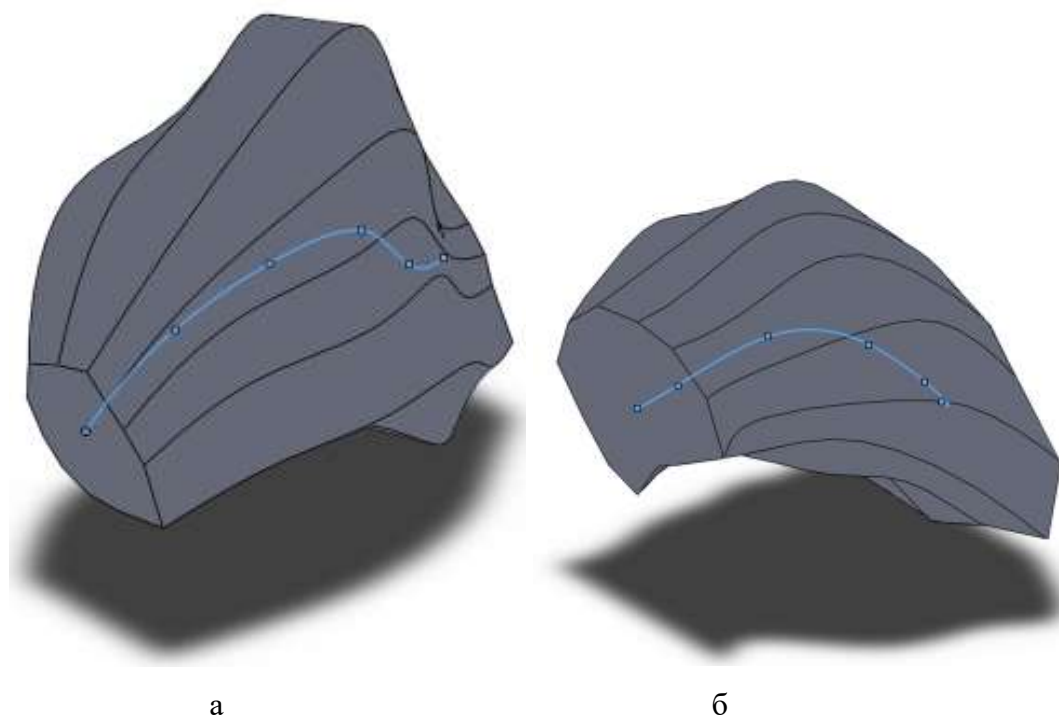
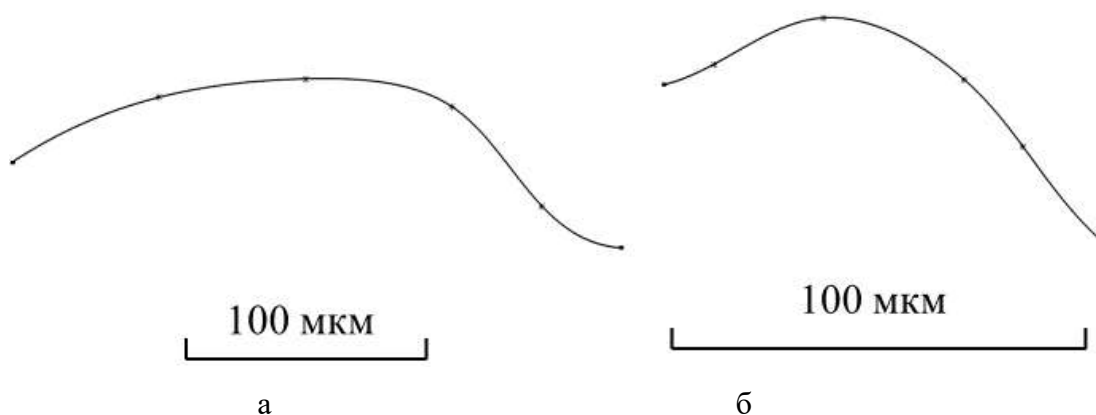


Рисунок 56. Сплайны, проходящие через центр моделей зерна до прокатки (а) и после (б)



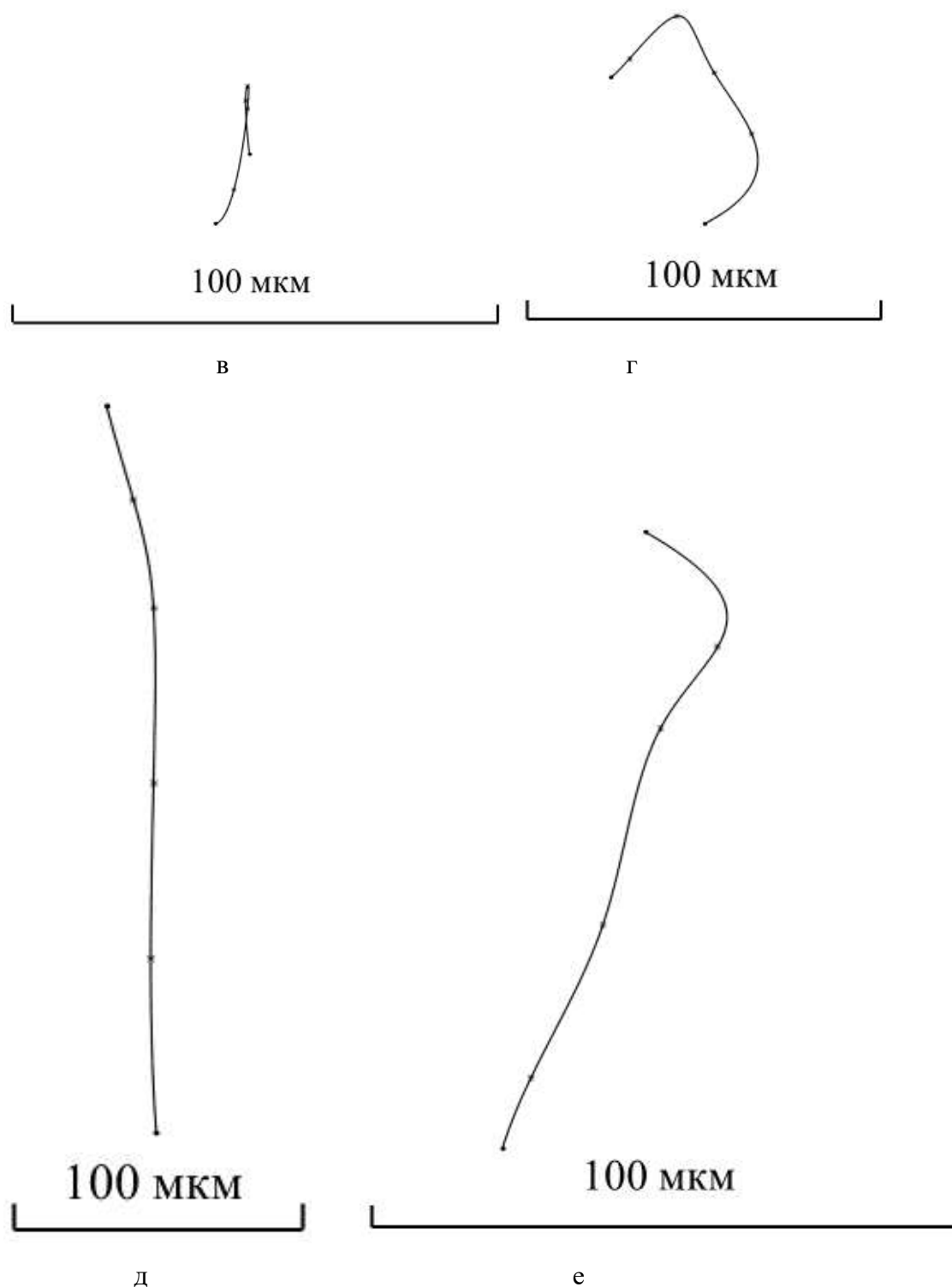


Рисунок 57. Сплайн, проходящий через центры сечений модели зерна до прокатки (а,в,д),и сплайн, проходящий через центры сечений модели зерна после прокатки (б,г,е): вид спереди (а,б), вид сбоку (в,г), вид сверху (д,е).

Данные рис. 56-57 позволяют визуально определить несколько изменений: наибольшие расстояния между центрами сечений по ширине, высоте и длине для модели зерна до прокатки отличаются от аналогичных расстояний для модели зерна после прокатки. Количественно сравнили наибольшие расстояния между центрами сечений по ширине, высоте и длине для моделей зерна до и после прокатки (табл. 3). Наибольшее расстояние между центрами сечений по ширине после прокатки увеличилось в 2,14 раза. Аналогичное расстояние по высоте уменьшается в 1,3 раза после прокатки. Такое же расстояние, но по длине, уменьшилось в 2,4 раза. Вид сплайна на рис. 58г показывает, что центр сечений зёрен смещается и описывает контур близкий к полукругу. Анализируя вид сплайна на рис. 58г и рис. 58е, можно заметить, что половина сплайна подобна виду винтовой линии. Указанные отличия и виды моделей и сплайнов наглядно иллюстрируют тезис о «закручивании» структуры и геликоидальности характера истечения материала при трёхвалковой винтовой прокатке.

Таблица 3. Наибольшие расстояния между центрами сечений моделей зерна до и после трёхвалковой винтовой прокатки.

	Наибольшее расстояние между центрами сечений, мкм		
	По ширине	По высоте	По длине
Модель зерна до прокатки	18,45	74,83	270
Модель зерна после прокатки	39,5	57,9	113

На виде сверху модели зерна после прокатки (рис. 55е) видна четкая ориентация зерна под некоторым углом к направлению прокатки. Используя сплайн для этого зерна, на виде сплайна сверху оценили угол, под которым зерно ориентировано к направлению прокатки (рис. 58).

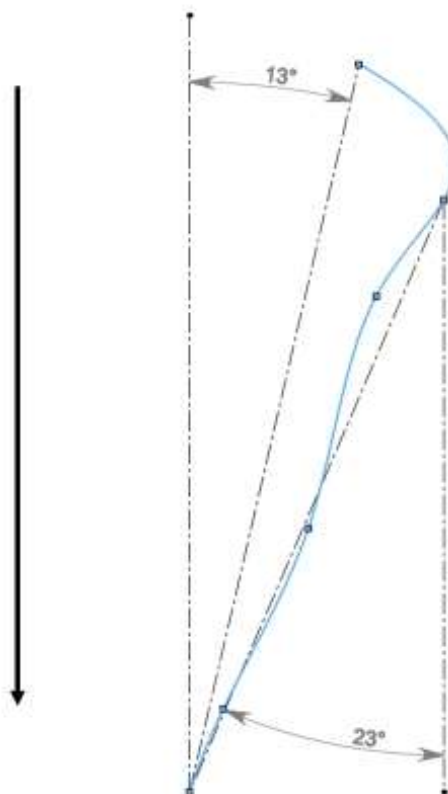


Рисунок 58. К оценке угла ориентировки зерна относительно направления прокатки (показано стрелкой)

Согласно рис. 58, оценка угла ориентировки длинной оси зерна относительно направления прокатки лежит в интервале $13-23^\circ$. При прокатке заготовки в трёхвалковом стане угол подачи составлял 18° . Стоит отметить, что согласно рис. 43 строчечная структура в продольном сечении была ориентирована под углом $15-17$ градусов к оси заготовки. Следовательно, полученная модель зерна позволяет заключить, что и зерна при прокатке ориентируются под углом, близким к углу подачи.

2.3. Моделирование кинематического состояния при радиально-сдвиговой прокатке и оценка его влияния на формирование микроструктуры заготовок

К процессам радиально-сдвиговой прокатки (РСП) относят процессы винтовой прокатки с повышенными ($18-20$ градусов и более) углами подачи валков [6,13]. Наибольшее

распространение получил траекторной управляемый вариант радиально-сдвиговой прокатки [6, 62].

Метод позволяет прокатывать практически все деформируемые сплавы с интенсивным измельчением структурного строения и комплексным повышением свойств. Эта возможность обусловлена уникальными кинематическими условиями геликоидального истечения металла. В очаге деформации на стационарной основе образуются две характерные зоны с разнонаправленным изменением скорости течения металла. Периферийные слои заготовки замедляются в процессе обжатия, а центральные ускоряются. Между ними имеется нейтральный слой скорость которого остается практически постоянной. В результате активизируются интенсивные макро- и микро сдвиговые деформации, образуется градиентная структура с мелкодисперсным внешним слоем и более крупнозернистым центральным. Эта кинематическая закономерность впервые выявлена и аналитически описана в работах [6, 62]. Способ винтовой прокатки на основе описанного скоростного эффекта запатентован и успешно применяется в различных задачах деформационной обработки и получения структурированного состояния металлов и сплавов в длинномерных объемах. С описанным кинематическим состоянием прямо связаны основные деформационные и технологические возможности РСП, подобно тому, как процесс прошивки в двухвалковом стане винтовой прокатки основан на разрыхляющем эффекте Маннесманна в осевой зоне заготовки.

Среди исследований, связанных с радиально-сдвиговой прокаткой чаще всего встречаются публикации, связанные с формированием в круглом прокате структуры и свойств различных материалов: титана и его сплавов [47-49,51,57], меди и сплавов на её основе [157], магниевых сплавов [18,58,64], алюминия и сплавов на его основе [146], а также сталей различного химического состава и назначения [67-69,74]. Для оценки распределения параметров напряжённо-деформированного состояния и температуры в объёме прокатываемой заготовки при РСП применяют компьютерное моделирование, в том числе, конечно-элементное [143,144,154]. Ряд исследований посвящен совместному использованию конечно-элементного компьютерного моделирования и экспериментальной оценки с различными целями: прогнозирование возможного разрушения при РСП [157,158], особенностей распределения параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) на неустановившейся и установившейся стадиях РСП [157,158], исследованию формирования микроструктуры и свойств заготовки [46], оценке распределения параметров НДС в очаге деформации при РСП [146]. Отмечают [21], что необходимы дальнейшие исследования процессов трёхвалковой винтовой прокатки, так как до конца особенности напряжённо-

деформированного состояния заготовки и их влияние на формирование микроструктуры не выявлены. При этом эффективным для исследования процессов трёхвалковой винтовой прокатки является совместное использование компьютерного моделирования и экспериментов. В данном разделе являлась осуществлялось моделирование кинематических условий радиально-сдвиговой прокатки в среде QForm с последующим металлографическим анализом структуры прутков титанового сплава ВТ-6, прокатанных на стане МИСиС-100Т.

Для проведения компьютерного моделирования создали модели валков и заготовки в SolidWorks, а затем - из них сборку, сохранили в формате .step и загрузили в редактор геометрии QShape. В редакторе создали сетку конечных элементов для каждого объекта сборки, задали оси вращения валков. После этого сборку загрузили в QForm, задали начальные и граничные условия. Для заготовки использовали граничные условия «толкатель» и «вращение» (рис. 59). Для пары «заготовка-валок» задавали фактор трения постоянным и равным 5, закон трения – «Зибель». Скорость вращения валков задали равной 9.42 радиана в секунду. Материал заготовки - ВТ6, сопротивление деформации задавали таблично при различных степенях деформации, скорости деформации и температуре. После этого в QForm, используя табличные данные, с помощью интерполяции получали графические зависимости сопротивления деформации от степени деформации (рис. 60) при различных температурах (750, 800, 900, 1000, 1100°C) и скоростях деформации (0.01, 0.1, 1, 10, 50, 100 с⁻¹). Про моделировали прокатку по режиму $\varnothing 76 \rightarrow \varnothing 65 \rightarrow \varnothing 55 \rightarrow \varnothing 48$ мм.

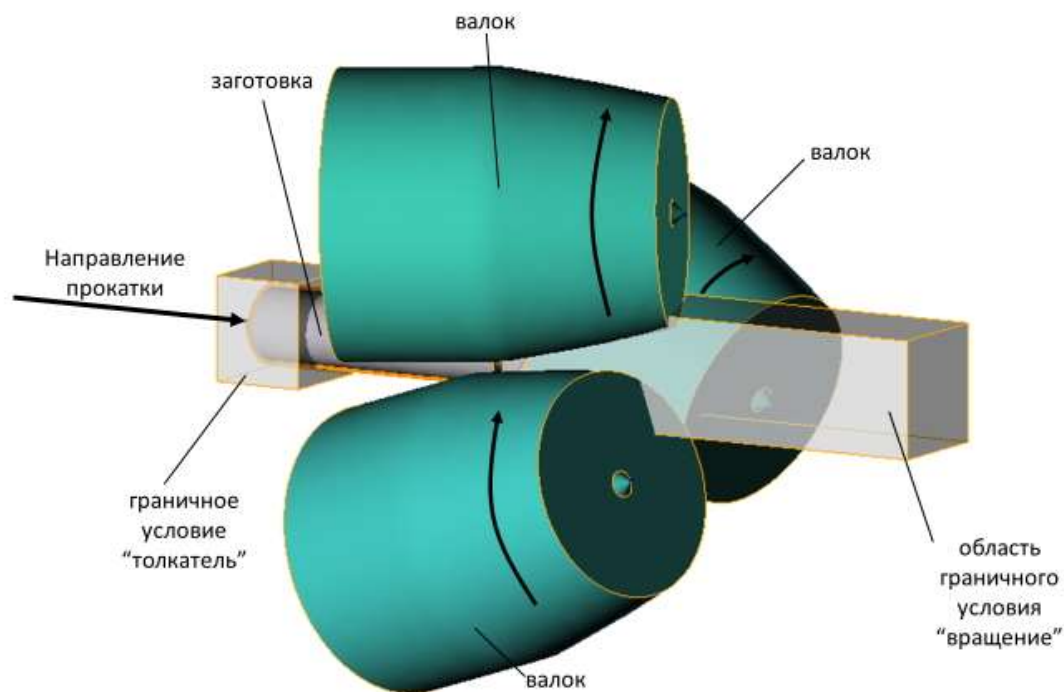


Рисунок 59. Модель в QForm для расчёта процесса формоизменения заготовки при трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатке в стане МИСиС-100Т (стрелками показаны направления вращения валков)

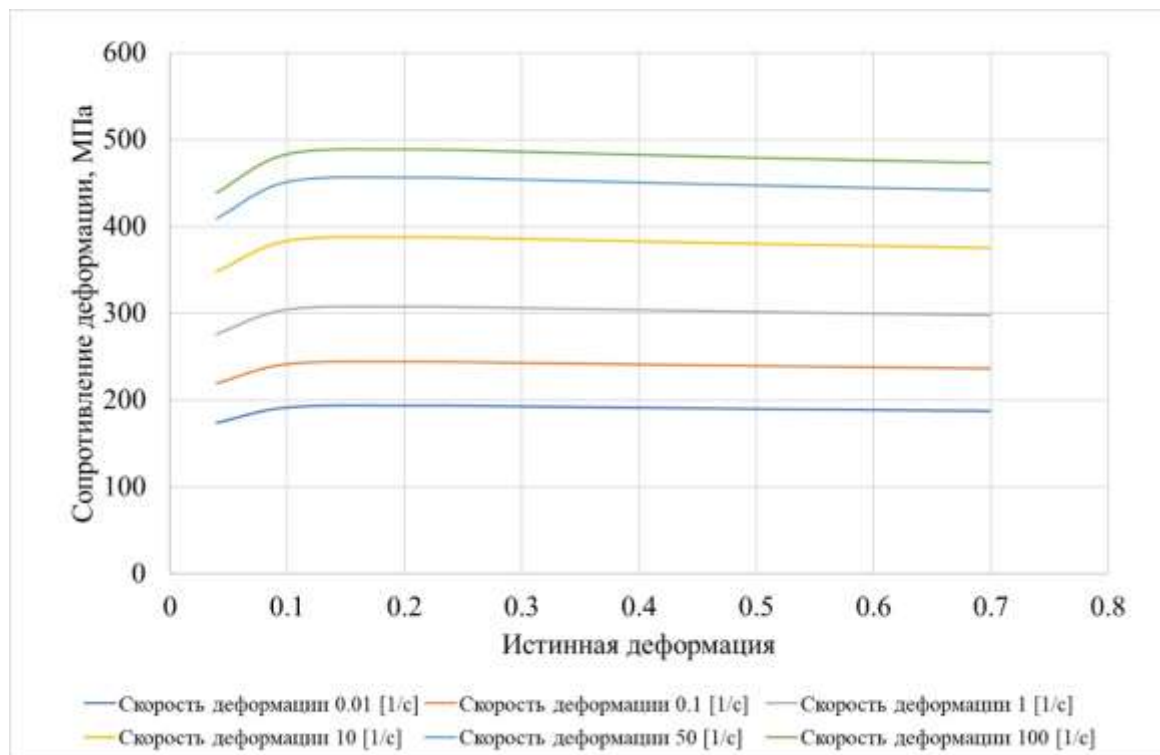


Рисунок 60. Сопротивление деформации сплава ВТ6 при температуре 900°C при различных скоростях деформации

По окончании компьютерного моделирования на стационарной стадии прокатки в поперечном сечении конечной заготовки Ø48 мм на радиусе выбрали семь точек с равным шагом 4 мм. При этом одна точка находилась в центре заготовки и одна – на поверхности (рис. 61). В выбранных точках рассчитали значения накопленной деформации и полной скорости.

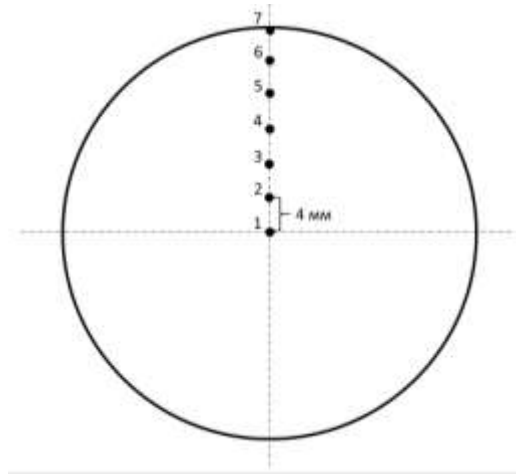


Рисунок 61. Расположение точек по радиусу заготовки в поперечном сечении на установившейся стадии (для которых проводили трассировку в QForm)

Радиально-сдвиговую прокатку заготовок из титанового сплава ВТ6 осуществляли в трёхвалковом стане МИСИС-100Т в три прохода по режиму $\varnothing 76 \rightarrow \varnothing 65 \rightarrow \varnothing 55 \rightarrow \varnothing 48$ мм. При прокатке угол подачи валков составлял 20 градусов, угол раскатки – 10 градусов. Перед прокаткой заготовки нагревали до температуры 940-950°C в течение одного часа. Между проходами заготовку подогревали до температуры прокатки в течение 5-10 минут. Валки вращались со скоростью 9.42 радиан в секунду (или 90 оборотов в минуту). По окончании прокатки заготовка охлаждалась на воздухе. С целью оценки микроструктуры из середины заготовки $\varnothing 48$ мм (по длине) после прокатки вырезали полукруглый образец, затем в поперечном сечении подготовили шлиф для исследования микроструктуры. Микроструктуру образца из титанового сплава ВТ6 в поперечном сечении изучали на оптическом микроскопе Micromet 5101 Buehler при увеличениях $\times 100$ и $\times 500$. Схема расположения полей зрения при металлографическом анализе поперечного шлифа представлена на рис. 62.

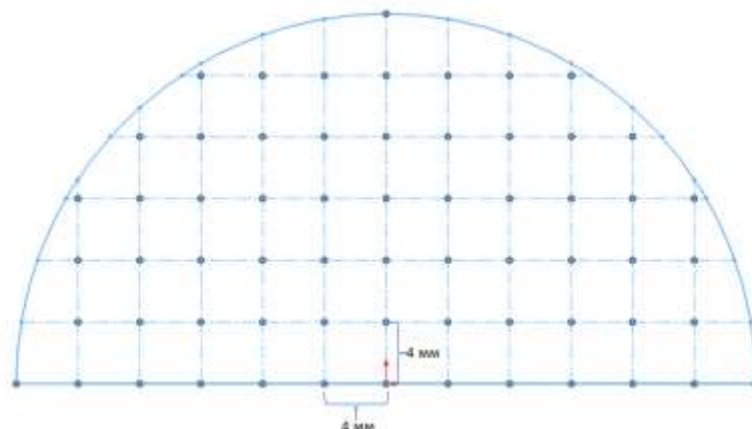


Рисунок 62. Схема расположения полей зрения при металлографическом анализе поперечного шлифа

Поверхность шлифов травили в реактиве следующего состава: 30 мл H₂O + 30 мл HNO₃ + 30 мл H₂SO₄ + 10 мл HF. Химический состав сплава заготовки представлен в табл. 4.

Таблица 4. Химический состав сплава ВТ6 в вес. %.

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
до 0.6	до 0.1	до 0.1	3.5 - 5.3	до 0.05	86.45 - 90.9	5.3 - 6.8	до 0.3	до 0.2	до 0.015	прочих 0.3

По результатам компьютерного моделирования определили, как изменяется скорость в исследуемых точках во времени (рис. 63). В каждом из проходов при прохождении точками пережима, полная скорость точек вблизи поверхности (точек 5,6,7) уменьшалась, вблизи центра (точки 1,2,3) – увеличивалась, например, как и в третьем проходе (рис. 63).

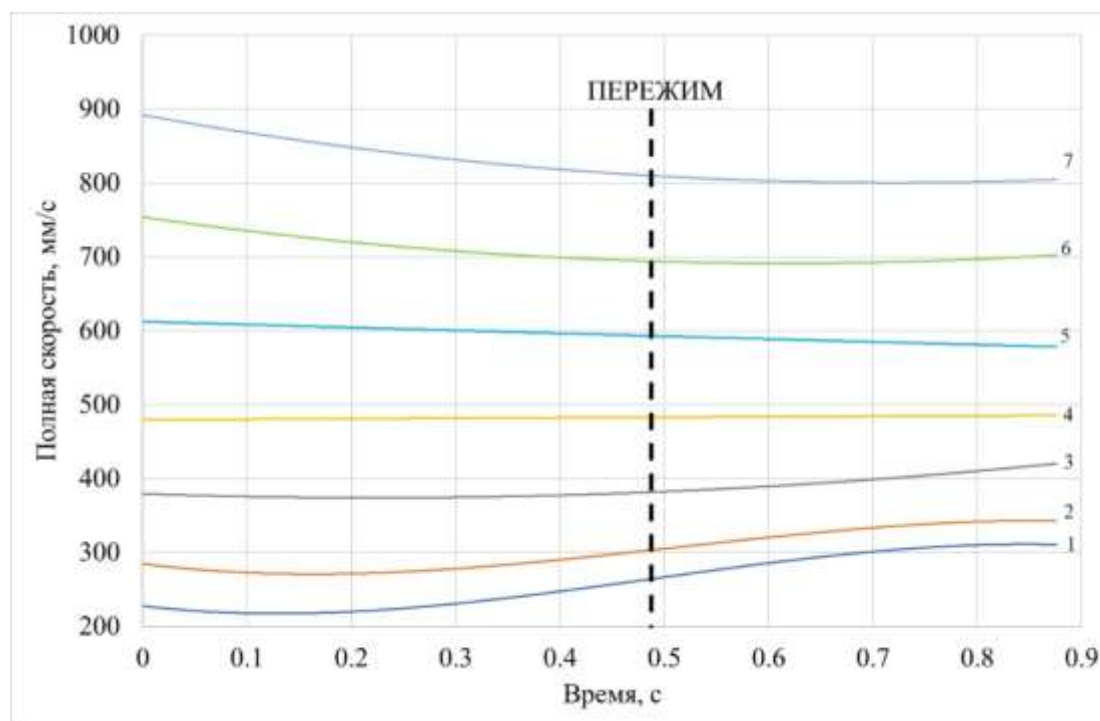
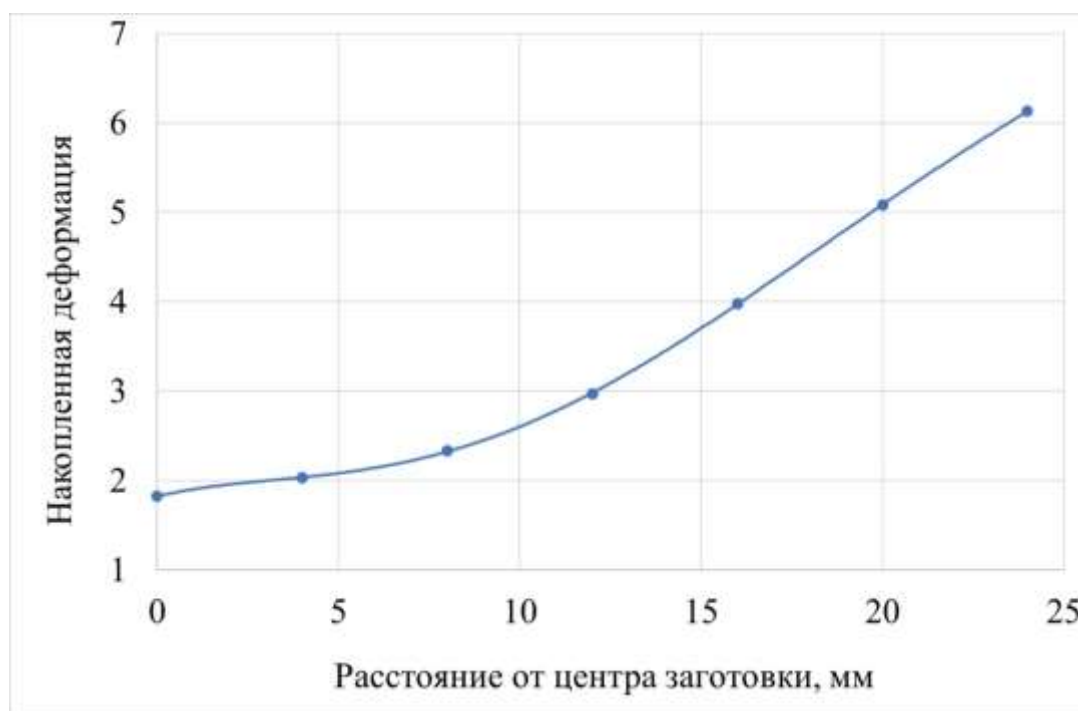


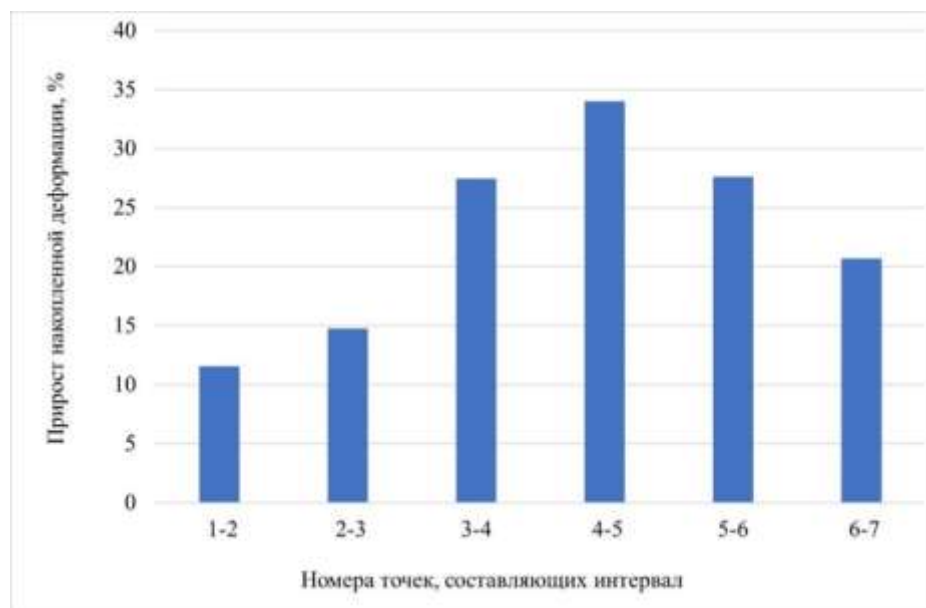
Рисунок 63. Изменение скорости трассируемых точек в третьем проходе при прохождении пережима

Можно предположить (рис. 63), что заготовка может быть поделена на две области: область с понижением полной скорости (периферийная область заготовки) и повышением полной скорости (центральная область заготовки). При этом смена тенденции в изменении полной скорости во всех проходах происходила между точками 3 и 5. То есть между этими точками можно предположить наличие некоторой цилиндрической нейтральной прослойки [62] с нейтральной цилиндрической поверхностью в заготовке. Наружный и внутренний радиусы этой прослойки, исходя из конечного положения точек, лежат в пределах от 8 мм (расстояние от центра прокатанной заготовки до точки 3 (рис. 61), до 16 мм (расстояние от центра прокатанной заготовки до точки 5).

По результатам компьютерного моделирования оценили и показали точечной диаграммой, как изменяется значение накопленной деформации в исследуемых точках, и затем построили линию тренда, иллюстрирующую изменение накопленной деформации вдоль радиуса заготовки (рис. 64а). Также оценили относительный прирост накопленной деформации в процентах между соседними трассируемыми точками (рис. 64б).



а



б

Рисунок 64. Изменение накопленной деформации по радиусу прокатанной заготовки Ø48 мм (а) и прирост накопленной деформации в интервалах между трассируемыми точками (б) по результатам моделирования после всех проходов

На рис. 6а видно, что в центральных слоях значение накопленной деформации в 3 раза меньше, чем вблизи поверхности. Следовательно, вблизи поверхности заготовки структура должна характеризоваться меньшим размером зерна, чем в центре. В исследованиях, связанных с оценкой микроструктуры после трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатки, отмечают, что после прокатки в заготовке можно выделить две зоны: периферийную с мелкозернистой структурой, и центральную, с более крупным зерном [62]. На рис. 64б видно, что сначала идёт увеличение относительного прироста накопленной деформации, а затем уменьшение, то есть, как и в случае с изменением полной скорости, одна тенденция сменяет другую. В случае с приростом накопленной деформации, его увеличение заканчивается между точками 4 и 5, то есть в интервале 12-16 мм от центра заготовки.

Наличие периферийной и осевой зоны с разным размером зерна предполагает, что, статистически, распределение размера зерна в поперечном сечении заготовки должно формироваться из двух распределений, одно из них соответствует периферийной зоне, второе – осевой. При этом на гистограмме должно выявляться два выраженных максимума (пика).

По результатам исследований оценили микроструктуру сплава в поперечном сечении заготовки Ø48 мм (рис.65).

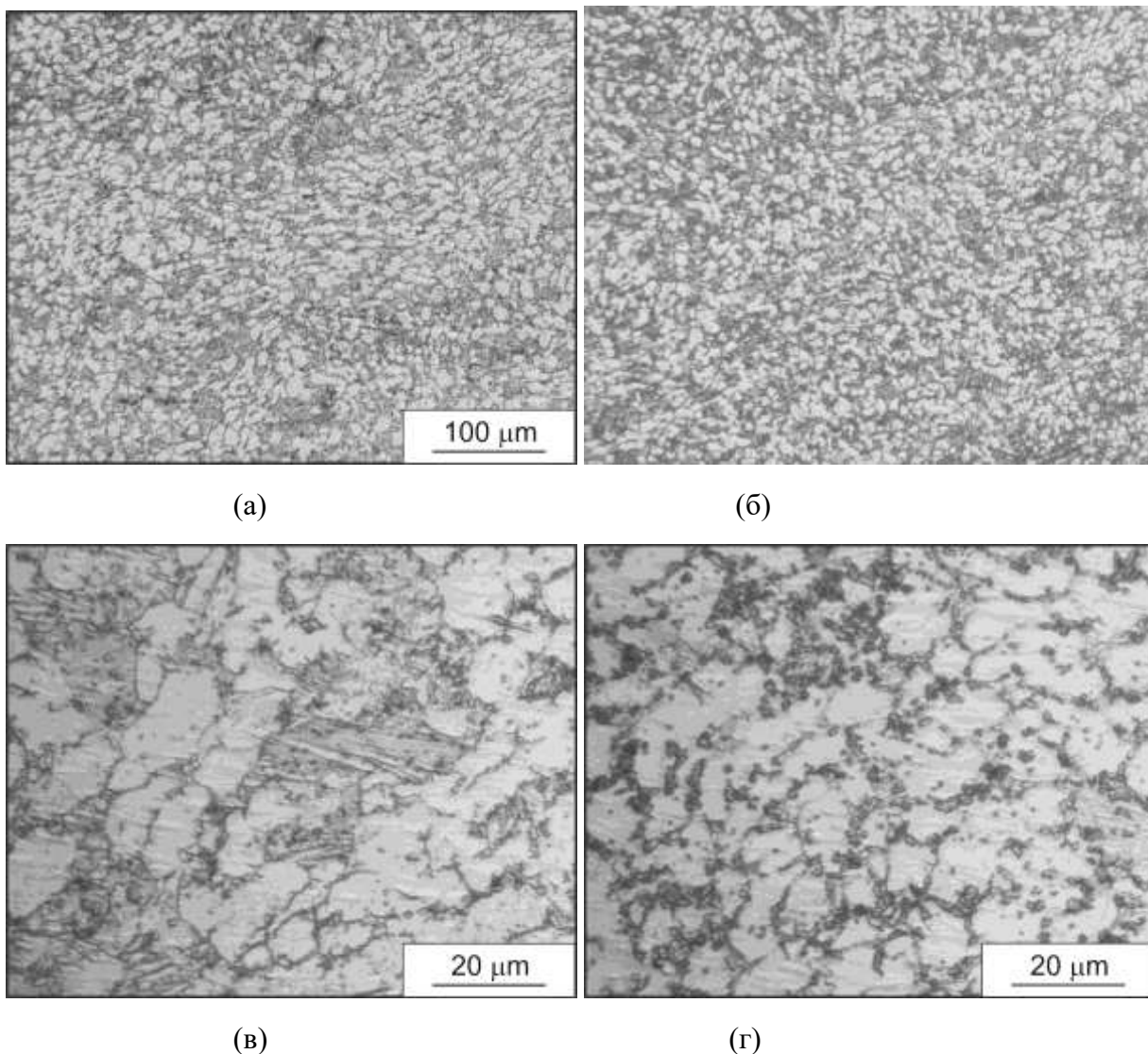
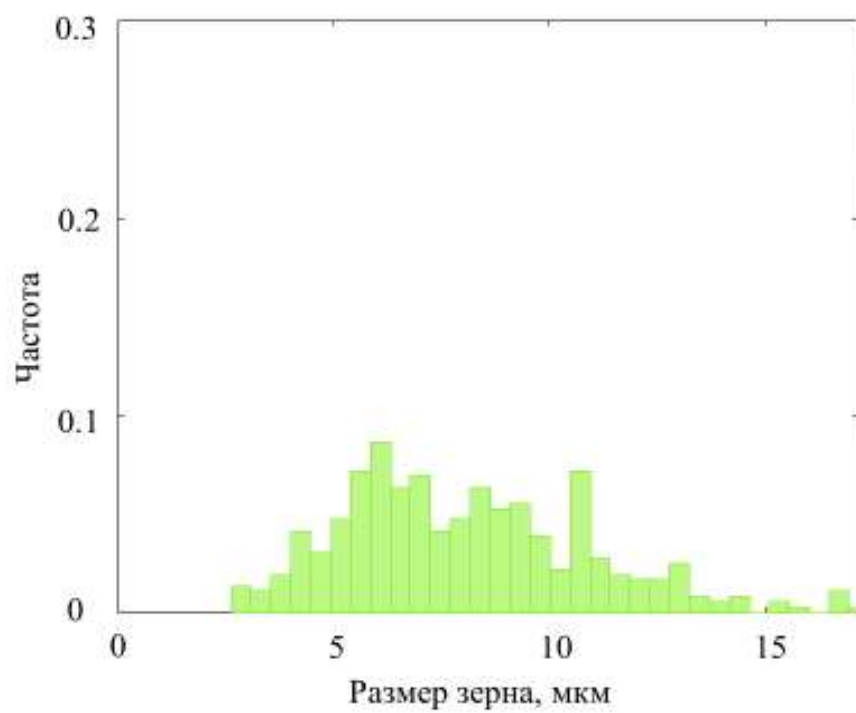
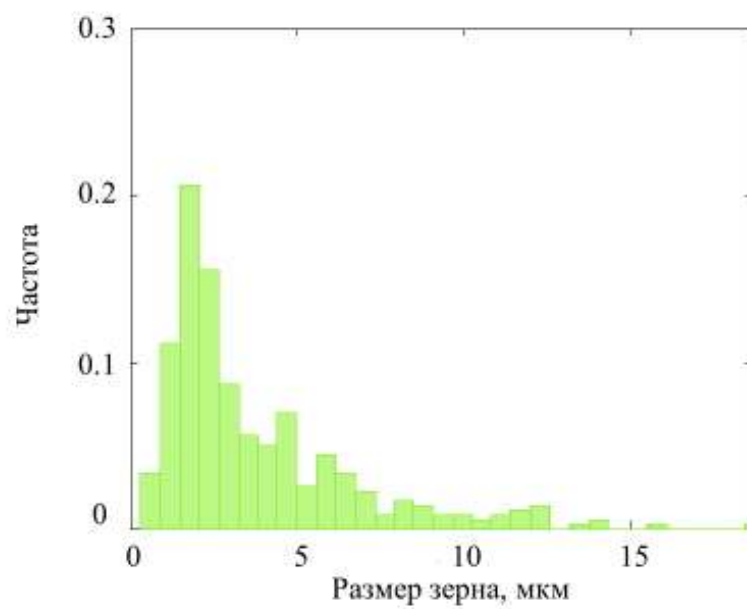


Рисунок 65. Структура образца сплава ВТ6 в поперечном сечении а, в – центр заготовки; б, г – вблизи поверхности

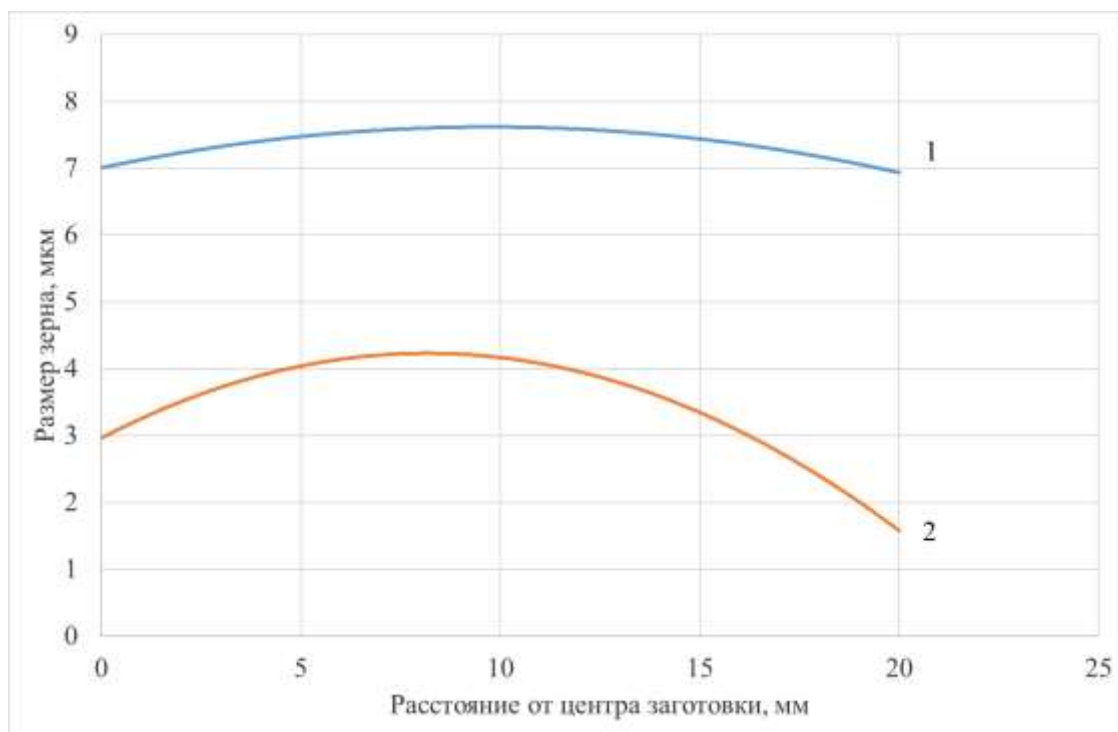
Согласно рис. 65 наблюдается двухфазная структура – светлые зерна α -фазы и пластинчатая β -фаза между ними. Размер зерна β -фазы в центре заготовки до 5 раз больше, чем вблизи поверхности, что согласуется с изложенным выше о двух слоях заготовки с мелкозернистой структурой вблизи поверхности и более крупной в центре. Размер зерна α -фазы также немного больше в центре заготовки, чем вблизи поверхности. Структура (рис. 65) соответствует ГОСТ 26492-85 Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия. По результатам исследований микроструктуры (часть фото микроструктуры в Приложении б) построили гистограммы распределения размера зерна α -фазы и β -фазы по всему сечению прутка $\varnothing 48$ мм (рис. 66). На рис. 66 также показано изменение размера зерна по радиусу заготовки до и после прокатки.



а



б



в

Рисунок 66. Гистограмма распределения размера зерна заготовки после прокатки: распределение размера зерна α -фазы (а) и β -фазы (б), а также изменение размера зерна по радиусу заготовки (в) до (1) и после (2) прокатки

При построении гистограмм выбирали различное число интервалов (от 10 и более). При этом на гистограммах наблюдали два ярко выраженных максимума: один, или несколько максимумов с частотами 0.05 и менее (как у гистограмм на рис. 66), либо на гистограмме было всего два максимума с частотами 0.1 и более. Наблюдаемое количество ярко выраженных на гистограммах столбцов-максимумов подтверждает сделанное выше предположение о том, что распределение размера зерна формируется из двух распределений.

Используя данные гистограмм рис. 8 предложили способ определения границ, внутри которых расположена нейтральная поверхность, пределы изменения радиуса которой оценили на основе компьютерного моделирования по данным рис. 63 и рис. 64б. 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. 67). 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 (рис. 67). По значениям долей можно найти, используя формулу площади круга, значения радиусов R_1 и R_2 , соответствующие границам крупнозернистой и мелкозернистой структур (рис. 67). 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 (рис. 66б) лежит в пределах 8.4-19.5 мм.

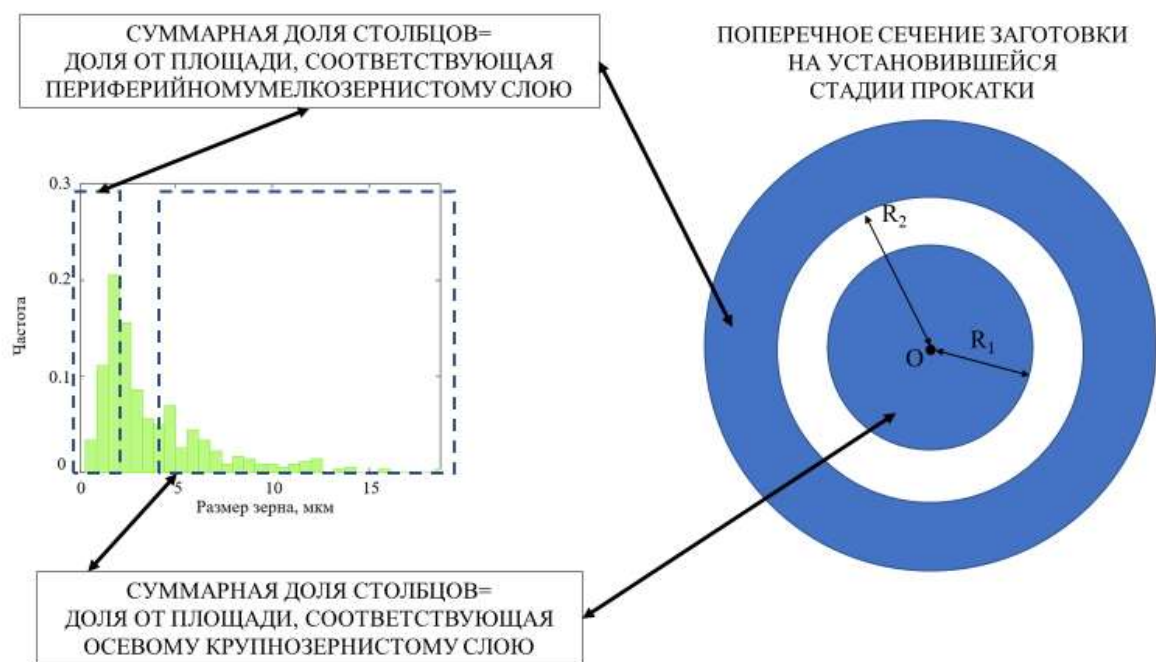


Рисунок 67. Определение границ области, в которой расположена нейтральная цилиндрическая прослойка, на основе данных гистограммы распределения размера зерна β -фазы (О-центр окружности, являющейся поперечным сечением заготовки на установившейся стадии прокатки)

По методике, проиллюстрированной на рис.67, рассчитали пределы, в которых лежит значение радиуса нейтральной цилиндрической поверхности, используя данные гистограммы распределения размера зерна α -фазы (рис. 66а). Интервал получился 11.3 мм – 19.7 мм. Сравнили интервалы, в которых находится значение радиуса нейтральной цилиндрической поверхности (рис. 68), рассчитанные на основе анализа результатов компьютерного

моделирования, а, именно, изменения значений полной скорости трассируемых точек (рис. 63) и прироста накопленной деформации (рис. 64б), а также исследования микроструктуры: анализа результатов гистограмм распределения размера зерна α -фазы (рис. 66а) и β -фазы (рис. 66б).

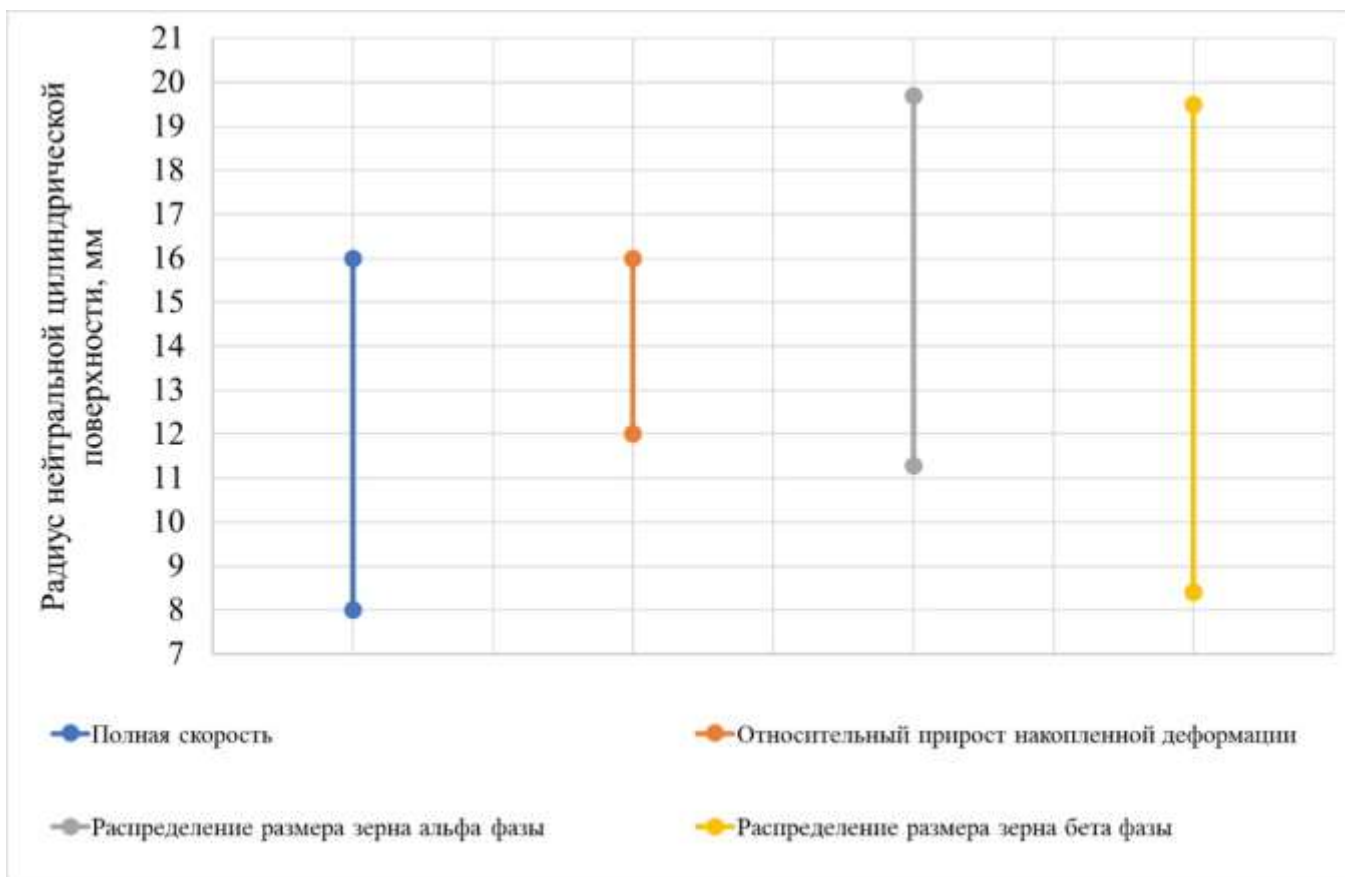


Рисунок 68. Интервалы, в пределах которых лежит значение радиуса нейтральной поверхности, определённые с помощью компьютерного моделирования и опытных прокаток

Объединяя данные по всем интервалам, получили пределы 8-19.7 мм. Сравнивая результаты компьютерного моделирования и опытных прокаток, 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 почти полностью находится внутри соответствующего интервала, определённого на основе анализа гистограммы распределения размера зерна β -фазы и на 60% в интервале, определённом 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.

2.4 Выводы по Главе 2

1. На основании экспериментальных исследований зёрненной структуры и распределения твёрдости по длине и поперечному сечению круглых заготовок из аустенитной стали 12X18H10T после горячей винтовой прокатки в двух- и трёхвалковом станах выявлены особенности структурных процессов на нестационарной и стационарной стадиях прокатки.

2. Стационарная горячая винтовая прокатка аустенитных сталей по обеим схемам при обычных температурах и с небольшой вытяжкой (не более 14%) ведёт к существенному измельчению и повышению однородности исходной неоднородной зёрненной структуры по всему поперечному сечению проката.

3. Сложный, неоднородный процесс деформации на нестационарной стадии горячей винтовой прокатки обуславливает сильную, особенно при двухвалковой схеме прокатке, разнотекучесть и непрогнозируемую неоднородность свойств приторцовых зон металлопроката, снижая выход годного.

4. Различия в зёрненной структуре и, следовательно, в свойствах, включая их анизотропию и характер распределения по сечению проката для разных схем винтовой прокатки сохраняются и на стационарной стадии, по крайней мере в сплошных заготовках, получаемых при не слишком высоких степенях деформации и неполном протекании динамической рекристаллизации.

6. На основе компьютерного моделирования и экспериментальной оценки показана взаимосвязь между характером изменения размера зерна и интенсивностью деформации при двухвалковой и трёхвалковой прокатке: коэффициенты корреляции, составили -0,80 для двухвалковой и -0,89 для трёхвалковой прокатки, соответственно, и подтверждают обратную корреляционную зависимость.

7. Экспериментально подтверждена гипотеза о том, что на нестационарной стадии поле распределения значений интенсивности деформации при двухвалковой прокатке имеет W-образный характер, а при трёхвалковой – U-образный.

8. По результатам компьютерного моделирования установлено, что для интенсивности деформации на стационарной стадии при двухвалковой прокатке, по сравнению с

нестационарной стадией, разброс значений уменьшается до 12 раз, при трёхвалковой прокатке – до 2,5 раз, что может являться вероятной причиной выявленного уменьшения разброса значений твёрдости и среднего размера зёрен на стационарной стадии винтовой прокатки относительно нестационарной стадии.

9. 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. Разработанная методика может быть использована для построения моделей зерна для других процессов ОМД, а также для оценки влияния термообработки на структуру материала, например, изучения процессов рекристаллизации и роста зерна. Безусловно, что для создания модели преобразования зёрненной структуры деформируемого поликристаллического объекта должно учитываться взаимодействие между разными зёрнами, совместность деформации ансамбля зёрен для сохранения сплошности материала.

10. По результатам конечно-элементного компьютерного моделирования трёхвалковой РСР в поперечном сечении конечной заготовки Ø48 мм из сплава ВТ6 на установившейся стадии зафиксировано две области: внешняя область, в которой скорость движения деформируемого металла уменьшается, и центральная область, в которой скорость деформируемого металла увеличивается. При этом радиус нейтральной прослойки, разделяющей эти области, лежит в пределах 8-16 мм, т.е. в интервале 0,33-0,67 от радиуса прокатанной заготовки.

11. По результатам конечно-элементного компьютерного моделирования в поперечном сечении заготовки на установившейся стадии вдоль радиуса заготовки относительный прирост накопленной деформации сначала монотонно увеличивается, а затем – монотонно уменьшается. Радиусы нейтральной цилиндрической прослойки, разделяющей область с монотонным ростом относительного прироста накопленной деформации от зоны с

монотонным убыванием относительного прироста накопленной деформации, находится в пределах 12-16 мм, т.е. 0,5-0,67 мм от радиуса прокатанной заготовки.

12. По результатам исследований микроструктуры распределение зерна по размерам в поперечном сечении конечной заготовки формируется наложением не менее двух однородных распределений: внешнего мелкозернистого слоя и осевого слоя с более крупным размером зерна. Оценка радиуса нейтральной цилиндрической поверхности внутри нейтральной прослойки, разделяющей эти два слоя даёт более широкие пределы величин: 11.3-19.7 при исследовании α -фазы и 8.4-19.5 мм при исследовании β -фазы и более плавный переход между слоями.

13. Совместное использование компьютерного моделирования и экспериментальной оценки микроструктуры позволило продемонстрировать, что формирование микроструктуры при трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатке обусловлено сложным кинематическим состоянием и немонотонным изменением скоростных и деформационных параметров по сечению заготовки в ходе процесса. Варьированием деформационных и скоростных условий процесса радиально-сдвиговой прокатки можно регулировать размеры и соотношение величины периферийного мелкозернистого и осевого крупнозернистого слоя получаемой заготовки, а также величину структурных элементов в каждом слое.

ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССАХ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Выявленные, по результатам исследований в рамках предыдущей главы, отличия в формировании зёрненной структуры, твёрдости и прочности заготовок, а также полученные при компьютерном моделировании и экспериментально подтверждённые данные о характере распределения параметров НДС при двух- и трёхвалковой винтовой прокатках создают предпосылки для прогнозирования вероятного разрушения заготовок в процессах винтовой прокатки. В рамках данной главы предложена методика, основанная на совместном использовании компьютерного моделирования и экспериментальной оценки для прогнозирования разрушения заготовок при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке.

3.1 Прогнозирование разрушение металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане

Прошивка заготовки в гильзу на стане винтовой прокатки является основной деформирующей операцией в большинстве современных технологических схем производства бесшовных труб. Она оказывает существенное влияние на качество труб и производительность агрегата [1,13]. К наиболее характерным особенностям процесса двухвалковой винтовой прокатки относится предрасположенность заготовки к разрыхлению и разрушению металла в осевой зоне, т.н. эффекту Маннесманна [24]. Единого мнения о причинах такого разрушения до сих пор не сформировалось. Наиболее надежные результаты о влиянии факторов процесса проявление этого эффекта получены прямыми экспериментальными исследованиями прошиваемости заготовок [13].

В настоящее время эффективным инструментом при исследовании процессов винтовой прокатки является компьютерное моделирование в вычислительных средах конечно-элементного анализа. В работе [139] исследовали прошивку в трёхвалковом стане с помощью DEFORM-3D [93]. В работе [10] с помощью QForm [107] исследовали процесс прокатки круглой заготовки в трёхвалковом стане винтовой прокатки. В работах [103,105] применяли MSC.Superform [104] для исследования процесса прошивки в двухвалковом стане с направляющими дисками, т.н. стане Дишера. С помощью этой же вычислительной системы конечно-элементного анализа исследовалась прошивка в стане Маннесманна – двухвалковом стане с направляющими линейками [124]. Программный продукт FORGE [90] применяли при исследовании прокатки магниевых сплавов в [145] в стане РСП [62], а также для

сравнительного анализа энергосиловых параметров и распределения параметров НДС при двух- и трёхвалковой винтовой прокатке [163].

Отдельно стоит отметить, что конечно-элементное моделирование применялось для оценки пластичности и прогнозирования разрушения при винтовой прокатке. Для исследования процесса трёхвалковой винтовой прокатки круглой заготовки с целью прогнозирования разрушения в [136] использовали критерий разрушения Ойена (Oyane):

$$I = \int_0^{\varepsilon_{eq,f}} \sigma_m \cdot f \left(A + \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\varepsilon \geq C, \quad (1)$$

где A и C – константы материала, σ_m – среднее напряжение, σ_{eq} – интенсивность напряжений, $\varepsilon_{eq,f}$ – накопленная пластическая деформация, $d\varepsilon$ – приращение накопленной деформации. Полученные при компьютерном моделировании данные работы [136] в целом не противоречат теоретическим представлениям, изложенным в [1,13,24]. Однако в [136] нет экспериментального подтверждения данных, полученных компьютерным моделированием с помощью MSC.SuperForm.

Процесс осевого разрушения при двухвалковой винтовой прокатке смоделирован [78] с помощью Abaqus/Explicit [79]. Однако в работе не представлено сравнение результатов моделирования с данными известных экспериментальных исследований. Подобное сравнение проведено в работах [96,97,161], но лишь только для частного случая прокатки. При этом авторы использовали модель разрушения Лемэтра (Lemaitre), предварительно её модифицировав.

В связи с изложенным дальнейшее изучение осевого разрушения при винтовой прокатке и разработка способов прогнозирования разрушения и пластичности прокатываемого металла при условии их экспериментальной проверки является актуальной задачей.

Целью работы являлось смоделировать процессы винтовой прокатки в двухвалковом стане для прогнозирования осевого разрушения и сравнить полученные данные с результатами опытных прокаток, а также предложить собственный способ оценки разрушения металла при винтовой прокатке.

Для прогнозирования осевого разрушения смоделировали прокатку заготовок из стали 12X18H10T в двухвалковом стане, согласно данным работы [1,2,4], в которой для определения прошиваемости осуществляли прокатку заготовок в стане МИСИС-100. Заготовки длиной 300 мм, диаметром 60 мм, перед прокаткой их нагревали до 1200°C, затем прокатывали за один проход до диаметра 50 мм. Согласно условиям опытных прокаток [1,2,4] создали 3D модели

валкового узла стана МИСИС-100 (рис. 69). Для этого использовали SolidWorks [164]. Сначала создали модели валков, направляющего инструмента, заготовки и толкателя, после этого сделали сборки. Всего создали четыре сборки для моделирования процесса прокатки при углах подачи 6°, 12°, 18° и 24°. Затем сборки сохранили в формате .stl и загрузили в пре-процессор вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM-3D, которая по данным [100] является одной из наиболее широко применяющихся при компьютерном моделировании процессов обработки металлов давлением. После загрузки данных из SolidWorks в пре-процессоре DEFORM-3D задали начальные условия согласно выше указанным условиям экспериментов [1,2,4] и провели моделирование процессов прокатки при четырёх углах подачи валков. Фактор трения по Зибелю задавали равным 1 согласно рекомендациям [103,105]. Из библиотеки материалов DEFORM выбрали сталь AISI-321 (американский аналог 12X18H10T), сопротивление деформации которой задано в DEFORM для различных скоростей деформации и температур (рис. 70).

При моделировании в DEFORM-3D для прогнозирования разрушения заготовок использовали нормализованный критерий разрушения Кокрофта-Латэма (Normalized Cockcroft-Latham), который в DEFORM-3D предлагается для прогнозирования разрушения по умолчанию [165]:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad , \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}$ - накопленная пластическая деформация, $d\bar{\varepsilon}$ - приращение накопленной деформации, σ^* - максимальное главное растягивающее напряжение, $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

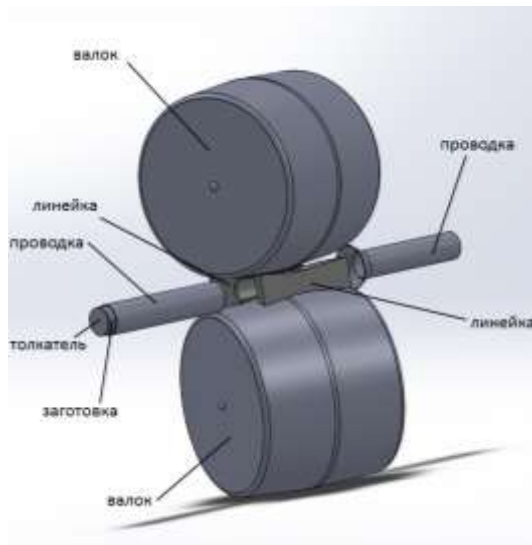


Рисунок 69. Сборка в SolidWorks для моделирования прокатки с углом подачи 18° в DEFORM-3D

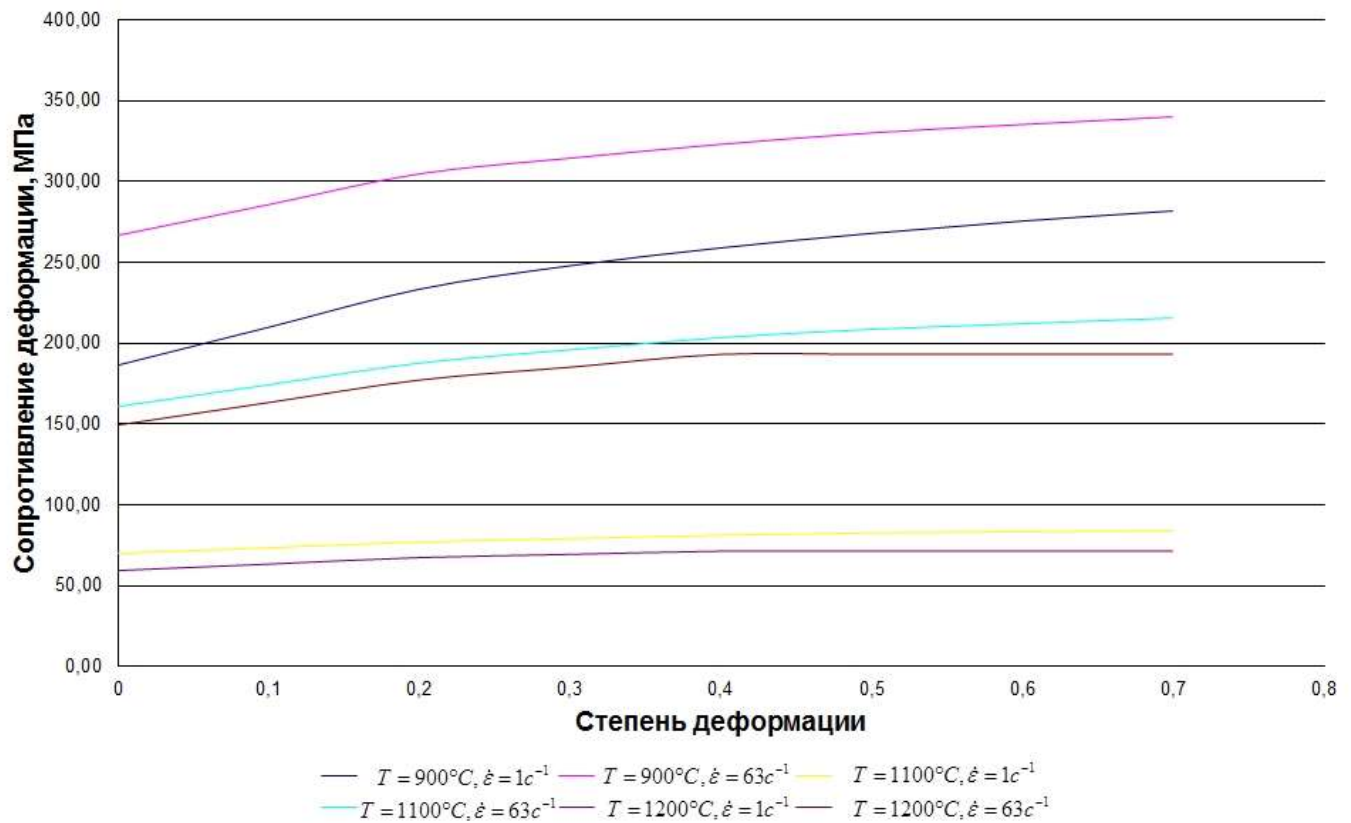
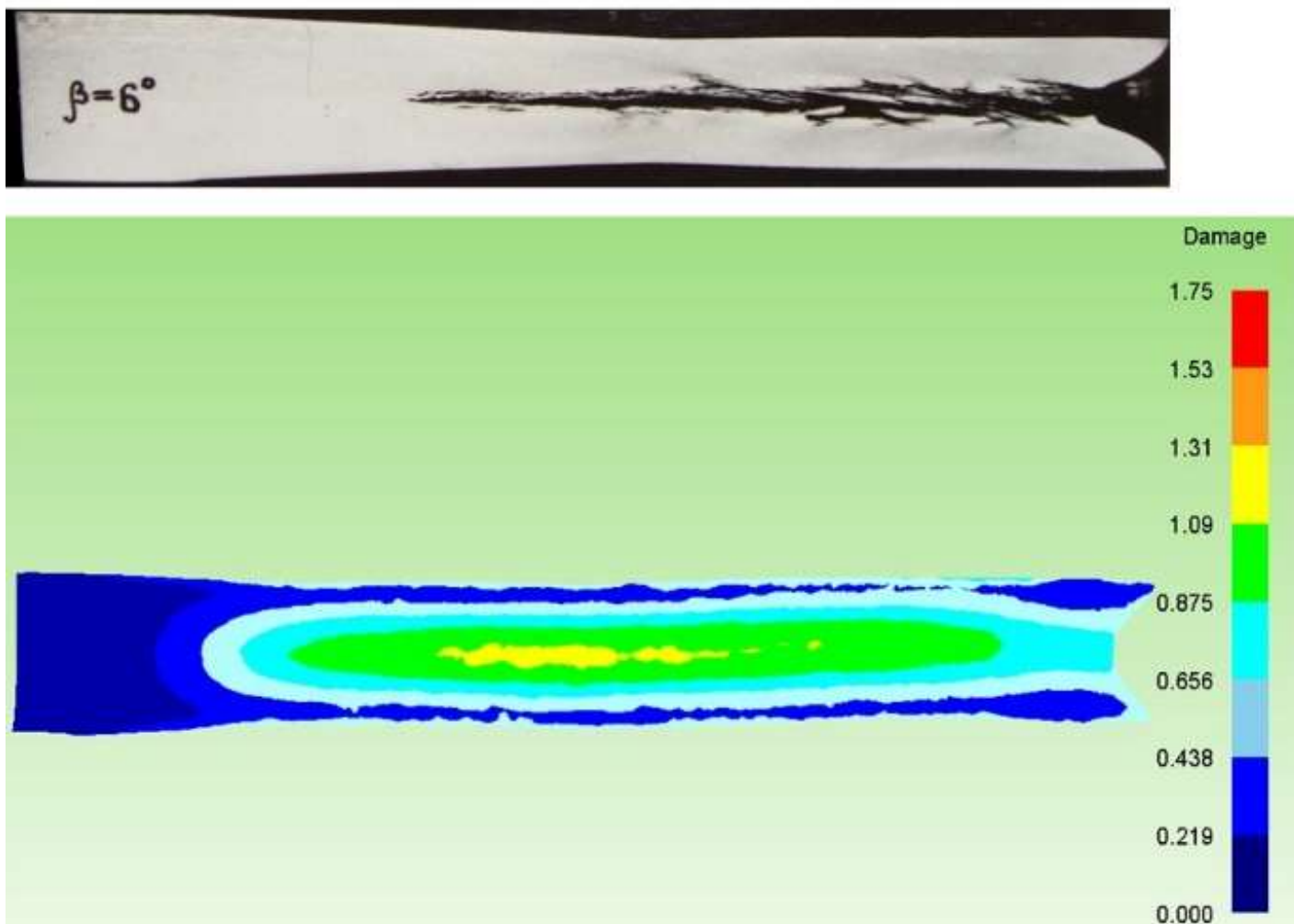
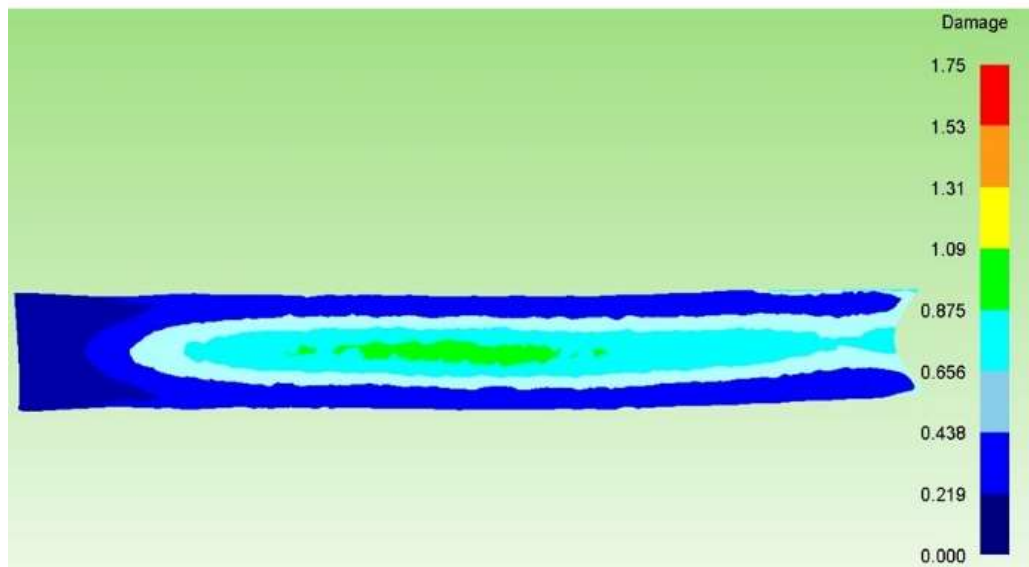


Рисунок 70. Изменение сопротивления деформации стали AISI-321 согласно базе данных материалов DEFORM-3D при различных температурах и скоростях деформации

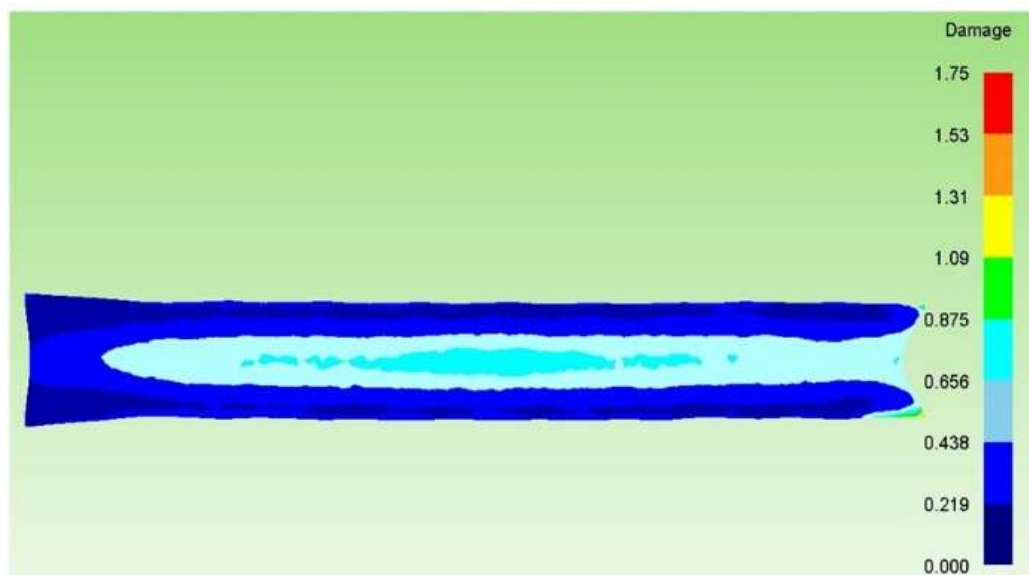
По результатам моделирования в DEFORM-3D построили поле значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в диаметральной (продольном)

сечении и сравнили полученные данные с результатами экспериментов по исследованию прошиваемости [1,2,4] (рис. 71).

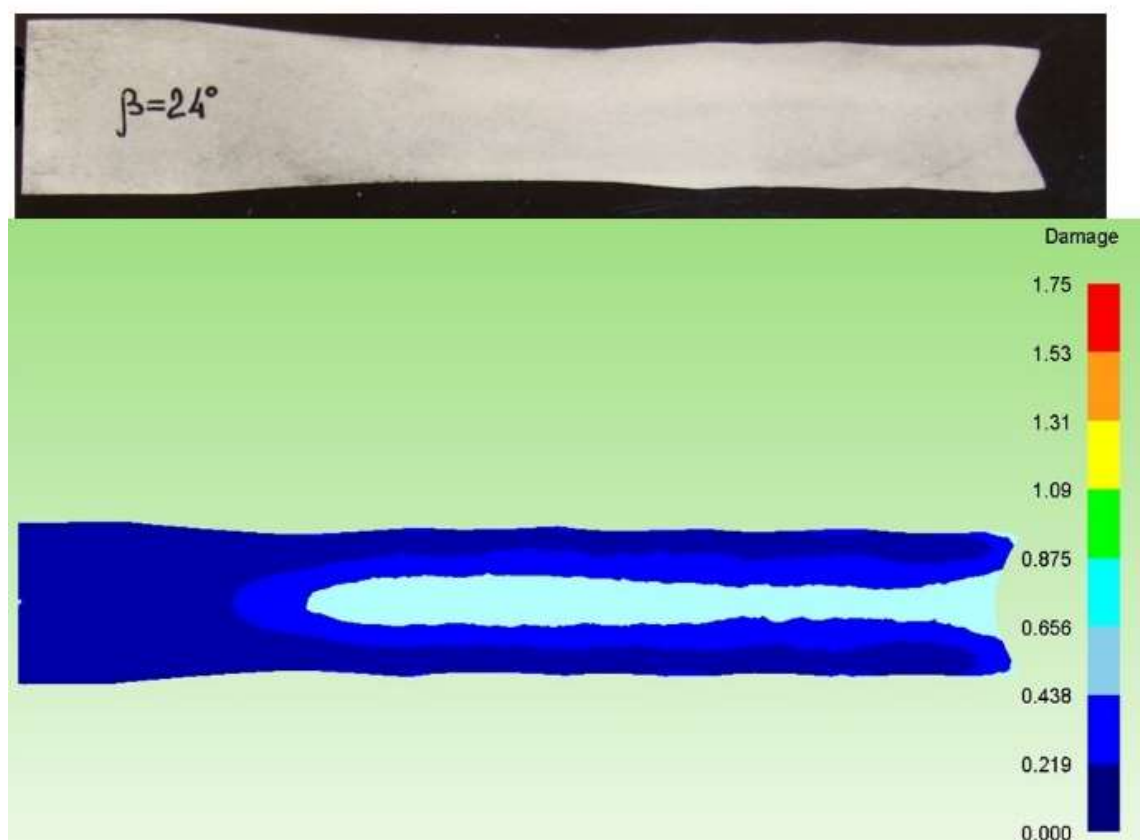




6



B



г

Рисунок 71. Распределение значений критерия разрушения в продольном сечении заготовки при моделирование в DEFORM-3D и вид продольных сечений заготовок после опытных прокаток при углах подачи: а - 6° (сверху – после прокатки, снизу – моделирование), б - 12° , в - 18° , г - 24°

По рис. 71 видно, что распределение значений критерия разрушения схоже с тем, каково разрушение заготовок после прокатки при различных углах подачи. Так, например, при угле подачи $\beta=6^\circ$ наблюдается наибольшее по глубине и объёму осевое разрушение. При этом значение критерия разрушения достигает 1,31. Увеличение угла подачи β до 12° (рис. 71б) привело к уменьшению разрушения металла по сравнению с прокаткой при $\beta=6^\circ$. Следует отметить, что в прокатанной заготовке области со значением критерия разрушения 1,31 при $\beta=12^\circ$ отсутствуют, а максимальное значение составляет 1,09. В заготовке, прокатанной при $\beta=18^\circ$ (рис. 71в), осевое разрушение незначительное и максимальное значение критерия разрушения достигает 0,875. При прокатке с углом подачи $\beta=24^\circ$ осевое разрушение не наблюдается, критерий разрушения не превышает 0,66. Таким образом, результаты

моделирования подтвердили, что с увеличением угла подачи развитие осевого разрушения уменьшается, а при $\beta=24^\circ$ отсутствует.

Отметим, что на рис. 71 показано не собственно разрушение заготовки, а его косвенная оценка по распределению значения критерия разрушения, т.к. именно это позволяет сделать вычислительная среда. Для того, чтобы визуально выделить при компьютерном моделировании осевое разрушение можно удалить элементы из сетки конечно-элементного разбиения, значение критерия разрушения в которых выше критического. Для этого в DEFORM предусмотрена специальная функция. Однако, в этом случае нарушается условие постоянства объёма заготовки.

Стоит отметить, что в работах [96,97,161] создали подобную модель и длина полученной осевой поры отличалась на 10% от длины поры, полученной экспериментально. Сравнение проводилось только для единственного случая прокатки. Оценка того, насколько нарушено было условие постоянства объёма в работе не приведено. По результатам моделирования в [96,97,161] первая пора (зарождение разрушения) появляется на расстоянии менее половины диаметра заготовки от её торца (рис. 72).

Для той же стадии винтовой прокатки, что и на рис. 72, построили по результатам моделирования в DEFORM-3D поле значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (рис. 73). Из рис. 73 видно, что область с максимальным значением критерия расположена на оси заготовки на расстоянии 12 мм от дна утяжины и на расстоянии 23 мм от торца.

Согласно экспериментальным данным [21] первая пора при начале разрушения появляется на расстоянии от торца, равном или более половины конечного диаметра заготовки, что иллюстрирует представленная в [21] схема формирования осевой утяжины (рис. 74) в зависимости от геометрических соотношений очага деформации. Подобную схему представили на рис. 75 на поле распределения значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (рис. 73).

Если аналогичную схему [21] представить для стадии прокатки, показанной на рис. 72 [96,97,161], то первая пора должна располагаться глубже, чем получено при моделировании в Forge [96,97,161] (рис. 76).

Следовательно, можно отметить, что результаты моделирования в DEFORM-3D согласуются с экспериментальными данными работы [21] (что видно из рис. 74), в отличие от результатов моделирования, представленных в [96,97,161] и на рис. 76 при прогнозировании разрушения.

Согласно [26], для прогнозирования разрушения является целесообразным учитывать взаимосвязь накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния:

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

$\bar{\sigma}$ - среднее напряжение, T - интенсивность напряжений.

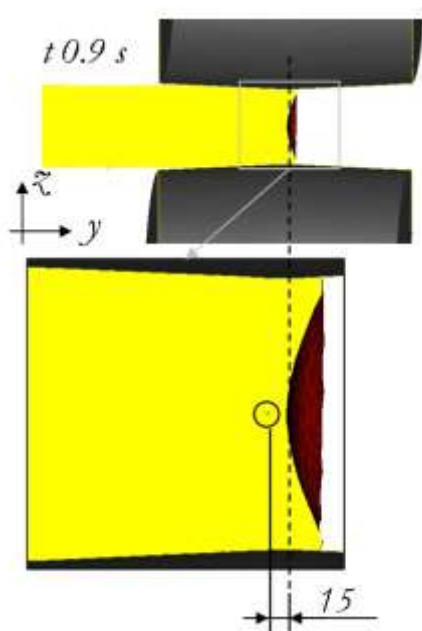


Рисунок 72. Пора, появляющаяся при моделировании разрушения при винтовой прокатке [96,97,161]

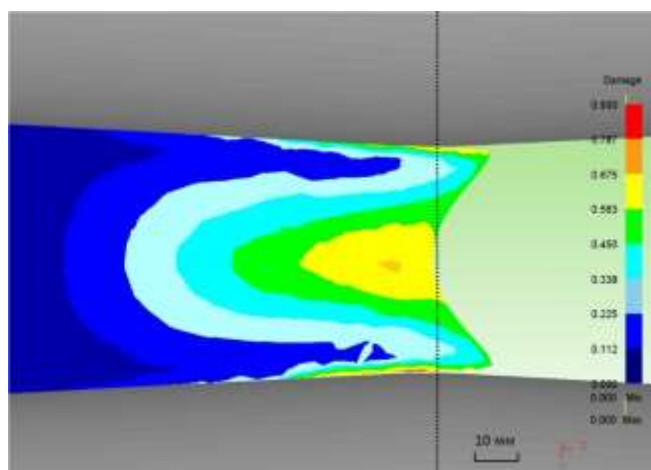


Рисунок 73. Распределение значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма при прохождении переднего торца заготовки через пережим (показан пунктирной линией) при моделировании в DEFORM-3D

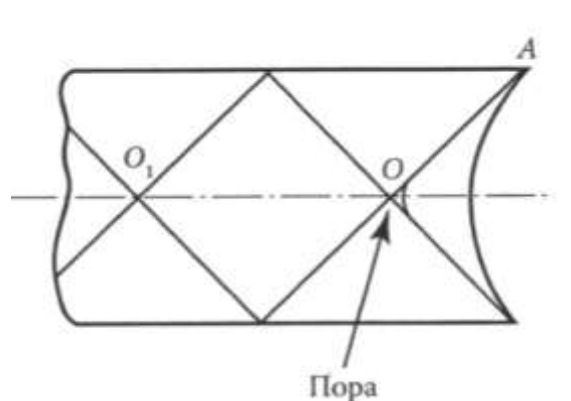


Рисунок 74. Схема формирования осевой утяжины в зависимости от геометрических соотношений физического очага деформации (схема взята из работы [21])

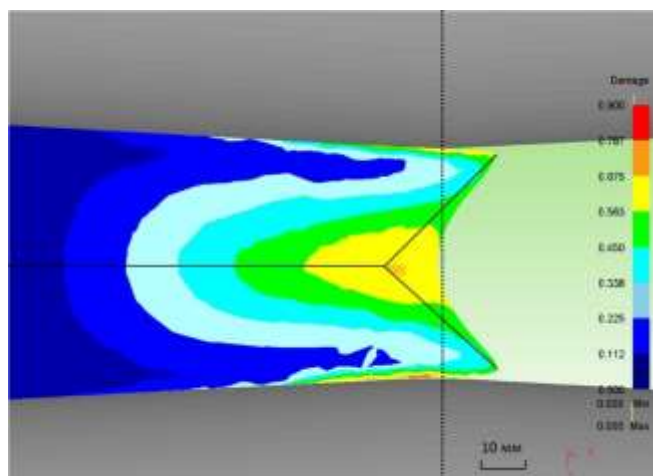


Рисунок 75. Совмещение поля распределения значения нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма со схемой формирования утяжины [21] (вертикальная пунктирная линия – пережим)

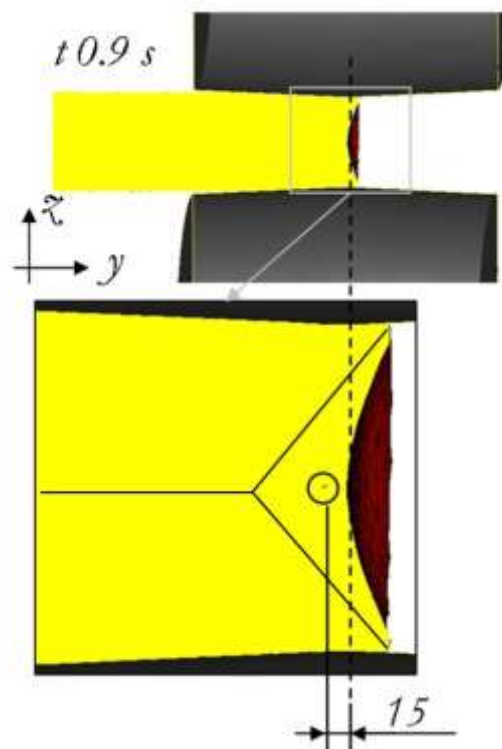


Рисунок 76. Совмещение данных моделирования разрушения в Forge [96,97,161] на основе модифицированной модели Лемэтра со схемой формирования утяжины [21]

В зарубежной литературе, например, в работах [96,167], также говорится о необходимости учитывать при моделировании процесса разрушения при винтовой прокатке параметр “stress triaxiality”, который рассчитывается по формуле, отличной от формулы (3) лишь отсутствием умножения на 3 [166].

Для анализа особенностей формоизменения при двухвалковой винтовой прокатке построили графические зависимости накопленной деформации от угла подачи (рис. 77), коэффициента жёсткости напряжённого от угла подачи (рис.78) и графическую зависимость накопленной деформации от коэффициента жёсткости (рис. 79) для одной и той же точки заготовок, прокатанных при различных углах подачи по результатам компьютерного моделирования в DEFORM. Точка, для которой строились графики, находилась на расстоянии 75 мм от переднего торца заготовки перед прокаткой (передний торец – торец, который первым контактирует с валками). Для каждого шага моделирования из DEFORM в Excel загрузили данные об изменении интенсивности скорости деформации, среднего напряжения и интенсивности напряжений во времени. Для получения на каждом шаге значений накопленной деформации численно интегрировали интенсивность скорости деформации по времени. Для получения графических зависимостей, представленных на рис. 79 по оси OX для выбранного момента времени откладывали значение коэффициента

жѐсткости напряжѐнного состояния, а по оси ОУ для этого же момента времени откладывали значение накопленной деформации, получая таким образом точку на графике. Построили массив точек для процесса прокатки при различных углах подачи. Для временных интервалов, когда поперечное сечение, содержащее исследуемую точку на оси заготовки, не находилось в зоне контакта с валками, получаемые массивы точек в исследуемых координатах визуально не предоставляли какой-либо существенной информации. Поэтому перестроили графические зависимости для временного промежутка, в течение которого указанное поперечное сечение с точкой находилось в зоне контакта металла с валками, и в Excel были получены графики типа «точечный» в координатах «коэффициент жѐсткости напряжѐнного состояния – накопленная деформация» для каждого из углов подачи в 6°, 12°, 18°, 24°. Для каждого из четырёх «точечных» графиков построили линии тренда. Наиболее подходящей зависимостью для линий тренда оказалась экспоненциальная (рис. 79), коэффициент корреляции составил 0,73. Экспоненциальные кривые рис. 79 подобны кривым диаграммы пластичности.

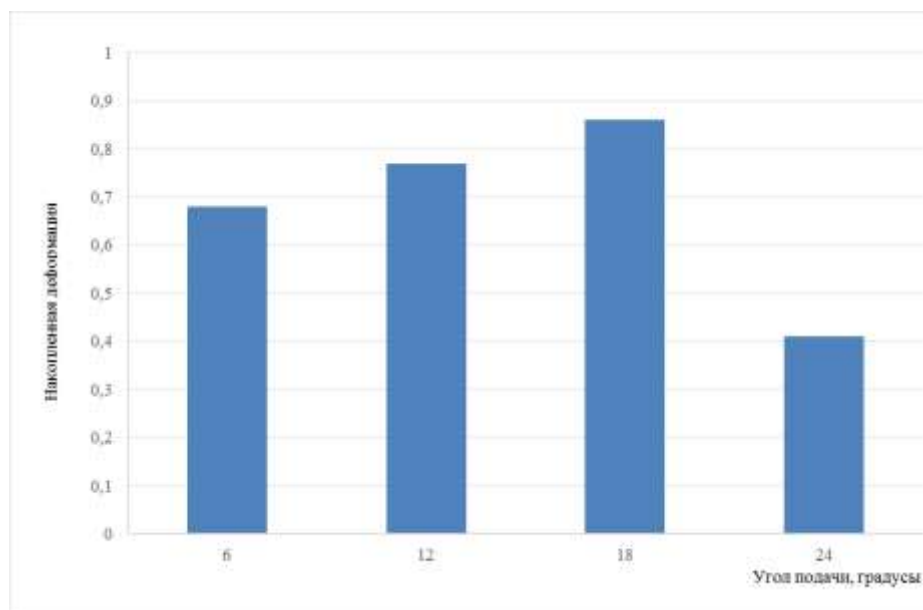


Рисунок 77. Зависимость накопленной деформации от угла подачи валков, полученная по результатам моделирования в DEFORM-3D

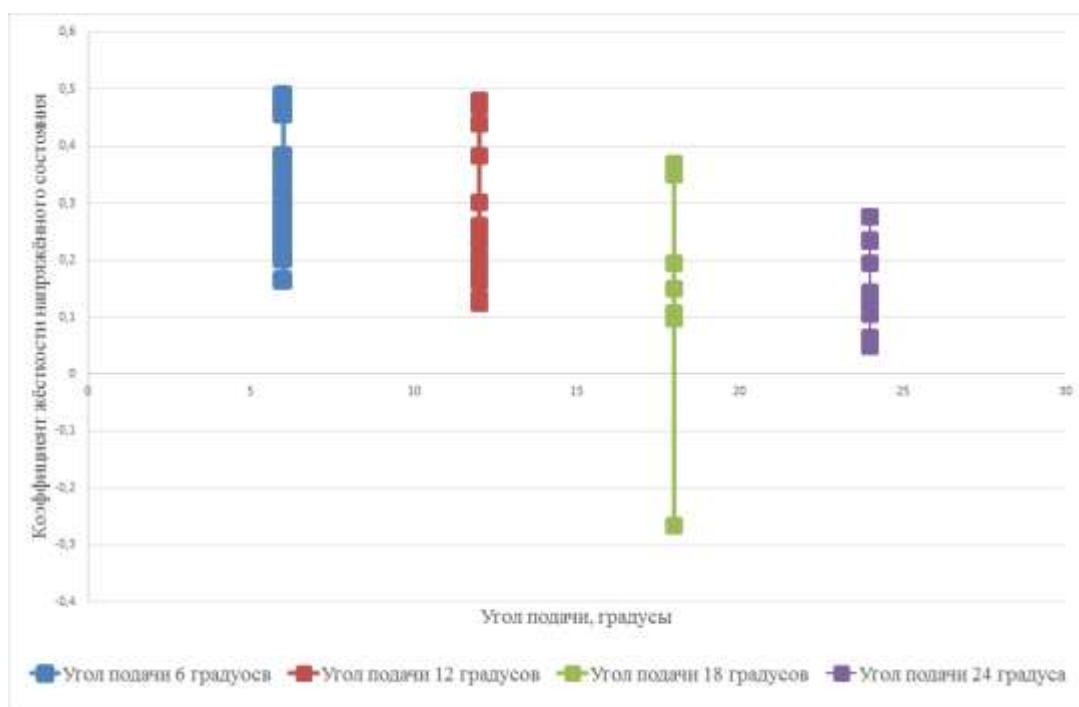


Рисунок 78. Значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния при различных углах подачи валков, полученные по результатам моделирования в DEFORM-3D

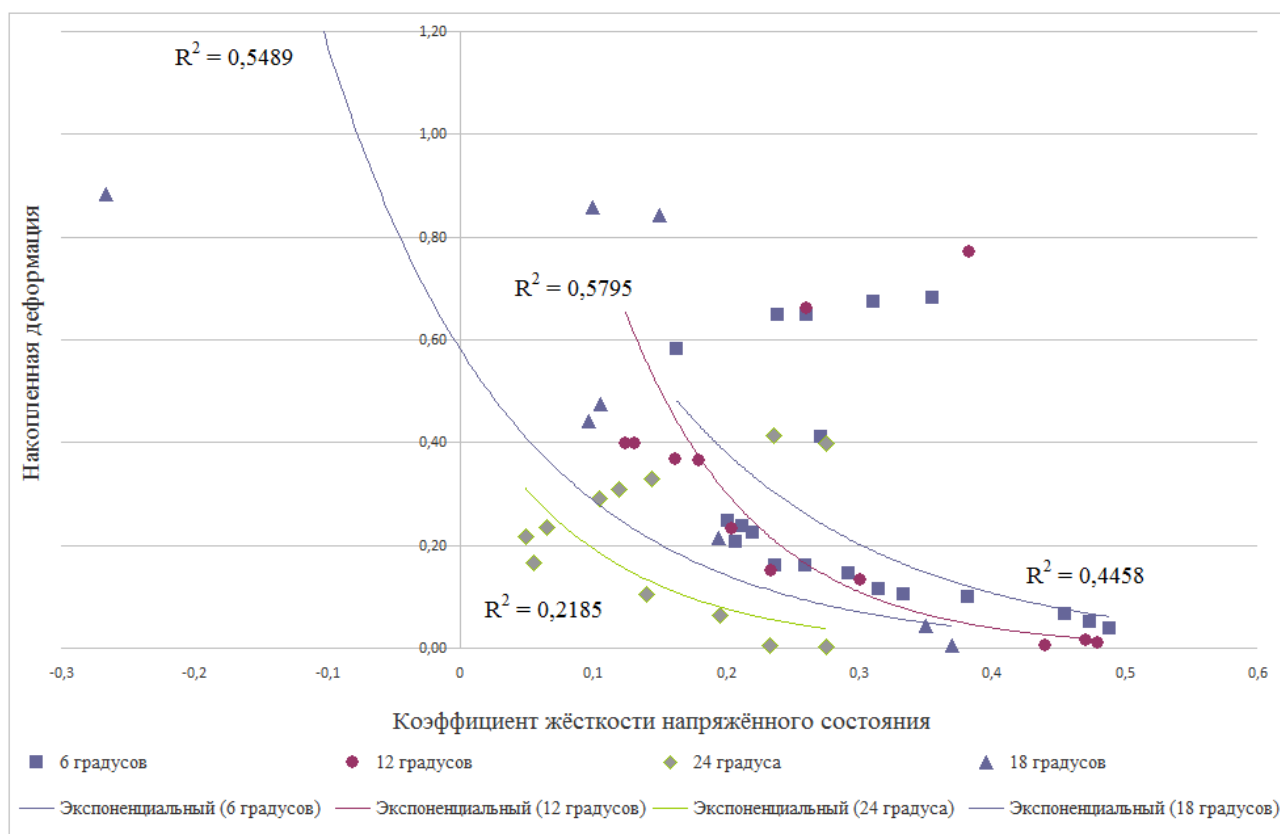


Рисунок 79. Соотношение накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния для траектории точки, находящейся на расстоянии 75 мм от переднего торца заготовки на её оси при прокатке с различными углами подачи

По рис. 77 и рис. 79 видно, что наибольших значений накопленная деформация достигает при прокатке с углом подачи 18° . С точки зрения достижения наибольшей пластичности прокатываемой заготовки это значение угла подачи, в условиях проведённых экспериментов, является оптимальным. Согласно данным [1,2,4,6,25,168], диапазон углов подачи $16-20^\circ$ является наиболее эффективным с точки зрения интенсификации процессов двухвалковой прокатки и прошивки.

Известно, что при одноосном растяжении коэффициент жёсткости напряжённого состояния равен 1, а при кручении – 0 [23,26]. Из рис. 78-79 можно заметить, что увеличение угла подачи приводит к снижению коэффициента жёсткости напряжённого состояния и смещению графической зависимости накопленной деформации от коэффициента жёсткости напряжённого состояния в область, близкую к абсциссе, характеризующей схему деформации с преобладанием кручения (коэффициент жёсткости напряжённого состояния стремится к нулю) (рис. 79), поэтому разрушение меньше. При этом коэффициент жёсткости напряжённого состояния снижается с примерно +0,5 до -0,2. Тенденция, проиллюстрированная на рис. 78-79, также была выявлена в [23,170] при прокатке слоистых

образцов из свинцово-сурьмянистого сплава в двухвалковом стане винтовой прокатки. По результатам исследований было показано, что с увеличением угла подачи коэффициент жёсткости напряжённого состояния уменьшается, схема становится более «мягкой». Так, увеличение угла подачи с 8° до 24° влечёт за собой изменение среднего коэффициента жёсткости по длине геометрического очага деформации для осевой зоны прокатываемой в двухвалковом стане заготовки от +0,46 до -0,09.

Графические зависимости в координатах «коэффициент жёсткости напряжённого состояния – накопленная деформация» могут быть использованы для прогнозирования разрушения при винтовой прокатке. При этом указанные зависимости можно использовать для любого типа исходной заготовки – деформированной или литой. Если исходная заготовка деформированная, то нужно перед началом моделирования ввести в программу цифровые данные результатов стандартных испытаний материала исходной деформированной заготовки. Если исходная заготовка литая, то при использовании некоторых вычислительных сред конечно-элементного анализа для моделирования процессов ОМД, в том числе [93], [104], [107], не нужно будет вводить никаких дополнительных данных. При этом процесс получения исходной литой заготовки моделируется с помощью соответствующих вычислительных сред, например, ProCAST или THERCAST, а далее при передачи данных из программы для компьютерного моделирования процессов литья в программу для компьютерного моделирования процессов ОМД вся информация о свойствах материала будет загружена в пре-процессор.

3.2 Прогнозирование вероятного разрушения при радиально-сдвиговой прокатке непрерывнолитых медных заготовок на основе компьютерного моделирования

Прогнозирование деформируемости непрерывнолитых заготовок при винтовой прокатке заготовок является актуальной задачей. В ряде работ, в том числе [21], указывается, что нет единого мнения касательно причин разрушения заготовок при их деформации в станах винтовой прокатки.

Отмечают, что для двухвалковой винтовой прокатки уровень деформируемости заготовок ограничен осевым разрушением в центральной зоне прутка [13], а для трёхвалковой винтовой прокатки, в том числе для радиально-сдвиговой прокатки [171], кольцевым разрушением в периферийной зоне [6].

Учитывая особенности процессов винтовой прокатки, затруднительно, а иногда невозможно проводить экспериментальные исследования с целью выявления особенностей формоизменения. В настоящее время при исследовании особенностей деформации в

процессах винтовой прокатки, в том числе разрушения, эффективно применяются вычислительные среды конечно-элементного анализа.

В работах [96,172] прогнозировали разрушение при двухвалковой винтовой прокатке круглых заготовок на основе компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов и проверена адекватность моделирования разрушения сравнением с экспериментальными данными. Как показано в работе [172] винтовая прокатка, в первую очередь двухвалковая, широко и эффективно исследуется с помощью компьютерного моделирования. Трёхвалковая винтовая прокатка исследовалась с помощью различных вычислительных сред конечно-элементного анализа в работах [143-145]. В работах [46-47] по исследованию процесса трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатки заготовок из титанового сплава показана эффективность применения вычислительной среды LS-DYNA для исследования изменения параметров напряжённо-деформированного состояния. В работе [15] показано определяющее влияние траекторий истечения металла на деформируемость заготовок при радиально-сдвиговой прокатке. Ряд работ в области трёхвалковой прокатки посвящены исследованию разрушения заготовок, в том числе [39]. В ходе литературного обзора применение компьютерного моделирования для прогнозирования разрушения в ходе литературного обзора удалось обнаружить только в работе [136]. В ходе исследований авторы использовали компьютерную среду MSC.SuperForm для прогнозирования разрушения с помощью критерия разрушения Ойена (Oyane) [136,172]. Полученные по результатам компьютерного моделирования данные не противоречат имеющимся теоретическим представлениям об изменении параметров напряжённого-деформированного состояния при трёхвалковой винтовой прокатке, однако в работе не представлено сравнение полученных данных с результатами опытных прокаток.

Учитывая, что конечно-элементное компьютерное моделирование достаточно эффективно при прогнозировании разрушения заготовок при двухвалковой винтовой прокатке, является актуальным прогнозирование разрушения при трёхвалковой винтовой прокатке на основе компьютерного моделирования.

Целью работы являлось прогнозирование разрушения при трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатке (РСП) медных прутков с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM и проверка адекватности полученных данных о разрушении в DEFORM сравнением с данными о разрушении при опытных прокатках медных прутков в стане РСП 10-30.

Опытные прокатки проводили на стане РСП 10-30 [16,173]. Деформации подвергали заготовки длиной 150 мм и диаметром 25 мм., полученные на горизонтальной машине непрерывного литья. Материал заготовок – анодная медь с фосфором [95], химический

состав представлен в табл. 5. Диаметр получаемого прутка – 12 мм. Прокатку вели при температуре заготовок 750°C и 800°C, частота вращения валков стана составляла 85 об/мин. В клетки стана 10-30 оси валков скрещиваются с осью прокатки под углом 20° и установлены с эксцентриситетом 30 мм. Настройка калибра выполняется осевым перемещением валков. Данная настройка соответствует схеме прокатки с углом подачи 17,56° и углом раскатки 9,72° [174].

Опытные прокатки моделировали с помощью DEFORM. В соответствии с настройками мини-стана РСП 10-30 в SolidWorks создали модели из валков, заготовки, толкателя и проводок. Из моделей сделали сборку, сохранили в формате .stl и загрузили в пре-процессор DEFORM (рис.80).

Таблица 5. Химический состав анодной меди, %

Cu	Fe	S	Pb	Sb	Ni	As	P	O	Bi, Cd, Mn, Sn, Mg
99,94	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,04-0,07	0,001	0,001

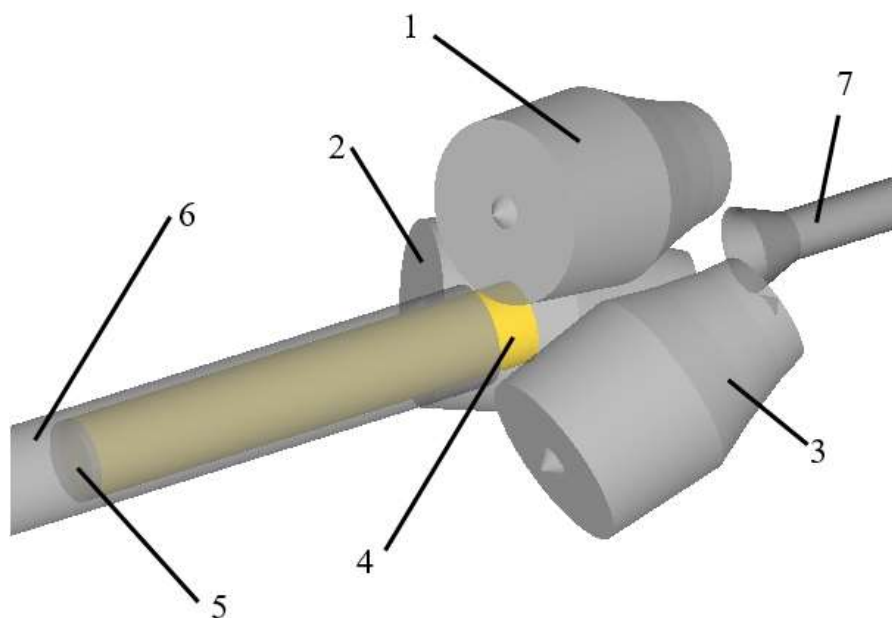


Рисунок 80. Модель в DEFORM для расчёта процесса РСП медного прутка в стане 10-30: 1,2,3 – валки, 4 – заготовка, 5 – толкатель, 6 – проводка с входной стороны, 7 – проводка с выходной стороны

В Pre-processor DEFORM в качестве материала заготовки выбрали CuC2 – марка меди согласно стандарту ASTM(США) – наиболее близкая, из имеющихся в библиотеке материалов DEFORM, к марке меди заготовок при опытных прокатках. Угловую скорость вращения валков задавали равной 8,9 рад/с, что соответствует частоте вращения 85 об/мин при опытных прокатках. Выбрали тип трения по Зибелю и для пар «валок-заготовка» фактор трения задавали равным 3, для пары «толкатель – заготовка» - 0,3, для пар «проводка-заготовка» - 0,08. Расчёт вели без учёта теплообмена между заготовкой и валками, проводками и толкателем. Заготовка имела сетку из тетраэдральных конечных элементов количеством 75000.

По окончании прокаток медных заготовок на мини-стане РСП 10-30 установили, что заготовка, начальная температура которой была 750°С, имеет бóльшую длину – 800 мм - по сравнению с заготовкой, начальная температура которой составляла 800°С, и длина которой оказалась равной 730 мм.

Каждый из полученных прутков имел разрушение (несплошности). При этом оно не было сквозным, области с разрушением внутри заготовки чередовались со сплошными областями (рис. 81).



а



б

Рисунок 81. Разрушение в поперечном (а) и продольном сечении (б) полученных РСП прутков

Объём исходной заготовки составлял 73,6 см³. По результатам опытных прокаток установили, что объём полостей внутри прутков, появившихся по причине разрушения, при 750°С составил 16 см³, а при 800 °С – 8,9 см³, что составляет, соответственно, 21,7% и 12,1% от исходного объёма заготовки. То есть при прокатке заготовки с начальной температурой 750°С имеет место разрушение существенно большего объёма, по сравнению с прокаткой

заготовки с начальной температурой 800°C. Следовательно, при 800°C заготовка более пластична, чем при 750°C.

Для сравнения пластичности материала заготовок при двух различных температурах по результатам моделирования в DEFORM оценили глубину утяжины на каждом из полученных прутков (рис. 82).

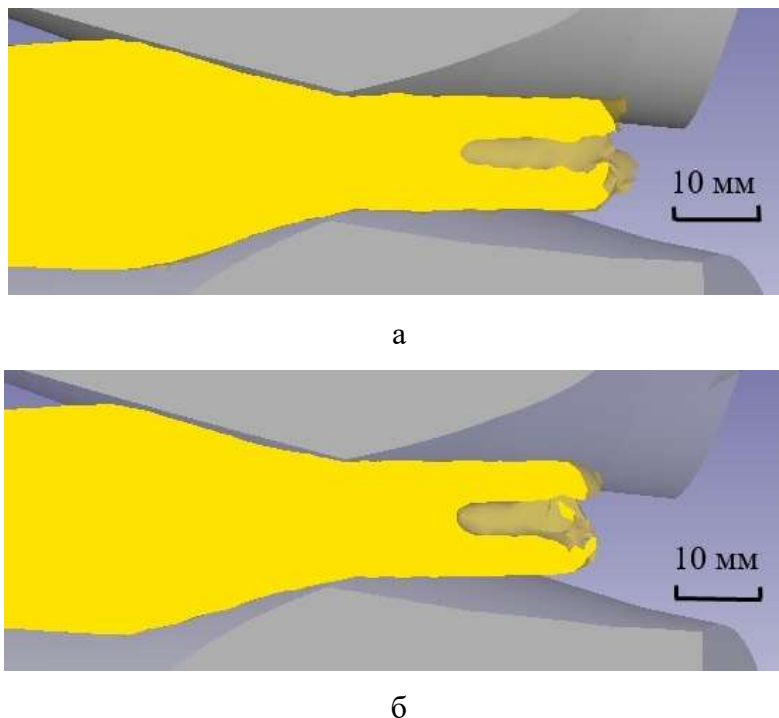


Рисунок 82. Утяжина при моделировании в DEFORM РСП медного прутка при 750°C (а) и 800°C (б)

По рис. 82 видно, что глубина утяжины при прокатке заготовки при температуре 750°C на 20% больше, чем при прокатке при 800°C. Известно, что утяжина при прокатке прутка формируется на нестационарной стадии прокатки [6,173], а разрушение начинается в приторцовых областях [6,21], характер деформации которых также нестационарный. Следовательно, моделирование продемонстрировало, что в приторцовых областях более вероятно разрушение и его развитие при прокатке при 750°C, чем при 800°C.

Для прогнозирования разрушения при деформации заготовки из выбранного при моделировании материала в пост-процессоре DEFORM построили поле распределения значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (Normalized Cockcroft-Latham), [172] (рис.83, формула (2)).

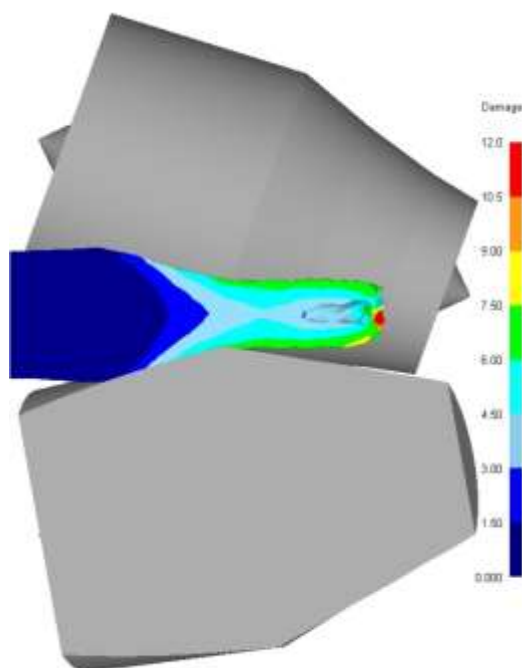


Рисунок 83. Поле значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в продольном сечении заготовки при прокатке при температуре заготовки 800°C

Чем выше значение нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, тем вероятнее разрушение. Согласно рис. 83, наиболее вероятно разрушение в поверхностных областях заготовки, что полностью противоположно данным опытных прокаток: разрушение происходит внутри заготовки. Следовательно, нормализованный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма при анализе данного случая РСП неэффективен, в отличие от двухвалковой винтовой прокатки [172].

Для оценки пластичности заготовок и прогнозирования разрушения по результатам моделирования в DEFORM рассчитывали значение накопленной деформации в интересующих точках заготовки. Для получения значений накопленной деформации использовали методику, предложенную в [172]. Численно интегрировали по времени интенсивность скорости деформации (strain rate effective), которую рассчитывает DEFORM. Также, аналогично [172], по результатам моделирования в DEFORM в выбранных точках рассчитывали значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния [25,26,165,172]. Указанные параметры рассчитывали для 13 точек заготовки, расположенных по радиусу с шагом 1 мм. Точки располагались на расстоянии 12 мм от переднего торца заготовки. Для каждой из точек рассчитали значение накопленной деформации и построили графики типа «точечный» в Excel для случаев прокатки при 750°C и 800°C. Затем для каждого набора точек построили линии тренда, описываемые уравнением в виде полинома 3-й степени (рис.

84). На рис. 84 выше кривых указан коэффициент достоверности аппроксимации для 800°C, а ниже – для 750°C.

