

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСИС»

На правах рукописи

ИСХАКОВ РУСЛАН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКА КЛЕТИ  
РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ  
НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ТПА С ТРЕХВАЛКОВЫМИ РАСКАТНЫМИ СТАНАМИ**

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Галкин Сергей Павлович

Москва – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ.

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.	5
ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ВИНТОВОЙ (РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ) ПРОКАТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СПЛОШНЫХ КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ПРОШИВКОЙ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.	10
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НЛЗ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК СТАЛИ ПРОИЗВОДСТВА АО «ПНТЗ».	32
2.1 Материалы экспериментальных исследований.	32
2.2 Прокатка опытной партии НЛЗ на опытно-промышленном трёхвалковом стане МИСиС-130Т.	32
2.3 Прокатка опытной партии труб на ТПА-160 и ТПА 140-1 из предварительно деформированных заготовок.	37
2.4 Исследование структуры исходных НЛЗ и деформированных заготовок после РСП.	39
2.5 Исследование механических свойств полученных труб.	46
ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПЕРЕЖИМОВ ДЛЯ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ РСП ПО ЗАДАННОЙ КАЛИБРОВКЕ И НАСТРОЙКЕ ВАЛКОВ.	49
3.1 Исходные положения и геометрическая схема расчёта.	49
3.2 Углы раскатки и подачи заготовки относительно валков. Формулы расчёта.	55
3.3 Оценка точности расчёта.	57

ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РСП ПРИ ОТНОШЕНИИ ДИАМЕТРА ВАЛКОВ К ДИАМЕТРУ ЗАГОТОВКИ 1,3-1,8	64
4.1 Порядок выполнения моделирования и анализа результатов.	64
4.2 Усилие, момент, мощность прокатки.	69
4.3 Скорость деформации, коэффициент жёсткости напряжённого состояния и накопленная пластическая деформация.	73
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ КЛЕТИ РСП, СОВМЕСТИМОЙ С ОБОРУДОВАНИЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТРЁХВАЛКОВОГО РАСКАТНОГО СТАНА ТПА-160.	77
5.1 Разработка объёмно-компоновочного решения клетки и схемы настройки рабочих валков.	77
5.2 Общее устройство клетки.	81
5.3 Сопряжение конструкции клетки по углам перекоса в шпиндельных устройствах и по допустимому моменту прокатки.	85
5.4 Компьютерная оценка прочности и жёсткости элементов клетки. Техническая характеристика клетки.	94
ГЛАВА 6. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РСП И КЛЕТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ТПА-160.	101
6.1 Порядок освоения клетки РСП, как сменного оборудования раскатного стана.	101
6.2 Совершенствование режима деформации НЛЗ в сочетании «РСП – прошивка».	112
6.3 Оценка накопленной деформации в сочетании «РСП – прошивка» в условиях ТПА-160.	118
6.4 Выполненная программа предварительного обжатия НЛЗ.	122
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.	146

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.	165

## **ВВЕДЕНИЕ.**

### **Актуальность работы.**

Широкомасштабный переход на непрерывную разливку стали вывел металлургическую отрасль на качественно новый уровень ресурсо- и энергосбережения. Вместе с тем, в производстве бесшовных труб обозначились определённые проблематичные зоны, связанные, с применением непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) круглого сечения взамен деформированных. В первую очередь – это ограниченный минимальный диаметр НЛЗ, особенности структуры и пониженная пластичность металла. Наиболее остро эти вопросы стоят для малых агрегатов, типа ТПА-160, работающих с заготовками диаметром 150 мм и менее, для которых практически отсутствуют кристаллизаторы соответствующих размеров. К числу весьма перспективных технологических схем производства бесшовных труб из непрерывнолитых заготовок относится схема, включающая предварительное обжатие заготовки способом радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки (РСП) в трёхвалковом стане перед прошивкой. К настоящему времени в промышленности реализовано два варианта такой схемы: строительство нового стана РСП и модернизация действующих трёхвалковых раскатных станов. Первый вариант требует значительных капитальных затрат. Второй – имеет ограничения по углам подачи валков (не более 14-15°) на существующих раскатных станах и ограничен в реализации рациональных режимов РСП на более высоких углах подачи.

### **Цель и задачи работы.**

На основе комплексных исследований разработать и внедрить режимы радиально-сдвиговой прокатки при углах подачи не менее 18° и рабочую клеть специальной конструкции для предварительного деформирования непрерывнолитых заготовок из легированных сталей, в условиях действующего трубопрокатного агрегата ТПА-160 АО «ПНТЗ».

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

– Провести экспериментальные исследования процесса радиально-сдвиговой прокатки непрерывнолитых заготовок из легированных сталей различных марок на стане МИСиС-130Т.

– Развить аналитическую методику виртуальных пережимов на случай расчёта геометрии очага деформации по известной калибровке валков (обратная задача) с применением углов подачи и раскатки заготовки относительно валков.

– Провести конечно-элементное моделирование процесса РСП при отношении диаметра валков к диаметру заготовки 1,3-1,8.

– Разработать объёмно-компоновочное решение и специальную конструкцию модульной клетки РСП прокатки НЛЗ диаметром 145-220 мм из легированных сталей в условиях ТПА-160 АО «ПНТЗ».

– Внедрить и освоить клеть РСП специальной конструкции как сменное дополнительное оборудование к раскатному стану ТПА-160.

#### **Научная новизна работы:**

– Исследованы и внедрены в практику промышленного производства технологические режимы радиально-сдвиговой прокатки непрерывнолитых заготовок диаметром 145-220 мм из углеродистых и легированных сталей (включая хромосодержащие типа 12Х1МФ и др.) при углах подачи валков  $18^\circ$  с коэффициентами вытяжки за проход до 3,0.

– Разработано объёмно-компоновочное решение и конструкция модульной клетки РСП, совместимая с оборудованием трёхвалковых раскатных станов действующих трубопрокатных агрегатов типа ТПА-160.

– Установлены закономерности пластического течения металла и энергосиловых параметров РСП при отношении диаметра валков к диаметру заготовки 1,3-1,8.

– Показано положительное влияние РСП на особенности структурного строения деформированных НЛЗ, в частности, установлено, что относительный объём металла с остатками литой структуры зависит от марки стали и уменьшается от центра заготовки к периферии в пределах 4,42-0% для стали

12Х1МФ и 22,15-1,62% для стали 18ХМФБ при коэффициентах вытяжки 2,0-3,0.

– Установлены аналитические формулы расчёта геометрических параметров очага деформации РСП по заданной калибровке валков с применением фактических углов подачи и раскатки заготовки относительно оси валков.

### **Практическая значимость и реализация работы.**

Разработаны и внедрены технология и клеть РСП специальной конструкции для предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок на ТПА-160 АО «ПНТЗ» при повышенных углах подачи валков (18°). Клеть устанавливается и эксплуатируется как сменное дополнительное оборудование к существующему раскатному стану ТПА-160. Время приведения клетки РСП в рабочее положение и обратного перехода на штатный вариант раскатной клетки не превышает времени перевалки валков.

Применение радиально-сдвиговой прокатки при углах подачи 18° для предварительной деформации непрерывнолитых заготовок из легированных хромсодержащих марок сталей в условиях действующего агрегата ТПА-160 позволяет, в ряде случаев, заменить катаную заготовку непрерывнолитой заготовкой собственного производства без снижения уровня выхода годного.

Результаты исследований использованы при разработке проектно-конструкторской документации клетки РСП специальной конструкции и её изготовлении в кооперации АО «Исток МЛ» с ПАО «НЛМК».

Результаты работы используются на кафедре ОМД НИТУ «МИСИС» при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий, в курсовом проектировании и при выполнении выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

## **Методы исследований.**

Исследование макро- и микроструктуры, свойств заготовок проведено в условиях аккредитованной испытательной лаборатории АО «ПНТЗ».

Экспериментальные исследования прокатки непрерывнолитых заготовок выполнены на опытно-промышленном стане винтовой прокатки МИСиС-130Т и специализированной клетки РСП раскатного стана ТПА-160. Анализ полученных результатов выполнен с использованием регистрирующей аппаратуры, измерительных приборов и применением прикладного программного обеспечения Microsoft Excel.

Напряжённо-деформированное состояние и энергосиловые параметры при радиально-сдвиговой прокатке исследованы с помощью программного комплекса КЭ-моделирования QForm. Построение геометрических моделей валков выполнено в системе твердотельного моделирования Компас-3D.

Разработка конструкции специализированной клетки РСП и её привязка к основным элементам главного привода, входной и выходной стороны раскатного стана ТПА-160, прочностные расчёты осуществлены с применением программного обеспечения SolidWorks 3D и SolidWorks Simulation.

## **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технологические режимы радиально-сдвиговой прокатки непрерывнолитых заготовок диаметром 145-220 мм из легированных сталей при повышенных углах подачи валков ( $18^\circ$ ) в условиях ТПА-160 АО «ПНТЗ».

2. Объёмно-компоновочное решение, конструкция сменной клетки РСП, совместимое с оборудованием линии главного привода, входной и выходной сторонами раскатного стана ТПА-160.

3. Особенности влияния предварительной деформации методом РСП на структурное строение деформированных НЛЗ из легированных сталей.

4. Закономерности пластического течения металла и энергосиловых параметров РСП при отношении диаметра валков к диаметру заготовки 1,3-1,8.

5. Методика расчёта геометрических параметров очага деформации РСР по заданной калибровке валка с применением углов подачи и раскатки заготовки относительно валков.

**Личный вклад** автора состоит в постановке и решении задач исследований, в организации и проведении экспериментов, в получении и анализе основных научных результатов, разработке предложений по проектированию клетки, промышленном освоении технологии и клетки РСР при производстве бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА-160.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты и положения диссертационной работы доложены на: Международной конференции «Промышленное производство и металлургия» ICIMM 2020; XXIV Международной научно-практической конференции «Трубы-2021»; XIII Международном конгрессе прокатчиков 2022 г.; Международной промышленной выставке «Металл-Экспо 2021» (золотая медаль).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы изложено в опубликованных 10 работах, в том числе 6 из перечня ВАК РФ.

#### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 136 наименований, 6 приложений. Работа содержит 165 страниц машинописного текста, 73 рисунка и 24 таблицы.

# **ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ВИНТОВОЙ (РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ) ПРОКАТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СПЛОШНЫХ КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ПРОШИВКОЙ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.**

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий непрерывной разливки стали, что привело к широкому внедрению непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) круглого сечения в качестве трубной заготовки на многих трубопрокатных агрегатах (ТПА), выпускающих бесшовные трубы [1-3]. Это стало экономически эффективной альтернативой использованию деформированной заготовки. Переход на НЛЗ вывел трубную промышленность на качественно новый уровень эффективности, ресурсо- и энергосбережения.

Вместе с тем, по данным [1] использование НЛЗ при производстве горячекатаных труб всего марочного и геометрического сортамента сдерживается имеющимися ограничениями: литая структура материала, наличие характерного дефекта «центральная пористость», ограниченный минимальный производимый размер (наружный диаметр не менее 150 мм).

Производственный опыт и многочисленные исследования показывают, что при традиционных схемах получения бесшовных труб их качество во многом зависит от качества исходной заготовки [4-8]. Одним из распространенных дефектов НЛЗ является повышенная пористость или наличие трещин в осевой зоне заготовки [9-12], которые приводят к появлению дефектов, образующихся на внутренней поверхности труб. Возможно образование и других дефектов, которые могут снижать качество готовых труб. Они подробно описаны в работах [13, 14].

В работе [15] предложен ряд эффективных технологических решений, адаптирующих производство бесшовных труб к применению НЛЗ. В частности,

путём технологии «двойной перекачки» на существующем оборудовании ТПА частично преодолевается несоответствие между достаточно большим количеством диаметров трубных заготовок, необходимым для эффективного функционирования трубопрокатных агрегатов, и ограниченными сортаментными возможностями установок непрерывной разливки. Малые углы подачи снижают практическую применимость такой технологии, поскольку не оказывают положительного влияния на структурное состояние металла.

Вопросам расширения сортамента производимых труб на ТПА со станами продольной и винтовой прокатки при сокращении размерного ряда заготовок, в том числе в связи с использованием непрерывнолитой заготовки, посвящено множество работ [16-32]. В данных работах показаны резервы технологических возможностей станов винтовой прокатки – прошивных, раскатных/обкатных и калибровочных для реализации указанной задачи. Однако, ограничения размерного и марочного сортамента получаемых труб по новым режимам, не позволяют полностью заменить традиционные схемы производства и могут рассматриваться только как дополнительные, повышающие манёвренность агрегатов.

Исследованию и совершенствованию технологии прошивки НЛЗ посвящены работы [33-42 и др.].

Технологическая схема, включающая предварительное обжатие НЛЗ в стане радиально-сдвиговой прокатки (РСП) перед прошивкой (рисунок 1.1), относится к наиболее перспективным для промышленного применения.

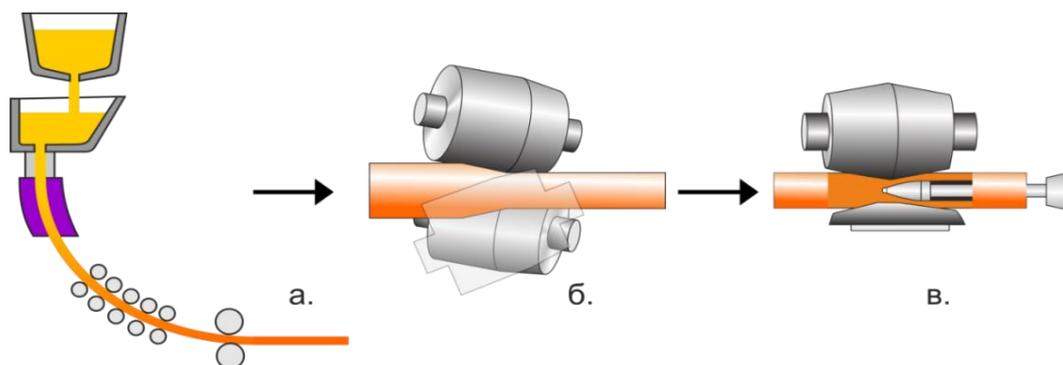


Рисунок 1.1 – РСП в производстве бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки: а – непрерывная разливка заготовок; б – обжатие заготовок в стане радиально-сдвиговой прокатки; в – прошивка обжатых заготовок.

РСП обеспечивает [43-46]:

- обеспечивает широкую номенклатуру заготовок под прошивку из непрерывнолитой заготовки одного-двух диаметров;
- интенсивно прорабатывает литую структуру и повышает свойства металла;
- повышает деформируемость металла при прошивке и последующих операциях пластической обработки;
- сокращает развитие исходных поверхностных дефектов.

Термином «радиально-сдвиговая прокатка» обозначают частный случай винтовой прокатки при больших углах ( $18-24^\circ$ ), предназначенный для деформации сплошных заготовок [47]. Одним из целевых назначений радиально-сдвиговой прокатки (рисунок 1.2) является интенсивная пластическая деформация (ИПД) и уплотнение металла по всему сечению проката, с получением уникального структурного строения и повышением свойств. В основе процесса лежит исследовательское достижение коллектива учёных «МИСИС» под руководством И.Н. Потапова и П.И. Полухина (1970-е годы) об определяющем влиянии траекторий винтового движения прокатываемой заготовки на условия деформации металла. При малых углах подъёма винтовых траекторий в осевой зоне заготовки наблюдается разрыхление металла или, в

лучшем случае, сохраняется исходное состояние. При переходе в область больших углов подачи  $\beta = 18 - 24^\circ$  создаются условия для уплотнения и интенсивной проработки структуры металла по всему сечению заготовки.

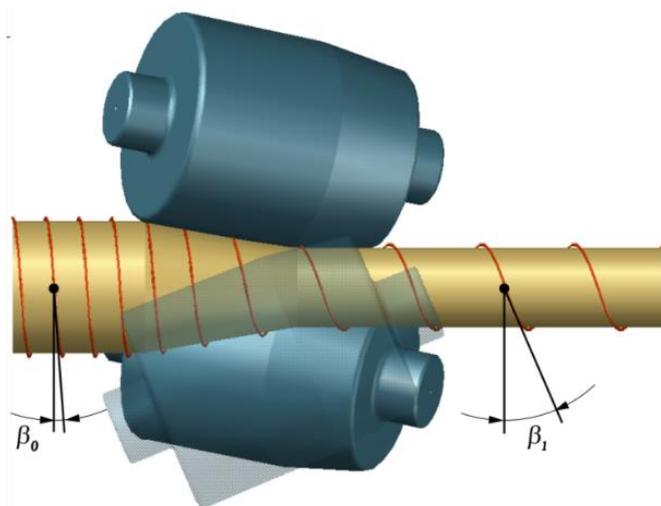


Рисунок 1.2 – Схема радиально-сдвиговой прокатки с геликоидальной траекторией течения деформируемого металла.