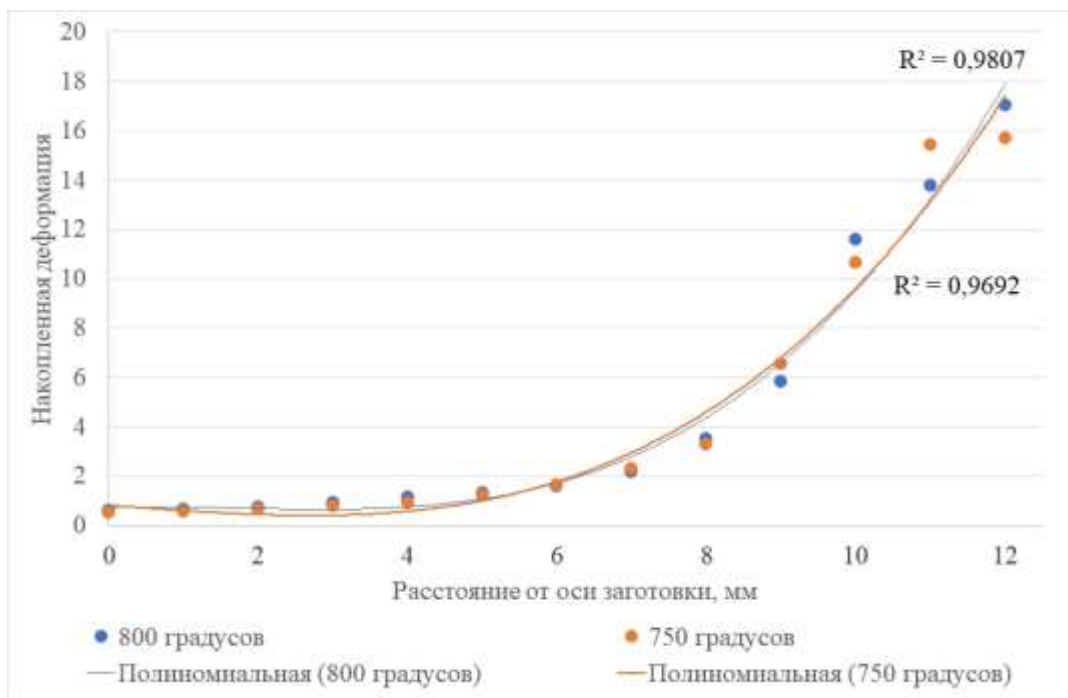
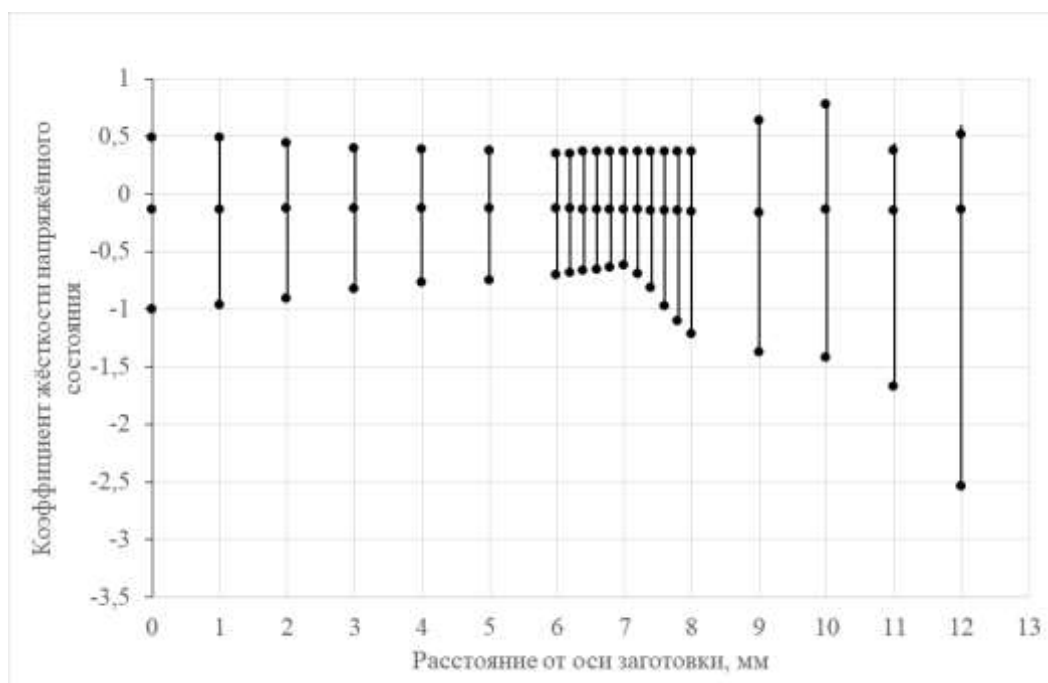


Рисунок 84. Изменение накопленной деформации для 13 точек, расположенных по радиусу заготовки на расстоянии 12 мм от торца.

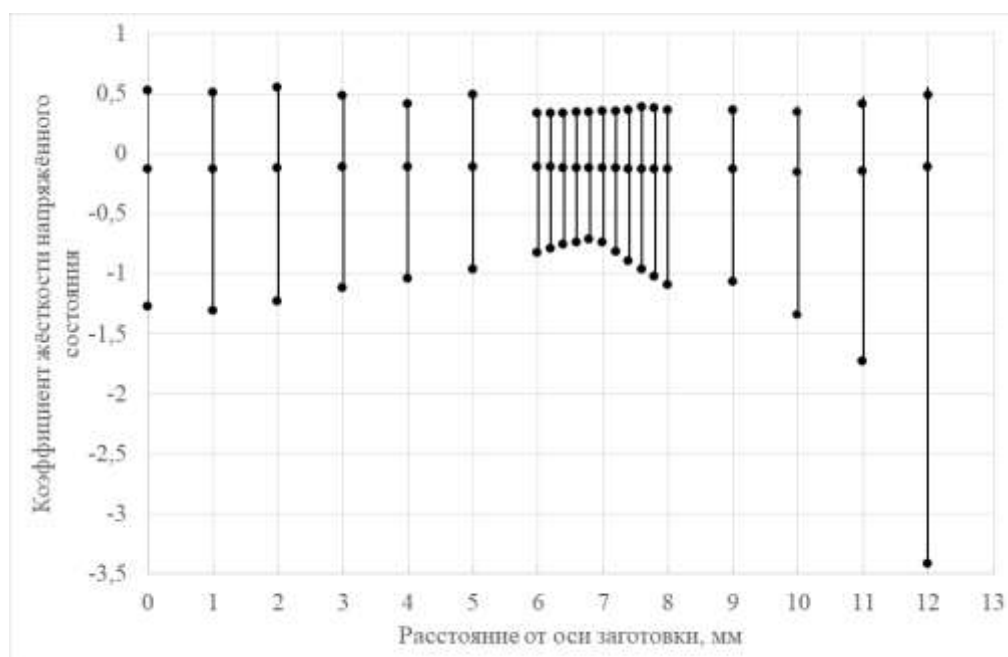
По рис. 84 видно, что значения накопленной деформации для выбранных точек при 750°C и 800°C близкие и однозначно сказать, при какой температуре материал в этой области заготовки будет более пластичным невозможно. Зависимости, показанные на рис. 84, схожи качественно с полученными при моделировании трёхвалковой винтовой прокатки с помощью DEFORM в работе [175], с помощью LS-DYNA в работах [46,47]. Учитывая, что для трёхвалковой винтовой прокатки характерно кольцевое разрушение, для определения радиуса этой кольцевой зоны необходимо, при наличии графической зависимости распределения значений параметра напряжённо-деформированного состояния, иметь в некоторой отстоящей от оси заготовки точке характерное отличие в распределении этого параметра. Это может быть максимум или минимум, точка перегиба и т.п. По графическим зависимостям рис. 84, а также представленным в [46,47,175] сложно выделить такую точку. Для поиска такой точки анализировали изменение значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния.

Для расчёта значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния [26,172] в выбранных точках по результатам расчёта в DEFORM делили значения среднего напряжения (Mean Stress) на интенсивность напряжений (Stress Effective). Для каждой из

тринадцати точек во время деформации определяли минимальное, максимальное и среднее значение. Эти три величины для каждой точки наносили на график в Excel. Для каждой точки получался отрезок, верхний конец которого являлся максимальным значением, нижний – минимальным, а между этими двумя значениями находилось среднее. Определили, что имеет место чёткое изменение в распределении значений при движении по радиусу заготовки. Для обеих температур прокатки, если двигаться от оси заготовки к поверхности, границы изменения коэффициента жёсткости сначала уменьшаются, а потом наоборот, начинают увеличиваться. При этом указанное изменение происходило между точками, находящимися на расстоянии 6 и 8 мм от оси заготовки (рис. 85). Для того, чтобы более чётко определить положение точки, в которой происходит изменение тенденции, выбрали дополнительно с шагом 0,2 мм точки, находящиеся на отрезке от 6 до 8 мм от оси заготовки.



а

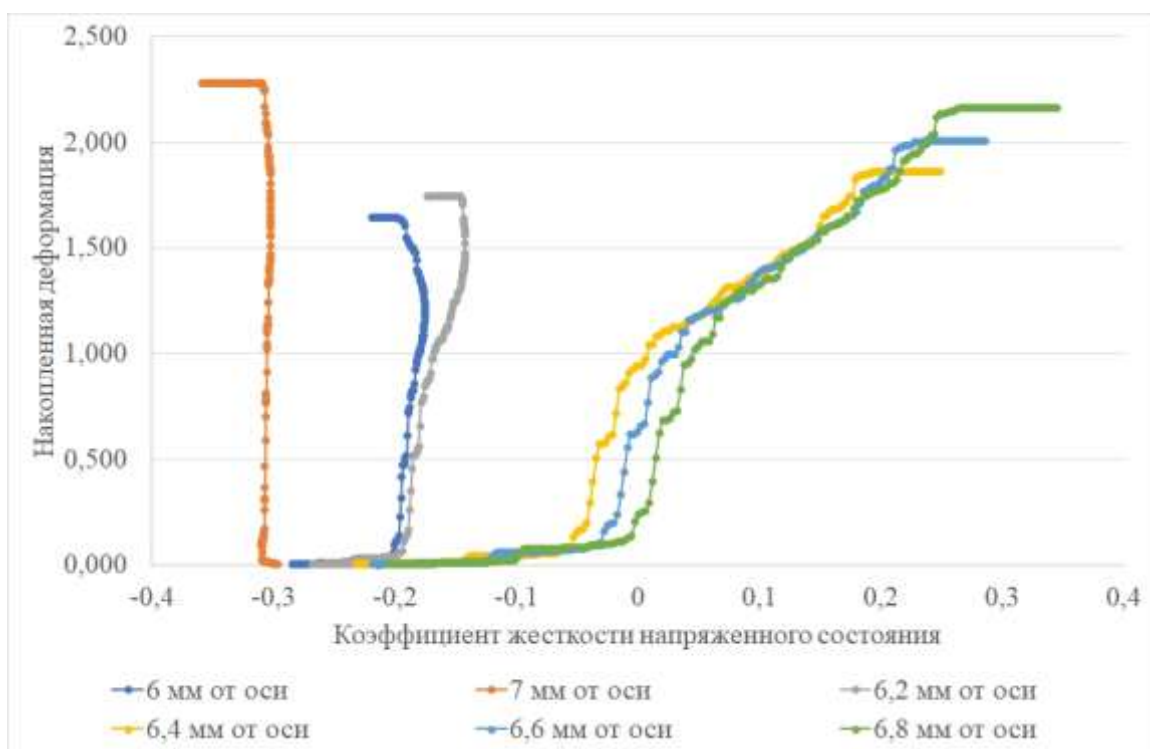


б

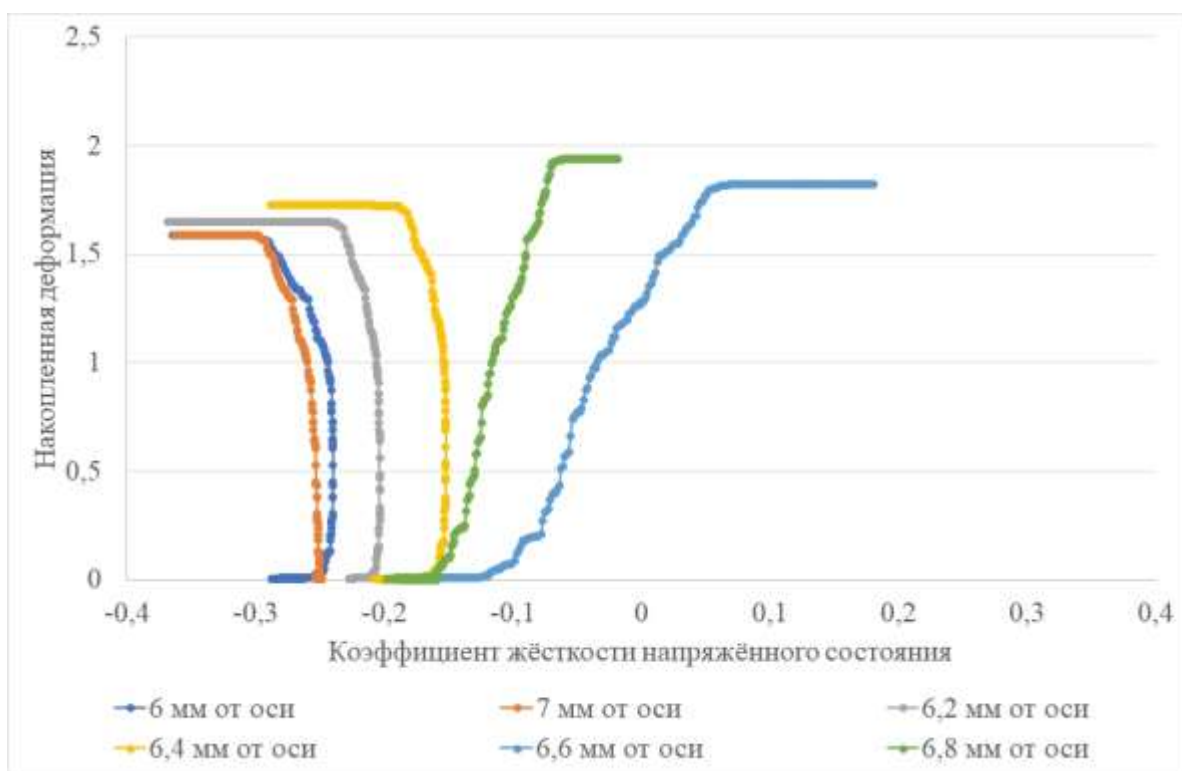
Рисунок 85. Интервалы изменения значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния по результатам моделирования в DEFORM для выбранных точек при температуре прокатки 750°C (а) и 800°C (б)

По рис. 85 установили, что при 750°C изменение происходит в точке, находящейся на расстоянии 7 мм от оси заготовки, а при 800°C – на расстоянии 6,8 мм. Учитывая эти данные, можно спрогнозировать, что радиус кольцевой зоны и, следовательно, объём разрушения, при 800°C будет меньше, чем при 750°C.

Для оценки вероятности разрушения в точках, находящихся на расстоянии от 6 до 7 мм от оси заготовки, построили графические зависимости накопленной деформации от коэффициента жёсткости напряжённого состояния аналогично полученным в работе [172] для двухвалковой винтовой прокатки. Так как по результатам расчёта в DEFORM коэффициент жёсткости имел сильные колебания значений, перед построением указанных выше графических зависимостей с помощью Excel «сгладили» колебания значений коэффициента жёсткости с помощью построения линии тренда на основе полинома второй степени. Учитывая полученные для каждой из точек полиномы построили зависимости накопленной деформации от коэффициента жёсткости напряжённого состояния (рис. 86). Горизонтальные участки в начале и конце показанных на рис. 86 траекторий соответствуют моменту входа и выхода точек из очага деформации.



а



б

Рисунок 86. 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)

Из рис. 86 видно, что для температуры 750°C правее всех лежит траектория точки, находящейся на расстоянии 6,8 мм от оси заготовки. При этом большая часть траектории лежит в пределах значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния от 0 до 0,25. Для температуры прокатки 800°C правее всех лежит траектория точки, находящейся на расстоянии 6,6 мм от оси заготовки. При этом большая её часть лежит в пределах значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния от -0,1 до 0,1. Согласно данным [25,26,169,172] чем правее лежит траектория точки в координатах коэффициент жёсткости напряжённого состояния – накопленная деформация, тем схема деформации наименее «мягкая» и тем вероятнее разрушение. Результаты моделирования, представленные на рис. 64-65, показывают, что можно говорить о так называемой кольцевой зоне 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. 86а), 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. 86б) – 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.

3.3 Прогнозирование разрушения заготовок при прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки

Методику прогнозирования разрушения, эффективно использованную для двух- и трёхвалковой прокатки, использовали для прогнозирования разрушения заготовок при

прошивке в двухвалковом стане с направляющими линейками. Вопрос разрушения осевой зоны металла заготовки в процессе винтовой прошивки широко исследовался, начиная с 20-х гг. XX в. Результаты проведенных исследований и теоретические обоснования данного явления представлены в работах П.Т. Емельяненко [176], Чекмарева [33], И.А. Фомичева [177], К. Gruber [178], G. Lobkowitz [179], F. Kocks [180] и др. [181-184]. В работе [180] представлены результаты экспериментальных исследований по особенностям течения металла при прошивке. Е. Siebel в статье [185] связывает процесс образования трещин в сердцевине заготовки с максимальными скалывающими напряжениями. В трудах Фомичева и Смирнова [186-188] процесс разрушения осевой зоны объясняется действием нормальных растягивающих напряжений.

Экспериментальные исследования процесса прошивки полых заготовок с дном выполнены на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д (рис. 87).



Рисунок 87. Рабочая клеть прошивного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

В качестве исходного материала использовался горячекатаный прутки из стали 50 диаметром 31 мм, который разрезался на штучные заготовки длиной 85 мм на ленточной пиле.

Для проверки отсутствия пористости в исходных заготовках от них были отобраны образцы и сделаны фотографии микроструктуры на поперечном сечении в осевой зоне и вблизи поверхности (рис. 88).

Как видно, в исходной заготовке отсутствуют поры и микротрещины. На поверхности заготовка имеет более мелкую деформированную зёрненную структуру.

Для улучшения условий вторичного захвата и уменьшения разностенности с одного торца заготовки путем сверления в холодном состоянии наносилось зацентровочное

углубление диаметром 12 мм и глубиной 7...8 мм. Несоосность заготовки и зацентровочного углубления не превышала 0,15 мм.

Перед прошивкой заготовки в вертикальном положении нагревали в камерной электрической печи сопротивления до температуры 1150°C в течении 15...20 минут. Время транспортировки нагретых заготовок от печи до входной стороны прошивного стана составляло 2...4 с.

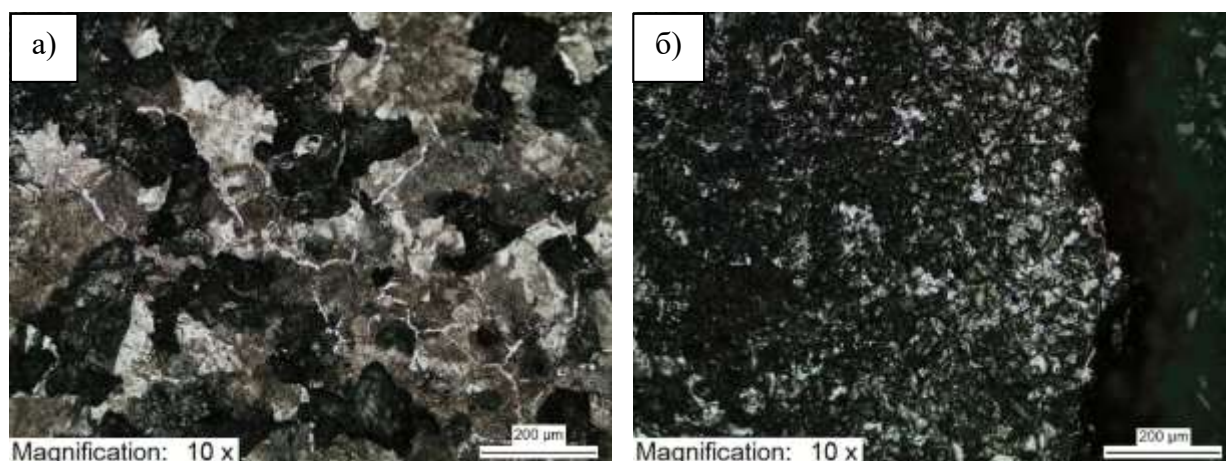


Рисунок 88. Микроструктура исходной заготовки в поперечном сечении (x10):
а) центр; б) поверхность

Рабочие валки стана имели калибровку с углами конусности $\varphi_1 = 2^{\circ}30'$ и $\varphi_2 = 3^{\circ}$ (рис. 89, а). Материал валков – сталь 45 с твердостью рабочей поверхности около НВ 190...200.

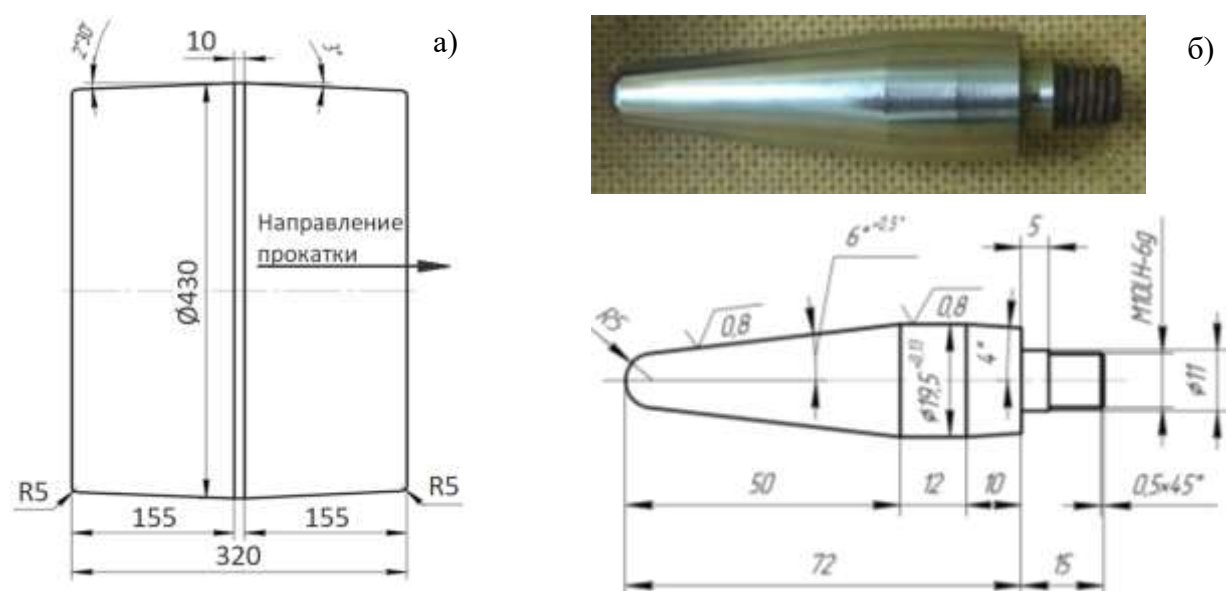


Рисунок 89. Рабочий инструмент прошивного стана МИСиС-130Д: а) профиль бочки валка; б) оправка

В качестве направляющего инструмента при прошивке на двухвалковом стане использовали линейки из высоколегированного сплава (бидулоидный чугун) с твердостью рабочей поверхности HRC 60...62.

Для прошивки заготовок использовали оправку диаметром 19,5 мм с углом конусности рабочей поверхности 6° длиной 72 мм (рис. 89, б). Для схода гильзы с оправки после цилиндрического пояса выполнен обратный конус длиной 10 мм с углом наклона 4° . Оправки изготовлены из стали 4X5МФС с левой резьбой хвостовика для предотвращения раскручивания в процессе прокатки.

Выходная сторона стана была оснащена специальным быстродействующим рычажным устройством, которое позволяет получать гильзы с дном и обеспечивает высокое быстродействие.

Прошивка выполнялась на двух разных настройках прошивного стана, обеспечивающих получение одинаковых геометрических размеров гильз (табл. 6).

Таблица 6. Параметры настройки прошивного стана

№ п/п	Расстояние между валками В, мм	Расстояние между линейками Л, мм	Выдвижение оправки за пережим С, мм	Угол подачи рабочих валков, град	Коэффициент овализации ξ	Обжатие в пережиме U, %
1	26	32	17	15	1,23	16,13
2	26,5	30	17	18	1,13	14,5

В соответствии с размерами рабочего инструмента и заготовки создали их 3D модели в SolidWorks. Также создали 3D модели направляющих с входной и выходной стороны. Из моделей создали сборку, сохранили в формате .stl и загрузили в pre-processor DEFORM (рис. 90). Моделирование прошивки выполнялось без учёта теплообмена между заготовкой и инструментами. Фактор трения для пар «валок-заготовка» равен 1 (по закону Зибеля), для пар «линейка-заготовка» и «оправка-заготовка» равным 0,3, для пар «направляющая-заготовка» и «толкатель-заготовка» равным 0,1. Во время моделирования оправка при контакте с заготовкой вращалась (как и при опытных прокатках). Температуру заготовки перед прокаткой задавали равной 1150°C , марка стали заготовки AISI-1050 (зарубежный аналог стали 50).

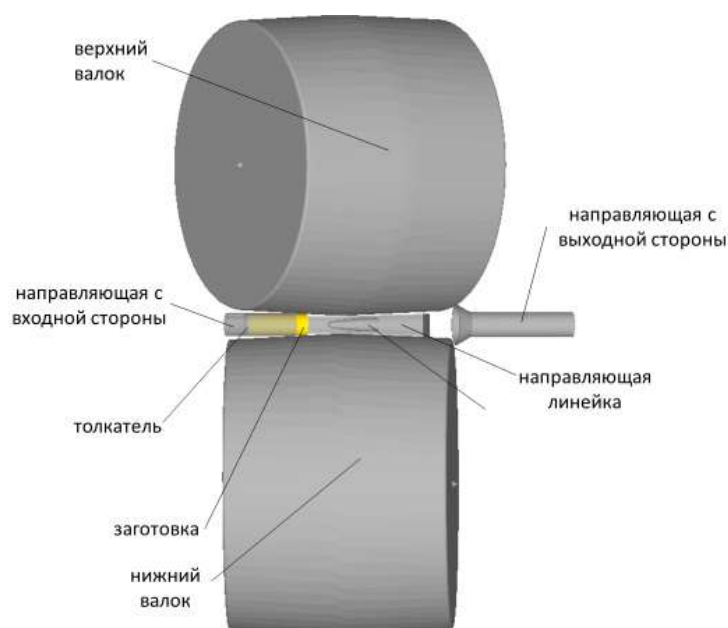


Рисунок 90. Модель в DEFORM 3D для расчета процесса прошивки при угле подачи валков $\beta=15^\circ$

По режимам, представленным в табл. 6, была прокатана партия гильз с дном наружным диаметром 33,5 мм и толщиной стенки 6,5 мм ($D/S=5,2$). Для контроля наличия разрушения отобранные образцы гильз были разрезаны на ленточных пилах в продольной плоскости. Практически во всех гильзах, прошитых при настойках №1, зафиксировано разрушение осевой зоны в донной части заготовки непосредственно перед носком оправки (рис. 91, а).

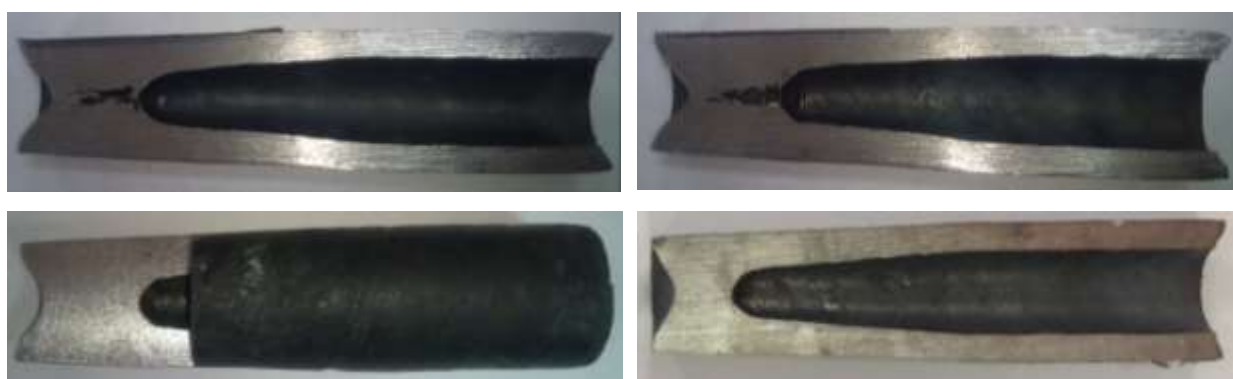


Рисунок 91. Продольные разрезы прошитых заготовок: а) режим №1; б) режим №2

После изменения настроек прошивного стана (увеличения угла подачи, уменьшения коэффициента овализации и обжатия в пережиме) осевого разрушения не происходит (рис. 91, б).

Как известно, увеличение угла подачи валков при винтовой прокатке приводит к снижению цикличности процесса за счет уменьшения количества частных обжати. Уменьшение коэффициента овализации способствует уменьшению величины растягивающих напряжений в радиальном направлении заготовки. В сумме данные факторы приводят к снижению вероятности разрушения металла в осевой зоне в процессе прошивки.

По результатам компьютерного моделирования оценили какие значения принимают критерии разрушения и параметры напряжённо-деформированного состояния по радиусу заготовки в сечении перед носком оправки на стадии остановки процесса прошивки (рис. 91). Для этого в постпроцессоре DEFORM назначено 8 точек P1-P8 (рис. 92).

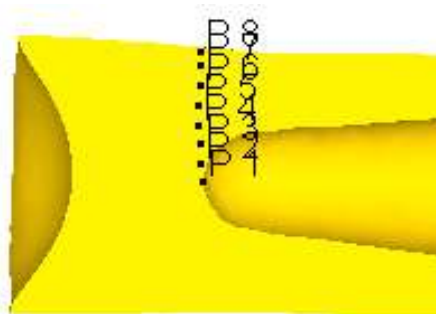


Рисунок 92. Точки для расчета значения параметров напряжённо-деформированного состояния в постпроцессоре DEFORM

По результатам моделирования для точек P1-P8 (рис. 92) оценивалось изменение значения нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (НКРКЛ) в процессе прошивки (рис. 93, а) в соответствии с уравнением (2).

Также оценили, как изменяются значения критерия разрушения Айада (Ayada) (рис. 93, б), которое определяется как:

$$D_A = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (4)$$

где $\bar{\epsilon}$ - накопленная пластическая деформация;

$d\bar{\epsilon}$ - приращение накопленной деформации;

σ_m - среднее напряжение;

$\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

В течение процесса прошивки, как показало моделирование, значения НКРКЛ и критерия разрушения Айада растут и достигают максимума в момент остановки процесса на расстоянии 10-12 мм от торца заготовки (аналогично опытным прошивкам).

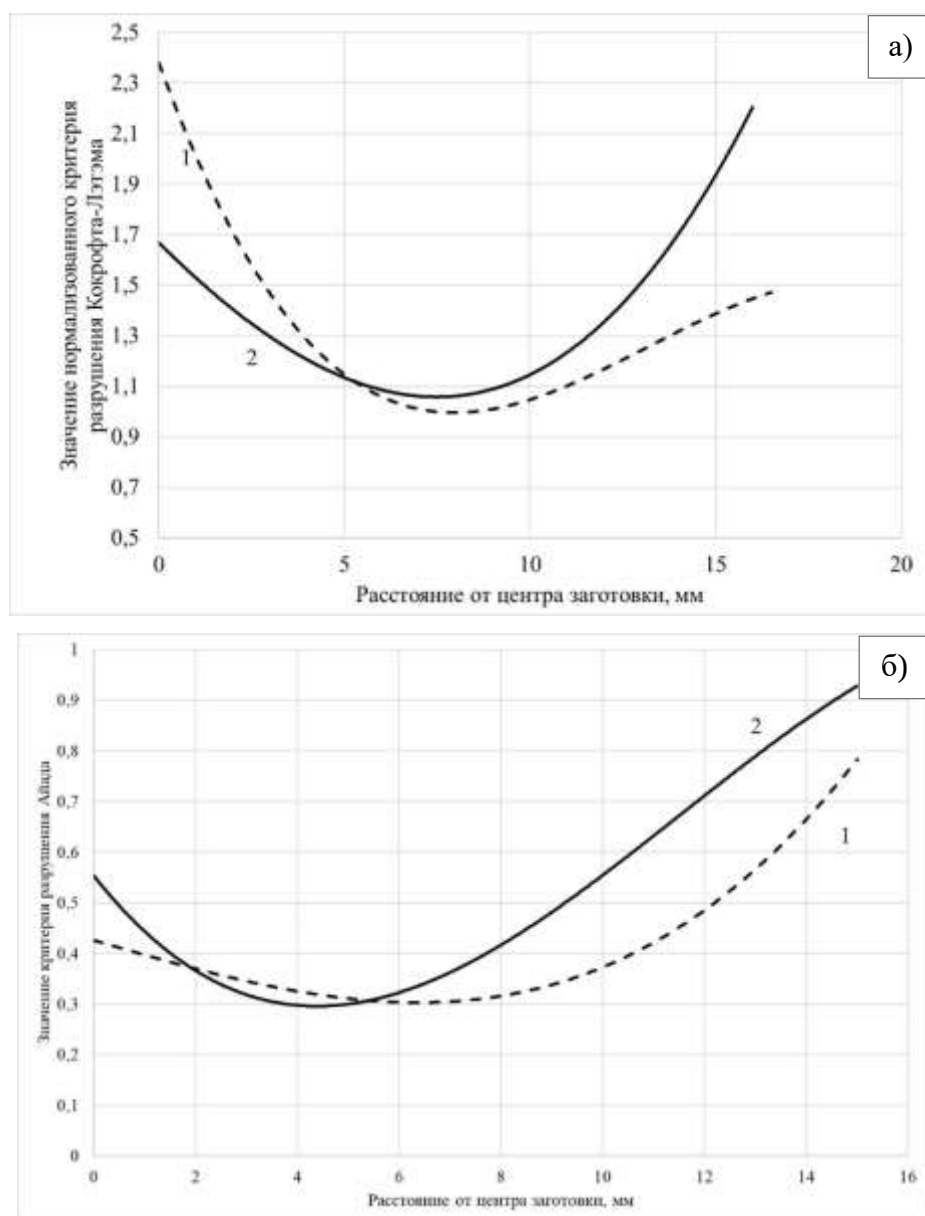


Рисунок 93. Изменение значений нормализованного Критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (а) и критерия разрушения Айада (б) вдоль радиуса заготовки при прошивке с углом подачи валков 15 (1) и 18 (2) градусов

Нормализованный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма при прошивке с углом подачи валков 15 градусов принимает значение в центре заготовки в 1,4 большее, чем при прошивке с углом подачи валков 18 градусов (рис. 93, а). То есть риск разрушения при прошивке с углом подачи валков 15 градусов выше, чем при 18 градусах, что соответствует опытным прокаткам. НКРКЛ на поверхности заготовки имеет обратную зависимость. Значения критерия разрушения Айада при прошивке с углом подачи валков 18 градусов в 1,3 раза выше, чем при прошивке с углом подачи 15 градусов (рис. 93, б), то есть риск разрушения при угле подачи 18 градусов выше, что не соответствует опытным прокаткам.

За исключением случая прошивки при угле подачи 15 градусов с использованием НКРКЛ, во всех остальных (рис. 93) риск разрушения на поверхности выше, чем в центре заготовки, что не соответствует опытным прошивкам, так как разрушение наблюдали в центре заготовки, а не на поверхности. Вероятным недостатком НКРКЛ и критерия разрушения Айада может являться использование при расчете приращения накопленной деформации и интегрирование по накопленной деформации по формулам (1) и (2). По данным [189,190] значения накопленной деформации на поверхности заготовки при различных схемах винтовой прокатки могут в несколько раз превышать значения накопленной деформации в центре заготовки.

Стоит отметить, что использование НКРКЛ было эффективным в рамках исследований [156], но неэффективным в рамках работ [189,190]. При этом, в работе [156,172] коэффициент вытяжки составлял 1,3, в работах [189,190] – 4,3. При винтовой прошивке в рамках данной работы коэффициент вытяжки достигал 1,4. С точки зрения дальнейших исследований по прогнозированию деформируемости в процессах винтовой прокатки представляет интерес определение «чувствительности» НКРКЛ при изменении коэффициента вытяжки.

В работах [24,156,172,189,190] для оценки вероятного разрушения предложено использовать коэффициент жёсткости напряжённого состояния (уравнение (3)).

Значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния был также рассчитан для точек P1-P8. Для этого использованы значения параметров «mean stress» (среднее напряжение) и «stress effective» (интенсивность напряжений), рассчитанные с помощью пост-процессора DEFORM. По результатам измерений построили кривые, представленные на рис. 94. Чем выше значение коэффициента жёсткости напряжённого состояния, тем вероятнее разрушение. При угле подачи 15 градусов значение коэффициента жёсткости в центре заготовки в 1,15 раза выше, чем при прошивке с углом подачи 18 градусов. Данные рис. 94 показывают, что разрушение наиболее вероятно в центре заготовки, что соответствует опытным прошивкам.

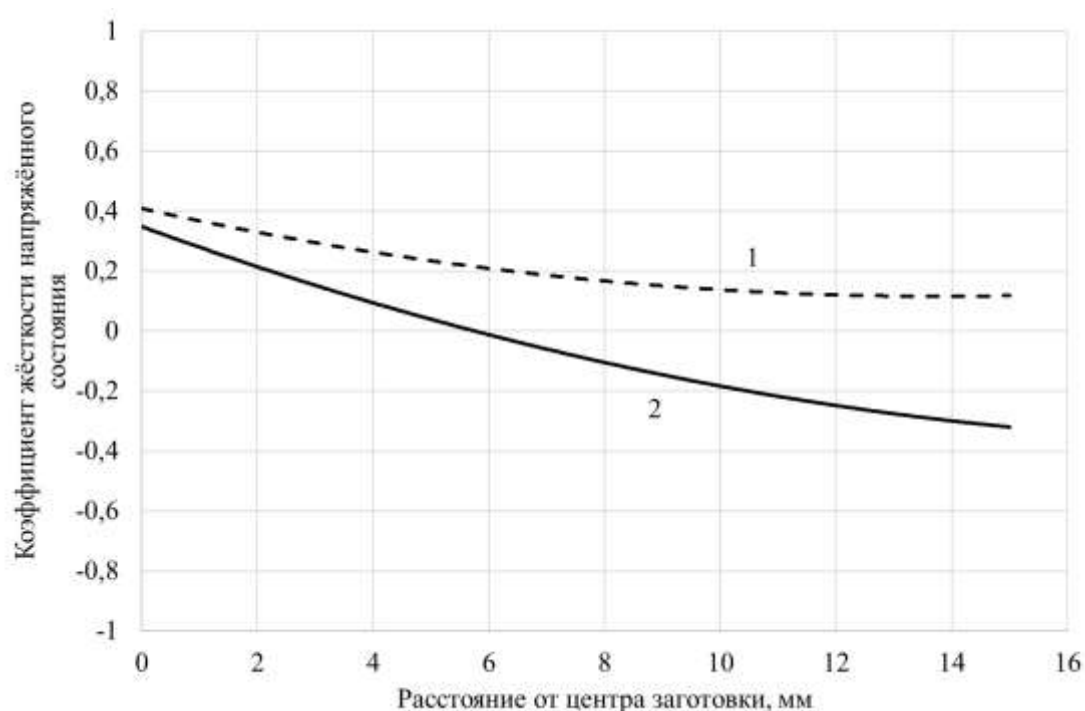


Рисунок 94. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния в поперечном сечении перед носиком оправки при моделировании прошивки с углом подачи 15 (1) и 18 (2) градусов.

С точки зрения прогнозирования вероятного разрушения эффективным является построение зависимости в координатах «накопленная деформация – коэффициент жёсткости напряжённого состояния» вдоль траектории движения точки [24]. При этом эффективность использования подобной методики показана для различных материалов и схем винтовой прокатки [156,17,2189,190]. По результатам моделирования в DEFORM для точек, лежащих в центре заготовки, при прошивке при угле подачи 15 градусов и 18 градусов построили указанные траектории (рис. 95). В постпроцессор DEFORM рассчитали изменение по времени интенсивности скорости деформации («strain rate effective»). Результаты расчёта загрузили в Microsoft Excel, численно проинтегрировали по времени, получив значения накопленной деформации на каждом шаге расчёта. Используя рекомендации по расчёту значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния и накопленной деформации [169], а также результаты испытаний на сжатие и растяжение образцов из стали 50, изложенные в [191], нанесли две точки на диаграмму рис. 10 и построили линию тренда с использованием экспоненциальной зависимости, получив приближённый вид кривой пластичности (линия 3 на рис. 95). Если траектория оказывается выше кривой пластичности – в точке наступает разрушение [25]. По данным рис. 95 при прошивке при угле подачи валков 15 градусов в центре заготовки наступает разрушение,

при угле подачи 18 градусов разрушение не происходит, что соответствует опытным прошивкам.

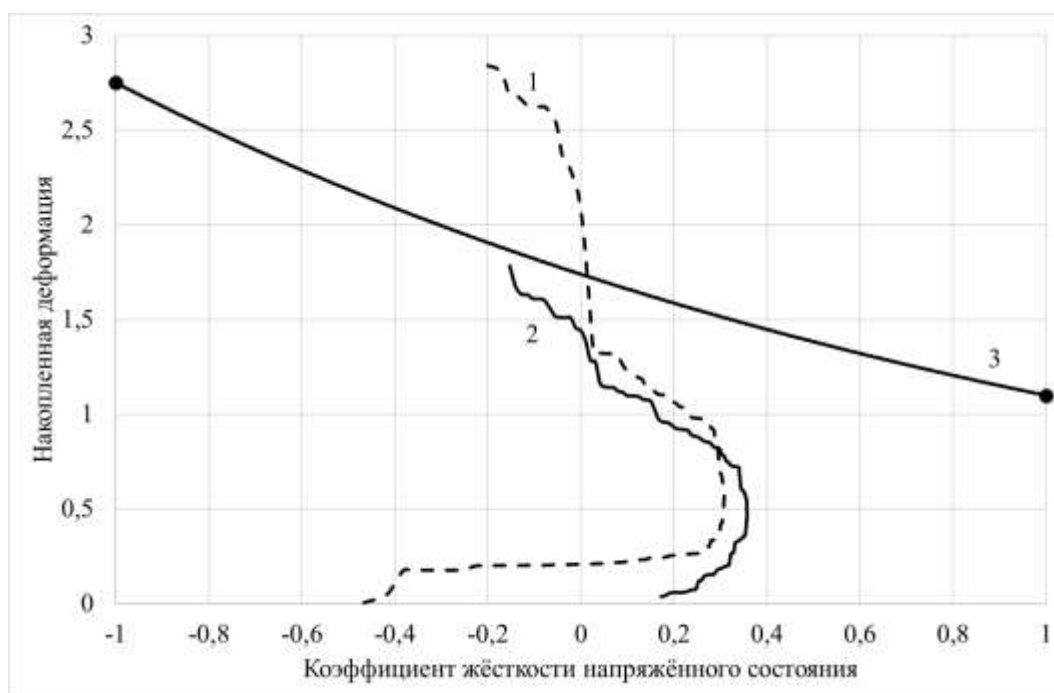


Рисунок 95. Траектории точек, расположенных на оси заготовки, в координатах «накопленная деформация - коэффициент жёсткости напряжённого состояния» при моделировании прошивки с углом подачи 15 (1) и 18 (2) градусов и оценка кривой пластичности (3)

3.4 Выводы по Главе 3

1. Проведённые исследования позволили установить, что применение нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в условиях двухвалковой прокатки обладает определённой эффективностью, однако его использование при моделировании трёхвалковой РСП с целью прогнозирования разрушения неэффективно.

2. При исследовании процесса трёхвалковой РСП с помощью DEFORM глубина утяжины на 20% меньше при 800°C, чем при 750°C, следовательно, моделирование, как и опытные прокатки показало, что пластичность материала заготовок при 800°C выше.

3. Предложена методика прогнозирования разрушения металла в выбранной точке заготовки при винтовой прокатке на основе построения графических зависимостей накопленной деформации от коэффициента жёсткости напряжённого состояния. Как показало сравнение с результатами опытных прокаток, предложенная методика эффективна как при двухвалковой, так и при трёхвалковой винтовой прокатке.

4. В результате опытных прошивок партий заготовок с дном диаметром 33, 5 мм при угле подачи валков 15 градусов наступает разрушение в осевой зоне заготовки, при угле подачи 18 градусов и изменении параметров настройки стана разрушение отсутствует.

5. Для прогнозирования вероятного разрушения, как показало сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов, нецелесообразно использование критерия разрушения Айада (Ayada). Использование нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма эффективно для прогнозирования разрушения в центре заготовки и неэффективно при прогнозировании вероятного разрушения вблизи и на поверхности заготовки.

6. Построение траекторий точек в координатах «накопленная деформация-коэффициент жёсткости напряжённого состояния» с одновременным построением оценки кривой пластичности эффективно и позволяет, в рамках проведённых исследований, однозначно спрогнозировать возникновение осевого разрушения в процессе прошивки.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ В ЧЕТЫРЁХВАЛКОВОМ СТАНЕ

Совместное использование компьютерного моделирования и экспериментальной оценки, как показывают результаты [156, 165-168, 192-200] и исследования в рамках Глав 2-3, эффективно при исследовании и прогнозировании формоизменения заготовок при различных способах винтовой прокатки.

В рамках данной главы представлены результаты, связанные с разработкой и исследованием четырёхвалковой винтовой прокатки с оригинальной схемой расположения валков с использованием компьютерного и физического моделирования, созданию действующей модели и лабораторно-промышленного стана.

4.1 Компьютерное моделирование процесса прошивки в проектируемом четырёхвалковом стане винтовой прокатки

При производстве бесшовных труб широко применяется прошивка в станах винтовой прокатки. По сравнению с другими способами получения полых трубных заготовок (гильз) прошивка в станах винтовой прокатки обладает рядом преимуществ, в том числе, по производительности и энергозатратам [1,21].

В настоящее время для винтовой прошивки используют двухвалковые и трёхвалковые станы. При этом каждый из способов имеет определённые недостатки.

При прошивке в двухвалковой клети используются различные направляющие инструменты. Это могут быть неподвижные линейки (стан Штифеля), неприводные ролики (стан Маннесманна), неприводные диски (стан Дишера). При использовании любого из этих направляющих инструментов либо вследствие их неподвижности (линейки), либо по причине того, что направляющий инструмент вращается за счёт контакта с заготовкой, из очага деформации отводится энергия [1, 201, 202]. При прошивке в двухвалковых станах вследствие особенности конструкции и расположения деформирующего инструмента у получаемых гильз наблюдается овальность [24].

При прошивке в трёхвалковом стане хоть и больше, по сравнению с двухвалковой схемой, площадь контакта с прошиваемой заготовкой, и есть предпосылка к снижению овальности, однако имеет место кольцевая зона растягивающих напряжений в поперечном сечении заготовки [24]. При прошивке оправка смещается в эту ослабленную зону, отклоняется от оси и это ведёт к разностенности получаемых гильз [1,24].

Для исследований процессов винтовой прокатки в настоящее время широко применяется компьютерное моделирование. С его помощью можно оценить эффективность применения оправок различной формы [121,139], оценить влияние настроек стана на изменение энергосиловых параметров [105], выявить возможные причины реологических отличий при различных схемах прокатки [136,203-206]. Использование вычислительных сред конечно-элементного анализа также позволяет оценить возможность реализации новой технологической схемы [147], возможность получения изделий из конкретного металла или сплава [145,148,], повысить качество продукции [127, 207-210] или предложить новый способ прокатки [171].

Опыт исследований процессов винтовой прокатки, как и других процессов ОМД, показывает, что одними из наиболее значимых критериев оптимизации любого способа обработки давлением являются показатели качества получаемых изделий и расход энергии при деформации.

Для повышения качества получаемых гильз и оптимизации энергозатрат является актуальным разработка способа прошивки и проекта стана для его реализации, который бы совмещал в себе преимущества существующих способов и минимизировал бы их недостатки.

Целью исследований являлась разработка и моделирование способа прошивки в стане винтовой прокатки без направляющего инструмента.

Предлагаемый способ прошивки [211] заключается в деформации заготовки четырьмя валками: двумя одинаковыми рабочими валками чашевидной формы и двумя одинаковыми вспомогательными валками грибовидной формы. Все валки предложено сделать приводными, чтобы предотвратить отвод энергии из очага деформации подобно тому, как это происходит при прошивке в двухвалковых станах. Увеличение количества валков позволит создать более замкнутый калибр. Площадь контакта с заготовкой увеличится, причём этому ещё будет способствовать и грибовидная форма вспомогательных валков. При деформации энергия будет распределяться по поверхности заготовки более равномерно, способствуя повышению качества поверхности получаемых гильз. При предполагаемой схеме появится возможность получения гильз с меньшей, чем при двухвалковой прошивке овализацией, однако сохранится возможность «наводить» эффект Маннесманна [1,24] для того, чтобы происходило самоцентрирование оправки [1]. При этом не будет возникать кольцевой зоны растягивающих напряжений как при трёхвалковой прокатке и из-за этого не будет расти разностенность гильз.

Для того, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность реализации предлагаемого способа и сравнить его с двухвалковой и трёхвалковой прошивкой, провели

компьютерное моделирование в вычислительной среде конечно-элементного анализа QForm [107].

При подготовке данных для компьютерного моделирования в QForm создали объёмные модели валков, оправок, заготовки и направляющего инструмента с помощью SolidWorks [164]. Для двухвалковой прошивки использовали размеры инструмента стана МИСиС-130Д [1], для трёхвалкового стана – МИСиС-100Т [1]. Сборка для моделирования прошивки в четырёхвалковом стане представлена на рис. 96. Созданные модели спозиционировали в сборке в SolidWorks, сохранили и загрузили в редактор геометрии QShape [107].

При задании начальных и граничных условий в QForm приняли температуру исходной заготовки равной 1150°C. Материал заготовки - сталь 45. Для пары «валок-заготовка» фактор трения по Зибелю задали равным 10, а для пары «оправка заготовка» - 0,4. Моделировали прошивку заготовок диаметром 60 мм и длиной 200 мм. Для каждого из трёх моделируемых способов использовали одну и ту же оправку с диаметром калибрующего участка 45 мм. При создании деталей и сборок в SolidWorks и задании условий перед моделированием в QForm учитывали данные, представленные в табл. 7. Теплообмен между заготовкой и инструментами в QForm задавали как «простой», более подробно об этом режиме можно узнать в [107].

Таблица 7. Параметры моделируемых способов прошивки

Параметр	Двухвалковая прошивка в стане с направляющими линейками	Трёхвалковая прошивка	Прошивка в четырёхвалковом стане
Рабочие валки:			Рабочие валки /Вспомогательные валки
• диаметр в пережиме, мм	420	140	150 / 110
• длина бочки, мм	320	180	200 / 200
• Частота вращения, мин ⁻¹	60	60	60 / 80
Угол:			
• раскатки	0	-5	7 / -7
• подачи	18	18	15 / 15
Обжатие в пережиме, %	13	11	9

Обжатие перед носиком оправки, %	6	6	6
-------------------------------------	---	---	---

По табл. 7 видно, что среди моделируемых способов при прошивке в четырёхвалковом стане имеет место наименьшее обжатие в пережиме – 9%. При таком значении обжатия создаётся возможность для прошивки малопластичных сталей и сплавов.

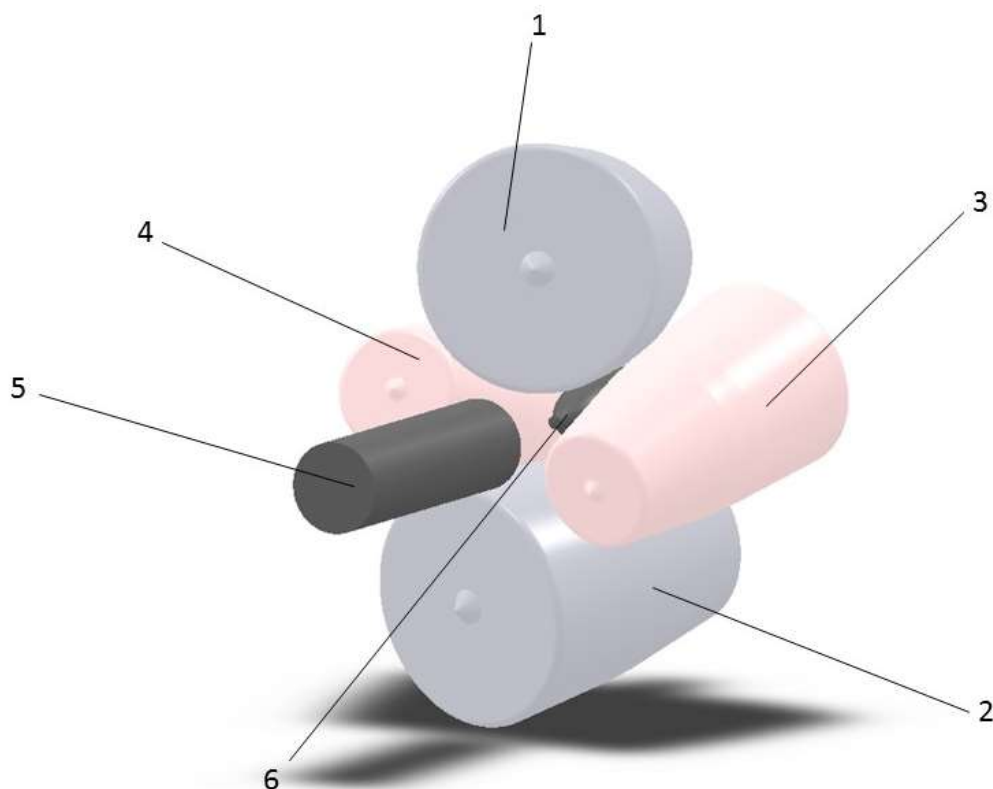
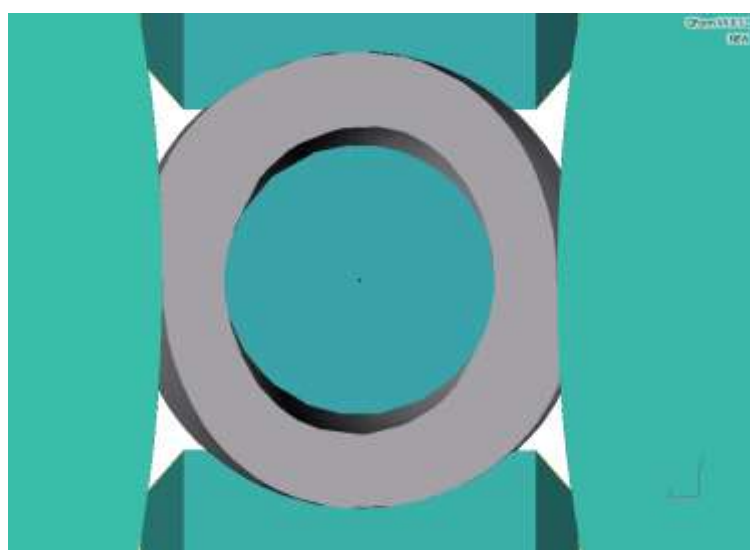


Рисунок 96. Объёмная модель, подготовленная в Solidworks, для компьютерного моделирования в QForm процесса прошивки в четырёхвалковом стане: 1,2 – рабочие валки, 3,4 – вспомогательные валки, 5 – заготовка, 6 – оправка

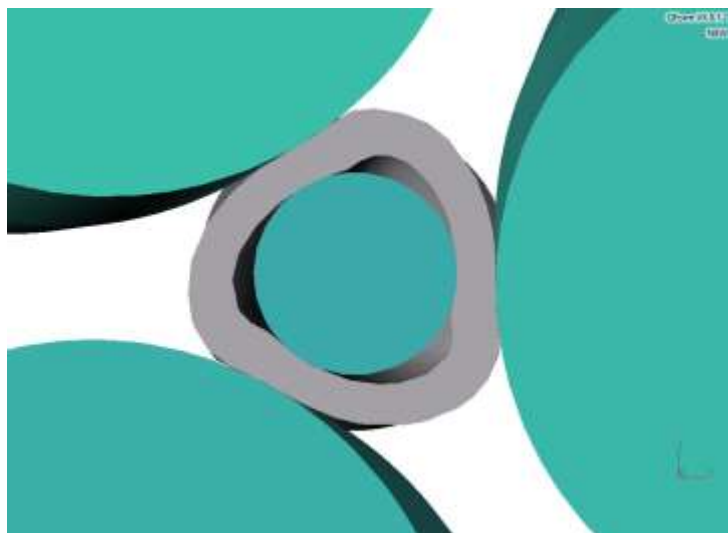
По результатам моделирования прошивок в QForm получили модели гильз (рис. 97) и визуально оценили разницу в формоизменении прошиваемых заготовок в очаге деформации в пережиме (рис. 98).



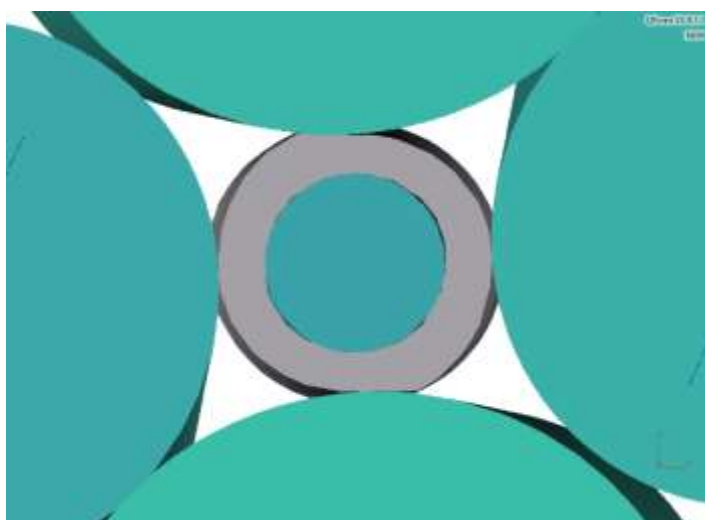
Рисунок 97. Вид гильз со стороны торца после прошивки в двухвалковом стане (а), трёхвалковом стане (б) и четырёхвалковом стане (в)



а



б



в

Рисунок 98. Формоизменение в пережиге: а – двухвалковый стан с линейками, б – трёхвалковый стан, в – четырёхвалковый стан

По рис. 98 видно, что характер формоизменения в пережиге, с точки зрения формирования качества получаемых гильз, наиболее благоприятный при прошивке в четырёхвалковом стане: меньше овальность и нет течения в зазоры между валками. Если отталкиваться от рис. 97, то сложно установить визуально, насколько отличие характера деформации в пережиге по предлагаемому способу от двухвалковой и трёхвалковой прошивки сказывается на различии в овальности и разностенности гильз.

С целью количественной оценки овальности и разностенности полученных при моделировании в QForm гильз данные из QForm передали в SolidWorks для проведения измерений. Измеряли диаметр гильз в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 20 мм по длине. В каждом сечении диаметр измеряли 8 раз, через каждые 22,5

градуса (рис. 99). По результатам восьми измерений выявляли наибольшее и наименьшее значение наружного диаметра. Вычисляли отношение наибольшего диаметра к наименьшему и принимали его в качестве показателя овализации. На рис. 100 показаны данные по овализации для сечений гильз, полученных прошивкой в двухвалковом, трёхвалковом станах и стане без направляющего инструмента.

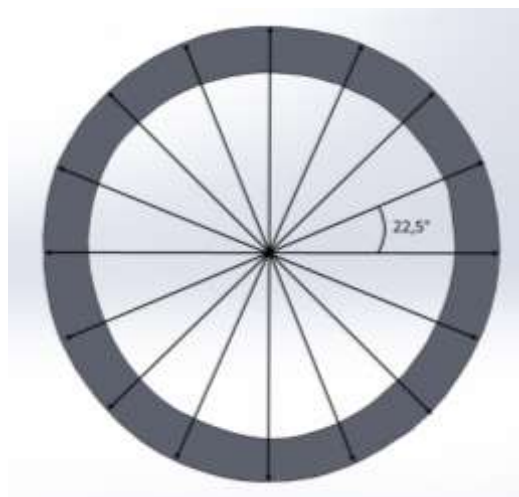


Рисунок 99. Схема измерения наружного диаметра для определения овализации сечения

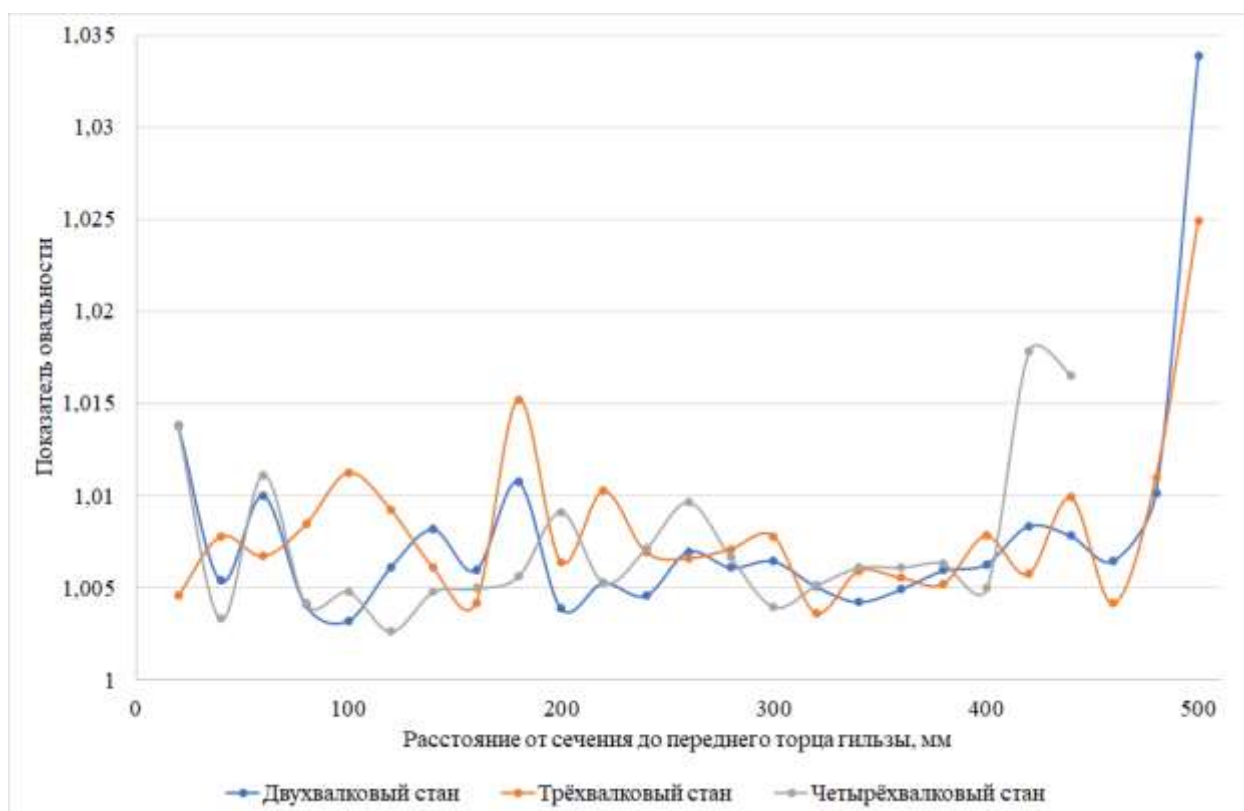


Рисунок 100. Изменение показателя овальности по длине гильз, полученных при моделировании прошивки в двух-, трёх- и четырёхвалковом станах винтовой прокатки

По рис. 100 видно, что овальность по предложенному способу как минимум не выше, чем при двухвалковой или трёхвалковой прошивке. Для более детального анализа данные рис. 100 обработали статистически (табл. 8).

Таблица 8. Результаты статистического анализа данных по овализации гильз

Статистические оценки	Двухвалковая прошивка	Трёхвалковая прошивка	Прошивка в стане без направляющего инструмента
Среднее значение овальности	1,008	1,008	1,007
Дисперсия	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Среднеквадратичное отклонение	0,006	0,004	0,004

По табл. 8 и рис. 100 видно, что из всех смоделированных способов прошивка в четырёхвалковом стане позволяет получать гильзы с наименьшей овальностью, в первую очередь в приторцовых областях гильзы (рис. 100), то есть на нестационарной стадии.

Сравнили также изменение толщины стенки по длине прошитых гильз. Схема измерения была аналогичной схеме, представленной на рис. 99. Измеряли толщину стенки в 16 точках каждого сечения с шагом 22,5 градуса. После измерений для каждого сечения выбирали максимальное и минимальное значение толщины стенки и рассчитывали их отношение. На рис. 101 показано как это отношение изменяется по длине гильз после прошивок по различным схемам.

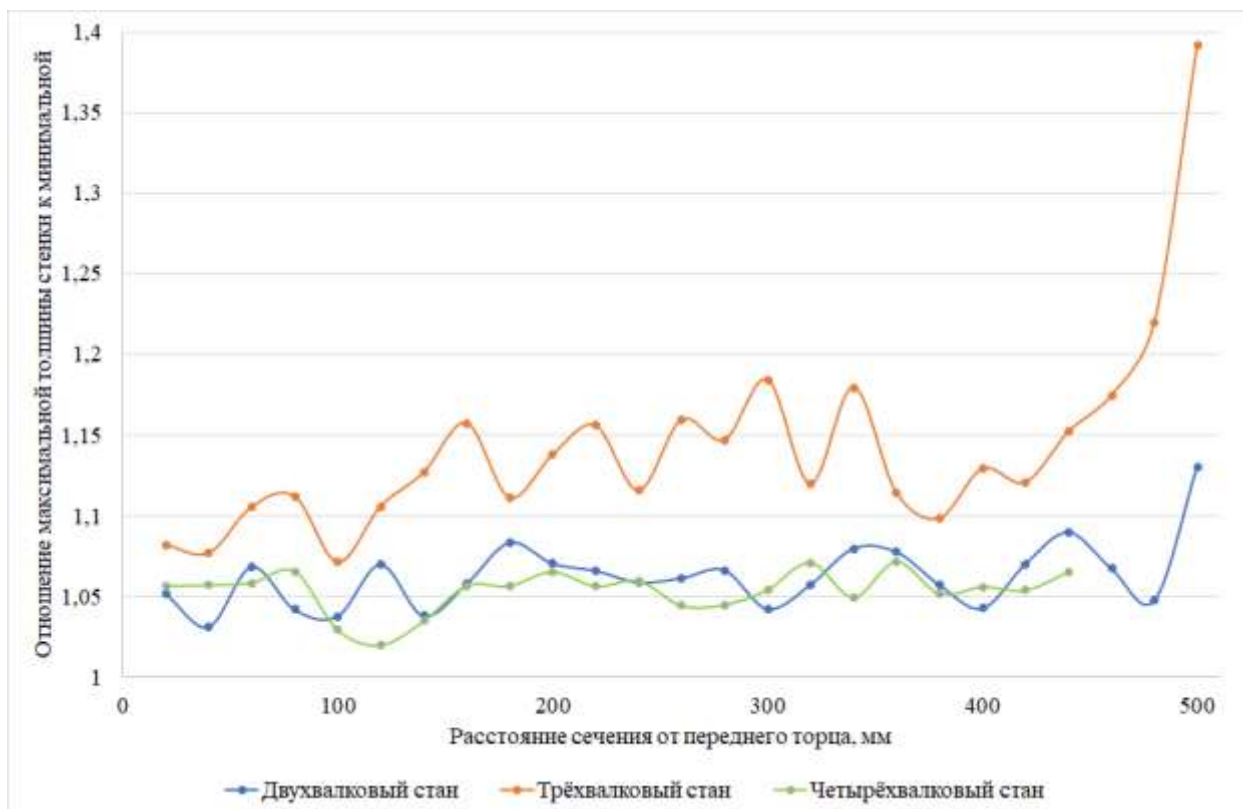


Рисунок 101. Изменение разностенности по длине гильз по результатам моделирования двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой прошивки

По рис. 101 видно, что среди трёх смоделированных способов прошивки в стане без направляющего инструмента позволяет получить гильзу с наименьшей разностенностью.

Важным показателем при оценке разных способов получения одного и того же вида металлопродукции являются энергозатраты на деформацию. По результатам моделирования в QForm построили кривые усилия на валках и оценили работу, осуществляемую валками (рис. 102).

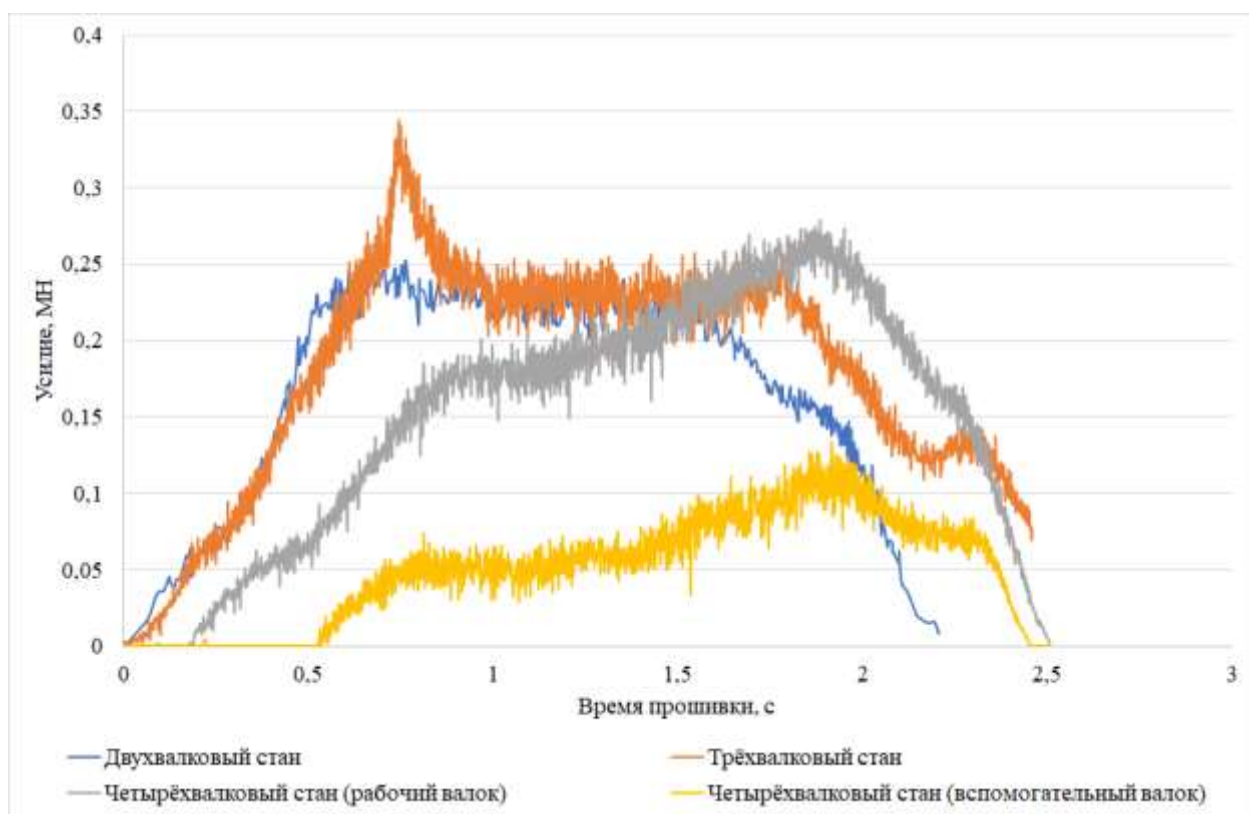


Рисунок 102. Усилие на валок при прошивке в двухвалковом, трёхвалковом станках, на рабочий и вспомогательный валки четырёхвалкового стана

Вследствие разного обжатия в пережиме (табл. 8) непосредственно сравнивать усилия было бы некорректно, есть возможность сопоставить порядок усилий, а также значений работы, осуществляемой валком каждого из станков (табл. 9).

Таблица 9. Энергосиловые показатели смоделированных прошивок

Показатель	Двухвалковая прошивка	Трёхвалковая прошивка	Прошивка в четырёхвалковом стане	
			Рабочий валок	Вспомогательный валок
Работа, кДж	170,84	199,7	165	3,3

Для дальнейшего сравнения двух-, трёх- и четырёхвалковой прошивок провели компьютерное моделирование с помощью QForm. Моделировали процессы при равных диаметрах валков, обжатии в пережиме (10%) и перед носиком оправки (6%), одинаковых размерах исходной заготовки (60 мм), частоте вращения валков (60 об/мин). По результатам моделирования в QForm оценили значения энергосиловых параметров при различных

схемах прошивки. Согласно виду кривых усилия (рис. 103) 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 носком оправки на установившейся стадии прошивки (табл. 10). 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.

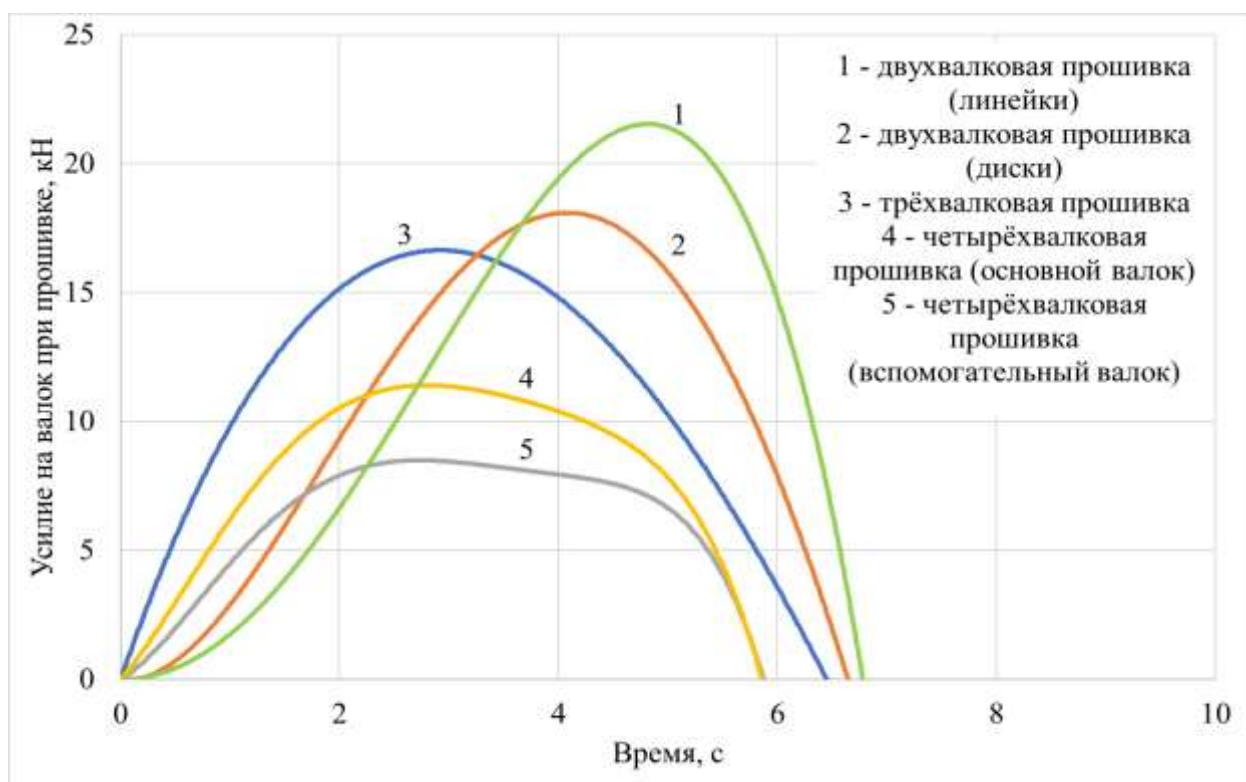


Рисунок 103. Усилия на валок при различных схемах прошивки по результатам моделирования в QForm

Таблица 10. 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	27,0
Математическое ожидание, [МПа]	-19,9	-20,0	-24,0	-20,0
Среднеквадратичное отклонение, [МПа]	26,6	27,7	30,4	28,0

По результатам исследований показано, что, отталкиваясь от результатов компьютерного моделирования, процесс прокатки в четырёхвалковом стане возможен. В следующих двух разделах показано, как осуществляется прокатка и прошивка пластилиновых заготовок в действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки.

4.2 Исследование процесса винтовой прокатки в четырёхвалковой клети

Одним из способов получения сплошных круглых заготовок является винтовая прокатка в трёхвалковых станах. По сравнению с другими способами, например, прессованием, данный процесс более производителен и менее энергозатратен [1]. При прокатке заготовок в трёхвалковых станах имеет место осевое и кольцевое разрушение заготовок [21], причины которого до конца однозначно не выявлены и прогнозировать которое сложнее, чем при двухвалковой прокатке [78,84,96, 212].

Целью исследований являлось создать действующую модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки и осуществить прокатку заготовки из модельного материала в этом стане, а также сравнить энергосиловые параметры, напряжённо-деформированное и кинематическое состояние при трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатке с помощью компьютерного моделирования.

Действующую модель стана создавали исходя из имеющихся возможностей оборудования для изготовления компонент модели и данных работ [211,213-216]. Стан имеет четыре валка, все валки приводные, два валка имеют чашевидную форму и одинаковые размеры, другие два валка имеют грибовидную форму и одинаковые размеры, отношение диаметра в пережиме чашевидного валка к диаметру в пережиме грибовидного валка составляет 1,4, угол раскатки для чашевидных валков составляет 7° , для грибовидных валков - 7° , угол подачи для всех валков составляет от 15° , обжатие в пережиме 8%. Угол подачи 15° согласно данным [25] позволит «смягчить» схему напряженно-деформированного состояния и максимально снизит вероятность осевого разрушения заготовки. Угол раскатки 7° для чашевидных валков необходим для размещения главного привода. Для грибовидных валков угол раскатки 7° также необходим для размещения их главного привода. Чашевидные валки осуществляют основную деформацию металла, а грибовидные необходимы для закрытия очага деформации в плоскости, перпендикулярной основным валкам и создания дополнительных тянущих сил. Для восприятия соответствующих усилий прокатки конструкция валкового узла должна быть выполнена с соотношением диаметра рабочего валка в пережиме к диаметру вспомогательного валка в пережиме 1,4. Вследствие наличия четырёх приводных валков увеличивается площадь контакта заготовки с деформирующим инструментом и образуется достаточно замкнутый калибр. Это позволяет повысить устойчивость поперечного сечения и точность получаемых прутков. Наличие привода на каждом валке позволит снизить износ деформирующего инструмента

На рис. 104 показаны модели валков четырёхвалкового стана винтовой прокатки.

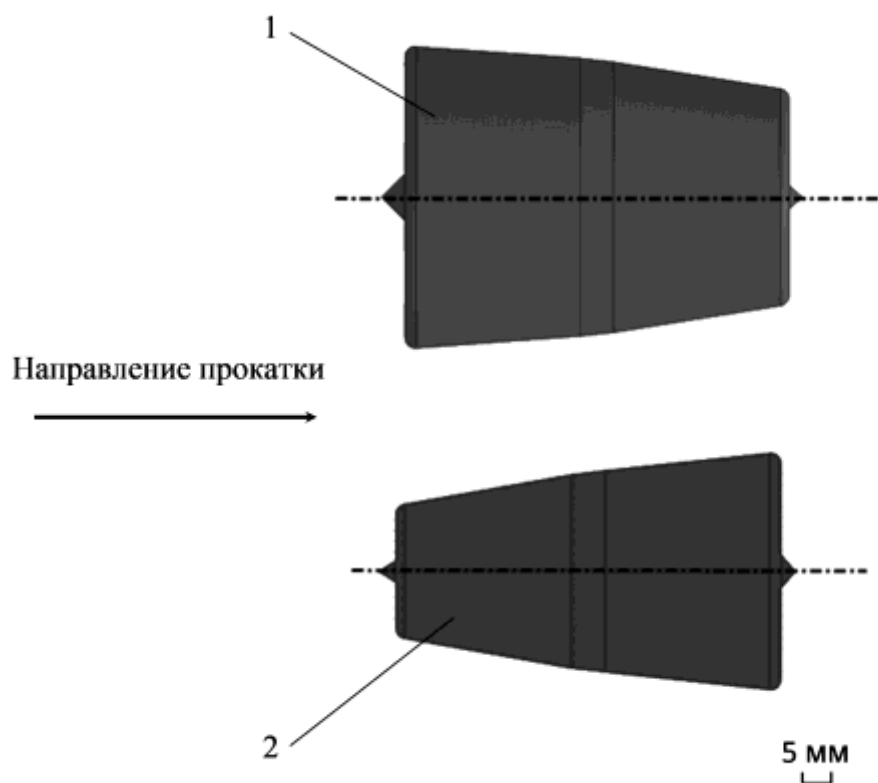


Рисунок 104. Модели рабочего (1) и вспомогательного валков (2)

При создании действующей модели в основу конструкции клетки были положены следующие принципы: использование станины закрытого типа, расположение рабочих валков при постоянных углах подачи и раскатки, вывод исполнительного механизма установки валков из под прямого действия усилия прокатки, что не только упростило конструкцию модели прокатного стана, но и условия её эксплуатации

Модель (рис. 105) состоит из рабочей клетки 1, индивидуальных главных приводов рабочих валков - мотор-редукторов 2 и шпиндельных передач 3, входной стороны с обогреваемой проводкой 4 и выходной стороны 5.

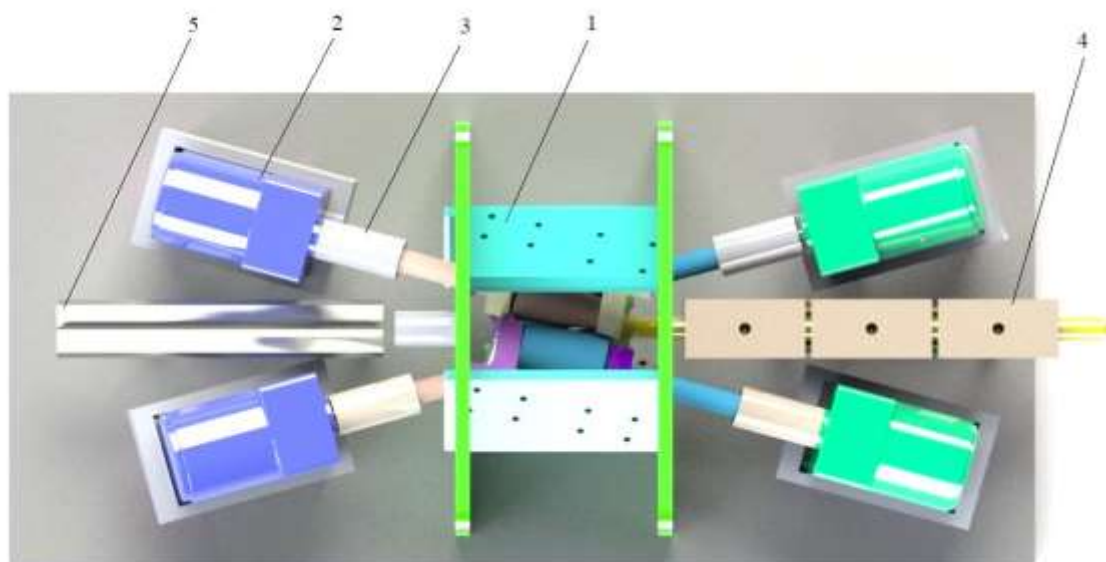


Рисунок 105. Схема расположения основных механизмов и устройств модели: 1 – рабочая клеть, 2 – индивидуальные главные приводы - мотор-редукторы, 3 – шпиндельные устройства, 4 - проводка с входной стороны, 5 – проводка с выходной стороны.

На основе представленных выше параметров и данных рис. 104-105 создали действующую модель стана четырёхвалковой винтовой прокатки (рис. 106) с использованием цифровых технологий изготовления.

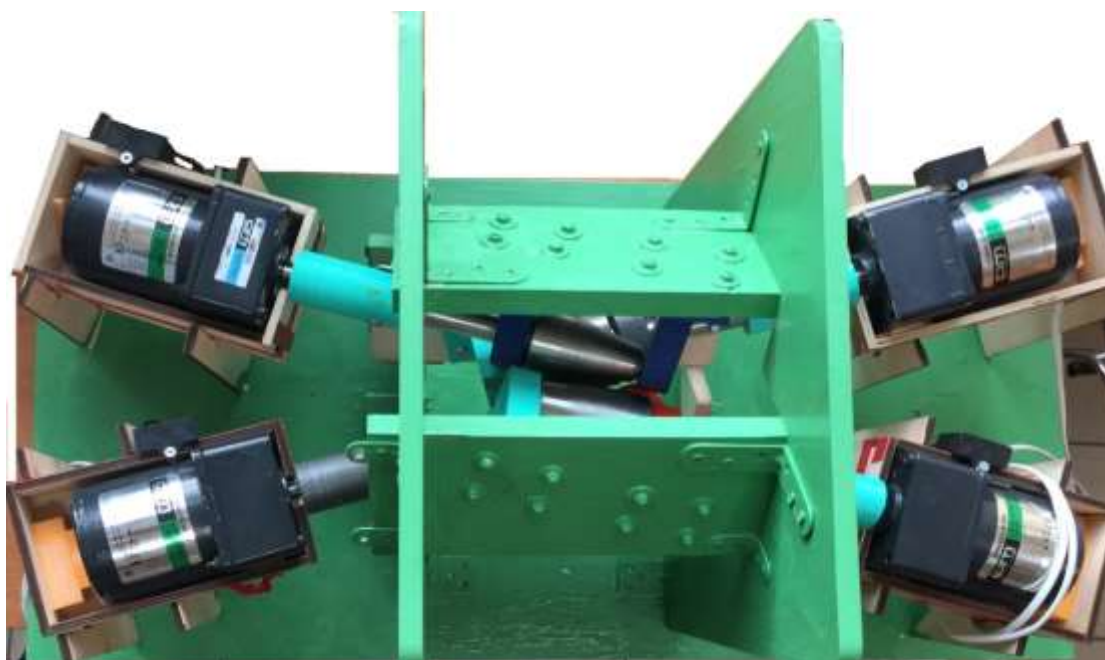


Рисунок 106. Четырёхвалковый лабораторный стан винтовой прокатки (действующая модель)

С целью демонстрации возможности четырёхвалковой прокатки осуществили деформацию заготовки из пластилина (Roma Plastilina No. 1) в действующей модели. Исходная заготовка имела длину 120 мм и диаметр 25 мм. При прокатке калибр, образуемый валками в пережиме, составлял 20 мм. Полученная после прокатки заготовка имела характерные утяжины на переднем и заднем торцах подобно заготовкам, имеющим утяжину после прокатки в двух- и трёхвалковых станах [21] (рис. 107). Также, как и при прокатке по двух- и трёхвалковой схемам чётка видна винтовая линия на поверхности заготовки.

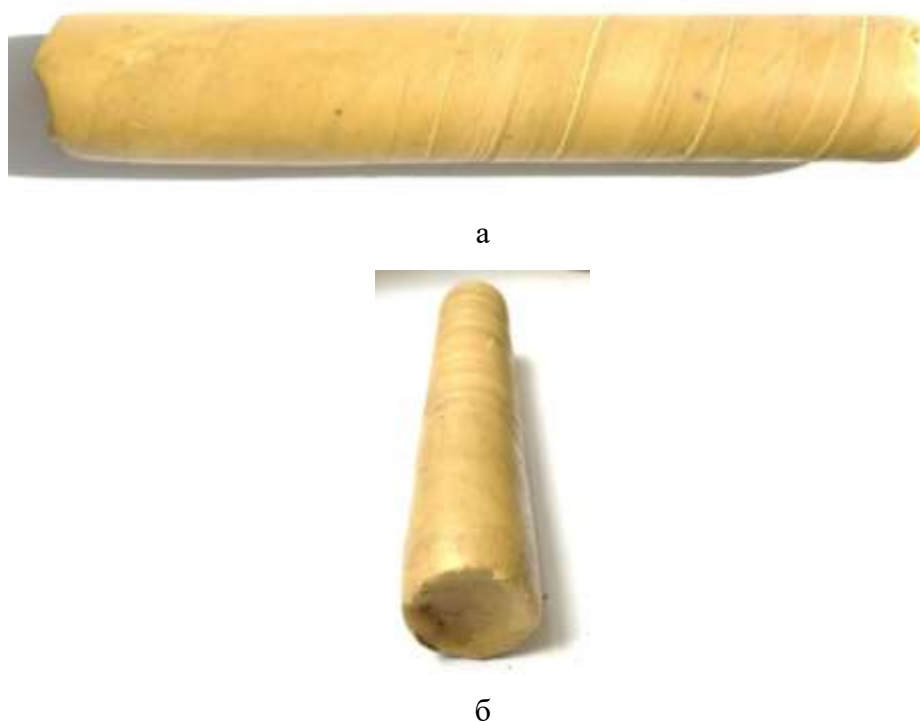


Рисунок 107. Заготовка из пластилина, прокатанная в четырёхвалковом стане: виды на цилиндрическую поверхность (а) и со стороны торца (б)

Для эффективного анализа процессов винтовой прокатки широко применяются различные вычислительные среды конечно-элементного анализа. Моделировали опытные прокатки заготовок из пластилина в лабораторном стане с помощью QForm. Для моделирования предварительно создали в SolidWorks сборку, состоящую из валков, заготовки, направляющих и толкателя (рис. 108). Сборку сохранили в формате .step, загрузили в редактор геометрии QShape, создали сетку для всех элементов сборки, оси вращения для рабочих и вспомогательных валков. Свойства пластилина, необходимые для расчёта формоизменения заготовки в QForm, задавали в соответствии с данными работы

[217] (рис. 109). Смазку в QForm выбирали таким образом, чтобы фактор трения для пар «заготовка-валок» составлял 5 по закону трения Зибеля. Скорость вращения валков, углы подачи и раскатки равнялись соответствующим значениям при опытных прокатках.

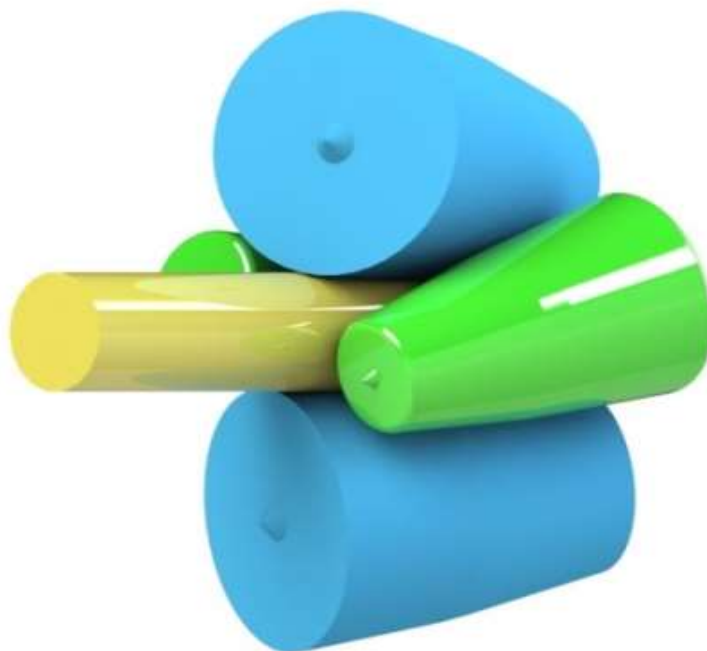


Рисунок 108. Сборка в SolidWorks для последующего моделирования прокатки в четырёхвалковом стане (для удобства отображения не показаны входные и выходные проводки)

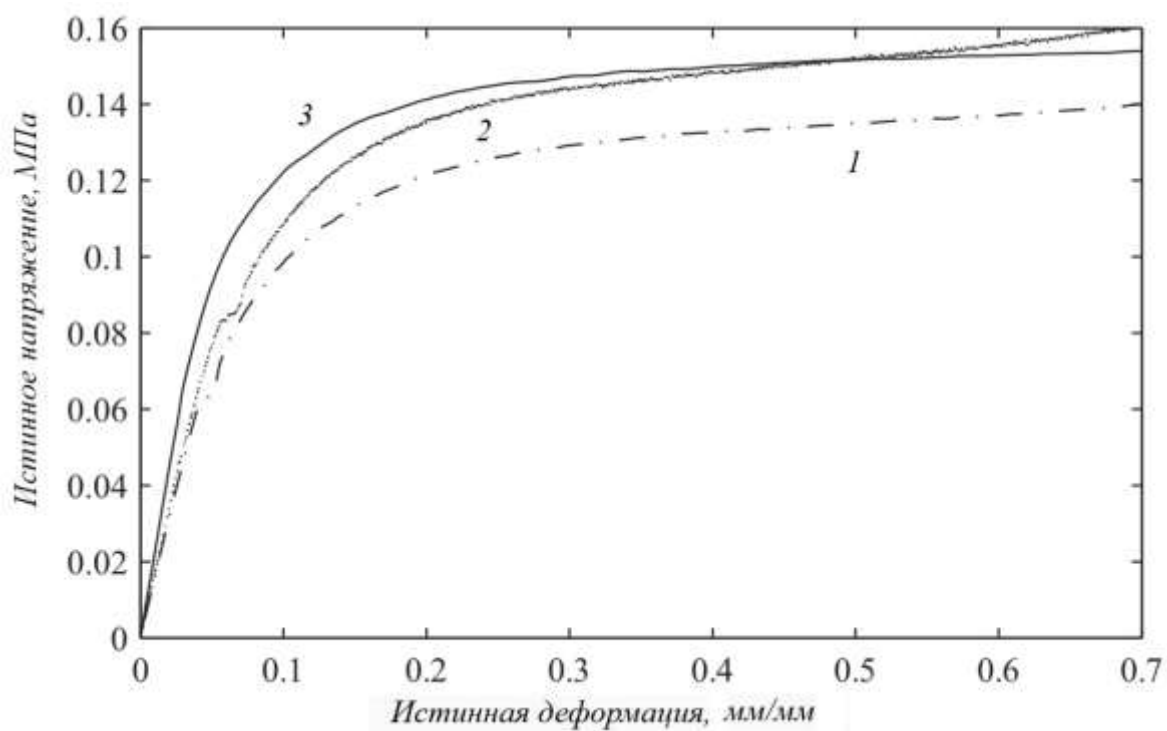


Рисунок 109. Кривые в координатах «истинное напряжение - истинная деформация» для пластилина (Roma Plastilina No. 1) [197] заготовок, использованных при прокатке на лабораторном стане и заданные в пре-процессоре при моделировании в QForm, для разных скоростей сжатия: 1 – 10 мм/мин, 2 – 100 мм/мин, 3 – 500 мм/мин

Сравнили результаты компьютерного моделирования с результатами опытных прокаток (табл. 11).

Таблица 11. Длина заготовки и глубина утяжины на переднем и заднем торце после опытных прокаток и компьютерного моделирования в QForm

	Глубина утяжины на переднем торце, мм	Глубина утяжины на заднем торце, мм	Длина заготовки, мм
Опытные прокатки	4,8	3,6	126,2
Моделирование в QForm	3,53	3,16	129,74

Из табл. 11 видно, что отличие по длине незначительно (примерно 3%). Заметные отличия получили по глубине утяжины на переднем (26%) и заднем торце (12%). Отличия подобного рода по глубине утяжины получены при моделировании РСП прокатки в работе [156]. Возможной причиной подобных отличий является нестационарность деформации в приторцовых областях заготовки [156].

Учитывая приемлемую точность результатов компьютерного моделирования (отличие от экспериментальных данных не составляет 15%) процессов винтовой прокатки с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа при расчёте энергосиловых параметров и определению размеров получаемых изделий, в том числе результаты [102], смоделировали процесс прокатки по трёхвалковой и четырёхвалковой схемам с помощью QForm. По результатам моделирования сравнили изменение наружного диаметра заготовки по длине и энергосиловые параметры для двух схем прокатки.

Моделировали процесс прокатки заготовки диаметром 25 мм на диаметр 20 мм из стали 3Х2ВФ8, так как согласно данным [218] четырёхвалковая схема может проявить свои преимущества именно при прокате легированных сталей с точки зрения энергозатрат.

Для моделирования процессов трёхвалковой и четырёхвалковой прокатки создали в SolidWorks модели соответственно валкового узла стана РСП 14-40 [62] и валкового узла

действующей модели стана (табл. 12). Созданные в SolidWorks (рис. 108,110) модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки материалов в программе QForm для заготовки была выбрана марка стали 3Х2В8Ф. Температура нагрева заготовок принята равной 1200 °С, температура инструмента — 20 °С. Длину заготовки приняли минимальной $l_3 = 100$ мм, но достаточной для формирования полного очага деформации.



Рисунок 110. Сборка в SolidWorks для последующего моделирования прокатки заготовки в стане РСП 14-40 (для удобства отображения не показаны входные и выходные проводки)

Таблица 12. Параметры моделируемых прокаток

Параметр	Трёхвалковая прокатка в стане РСП 14-40	Прокатка по предлагаемому способу	
		Основные валки	Вспомогательные валки
Рабочие валки:			
- диаметр в пережиме, мм	76	50	36
- длина бочки, мм	85	70	70
Частота вращения, мин ⁻¹	60	60	83

угол раскатки, град.	-7	-7	+7
угол подачи, град.	15	15	15

Теплообмен между заготовкой и инструментом в QForm задавали как «простой». При этом температура инструмента постоянна за исключением небольшого поверхностного слоя малой толщины. Тепловой поток подводится или отводится от заготовки к поверхностному слою инструмента в зависимости от знака разности температур между заготовкой и инструментом. Температура заготовки изменяется в соответствии с уравнением нестационарной теплопроводности с учетом теплообмена с окружающей средой по свободной поверхности. Более подробно режим описан в [107]. Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания, фактор трения по Зибелю задавали равным 10.

С целью оценки точности прутка по диаметру при моделировании в QForm провели измерения диаметра в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 15 мм по длине с помощью встроенного инструментария. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли 5 раз, через каждые 36 градусов. По результатам пяти измерений получили средние значения наружного диаметра, дисперсию и среднеквадратичное отклонение (табл. 13). На рис. 111 показаны данные, иллюстрирующие изменение диаметра по сечениям прутков, полученных прокаткой в трёхвалковом и четырехвалковом станах.

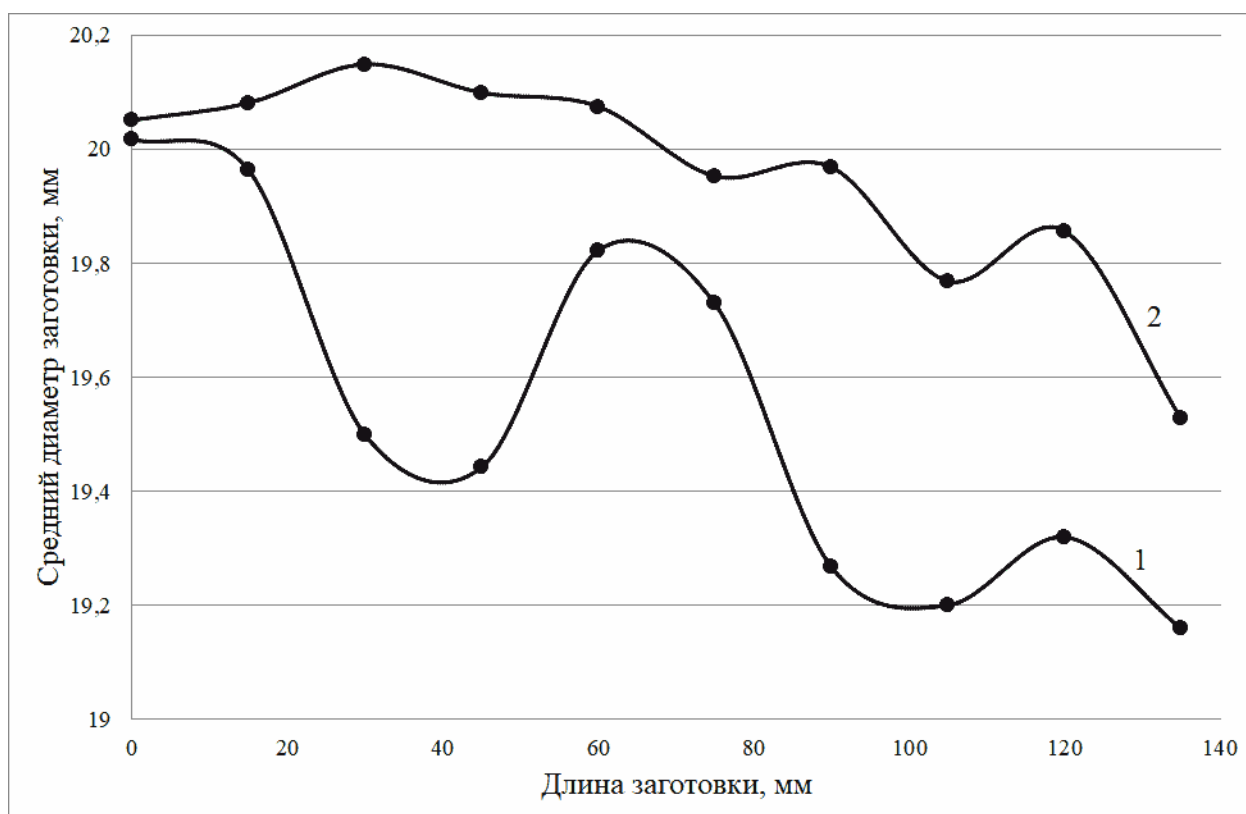


Рисунок 111. Изменение диаметра по длине прутков, полученных при моделировании прокатки в трёх- (1) и четырёхвалковом (2) станах

Таблица 13. Статистические показатели точности прутков по смоделированным схемам

	Среднее значение диаметра полученной заготовки, мм	Дисперсия, мм ²	Среднеквадратичное отклонение, мм
Трёхвалковая прокатка	19,54	0,10	±0,32
Четырёхвалковая прокатка	19,95	0,04	±0,19

Установлено, что прутки, полученные прокаткой в четырехвалковом стане, отличаются большей точностью. При прокатке по трёхвалковой схеме перепад значений диаметра составляет 1,2 мм, при четырёхвалковой схеме – 0,7 мм. Дисперсия диаметра прутка, полученного способом четырёхвалковой прокатки составляет 0,04 мм², что в 2,5 раза меньше, чем дисперсия прутка при трёхвалковой прокатке – 0,10 мм².

По результатам моделирования построили графики усилий на валок для каждого из способов прокатки (рис. 112). Усилие на валок при прокатке в четырёхвалковом стане – как

для рабочего, так и для вспомогательного – на 35-40% меньше, чем при прокатке в трёхвалковом стане. Также по результатам моделирования в QForm построили графики работы для каждого из валков в зависимости от времени процесса прокатки (рис. 113).

Согласно данным рис. 113 для прокатки в трёхвалковом стане необходимо затратить 17,49 кДж ($3 \times 5,83$ кДж), а для прокатки в четырёхвалковом стане – 16,46 кДж ($2 \times 7,93 + 2 \times 0,3$ кДж). То есть при прокатке в четырёхвалковом стане энергии для осуществления формоизменения понадобится на 6% меньше, чем при трёхвалковой схеме.

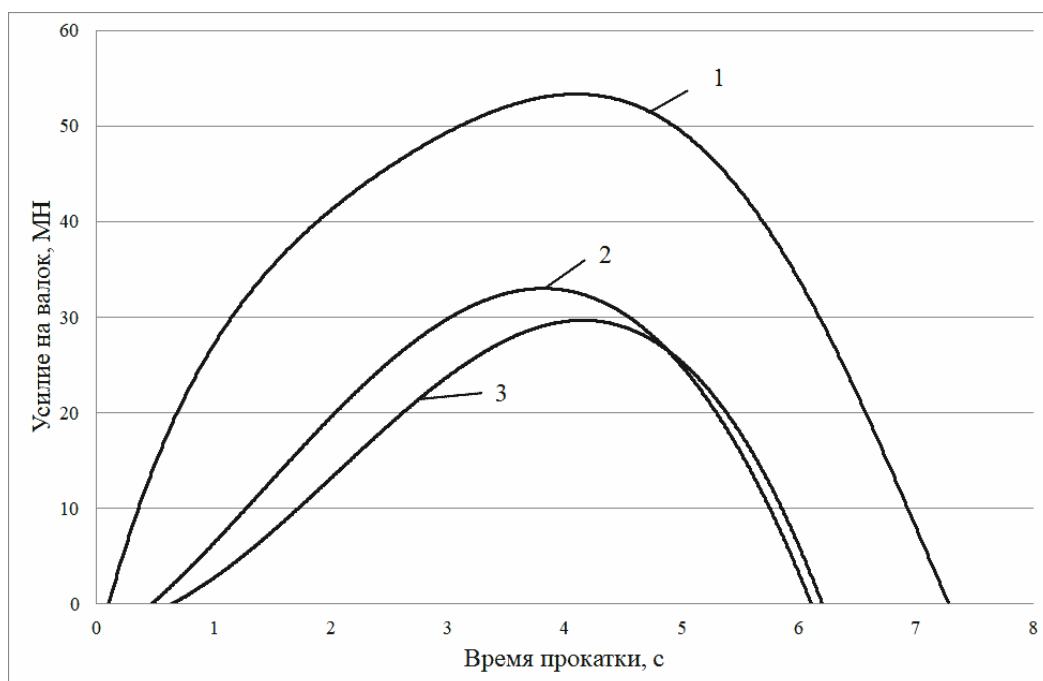


Рисунок 112. Усилия на валок в трёхвалковом стане (1) и четырёхвалковом: на рабочий (2) и вспомогательный (3) валки

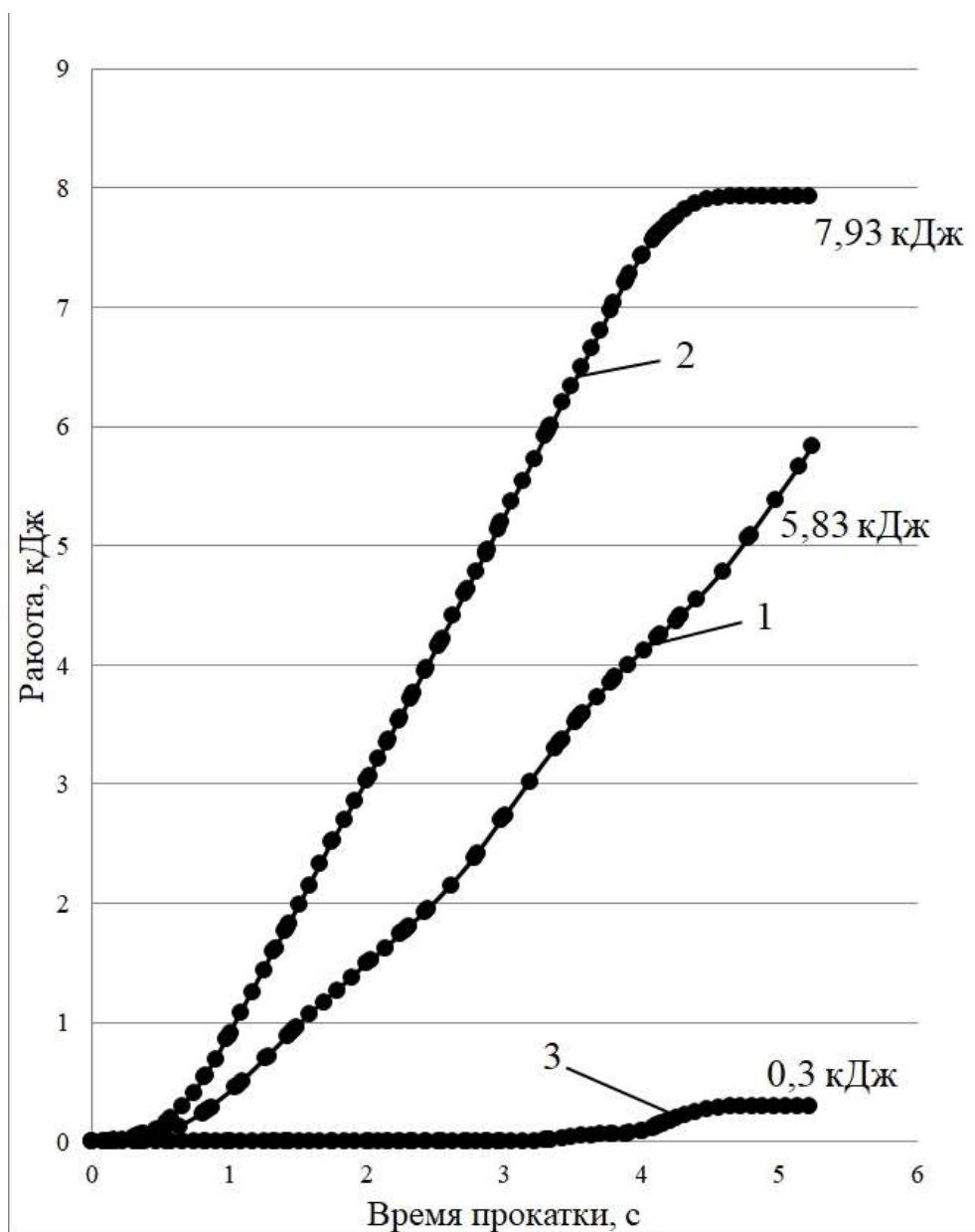


Рисунок 113. Работа на валке для каждой из схем прокатки: 1 – трёхвалковый стан, 2 – основной валок четырёхвалкового стана, 3 – вспомогательный валок четырёхвалкового стана

4.3 Исследование процесса винтовой прошивки в действующей модели четырёхвалкового стана

Одним из способов получения полых заготовок является винтовая прошивка в двухвалковых станах. По сравнению с другими способами, например, прошивкой на прессе, данный процесс более производителен и менее энергозатратен [1].

Широкое применение получила прошивка в двухвалковых станах винтовой прокатки. Преимуществом данной схемы является возможность «наводить» осевое

разрушение [32], т.н. эффект Маннесманна [92,96], осуществляя тем самым «самоцентрирование» прошивной оправки [24]. Недостатком данного способа является овальность получаемых заготовок. При прошивке в двухвалковых станах с направляющими линейками, т.н. стане Маннесманна [128,133], теряется энергия вследствие трения заготовки о неподвижные линейки, которые интенсивно изнашиваются и их часто меняют. Двухвалковую прошивку также можно осуществлять в стане Дишера [102], где в качестве направляющего инструмента применяются приводные [103] или не приводные диски. Приводные диски сообщают металлу лишь продольное перемещение, в то время как валки сообщают геликоидальные траектории перемещения точкам прошиваемой заготовки. Аналогичный недостаток имеет место при прошивке в стане с не приводными дисками, при этом также тратится энергия на их вращение вследствие контакта с прошиваемой заготовкой. Известен способ прошивки в стане с двумя приводными валками и двумя не приводными [7]. Так как валки холостые и вращаются вследствие контакта с заготовкой, то также имеет место потеря энергии на их вращение.

Прошивку можно также осуществлять в трёхвалковых станах винтовой прокатки. Однако, вследствие особенностей напряжённого состояния заготовки в очаге деформации в ней образуется кольцевая зона растягивающих напряжений и в эту ослабленную зону смещается оправка, из-за чего получаемые гильзы имеют существенную разностенность [1,24].

В исследованиях [220,221] на основе компьютерного моделирования с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm авторами разработан способ прошивки в четырёхвалковом стане с двумя парами приводных валков. При этом разработанный способ не обладает перечисленными недостатками двухвалковой и трёхвалковой схем прошивки. Однако, авторами [220,221] не продемонстрирована возможность реализации такого способа на практике. В связи с этим представляется актуальным создание действующей модели четырёхвалкового прошивного стана, описанного в [211,220-222].

Действующую модель стана создавали исходя из имеющихся возможностей оборудования для изготовления компонент модели и данных работ [211,220-222]. Стан имеет четыре валка, все валки приводные, два валка имеют чашевидную форму и одинаковые размеры, другие два валка имеют грибовидную форму и одинаковые размеры. Отношение диаметра в пережиме чашевидного валка к диаметру в пережиме грибовидного валка составляет 1,4, угол раскатки для чашевидных валков составляет -7° , для грибовидных валков 7° , угол подачи для всех валков составляет 15° , обжатие в пережиме 10%. Угол подачи 15° согласно данным [172] позволит «смягчить» схему напряженно-

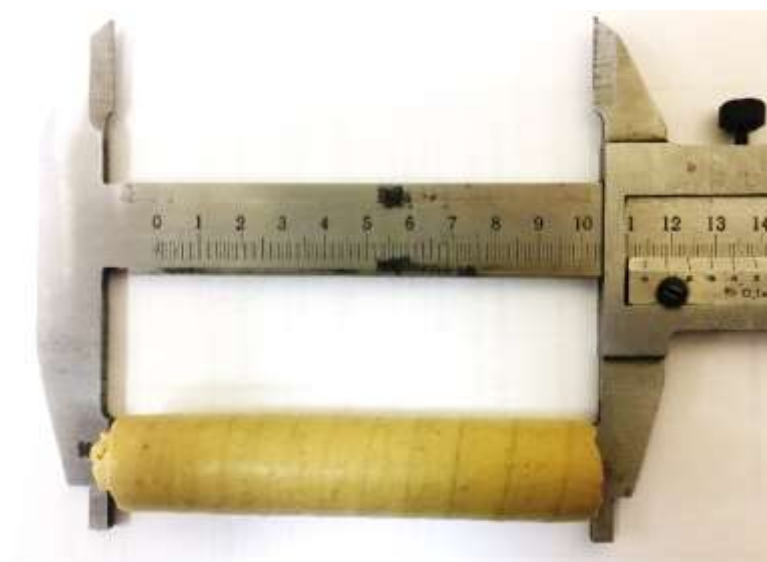
деформированного состояния и максимально снизит вероятность осевого разрушения заготовки. Угол раскатки -7° для чашевидных валков необходим для удобства размещения главного привода и входной стороны стана. Для грибовидных валков угол раскатки 7° также необходим для размещения их главного привода и выходной стороны стана. Чашевидные валки осуществляют основную деформацию металла, а грибовидные необходимы для закрытия очага деформации в плоскости, перпендикулярной основным валкам и создания дополнительных тянущих сил. Для восприятия соответствующих усилий прошивки конструкция валкового узла должна быть выполнена с соотношением диаметра рабочего валка в пережиме к диаметру вспомогательного валка в пережиме 1,4. Вследствие наличия четырёх приводных валков увеличивается площадь контакта заготовки с деформирующим инструментом и образуется достаточно замкнутый калибр. Это позволяет повысить устойчивость поперечного сечения и точность получаемых изделий. Большая площадь контакта валков с заготовкой и то, что все валки приводные, будет способствовать более равномерному распределению энергии по поверхности заготовки и уменьшать неравномерность деформации по поперечному сечению.

При создании действующей модели в основу конструкции клетки были положены следующие принципы: использование станины закрытого типа, расположение рабочих валков при постоянных углах подачи и раскатки, вывод исполнительного механизма установки валков из-под прямого действия усилия прошивки, что не только упростило конструкцию модели прокатного стана, но и условия её эксплуатации.

Схема расположения основных механизмов и устройств модели и её фото представлены на рис. 105.

Характерной особенностью является то, что в момент выхода гильзы из очага деформации, в поперечном сечении, где заканчивается контакт валков с гильзой, валки имеют одинаковый диаметр. Такое расположение реализует одинаковое обжатие по четырем направлениям и обеспечивает равномерность деформации поперечного сечения гильзы, что позволяет увеличить точность получаемых гильз.

На основе указанных выше параметров создали действующую модель (рис. 106-107) стана четырёхвалковой винтовой прошивки с использованием цифровых технологий изготовления целью демонстрации возможностей четырёхвалковой прошивки осуществили деформацию заготовки из пластилина (Roma Plastilina No. 1, [217]) в действующей модели. Исходная заготовка имела длину 70 мм и диаметр 25 мм. При прошивке калибр, образуемый валками в пережиме, составлял 22 мм. Процесс прошивки протекал стабильно, на поверхности заготовки были видны характерные винтовые линии (рис. 115).



а



б

Рисунок 115. Гильза, полученная прошивкой в действующей модели: а – вид на цилиндрическую поверхность; б – со стороны торца.

Для эффективного анализа процессов винтовой прошивки широко применяются различные программные продукты конечно-элементного анализа. В работе [218] показана принципиальная возможность компьютерного моделирования четырёхвалковой схемы прошивки с помощью QForm. С помощью этой вычислительной среды конечно-элементного анализа смоделировали опытные прошивки заготовок из пластилина. Для моделирования предварительно создали в SolidWorks сборку, состоящую из валков, заготовки, направляющих и толкателя. Сборку сохранили в формате .step, загрузили в редактор геометрии QShape, создали сетку для всех элементов сборки, оси вращения основных и вспомогательных валков. Свойства пластилина, необходимые для расчёта

формоизменения заготовки в QForm, задавали в соответствии с данными работы [217]. Смазку в QForm выбирали таким образом, чтобы фактор трения для пар «заготовка-валок» составлял 10 по закону трения Зибеля. Скорость вращения валков, углы подачи и раскатки равнялись соответствующим значениям при опытных прошивках.

Сравнили результаты компьютерного моделирования с результатами опытных прокаток. Длина заготовки после опытных прокаток составляет 116,64 мм, по результатам компьютерного моделирования в QForm -112,368 мм. Видно, что отличие по длине составило 3,6%. Помимо длины сравнили изменение толщины стенки по длине полученной гильзы по результатам опытных прошивок и компьютерного моделирования (рис. 116). По рис. 116 видно, что отличие значений не превышает 10%.