В середине 1960-х годов двухвалковые прошивные станы с групповым приводом валков от одного двигателя и работающие на малых углах подачи ( $10-12^\circ$ ) стали существенно ограничивать производительность ТПА в целом. Не стал исключением и прошивной стан первого в СССР трубопрокатного агрегата данного типа – «30-102» Первоуральского новотрубного завода, где в 1967 году группой заводских специалистов в составе Ф.А. Данилова, Е.А. Белова, М.Ф. Столетнего, Л.Н. Кузнецова, А.Д. Толченникова, Н.И. Хухарева при реализации собственных проектных предложений по очередному увеличению производства труб на ТПА 30-102 впервые в мировой практике были успешно применены режимы прошивки на углах подачи вплоть до  $15^\circ$ , а благодаря последующим совместным со специалистами «МИСИС» обширным исследованиям, данное направление было внедрено и получило развитие, в том числе и на других ТПА [47-49].

На основании успешного опыта реконструкции прошивного стана ТПА 30-102 АО «ПНТЗ» для перехода на большие углы подачи,

Электростальский завод тяжёлого машиностроения (АО «ЭЗТМ») спроектировал и освоил выпуск принципиально нового типа прошивных станов – с индивидуальным приводом рабочих валков, развёрнутых на большие углы подачи до 14-15° [6]. Повышение осевой скорости прошивки без увеличения частоты вращения валков стало эффективным средством комплексного ресурсо- и энергосбережения. Проблема производительности была решена одновременно с улучшением состояния внутренней поверхности труб, снижением расхода энергии на прошивку, увеличением стойкости технологического инструмента.

Для проведения углубленных экспериментальных исследований процессов винтовой прокатки при больших углах подачи АО «ЭЗТМ», при технологической и конструкторской поддержке «МИСИС», спроектировал и изготовил двух- и трёхвалковые опытно-промышленные станы МИСиС-100Д и МИСиС-100Т с регулированием углов подачи от 6 до 30° [47, 50], способные прокатывать заготовки промышленных типоразмеров.

Некоторые наглядные результаты экспериментов на этих станах представлены на рисунках 1.3 и 1.4.

Заготовки диаметром 60 мм из стали 12Х18Н10Т деформировались в двухвалковом стане при различных углах подачи с остановкой привода и торможением металла в очаге деформации. На недокатах визуализировалась траектория движения металла и контур контактной поверхности (рисунок 1.3, а). Из недокатов были изготовлены продольные макрошлифы для определения склонности к вскрытию осевой полости (рисунок 1.3, б). Прошиваемость оценивали по относительному обжатию  $\delta_{кр}$  в сечении начала осевого разрушения.

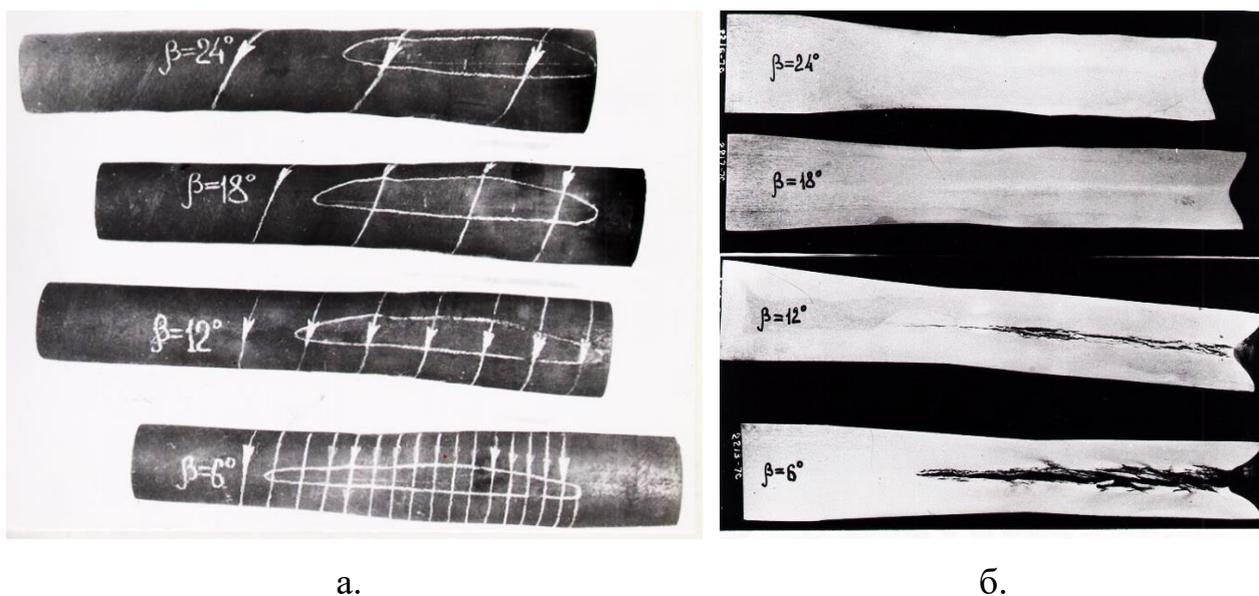


Рисунок 1.3 – Влияние угла подачи валков  $\beta$  при прокатке заготовок из стали 12X18Н10Т в двухвалковом стане МИСиС-100Д на: траекторию движения металла в очаге деформации (а) и продольные макрошлифы (б), показывающие склонность к осевому разрушению.

Экспериментально установлено, что осевое разрушение наиболее интенсивно идёт при наименьших значениях угла подачи: при  $\beta = 6^\circ$  величина критического обжатия  $\delta_{кр}$  составляет 8,9%. С увеличением  $\beta$  склонность металла к разрушению уменьшается, а при  $\beta > 18 - 21^\circ$  фиксируется обратный эффект – полное блокирование разрыхления металла и его уплотнение по всему сечению заготовки.

В трёхвалковом стане МИСиС-100Т выполняли горячую прокатку стальных заготовок диаметром 110 мм с просверленными осевыми отверстиями на диаметр 60 мм (коэффициент вытяжки  $\mu = 3,4$ ) [51, 52]. Углы подачи варьировали от 6 до  $24^\circ$ . Сверлёные отверстия моделировали дефекты кристаллизации непрерывнолитой заготовки в виде центральной пористости.

Степень закрытия осевого отверстия оценивалась коэффициентом  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{f_{\text{отв}}^1}{f_{\text{отв}}^0} \mu, \quad (1.1)$$

где  $f_{\text{отв}}^0$  – начальная площадь отверстия в исходной заготовке, а  $f_{\text{отв}}^1$  – площадь отверстия после прокатки;  $\mu$  – коэффициент вытяжки.

Значению  $\Psi = 1$  соответствует уменьшение площади дефекта пропорциональное коэффициенту вытяжки. Полное устранение дефекта будет только при  $\Psi = 0$ . На рисунке 1.4. показаны полученные результаты технологических опытов. Прокатке с малыми углами подачи  $\beta = 6 \dots 8^\circ$  соответствует  $\Psi > 1$ , т. е. площадь поперечного сечения отверстия снижается, но меньше, чем величина редуцирования площади поперечного сечения самой заготовки. В относительном измерении дефект развивается. Повышение угла подачи изменяет характер поведения отверстия на противоположный – коэффициент  $\Psi$  быстро уменьшается в области значений меньше 1. В зоне больших углов подачи  $\beta = 18 \dots 24^\circ$  при коэффициентах вытяжки  $\mu = 3 \dots 5$  происходит полное закрытие искусственного дефекта и  $\Psi = 0$ .

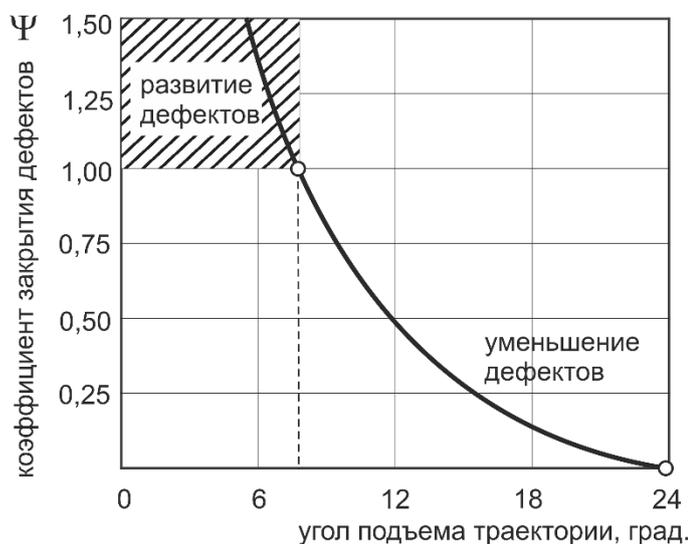


Рисунок 1.4 – Экспериментальная зависимость коэффициента закрытия осевого отверстия  $\Psi$  от угла подъёма траектории (угла подачи) при прокатке в трёхвалковом стане.

Воздействие больших углов подачи на повышение прошиваемости заготовок в двухвалковом стане и закрытие искусственных дефектов – в трёхвалковом, авторы [47, 51, 52] связывают с уменьшением числа циклов деформации, повышением частных обжатий и, как следствие, снижением неравномерности деформации. Результаты данных экспериментов дают основание утверждать, что разрыхляющее воздействие винтовой прокатки на металл, характерное для малых углов подачи 6-12° («традиционных» на тот момент), обращается в уплотняющее при увеличении углов подачи до 18° и более.

В зависимости от геометрии очага деформации и коэффициента вытяжки (обжатия) за проход различают два основных варианта РСП (рисунок 1.5):

а. Прокатка с высоким обжатием за проход (коэффициент вытяжки составляет 4-6) в калибре, имеющем обжимной «гребень» с углом конусности 12-50° [51-54].

б. Многопроходная прокатка с ограниченными обжатиями (коэффициент вытяжки за проход не более 3-4) в калибре с углом конусности 6-12° [55, 56].

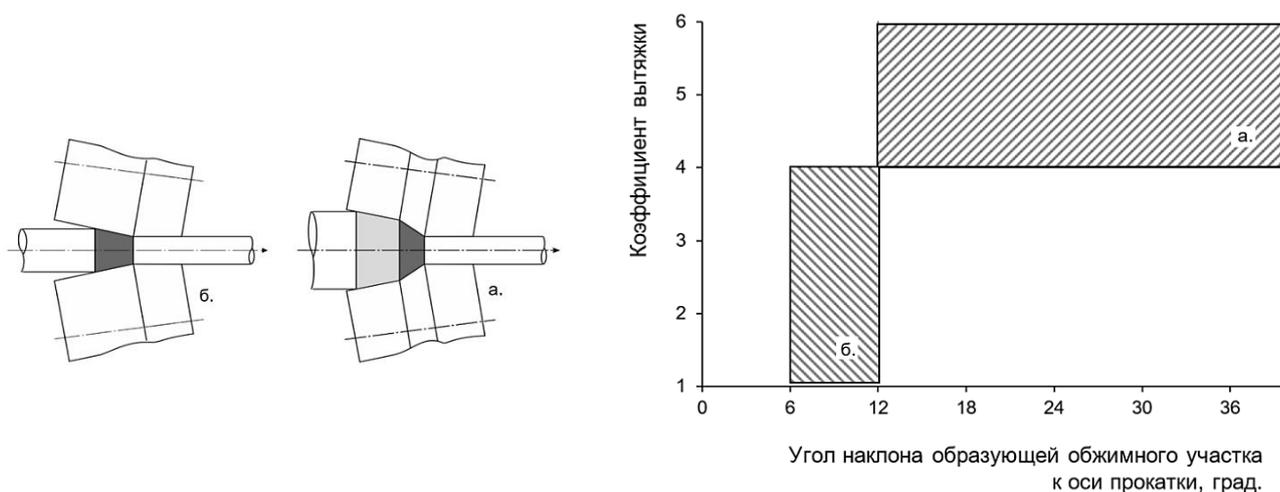


Рисунок 1.5 – Два основных варианта РСП в зависимости от геометрии очага деформации и коэффициента вытяжки за проход.

Основное назначение варианта а. – деформация непрерывнолитых заготовок с интенсивным уплотнением и проработкой структуры металла по

всему сечению. Клеть РСП этого варианта рационально использовать в качестве обжимной в составе сортопрокатных станов для быстрого редуцирования сечения заготовки. Вариант б. – универсальный способ предназначен для прокатки практически любых деформируемых материалов, включая непрерывнолитые, малопластичные и труднодеформируемые. Он применяется в реверсивной прокатке и прокатке на министанах.

Оба варианта РСП прошли опытно-промышленную отработку на трёхвалковом стане МИСиС-100Т. На вертикальной установке полунепрерывной разливки завода «Электросталь» была произведена партия непрерывнолитых заготовок диаметром 130 мм из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т для исследования радиально-сдвиговой и винтовой прокатки по варианту а. при различных углах подачи [52-54]. Заготовки прокатывали на стане МИСиС-130Т в валках с «гребнем» на пруток диаметром 55 мм с коэффициентом вытяжки 5,58 при углах подачи 10-20°.

Прокатка некоторых заготовок останавливалась для анализа очага деформации. Продольные макрошлифы «недокатов» при углах подачи 10, 15 и 20° представлены на рисунке 1.6. Литые дендриты периферийной зоны всех заготовок подвергаются интенсивному дроблению. Формируется мелкозернистая мелкозернистая структура на уровне 8-9 балла. В центральной части прутка деформированного при  $\beta = 10^\circ$  имеется остаточная литая структура и осевые несплошности (рисунок 1.6, а). Прокатка с коэффициентом вытяжки 5-6 при углах подачи 20° проработает структуры по всему сечению (рисунок 1.6, в). Улучшается качество поверхности проката: исходные дефекты глубиной до 2 мм выкатываются полностью, а более глубокие – уменьшают своё развитие. Характеристики макро- и микроструктуры, а также механические свойства металла удовлетворяют требованиям ГОСТ 5949. В работах [57, 58] получены близкие результаты по влиянию винтовой прокатки на структуру непрерывнолитого металла.

По варианту б. деформированные заготовки диаметром 105 и 120 мм из быстрорежущих сталей Р6М5, Р18, инструментальной стали Х12, жаропрочных сплавов на никелевой основе ХН77ТЮР, ХН56ВМТЮ, ХН51ВМТЮКФР и др. прокатывались за 5-7 проходов на круг диаметром 55 мм. [56]. Прокатка выполнялась на стане МИСиС-100Т с использованием одного комплекта валков. Обжатие за проход и количество проходов назначалось, исходя из пластических и прочностных свойств металла. Установлено что, РСП повышает пластические свойства жаропрочных сплавов в сравнении традиционной технологией. Сочетание РСП и последующей продольной прокатки обнаруживает синергетический эффект в повышении длительной жаропрочности никелевых сплавов. Стойкость металлорежущего инструмента, изготовленного из стали Р6М5 после РСП, повышается в 1,8-2,5 раза по сравнению с серийным инструментом [56].

Способность процесса РСП полностью прорабатывать литую структуру при относительно малых (по сравнению с продольной прокаткой, например) коэффициентах вытяжки экспериментально подтверждена на титановых [59] и никелевых жаропрочных сплавах [60].