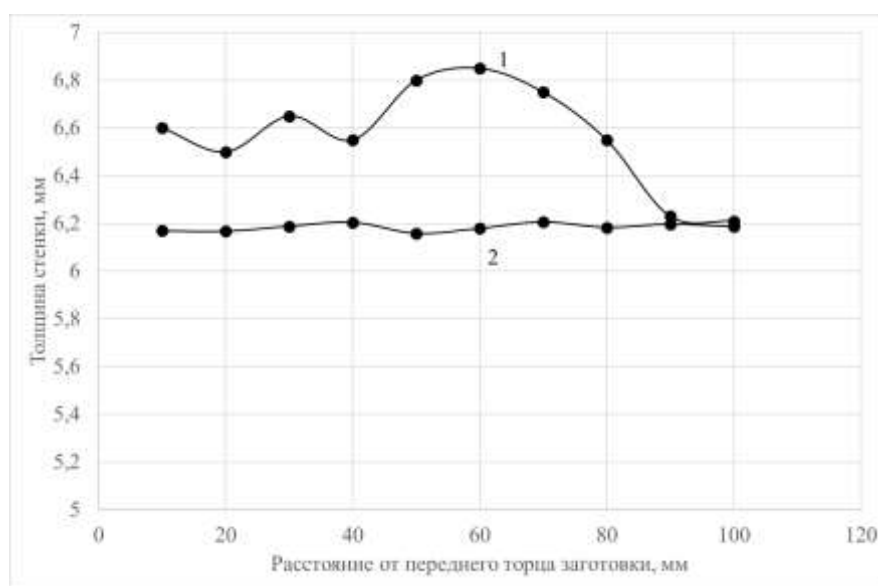


Рисунок 116. Изменение толщины стенки гильзы при опытных прошивках (1) и по результатам компьютерного моделирования (2).

Учитывая приемлемую точность результатов компьютерного моделирования процессов винтовой прошивки с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа, в том числе результаты [201,202], смоделировали процесс прошивки стальной заготовки по двухвалковой и четырёхвалковой схемам с помощью QForm. По результатам моделирования сравнили изменение наружного диаметра и толщины стенки заготовки по длине, значения усилий на валках.

Моделировали процесс прошивки заготовки диаметром 25 мм из стали 3Х2В8Ф, так как согласно данным [213] четырёхвалковая схема может проявить свои преимущества именно при прошивке легированных сталей.

Для моделирования процессов двухвалковой и четырёхвалковой прошивки создали в SolidWorks модели валкового узла двухвалкового лабораторного стана кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» и валкового узла действующей модели стана, при этом учитывались данные, показанные в табл. 14. Созданные в SolidWorks модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки материалов в программе QForm для заготовки была выбрана марка стали 3Х2В8Ф. Температура нагрева заготовок принята равной 1200 °С, температура инструмента — 20 °С. Длину заготовки приняли минимальной $l_3 = 100$ мм, но достаточной для создания полного очага деформации.

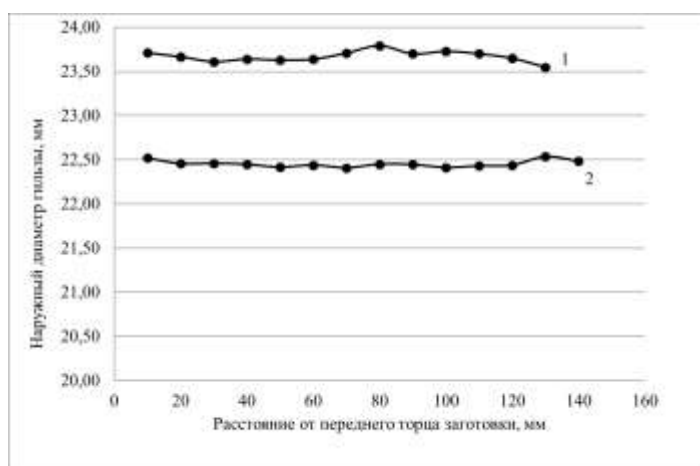
Таблица 14. Параметры моделируемых прошивок

Параметр	Двухвалковая прошивка в лабораторном стане МИСиС	Прошивка по предлагаемому способу	
		Основные валки	Вспомогательные валки
Рабочие валки:			
- диаметр в пережиме, мм	140	50	36
- длина бочки, мм	140	70	70
Частота вращения, мин ⁻¹	25	60	83
угол раскатки, град.	-7	-7	+7
угол подачи, град.	15	15	15
Расстояние между валками в пережиме, мм	22	22	
Расстояние между линейками, мм	24,2	22	
Выдвижение оправки за пережим, мм	11,94	12,94	

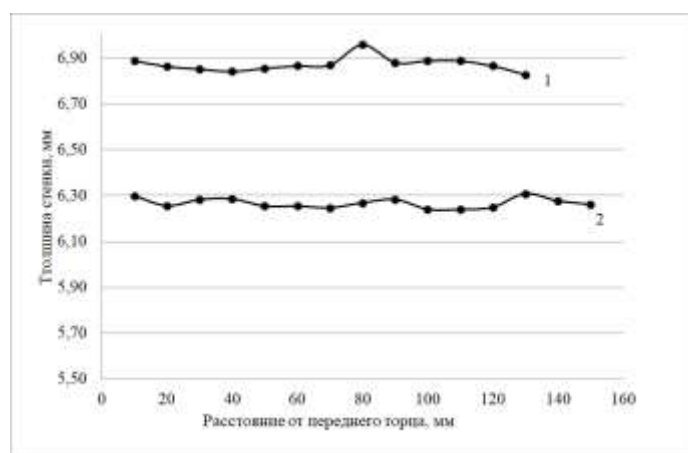
Диаметр оправки, мм	10	10
Длина оправки, мм	33,61	26,56
Коэффициент овализации	1,1	1,0

Теплообмен между заготовкой и инструментом в QForm задавали как «простой» [223]. Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания, фактор трения по Зибелю задавали равным 10.

С целью оценки изменения диаметра и толщины стенки по длине гильзы по результатам моделирования в QForm провели измерения в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 10 мм по длине с помощью встроенного инструментария. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли 8 раз, а толщину стенки измеряли в 16 точках каждого сечения с шагом 22,5 градуса. По результатам измерений получили среднее значения наружного диаметра, дисперсию и среднеквадратичное отклонение (табл. 14 и среднее значение, дисперсию и среднеквадратичное отклонение для толщины стенки (табл. 14). На рис. 117 показаны данные, иллюстрирующие изменение наружного диаметра и толщины стенки в сечениях гильз, полученных при компьютерном моделировании прошивки в двухвалковом и четырехвалковом станах.



а



б

Рисунок 117. Изменение наружного диаметра (а) и толщины стенки (б) по длине гильз, полученных при моделировании прошивки в двухвалковом (1) и четырёхвалковом (2) станках

Таблица 14. Статистические показатели точности размеров гильз по смоделированным схемам

Наименование параметра	Схема прошивки	Среднее значение, мм	Дисперсия, мм ²	Среднеквадратичное отклонение, мм
Наружный диаметр	Двухвалковая прошивка	23,67	0,0039	±0,0621
	Четырёхвалковая прошивка	22,45	0,0014	±0,0372
Толщина стенки	Двухвалковая прошивка	6,87	0,0010	±0,0317
	Четырёхвалковая прошивка	6,27	0,0004	±0,0209

По результатам моделирования установлено, что гильзы, полученные прошивкой в четырехвалковом стане, отличаются большей точностью размеров. При прошивке по двухвалковой схеме перепад значений диаметра составляет 0,25 мм, при четырёхвалковой схеме – 0,13мм. Дисперсия диаметра гильзы, полученной способом четырёхвалковой прошивки составляет 0,0014 мм², что меньше, чем дисперсия гильзы при двухвалковой прошивке – 0,039 мм².

Согласно табл. 14 дисперсия и среднеквадратичное отклонение толщины стенки при четырёхвалковой прошивке меньше дисперсии и среднеквадратичного отклонения толщины стенки при двухвалковой прошивки в 2,5 и 1,5 раза соответственно.

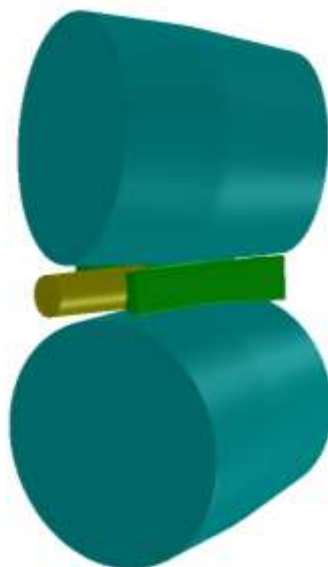
4.4 Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния заготовок при различных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования

Одним из способов производства бесшовных труб, полых трубных заготовок (гильз) и сплошных круглых заготовок и прутков является винтовая прокатка. Наиболее широко применяются двухвалковые и трёхвалковые станы винтовой прокатки [1,24]. Получение изделий с помощью указанных станов связано как с определёнными преимуществами, так и с недостатками, детально описанными в [1,6,24], обусловленными главным образом особенностями формоизменения. Исследуя деформацию в процессах винтовой прокатки, в работе [8] предложили конструкцию стана винтовой прокатки с четырьмя приводными вальками. Применяя вычислительную среду конечно-элементного анализа QForm в осуществили компьютерное моделирование процесса прошивки в четырёхвалковом стане. Представляется актуальным исследование процесса четырёхвалковой винтовой прокатки для определения характера изменения параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) и сравнения с характером изменения аналогичных параметров при двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатке, так как НДС во многом определяет свойства металла заготовок и качество получаемых изделий.

Вычислительные среды QForm и DEFORM эффективно применяются как при компьютерном моделировании традиционных, широко применяемых схем винтовой прокатки [92,106,112], так и относительно новых [11,142]. Компьютерное моделирование с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа позволяет получать результаты, согласующиеся с экспериментальными данными по размерам получаемых заготовок [31], энергосиловым параметрам [102], характеру распределения параметров НДС [208] и вероятному разрушению [96].

Смоделировали процесс прокатки заготовки из стали 45 с диаметра 25 мм на 22 мм при температуре 1200°C. В SolidWorks создали сборки (рис. 118) согласно данным табл. 15. Сборки сохранили в два файла в форматах .step и .stl, загрузили в редактор геометрии QShape и пре-процессор DEFORM, соответственно. Создали сетку конечных элементов для каждого из объектов в сборке, задали оси вращения валков, начальные и граничные условия: валки, линейки и направляющие с входной и выходной стороны считали

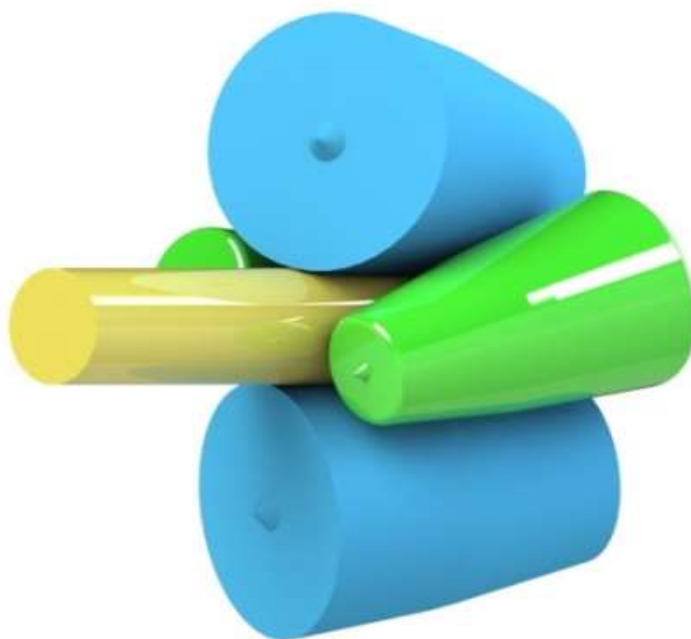
абсолютно жёсткими телами, моделирование осуществляли без учёта теплообмена между заготовкой и валками. Фактор трения для пар «валок-заготовка» в QForm задали равным 10, для пар «линейка-заготовка» - 0,7. В QForm вместо проводок и толкателя использовали граничные условия, имеющиеся в версии QForm VX 8.2.4: «вращение» и «толкатель».



а



б



в

Рисунок 118. Сборки в SolidWorks для моделирования двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой прокатки (в)

Таблица 15. Параметры моделируемых схем прокатки

Параметр	Двухвалковая прокатка на лабораторном стане МИСиС	Трёхвалковая прокатка в мини-стане РСП 14-40	Четырёхвалковая прокатка	
			Основные валки	Вспомогательные валки
Рабочие валки:				
- диаметр в пережиме, мм	140	76	50	36
- длина бочки, мм	140	85	70	70
Частота вращения, мин ⁻¹	25	60	60	83
угол раскатки, град.	7	-7	-7	+7
угол подачи, град.	15	15	15	15

По результатам компьютерного моделирования оценивали изменения значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния [25], в различных точках заготовки. Согласно [26], для прогнозирования разрушения целесообразно учитывать взаимосвязь накопленной деформации и коэффициента жесткости напряженного состояния.

Для детального сравнения особенностей напряжённо-деформированного состояния в заготовке выбрали 13 точек с равномерным шагом 1 мм на радиусе заготовки в сечении, находящемся на расстоянии 12 мм от переднего торца заготовки (рис. 119).

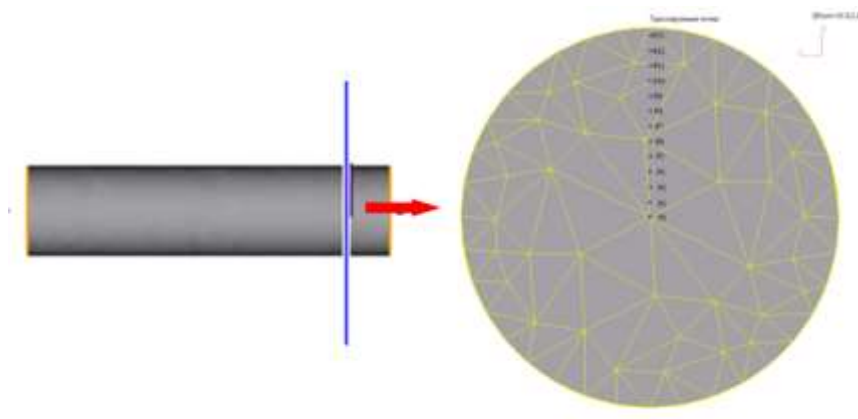


Рисунок 119. Положение точек заготовки, выбранных для расчёта значений коэффициента жёсткости, по результатам моделирования в QForm.

Для каждой из выбранных точек построили графики, отображающие изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния при удалении от оси заготовки (рис. 120). Благодаря возможностям QForm сохраняли данные об изменении параметров «Среднее напряжение» и «Интенсивность напряжений» по результатам применения функции трассировки точек в формате .xls. Далее полученные файлы открывали в Excel. Для расчёта коэффициента жёсткости напряжённого состояния делили значение параметра «Среднее напряжение» на значение параметра «Интенсивность напряжений».

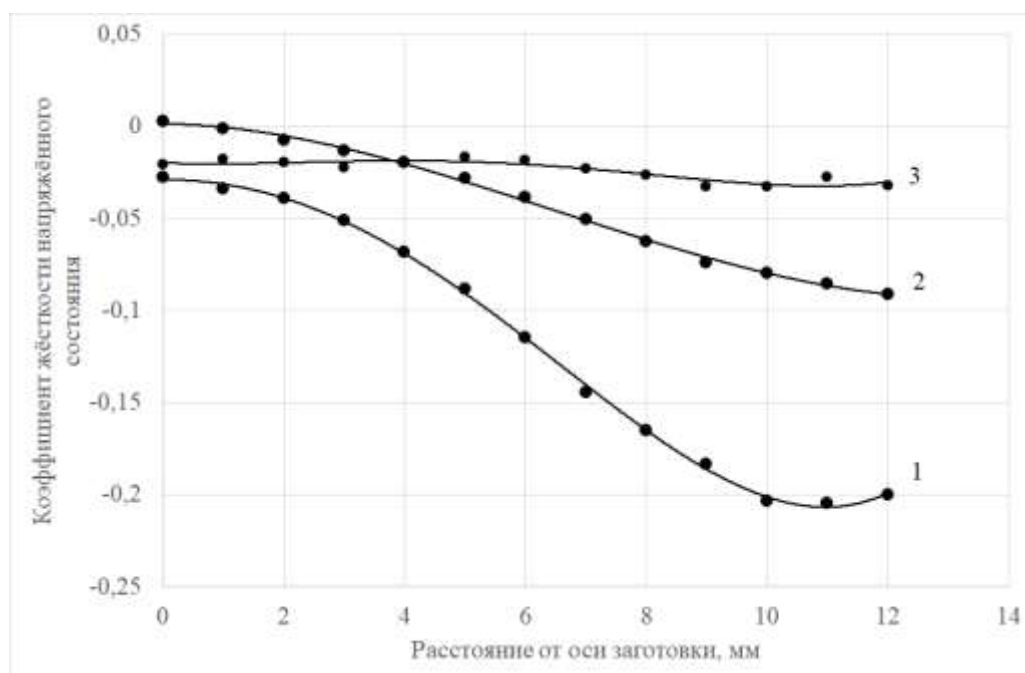
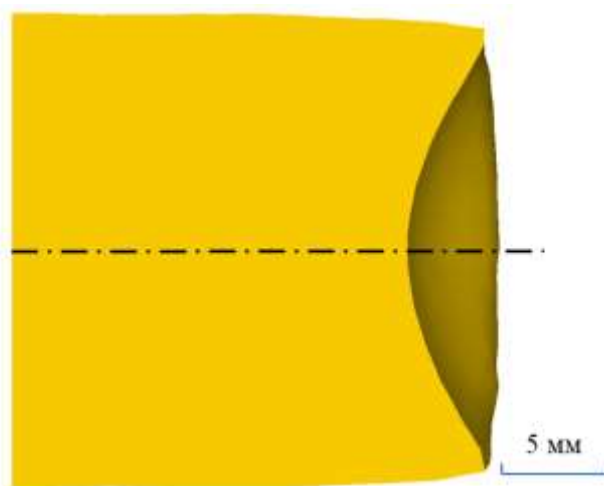


Рисунок 120. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния при двухвалковой (1), трёхвалковой (2) и четырёхвалковой (3) прокатке

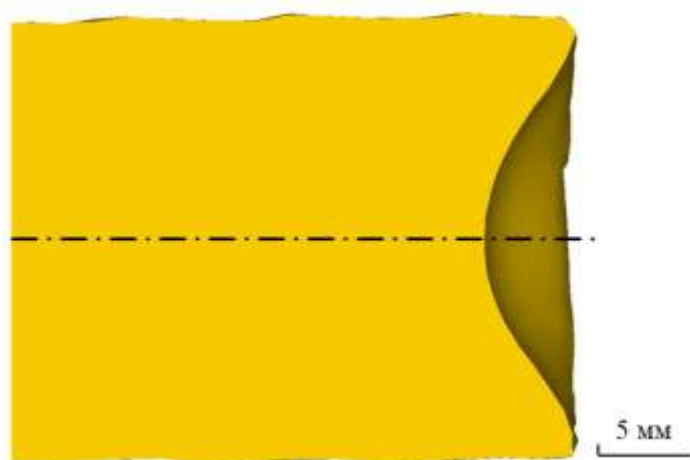
Согласно рис. 120 при четырёхвалковой схеме имеет место наименьший перепад значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния (0,05) между поверхностью и осевой зоной заготовки, следовательно, по сравнению с двухвалковой (перепад равен 0,175) и трёхвалковой (перепад равен 0,1) прокаткой получается наименьшая неравномерность напряжений, в связи с чем риск появления разрушения также наименьший из всех смоделированных схем.

Двухвалковую, трёхвалковую и четырёхвалковую прокатки заготовки из стали 45 смоделировали в DEFORM согласно данным табл. 15 с заданием начальных и граничных условий. В DEFORM модель имела, в отличие от модели QForm, проводки с входной и выходной стороны, а также толкатель. Для пар «валок-заготовка» фактор трения задавали равным 2, для пар «проводка-заготовка» - 0,3, «толкатель-заготовка» - 0,01. Сравнивали различные параметры для выявления отличий и подобий между четырёхвалковой, двухвалковой и трёхвалковой прокаткой.

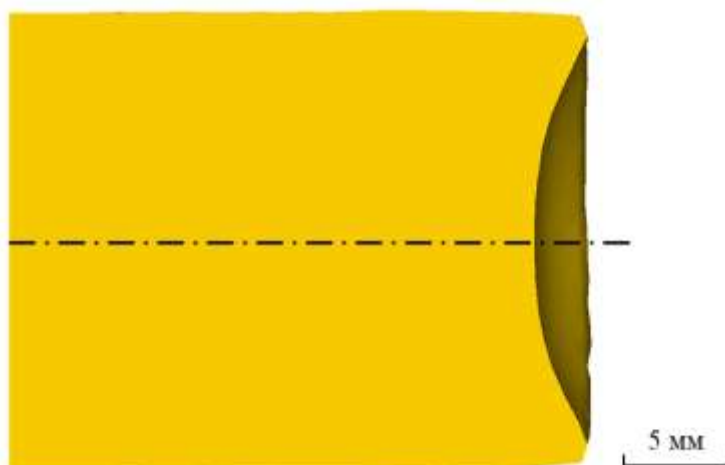
Сравнили форму утяжин на переднем торце заготовок, так как, согласно [156], форма утяжины может быть связана с характером распределения параметров напряжённо-деформированного состояния в приторцевой области. На рис. 121 показаны утяжины для различных схем прокатки по результатам моделирования в DEFORM.



а



б

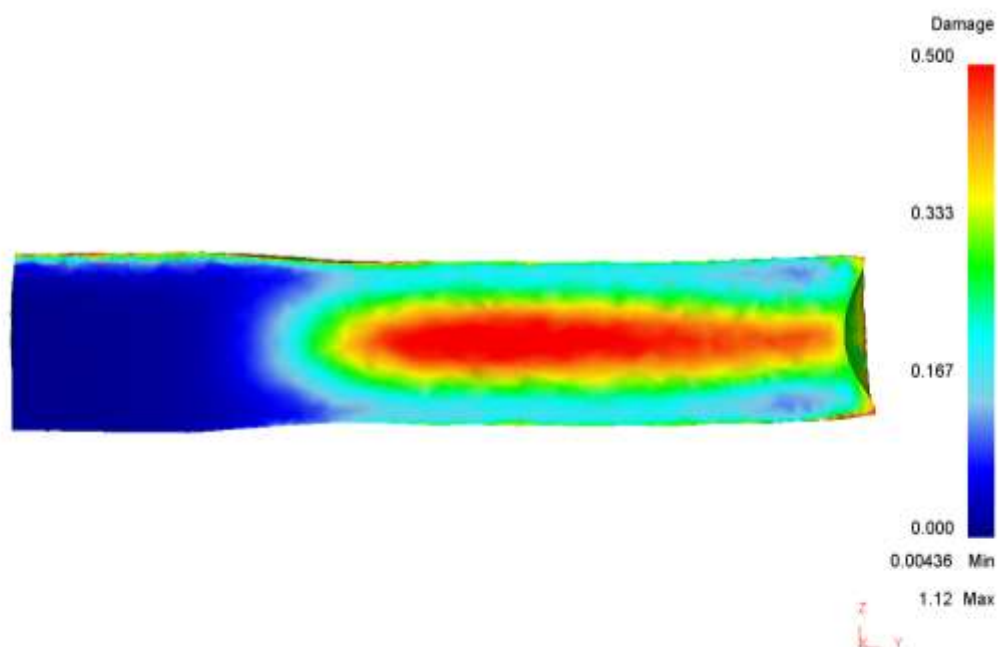


в

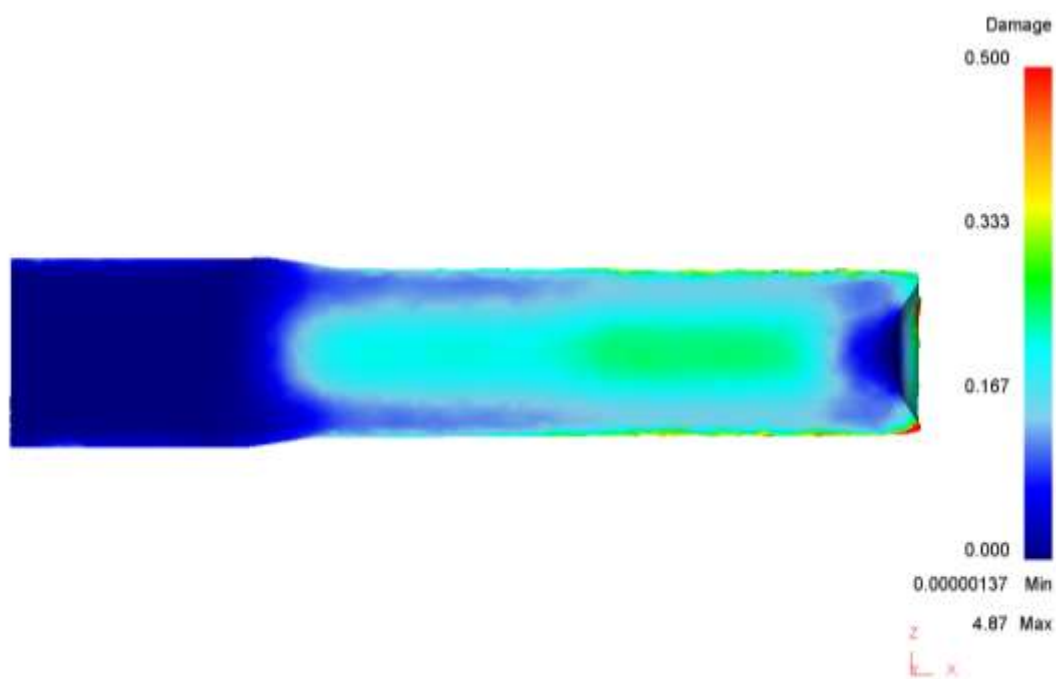
Рисунок 121. Утяжина на переднем торце по результатам моделирования двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) прокатки в DEFORM

Согласно рис. 121 форма утяжины при четырёхвалковой прокатке больше похожа на форму утяжины после двухвалковой прокатки, чем после трёхвалковой.

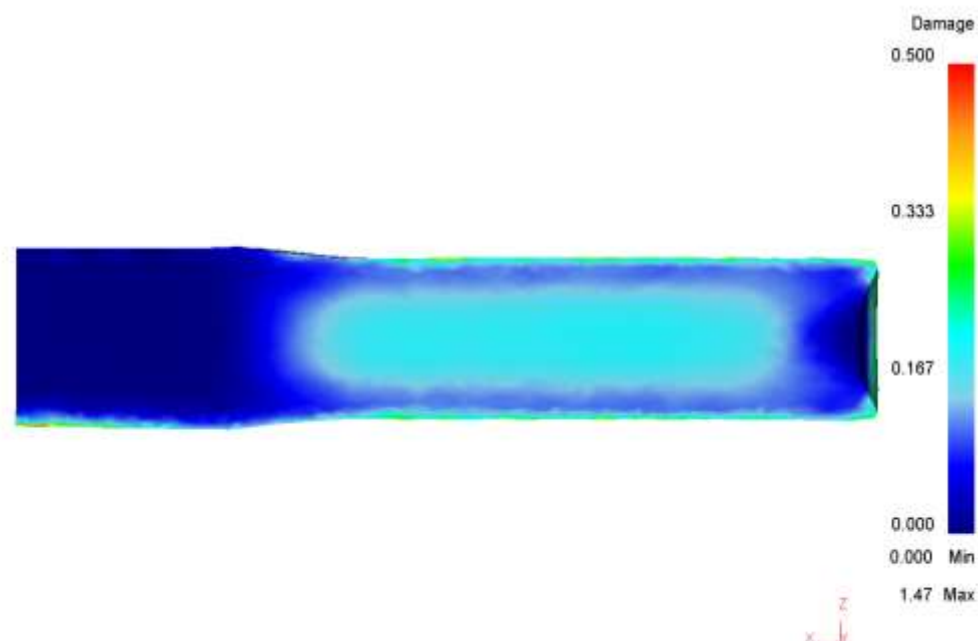
Сравнили распределение значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма [156] по результатам моделирования в DEFORM двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой прокаток (рис. 122).



а



б

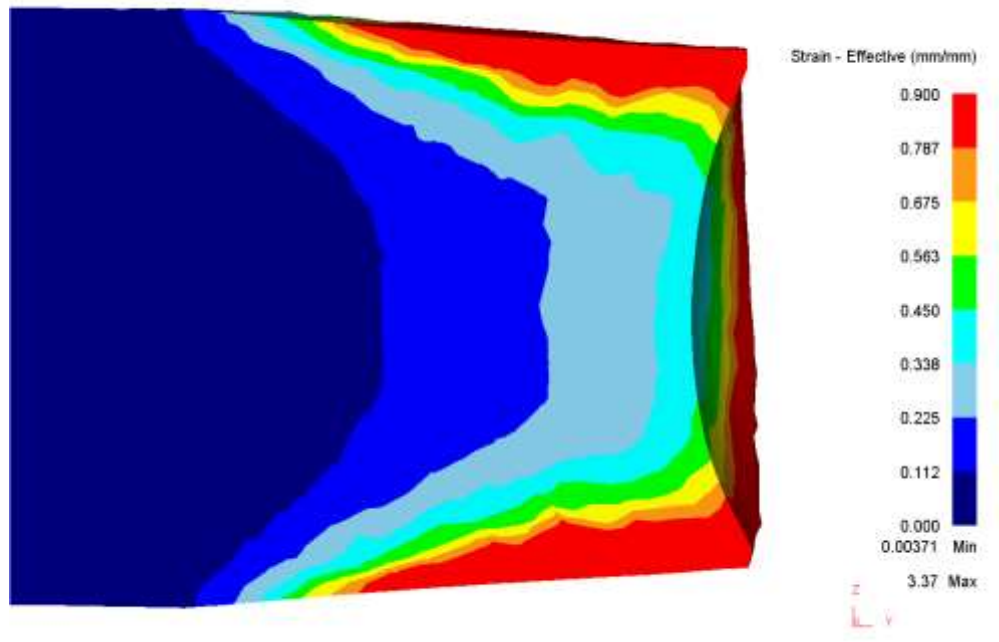


В

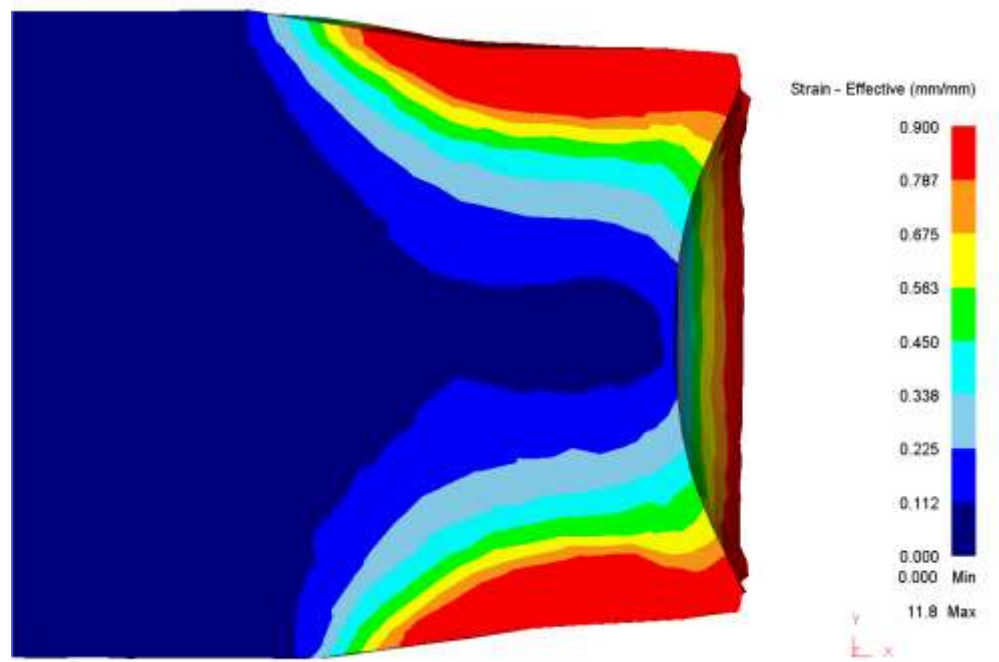
Рисунок 122. Распределение значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в продольном сечении заготовки из стали 45 при прокатке в двухвалковом (а), трёхвалковом (б) и четырёхвалковом (в) стане

Известно [223], что чем больше значение нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, тем вероятнее разрушение. Согласно рис. 120 наиболее вероятно разрушение при двухвалковой прокатке, наименее – при четырёхвалковой. Интервал значений критерия при двухвалковой прокатке от 0 до 0,5, при трёхвалковой от 0 до 0,3, четырёхвалковой – от 0 до 0,2. Исходя из этих интервалов наиболее равномерное распределение деформаций и напряжений имеет место при четырёхвалковой прокатке, что также было ранее показано по результатам моделирования в QForm (рис. 109).

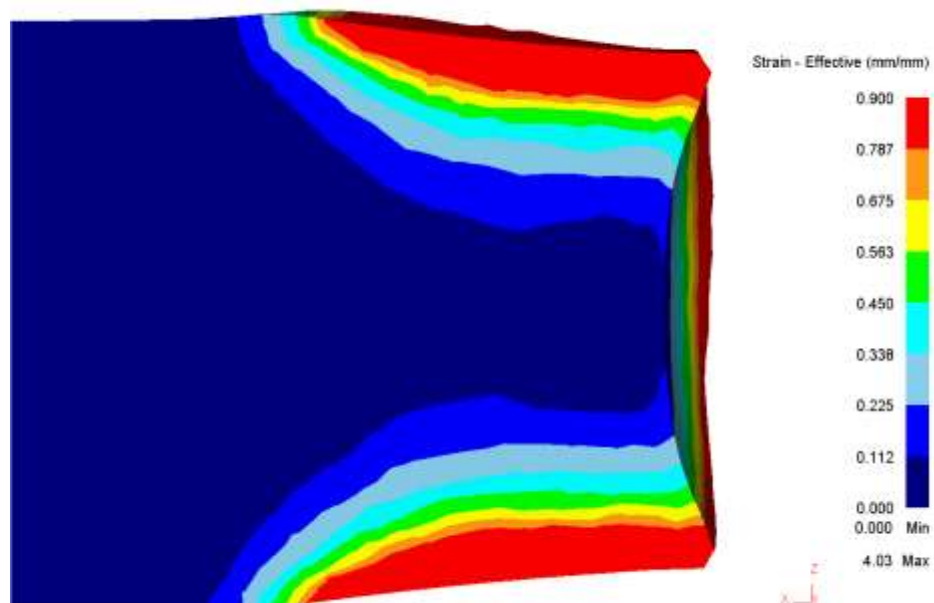
По данным [136] отличия между двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокаткой выявляются при оценке распределения интенсивности деформации в продольном сечении на нестационарной стадии [156], то есть, когда происходит деформация приторцовых областей. По результатам моделирования в DEFORM построили поля распределения значений интенсивности деформации (strain effective) при прокатке приторцовых областей по двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой схемам (рис. 123).



a



6

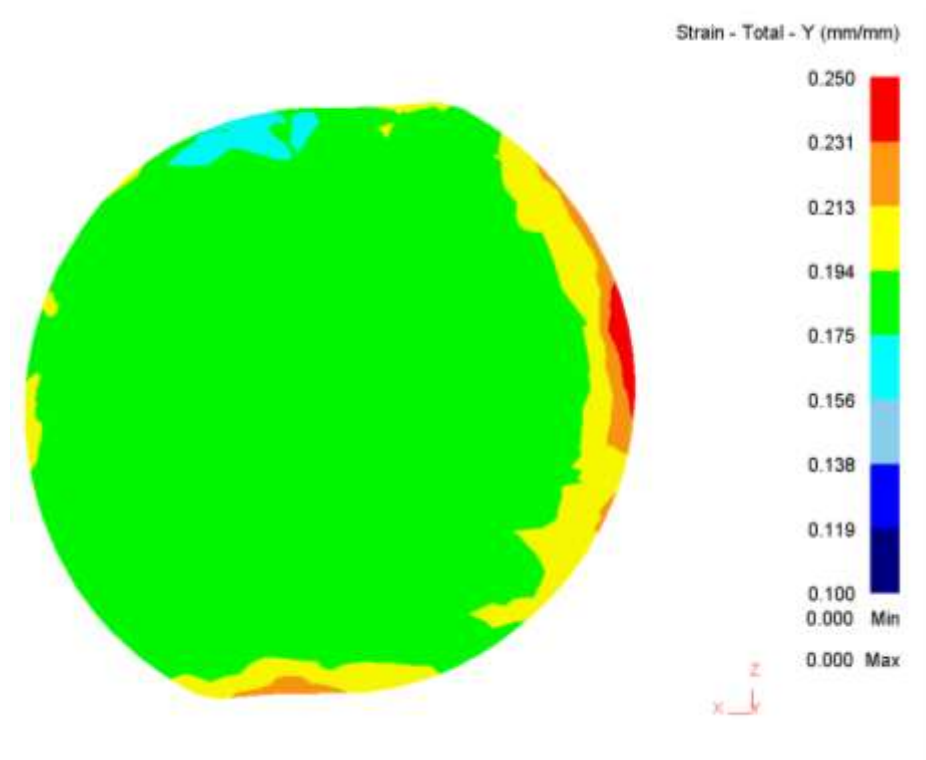


В

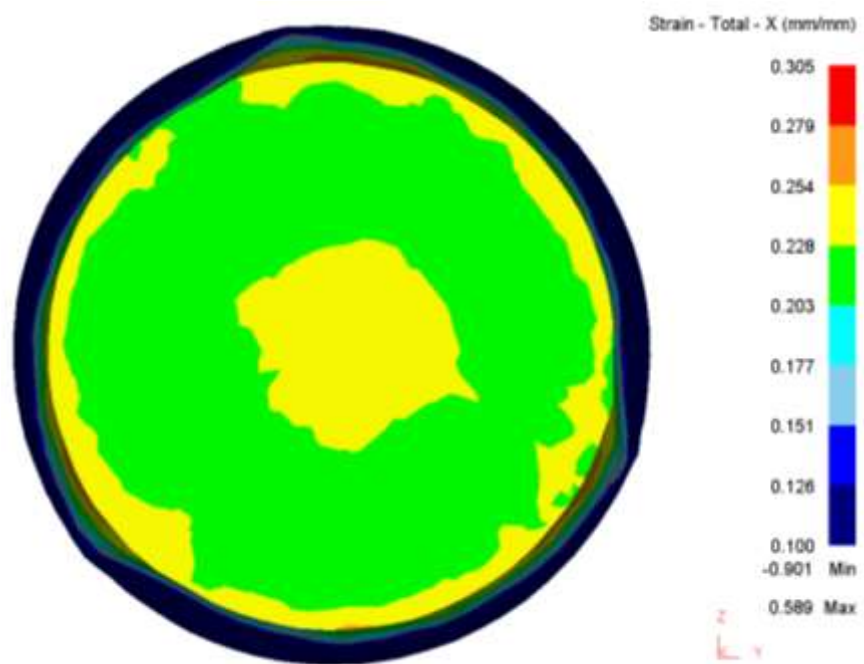
Рисунок 123. Распределение значений интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) прокатки по результатам моделирования в DEFORM

Согласно рис. 123 есть подобие в характере распределения интенсивности деформации четырёхвалковой и трёхвалковой схем, при этом при двухвалковой схеме распределение интенсивности деформации имеет отличный характер.

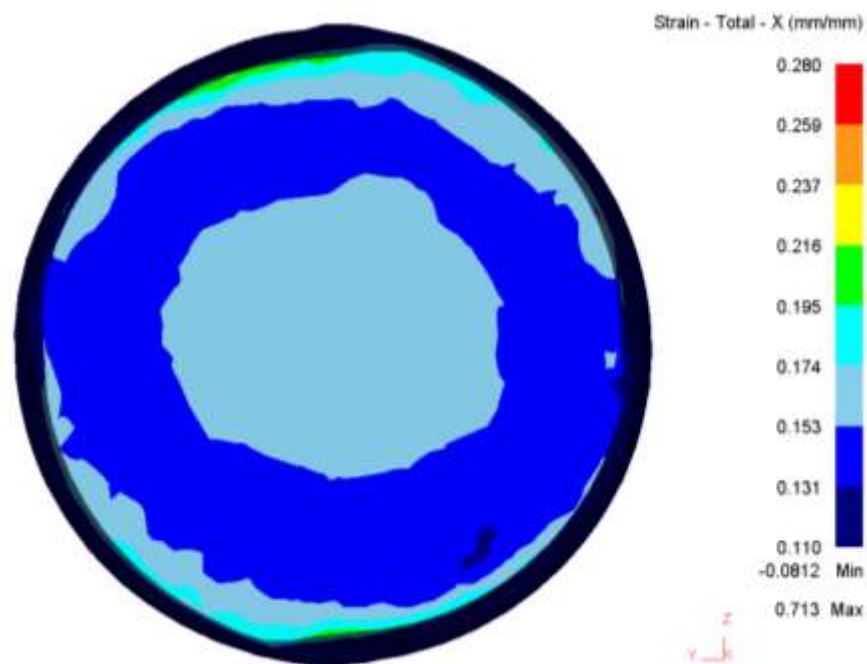
По результатам моделирования в DEFORM оценивали изменение параметров напряжённо-деформированного состояния на стационарной стадии прокатки [6] для исследуемых схем. На рис. 124 показано как меняется компонента деформации, совпадающая по направлению с осью прокатки, в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии.



a



6



В

Рисунок 124. Поля распределения значений компоненты деформации, совпадающей с направлением прокатки, в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) схем прокаток по результатам моделирования в DEFORM

Распределение значений компоненты деформации, совпадающей с направлением прокатки (рис. 124), позволило определить, что, в отличие от двухвалковой прокатки, при трёхвалковой и четырёхвалковой прокатке распределение исследуемой компоненты деформации имеет кольцевой характер. Однако при трёхвалковой схеме кольцевая зона представляет собой область с наибольшими значениями деформации в сечении, а при четырёхвалковой – наименьшие [224].

При анализе полей распределения значений параметров напряжённого состояния построили изменение среднего напряжения вдоль радиуса в продольном сечении (рис.125). Для получения данных использовали функции “point tracking” и “state variable between two points” в пост-процессоре DEFORM. Полученные данные экспортировали в Excel и построили графические зависимости, иллюстрирующие изменение среднего напряжения в зависимости от расстояния от оси заготовки (рис. 126).

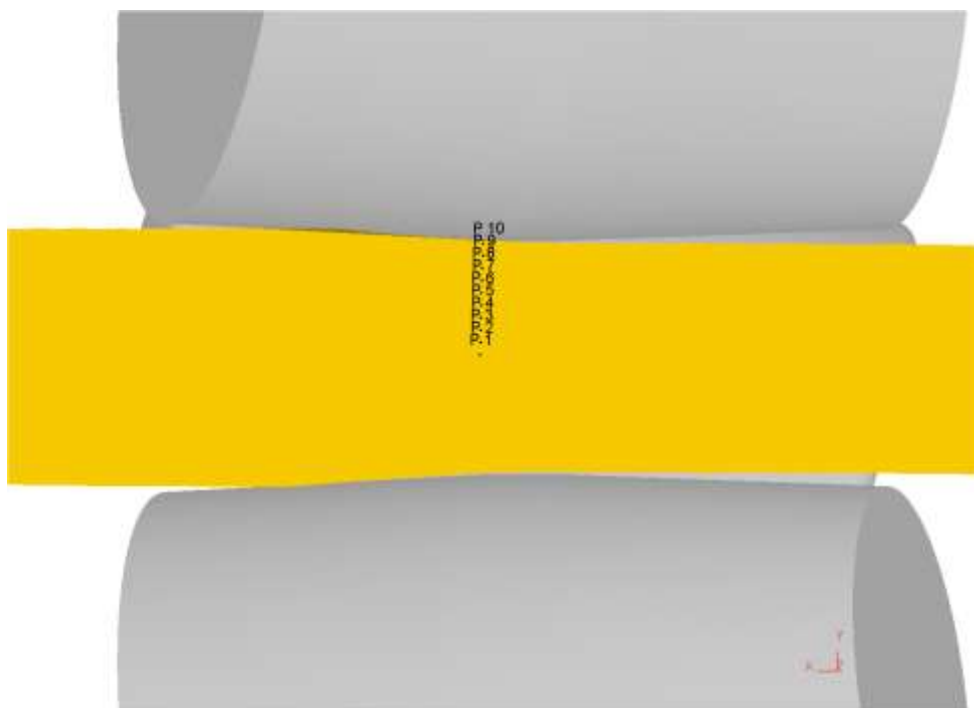


Рисунок 125. Положение точек вдоль радиуса в продольном сечении заготовки для расчёта изменения среднего напряжения в DEFORM при четырёхвалковой прокатке.

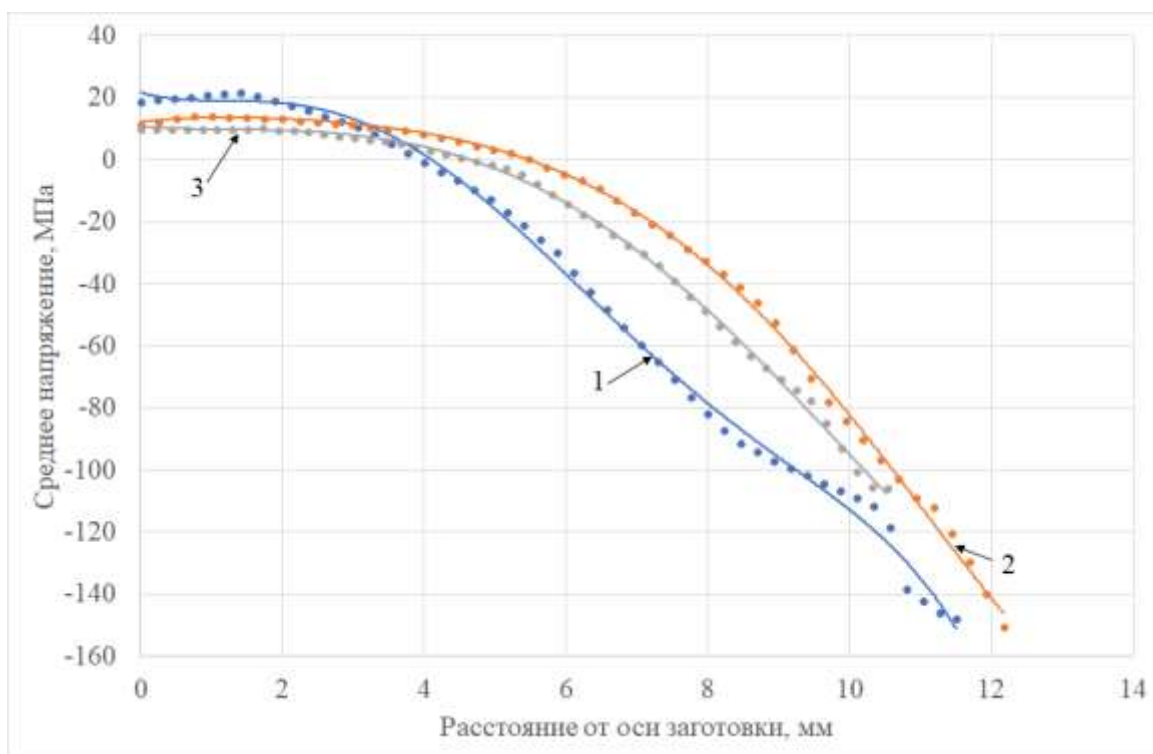


Рисунок 126. Изменение среднего напряжения в очаге деформации в зависимости от расстояния от оси заготовки при двухвалковой (1), трёхвалковой (2) и четырёхвалковой (3) прокатке по результатам моделирования в DEFORM

Согласно рис. 126 характер изменения среднего напряжения при четырёхвалковой прокатке отличается от характера изменения среднего напряжения при двухвалковой

прокатке и совпадает с характером изменения среднего напряжения при трёхвалковой прокатке.

4.5 Моделирование процессов трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатки при постоянном и переменном трении на контакте валков и заготовки

Винтовая прокатка в трёхвалковых станах применяется для получения сплошных заготовок и прутков [10,64,145, 225-233]. По результатам исследований в разделах 4.1-4.4 Разработана четырёхвалковая схема винтовой прокатки, создана действующая модель четырёхвалкового стана и в ней реализованы опытные прошивки и прокатки, проанализированы потенциальные преимущества четырёхвалковой схемы по сравнению с существующими схемами винтовой прокатки. Представляет интерес оценка и сравнение деформированного состояния заготовок при постоянном трении для пары «валок-заготовка», а также кинематических особенностей и устойчивости протекания процесса трёх- и четырёхвалковой прокатки заготовок при постоянном и переменном трении между валками и заготовкой с помощью конечно-элементного компьютерного моделирования в вычислительной среде QForm.

Провели компьютерное моделирование процессов трёх- и четырёхвалковой прокатки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm. Параметры моделируемых процессов представлены в табл. 16.

Таблица 16. Параметры моделируемых процессов

Стан	Диаметр вала в пережиме, мм	Частота вращения, об/мин	Диаметр исходно й заготовк и, мм	Угол подач и, град.	Угол раскатки, град.
Трёхвалковый	50	60	25	15	7
Четырёхвалко вый	50 (основной), 36 (вспомогательн ый)	60 (основной), 83 (вспомогательн ый)	25	15	7 (основной), -7 (вспомогательн ый)

Образуемый валками калибр в пережиме составлял 22 мм. Четырёхвалковая клеть имела пару основных (чашевидных) валков и пару вспомогательных (грибовидных) валков.

В SolidWorks создали модели валков и заготовок, создали из этих моделей сборки, загрузили их в QForm (рис. 127-128). При моделировании использовали граничные условия «толкатель» и «вращение». В очаге деформации использовали адаптацию сетки конечных элементов заготовки в виде цилиндрической области. Внутри этой области максимальный размер конечного элемента на поверхности заготовки не превышал 1,5 мм. Скорость толкания заготовки в пределах области граничного условия «толкатель» составляла 3 мм/с вдоль оси прокатки. Теплообмен между валками и заготовкой задавали как «Простой» из меню QForm [223].

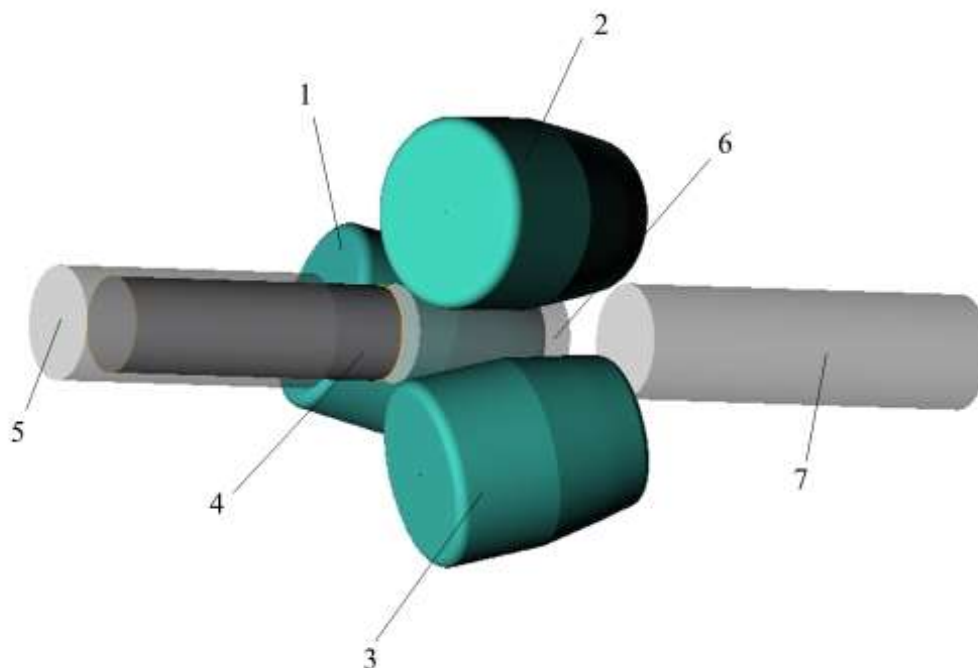


Рисунок 128. Модель в QForm для расчёта формоизменения при трёхвалковой винтовой прокатке: 1,2,3 – валки, 4 – заготовка, 5 – область граничного условия «толкатель», 6 – область адаптации сетки в заготовке в очаге деформации, 7 - область граничного условия «вращение».

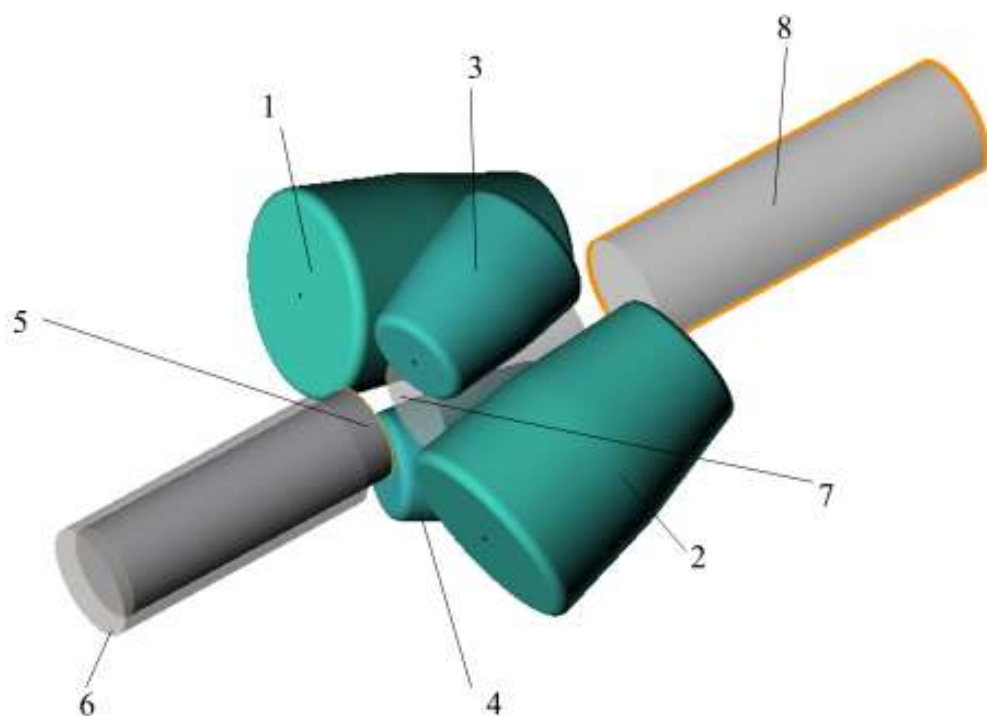


Рисунок 129. Модель в QForm для расчёта формоизменения при четырёхвалковой винтовой прокатке: 1,2 – основные валки, 3, 4 – вспомогательные валки, 5 – заготовка, 6 – область граничного условия «толкатель», 7 – область адаптации сетки в заготовке в очаге деформации, 8 – область граничного условия «вращение».

При моделировании материал заготовки задали сталь 45, валков – сталь 40X. Фактор трения, исходя из собственного опыта моделирования процессов винтовой прокатки в QForm, а также опыта коллег, задали равным 3 и постоянным. Также провели расчёты при переменном факторе трения, изменяющемся периодически в пределах 0,5-4,5 с периодом 1,5 с (рис. 130). При этом при задании постоянного и переменного фактора трения в меню QForm выбирали закон трения «Леванов» с коэффициентом Леванова 1,25.

По окончании компьютерного моделирования с помощью инструментария QForm оценили распределение значений накопленной деформации в продольном (диаметральном) сечении заготовок после трёхвалковой и четырёхвалковой прокаток (рис. 131-132) при постоянном значении фактора трения.

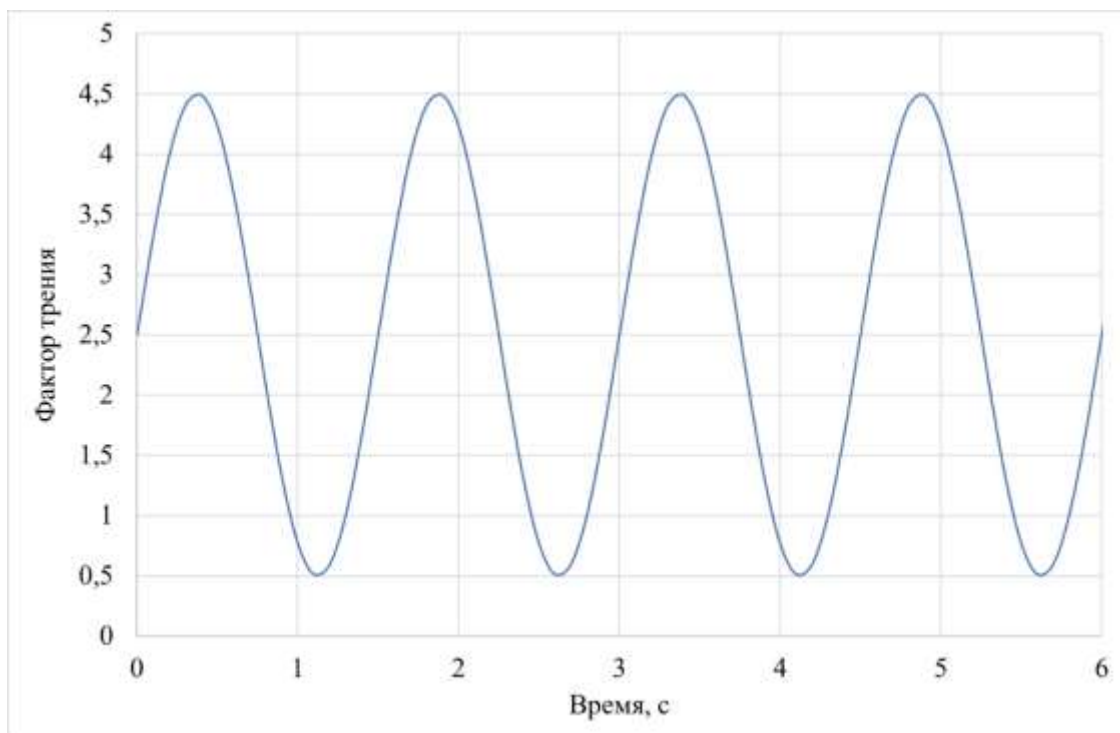


Рисунок 130. Изменение фактора трения во времени при моделировании процессов винтовой прокатки в QForm

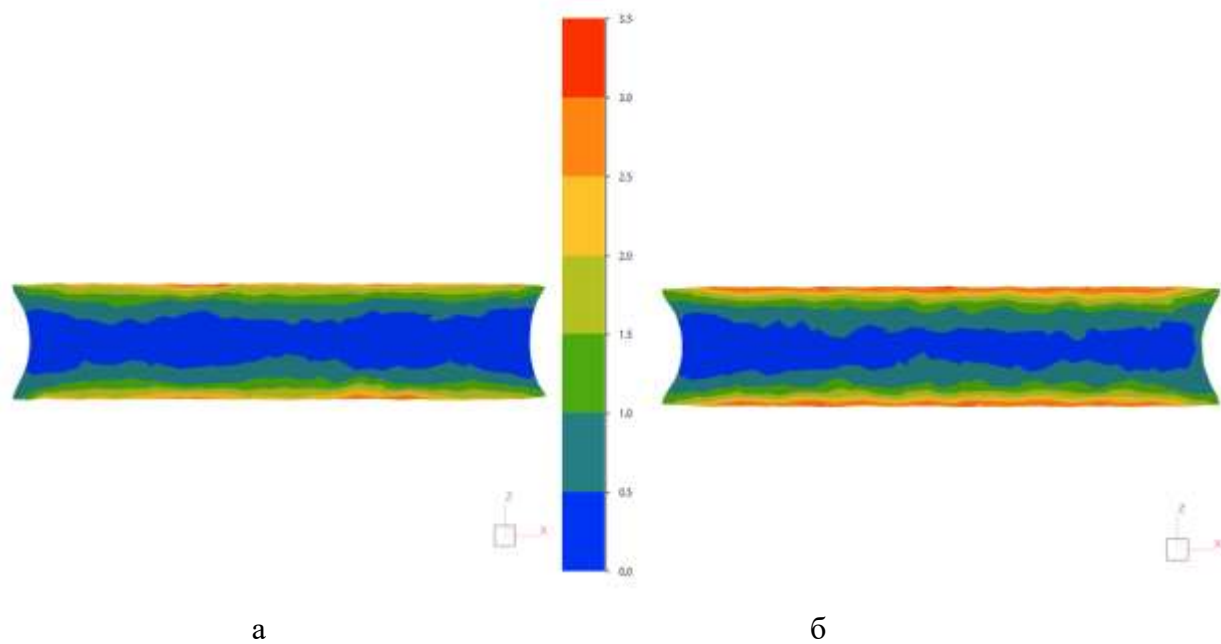
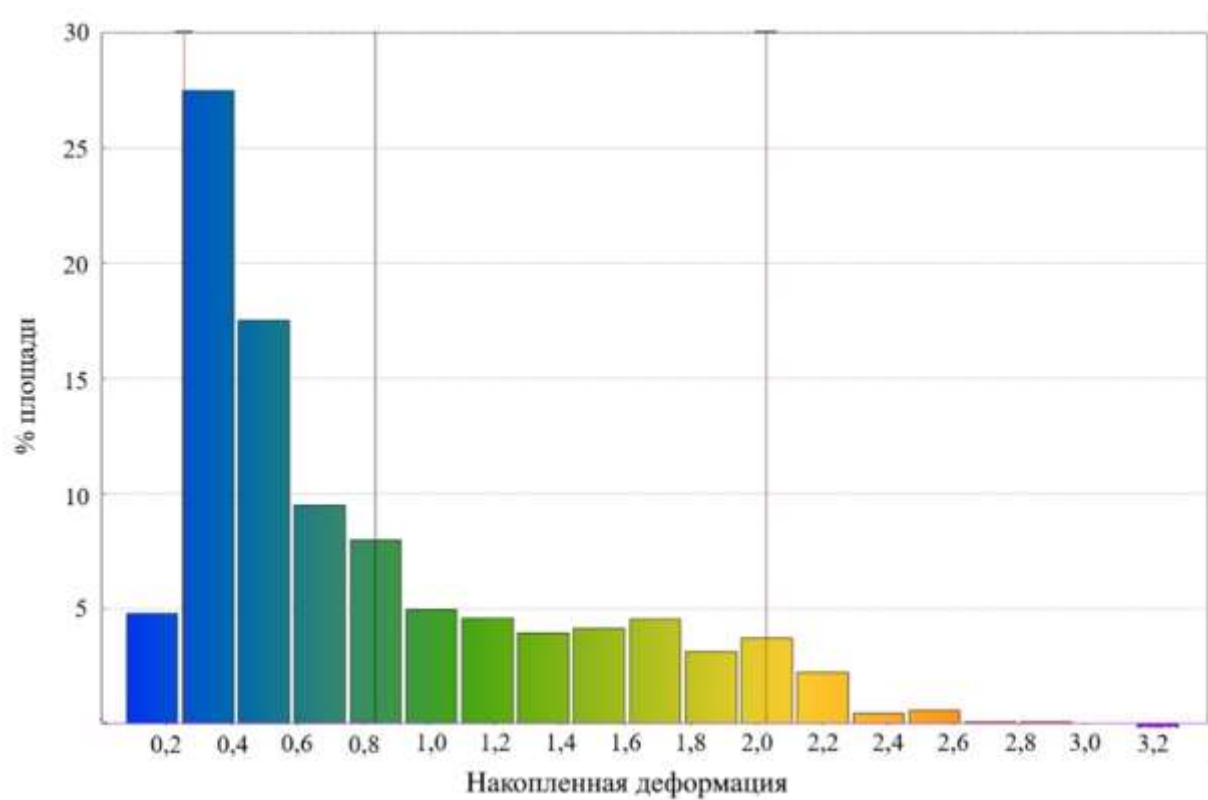
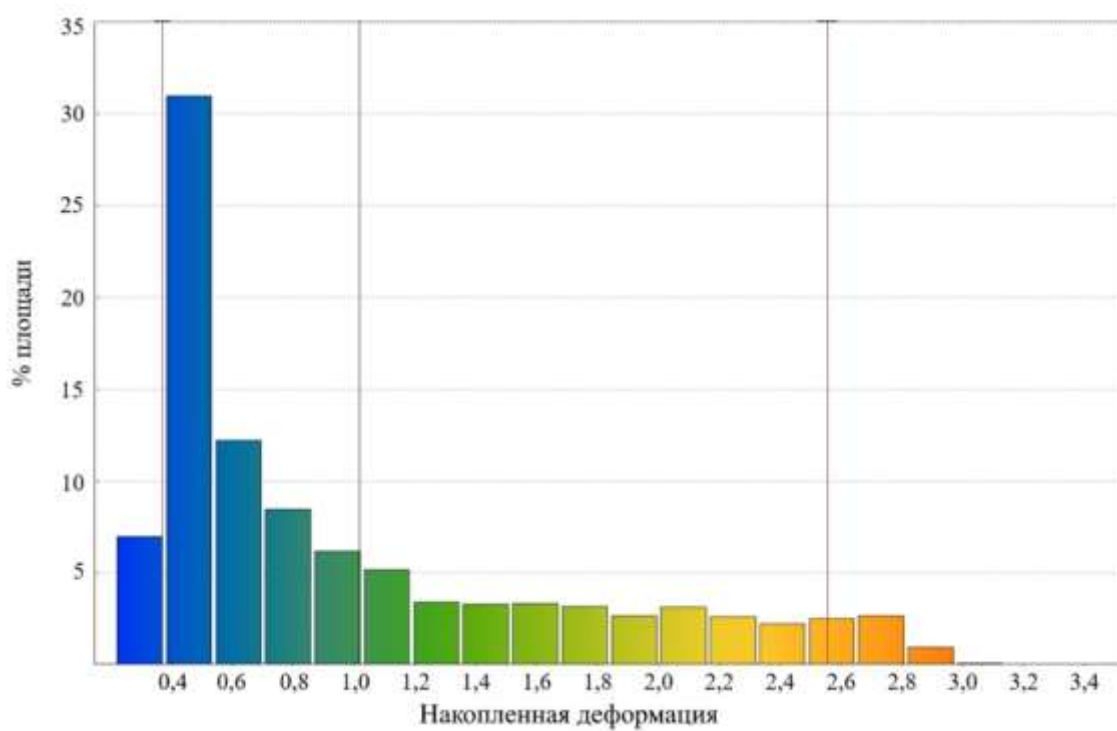


Рисунок 131. Поле значений накопленной деформации в продольном (диаметральном) сечении заготовки после трёхвалковой (а) и четырёхвалковой прокатки (б)



а



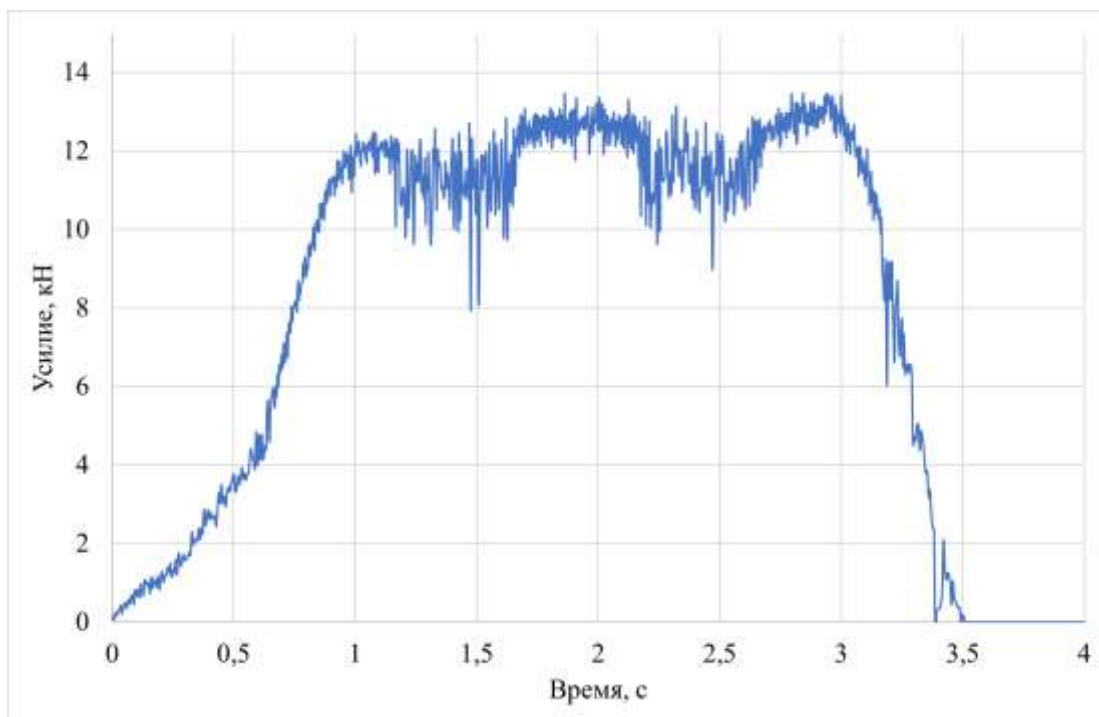
б

Рисунок 132. Гистограммы распределения значений накопленной деформации в диаметральном продольном сечении заготовки после трёхвалковой (а) и четырёхвалковой (б) прокатки

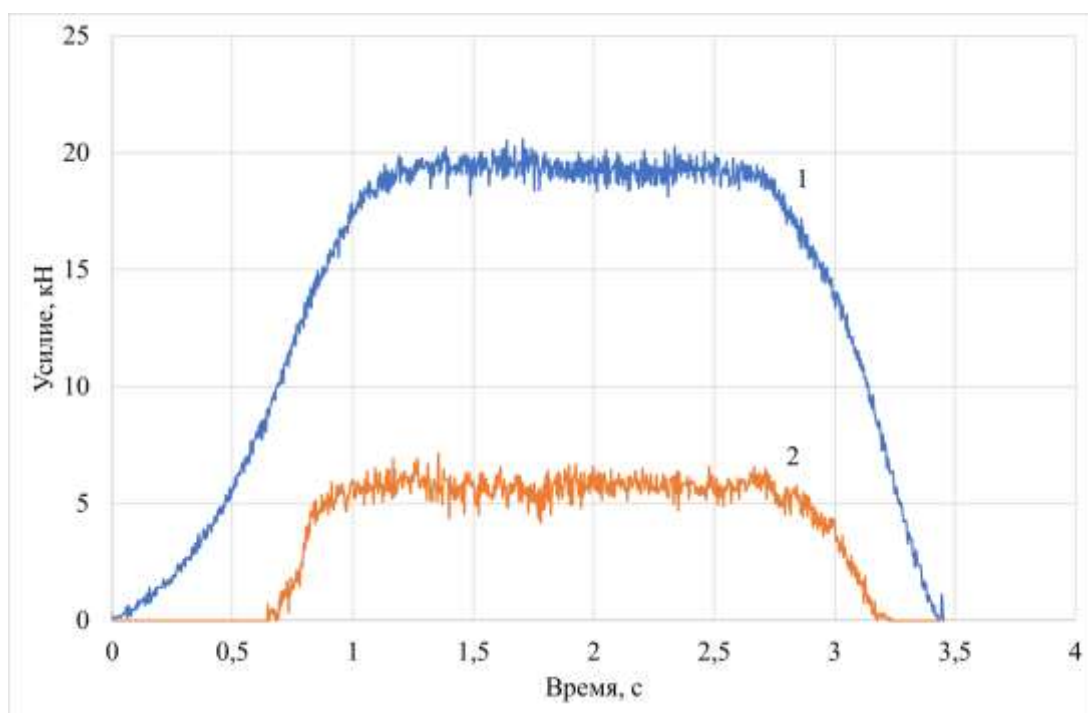
Согласно результатам моделирования (рис. 131-132) видно, что наименьшие значения накопленной деформации имеют место в центральной области заготовок. При этом средние значения накопленной деформации в продольном сечении заготовки, определённые с помощью инструментария QForm, после трёхвалковой прокатки 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 достигаются большие значения накопленной деформации и деформация глубже проникает в заготовку по сравнению с трёхвалковой прокаткой, то есть осевая зона заготовки в деформационном плане будет прорабатываться интенсивнее при четырёхвалковой прокатке, что особенно существенно при деформации литых заготовок.

Для оценки риска разрушения заготовки при трёх- и четырёхвалковой прокатке с помощью инструментария QForm оценили значения нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма [223] и критерия разрушения Ойена [136,234] при прокатке с постоянным фактором трения. Известно, что чем больше значение критерия разрушения, тем вероятнее разрушение заготовки. Максимальное значение нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма при трёхвалковой прокатке 0,451, при четырёхвалковой – 0,419. Максимальное значение критерия разрушения Ойена при трёхвалковой прокатке 1, при четырёхвалковой прокатке – 0,96.

С помощью инструментария QForm построили графики усилия на валки при трёх- и четырёхвалковой прокатке (рис. 133) при постоянном факторе трения. Согласно графикам, изображённым на рис. 5, процесс четырёхвалковой прокатки при постоянном факторе трения протекает на 0,1 с быстрее по сравнению с трёхвалковой. Также построили графики усилий на валки при переменном факторе трения при трёх- и четырёхвалковой прокатке (рис. 134). Периодический характер изменения фактора трения увеличивает время прокаток по обеим схемам: до 4,9 с при четырёхвалковой и до 5,2 с при трёхвалковой. При этом увеличилась разница во времени: четырёхвалковая прокатка протекает на 0,3 с быстрее, чем трёхвалковая прокатка. По графикам, представленным на рис. 6 можно заметить, что резкие изменения усилия на валке при трёхвалковой прокатке происходят при значениях фактора трения 1,3-2,6, при четырёхвалковой – 1,3-1,9. Возврат к установившемуся течению процесса при четырёхвалковой прокатке наступает быстрее (при значениях фактора трения не выше 1,9), чем при трёхвалковой прокатке (при значениях фактора трения не выше 2,6).

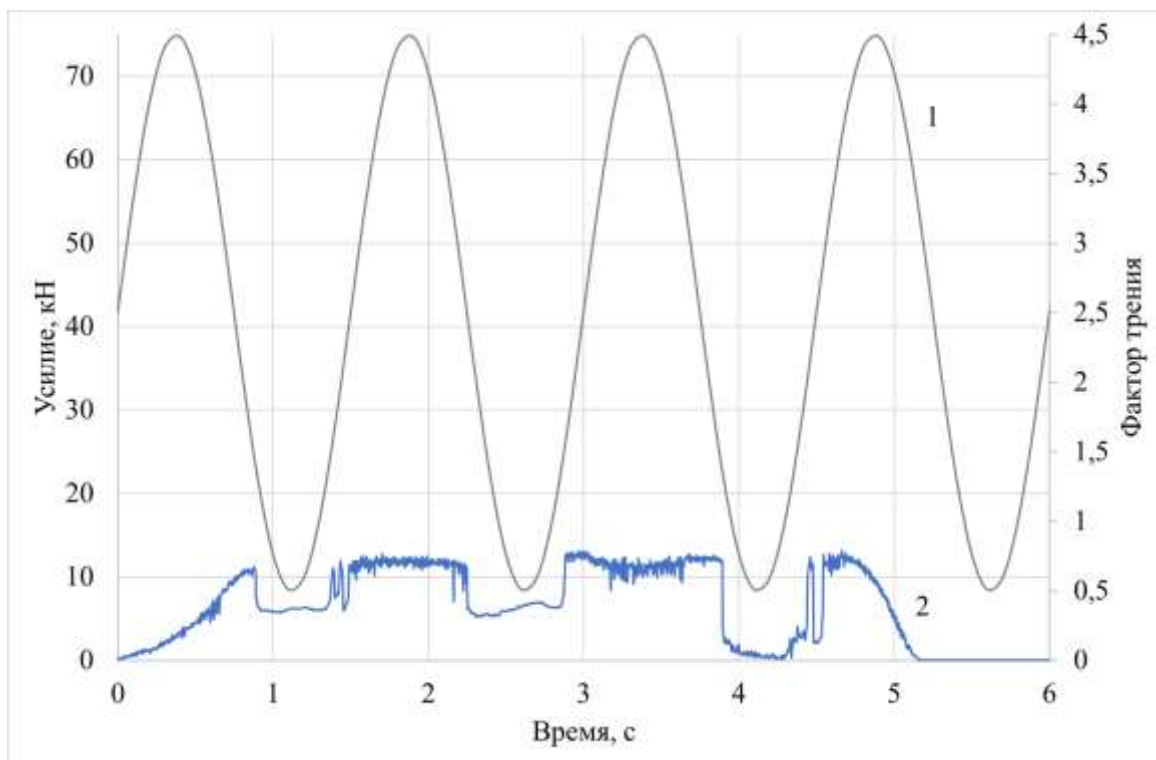


а

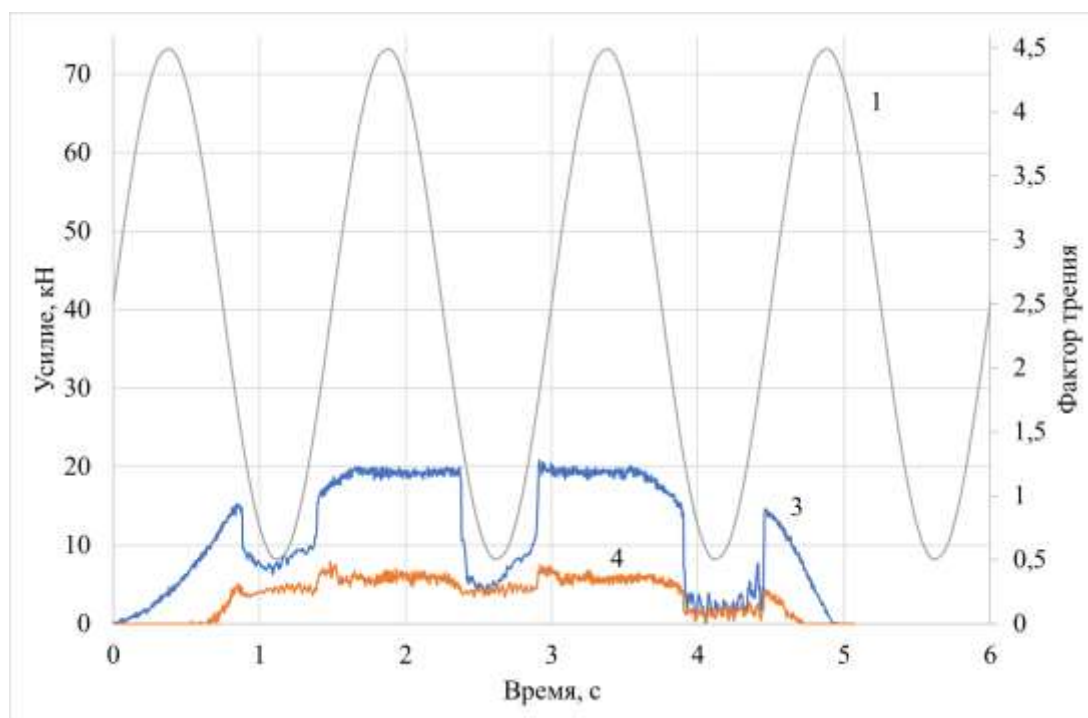


б

Рисунок 133. Усилие на валок при трёхвалковой прокатке (а), усилие при четырёхвалковой прокатке (б) на основной (1) и вспомогательный (2) валки



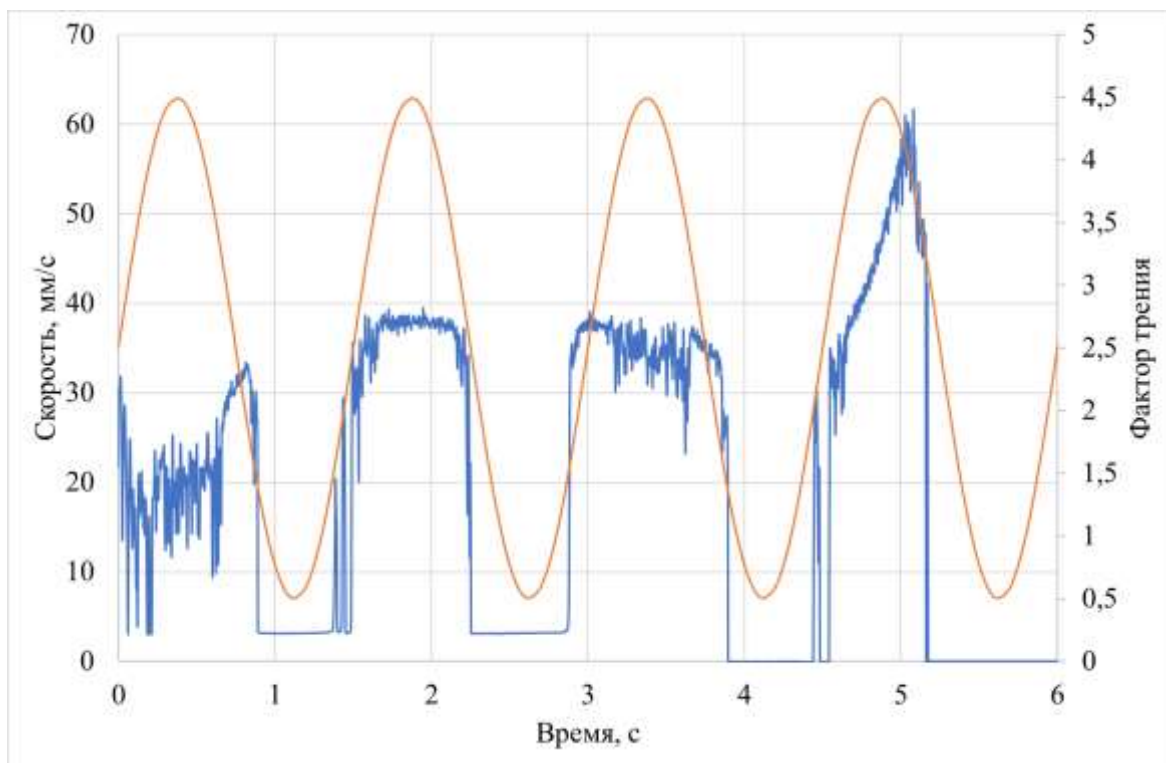
а



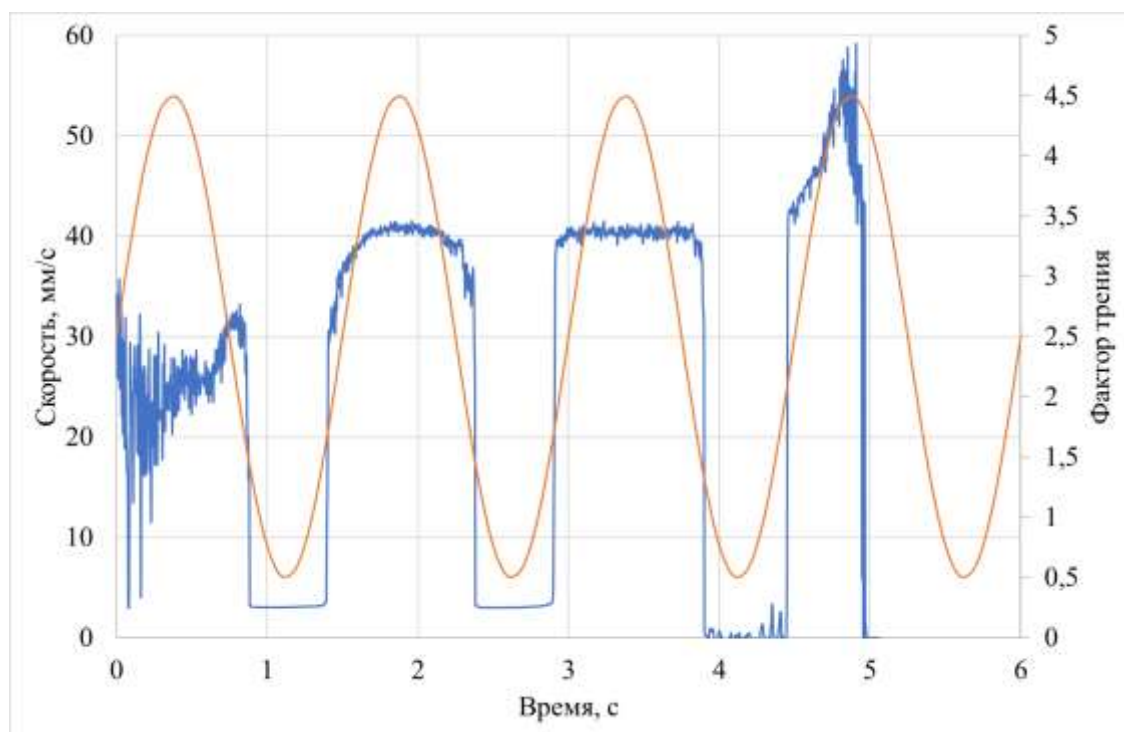
б

Рисунок 134. Усилие на валок (2) при трёхвалковой прокатке (а) и на основной (3) и вспомогательный (4) валки при четырёхвалковой прокатке (б) при периодическом характере изменения фактора трения (1)

При дальнейшем исследовании оценили изменение скорости точки, лежащей на переднем торце заготовки и принадлежащей оси заготовки. Графики изменения скорости точки при трёхвалковой и четырёхвалковой прокатках представлены на рис. 135.



а



б

Рисунок 135. Изменение скорости точки на переднем торце заготовки при трёхвалковой (а) и четырёхвалковой (б) прокатке при периодическом характере изменения фактора трения

Согласно рис. 135 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 подает либо до 3 мм/с, либо до нуля, при трёхвалковой прокатке составляет 0,62 с, 0,62 с и 0,65 с, при четырёхвалковой прокатке – 0,53 с, 0,53 с и 0,55 с. При этом в интервале от 1 с до 4 с, т.е. большей частью на установившейся стадии прокатки скорость точки достигает 40-41 мм/с при четырёхвалковой прокатке и 39 мм/с при трёхвалковой прокатке.

4.6 Выбор угла подачи для опытных прокаток

С помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm провели компьютерное моделирование процессов четырехвалковой винтовой прокатки заготовок из стали 45 при углах подачи валков 12, 15, 18 град при температуре 1200 °С. Прокатка осуществлялась четырьмя валками, два из которых – основные – имели чашевидную форму и одинаковые размеры и два – вспомогательные – грибовидной формы и одинаковых размеров. Отношение диаметра в пережиме чашевидного валка к диаметру в пережиме грибовидного валка составляет 1,4, угол раскатки для чашевидных валков составляет минус 7°, для грибовидных валков плюс 7°. Расстояние между основными валками в пережиме составляло 54 мм, а между вспомогательными 58 мм. Диаметр заготовки перед прокаткой составлял 60 мм, длина – 300 мм. Скорость вращения рабочих и вспомогательных валков составляла 70 об/мин и 80 об/мин соответственно. В SolidWorks создали модели валков и заготовки, затем создали из этих моделей сборки, загрузили их в QForm (рис. 136). При моделировании использовали граничные условия «толкатель» и «вращение». Скорость заготовки в пределах области граничного условия «толкатель» составляла 5 мм/с вдоль оси прокатки. Теплообмен между валками и заготовкой задавали как «простой» из меню QForm. Материалом валков приняли сталь 40X. При задании фактора трения выбирали закон трения «Зибель» с постоянной величиной 3. Использование завышенной величины

фактора трения в QForm вызвано тем, что при факторе трения, равном 1, в расчете касательные напряжения от сил трения равны максимальным касательным напряжениям материала заготовки, но при этом может происходить проскальзывание в контакте с инструментом. При завышении фактора трения касательные напряжения также не превышают максимальные касательные напряжения материала заготовки, но скорость проскальзывания стремится к нулю. Для оценки напряжённо-деформированного состояния использовали трассировку точек. Выбрали 7 точек на радиусе заготовки на установившейся стадии с шагом 5 мм и три точки на неустановившейся стадии на расстоянии 30 мм от торца с шагом 15 мм.

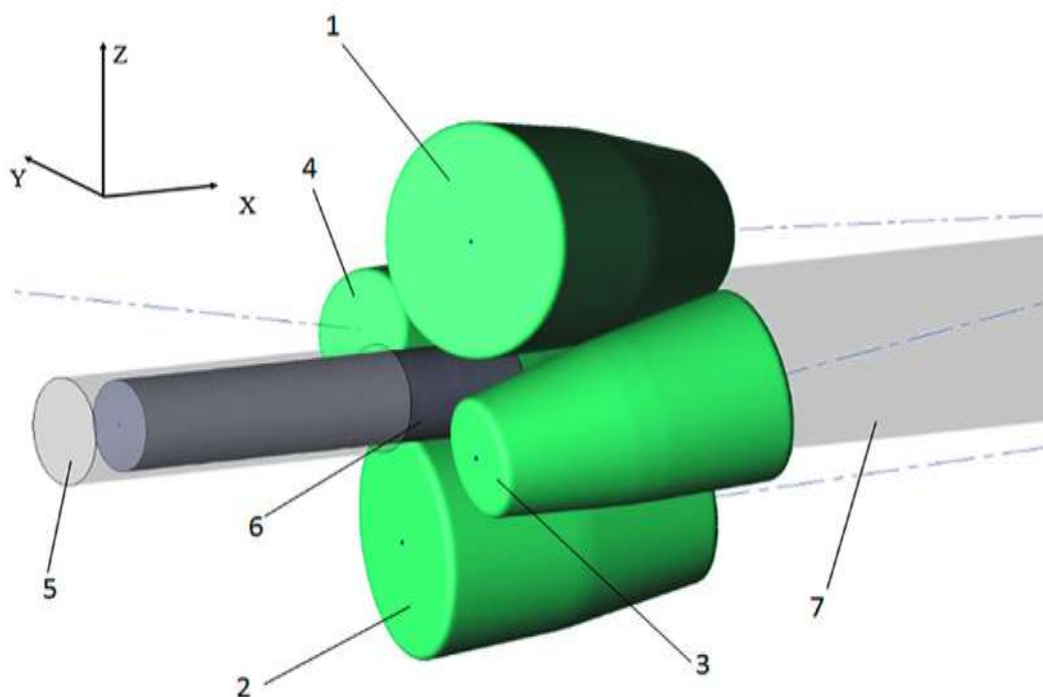


Рисунок 136. Модель в QForm для расчёта формоизменения при четырёхвалковой винтовой прокатке: 1,2 – основные валки, 3,4 – вспомогательные валки, 5 – область граничного условия «толкатель», 6 – заготовка; 7 – область граничного условия «вращение».

Оценили среднее значение и среднеквадратичное отклонение накопленной деформации в объёмах прокатанных заготовок (рис. 137-139). Распределение накопленной деформации в диаметрально-продольном сечении является характерным для всех схем винтовой прокатки: наименьшие значения в центре, наибольшие – у поверхности. Среднее значение накопленной деформации с ростом угла подачи валков снижается на 37%, среднеквадратичное отклонение – на 35% (рис. 138). В связи с этим при угле подачи валков 18 градусов предполагается наиболее равномерное деформированное состояние. На рис.

139 видно, что размах значений между центром и поверхностью на установившейся стадии в поперечном сечении по радиусу минимальный - 2,86 - при угле подачи 18 градусов.

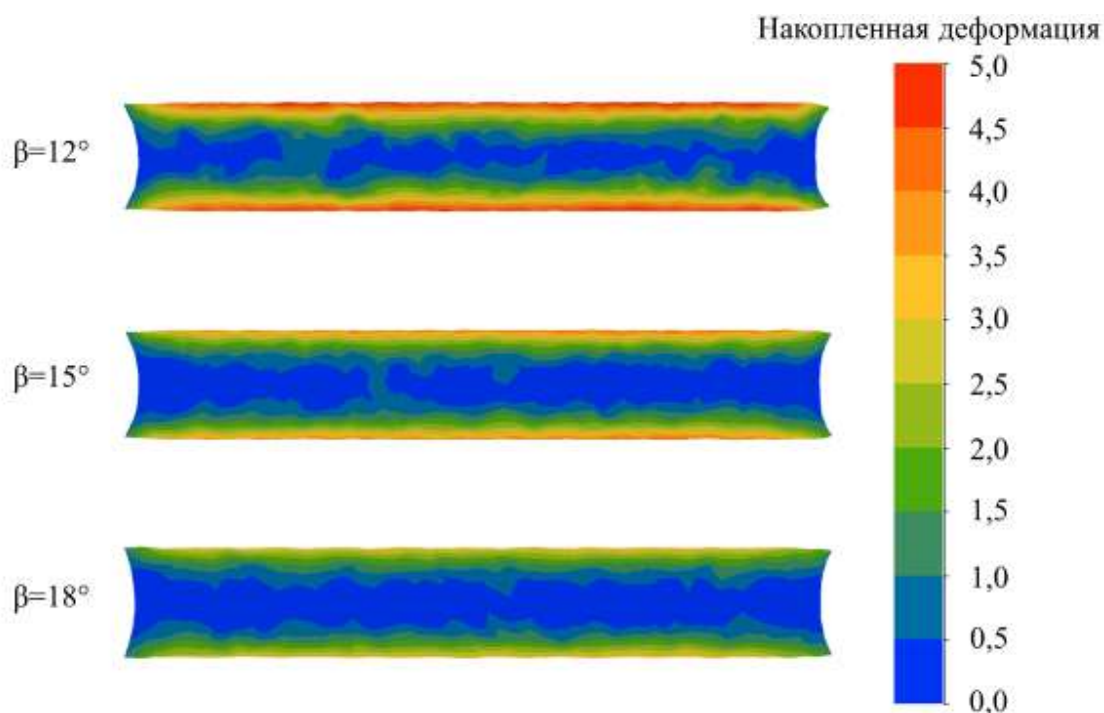


Рисунок 137. Поля распределения значений накопленной деформации в диаметральной продольном сечении при различных углах подачи β

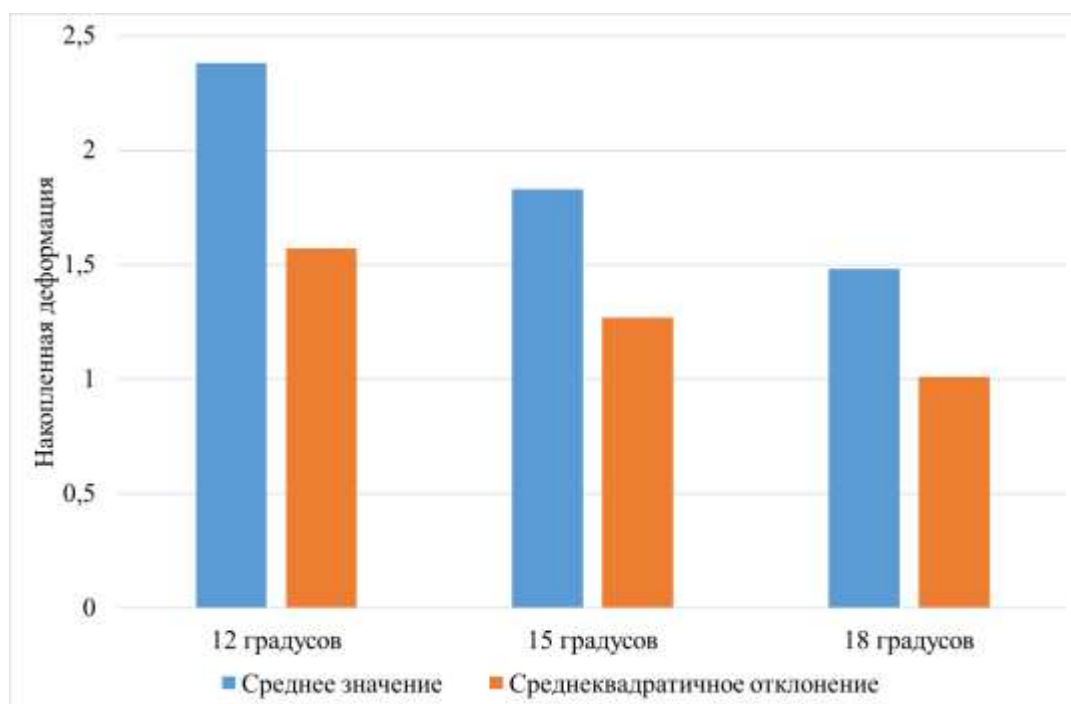


Рисунок 138. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение накопленной деформации при прокатке с различными углами подачи валков

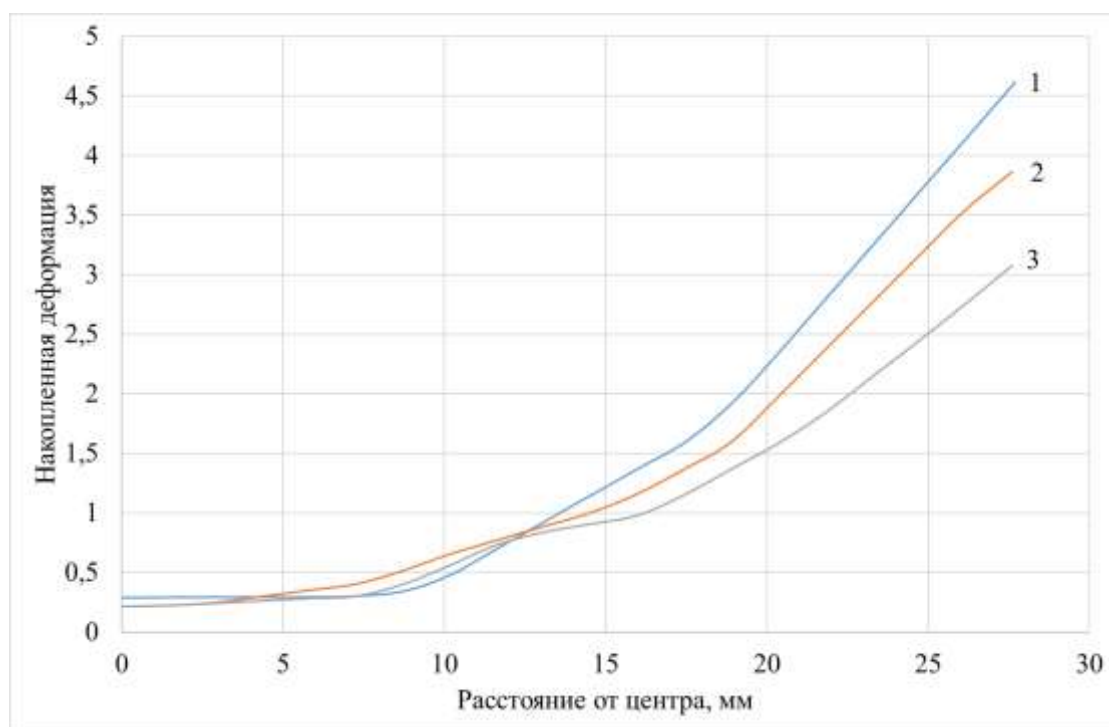


Рисунок 139. Изменение накопленной деформации по радиусу заготовки на установившейся стадии при прокатке с углами подачи валков 12 (1), 15 (2) и 18 (3) градусов.

По данным рис. 137-139 углом подачи, при котором более равномерное деформированное состояние и наибольшее проникновение деформации вглубь заготовки, является угол 18 градусов.

Для оценки вероятности разрушения для точек, расположенных на неустановившейся стадии в центре, середине радиуса и у поверхности, рассчитали среднее значение коэффициента жёсткости напряжённого состояния за время нахождения точки в очаге деформации, а также значения накопленной деформации по окончании прокатки (рис. 140).

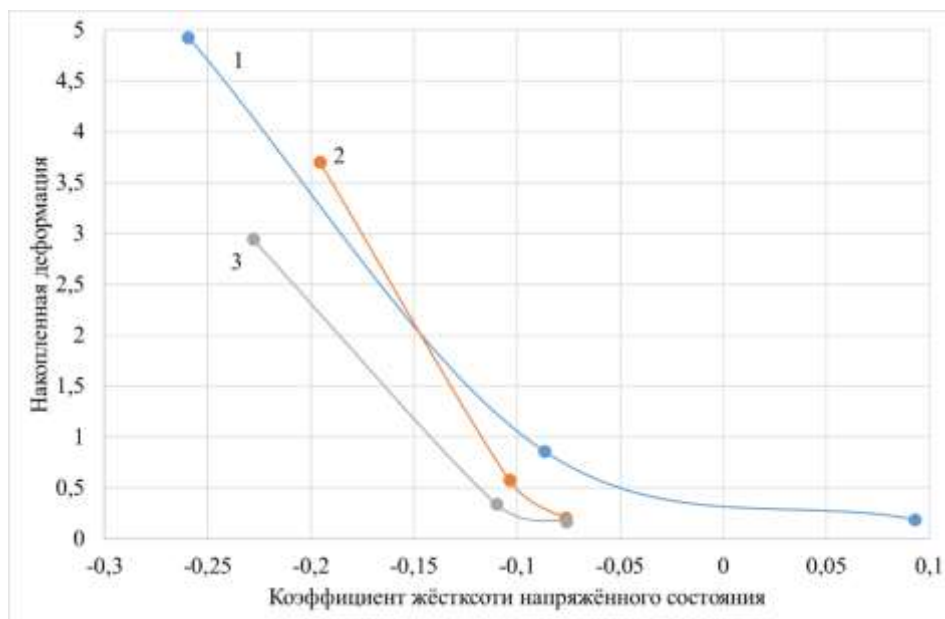


Рисунок 140. Средние значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния и значения накопленной деформации при прокатке с углами подачи 12 (1), 15 (2) и 18 (3) градусов: крайняя левая точка для каждой линии – соответствует значениями для точки у поверхности заготовки, в середине линии – середине заготовки, крайняя правая на линии – центру заготовки

Исходя из вида кривой пластичности, чем левее и ниже располагается точка в координатах «накопленная деформация – коэффициент жесткости напряжённого состояния», тем менее вероятно разрушение. По рис. 140 видно, что в целом, при четырёхвалковой схеме в условиях проведенного моделирования, разрушение наиболее вероятно в центре заготовки. При этом с ростом угла подачи вероятность разрушения снижается.

С точки зрения снижения риска разрушения и равномерности деформированного состояния углы подачи 15 и 18 градусов предпочтительнее. При этом при угле подачи 18 градусов расстояние между основными и вспомогательными валками не превышает 5 мм. В связи с этим, с точки зрения удобства эксплуатации целесообразно осуществлять прокатку при угле подачи 15 градусов.

4.7. Выбор коэффициента овализации для опытных прошивок

Моделировали процесс прошивки в четырёхвалковом стане винтовой прокатки. Схема очага деформации с указанием основных размеров деформирующего инструмента представлена на рис. 141 Угол подачи основных и вспомогательных валков составлял 15

градусов. В SolidWorks предварительно создали модели валков, оправки и заготовки, из этих моделей сделали сборки, сохранили в формате .step и загрузили в QForm. Расстояние между основными валками в пережиме составляло 53 мм, моделировали процессы с коэффициентом овализации 1,02, 1,04 и 1,06. Диаметр исходной заготовки составлял 60 мм.

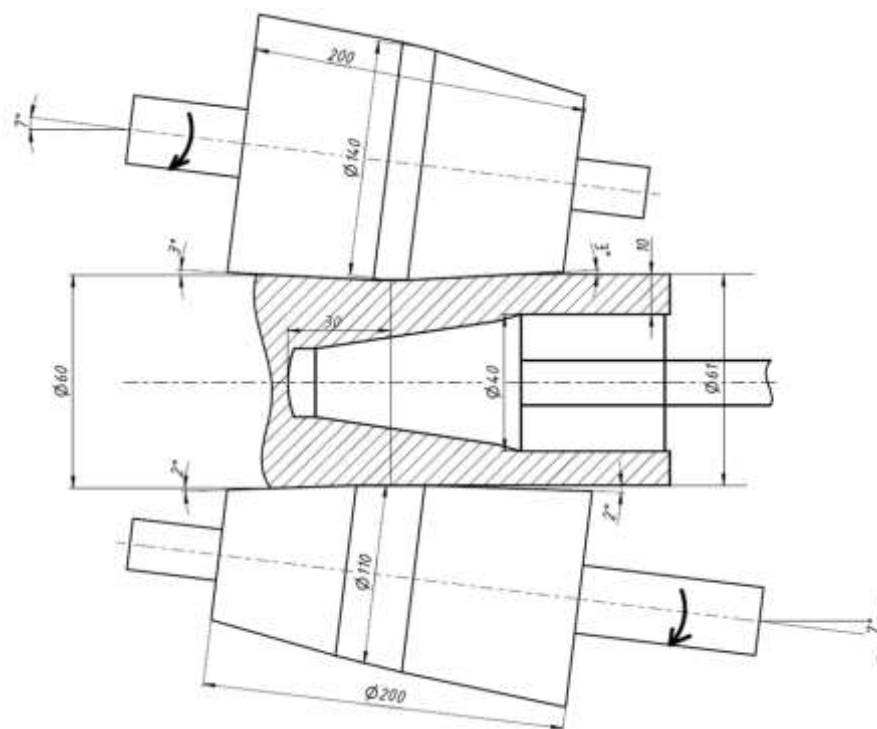


Рисунок 141. Схема очага деформации четырёхвалкового стана при прошивке

В QForm задали материал заготовки сталь 45. Основные валки вращались со скоростью 90 об/мин, вспомогательные – 100 об/мин. Исходя из опыта конечно-элементного моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки фактор трения для пар «валок-заготовка» задали равным 3, закон трения «Зибель», для пары «оправка-заготовка» - 0,3, закон трения «Зибель». При моделировании использовали граничные условия «толкатель» и «вращение», а также адаптацию сетки конечных элементов в очаге деформации.

На рис. 142 показаны значения усилий на деформирующий инструмент при прошивке с различным коэффициентом овализации.

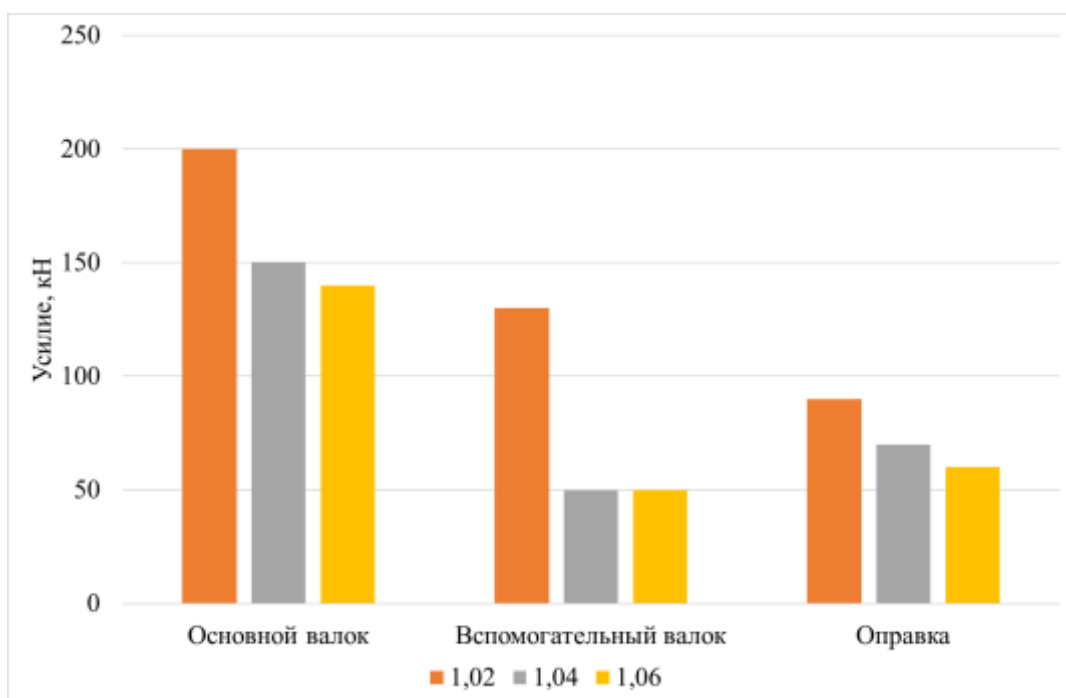


Рисунок 142. Усилие на деформирующем инструменте при прошивке с различным коэффициентом овализации

Согласно рис. 142 увеличение овализации с 1,02 до 1,06 снижает усилие на основной валок в 1,4 раза, вспомогательный – в 2,5 раза, на оправку – в 1,5 раза.

По результатам моделирования оценили изменение значений накопленной деформации по длине полученных гильз, считая от переднего торца, оценка проводилась для середины по толщине стенки гильзы (рис. 143).

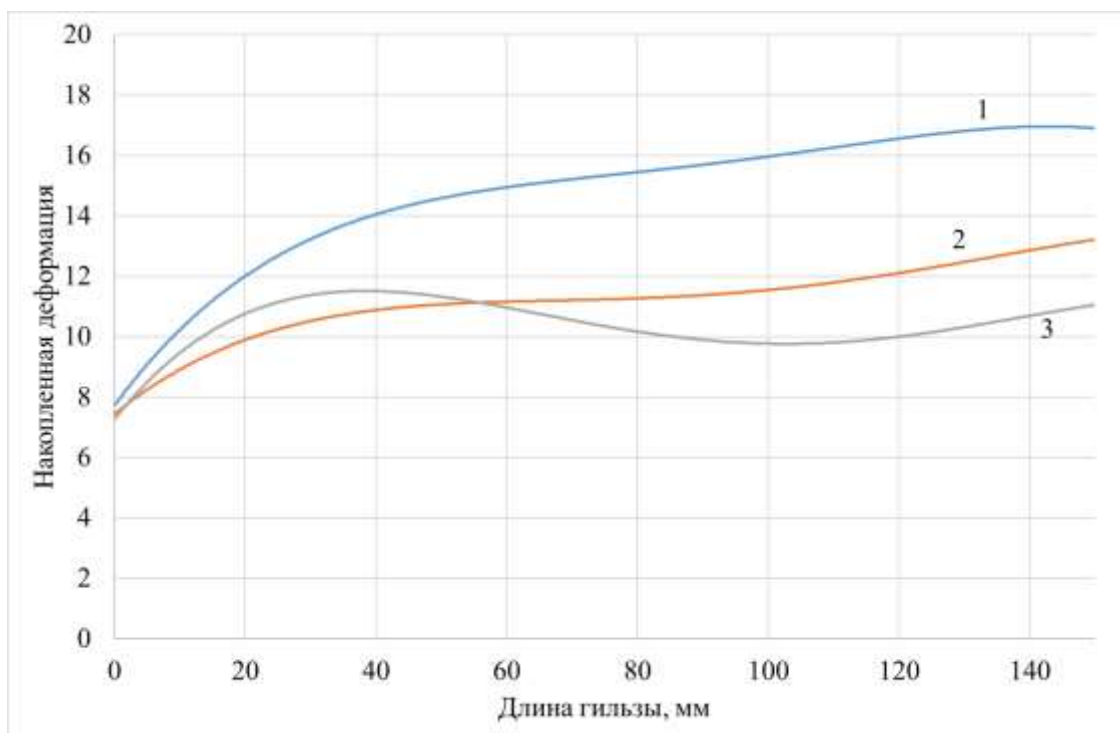


Рисунок 143. Изменение накопленной деформации по длине гильз при прошивке с коэффициентом овализации 1,02 (1), 1,04 (2) и 1,06 (3)

На выбранной длине гильзы (150 мм) при коэффициенте овализации 1,02 накопленная деформация монотонно возрастает, т.е установившаяся стадия не наступает, размах значений составляет 9,45. При этом при коэффициенте овализации 1,04 и 1,06 на длине больше 50 мм колебания значений накопленной деформации не превышает 15%, можно говорить о переходе к установившейся стадии, размах значений составляет 5,78 и 4,62, соответственно. Исходя из данных рис. 2-3 прошивку при коэффициенте овализации 1,02 проводить нецелесообразно, т.к. имеют место наибольшие энергозатраты и наименее равномерное деформированное состояние.

Далее проводили сравнительную оценку для прошивки с коэффициентом овализации 1,04 и 1,06. В табл. 17 приведены показатели точности получаемых гильз.

Таблица 17. Показатели точности размеров гильз по результатам компьютерного моделирования

Параметр/ Коэффициент овализации	Средняя толщина стенки, мм	Размах значений толщины стенки, мм	Среднеквадрат ичное отклонение толщины стенки, мм	Овальность гильзы ($D_{\text{макс}}/D_{\text{мин}}$)
1,04	8,17	0,47	0,20	1,005
1,06	8,18	0,28	0,12	1,001

Согласно табл. 1 точность размеров гильз при прошивке с коэффициентом овализации 1,06 выше. На рис. 144 представлены графики изменения усилия на оправку.

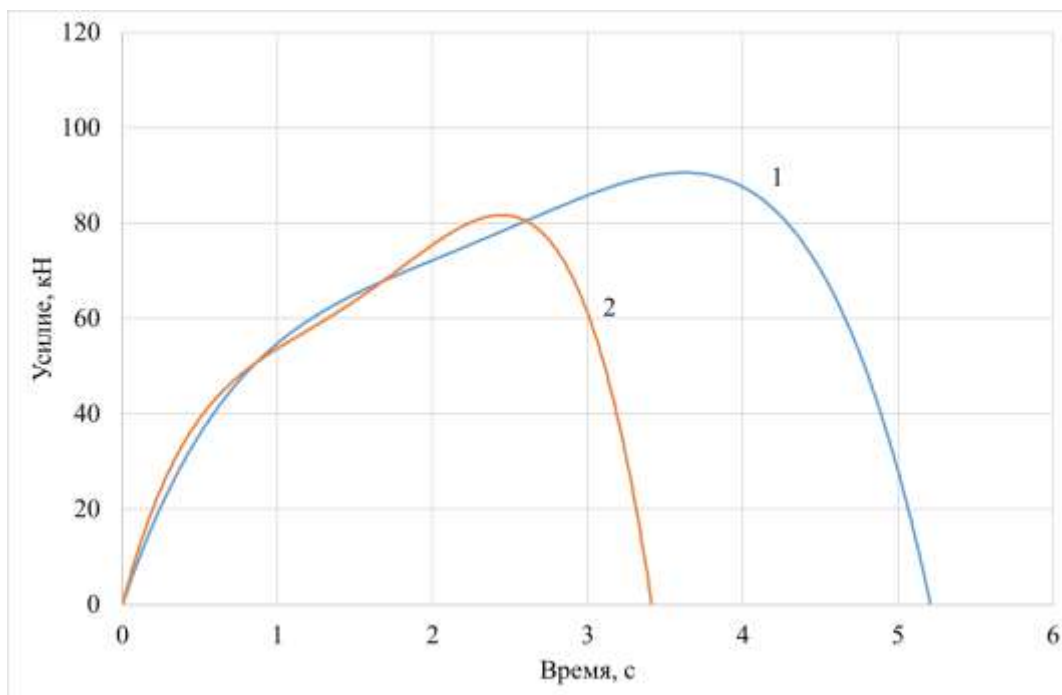


Рисунок 144. Осовое усилие на оправку при прошивке с коэффициентом овализации 1,04 (1) и 1,06 (2)

Согласно рис. 144. Видно, что при прошивке с коэффициентом овализации 1,06 процесс протекает в 1,5 раза быстрее, что приводит к тому, что средняя температура гильзы по окончании прошивки составляет 1048°С, при этом при коэффициенте овализации 1,04 - 1007°С. Это, в свою очередь, является главной причиной снижения энергозатрат при увеличении коэффициента овализации с 1,04 до 1,06.

4.8 Прокатка и прошивка заготовок в лабораторно-промышленном четырёхвалковом стане

Используя результаты исследований существующих схем винтовой прокатки, изложенные в Главе 2 и Главе 3, в [235-245], Учитывая результаты исследований 4.1-4.7 и [246-254], разработали и изготовили лабораторно-промышленный четырёхвалковый стан винтовой прокатки (рис. 145-146). Основные технические характеристики стана представлены в табл. 18.