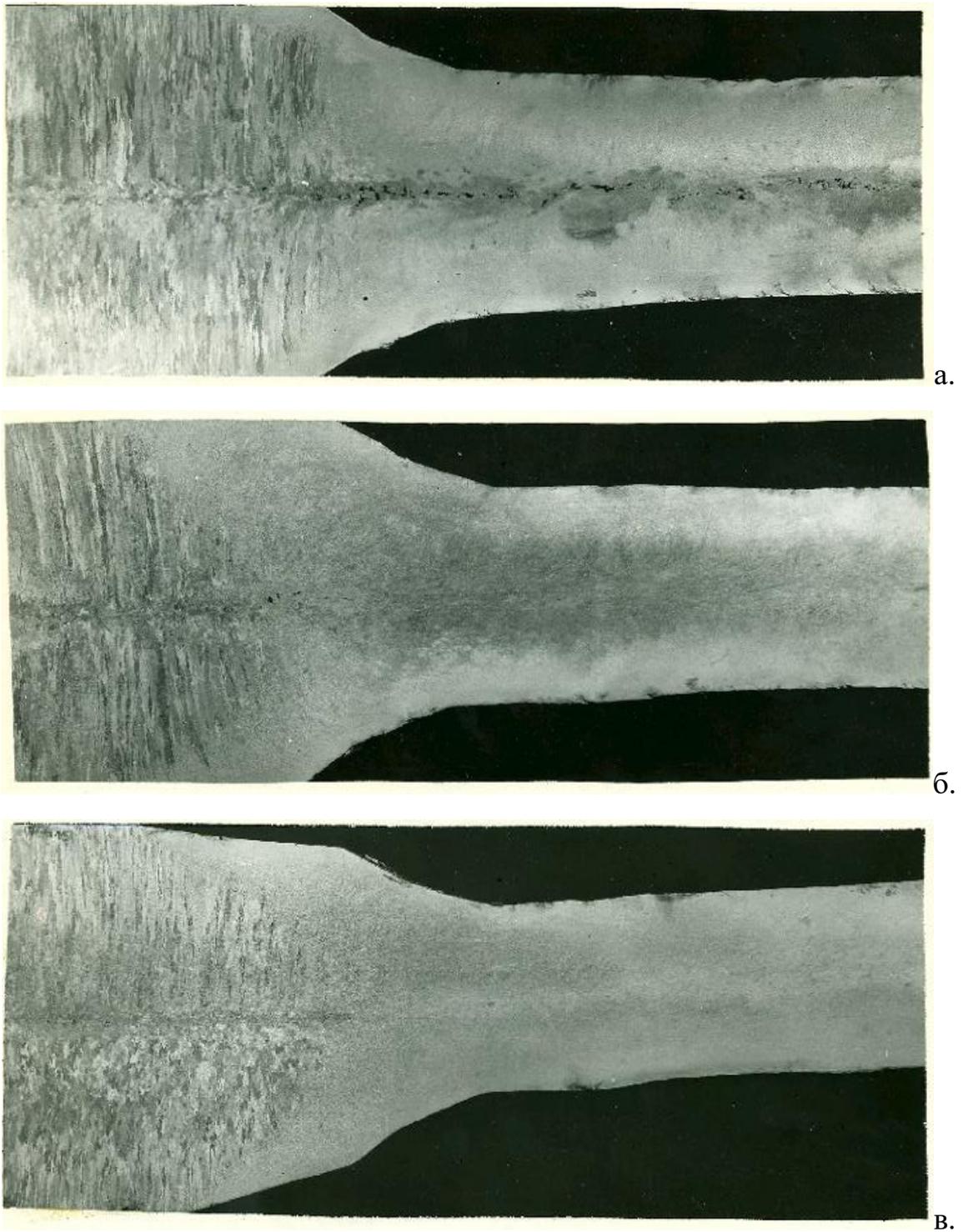


Рисунок 1.6 – Влияние прокатки при угле подачи валков:  $10^{\circ}$ (а);  $15^{\circ}$ (б);  $20^{\circ}$ (в) на макроструктуру «недокатов» непрерывнолитой заготовки из стали 12X18H10T [54].

Для многих легированных металлов и сплавов с низкими пластическими и высокими прочностными свойствами, для которых невозможны большие разовые деформации, весьма эффективным технологическим и конструктивным решением является радиально-сдвиговая прокатка по реверсивной схеме, представленной на рисунке 1.7 [47, 61-64].

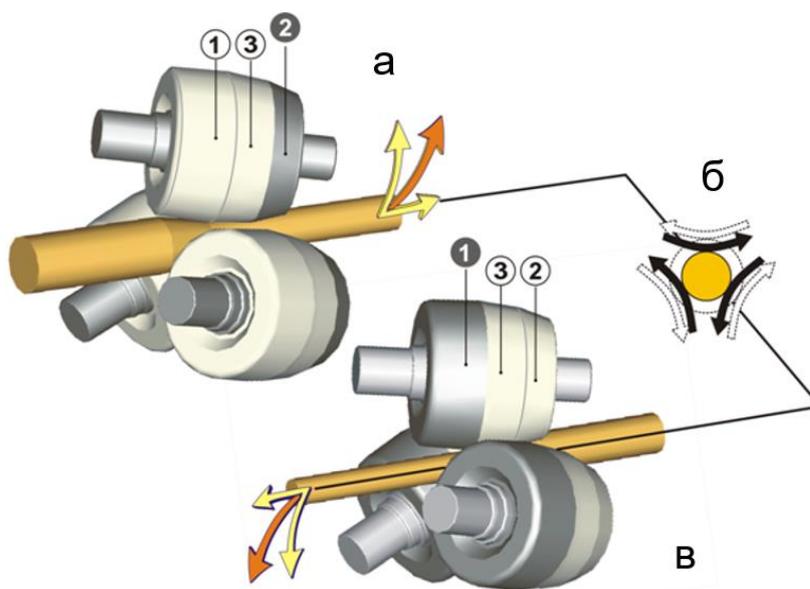


Рисунок 1.7 – Схема реверсивной РСП.

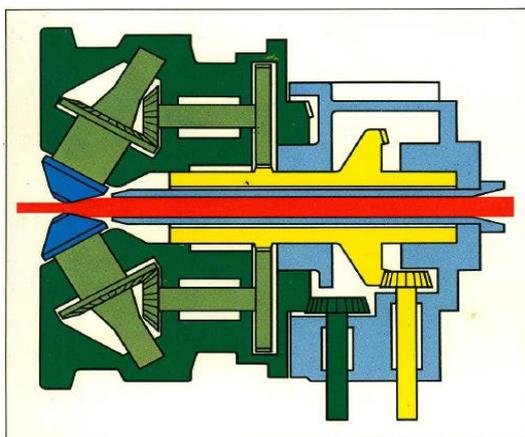
Валки реверсивного стана радиально-сдвиговой прокатки имеют участки: 1 – обжимной для прямых проходов; 2 – обжимной для реверсивных проходов; 3 – калибрующий для всех проходов. Основными этапами реверсивной прокатки являются:

- а) прямые проходы по чашевидной схеме (угол раскатки  $\delta < 0$ );
- б) сведение и реверс валков в паузе между проходами;
- в) обратные проходы по грибовидной схеме (угол раскатки  $\delta > 0$ ).

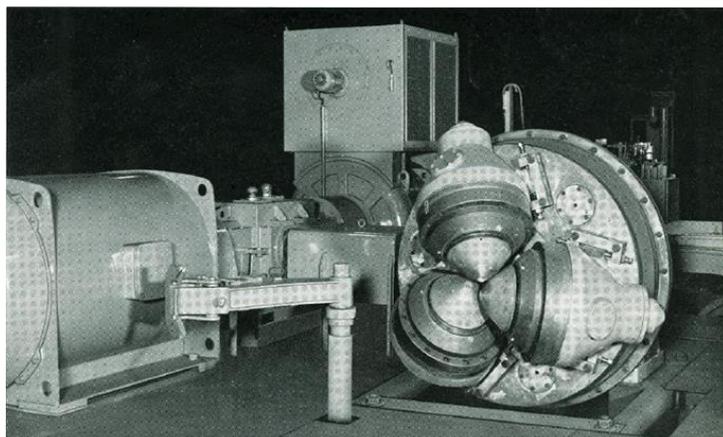
Реверсивная РСП не требует кантовок и поперечных передач раската между проходами. Валки имеют простую геометрическую форму без врезных калибров. Обжатие за проход регулируется бесступенчато.

Ряд промышленных реверсивных станов РСП спроектирован и изготовлен АО «ЭЗТМ» при участии и по технологическому заданию «МИСИС» [44]. Среди них: комплекс со станом СВП-500 Чепецкого механического завода (АО «ЧМЗ», г. Глазов) для производства заготовок циркониевых сплавов круглого сечения диаметром 110-120 мм из слитков диаметром до 500 мм; двух клетевой стан СРВП-130 ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Верхняя Салда) для прокатки широкой гаммы титановых сплавов; обжимная клеть реверсивной РСП в составе полунепрерывного среднесортно-мелкосортно-проволочного стана 350/250 АО «Металлургический завод «Электросталь» (г. Электросталь) для производства проката из легированных и высоколегированных сталей и сплавов [65, 66]. По своим техническим возможностям эти станы могут производить и трубную заготовку из НЛЗ легированных сталей в широком размерном сортаменте.

В 1970-е годы за рубежом, параллельно с развитием РСП в СССР, разрабатывался планетарный стан «PSW rolling» винтовой прокатки высокой «деформации», но другого принципа работы (рисунок 1.8) [67-69, 71, 72]. В этом стане клеть с консольными валками вращается относительно заготовки, совершающей только поступательное движение. Заготовки из легированных и высоколегированных сталей и сплавов прокатываются в один проход с коэффициентами вытяжки 4-5 и более. Отсутствие вращения деформируемого металла должно позволять применение такого стана непосредственно в составе непрерывной группы с клетями продольной сортовой прокатки. В настоящее время, концепция применения такого стана изменилась. Он используется как самостоятельная технологическая единица для раскатки полых литых заготовок из меди и её сплавов [70]. В планетарном стане отсутствует механизм изменения диаметра калибра, что ограничивает его технологическую мобильность.



а.



б.

Рисунок 1.8 – Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) планетарного стана «PSW rolling».

Начиная с 1990-х годов активно разрабатывается технология РСП с применением министанов, которые созданы на основании накопленного опыта промышленной эксплуатации и исследований [73-75]. Рациональные условия практически любых деформируемых металлов реализуются в узком диапазоне больших углов подачи  $18-20^\circ$ . При этом отсутствует значимая технологическая необходимость его перенастройки, например, при переходе на прокатку другой марки стали или сплава. Соответственно, имеется возможность создать компактную клеть РСП с оптимальными, конструктивно фиксированными угловыми настройками валков. С учётом этого положения разработана и успешно внедрена в промышленности и научно-исследовательских организациях целая серия министанов РСП. Один из таких станов показан на рисунке 1.9.



а.



б.

Рисунок 1.9 – Министан РСП 23-45 (а) и его рабочая клетка (б).

Министаны РСП активно применяются в научных исследованиях для интенсивного измельчения структуры стали и жаропрочных никелевых сплавов, а также сплавов на основе титана, алюминия, магния, циркония, кобальта и др. [76-82 и др.]. Составляют основу эффективных технологий деформационного рециклинга отработанных длинномерных изделий типа насосных штанг [83].

Уже первые опыты (рисунки 1.3, 1.4, 1.6) показали определяющее влияние геометрии винтовых траекторий течения металла на деформируемость заготовок и характер структуры получаемого проката. Значимость других факторов (калибровки валков, коэффициента вытяжки, количества проходов и др.) на процесс прокатки в целом определяется тем, в какой степени они влияют на траекторию. На этом положении основано траекторное управление процессом РСП [84, 85]. Геликоидальное истечение в очаге деформации стана РСП сопровождается разнонаправленным изменением скорости течения слоёв металла. В периферийных (внешних) слоях течение замедляется, а в центральных – ускоряется (рисунок 1.10) Во внешних слоях формируются расширяющиеся трубки тока. Между слоями заготовки создается кинематический макросдвиг.

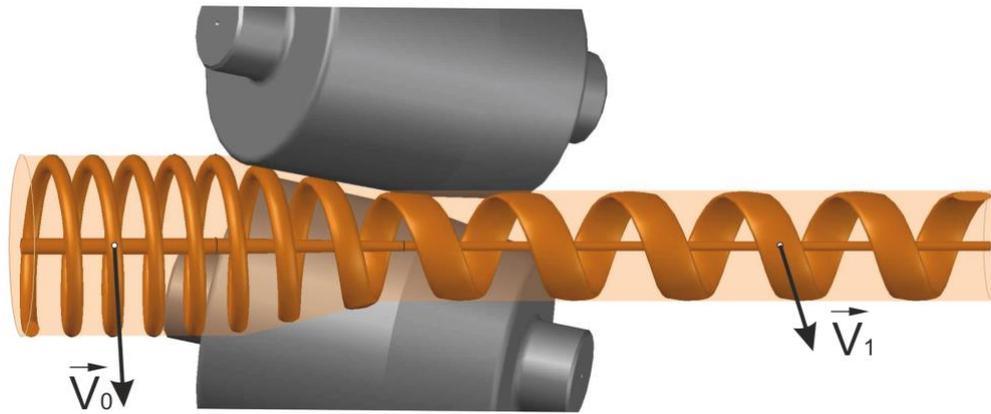


Рисунок 1.10 – Замедление внешних слоёв при радиально-сдвиговой прокатке и образование расширяющихся трубок тока.

Кроме того, имеет место характерный градиент послойного распределения траекторных коэффициентов деформации, связанный с геликоидальным истечением металла [75].

На рисунке 1.11 и в таблице 1.1 показано возможное деформированное состояние различных слоёв обрабатываемого материала, предписываемое аналитическими расчётами (на примере прокатки с углом подачи  $\beta = 20^\circ$  и коэффициентом вытяжки 2).

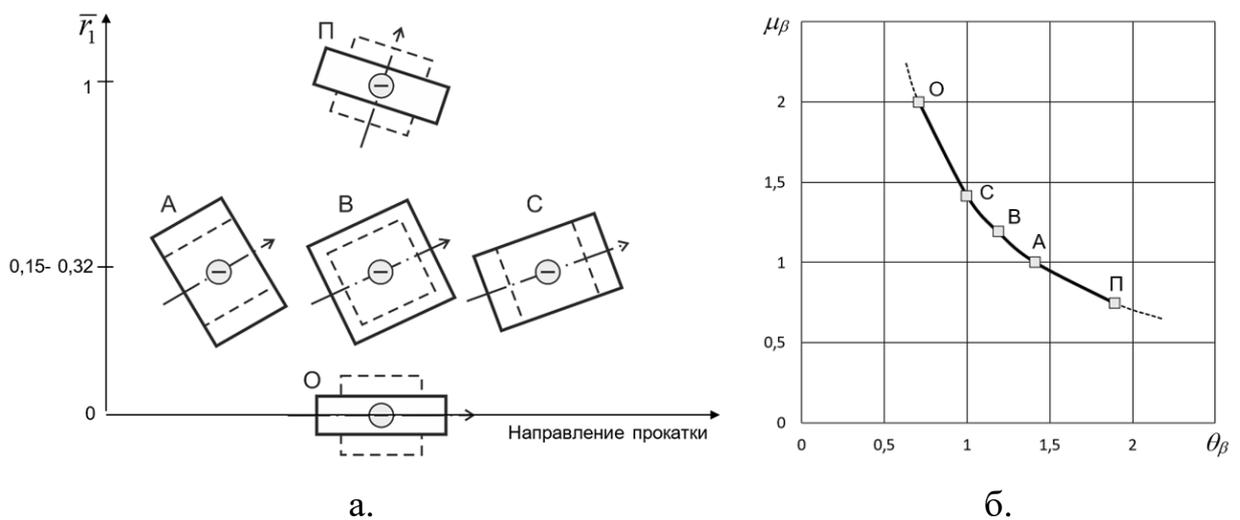
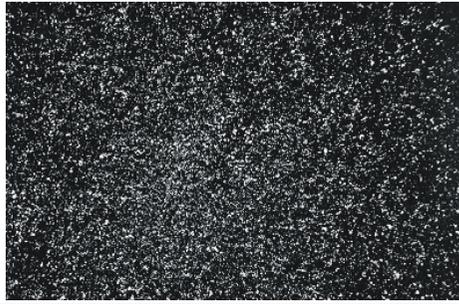


Рисунок 1.11 – Графическое изображение деформационного состояния различных слоёв проката (а.) и послойное изменение схемы деформации (б.) при РСП.  $\bar{r}_1$  – относительный радиус траектории. 0 – центр, 1 – поверхность.

Параметры  $\mu_\beta, \theta_\beta, \lambda_\beta$  представляют собой траекторные коэффициенты деформации: вытяжки, поперечной деформации и радиальной деформации, определенные относительно геликоидальной траектории. Деформации внешних слоёв заготовки (между поверхностью и точкой А на рисунке 1.11, б) происходит по схеме с укорочением траекторных элементов в направлении движения и удлинением поперёк траекторий.