Рисунок 145. Лабораторно-промышленный четырёхвалковый стан винтовой прокатки

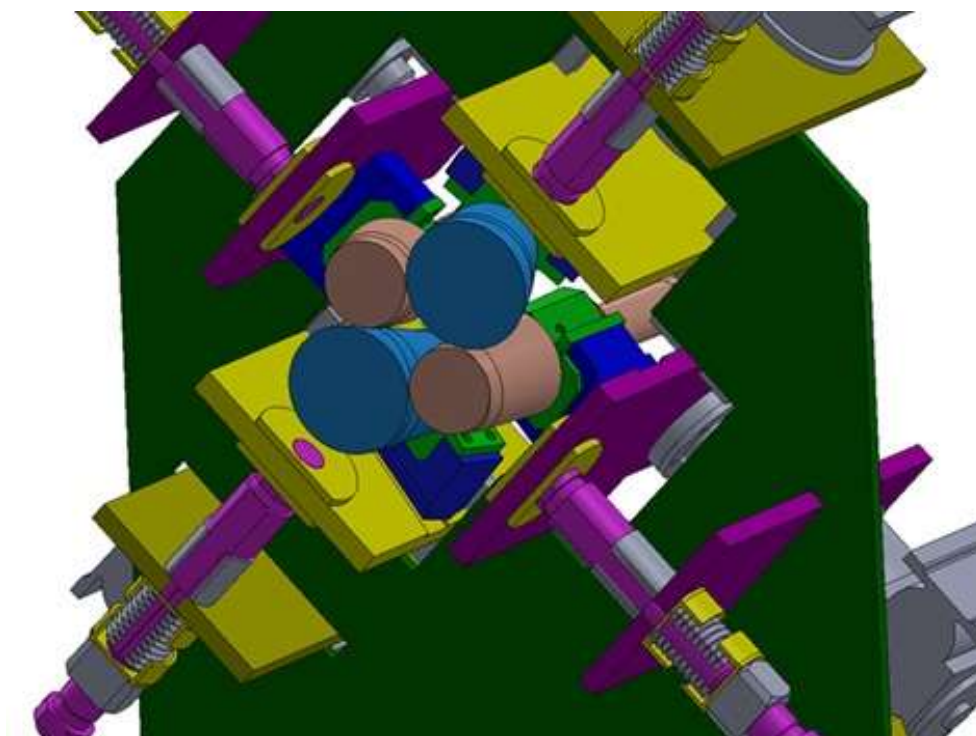


Рисунок 146. Изометрия рабочей клетки четырехвалкового стана в разрезе

Таблица 18. Основные технические характеристики четырёхвалкового стана

Наименование показателя	Значение
----------------------------	----------

Диаметр исходной заготовки, мм	55–65
Диаметр конечной гильзы, мм	50–65
Длина конечной гильзы, мм	до 700
Диаметр чашевидных / грибовидных валков в пережиме, мм	140/110
Угол раскатки чашевидных / грибовидных валков, град	–7 / +7
Макс. усилие на валок / осевое на оправку, кН	150\50
Мощность главного привода, кВт	2x30+2x18,5
Частота вращения валков, об/мин	до 100
Скорость прокатки, мм/с	до 120
Габаритные размеры (L×B×H), мм	7000x2500x1200
Масса стана, кг	7000

Провели прокатку заготовки из стали 40Х диаметром 62 мм и длиной 200 мм. Нагрев – до 1150 °С в электрической камерной печи. Частоты вращения грибовидного и чашевидного валков – 38 и 45 об/мин; различие частот обеспечивает выравнивание

окружных скоростей при разных диаметрах валков в пережиме. Смазки не применялись. По окончании прокатки средний диаметр заготовки составлял 54 мм. На поверхности заготовки наблюдали винтовые линии с шагом 50 мм (рис. 147).



Рисунок 147. Шаг винтовой линии на поверхности прокатанного прутка

Параметры опытных прошивок представлены в табл. 19. Полученные гильзы представлены на рис. 148-149

Таблица 19. Технологические параметры и результаты серии Б

Параметр	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
Марка стали (сплава)	40X	45	45	АМг
D ₀ , мм / L ₀ , мм	60 / 320	60 / 250	60 / 250	60 / 400
Диаметр оправки, мм	40 / 46*	40	40	—
n чаш. / гриб., об/мин	60 / 70	70 / 80	70 / 80	—
D гильзы, мм	61–62	61	61	59**
Толщина стенки, мм	6,7–7,0	10,0	10,0	—
Длина, мм	580	540	430	—
Коэфф. вытяжки λ	1,88/2,77*	1,77	1,77	1,03
Макс. нагрузка, А	—	150	—	—

* Двухстадийная обработка «прошивка Ø40 – раскатка Ø46»; ** прокатка без оправки.



Рисунок 148. Гильзы после охлаждения (указаны размеры и марки сталей)



Рисунок 149. Торцы гильз: оценка толщины стенки и качества внутренней поверхности

Также провели прошивку и раскатку заготовок из титанового сплава ПТ7М при температуре 950°C согласно параметрам Опыта 1 табл. 19. Полученные гильзы и трубы имели разностенность не более 0,4 мм. При этом толщина стенки трубы составляла 7,5 мм. Согласно параметрам опыта 1 табл. 19 также проведена прошивка заготовок из алюминиевого сплава АК7Т1 и бронзы БрКМц3-4-1.

4.9 Оценка скручивания гильз при двух- и четырёхвалковой винтовой прошивке

Управление качеством получаемых изделий при деформации в станах винтовой прокатки является актуальной задачей [265], учитывая достаточно сложный характер формоизменения [266] и связанных с этим явлений [267-276]. Процесс винтовой прокатки, в особенности винтовой прошивки, сопровождается скручиванием заготовки и гильзы

[13,24,277] из-за различной скорости вращения смежных сечений в очаге деформации. Большинство специалистов считает скручивание отрицательным явлением, так как оно вызывает дополнительные растягивающие напряжения в металле и способствует образованию дефектов в виде плен и разрывов, ухудшению качества труб.

Очаг деформации прошивного стана представляет из себя объем металла, ограниченный поверхностями приводных валков с активными силами трения, направляющими линейками (роликами, дисками) и оправкой [278] с реактивными силами трения, которые воздействуют на горячий металл через контактные поверхности с различной интенсивностью по его длине (рис.150).

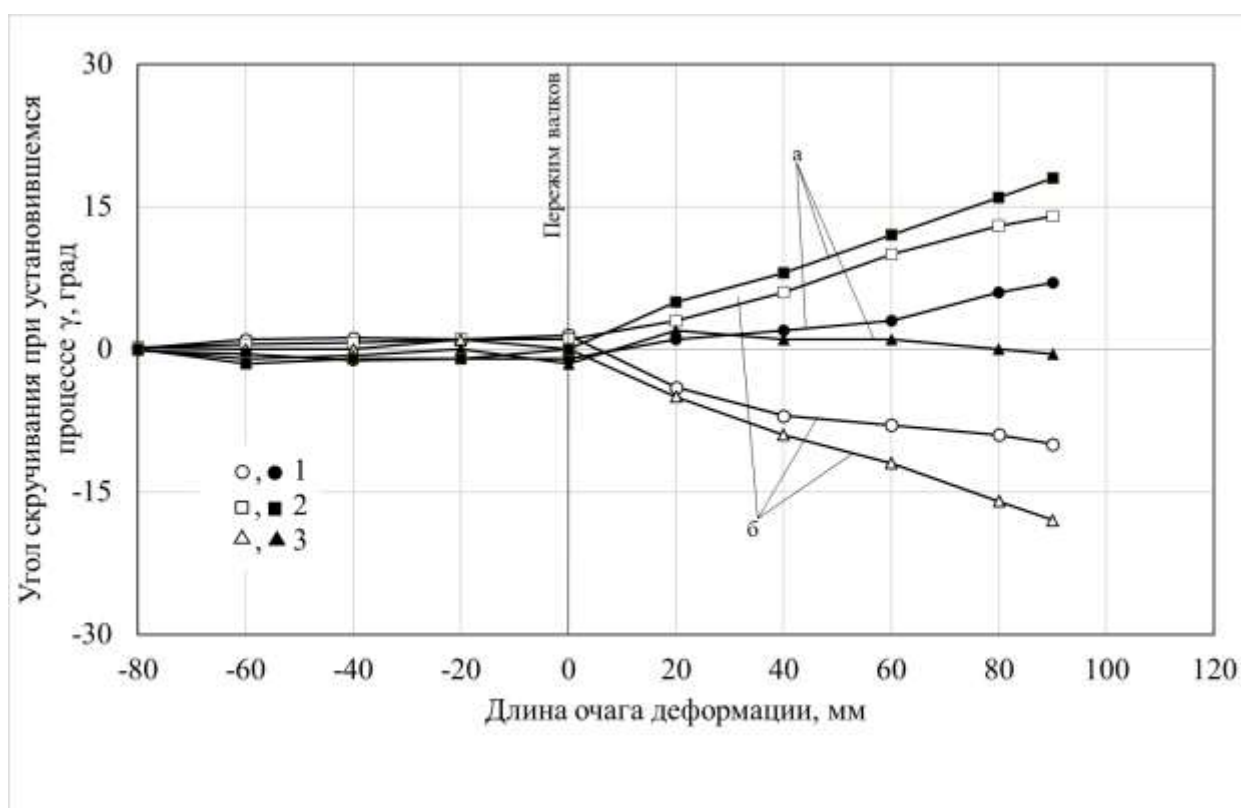


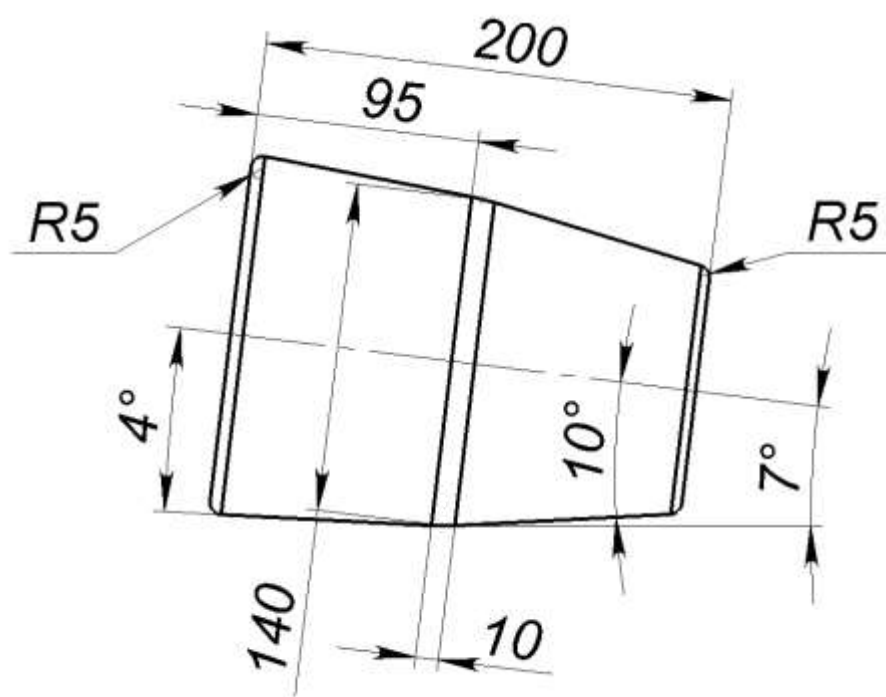
Рисунок 150. Скручивание заготовки-гильзы в очаге деформации при прошивке на угле подачи 18° : а – диаметр оправки 38 мм; б – то же, 50 мм; 1 – бочковидные валки, 2 – грибовидные валки; 3 – чашевидные валки, $\delta=10^\circ$ [13]

По-видимому, первопричиной скручивающего действия валков и скручивания металла является изменение по длине очага деформации отношения радиуса вала R_x к радиусу заготовки r_x [24], но при этом необходимо учитывать воздействие на металл направляющего инструмента и оправки. Направляющие линейки препятствуют течению металла в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях, при этом величина радиального (нормального) усилия металла на линейку T_x составляет 0,2...0,35 от усилия металла на валок. Линейки ограничивают формоизменение металла, а также препятствуют

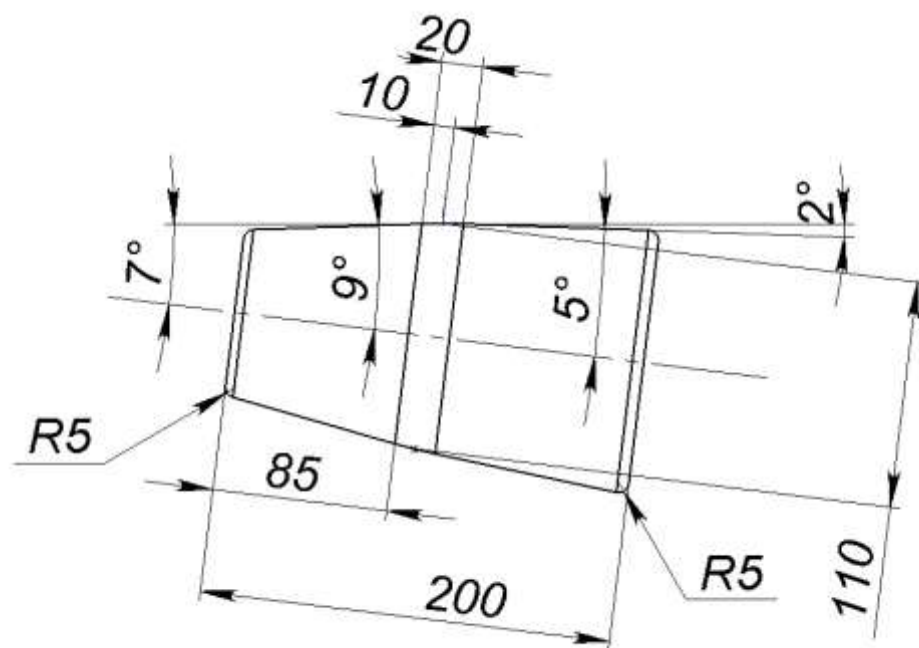
его вращению в очаг деформации и вызывают дополнительное скручивание. В работе [13] на основании экспериментальных исследований показано, что скручивание на участке от сечения входа заготовки в валки до пережима незначительно, а результирующее скручивание формируется на втором участке очага деформации – от пережима до сечения выхода гильзы из валков. На этом участке силы трения со стороны инструмента воздействуют на объем металла, имеющий полые сечения, и в меньшей степени сопротивляются скручивающим силам, в том числе и от неподвижных направляющих линеек. Учитывая изложенное, представляет интерес оценка скручивания гильзы при различных схемах винтовой прошивки.

Для оценки скручивания гильзы провели конечно-элементное компьютерное моделирование процессов двух- и четырёхвалковой прошивки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm [279]. Предварительно в SolidWorks создали модели валков, заготовки и оправки. Размеры валков двух- и четырёхвалкового станов, а также оправки представлены на рис. 151. Диаметр заготовки составлял 60 мм, длина – 300 мм. Расстояние между валками двухвалкового стана в пережиме составляло 52 мм, между линейками – 58 мм. Расстояние между основными (чашевидными) валками четырёхвалкового стана в пережиме составляло 54 мм, между вспомогательными (грибовидными) – 58 мм. Обжатие перед носком оправки, выдвинутой перед пережимом на 30 мм, составляло 5%. Созданные в SolidWorks модели валков, заготовки и оправки позиционировали в сборку, сборку сохраняли в формате .step и загружали в QForm (рис. 152,153). Скорость вращения валков двухвалкового стана и основных валков четырёхвалкового стана задали равной 100 об/мин, скорость вращения вспомогательных валков четырёхвалкового стана задали равной 90 об/мин. Угол подачи валков в каждом стане составлял 15 градусов. Угол раскатки вспомогательных валков четырёхвалкового стана составлял 7 градусов, основных валков четырёхвалкового и валков двухвалкового стана составлял -7 градусов. При расчёте для заготовки использовали граничные условия «толкатель» и «вращение». Материал заготовки – сталь 45, температура заготовки перед прошивкой - 1200°C. Теплообмен между деформирующим инструментом и заготовкой – «Простой» [223]. Фактор трения для пары «валок-заготовка», исходя из опыта моделирования процессов винтовой прошивки в QForm задали равным 3, закон трения «Зибель». Использование завышенной величины фактора трения в QForm вызвано тем, что при факторе трения равном 1 в расчете касательные напряжения от сил трения равны максимальным касательным напряжениям материала заготовки, но при этом может происходить проскальзывание в контакте с инструментом. При завышении фактора трения, касательные напряжения также не превышают максимальные касательные напряжения

материала заготовки, но скорость проскальзывания стремится к нулю. Фактор трения для пар «линейка заготовка» и «оправка-заготовка» задали равным 0,3, закон трения «Зибель». При моделировании оправка имела возможность свободно вращаться при контакте с гильзой.



а



б

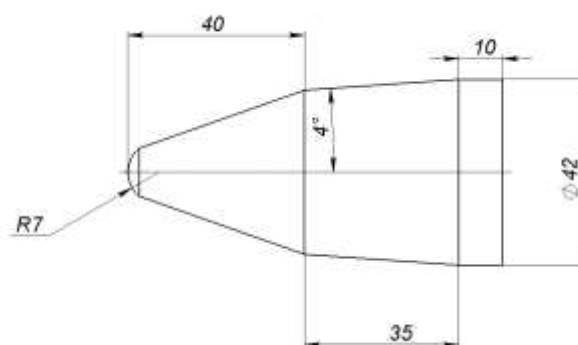


Рисунок 151. Размеры валка двухвалкового стана и основного валка четырёхвалкового стана (а), вспомогательного валка четырёхвалкового стана (б) и оправки (в)

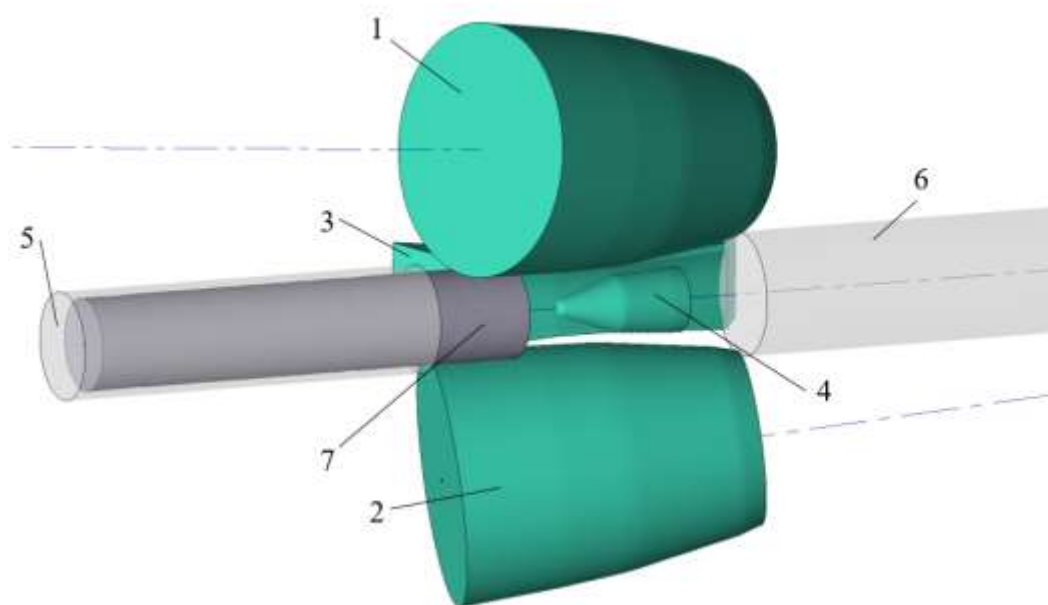


Рисунок 152. Вид модели для расчёта процесса двухвалковой прошивки в QForm: 1,2 – валки, 3 – линейка, 4 – оправка, 5 – граничное условие «толкатель», 6 – граничное условие «вращение», 7 - заготовка (одна линейка для удобства не показана)

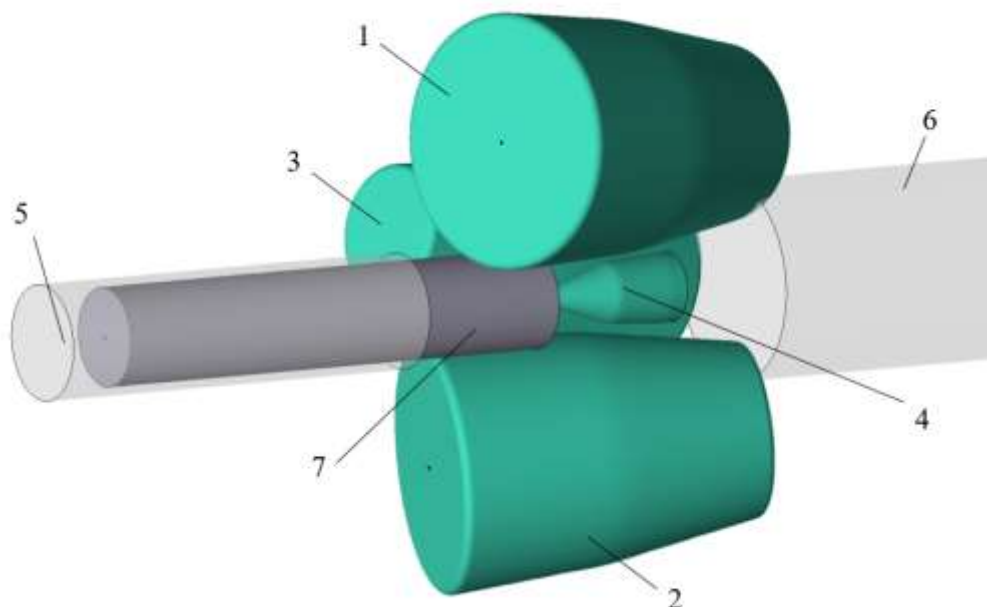


Рисунок 153. Вид модели для расчёта процесса четырёхвалковой прошивки в QForm: 1,2 – основные валки, 3 – вспомогательный валок, 4 – оправка, 5 – граничное условие «толкатель», 6 – граничное условие «вращение», 7 – заготовка (один вспомогательный валок для удобства не показан)

Используя результаты моделирования определяли момент для скручивания поперечных сечений заготовки – гильзы $M_{ск}$ как сумму моментов сил трения от валков $M_в$, линеек $M_н$ и оправки $M_о$, т.е.:

$$M_{ск} = M_в \pm M_н + M_о. \quad (5)$$

Моментом сил со стороны свободновращающейся оправки можно пренебречь. Тогда:

$$M_в = 2 \cdot P_в \cdot f_в \cdot tg\beta, \quad (6)$$

где $P_в$ – усилие металла на валок (2 – для двухвалкового стана и для основных валков четырёхвалкового стана), $f_в$ – коэффициент трения $\sim 0,35$, β – угол подачи, град. Для линеек двухвалкового стана и вспомогательных валков четырёхвалкового стана момент сил трения:

$$M_н = k \cdot P_в \cdot 2 \cdot f_н \cdot tg\beta, \quad (7)$$

где k – коэффициент, учитывающий уровень усилия на линейку относительно усилия на валок при двухвалковой прошивке и уровень усилия на вспомогательный валок относительно усилия на основной валок при четырёхвалковой прошивке, $f_н$ – коэффициент трения, 0,25 для линеек и 0,35 для вспомогательных валков. Тогда момент скручивания при двухвалковой прошивке:

$$M_{ск} = 2 \cdot P_в \cdot 0,35 \cdot tg\beta \pm k \cdot P_в \cdot 0,5 \cdot tg\beta = (0,7 \pm 0,5k) \cdot P_в \cdot tg\beta \quad (8)$$

Момент скручивания при четырёхвалковой прошивке:

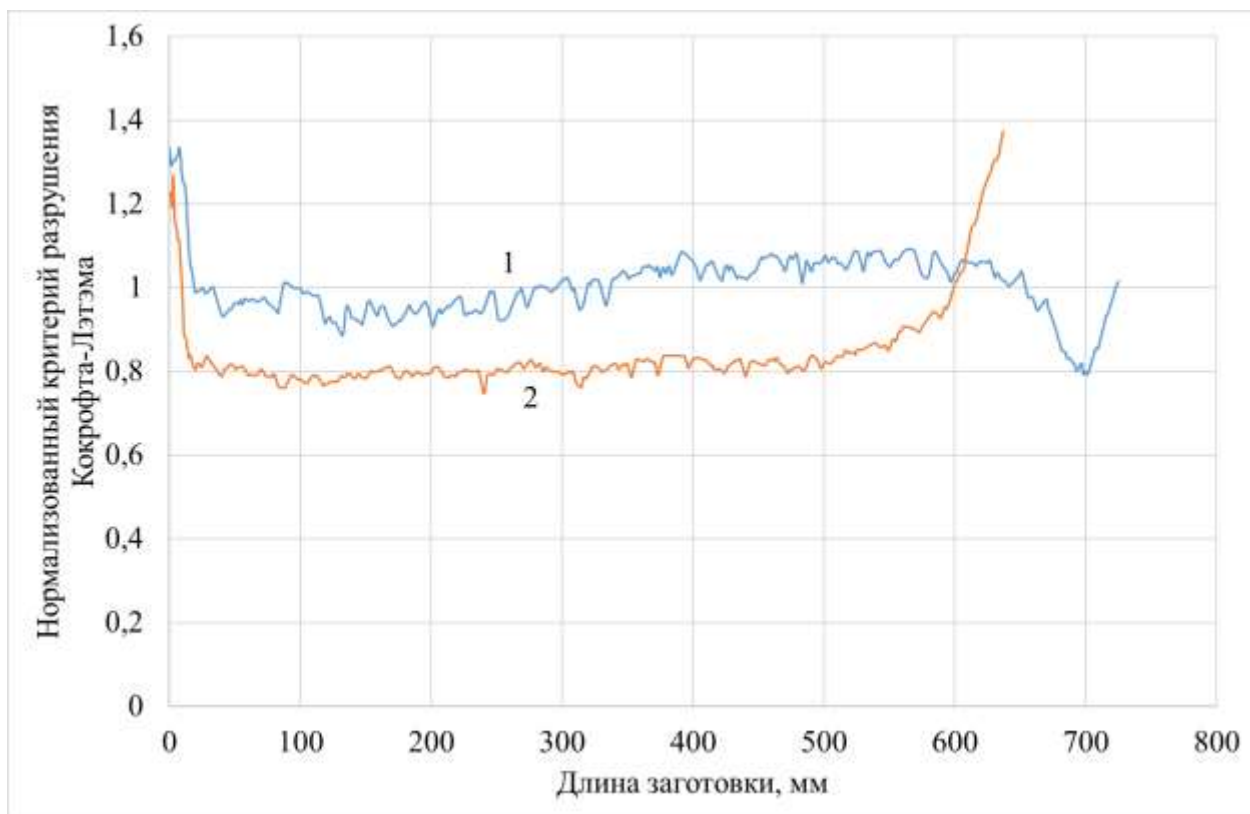
$$M_{ск} = 2 \cdot P_в \cdot 0,35 \cdot tg\beta \pm k \cdot P_в \cdot 0,7 \cdot tg\beta = (0,7 \pm 0,7k) \cdot P_в \cdot tg\beta \quad (9)$$

В четырехвалковом прошивном стане появляется возможность управлять $M_н$ путем изменения частоты вращения второй пары рабочих валков.

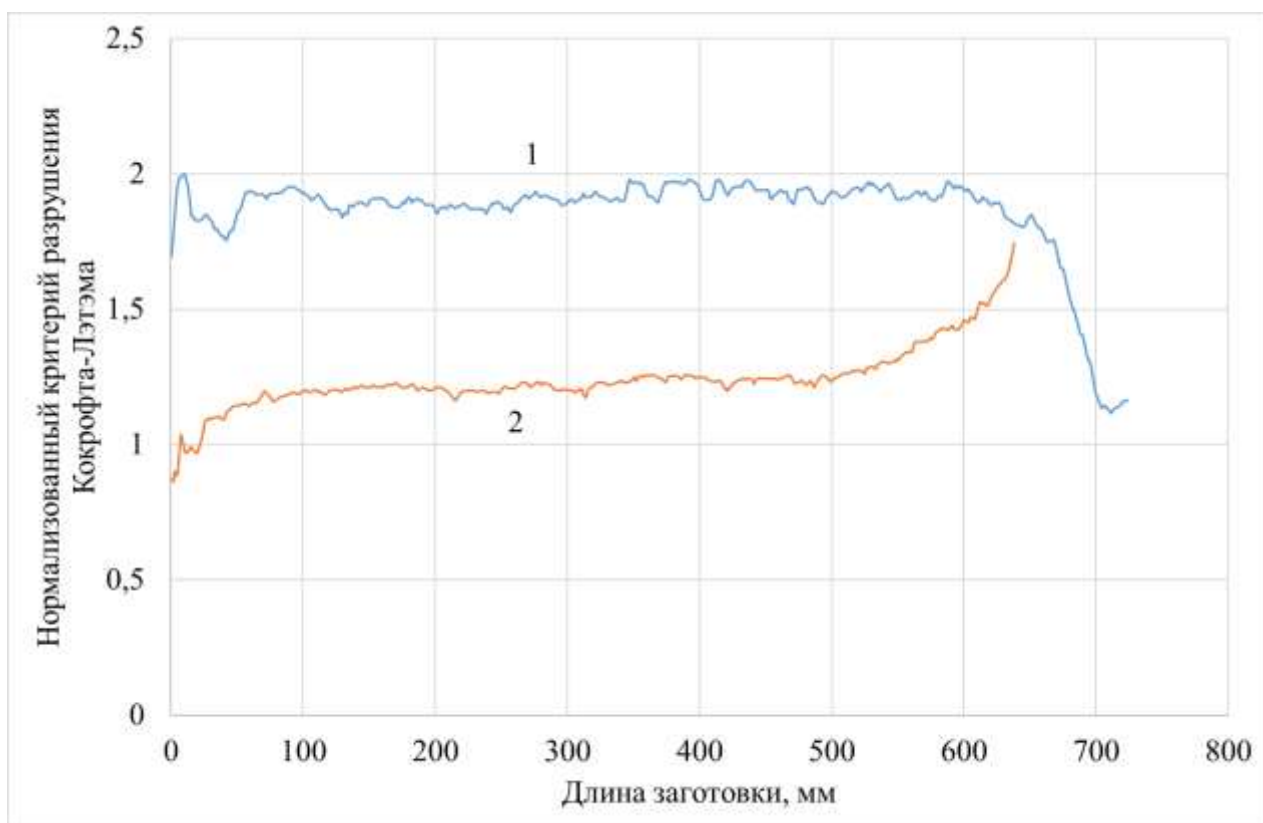
По результатам моделирования в QForm оценили максимальные усилия на деформирующий инструмент при двух- и четырёхвалковой прошивках. При двухвалковой прошивке усилие на валок достигает 157000 Н, на линейку – 52000 Н. То есть коэффициент соотношения усилий (формула (7)) составляет 0,33. Момент скручивания в таком случае находится в интервале $22506 \div 36389$ Н·м. При четырёхвалковой прошивке усилие на основной валок достигает 117200 Н, на вспомогательный – 30000 Н. Коэффициент соотношений усилий составляет 0,25. Момент скручивания лежит в интервале $11541 \div 19235$ Н·м. Снижение относительно двухвалковой прошивки составляет 47-48%.

Учитывая, что скручивание влияет на качество поверхности получаемых гильз, в том числе способствует появлению разрывов, оценили вероятность разрушения на поверхностях гильзы. С этой целью с помощью инструментария QForm рассчитали изменение по длине образующей на внутренней и наружной поверхностях гильз нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма (НКРКЛ), представленное на рис.154. НКРКЛ рассчитывается по формуле (2) [202,223,224].

Эффективность прогнозирования разрушения с помощью НКРКЛ при двухвалковой винтовой прошивке показана в [202]. Согласно рис. 154 на наружной поверхности на установившейся стадии при четырёхвалковой прошивке вероятность разрушения ниже, так как значения НКРКЛ до 20% ниже. На внутренней поверхности качественно ситуация аналогичная. При этом НКРКЛ при четырёхвалковой прошивке на установившейся стадии до 37% ниже. Также риск появления разрушения на внутренней поверхности, по сравнению с наружной, для двухвалковой прошивки по значениям НКРКЛ в 2 раза выше, для четырёхвалковой – в 1,5 раза.



а



б

Рисунок 154. Изменение НКРКЛ по длине образующей на наружной (а) и внутренней (б) поверхностях гильзы при двух- (1) и четырёхвалковой (2) прошивках

4.10 Выводы по Главе 4

1. При прошивке по предлагаемому способу образуемый валками калибр, по сравнению с двух- и трёхвалковой прошивкой, более замкнут и это позволит получать гильзы с меньшей овализацией и разностенностью. При прошивке в стане без направляющего инструмента, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой схемами, получаемые гильзы имеют чуть меньшую (на 0,2%) овальность. Гильзы после прошивки в стане без направляющего инструмента имели отношение максимальной толщины стенки к минимальной по длине гильзы не более 1,07. При этом для двухвалковой прошивки это отношение достигало 1,3, а для трёхвалковой – 1,39.

2. Компьютерное моделирование показало возможность реализации прошивки в стане без направляющего инструмента с меньшим, по сравнению с другими способами, обжатием в пережиме, что создаёт условия для прошивки малопластичных материалов.

3. Проведена прокатка образцов из пластилина на действующей модели, чем продемонстрирована возможность прокатки по четырехвалковой схеме. Прокатку заготовок из пластилина смоделировали в QForm, сравнили с результатами экспериментов. Отличия по длине заготовки не превысили 3%.

4. Проведённое компьютерное моделирование процессов прокатки заготовки из легированной стали позволило установить, что при прокатке по четырёхвалковой схеме суммарные энергозатраты (работа деформации) на 6% ниже, чем при аналогичной прокатке по трёхвалковой схеме; усилие на рабочий и вспомогательный валок четырёхвалкового стана на 35-40% ниже усилия на валок трёхвалкового стана; выше точность диаметра получаемых прутков.

5. Проведена прошивка образцов из пластилина на действующей модели, чем продемонстрирована возможность прошивки по четырехвалковой схеме. Прокатку заготовок из пластилина смоделировали в QForm, сравнили с результатами экспериментов. Отличия по длине заготовки не превысили 3,6%, а по толщине стенки – 10%.

6. Проведённое компьютерное моделирование процессов прошивки заготовки из легированной стали позволило установить, что усилие при четырёхвалковой прошивке на рабочий валок составляет 21 кН, вспомогательный – 14 кН, при двухвалковой – 69 кН. То есть усилие при прошивке в четырёхвалковом стане существенно ниже - примерно в три раза - чем при прошивке в двухвалковом. Анализ изменения наружного диаметра и толщины стенки по длине полученных гильз показал, что точность размеров гильз при прошивке в четырёхвалковом стане выше, чем при двухвалковой прошивке.

7. По результатам моделирования в QForm показано, что перепад значений коэффициента жёсткости между поверхностью и осевой зоной заготовки при четырёхвалковой прокатке (0,05) меньше, чем при двухвалковой (0,175) и трёхвалковой прокатке (0,1), следовательно, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой прокаткой получается наименьшая неравномерность напряжений.

8. По результатам моделирования в DEFORM показано, что форма утяжины на переднем торце при четырёхвалковой прокатке схожа для случая двухвалковой и отличается от трёхвалковой прокатки. Сравнение характера распределения интенсивности деформации, компоненты деформации в направлении оси прокатки и среднего напряжения позволило установить, что характер напряжённо-деформированного состояния при четырёхвалковой прокатке подобен трёхвалковой прокатке и отличается от двухвалковой прокатки.

9. Данные об изменении коэффициента жёсткости напряжённого состояния, полученные по результатам моделирования в QForm, а также данные об изменении нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, полученные по результатам моделирования в DEFORM, показывают, что из всех смоделированных схем четырёхвалковая позволяет получать наиболее равномерное распределение напряжений в объёме заготовки, а также вероятность разрушения при четырёхвалковой прокатке меньше, чем при двухвалковой и трёхвалковой.

10. При прокатке с постоянным фактором трения среднее значение накопленной деформации в продольном сечении заготовки при трёхвалковой винтовой прокатке составляет 0,83, при четырёхвалковой – 1,02. При четырёхвалковой винтовой прокатке деформация глубже проникает в заготовку по сравнению с трёхвалковой прокаткой. В сечении заготовки после обеих прокаток наименьшие значения накопленной деформации наблюдали в осевой зоне, т.е. в центре заготовки. После трёхвалковой прокатки области со значениями накопленной деформации, не превышающие 0,5, составляли 42% от общей площади продольного сечения, после четырёхвалковой прокатки – 33%. Риск разрушения при четырёхвалковой прокатке ниже, чем при трёхвалковой: наибольшие значения нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма и критерия разрушения Ойена при трёхвалковой прокатке составляет 0,451 и 1, соответственно, при четырёхвалковой – 0,419 и 0,96, соответственно.

11. При прокатке с постоянным фактором трения четырёхвалковая прокатка на 0,1 с быстрее протекает, чем трёхвалковая. При переменном значении фактора трения наблюдаются три интервала с резким падением усилия на валке и скорости перемещения заготовки вдоль оси прокатки. При этом при трёхвалковой прокатке длительность

интервалов падения скорости составила 0,62 с, 0,62 с и 0,65 с, при четырёхвалковой 0,53 с, 0,53 с и 0,55 с. Полученные данные позволяют предположить, что возврат к устойчивому протеканию прокатки при четырёхвалковой схеме наступает быстрее - при значениях фактора трения не больше 1,9 – чем при трёхвалковой прокатке: при значениях фактора трения не выше 2,6. В интервале от 1 до 4 с, т.е. большей частью на установившейся стадии прокатки, скорость перемещения заготовки вдоль оси прокатки достигает 40-41 мм/с при четырёхвалковой прокатке, а при трёхвалковой прокатке достигает 39 мм/с.

12. Компьютерное моделирование трёх- и четырёхвалковой прокатки позволяет предположить, что при прочих равных условиях процесс четырёхвалковой прокатки обеспечивает более стабильное протекание процесса формоизменения по сравнению с трёхвалковой прокаткой.

13. Разработан и изготовлен лабораторно-промышленный четырёхвалковый стан винтовой прокатки. В созданном стане проведены опытные прокатки и прошивки.

14. Значения момента скручивания для выбранных параметров процесса при двухвалковой прошивке лежат в интервале $22506 \div 36389$ Н·м, при четырёхвалковой - $11541 \div 19235$ Н·м. То есть снижение относительно двухвалковой прошивки составляет 47-48%. При этом в четырёхвалковой схеме есть возможность изменять момент скручивания за счёт изменения момента сил трения от вспомогательных валков, варьируя их частоту вращения.

15. Снижение момента скручивания при четырёхвалковой прошивке по сравнению с двухвалковой позволяет снизить риск разрушения металла на поверхностях гильз. На установившейся стадии прошивки нормализованный критерий разрушения Кокрофта-Лэтэма вдоль наружной поверхности гильзы до 20% ниже при четырёхвалковой схеме, на внутренней – до 37%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана и смоделирована четырёхвалковая прокатка в клетки 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.
2. Романцев Б.А., Потапов И.Н., Гончарук А.В., Попов В.А. Изготовление полых профилированных заготовок. – М.: НПО Информ ТЭИ. – 1992. – 263 с.
3. [Электронный ресурс]. URL: <http://misis.ru/files/11864/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A7%D0%B0%D0%BD%20%D0%91.%20%D0%A5..pdf> (дата обращения: 14. 02. 2019).
4. Романцев Б.А. Полые профилированные заготовки повышенной прочности: Теория, технология и конструкция машин. Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н., Москва, МИСиС, 1993.
5. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. Москва: Металлургия, 1973. – 368 с.
6. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва, 1998, 401 с.
7. Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. Производство стальных труб горячей прокаткой. М.: Металлургиздат, 1954 г., 616 с.
8. Новиков М.В. Исследование формоизменения для совершенствования режимов деформации и расширения сортаментных возможностей станов винтовой прокатки без направляющего инструмента. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Москва, МЭИ, 2007.
9. Rolling-mills.ru. (2017). Оборудование для черновой прокатки (обжатия) сортовых заготовок. [Электронный ресурс] URL: http://www.rolling-mills.ru/equip_for_roughing.php [Дата обращения 12.02.2019].
10. Ya Li Wang, Molotnikov A., Diez M., Lapovok R., Hyoun-Ee Kim, Jing Tao Wang, Estrin Yu. Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 639. p. 165-172.
11. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jian-hua Hu, Qing-hua Wang, Jing-chao Sun. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. No 8. pp 1597-1604.

12. Komori K. and Mizuno K. Study on plastic deformation in cone-type rotary piercing process using model piercing mill for modeling clay. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209, no. 11, p. 4994-5001.
13. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1990. 344 с.
14. Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитнов Е.А. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки. *Черные металлы*, 2015, №1, с.23-28.
15. Galkin, S.P. Trajectory of deformed metal as basis for controlling the radial-shift and screw rolling. (2004) *Stal'* (7), pp. 63-66.
16. Romantsev B.A., Galkin S.P., Mikhajlov V.K., Khloponin V.N., Koryshev A.N. Bar micromill. *Stal'*. Issue 2, February 1995, p. 40-42.
17. Колобов Ю.Р., Иванов М.Б. Опыт организации инновационной деятельности в рамках крупного комплексного проекта Федеральной целевой программы Минобрнауки. *Инновации РАН-2009: матер. Ежегодной науч.-практич. конф.* – Томск, 2009, с. 253-260.
18. Diez M., Kim H.-E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Yu. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling. *Materials Science & Engineering A*. 2014, p. 287-292.
19. Н.П. Безклубенко. Технология производства труб. НКЧМ СССР, Металлургиздат, 1941.
20. Патент SU348250A1 . Рабочая клеть трубопрокатного стана. Г.Д. Стыркин, И.Н. Потапов, П.И. Полухин, Е.С. Бондаренко, П.М. Финагин, Е.А. Волчков, В.Я. Шапино, Е.И. Панов, Л.Л. Симонов, Г.Д. Агарков, Ю.М. Бажанов, В.И. Викулов, В.С. Курбатов. Московский ордена Трудового Красного Знамени институт стали и сплавов. Оpubл. 13.09.1972, бюл. №25. B21B13/08 B21B19/00
21. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. М.: Металлургиздат, 2015. 380 с. Ил.
22. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. Л.: Изд-во ЛПИ, 1965.-286 с.
23. Воронцов В.К., Полухин П.И., Белевитин В.А., Бринза В.В. Экспериментальные методы механики деформируемых твёрдых тел (Технологические задачи обработки давлением). М.: Металлургия, 1990. 368 с.
24. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. Москва: Металлургия, 1983. – 270 с.

25. Белевитин В.А. Разработка и совершенствование методов экспериментальной механики для оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. ОАО «Уфалейский завод металлургического машиностроения», г. Верхний Уфалей, Челябинская область, 1997 г.
26. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральского ГТУ, 2001. – 836с.
27. Чекмарев А.П., Матвеев Ю.М., Выдрин В.Н., Финкельштейн Я.С. Интенсификация поперечно-винтовой прокатки. М.:Металлургия, 1970. 183 с.
28. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/> (дата обращения: 21. 02. 2019).
29. Lazić L., Lovrenić-Jugović M. and GRUBIŠIĆ Ž. Energy transformation during the pierce process in the production of seamless pipes. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2016. Vol. 22, no. 1, p. 60. DOI 10.12776/ams.v22i1.684. Technical University of Kosice, Fac. of Metallurgy, Metallurgy, Recycling
30. Hayashi C. and Yamakawa T. Influences of Piercing Ratio, Expansion Ratio, Feed, Cross and Skew Angles on Available Piercing Size Range in Rotary Piercing Process. *ISIJ International*. 1998. Vol. 38, no. 11, p. 1255-1261. DOI 10.2355/isijinternational.38.1255. Iron and Steel Institute of Japan
31. Zhang Zhe, Liu Dong, Yang Yanhui, Zheng Yong, Pang Yuhua, Wang Jianguo and Wang Haiping. Explorative study of rotary tube piercing process for producing titanium alloy thick-walled tubes with bi-modal microstructure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18, no. 4, p. 1451-1463. DOI 10.1016/j.acme.2018.05.005. Elsevier BV
32. Erman E. The effect of processing parameters on the propensity for central fracturing in piercing // *Journal of Applied Metalworking*. 1987. Т. 4. № 4. С. 331-341.
33. Чекмарев, А. П. Прошивка в косовалковых станах / А. П. Чекмарев, Я. Л. Ваткин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1967. – 240 с.
34. Хлопонин В.Н. Использование свойств однополостного гиперboloида в валковых узлах листопрокатных клетей. *Металлург*, №11, 2017, с. 51-55.
35. Рашников В.Ф., Прохоренко П.А., Денисов П.И. Клетки для эффективного управления профилем и формой полосы. *Производство проката*. 2001, №8, с. 34-43.
36. Тетерин П.К. и др. *Сталь*, 1959, №12, с. 1102.
37. Тетерин П.К. и др. В сб. «Обработка давлением специальных сталей и сплавов» (ЦНИИЧМ), вып. 53, 1967, с. 30.

38. Беришвили Т.К., Жордания И.С., Лежава О.А., Никулин А.Н. Влияние масштабного фактора на пластическое течение металла при поперечно-винтовой прокатке// Сообщ. АНГруз. ССР. 1983. Т. 110. №3. С. 561-564.
39. Yabo Fu, Jing Cui and Zhiqiang Cao. Cracks of Cu-Cr-Zr Alloy Bars under Planetary Rolling. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015. Vol. 44, no. 3, p. 567-570. DOI 10.1016/s1875-5372(15)30040-0. Elsevier BV
40. Стрелецкий В.В., Никулин А.Н. Особенности деформации литых заготовок при винтовой прокатке в трёхвалковом стане. *Металлы*, №4, 1996, с. 52-56
41. НИТУ «МИСиС» [Электронный ресурс]. URL: <http://misis.ru/> (дата обращения: 22. 02. 2019).
42. Politechnika Częstochowska | 70 lat doświadczenia w działalności naukowej i edukacyjnej [Электронный ресурс]. URL: <http://pcz.pl/> (дата обращения: 22. 02. 2019).
43. Bunte C., Gomez M. Characterization of semi-finished titanium alloys processed by extrusion and lamination perforation (Mannesmann process)/ *Revista Materia*, 2015, vol. 20, n.3, pp 636-645.
44. Kaida M., Yamaguchi A., Nagai S., Sedo S. Deformation of defects on tube surface by Mannesmann piercing. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1982, Vol. 22, Issue 2, pp B22-B22
45. Xiaoming Ding, Liyuan Sun, Xu Huang, Zhiwei Zhao Research on Three-Roll Screw Rolling Process for Ti6Al4V Titanium Alloy Bar [Электронный ресурс]. URL: <https://www.degruyter.com/view/j/htmp.ahead-of-print/htmp-2016-0215/htmp-2016-0215.xml> (дата обращения: 22. 02. 2019).
46. Lopatin N., Salishchev G., Galkin S. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011. Vol. 52. No. 5. pp 442-447.
47. Lopatin N. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti-6Al-4V titanium alloy // *International Journal of Material Forming*. 2012. Vol. 6. No. 4. pp 459-465.
48. Ratochka, I. V., Mishin, I. P., Lykova, O. N., Naydenkin, E. V. and Varlamova, N. V. Structural Evolution and Mechanical Properties of a VT22 Titanium Alloy Under High-Temperature Deformation // *Russian Physics Journal*. 2016. Vol. 59.No. 3. pp 397-402.
49. Naydenkin, E. V., Ratochka, I. V., Mishin, I. P. and Lykova, O. N. Evolution of the Structural-Phase State of a VT22 Titanium Alloy During Helical Rolling and Subsequent Aging // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 58. No. 8. pp. 1068-1073.
50. Mishin, I. P., Naydenkin, E. V., Ratochka, I. V., Lykova, O. N., Balushkina M.A. Influence of aging temperature on the structure and mechanical properties of titanium alloy VT22

subjected to helical rolling // AIP Conference Proceedings, Volume 1683, Issue 1, 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4932841>

51. Betekhtin, V. I., Kolobov, Y. R., Sklenicka, V., Kadomtsev, A. G., Narykova, M. V., Dvorak, J., Golosov, E. V., Kardashev, B. K. and Kuz'menko, I. N. Effect of a defect structure on the static and long-term strength of submicrocrystalline VT1-0 titanium fabricated by plastic deformation during screw and lengthwise rolling // Technical Physics. 2015. Vol. 60. No. 1. pp 66-71.

52. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. 1981. №1. с.115-123.

53. Valiev, R. Z., Murashkin, M. Y., Ganeev, A. V. and Enikeev, N. A. Superstrength of nanostructured metals and alloys produced by severe plastic deformation // The Physics of Metals and Metallography. 2012. T. 113. № 13. C. 1193-1201.

54. Andrievski R., Glezer A. Strength of nanostructures // Physics-Uspekhi. 2009. Vol. 52. No. 4. pp 315-334.

55. Trochu F., Galibois A., Brailovski V. Shape memory alloys. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1999.

56. Kolobova, A. Y., Ryklina, E. P., Prokoshkin, S. D., Inaekyan, K. E. and Brailovskii, V. Study of the Evolution of the Structure and Kinetics of Martensitic Transformations in a Titanium Nickelide upon Isothermal Annealing after Hot Helical Rolling // Physics of Metals and Metallography. 2018. Vol. 119.No. 2. pp 134-145.

57. Kolobov Y., Golosova O., Manokhin S. Regularities of Formation and Degradation of the Microstructure and Properties of New Ultrafine-Grained Low-Modulus Ti–Nb–Mo–Zr Alloys // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2018. Vol. 59.No 4. pp 393-402.

58. Stefanik, A., Szota, P., Mróz, S., Bajor, T. and Dyja, H. Properties of the AZ31 Magnesium Alloy Round Bars Obtained in Different Rolling Processes / Własności Prętów Okrągłych Ze Stopu Magnezu AZ31 Otrzymanych W Różnych Procesach Walcowania // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. T. 60. № 4. C. 3001-3006.

59. Hwang Y., Hsu H., Tzou G. A study of PSW rolling process using stream functions // Journal of Materials Processing Technology. 1998. Vol. 80-81. pp 341-344.

60. Hwang Y. и др. Analytical and experimental study on the spiral marks of the rolled product during three-roll planetary rolling processes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. Vol. 46. No. 12-13. pp 1555-1562.

61. Winterfeldt T. Erhöhung der Prozesstransparenz beim Planetenschrägwalzen am Beispiel der Kupferrohrherstellung // 2008.

62. Galkin S.P. Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory, *Steel in Translation*. 2004. Vol. 34. No. 7. pp 57-60.
63. Kharitonov E., Alekseev P., Romanenko V. Temperature field in blank during radial-shear rolling // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 1. pp 12-16.
64. Dobatkin, S., Galkin, S., Estrin, Y., Serebryany, V., Diez, M., Martynenko, N., Lukyanova, E. and Perezhogin, V. Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 774. pp 969-979.
65. Lapovok R., Estrin Y. Superplasticity in magnesium alloys by severe plastic deformation // *Advances in Wrought Magnesium Alloys*. 2012. pp 144-185.
66. Naizabekov, A. B., Lezhnev, S. N., Arbuz, A. S. and Panin, E. A. Obtaining of long-length rods with ultrafine-grained structure by the radial-shear rolling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 461. pp 1-5
67. Naizabekov, A., Lezhnev, S., Arbuz, A. and Panin, E. The effect of radial-shear rolling on microstructure and mechanical properties of stainless austenitic steel AISI-321 // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol 190. pp 1-5
68. Mogucheva A., Lopatin, N., Belyakov, A. and Kaibyshev, R. Grain Refinement in Austenitic Stainless Steel during Warm Screw Rolling // *Materials Science Forum*. 2012. Vol. 715-716. pp 889-894.
69. Деревягина Л.С., Гордиенко А.И., Почивалов Ю.И., Смирнова А.С. Модификация структуры низкоуглеродистой трубной стали методом поперечно-винтовой прокатки и повышение её характеристик прочности и хладостойкости. *Физика металлов и металловедение*. 2018, том 119, №1, с. 89-98.
70. Wang, Y. L., Liu, Y., Wang, J. T. and Tian, F. S. Microstructure and Properties of T2 Copper Tube Produced by Severe Hot Rolling // *Materials Science Forum*. 2010. T. 667-669. C. 193-198.
71. Валеев И.Ш., Валеева А.Х. Изменение микротвёрдости и микроструктуры меди М1 при радиально-сдвиговой прокатке. *Письма о материалах т.1* (2011) с. 38-40.
72. He, Y. D., Zhou, X. F., Chen, C. and Li, T. J. Research on Effects of Rolling-Drawing Deformation on Performance of Cu-10Ni-1Fe-1Mn Alloy // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 921. pp 236-245.
73. Валеев И.Ш., Валеева А.Х., Фазлыяхметов Р.Ф., Халикова Г.Р. Влияние радиально-сдвиговой прокатки на структуру алюминиевого сплава Д16. *Материаловедение*, 2014, №7, с. 27-30.

74. Bogatov A., Panov E. Effect of Stress-strain State during Helical Rolling on Metal and Alloy Structure and Ductility // *Metallurgist*. 2013. Т. 57. № 5-6. С. 434-441.
75. Finite element method [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method (дата обращения: 02. 03. 2019).
76. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Издательство «МИР», Москва, 1979.
77. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Издательство «МИР», Москва, 1984.
78. Chiluveru S. Computational modeling of crack initiation in cross-roll piercing. Massachusetts institute of technology, 2007.
79. Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI 02860. ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.5, 2005.
80. C.C. Chu and A. Needleman. Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 102:249-256, 1980.
81. V. Tvergaard. Ductile fracture by cavity nucleation between larger voids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 30(4):265-286, 1982.
82. V. Tvergaard. On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*, 18(4):237-252, 1982.
83. V. Tvergaard and A. Needleman. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 32(1):157-169, 1984.
84. Berazategui, D. A., Cavaliere, M. A., Montelatici, L. and Dvorkin, E. N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 65. No 7. pp 1113-1144.
85. Yang J, Li G, Wu W-T, Sawamiphakdi K, Jin D. Process modeling for rotary tube piercing application. *Proceedings Materials Science and Technology Conference. AIST-TMS: New Orleans*, 2004.
86. Komori K, Suzuki M. Simulation of deformation and temperature in piercing rolling. In *Proceedings European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2004)*, Neittaanmaki P et al. (eds). Jyvaskyla: Finland, 2004.
87. Pietsch J, Thieven P. FEM simulation of the rotary tube piercing process. *MPT International*, April 2003.
88. Wada Y, Yamada K, Hamazu S, Uchida S. Three-dimensional analysis of helical rolling of bar and pipe using rigid-plastic finite element method. In *Numiform '98—Simulation of*

Materials Processing: Theory, Methods and Applications, Huetink J, Baaijens FPT (eds). Balkema: Rotterdam, 1998.

89. Mori K, Yoshimura H, Osakada K. Simplified three-dimensional simulation of rotary piercing of seamless pipe by rigid-plastic finite-element method. Journal of Materials Processing Technology 1998; 80–81:700–706.

90. Numerical simulation software for hot or cold metal forming - Transvalor [Электронный ресурс]. URL: <http://www.transvalor.com/en/cmspages/forge-nxt.32.html> (дата обращения: 04. 03. 2019).

91. Pschera R., Klarner J., Sommitsch C. Modelling the Forming Limit during Cross-Rolling of Seamless Pipes Using a Modified Continuum Damage Mechanics Approach // Steel research international. 2010. Vol. 81. № 8. pp 686-690.

92. Joun, M., Lee, J., Cho, J., Jeong, S. and Moon, H. (2014). Quantitative Study on Mannesmann Effect in Roll Piercing of Hollow Shaft. Procedia Engineering, 81, pp.197-202.

93. Scientific Forming Technologies Corporation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deform.com/> (дата обращения: 04. 03. 2019).

94. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 04. 03. 2019).

95. Кожевникова Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки. Минск: Белорусская наука, 2010. - 304 с.

96. [Электронный ресурс]. URL: http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/1/Silvio_Fanini_Tesi_Dottorato.pdf (дата обращения: 04. 03. 2019).

97. Chastel, Y., Diop, A., Fanini, S., Bouchard, P. O. and Mocellin, K. Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1. № S1. pp 355-358.

98. J. Lemaitre, A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture. Journal of Engineering Materials and Technology, 107 (1985) 83-89.

99. J. Lemaitre, J. P. Sermage, One Damage Law for Different Mechanisms, Computational Mechanics 20 (1997) 84-88.

100. J. Lemaitre, R. Desmorat, Engineering Damage Mechanics. Springer-Verlag, Berlin, 2005.

101. Романцев Б.А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Гладков Ю.А. Сравнение усилий на оправку при повышенных углах подачи и на пуансон при прошивке трубных заготовок. Производство проката, №6, 2018. с. 35-40.

102. Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3D Finite element method (FEM) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill. METALURGIJA 51 (2012) 4, pp 501-504.

103. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 177. pp 167-170.

104. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mscsoftware.com/assets/1832_MAAF303ZSFORMZLTDAT.pdf (дата обращения: 05. 03. 2019).

105. Pater Z., Kazanecki J. Complex Numerical Analysis of the Tube Forming Process Using Diescher Mill // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58. No 3, pp 717-724.

106. В.М. Максимов, О.С. Хлыбов. Моделирование процессов прошивки в стане винтовой прокатки с использованием QForm. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. №12, 2016, с. 17-22.

107. QForm. Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. URL: <http://qform3d.ru/> (дата обращения: 25. 02. 2019).

108. Liu, F., Qiu, Y. L., Song, Z. H. and Wang, S. W. Numerical Simulation of the Piercing Process of Large-Sized Seamless Steel Tube // Applied Mechanics and Materials. 2013. T. 319. C. 444-450.

109. Yin, Y. D., Wang, M. J., Li, S. Z., Wang, P. Z., Wang, X. D. and Li, G. T. 11. Yin Y. и др. Influence of Roll Rotational Speed on inside Bore and Lamination Defects in Rotary Piercing Large Diameter Heavy Wall P92 Steel Pipe Process // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 421. pp 205-211.

110. Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н. К вопросу выбора программных продуктов для моделирования процессов обработки металлов давлением. Metallurg, №1, 2013, с. 20-23.

111. Bogatov A., Nukhov D., Toporov V. Simulation of Rotary Piercing Process // Metallurgist. 2017. T. 61. № 1-2. C. 101-105.