Такой схемы истечения металла нет в других стационарных процессах получения прутков и в способах испытания металлов на механические свойства. Трансформация структурного строения тесно коррелирована со схемами деформации (по таблице 1.1).

Таблица 1.1 – Деформированное состояние различных слоёв проката при РСП [75].

Слои и точки	Относительный радиус	$\mu_{\beta}$	$\theta_{\beta}$	$\lambda_{\beta}$	Процесс-аналог	Структура
Внешние слои П	1	0,75	1,89	0,71	Нет аналога в стационарных процессах прокатки, прессования, волочения и др.	
А	0,32	1,00	1,41	0,71	Прокатка узкой полосы («плющенко») с уширением без вытяжки.	
В	0,22	1,19	1,19	0,71	Прокатка полосы средней ширины с равенством продольной и поперечной деформации.	
С	0,15	1,41	1,00	0,71	Прокатка широкого листа без уширения	
Центральные слои О	0	2,00	0,71	0,71	Прессование, волочение, прокатка в калибрах круглого профиля.	

Неравномерность деформации в поперечном сечении трёхвалкового стана схематично может быть представлена выделением двух зон I и II с качественно различным характером течения [56] (Рисунок 1.12, а) и конфигурацией траекторий течения различного начального радиуса в проекции на плоскость, нормальную оси прокатки [77] (Рисунок 1.12, б).

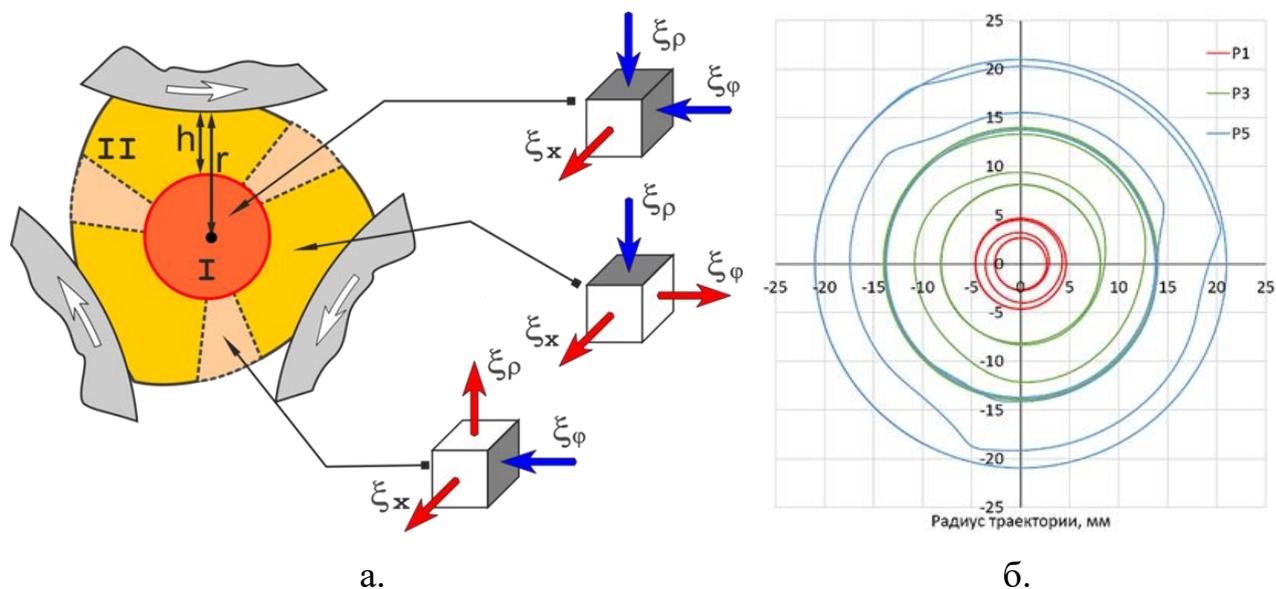


Рисунок 1.12 – Схема неравномерности деформации в процессе РСП (а) и проекции траекторий точек P5 (поверхность), P3 (середина радиуса) и P1 (осевая зона) на плоскость нормальную оси прокатки (б).

В центральной зоне I металл находится в состоянии монотонного сжатия с отрицательными компонентами скоростей деформации по радиусу  $\xi_r$  и окружности  $\xi_\phi$ . Траектории частиц (траектория P1 на рисунке 1.12, б) имеют вид «гладкой» спирали, уменьшающегося радиуса. Интенсивность скорости деформации и накопленная деформация (пластическая деформация по версии программы QForm) близки к натуральному логарифму текущего коэффициента вытяжки. Во внешней зоне II течение металла происходит по траекториям знакопеременной кривизны (траектория P5 на рисунке 1.12, б): вогнутым вблизи контакта с валками, выпуклым – в межвалковом зазоре. Компоненты скорости

деформации  $\xi_r$  и  $\xi_\varphi$  циклически изменяют свой знак. Накопленная степень деформации может в 8-10 раз превышать уровень значений в центральной зоне.

Деформационные и кинематические аспекты РСП (представленные на рисунках 1.10-1.12 и в таблице 1.1) действуя в совокупности и взаимном усилении, определяют преимущества процесса в части интенсивной деформационной проработки структуры. Во внешней зоне накопленная деформация существенно превышает значения, обусловленные изменением длины (вытяжкой) заготовки.

Такая схема истечения металла способствует интенсивной проработке структуры НЛЗ и повышению свойств металла при ограниченных коэффициентах вытяжки. Деформация при РСП реализуется по схеме «круг-круг» со свободным выбором диаметров проката и заготовки. Это обеспечивает оперативное получение неограниченно широкой номенклатуры заготовок оптимальных диаметров под прошивку из непрерывнолитой заготовки одного-двух диаметров [86].

До настоящей работы было известно два варианта практической реализации схемы производства бесшовных труб с применением предварительного обжатия НЛЗ (рисунок 1.1):

- установка нового стана РСП с индивидуальными приводами и повышенными углами подачи валков в составе действующих ТПА, либо отдельно стоящим с нагревательной печью, охлаждающим столом и передаточными механизмами [40, 87, 88];
- модернизация трёхвалковых раскатных станов существующих трубопрокатных агрегатов [89-96].

Первый вариант связан с капитальным строительством, требует значительных затрат и времени. Обжимные станы РСП конструкции АО «ЭЗТМ» с индивидуальными приводами установлены в составе трубопрокатных агрегатов – ТПА-80 (АО «СинТЗ») и ТПА-200 (Artrom Steel Tubes S.A.) [40, 87, 88]. Обжимной стан в ТПА-80 имеет индивидуальный привод

мощностью  $3 \times 1000$  кВт и прокатывает НЛЗ диаметром 130-160 мм на круг диаметром 120 мм. Мощность другого обжимного стана составляет  $3 \times 1800$  кВт и рассчитана на прокатку НЛЗ диаметром 177-250 мм на круг диаметром 120-220 мм. Угол подачи валков на обоих станах регулируется в пределах  $10-20^\circ$ . Угол раскатки –  $12^\circ$ .

Близкие технические решения с редуцированием сечения исходной заготовки большего диаметра в трёхвалковой стане перед прошивкой предусмотрены в качестве одного из вариантов работы в новой концепции трубопрокатного агрегата с непрерывным станом [97, 98]. Известны и другие агрегаты [99-101], в составе которых использован трёхвалковый обжимной стан для расширения технологических возможностей.

Второй вариант реализован в условиях ТПА-160 и двух ТПА 50-200 [89-96]. В этом случае преимущества предварительного обжатия достигаются лишь частично, в связи с ограниченностью углов подачи (не более  $15^\circ$ ) и обжатий (не более 25%). При прокатке на средних углах подачи остается вероятность развития структурных дефектов литой заготовки легированных хромсодержащих (в т. ч. котельных) марок сталей, которые в дальнейшем при прокатке труб приводят к дефектам (плёнам) на внутренней поверхности. Причём риск развития дефектов повышается с увеличением коэффициента вытяжки при обжатии заготовки. Кроме того, имеются серьезные ограничения величины обжатия по энергосиловым параметрам (токовым нагрузкам). В частности, обжать НЛЗ из стали 15Х13Н2 диаметром 156 мм на круг диаметром 120 мм можно при углах подачи не более  $11^\circ$  [94].

Расположение рабочих валков в трёхвалковых раскатных станах, (известных ещё как станы Ассела) и станах РСП в целом близки. Основное качественное отличие в углах подачи валков, из которого следует различие в главном приводе валков. В станах Ассела он групповой, в станах РСП – индивидуальный. Конструктивные особенности группового привода не позволяют напрямую увеличить углы подачи в действующих раскатных станах.

Однако, современные компьютерные средства трёхмерного конструирования и моделирования в сочетании с отработанными и эффективными техническими решениями в области создания компактных министанов РСП позволяют разработать клеть специальной конструкции с углами подачи валков не менее  $18^\circ$ , совместимую с групповым приводом. И, тем самым, внедрить технологию РСП для предварительного обжатия НЛЗ в условиях действующих ТПА с трёхвалковыми раскатными станами.

Такой вариант включения РСП в технологическую схему производства бесшовных труб представляется на сегодня наиболее экономичным, быстро реализуемым и с коротким сроком окупаемости. Технологические возможности клетки специальной конструкции могут превосходить другие решения по ряду ключевых параметров, например, по коэффициенту вытяжки и возможности прокатывать легированные стали.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НЛЗ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК СТАЛИ ПРОИЗВОДСТВА АО «ПНТЗ».**

### **2.1 Материалы экспериментальных исследований.**

В качестве исходной заготовки для проведения предварительной деформации использовалась непрерывнолитая заготовка (НЛЗ) диаметром 150 и 156 мм из марок стали 12Х1МФ, 18ХМФБ и 18ХЗМФБ в количестве 10 т. Предварительно на АО «ПНТЗ» была осуществлена порезка заготовок на кратные части общей длиной до 3,5 м (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Внешний вид исходных непрерывно-литых заготовок.

### **2.2 Прокатка опытной партии НЛЗ на опытно-промышленном трёхвалковом стане МИСиС-130Т.**

Исходные заготовки разрезались на мерные длины 650...1100 мм на ленточнопильных станках. Перед деформацией мерные заготовки нагревались до температуры прокатки 1180°С в камерной печи электросопротивления одновременно по 4 шт. Время нагрева одной садки заготовок составляло 4-5 ч. Температура нагрева контролировалась по показаниям электронного дисплея контроллеров, фиксирующим данные термопар, смонтированных на задней стенке печи.

Нагретые заготовки подвергались обжатию на опытно-промышленном стане радиально-сдвиговой прокатки МИСиС-130Т [46, 86, 102] (рисунке 2.2). Стан предназначен для деформирования прутков круглого сечения и бесшовных труб из различных сталей, сплавов чёрных и цветных металлов, включая высоколегированные и труднодеформируемые сплавы.



Рисунок 2.2 – Непрерывнолитая заготовка производства АО «ПНТЗ» после прокатки на выходной стороне стана МИСиС-130Т.

Краткая техническая характеристика стана МИСиС-130Т представлена в таблице 2.1.



Валок состоит из входного участка длиной 130 мм с углом конусности образующей к оси валка  $1,5^\circ$ , калибрующего участка длиной 90 мм и выходного участка 50 мм с углами конусности по валку  $11^\circ$  и  $13^\circ$  соответственно. Валки в стане расположены симметрично вокруг оси прокатки через  $120^\circ$  и развернуты на угол подачи  $\beta$ , варьируемый в пределах  $12...24^\circ$  (по факту с учётом ограничений металлоконструкций входной стороны –  $13,5...21^\circ$ ) и угол раскатки  $\delta = -10^\circ$ .

Режимы опытной прокатки НЛЗ представлены в таблице 2.2 [86, 102].

Таблица 2.2 – Режимы прокатки НЛЗ на стане РСП МИСиС-130Т.

№ п/п	Марка стали	Температура нагрева, °С	Угол подачи, °	Частота вращения валков, об/мин	Диаметр исходной заготовки, мм	Диаметр проката, мм	Коэф. вытяжки
1	12Х1МФ	1180	21	37	150	105	2,04
2	18ХМФБ	1180	21	37	156	105	2,21
3	18Х3МФБ	1180	21	37	150	90	2,78
4	18ХМФБ	1180	21	37	156	90	3,00

Прокатка всех заготовок опытной партии проходила устойчиво при естественном захвате, плавном освобождении очага деформации и стабильном движении раската в стационарной стадии. Видимых поверхностных дефектов не обнаружено.

На маршрутах №1 и 4 первые 1-2 заготовки были прокатаны в 2 прохода, с отбором образцов для дополнительного исследования структуры металла на промежуточном размере  $\varnothing 120-130$  мм. Кроме того, при прокатке партии заготовок: по маршруту №4 для оценки влияния угла подачи на структуру металла, были прокатаны по одной заготовке при углах подачи  $15^\circ$  и  $18^\circ$ , а по маршруту №3 для оценки влияния угла подачи при РСП на величину критического обжатия при прошивке («прошиваемость») получаемой заготовки, дополнительно была прокатана одна заготовка при углах подачи  $15^\circ$ .

После прокатки прутки охлаждались на воздухе.

Для проведения испытаний на определение механических свойств и микроструктуры от заготовки каждой марки стали отрезались образцы длиной 100 мм. Контроль микроструктуры осуществлялся в поперечном сечении прутка в трех зонах: в центре заготовки, на расстоянии середины радиуса и на периферии. Для исследований использовался световой инвертированный микроскоп отраженного света Axiovert 25 («Carl Zeiss», Германия) [86, 102].

Для оценки величины критического обжатия при прошивке из заготовок стали 18ХЗМФБ диаметром 90 мм, полученных радиально-сдвиговой прокаткой при углах подачи 15 и 21°, были изготовлены образцы длиной 300 мм. Подготовленные образцы повторно нагревали и задавали в двухвалковый прошивной стан МИСиС-130Д без оправки. С целью получения недокатов в момент выхода переднего конца заготовки за сечение пережима валков, привод отключали. Установленное расстояние в пережиме между валками равное 76 мм и линейками – 90 мм соответствовало относительному обжатию заготовки на 15,6%, коэффициенту овализации – 1,18 и обеспечивало гарантированное вскрытие полости в осевой части заготовки. Прокатку проводили при трёх значениях углов подачи – 8, 10 и 12° [103]. После охлаждения полученные «недокаты» разрезали в продольном направлении по оси заготовки и определяли критическое обжатие и число циклов деформации по каждому из 6 вариантов. Исходя из измерений, отмечено существенное повышение критического обжатия в среднем по вариантам в 2,2 раза для заготовки после РСП при углах подачи 21° [103]. Так, например, при прокатке в двухвалковом стане при углах подачи 8° критическое обжатие увеличивается с 2,9 до 6,0% при двухкратном росте числа циклов до разрушения (рисунок 2.4). Полученный результат свидетельствует о положительном влиянии повышения углов подачи при РСП НЛЗ на технологическую пластичность металла при винтовой прошивке.

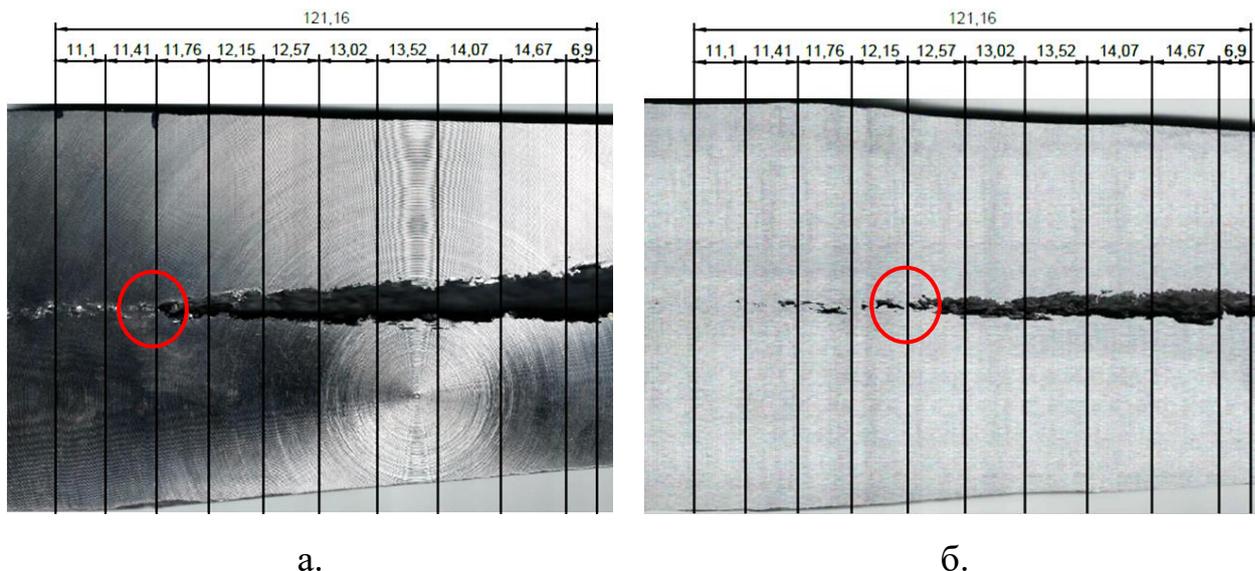


Рисунок 2.4 – Темплеты заготовок из стали 18Х3МФБ, полученные при сочетании углов подачи трёхвалкового и двухвалкового станков:  $15^\circ - 8^\circ$  (а) и  $21^\circ - 8^\circ$  (б). Для наглядности отмечен шаг подачи на каждом цикле деформации.