112. Zhao, Y., Mao, J., Liu, F. and Ma, Z. (2015). Experiments and Simulation on Mannesmann Piercing Process in the Drill Steel Manufacture. Strength of Materials, 47(1), pp.29-40.

113. [Электронный ресурс]. URL: <http://congress.cimne.com/complas2017/admin/files/fileabstract/a15.pdf> (дата обращения: 05. 03. 2019).

114. Lee, H. W., Lee, G. A., Kim, E. Z. and Choi, S. и др. Prediction of plug tip position in rotary tube piercing mill using simulation and experiment // International Journal of Modern Physics B. 2008. Т. 22. № 31n32. С. 5787-5792.
115. Король А.В., Выдрин А.В., Широков В.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15, №2, с. 68-74.
116. O. Jaouen, F. Costes, and P. Lasne: ‘A new 3D simulation model for complete chaining casted and forged ingot’, Proc. 1st Int. Conf. on ‘Ingot Casting, Rolling and Forging’, Aachen, Germany, 2012, pp 1–9.
117. P. De Micheli, A. Settefrati, S. Marie, J. Barlier, and P. Lasne: ‘Towards the simulation of the whole manufacturing chain processes with FORGE®’, Proc. Int. Conf. on ‘New development in forging technology’, Stuttgart, Germany, 2015, pp1–25.
118. M. M. Skripalenko, V. E. Bazhenov, B. A. Romantsev, M. N. Skripalenko, A. V. Koltygin, and A. A. Sidorov: ‘Computer modeling of chain processes in the manufacture of metallurgical products’, Metallurgist, 2014, 58, pp 86–90.
119. A. D. Abdullin and A. A. Ershov: ‘End-to-end simulation of casting and metal-forming operations with ProCAST and QForm software’, Metallurgist, 2014, 58, pp 339–345.
120. A. N. Romashkin, V. S. Dub, I. A. Ivanov, S. I. Markov, A. N. Mal’ginov, and D. S. Tolstykh: ‘Development of an integral production process for manufacturing machinery billets based on computer simulation’, Metallurgist, 2015, 58, 821–830.
121. Skripalenko, M., Bazhenov, V., Romantsev, B., Skripalenko, M., Huy, T. and Gladkov, Y. (2016). Mannesmann piercing of ingots by plugs of different shapes. Materials Science and Technology, 32(16), pp.1712-1720.
122. Скрипаленко М. М., Баженов В. Е., Скрипаленко М. Н., Романцев Б. А., Ба Хюи Чан, Гартвиг А. А., Гладков Ю. А. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования прошивки слитков в двухвалковом стане винтовой прокатки. Кузнечно - штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2016. - № 12. - С. 22-26.
123. М. М. Скрипаленко, Б. А. Романцев, В. Е. Баженов, Б. Х. Чан, М. Н. Скрипаленко, С. П. Галкин, М. Б. Савонькин, Ю. А. Гладков. Компьютерное моделирование процессов прошивки слитков из алюминиевого сплава в двухвалковом стане винтовой прокатки. Известия вузов. Цветная металлургия, 2016, №6, с. 42-50.
124. Lu, L., Wang, Z., Wang, F., Zhu, G. and Zhang, X. Simulation of tube forming process in mannesmann mill // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2011. Vol. 16. No 3. pp 281-285.

125. Lu L., Jia Z. C. Shear stresses and velocity analysis of piercing process in Diescher's mill using Finite Element Method. *Advances in engineering Research*, volume 113, pp 753-757.
126. Topa A., Kim D., Kim Y. 3D Numerical Simulation of Seamless Pipe Piercing Process by Fluid-Structure Interaction Method // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 203. pp 06-16.
127. Zhao, C., Liu, Y., Bai, L., Wang, N., Gao, X. and Shuang, Y. Stretch reduction of seamless steel tube by skew rolling and its numerical simulation // *Metallurgical Research & Technology*. 2016. Vol. 113. No 3. pp 1-10.
128. Yoshida, M., Barlat, F., Moon, Y. H. and Lee, M. G. 3D FEM Simulation of Rolling Load Working on Piercer Plug in Mannesmann Piercing Process // *Numiform. Proceedings of the 10th International conference*, pp 1333-1338.
129. MARC/AutoForge - Mathematical software - swMATH [Электронный ресурс]. URL: <https://www.swmath.org/software/10384> (дата обращения: 05. 03. 2019).
130. LI Shengzhi, SUN Zhongjian, LI Lianshi. 3-D Coupled Thermo-mechanical Analysis of the Tube Round during Two-Roll Rotary Rolling Process *Journal of university of science and technology Beijing* 2000, Issue 1, pp 52-55
131. LI Shengzuo, CHEN Dahong, SUN Zhongjian, LI Lianshi, WANG Qijiang, ZHENG Jianmin. Influence of cross angle on stress and strain of tube blanks during rotary rolling. *IRON & STEEL* , 2001, Issue 4, pp 34-38.
132. Li Shengzhi, Sun Zhongjian, Li Lianzhi. Distribution of stress/strain field and temperature of solid round bloom during two high rotary piercing operation. *Steel Pipe*, 1999, Issue 06, pp 5-11.
133. Komori, K. (2005). Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimensional rigid-plastic finite-element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(12), pp.1838-1853.
134. Reggio, M., McKenty, F., Gravel, L., Cortes, J., Morales, G. and Ladron de Guevara, M. 10. Reggio M. и др. Computational analysis of the process for manufacturing seamless tubes // *Applied Thermal Engineering*. 2002. Vol. 22. No 4. pp 459-470.
135. Dyl T. The Experimental Analysis of the Piercing and Spreading Process in Diescher's Skew Rolling Mill. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2007, Volume 52, Issue 4, pp 37-43
136. S. Z. Li, W. H. Meng, L. W. Hu, and B. Ding. Research on the tendency of inner crack during 3-roll skew rolling process of round billets. *Advanced Materials Research*. 145, pp 238–242 (2011)
137. Наука и Образование: научно-техническое издание: Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки на основе эйлера описания движения сплошной среды

[Электронный ресурс]. URL: <http://www.technomag.edu.ru/doc/113356.html> (дата обращения: 05. 03. 2019).

138. Romantsev, B. A., Skripalenko, M. M., Zhigulev, G. P. and Skripalenko, M. N. Use of a numerical experiment to determine the trajectories of particles of metal undergoing deformation // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. No 9-10. pp 753-757.

139. Romantsev, B. A., Skripalenko, M. M., Skripalenko, M. N. and Hui, C. B. Modeling the Piercing of Semifinished Products in a Three-Roll Rotary Rolling Mill on a Hollow Mandrel // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. No 7-8. pp 557-561.

140. Ding, X., Shuang, Y., Liu, Q. and Zhao, C. New rotary piercing process for an AZ31 magnesium alloy seamless tube // *Materials Science and Technology*. 2017. T. 34. № 4. C. 408-418.

141. He, M., Sawamiphakdi, K., Perez, A. and Daiger, K. Finite Element Modeling of the Skew Rolling Process // *AIP Conference Proceedings*. 712, 440 (2004). <https://doi.org/10.1063/1.1766564>

142. S.A. Mashekov S.A., Gladkov M.V., Absadykov B.N., Masheкова A.S. Simulation of combined process of rod extrolling in three-roll mill using DEFORM-3D. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. Volume 6, Number 426 (2017), 237 – 245.

143. Guang Xing Huang, Bao Shou Sun, Wen Fei Peng, Xue Dao Shu, Wang Lu. Research on Stable Forming of Titanium Alloy Bar Using Three-Roll Skew Rolling // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1095. pp 837-841.

144. Gryc A., Bajor T., Dyja H. the analysis of influence the parameters of rolling process in three high skew rolling mill of AZ31 magnesium alloy bars on temperature distribution // *METALURGIJA*. 2016. Vol. 55. pp 772-774.

145. Stefanik A., Szota P., Mroz S., Dyja H. Application of the three-high skew rolling to magnesium rods production // *Materials Testing*. 2016. Vol. 58. No 5. pp 438-441.

146. Stefanik, A., Morel, A., Mróz, S. and Szota, P. Theoretical And Experimental Analysis Of Aluminium Bars Rolling Process In Three-High Skew Rolling Mill // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 60. No 2. pp 809-813.

147. Pater Z., Tomczak T., Bulzak T. Numerical analysis of the skew rolling process for main shafts. *Metalurgija*, 54 (2015), 4, pp 627-630.

148. Pater Z., Bulzak T., Tomczak J. Numerical Analysis of a Skew Rolling Process for Producing a Stepped Hollow Shaft Made of Titanium Alloy Ti6Al4V // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. No 2. pp 677-682.

149. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Numerical Analysis of the Skew Rolling Process for Rail Axles // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60. No 1. pp 415-418.
150. Xu C., Shu X.D. Influence of process parameters on the forming mechanics parameters of the three-roll skew rolling forming of the railway hollow shaft with 1:5. Metalurgija, 57 (2018), 3, pp 153-156.
151. Zeng Q., Zang Y., Qin Q. The effect of roll with passive segment on the planetary rolling process // Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7. No 3. pp 1-7
152. Marc - Advanced Nonlinear Simulation Solution [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mscsoftware.com/product/marc> (дата обращения: 06. 03. 2019).
153. Li, B., Zhang, S., Zhang, G. and Zhang, H. Prediction of 3-D temperature field of TP2 copper tubes in three-roll planetary rolling process // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 205. No 1-3. pp 370-375.
154. Lapovok R., Smirnov S., Solomein V. Modeling the helical rolling of rods in a three-high mill. Journal of Materials Processing Technology, 80-81 (1998), pp 365-369.
155. И.В. Раточка, И.П. Мишин, О. Н. Лыкова, Е.В. Найденкин, Н.В. Варламова. Эволюция структуры и механические свойства титанового сплава BT22 при высокотемпературной деформации // Известия вузов. Физика. - 2016 . - Т.59, №3. – с. 70-74.
156. 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.
157. 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.
158. 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
159. Tukey, John Wilder, Exploratory data analysis. Reading, Mass. u.a.: Addison-Wesley. 1992
160. Экспертиза М. Тиксомет – система анализа изображений с микроскопа, лаборатория [Электронный ресурс]. URL: <https://thixomet.ru/> (дата обращения: 23. 09. 2018).

161. Ghiotti A., Fanini S., Bruschi S. and Bariani P. Modelling of the Mannesmann effect. CIRP Annals. 2009. Vol. 58. Issue 1, pp 255-258.
162. Бровман Т.В. Теоретическое обоснование и технологические основы использования локальной пластической деформации для совершенствования нестационарных процессов обработки металлов давлением. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва, 2018, 222 с.
163. Pater Z., Wójcik Ł., Walczuk P. Comparative Analysis of Tube Piercing Processes in the Two-Roll and Three-Roll Mills // Advances in Science and Technology Research Journal. 2019. Vol. 13. № 1. pp 37-45.
164. 3D CAD DesignSoftware [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 25. 05. 2018).
165. Власов А.В. Расчёт повреждённости металла при холодной радиальной ковке по результатам конечноэлементного моделирования в программе DEFORM-3D. Сборник трудов международной научно-технической конференции «Инженерные системы-2009», г. Москва, 2009 г., с.204-217.
166. [Электронный ресурс]. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtul.pdf (дата обращения: 13. 06. 2021).
167. Lou, Y., Huh, H., Lim, S. & Pack, K. New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals. International Journal of Solids and Structures 49, 3605–3615, 10.1016/j.ijsolstr.2012.02.016, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002076831200056X> (2017)
168. Лисицын А. И. ,Остренко В. Я. Моделирование процессов обработки металлов давлением (Оптические методы). Киев, Техника, 1976. -208 с. , ил.
169. Белевич А.В. Моделирование показателей пластичности и сопротивления деформации сталей и сплавов: практикум по технолог. механике/ Владим. гос. ун-т. – Владимир. Изд-во ВлГУ, 2005. – 84 с. – ISBN 5-89368-611-X.
170. Полухин П. И. , Воронцов В. К. , Белевитин В. А. и др. Оценка напряженного состояния в процессах поперечнойковки, винтовой и поперечной прокатки. // Сб. трудов МИСиС. N: 140 "Пластическая деформация металлов и сплавов". М.: Металлургия. 1982, С. 145-150.
171. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Putting into practice innovative potential in the universal radial-shear rolling process. CIS Iron and Steel Review. Volume 2014, Issue 9, January 2014, pp 35-39.

172. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Капуткина Л.М., Чан Б.Х. Прогнозирование разрушения металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане. *Металлург*, №11, 2017, с. 11-18.
173. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Samusev S.V., Tran Ba Huy, Pavlov S.A. Studying the Nonstationary Stages of Screw Rolling of Billets with Profiled Ends // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. № 3-4. pp 257-264.
174. Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Сопоставительный анализ геометрии мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки. *Производство проката*. 2015. №12, с. 19-25.
175. Bogatov A., Pavlov D. Study of Metal Strain Rate Stated During Workpiece Reduction in a Three-Roll Screw-Rolling Mill. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. №3-4, pp 311-317.
176. П.Т. Емельяненко. Теория кривой и пилигримовой прокатки. М.: *Металлургиздат*, 1949
177. Фомичев, И.А. Косая прокатка. – М.: *Металлургиздат*, 1963. – 262 с.
178. K. Gruber. Über die Herstellung nahtloser Rohre unter besonderer Berücksichtigung des Mannesmann-Schrägwalzverfahrens. *Stahl und Eisen*, 1919, №36, 38, 40-42.
179. G. Lobkowitz. Über die Aufstellungs-Nothwendigkeit des Walzenneigungswinkels bei der Räumhale. *Rohrenindustrie*, 1932, №1, 2.
180. F. Kocks. Das Schrägwalzen. *Stahl und Eisen*, 1927, №11.
181. Воронцов В. К., Белевитин В.А. К вопросу о макроразрушении осевой зоны сплошной заготовки при винтовой прокатке. - Сб. трудов МИСиС №: 119 «Теория и технология деформации металлов». М.: *Металлургия*. 1979. - С. 23-26.
182. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М: *Металлургия*. 1970. - 230 с.;
183. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов К.С. Ресурс пластичности металла при обработке давлением, - М: *Металлургия* 1984. -144 с.
184. Колмогоров К.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А. Пластичность и разрушение, М: *Металлургия*, 1984, -144 с
185. E. Siebel. Grundsätzliche Betrachtungen zum Schrägwalzverfahren. *Stahl und Eisen*, 1927, №11
186. И.А. Фомичев. Деформация металла в стане кривой вальцовки. *Сталь*, 1936, №11
187. В.С. Смирнов и др. Поперечная прокатка в машиностроении. *Машгиз*, 1957.
188. В.С. Смирнов. Напряженное состояние при поперечной и винтовой прокатке. *Прокатное и трубное производство*. (приложение к журналу «Сталь»), *Металлургиздат*, 1957.

189. 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
190. Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Хе Чже Сун, Романцев Б.А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М.Н., Капуткина Л.М., Сидоров А.А. Прогнозирование вероятного разрушения при радиально-сдвиговой прокатке непрерывнолитых медных заготовок на основе компьютерного моделирования. *Металлург*, №9, 2018, с. 7-12
191. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., "Металлургия", 1983. 488 с.
192. Kocks — Know how for tomorrow [Электронный ресурс] // Kocks.de. 2019. URL: <https://www.kocks.de/en/> (accessed: 27. 06. 2019).
193. Connell P., Surmund J., Battel E., Von der Heiden J. Kocks KRM – An innovative new method for cross-roll elongation of seamless tubes. AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings. AISTech 2015 Iron and Steel Technology Conference and 7th International Conference on the Science and Technology of Ironmaking, ICSTI 2015; Cleveland Convention Center Cleveland; United States; 4 May 2015 - 7 May 2015; Volume 3, 2015, pp 3154-3157.
194. Bartel E., Surmund J., Connell P. Kocks rotation mill [KRM] – an innovative elongation method for seamless tube. 52º Seminário de Laminação, Rio de Janeiro, 2015, pp 240-245.
195. Yamane K., Kazuhiro S., Yamane A. Three-dimensional numerical analysis of rotary piercing process. XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications. COMPLAS 2017, pp 114-121.
196. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Галкин С.П., Капуткина Л.М., Скрипаленко М.Н. Исследование деформационных и структурных особенностей на разных стадиях двух- и трёхвалковой винтовой прокатки. *Сталь*, №10, 2019 г., с. 32-38.
197. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Капуткина Л.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Чеверикин В.В. Исследование нестационарной и стационарной стадии при двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокатке заготовки из стали 12X19H10T. *Металлург*, №4, 2019, с. 49-57
198. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Kapukina 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.

199. 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. С. 709-715.
200. 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. С. 3889-3894.
201. Гамин Ю.В., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Кадач М.В. Прогнозирование разрушения заготовок при прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки. *Металлург*, 2020, №10, с. 36-42.
202. 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.
203. Skripalenko M.M., Galkin S.P., Romantsev B.A., Kaputkina L.M., Danilin A.V., Skripalenko M.N., Patrino P.V., Karpov B.V. Forming features and properties of titanium alloy billets after radial-shear rolling. *Materials*. 2019. T. 12. № 19. С. 1-12.
204. 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. С. 1-9.
205. 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.
206. 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).
207. 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.
208. 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.
209. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Воротников В.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Куприков М.П., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А.

Оценка деформированного, кинематического и теплового состояний стальных заготовок при трёхвалковой винтовой прокатке. Сталь, 2024, №6, с. 11-15

210. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Воротников В.А., Сидоров А.А. Оценка сдвиговых деформаций, кинематического состояния и параметров очага деформации в процессах двухвалковой винтовой прокатки. Metallurg, №7, 2024, с. 94-97

211. 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.

212. 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.

213. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Чан Ба Хюи, Гладков Ю.А., Гартвиг А.А. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырёхвалковом стане винтовой прокатки. Metallurg, №9, 2017, с. 19-24.

214. 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.

215. 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.

216. Романцев Б.А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Исследование процесса винтовой прокатки в четырехвалковой клетки методом моделирования. Metallurg, №7, 2018, с. 15-20.

217. Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates // International Journal of Impact Engineering. 2016. T. 90. C. 1-11.

218. Чан Ба Хюи. Разработка и исследование процесса винтовой прокатки в четырёхвалковом стане на основе физического и компьютерного моделирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. НИТУ МИСИС, Москва, 2019.

219. Пат. 2179900 РФ. Способ винтовой прокатки / А. В. Гончарук, Б. А. Романцев, В. К. Михайлов, С. П. Галкин, Е. В. Даева, А. П. Чистова, А. А. Хзарджан; опубл. 04.04.2006.

220. 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.
221. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния в процессах прошивки на основе компьютерного моделирования. Тяжелое машиностроение. 2020. № 5-6. С. 46-49.
222. Пат. RU 2764066 С2. Стан винтовой прокатки. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А.
223. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объёмной штамповки: учебное пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.: ил.
224. 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
225. Karpov, B. V., Patrin, P. V., Galkin, S. P., KHaritonov, E. A. and Karpov, I. B., 2018, Radial-Shear Rolling of Titanium Alloy VT-8 Bars with Controlled Structure for Small Diameter Ingots (≤ 200 mm). Metallurgist. 2018. Vol. 61, no. 9-10, p. 884-890.
226. Galkin S.P., Romantsev, B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. Chernye Metally, Issue 4, 1 April 2018, Pages 20-27.
227. Gamin, Y., Akopyan, T., Koshmin, A., Dolbachev, A. and Goncharuk, A. Microstructure evolution and property analysis of commercial pure Al alloy processed by radial-shear rolling. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20 (4).
228. Gamin, Y., Koshmin, A., Dolbachev, A., Galkin, S., Aleschenko, A. and Kadach, M., Studying the Influence of Radial-Shear Rolling on Thermal Deformation Conditions of A1050 Processing. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, 61(6), pp. 646-657.
229. Stefanik, A., Szota, P., Mróz, S., Bajor, T. and Boczkal, S. Influence of the Deformation Method on the Microstructure Changes in AZ31 Magnesium Alloy Round Rods Obtained by the Rolling Process. Key Engineering Materials, 2016, 716, pp. 864-870.
230. 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).

231. Андреев В.А., Рогачев С.О., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С. Влияние винтовой прокатки на структуру и механические свойства титановых сплавов. Деформация и разрушение материалов, 2023, № 11, с. 22-32
232. 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.
233. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А. Оценка деформированного, теплового и кинематического состояний и их влияние на микроструктуру заготовки из коррозионностойкой стали при трёхвалковой винтовой прокатке. Черные металлы, 2025, январь (№1), с. 31-36.
<https://doi.org/10.17580/chm.2025.01.06>
234. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T.. Establishment of a new hybrid fracture criterion for cross wedge rolling. International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 167. February. 105274.
235. 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.
236. Андреев В.А., Карелин Р.Д., Комаров В.С., Куприков М.П., Скрипаленко М.М., Черкасов В.В., Лайшева Н.В., Юсупов В.С. Деформационное поведение и свойства прутков никелида титана после горячей винтовой прокатки. Прокатное производство, 2024, №23, с. 22-34.
237. 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.
238. 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.
239. 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.
240. Рогачев С.О., Андреев В.А., Наумова Е.А., Скрипаленко М.М., Щербаков В.А. Особенности поведения многокомпонентного заэвтектического алюминиевого сплава в условиях горячей трёхвалковой радиально-сдвиговой прокатки. Прокатное производство, 2025, №19, с. 1-10.

241. 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.

242. 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.

243. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О. Актуальные направления компьютерного моделирования процессов трёхвалковой винтовой прокатки. Обзор. Прокатное производство, 2025, №24, с.18-29

244. 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.

245. 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.

246. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Кузнецов В.П. Оценка напряженно-деформированного и теплового состояния заготовки при трех- и четырехвалковой винтовой прокатке и его влияния на формирование микроструктуры. *Сталь*, 2024, №11, с. 34-36.

247. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Гартвиг А.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Данилин А.В., Гладков Ю.А. Моделирование процессов винтовой прокатки при постоянном и переменном трении на контакте валков и заготовки. *Металлург*, №7, 2023, с. 102-107

248. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А., Куприков М.П. Моделирование очага деформации и напряжённо-деформированного состояния при винтовой прокатке заготовок из труднодеформируемого сплава. *Сталь*, 2023, №9, с. 16-20

249. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Оценка напряжённо-деформированного и кинематического состояний заготовки из никелида титана в процессах винтовой прокатки на основе компьютерного моделирования. *Металлург*, 2023, №10, с. 82-88

250. 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.

251. 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

252. 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.

253. Скрипаленко М.М., Андреев В.А., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Рогачев С.О., Куприков М.П., Кузнецов В.П., Скрипаленко М.Н., Шустер Е.В. Оценка напряжённостно-деформированного и температурного состояния заготовок из никелида титана при винтовой прошивке. Metallurg, 2024, №9, с. 78-82.

254. 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

255. 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.

256. Способ раскатки трубных заготовок: Пат. RU 2722952 C1. Рос. Федерация: B21B 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.

257. Стан винтовой прокатки: Пат. RU 2764066 C2. Рос. Федерация: B21B 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.

258. Способ винтовой прошивки в четырёхвалковом стане: RU 2821416 C1. Рос. Федерация: B21B 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.

259. 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.

260. 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

261. 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.

262. 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.

263. 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.

264. 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.

265. Пат. SU 786120 A1. Способ винтовой прокатки круглых заготовок сплошного профиля. Полухин П.И., Потапов И.Н., Харитонов Е.А. Опубликовано в бюл. №24, 1980 г.

266. 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.

267. Способ прогнозирования разрушения заготовок в процессе обработки металлов давлением: Пат. RU 2748138 C1. Рос. Федерация: B21B 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.

268. Способ создания трёхмерной модели зерна металлоизделия. Пат. RU 2778276 C1. Рос. Федерация: G06T 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.

269. 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.

270. 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.

271. 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.

272. 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.

273. 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.

274. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Будников А.С., Юсупов В.С., Андреев В.А., Кузнецов В.П. Баланс тянущих сил при винтовой прошивке. Прокатное производство, 2024, 21, с. 30-35.

275. 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

276. 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.

277. Потапов И.Н., Коликов А.П., Дрюян В.М., Теория трубного производства. Учебник для ВУЗов. – М.: Металлургия, 1991. 424 с.

278. Способ определения площади контакта оправки и заготовки при винтовой прошивке: Пат. RU 2714225 C1. Рос. Федерация: G01B 21/28 (2006.01), G06T 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.

279. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО СМК
Кандидат технических наук

В.П. Шмелев

« » 2023 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

об использовании «Методики прогнозирования разрушения заготовок в процессах обработки металлов давлением»

Настоящий акт составлен в том, что НИТУ МИСИС (кафедра ОМД) в инициативном порядке выполнены исследования по разработке методики прогнозирования разрушения заготовок в процессах обработки металлов давлением.

Методика позволяет определить области в объёме деформированной заготовки, которые либо наиболее склонны к разрушению, либо в которых произойдёт разрушение. Для этого исследуемый процесс обработки давлением моделируют с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа, по результатам компьютерного моделирования для исследуемой точки заготовки строят траекторию в координатах «накопленная деформация - коэффициент жёсткости напряжённого состояния», в этих же координатах строят линию предельной пластичности. Совместный анализ положения траектории и линии предельной пластичности позволяет прогнозировать разрушение. Приведены результаты применения методики прогнозирования.

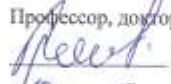
Методика и результаты исследований будут использованы при разработке технологических процессов обработки металлов давлением.

от НИТУ МИСИС

от АО СМК

Профессор, доктор технических наук

Технический директор

 Б.А. Романцев

 Д.А. Карягин

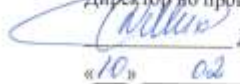
«10» 02 2023 г.

«10» 02 2023 г.

Доцент, кандидат технических наук

Директор по производству

 М.М. Скрипаленко

 Д.В. Михайлов

«10» 02 2023 г.

«10» 02 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Статус: Принят

Внимание!

При заполнении форм отчета введенные Вами данные автоматически сохраняются на Вашем персональном компьютере. Однако просим учесть, что для дальнейшей передачи этих данных на сервер необходимо нажимать кнопку "Синхронизация".

Для заполнения данных публикаций обновите страницу!

Форма «Т». Титульный лист отчета(итогового отчета) о выполнении проекта

Название проекта Исследование и разработка процесса пластической деформации труднодеформируемых титановых сплавов путем прокатки сплошных и полых заготовок на многовалковом стане винтовой прокатки новой отечественной конструкции	Номер проекта 23-19-00775	
	Тип проекта: ОНГ	
	Отрасль знания: 09	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: Скрипаленко Михаил Михайлович	Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: +74992302817 mms@misls.ru	
Полное и краткое название организации, через которую осуществляется финансирование проекта: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук ИМЕТ РАН		
	Год начала проекта: 2023	Год окончания проекта: 2025

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



Форма направления реферативно-библиографических сведений
о результатах научно-исследовательской, опытно-конструкторской и
технологической работы

I. Сведения о НИОКТР

Номер государственного учета НИОКТР	Дата постановки НИОКТР на учет
AAAA-A19-119100490117-8	04/10/2019

Наименование НИОКТР
Разработка и изготовление макета четырёхвалкового стана винтовой прокатки

Руководитель НИОКТР	Ученая степень	Ученое звание
Скрипаленко М.М.	Кандидат технических наук	Доцент

II. Сведения об отчете

Номер государственного учета отчета	Дата постановки отчета на учет
AAAA-B20-220030290002-4	02/03/2020

Наименование отчета
Компьютерное моделирование прокатки и прошивки заготовок в макете, оценка полноты и качества изготовления элементов макета, сборка валкового узла макета

Тематическая(-ие) рубрика(-и)	Индекс
53.49.09; 53.47.39; 53.47.29; 53.43.37; 53.43.31	669.017.539.4; 669.017.539.52

Коды международной классификации отраслей наук
02.00.00; 02.03.00

Дата утверждения отчета
21/02/2020

Кол-во юнг (томов)	Общее кол-во страниц
1	34

Номера книг (томов)/Кол-во страниц	1/34	2/0	3/0	4/0	5/0	6/0	7/0	8/0	9/0	10/0	11/0	12/0	13/0	14/0	15/0	16/0	17/0	18/0	19/0	20/0

Приложений	0	Таблиц	0	Иллюстраций	25	Библиография	5	Публикаций по результатам НИОКТР	0
------------	---	--------	---	-------------	----	--------------	---	----------------------------------	---

Руководитель организации-исполнителя	Фамилия, инициалы	Должность	СНИЛС	Подпись
	Скрипаленко М. М.	Генеральный директор	Нет данных	



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "МИП "СТАН"

УДК: 621.771:669.15'26'24'295-194
Регистрационный №АААА-А19-119100490117-8
Инв. №001-09/19 от 3 сентября 2019



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Скрипаленко М. М.

ОТЧЕТ

о выполнении НИОКР по теме:

"Разработка и изготовление макета четырёхвалкового стана винтовой прокатки"
(договор №3211ГС1/48664 от 03.09.2019)

Этап №1 "Разработка конструкции валков и валкового узла макета, входной и выходной стороны. Создание 3D-моделей основных и вспомогательных валков, позиционирование валков в сборку для создания 3D-модели валкового узла макета."
(промежуточный)

Руководитель работ

Скрипаленко М. М.

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ
ИННОВАЦИЯМ



Директор института
Экотехнологий и инжиниринга
НИТУ МИСИС
А.Я. Травянов
«...» 2026 г.

Акт

об использовании в учебном процессе материалов диссертационной работы доцента кафедры «Обработка металлов давлением» Скрипаленко М.М. на тему: " Совершенствование четырёхвалковой винтовой прокатки и разработка универсального стана на основе компьютерного моделирования и анализа различных схем процесса ", представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящий акт подтверждает, что на кафедре ОМД при подготовке бакалавров по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», а также магистров по направлению 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (направленность (профиль) «Инженерный менеджмент оборудования и технологий») используются результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы Скрипаленко М.М.

Указанные материалы используются при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Методы исследования технологического оборудования», «Технологии производства сплошных и полых изделий», «Технологические процессы пластической обработки металлов и сплавов», при выполнении КНИР и выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

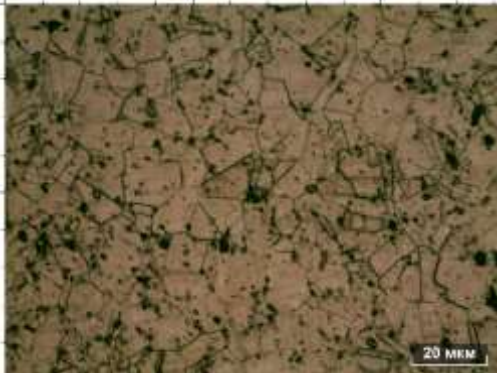
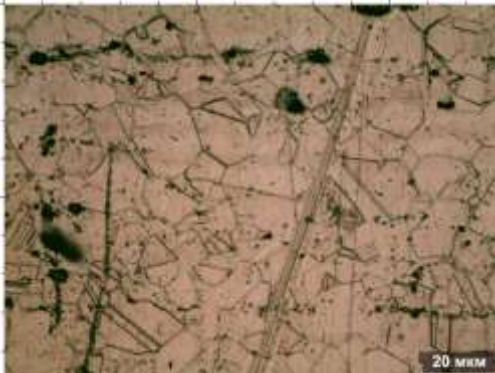
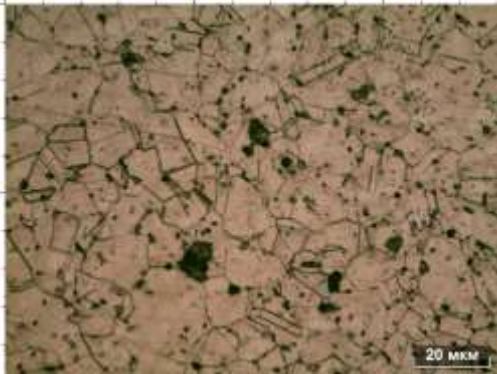
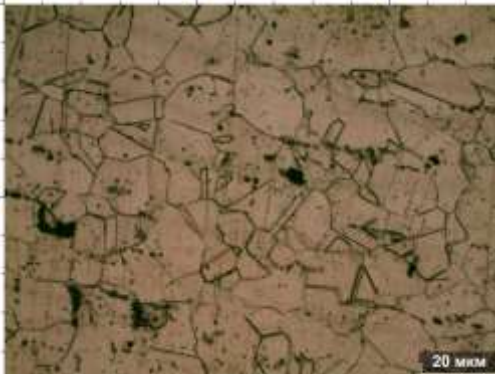
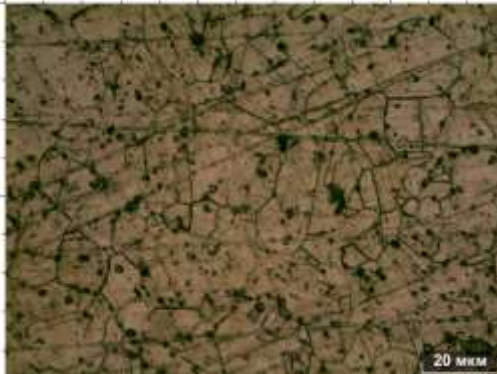
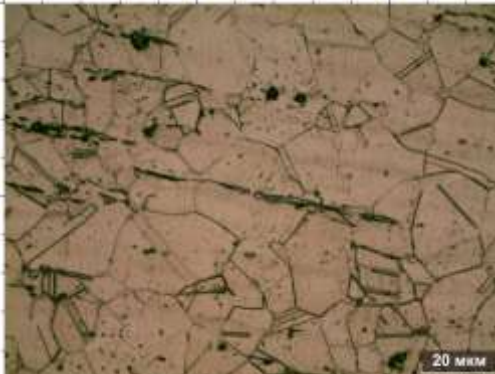
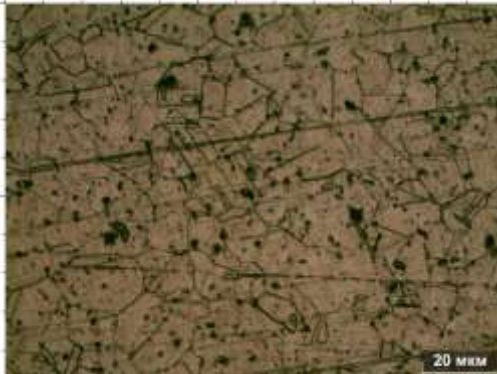
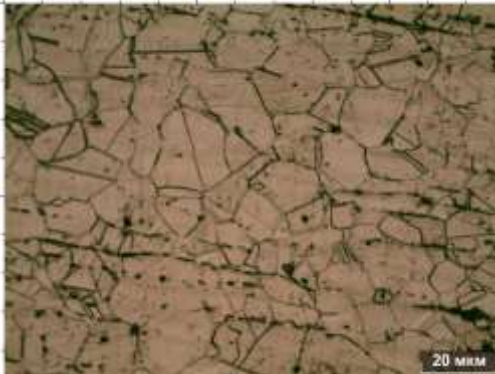
Заведующий кафедрой
«Обработка металлов давлением»  А. С. Алещенко

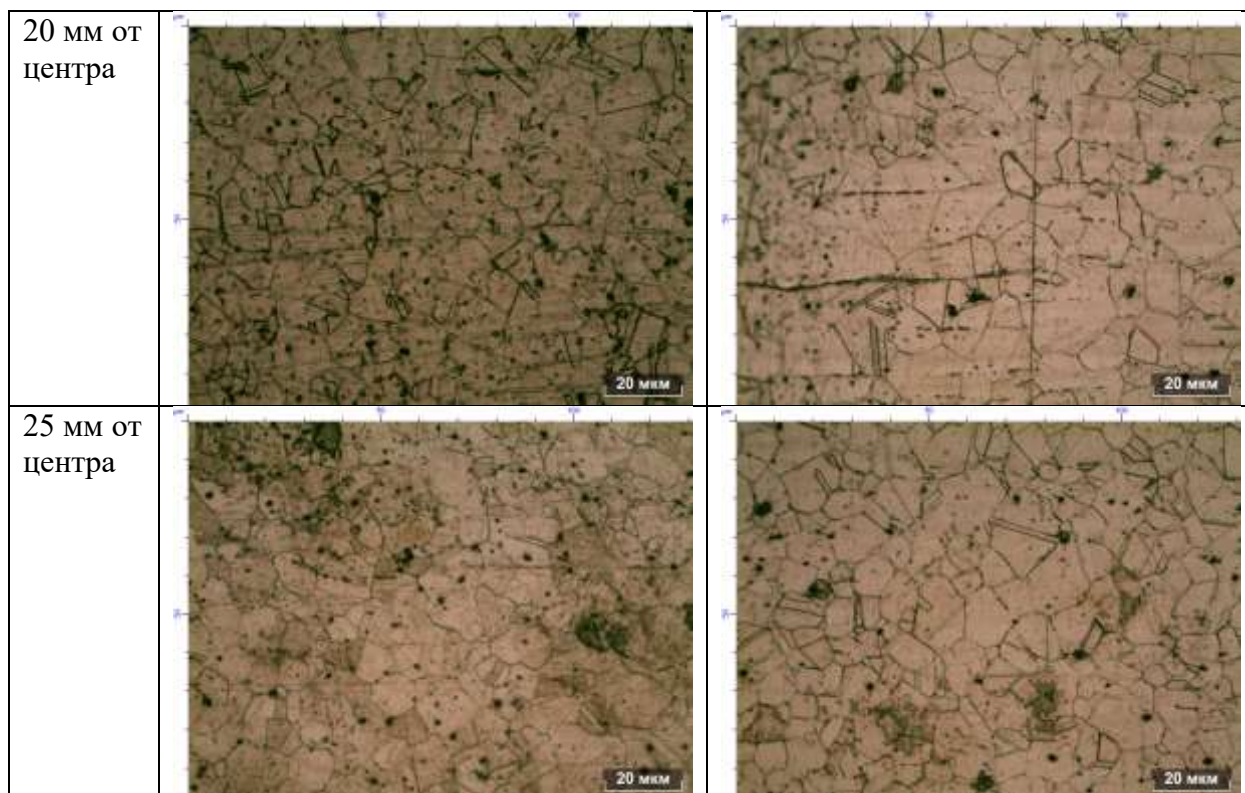
Учёный секретарь кафедры
«Обработка металлов давлением»  Т. Ю. Сидорова

Доц., к.т.н.  М.М. Скрипаленко

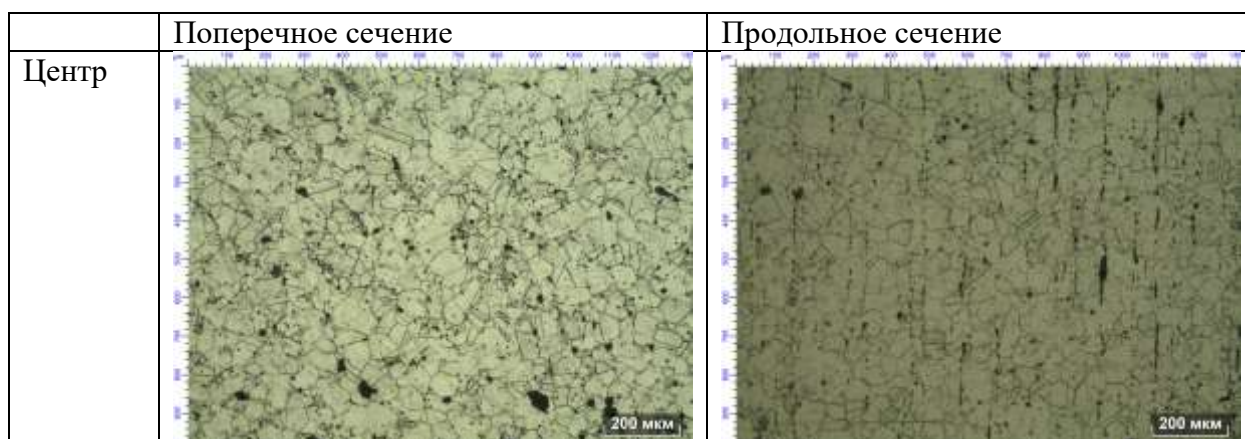
ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Микроструктура, полученная по результатам исследований образца «Торец» (рис. 35) после двухвалковой прокатки

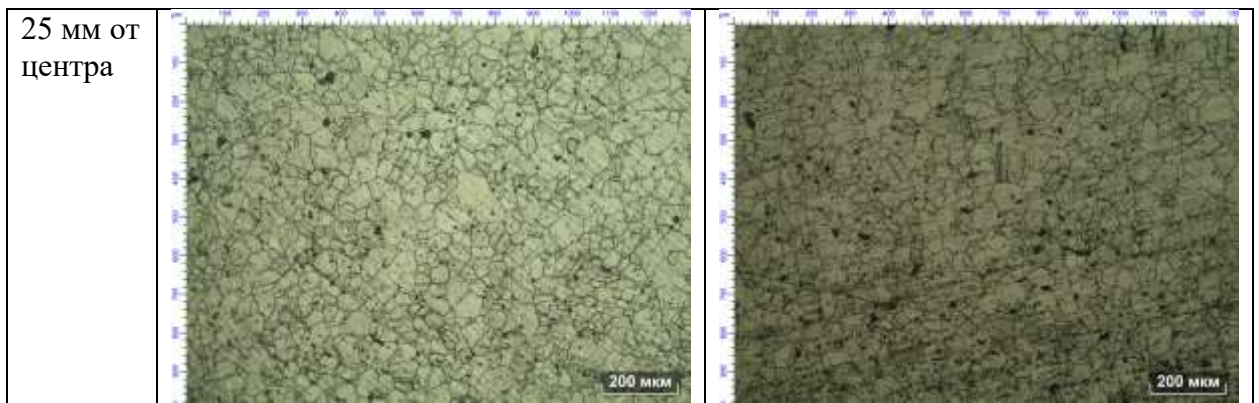
	Поперечное сечение	Продольное сечение
Центр		
5 мм от центра		
10 мм от центра		
15 мм от центра		



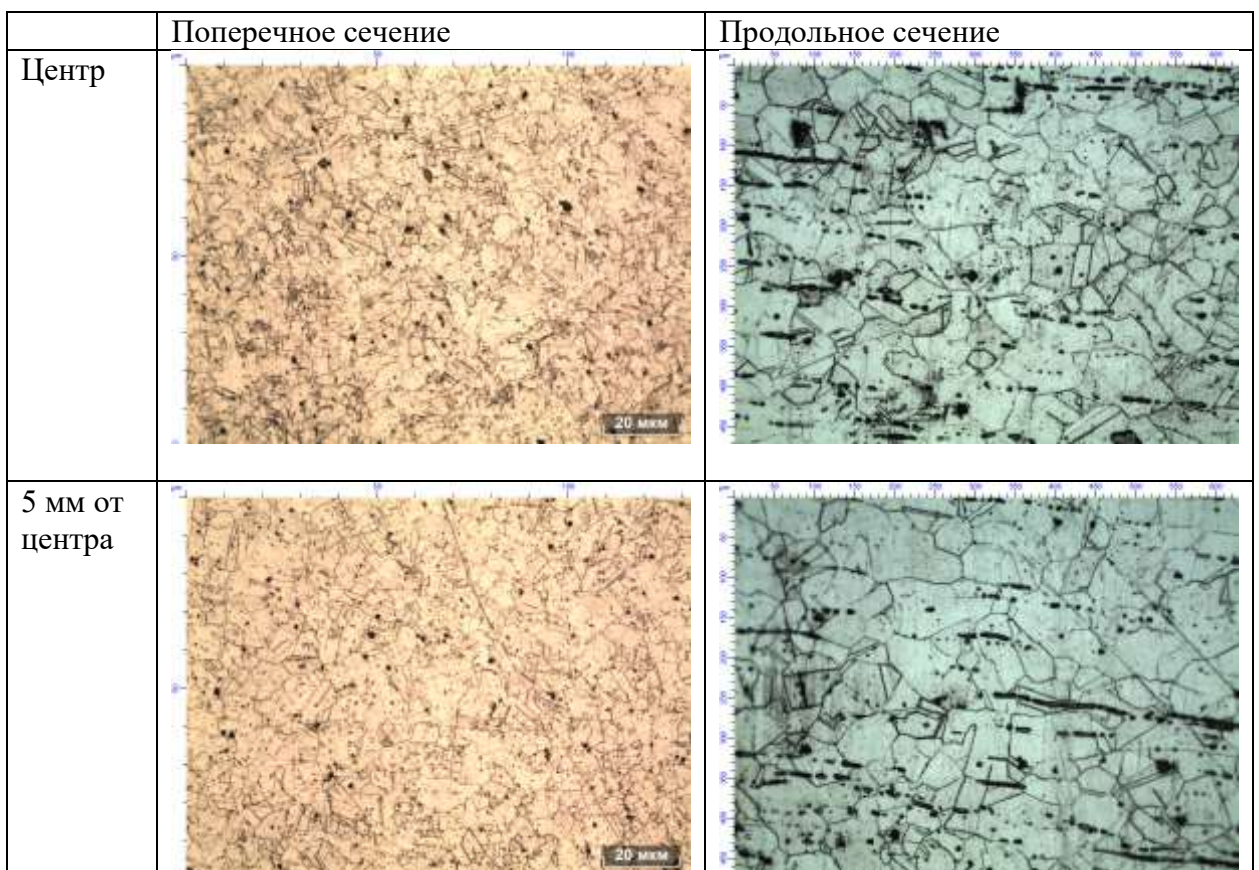
Микроструктура, полученная по результатам исследований образца «Середина заготовки» (рис. 35) после двухвалковой прокатки

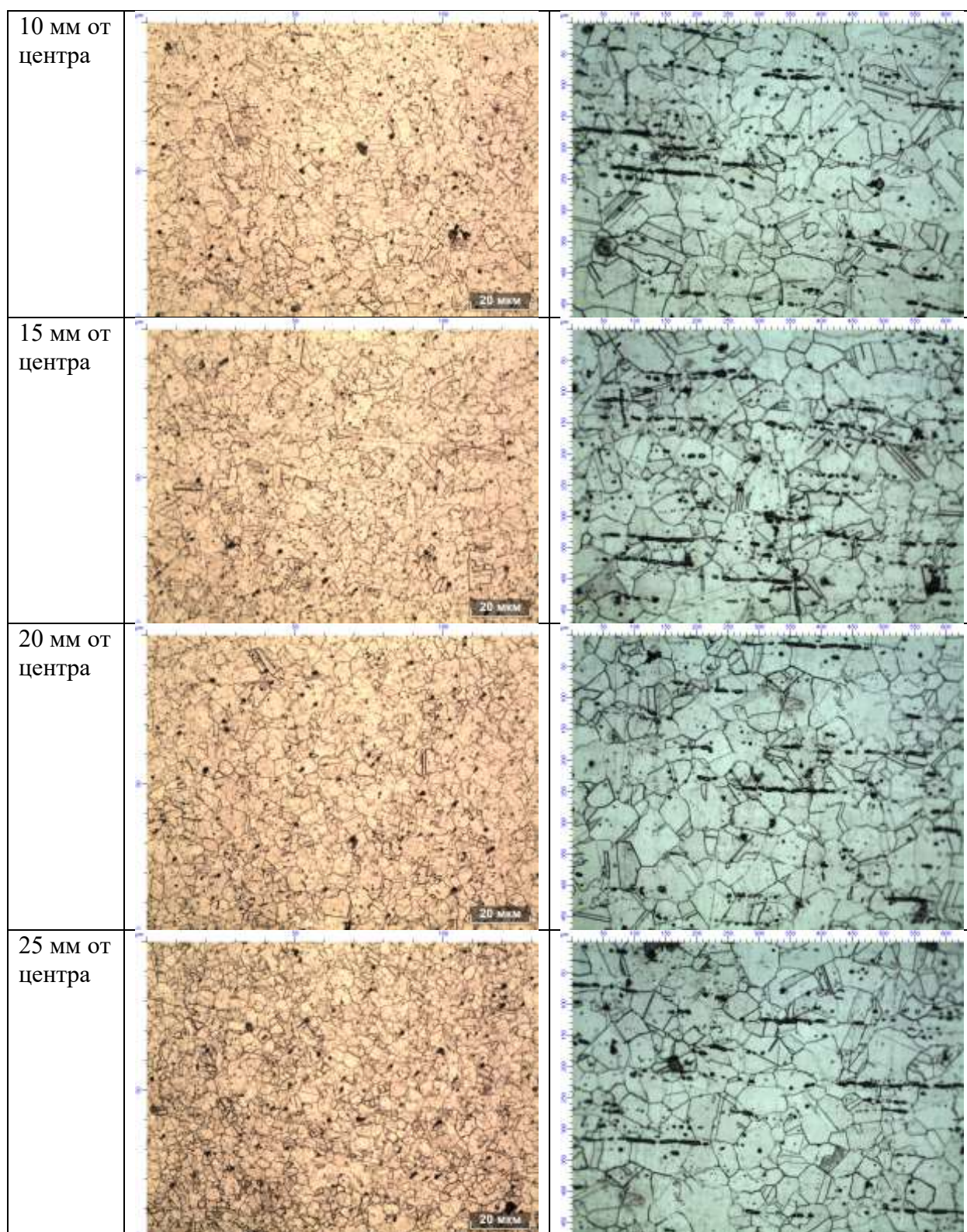


5 мм от центра		
10 мм от центра		
15 мм от центра		
20 мм от центра		

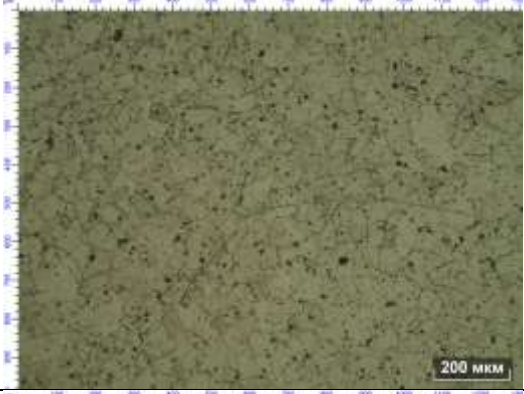
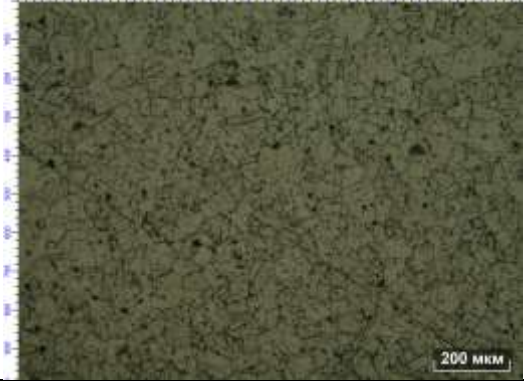


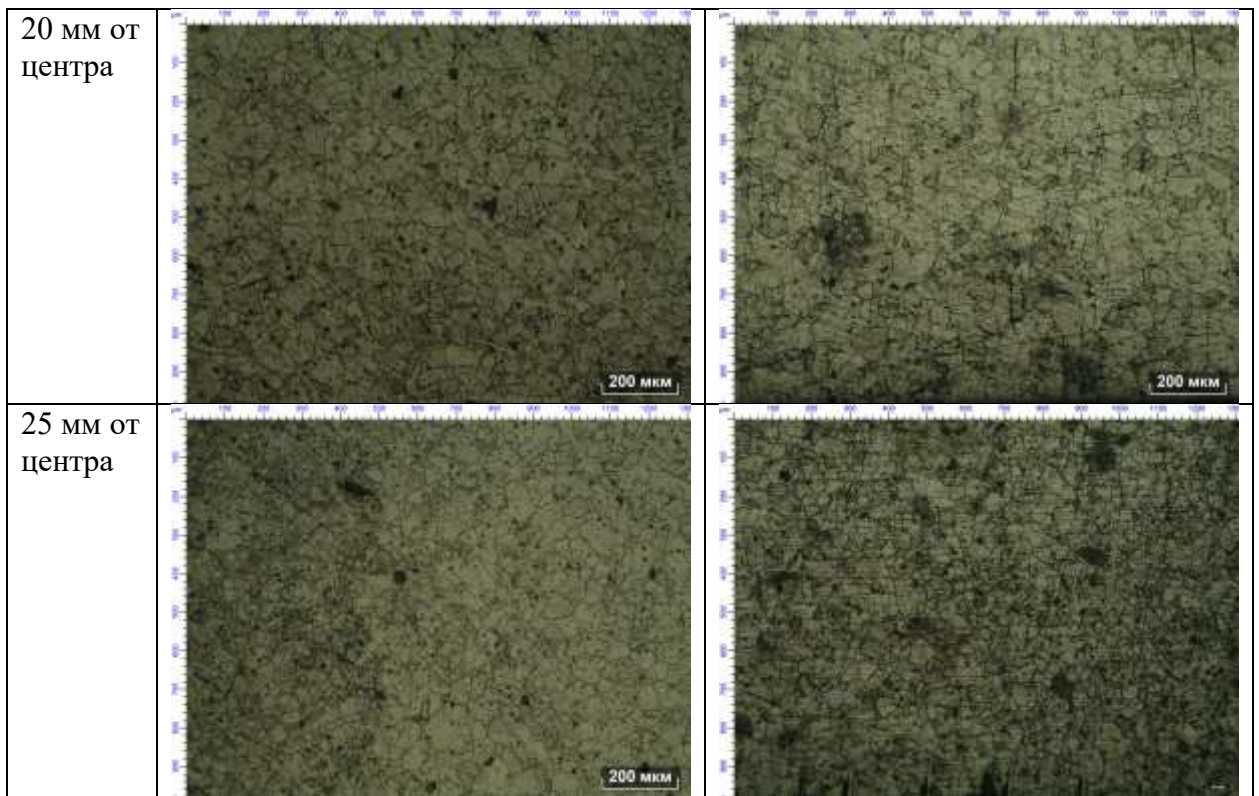
Микроструктура, полученная по результатам исследований образца «Торец» (рис. 35) после трехвалковой прокатки





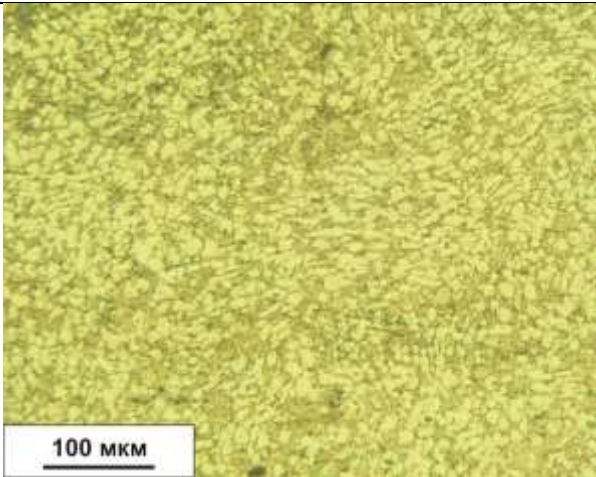
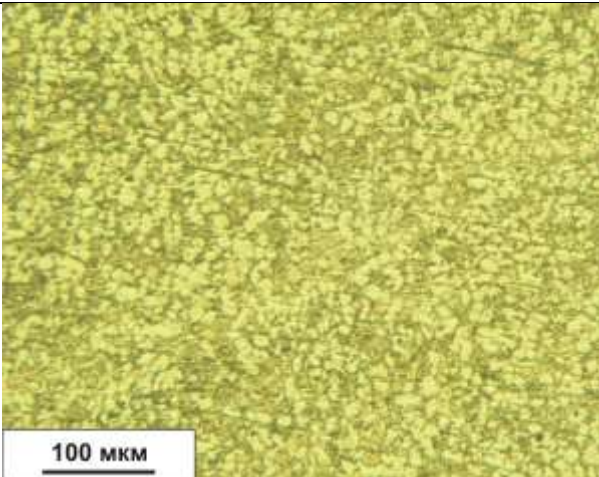
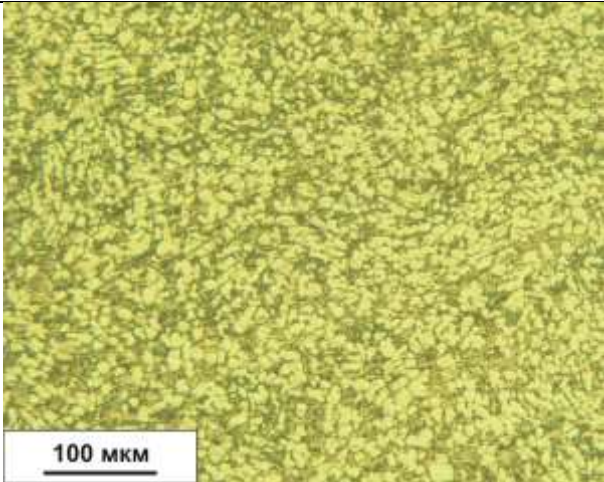
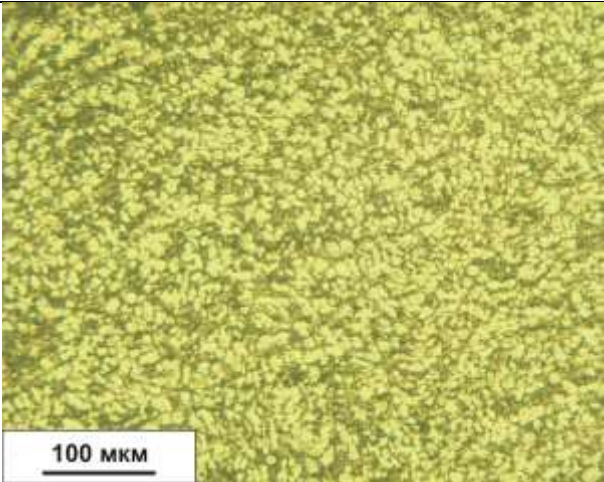
Микроструктура, полученная по результатам исследований образца «Середина заготовки» (рис. 35) после трёхвалковой прокатки

	Поперечное сечение	Продольное сечение
Центр		
5 мм от центра		
10 мм от центра		
15 мм от центра		



ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Фото микроструктуры после трёхвалковой РСП заготовки из сплава ВТ6. Для различных расстояний от центра заготовки.

центр	4 м от центра
	
8 мм от центра	12 мм от центра
	
16 мм от центра	20 мм от центра