### 2.3 Прокатка опытной партии труб на ТПА-160 и ТПА 140-1 из предварительно деформированных заготовок.

После прокатки на стане МИСиС-130Т деформированные заготовки были доставлены на площадку АО «ПНТЗ» (рисунок 2.5) для отрезки концов с утяжками и прокатки труб.



Рисунок 2.5 – Общий вид деформированных на стане РСР МИСиС-130Т заготовок.

Прокатка труб из деформированных заготовок осуществлялась на трубопрокатных агрегатах ТПА-160 с трёхвалковым раскатным станом Ассела и

ТПА 140-1 с автоматическим станом в соответствии с маршрутами, представленными в таблице 2.3, по действующей технологии [46, 86, 102].

Таблица 2.3 – Маршруты прокатки труб из предварительно деформированной заготовки.

№ п/п	ТПА	Марка стали	Температура нагрева, °С	Диаметр исходной заготовки, мм	Размер трубы, мм	Суммарный коэф. вытяжки
1	160	12Х1МФ	1190-1200	105	63,5×7,6	6,49
2	160	18ХМФБ	1165-1175	105	73×11	4,04
3	140-1	12Х1МФ	1200-1210	105	63,5×7,6	6,49
4	140-1	18ХМФБ	1210-1230	90	83×5,0	5,19
5	140-1	18ХЗМФБ	1210-1230	90	83×5,0	5,19

В состав оборудования ТПА-160 входят кольцевая газовая печь для нагрева заготовок, двухвалковый прошивной стан винтовой прокатки, трёхвалковый раскатной стан Ассела, трёхвалковый калибровочный стан винтовой прокатки и 9-ти клетевой редуционно-калибровочный стан продольной прокатки с двухвалковыми клетями. Состав оборудования ТПА 140-1 включает в себя следующие основные единицы: методическая нагревательная печь с наклонным подом, двухвалковый прошивной стан винтовой прокатки, автоматический раскатной стан, обкатные машины, газовая подогревательная печь и 18-ти клетевой редуционно-калибровочный стан продольной прокатки с двухвалковыми клетями.

При получении труб наблюдался стабильный процесс прошивки и раскатки.

После прокатки и охлаждения от полученных труб отбирались образцы для исследования механических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение). Исследование микроструктуры образцов проводилось на световом инвертированном микроскопе отраженного света Axiovert 25 («Carl Zeiss», Германия). Испытания на разрыв производились на универсальной испытательной машине INSTRON серии SATEC 300LX («INSTRON», США) [86, 102].

## 2.4 Исследование структуры исходных НЛЗ и деформированных заготовок после РСП.

Для проведения испытаний на определение макро- и микроструктуры от заготовки каждой марки стали до и после деформации были отобраны образцы длиной 100 мм.

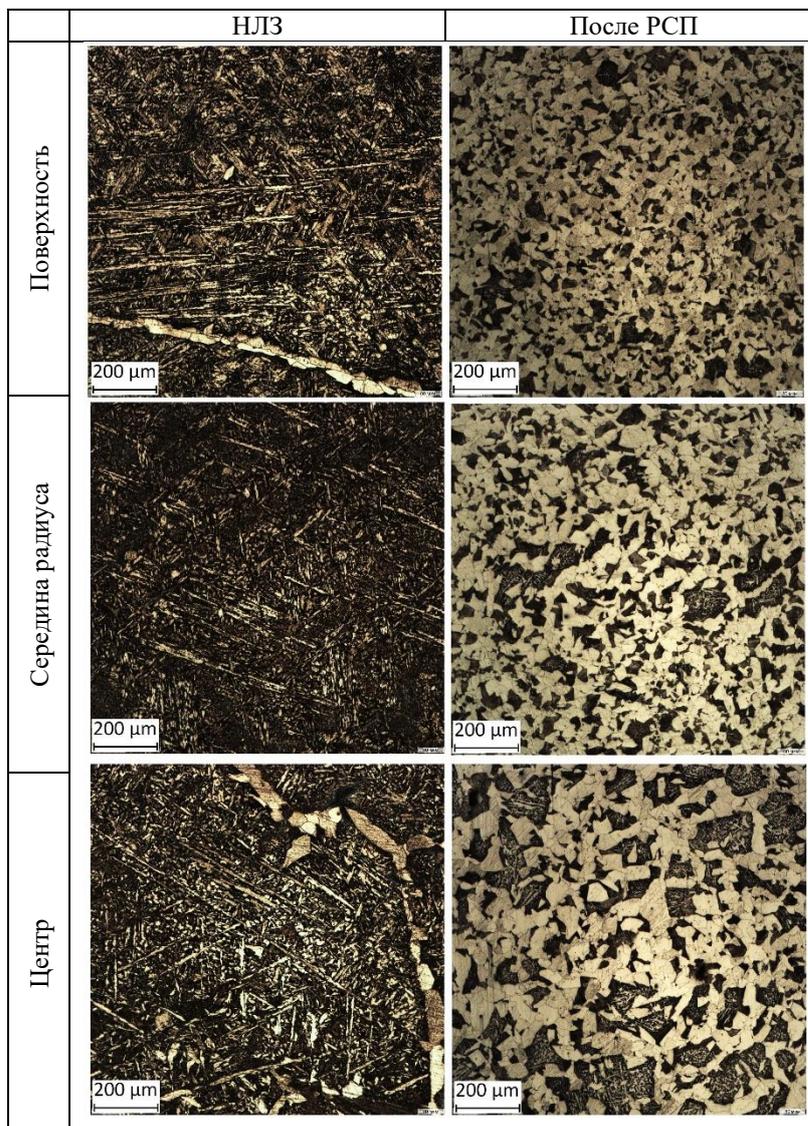


Рисунок 2.6 – Микроструктура НЛЗ из стали 18ХМФБ до деформации (левый столбец) и после РСП (правый столбец) на поверхности, в середине радиуса и в центре прутка. Маршрут прокатки  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 90$  мм, угол подачи  $\beta = 21^\circ$ , номер плавки 8F4346.

Контроль микроструктуры осуществлялся в поперечном сечении прутка в трёх зонах: в центре заготовки, на расстоянии середины радиуса и на

поверхности. Микроструктура образцов до и после прокатки представлена на рисунках 2.6 и 2.7.

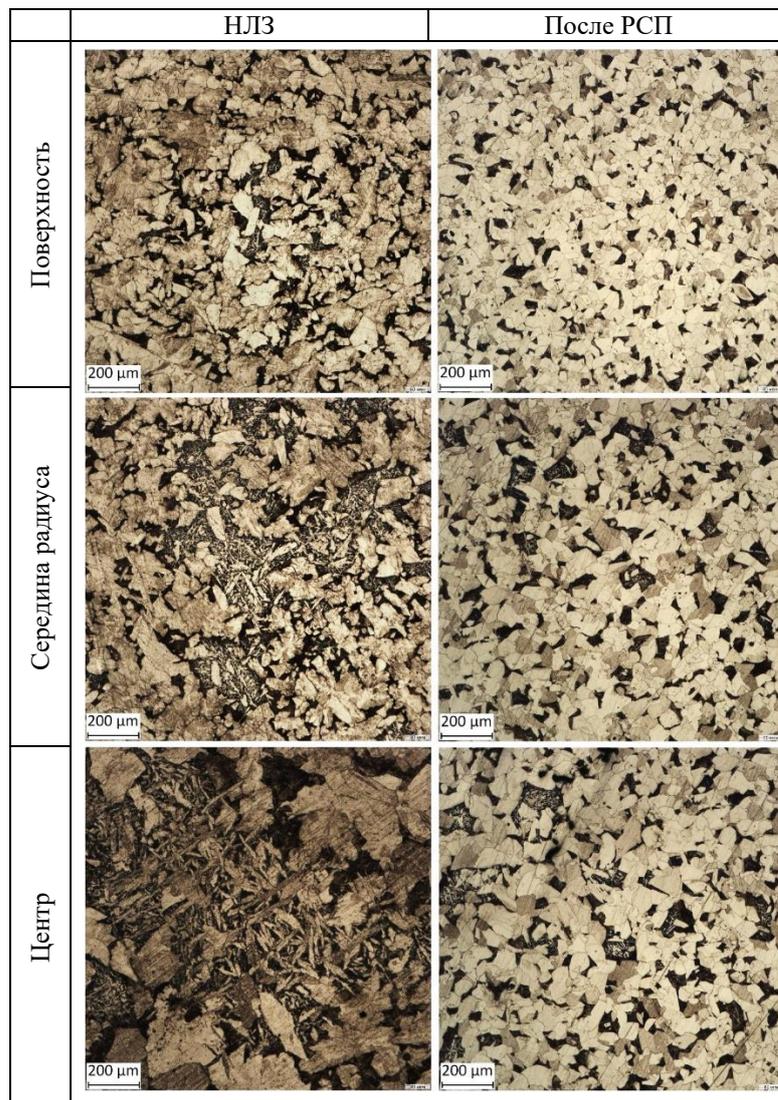


Рисунок 2.7 – Микроструктура НЛЗ из стали 12Х1МФ до деформации (левый столбец) и после РСП (правый столбец) на поверхности, в середине радиуса и в центре прутка. Маршрут прокатки  $\varnothing 150 \rightarrow \varnothing 105$  мм, угол подачи  $\beta = 21^\circ$ , номер плавки 7F4924.

Исходные НЛЗ исследованных сталей имеют неоднородную структуру по сечению. Во всех случаях проявлялся дендритный характер распределения (количества, морфологии, формы и размеров) фазовых и структурных составляющих, включающих феррит, перлит и карбиды. Структура поверхностных слоёв мельче и неоднороднее. На середине радиуса заготовки и,

особенно, в центральной части наблюдается существенно более неоднородная структура. В стали 12Х1МФ выявляются весьма крупные междендритные расстояния: во внутренних слоях расстояния между осями дендритов составляют от 15 до 100 мкм, центральная пористость достигает 2 балла. В стали 18ХМФБ, кроме укрупнения «матричной» структуры, увеличиваются количество и размер карбидов, выделяющихся по границам зёрен и осям дендритов. Например, в стали 18ХМФБ во внутренних слоях наблюдаются карбиды размером ~40 мкм. Центральная пористость находится в пределах 3 балла [86].

В результате нагрева до 1180 °С в течение 4-5 ч и радиально-сдвиговой прокатки НЛЗ сталей с коэффициентом вытяжки 2,0-3,0 происходят процессы перекристаллизации, растворения большей части карбидов, гомогенизации, наклёпа и рекристаллизации. Получаемая после охлаждения деформированных заготовок структура, состоящая из феррита, перлита и карбидов фиксирует следующие состояния и соответственно произошедшие в результате изменения.

Заготовки Ø105 мм из стали марки 12Х1МФ проработаны по всему сечению, структурные элементы (структура) более дисперсные в поверхностных слоях (средний размер ферритных участков составляет 26 мкм) по сравнению с центральными слоями (32 мкм) (рисунок 2.7). Центральная пористость снижается до 1 балла.

Структура достаточно однородна и изотропна, на периферийных и иногда во внутренних слоях заготовки встречаются следы ориентированных по спирали участков перлита, что возможно связано с неполной гомогенизацией или неполным прохождением рекристаллизации, меньшей степенью деформации. Различия между поверхностными слоями и центральной частью деформированных заготовок меньше, чем у НЛЗ, а также после РСП уменьшаются различия в структуре разных плавок [86] (приложение 1).

Сталь 18ХМФБ, кроме отличий в химическом составе, имеет существенные отличия в структуре исходных НЛЗ. Тем не менее в результате РСП проявились качественно те же изменения в структуре деформированных

заготовок по сравнению со структурой исходной НЛЗ. После радиально-сдвиговой прокатки происходит сквозная проработка металла по поперечному сечению и получение сравнительно однородной (феррит + перлит + карбиды) структуры по всему сечению заготовки. При этом более дисперсная и однородная структура наблюдается в поверхностных слоях. Например, средний размер ферритных участков стали 18ХМФБ составляет 21 мкм в поверхностных слоях и ~37 мкм в центральной части заготовок. Конечно, соотношение количества фаз в разных сталях разное. Центральная пористость снижается до 1 балла [86]. Также можно отметить, что по сравнению со сталью 12Х1МФ, феррит в этой стали обрамляет перлитные области, образуя ферритную сетку. Кроме того, сохраняются крупные карбиды. Это может проявиться в структуре и свойствах конечной готовой продукции, в частности труб, получаемых из таких заготовок.

Полноту проработки структуры металла можно оценить, исходя из анализа относительной доли (процента) остаточной литой структуры, путём измерения и суммирования площади участков её скопления в пределах одного изображения (выделено зелёным цветом на рисунке 2.8, а), с последующим отношением к площади данного изображения. На рисунке 2.8, б представлена диаграмма процента литой структуры для двух сталей после РСП.

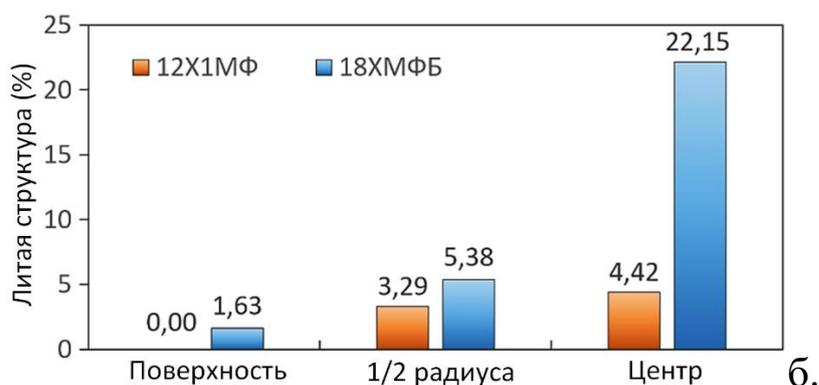
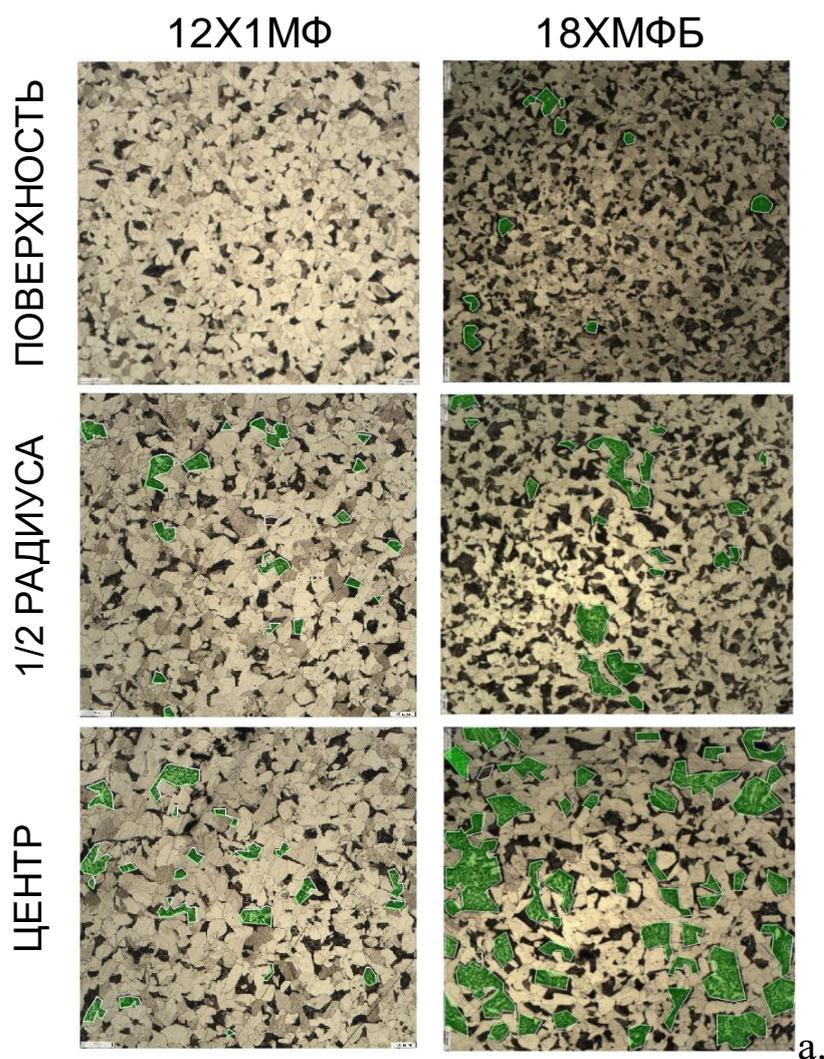


Рисунок 2.8 – Участки скопления (а) и процент остаточной литой структуры после деформации способом РСП для сталей 12Х1МФ и 18ХМФБ (б).

Распределение доли литой структуры имеет градиентный характер, соответствующий неравномерности деформации при РСП [104] и зависит от марки стали. Несмотря на то, что сталь 18ХМФБ деформирована с большим суммарным коэффициентом вытяжки процент литой структуры в ней выше, чем

в стали 12Х1МФ. Наибольшие отличия наблюдаются в центральной части заготовки (22,15 % против 4,42 %). На расстоянии  $\frac{1}{2}$  радиуса заготовки разница резко снижается и составляет уже 2,1%. В поверхностном слое заготовки для обеих сталей литая структура практически отсутствует. Таким образом, предварительное обжатие заготовок с коэффициентом вытяжки 2,0-3,0 обеспечивает качественную проработку литой структуры на 70-90 % [46, 82, 86].

По результатам сравнения структуры по сечению образцов заготовок из стали 18ХМФБ, прокатанных при углах подачи 15, 18 и 21°, отмечено положительное влияние повышения углов подачи на полноту проработки структуры металла (рисунок 2.9). Также, следует выделить некоторое преимущество для исследованных маршрутов схемы прокатки в 2 прохода, по сравнению с однопроходной схемой. Полученные выводы находят своё подтверждение в результатах проведённых ранее исследований [52, 54, 56-58, 105].

Результаты исследования микроструктуры образцов всех заготовок опытной партии представлены в приложении 1. Соответствие образцов маршрутам прокатки, маркам стали и номерам плавков приведено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Номера образцов и маршруты прокатки.

Марка стали	Маршрут прокатки	Угол подачи, °	Номер плавки	Номер образца НЛЗ	Номер образца после РСП
12Х1МФ	Ø150→Ø105	21	7F0105	1-Х	1-У
			7F4924	2-Х	2-У
				-	4-У
	Ø150→Ø130→Ø105		-	6-1-У – Ø130 6-2-У – Ø105	
	Ø150→Ø105			8-Х	8-У
18Х3МФБ	Ø150→Ø90		7F1786	10-Х	10-У
18ХМФБ	Ø156→Ø120→Ø90		8F4346	11-Х	11-0-У
	Ø156→Ø90	15			11-1-У
		18			11-2-У
		21	11-3-У		
	Ø156→Ø105		9F0385	13-Х	13-У
Последняя цифра в номере образца обозначает зону сечения заготовки: центр (НЛЗ – 4; РСП – 3), середина радиуса (НЛЗ – 2, 3, 5 и 6; РСП – 2 и 4), поверхность (НЛЗ – 1 и 7; РСП – 1 и 5).					

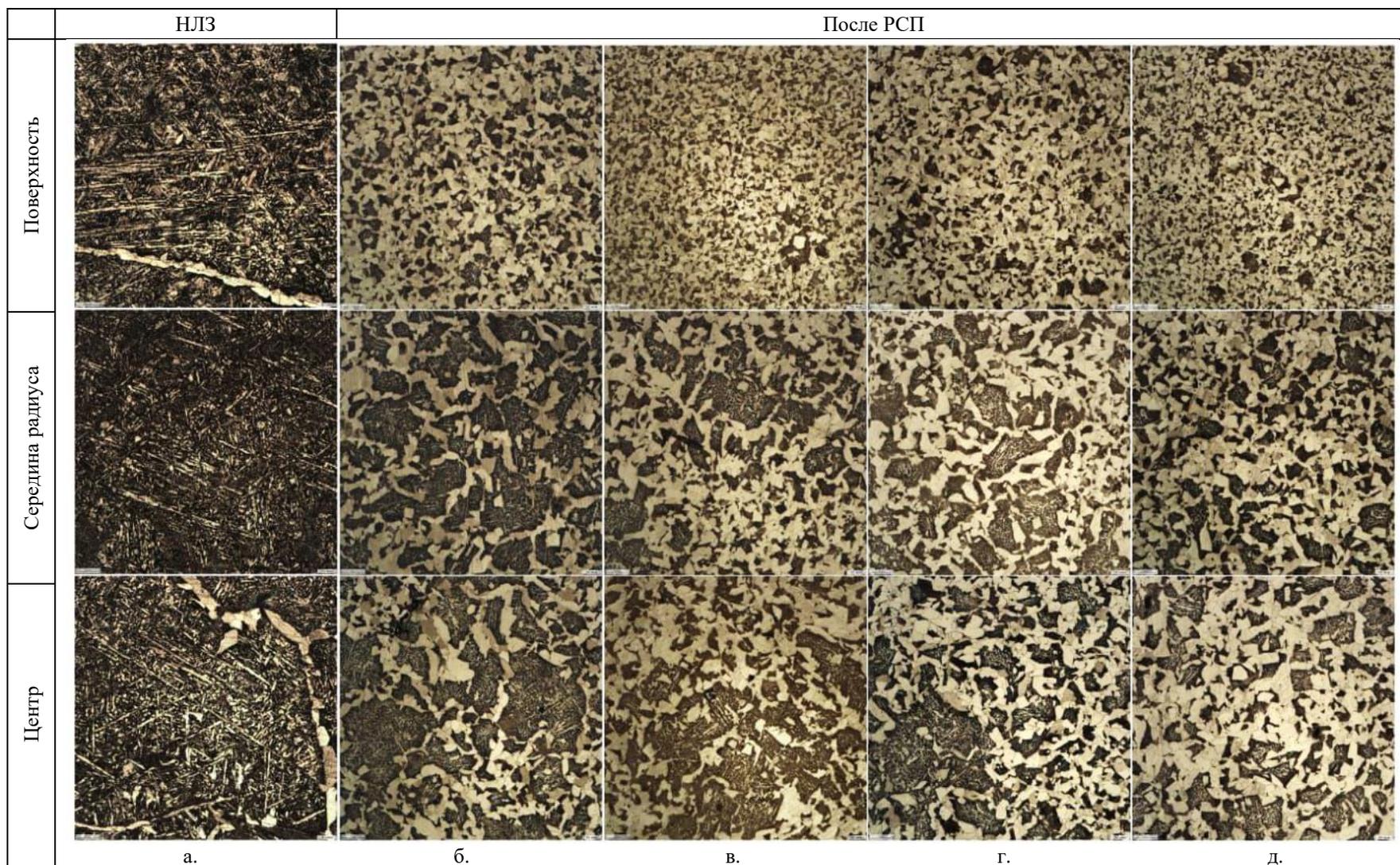


Рисунок 2.9 – Микроструктура НЛЗ из стали 18ХМФБ (плавка 8F4346) на поверхности, в середине радиуса и в центре

прутка до деформации (а) и после РСП, при различных углах подачи  $\beta$  и маршрутах прокатки:  $\beta = 15^\circ$  (б);

$\beta = 18^\circ$  (в);  $\beta = 21^\circ$  (г, д);  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 90$  мм (б, в, г);  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 120 \rightarrow \varnothing 90$  мм (д).

## 2.5 Исследование механических свойств полученных труб.

Оценка влияния радиально-сдвиговой прокатки (РСП) НЛЗ на механические свойства готовых труб была проведена на примере стали марки 18ХМФБ. На рисунке 2.10 представлены диаграммы механических свойств труб, прокатанных на различных ТПА, и свойства, регламентируемые стандартом ГОСТ Р 53366/ISO 11960 для группы прочности J55.

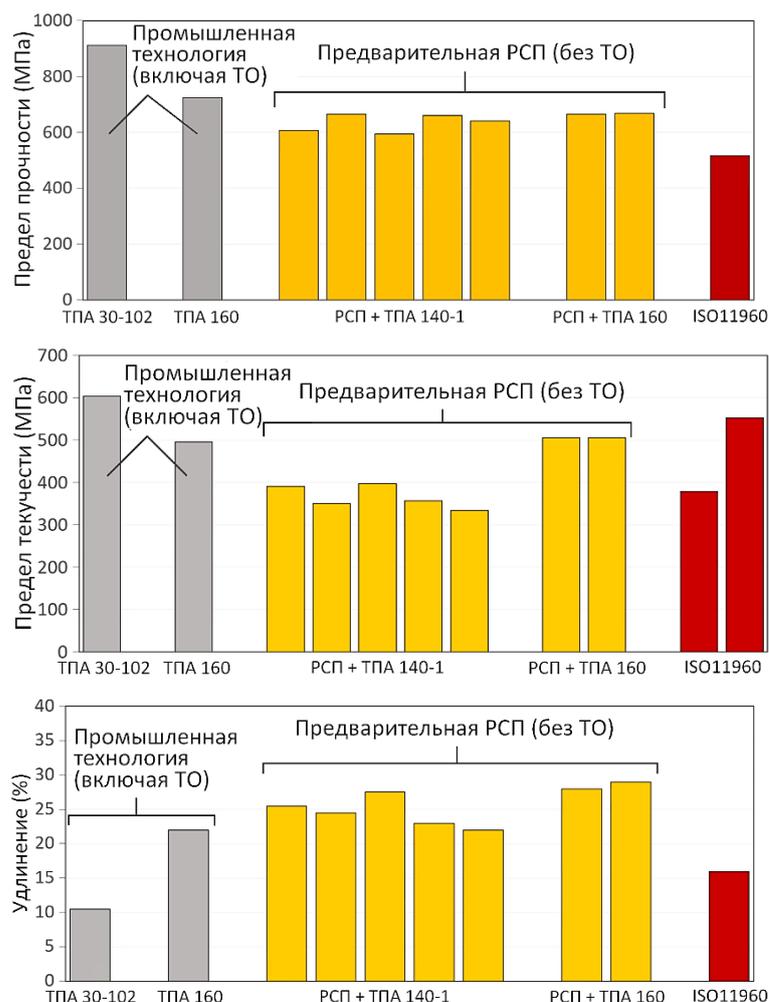


Рисунок 2.10 – Механические свойства бесшовных труб из стали 18ХМФБ полученные прокаткой из НЛЗ по действующей технологии на различных ТПА (серые столбики), из заготовки, предварительно деформированной на стане РСП (желтые столбики) и нормативные требования по ГОСТ Р 53366/ISO 11960 для группы прочности J55 (красные столбики).

Действующая технология производства бесшовных труб на агрегате ТПА-160 из НЛЗ предусматривает операцию термообработки. При этом достигаются механические свойства, изображаемые серыми столбиками на рисунке 2.10.

Результаты испытаний показывают, что трубы, полученные из предварительно деформированной заготовки способом РСП на ТПА-160, полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 53366/ISO 11960 для группы прочности J55 с прокатного нагрева (без проведения дополнительной термообработки). Показатели относительного удлинения ( $\delta_5$ , %) достигают значений 25,5-29,0, что в 1,6-1,8 раза выше требований ГОСТ Р 53366/ISO 11960 для группы прочности J55. Кроме того, следует отметить, что схожие по размеру трубы 73×5,5 мм прокатанные из НЛЗ Ø150 мм на ТПА 30-102 с гораздо большей степенью деформации, не соответствуют данным требованиям с прокатного нагрева (таблица 2.5). Для получения сопоставимого уровня пластических свойств труб, прокатанных по действующей технологии необходимы термообработка (нормализация) с нагревом до 890°С и выдержкой 45-55 мин, либо применение покупной деформированной (катаной) заготовки (в случае прокатки труб размером 73×5,5 мм на ТПА 30-102) [46, 82, 86, 102]. Аналогичные результаты о возможности достижения высоких пластических свойств методом РСП без термообработки были получены и на других материалах, в частности на алюминиевых сплавах [106, 107].

Таблица 2.5 – Механические свойства труб размером 73х5,5 мм из стали 18ХМФБ, прокатанные из заготовки Ø150 мм на ТПА 30-102 и требования НД.

Номер плавки	Поставщик заготовки	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Соответствие группе прочности ГОСТ Р 53366/ISO 11960
28544	АО «ОЭМК»	706	545	25,0	K72/K
3F2129	ЭСЦ	912	603	7,4	–
Требования ГОСТ Р53366/ISO 11960 к механическим свойствам в соответствии с группой прочности		≥517	379-552	≥16	J55
		≥655	379-552	≥14	K55/Д
		≥687	≥490	≥12	K72/K

Проведённые исследования показали, что включение в процесс предварительной деформации (обработки) стальной НЛЗ способом РСП способствует получению более однородной структуры по химическому, фазовому составу и структурному состоянию. За счёт этого при правильной коррекции режимов горячей прокатки и охлаждения можно будет сократить общий цикл получения готовых труб и, в ряде случаев, (где это разрешено нормативной документацией) исключить операции по термообработке (нормализации). Кроме того, повышенная пластичность позволяет ожидать улучшения деформируемости труб при последующей холодной прокатке и роста эксплуатационных свойств.

## **ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПЕРЕЖИМОВ ДЛЯ РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ РСП ПО ЗАДАННОЙ КАЛИБРОВКЕ И НАСТРОЙКЕ ВАЛКОВ.**

### **3.1 Исходные положения и геометрическая схема расчёта.**

В процессе РСП заготовка деформируется тремя рабочими валками, которые расположены вокруг прокатываемой заготовки, чаще всего через  $120^\circ$ . Оси валков и заготовки скрещиваются под острым углом. Это придаёт винтовое движение прокатываемой заготовке. В трубных станах винтовой прокатки угловыми параметрами настройки валков являются угол подачи и угол раскатки, при этом винтовое движение происходит от угла подачи [47, 108, 109]. Очаг деформации образуется уменьшением расстояния от рабочих поверхностей валков до оси прокатки по ходу движения заготовки. Внешний контур очага деформации не замкнут и состоит из трёх контактных поверхностей, разделённых тремя свободными межвалковыми зазорами. Конфигурация контура имеет симметрию вращения 3 порядка.

Под продольным профилем очага деформации понимается изменение кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валков по оси заготовки. Прямая задача геометрии РСП состоит в определении калибровки валков, которая обеспечивает заданный продольный профиля очага деформации с учётом разворота валков на углы подачи раскати относительно оси заготовки [110]. Определение продольного профиля очага деформации при известной калибровке валков – это обратная задача.

Методика виртуальных пережимов [110], специально созданная для расчёта геометрии станов РСП, успешно применяется для решения прямой задачи при углах скрещивания до  $20\text{-}30^\circ$ .

Решение обратной задачи связано с определением кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валков с учётом искажении очага деформации.

При указанных углах подачи и скрещивания это связано с определёнными математическими трудностями, которые преодолеваются применением численных методов и вычислительной техники. В частности, в [47] отмечается, что для определения кратчайшего расстояния только в одном сечении очага деформации необходимо решить уравнение четвёртой степени, которое не имеет аналитического решения.

Геометрические задачи винтовой прокатки для отдельных частных случаев решены также в работах [111, 112 и др.].

Вместе с тем, методика виртуальных пережимов, основанная на использовании инвариантных параметров и соотношений, может быть успешно адаптирована под решение обратной задачи [113]. Креативный приём методики состоит в построении элементарных формул расчёта геометрии РСП, используя особые свойства технологического пережима, элементарные соотношения в прямоугольных треугольниках, и с учётом продольного изменения фактических углов подачи и раскатки валков.

Рассматриваемый подход представляет собой гибридный вариант совместного применения методик П.К. Тетерина и Ю.М. Миронова [108, 109]. В описании используется ряд терминов и понятий. В частности:

– «технологический пережим» – сечение, перпендикулярное оси прокатки и содержащее ось разворота  $OC$  валков на угол подачи  $\beta$ ;

– «геометрический пережим» – сечение, перпендикулярное оси прокатки и содержащее общий перпендикуляр к осям валка и прокатки  $GG_B$ .

Изометрия и основные проекции взаимного расположения оси валка и прокатки с указанием геометрических характеристик показаны рисунке 3.1.

В технологическом пережиме углы раскатки  $\delta$  и подачи  $\beta$  заданы настройкой валков и определяются как показано на рисунке 3.1. В станах барабанного типа отрезок  $OC$  обычно лежит на оси барабана, которую называют осью разворота валков на угол подачи [47, 108, 109].

Дополнительно используется понятие «виртуальный технологический

перезжим» – произвольное поперечное сечение очага деформации, в котором расчётным путём определены: длина перпендикуляра к оси прокатки, соединённого с осью валка и фактические углы подачи и раскатки, определённые относительно этого перпендикуляра.

Расчёты базируются на элементарных геометрических связях между элементами прямой треугольной пирамиды  $G_B DAC$  и базового треугольника треугольнике  $\Delta OAC$  [113].

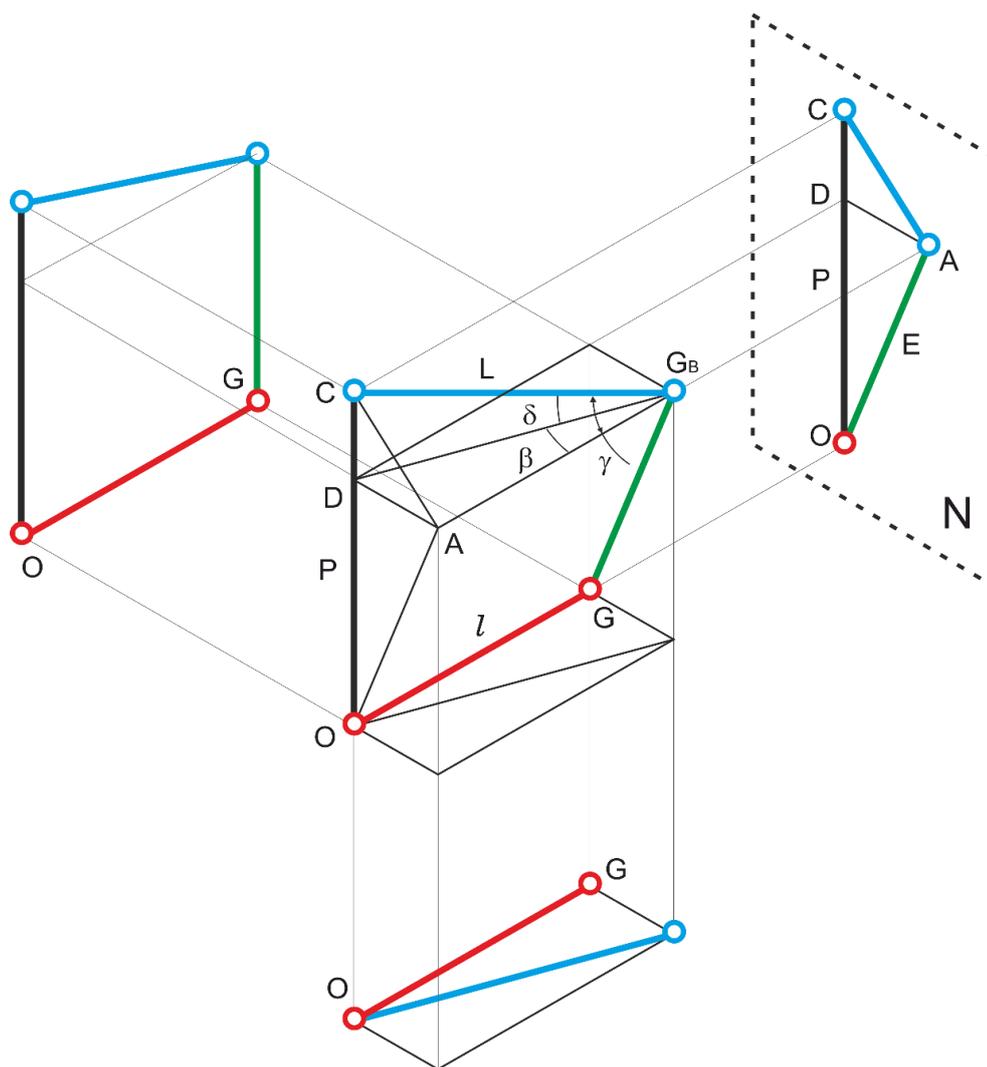


Рисунок 3.1 – Изометрия и основные проекции взаимного расположения оси валка  $CL$  и оси прокатки  $Ol$  [113].

Основание  $\Delta DCA$  располагается в технологическом пережиме, а вершина пирамиды  $G_B$  – в геометрическом. Расстояние между пережимами по оси валка

$L$  равно длине ребра  $CG_B$ , а по оси прокатки  $l$  – длине ребра  $AG_B$ , параллельного оси прокатки. Углы подачи  $\beta$ , раскатки  $\delta$  и скрещивания  $\gamma$ , служат плоскими углами при вершине пирамиды  $G_B$ , т. е.  $\angle DG_BA = \beta$ ,  $\angle DG_BC = \delta$ ,  $\angle CG_BA = \gamma$ .

Грани  $DG_BC$  и  $DG_BA$  перпендикулярны. По теореме косинусов для трёхгранного угла при двугранном угле  $90^\circ$  справедлива формула

$$\cos \gamma = \cos \beta \cdot \cos \delta \quad (3.1)$$

Наглядное представление о геометрических соотношениях даёт плоская интерпретация схемы в виде пирамиды  $ACDG_B$ , развернутой на плоскость основания  $ACD$  (рисунок 3.2) [306].

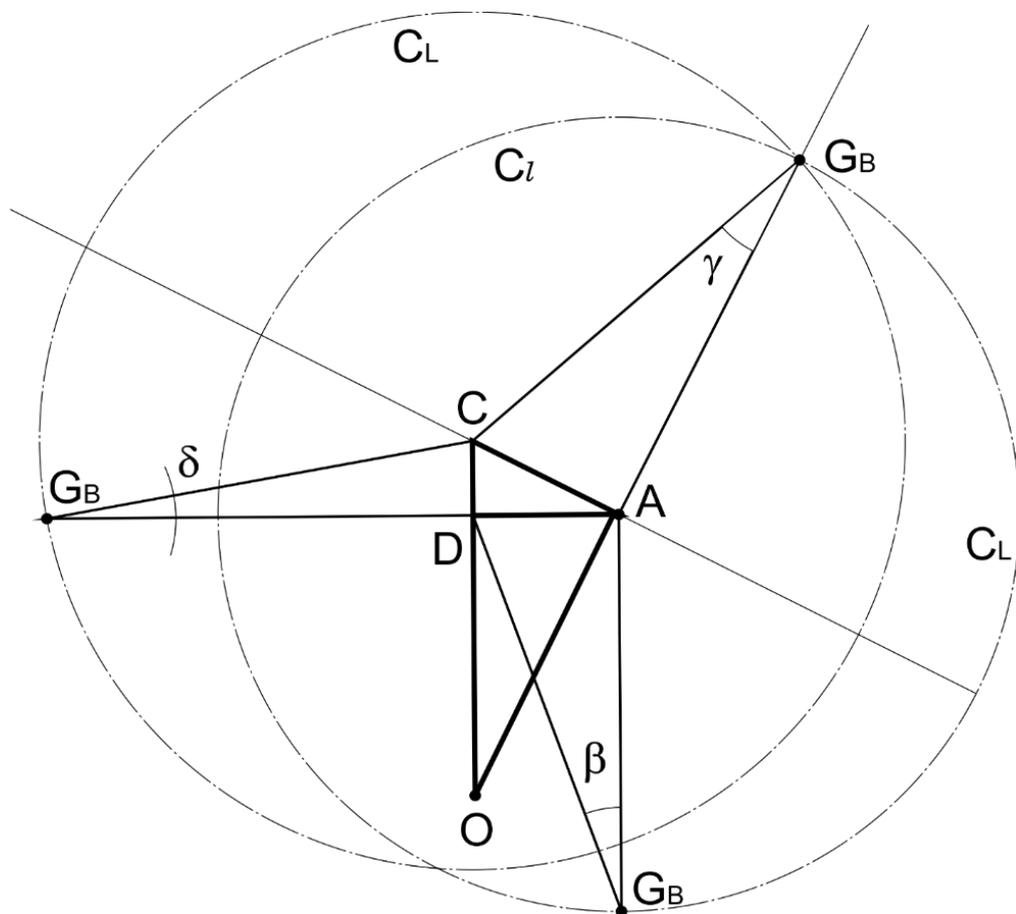


Рисунок 3.2 – Плоская геометрическая схема РСП в виде развертки пирамиды  $G_BDAC$ .

В базовом треугольнике приняты следующие обозначения (рисунки 3.1 и 3.2):

- точка  $O$  – проекция оси прокатки на рассматриваемую плоскость;
- гипотенуза  $OC$  – отрезок оси разворота валков на угол подачи, перпендикулярен к оси прокатки.  $P$  – расстояние между осью прокатки и осью валка в плоскости технологического пережима;
- катет  $OA$  – общий перпендикуляр к осям прокатки и валка длиной  $E$ ;
- катет  $AC$ , он же гипотенуза основания пирамиды, имеет длину

$$AC = L \cdot \sin \gamma = l \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (3.2)$$

Высота треугольника  $AD$  составляет

$$AD = L \cdot \sin \beta \cdot \cos \delta = l \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (3.3)$$

Длина отрезка  $CD$ , отсекаемого высотой  $AD$  на гипотенузе  $OC$ , составляет

$$CD = L \cdot \sin \delta = l \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \beta}. \quad (3.4)$$

В представленных схемах пространственного взаиморасположения осей валка и прокатки присутствует набор из 6 величин  $E, P, l$  (или  $L$ ),  $\beta, \delta, \gamma$ . При этом для однозначного определения пространственной позиции валка достаточно трёх, из которых, по крайней мере одна должна быть линейной. В теоретическом случае три величины из этого списка могут быть приняты за параметры настройки стана винтовой прокатки, а оставшиеся – определены расчётным путём. Число сочетаний из 6 по 3 составляет 20, т. е. теоретически существует 20 способов (комбинаций параметров) настройки валков. Для станов РСП угол подачи регламентирован по определению в интервале 18-24°. Если его зафиксировать, например, на уровне 20°, то число возможных вариантов настройки уменьшится до 10 (число сочетаний из 5 по 2). Отмеченное свидетельствует о широком разнообразии возможных вариантов расчётных формул. Далее приведены некоторые из них, удобные для быстрых расчётов.

Из перечисленного списка геометрических параметров, две величины  $E$  и  $\gamma$  являются инвариантными (постоянными) для заданной настройки стана,

остальные 4 ( $P$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $l$  или  $L$ ) изменяются вдоль оси прокатки и оси валка. Аналитически важны связи переменных величин с постоянными. Инвариантный угол скрещивания  $\gamma$  рассчитывается исходя из формулы (3.1). Кратчайшее расстояние  $E$  между осями валка и заготовки равно:

$$E = P \frac{\sin \beta \cdot \cos \delta}{\sin \gamma} = \text{const.} \quad (3.5)$$

Из совместного рассмотрения формул (3.1) и (3.5) получается практически важное инвариантное соотношение

$$G_E = E \cdot \text{tg} \gamma = P \cdot \text{tg} \beta = \text{const.} \quad (3.6)$$

Если расстояние  $l$  принять за независимый аргумент, то изменение расстояния  $P$  между осями валка и прокатки описывается уравнением однополостного гиперболоида:

$$\left(\frac{P}{E}\right)^2 - \left(\frac{l}{E}\right)^2 \cdot \text{tg}^2 \gamma = 1. \quad (3.7)$$

Функциональная зависимость угла подачи от расстояния  $P$  или  $l$  находится из формул:

$$\text{tg} \beta = \frac{G_E}{P} = \frac{\text{tg} \gamma}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{E}\right)^2 \cdot \text{tg}^2 \gamma}}, \quad (3.8)$$

или

$$\text{ctg}^2 \beta - \text{ctg}^2 \gamma = \left(\frac{l}{E}\right)^2. \quad (3.9)$$

Связь угла раскатки с расстояниями  $l$  и  $P$  присутствует в конечных выражениях:

$$\cos \delta = E \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{E}\right)^2 \cdot \sin^2 \gamma}}{P}, \quad (3.10)$$

или

$$\cos \delta = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{E}\right)^2 \cdot \sin^2 \gamma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{E}\right)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma}}, \quad (3.11)$$

или

$$\sin \delta = \frac{l}{P} \cdot \frac{\sin^2 \gamma}{\cos \gamma}. \quad (3.12)$$

### 3.2 Углы раскатки и подачи заготовки относительно валков. Формулы расчёта.

С изменением угла подачи изменяется расстояние между осями валков и прокатки  $P$ , и продольный профиль очага деформации (кратчайшее расстояние от оси прокатки до поверхности валков). Изменение происходит во всех сечениях кроме одного – сечения технологического пережима, т. е. сечения, содержащего ось разворота валков на угол подачи. В этом сечении контакт сечения заготовки радиусом  $r_p$  с сечением валка радиусом  $R_p$  происходит в точке  $F$  по схеме, представленной на рисунке 3.3, а. На схеме приняты следующие обозначения:  $OC = P$ ;  $OF = r_p$ ;  $O_B F = R_p$ ;  $\angle CFO_B = \delta$  [110, 113].

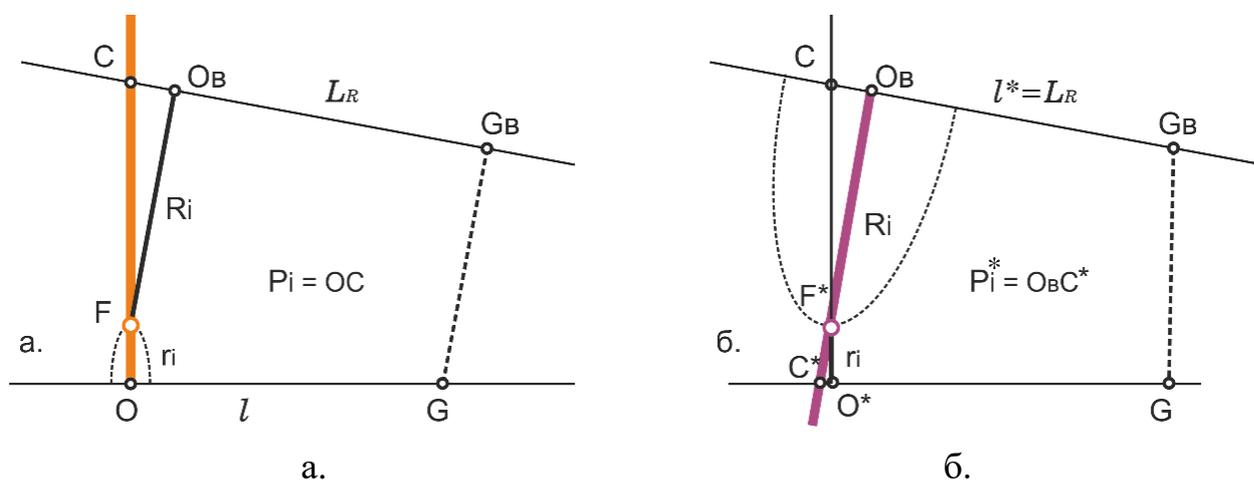


Рисунок 3.3 – Схема контакта «валок–заготовка» в технологическом пережиме для прямой (а) и обратной (б) задачи.  $CG_B$  – ось валка.  $OG$  ( $O^*G$ ) – ось прокатки.  $OC$  – ось разворота валка на угол подачи  $\beta$ .  $O_B C^*$  – ось разворота заготовки на угол подачи  $\beta^*$ .

Положение точки  $F$  и, соответственно радиус очага деформации, не зависят от поворота валков на угол подачи. При этом справедлива формула [47, 110]

$$P = r_p + \frac{R_p}{\cos \delta}. \quad (3.13)$$

Продуктивность и простота методики виртуальных пережимов состоит в том, чтобы любое сечение очага деформации перевести в состояние пережима, в котором будет справедлива эта формула. Формула (3.13) напрямую используется для определения радиуса валка  $R(l)$ , которое контактирует с некоторым сечением заготовки заданного радиуса  $r(l)$ , отстоящем от геометрического пережима на величину  $l$

$$R(l) = [P(l) - r(l)] \cdot \cos \delta(l), \quad (3.14)$$

где  $\delta(l)$  – текущее значение угла раскатки в рассматриваемом сечении (виртуальном пережиме).

Для решения обратной задачи с сохранением структуры расчётных формул можно обратиться к рисунку 3.3 б. В обозначения геометрических элементов, относящихся к обратной задаче добавлен символ (\*). По аналогии с углами подачи и раскатки валков вводится понятия обратных величин – углы раскатки  $\delta^*$  и подачи  $\beta^*$  заготовки относительно валков. На рисунке 3.3, б обозначено:  $O_B C^* = P^*$ ;  $O^* F^* = r_p^*$ ;  $O_B F^* = R_p$ ;  $\angle C^* F^* O^* = \delta^*$ .

В расчётном сечении угол раскатки  $\delta^*$  определяется как дополнительный угол между осью заготовки и перпендикуляром к оси валка, пресекающим ось заготовки. За угол подачи  $\beta^*$  принимается угол между осью валка и проекцией оси заготовки на плоскость, нормальную к перпендикуляру к оси валка. Если в произвольном поперечном сечении валка, отстоящем от геометрического пережима на величину  $l_i^* = L_{Ri}$ , известен его радиус  $R_i$ , определены угол раскатки  $\delta_i^*$  и расстояние между осями валка и заготовки  $P_i^*$ , то искомый радиус очага деформации  $r_i$  (кратчайшее расстояние от оси прокатки до поверхности валка) вычисляется по формуле, аналогичной формуле для прямой задачи.

$$r_i^* = (P_i^* - R_i) \cdot \cos \delta_i^*, \quad (3.15)$$

здесь  $P_i^*$  и  $\delta_i^*$  вычисляются из формул (3.7), (3.10)-(3.12) с подстановкой  $l_i^* = L_{Ri}$ .

Положение центра сечения заготовки, определяемое расстоянием от геометрического пережима по оси прокатки, рассчитывается по формуле

$$L_{ri}^* = l_i^* \cdot \cos \gamma \pm R_i \cdot \sin \delta_i^*, \quad (3.16)$$

где «+» выбирается для сечений, расположенных до геометрического пережима по оси прокатки ( $l_i^* \geq 0$ ), и «-» – для сечений, расположенных за геометрическим пережимом по оси прокатки ( $l_i^* < 0$ ).

Для вычисления угла подачи  $\beta_i^*$  в этом сечении могут быть использованы формулы

$$\operatorname{tg} \beta_i^* = \frac{G_E}{P_i^*} \quad (3.17)$$

или

$$\operatorname{ctg}^2 \beta_i^* = \operatorname{ctg}^2 \gamma + \left(\frac{l_i^*}{E}\right)^2 \quad (3.18)$$

Величины  $\gamma$ ,  $E$  и  $G_E$  – геометрические инварианты, одинаковые для прямой и обратной задач, вычисляемые по формулам (3.1), (3.5) и (3.6).

### 3.3 Оценка точности расчёта.

Точность обратного расчёта может быть оценена следующим образом [113]. По заданным исходным данным настройки валков (радиусы валков и проката, углы подачи и раскатки) определяются параметр технологического пережима  $P$  и параметры геометрического пережима, величины  $\gamma$ ,  $E$ ,  $l$  и  $L_R$  (рисунок 3.3, а).

Далее исходный технологический пережим принимается за виртуальный, в котором необходимо определить радиус проката  $r^*$  при известном радиусе валков. Для этого вычисляется расстояние  $P^*$  и косинус обратного угла раскатки заготовки относительно валков вычисляется, с помощью, например, формул (3.7) и (3.10)-(3.12), в которых положено  $l_i^* = L_{Ri}$  (рисунок 3.3, б).

Искомый радиус  $r^*$  определяется по формуле (3.15) и сравнивается и исходным значением  $r$ . Погрешность оценивается относительной разностью

$$\varepsilon_r = \frac{r-r^*}{r} \cdot 100\%. \quad (3.19)$$

В качестве примера в таблицах 3.1-3.4 и на рисунках 3.4 и 3.5 приведены расчёты погрешности обратного решения при углах подачи – 15, 20, 25 и 30°, углах раскатки – 5, 10, 15 и 20°, для радиуса проката – 50 мм, радиуса валков – 145 мм.

Необходимость расчёта обратного угла подачи в данном случае отсутствует, однако его знание позволяет оценить правильность вычислений по значению угла скрещивания, для которого должно выполняться равенство (3.1).

Полученные результаты показывают, что погрешность обратного решения в исследуемой области не превышает 1%. Причём максимальное отклонение приходится на максимальные значения  $\delta$  и  $\beta$ , которые не применяются на практике. Со снижением  $\delta$  и  $\beta$  точность расчёта существенно возрастает и для реального диапазона углов отклонение не превышает 0,15-0,25%.

Важно отметить, что для очага деформации РСП в целом фактические углы раскатки и подачи изменяются вдоль оси прокатки, например, как показано на рисунке 3.5. Соответственно, и изменяется погрешность расчётов, которая уменьшается по ходу прокатки более, чем 5 раз, вместе с близким снижением текущего угла раскатки и при некотором увеличении угла подачи (порядка 15%). В зоне обжимного участка  $\varepsilon_r \approx 0,05\%$  и менее, чем 0,01% – в зоне калибрующего. Это обстоятельство имеет существенную практическую значимость, поскольку правильность исполнения геометрии, калибрующего участка находится в безусловном приоритете. В абсолютных величинах расчётный радиус проката на калибрующем участке составляет 50,0089 мм в его начале, и 50,0005 мм – в конце при заданном исходном значении 50 мм. Т. е. погрешность расчёта существенно меньше допуска на размер проката и калибровки валков.

Таблица 3.1 – Значения угла раскатки  $\delta^*$  заготовки относительно оси валков при различных угловых настройках.

Угол раскатки $\delta, ^\circ$	5	10	15	20
Угол подачи $\beta, ^\circ$				
15	4,92	9,84	14,75	19,67
20	4,86	9,72	14,57	19,43
25	4,78	9,57	14,35	19,13
30	4,70	9,40	14,10	18,80

Таблица 3.2 – Значения угла подачи  $\beta^*$  заготовки относительно оси валков при различных угловых настройках.

Угол раскатки $\delta, ^\circ$	5	10	15	20
Угол подачи $\beta, ^\circ$				
15	15,03	15,11	15,24	15,44
20	20,03	20,14	20,31	20,55
25	25,04	25,16	25,36	25,65
30	30,04	30,18	30,40	30,72

Таблица 3.3 – Значения расчётного радиуса заготовки при различных углах раскатки и подачи валков.

Угол раскатки $\delta, ^\circ$	5	10	15	20
Угол подачи $\beta, ^\circ$				
15	50,01	50,04	50,09	50,16
20	50,02	50,07	50,16	50,28
25	50,03	50,11	50,24	50,44
30	50,04	50,15	50,35	50,63

Таблица 3.4 – Относительная погрешность (%) обратного расчёта радиуса заготовки при различных углах раскатки и подачи валков.

Угол раскатки $\delta, ^\circ$	Угол подачи $\beta, ^\circ$			
	5	10	15	20
15	0,02	0,08	0,18	0,32
20	0,03	0,14	0,31	0,57
25	0,05	0,22	0,49	0,88
30	0,08	0,31	0,70	1,27

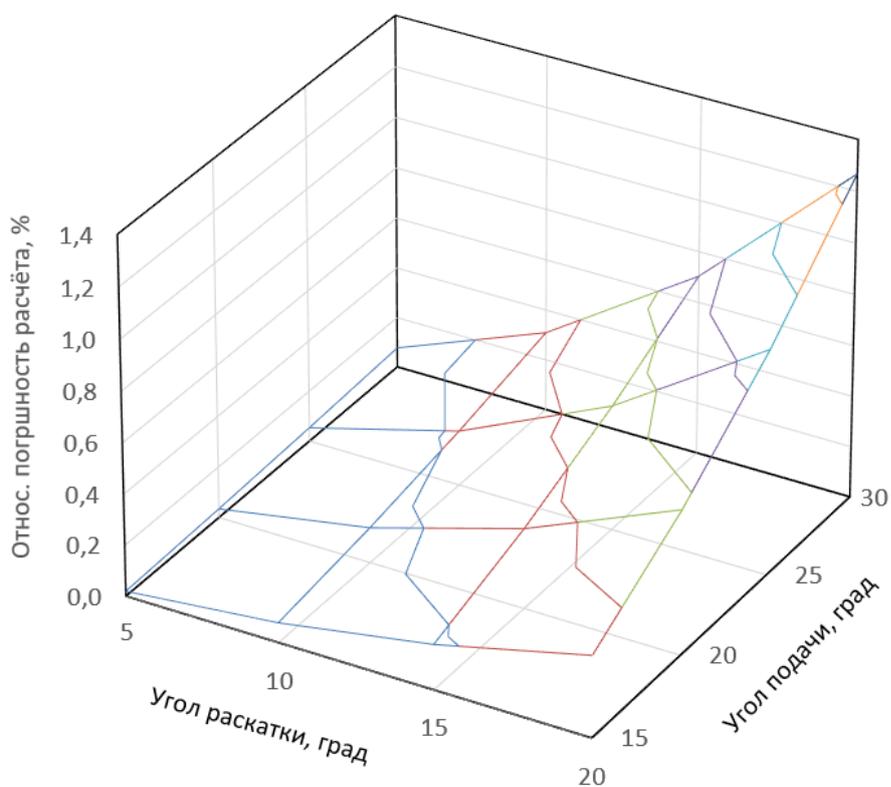


Рисунок 3.4 – Влияние углов подачи и раскатки на относительную погрешность обратного расчёта радиуса заготовки.

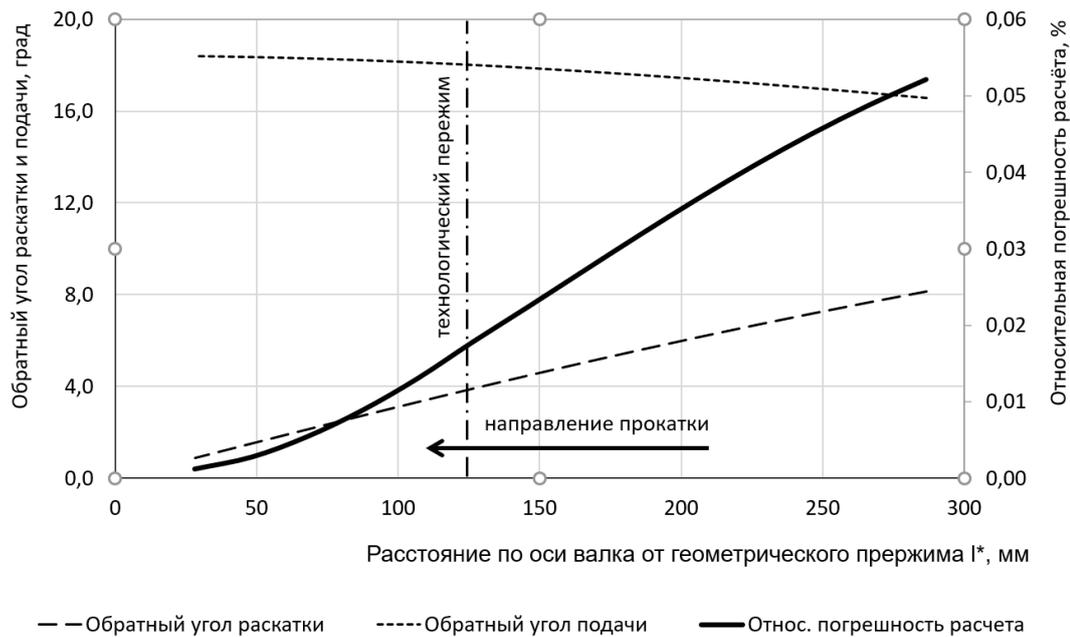


Рисунок 3.5 – Изменение относительной погрешности расчёта радиуса заготовки, обратных углов раскатки  $\delta_i^*$  и подачи  $\beta_i^*$  заготовки вдоль оси валка при прокатке заготовки  $\varnothing 156$  мм на  $\varnothing 100$  мм (диаметр валков 290 мм, угол подачи валков –  $18^\circ$ , угол раскатки валков –  $4^\circ$ ).

Дополнительная оценка точности предложенной методики проведена при помощи компьютерного моделирования в Компас-3D на примере пусковой калибровки валков специализированной клетки, представленной на рисунке 3.6.

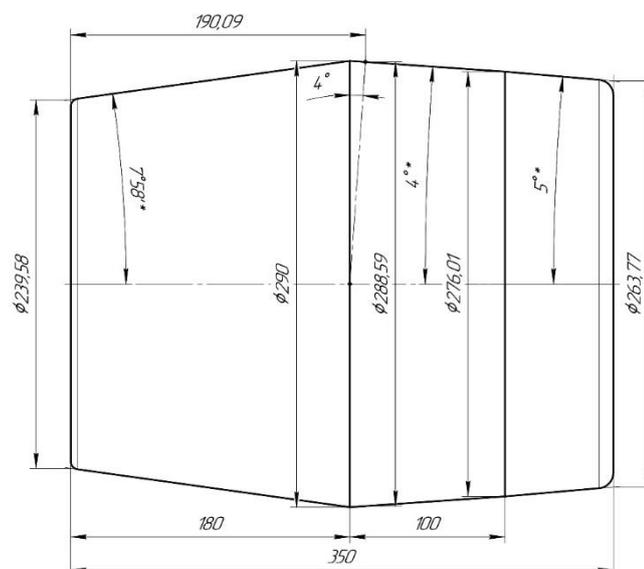


Рисунок 3.6 – Калибровка валка специализированной клетки РСП (пусковой вариант, чертёж 2-219192).

Результаты расчётов и сравнение с полученными значениями при построении в Компас-3D сведены в таблицы 3.5 и 3.6. Обозначение расчётных величин приведено на рисунке 3.7. По результатам расчёта геометрические параметры очага деформации при текущих углах раскатки и подачи специализированной клетки, полученные по разработанной методике, совпадают с аналогичными величинами, полученными построением в САД-системе (разница не превышает 0,22%).

Таблица 3.5 – Результаты расчёта радиусов очага деформации по сечениям и сравнение с полученными значениями при построении в Компас-3D.

Сечение	Очаг деформации (заготовка)						
	Расст. до техн. пережима $XR_i$ , мм	Радиус валка $R_i$ , мм	Расчёт			Построение	
			$l_i^*$ , мм	$P_i^*$ , мм	Радиус $r_i^*$ , мм	Радиус $r_i^*$ , мм	Разница, %
1	-190,09	119,79	212,241	212,243	91,334	91,285	0,056
2	-10,09	145	190,156	190,159	45,035	45,028	0,021
<b>3 (P)</b>	<b>0</b>	<b>144,295</b>	<b>189,405</b>	<b>189,408</b>	<b>45,005</b>	<b>45,000</b>	<b>0,016</b>
4	89,91	138,005	185,283	185,286	47,27	47,272	0,001
5	159,91	131,885	185,391	185,394	53,494	53,495	0,002

Таблица 3.6 – Результаты расчёта расстояний до технологического пережима очага деформации по сечениям и сравнение с полученными значениями при построении в Компас-3D.

Сечение	Очаг деформации (заготовка)					
	Расчёт				Построение	
	$\delta_i^*$ , °	$\beta_i^*$ , °	$L_{ri}^*$ , мм	Расст. до техн. переж. $\Delta l_i$ , мм	Расст. до техн. переж. $\Delta l_i$ , мм	Разница, %
1	8,916	16,189	314,984	-189,099	-188,686	0,219
2	4,205	17,955	136,277	-10,392	-10,376	0,153
<b>3 (P)</b>	<b>3,900</b>	<b>18,021</b>	<b>125,885</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
4	1,056	18,395	33,314	92,571	92,402	0,184
5	1,223	18,386	-38,455	164,340	164,011	0,201

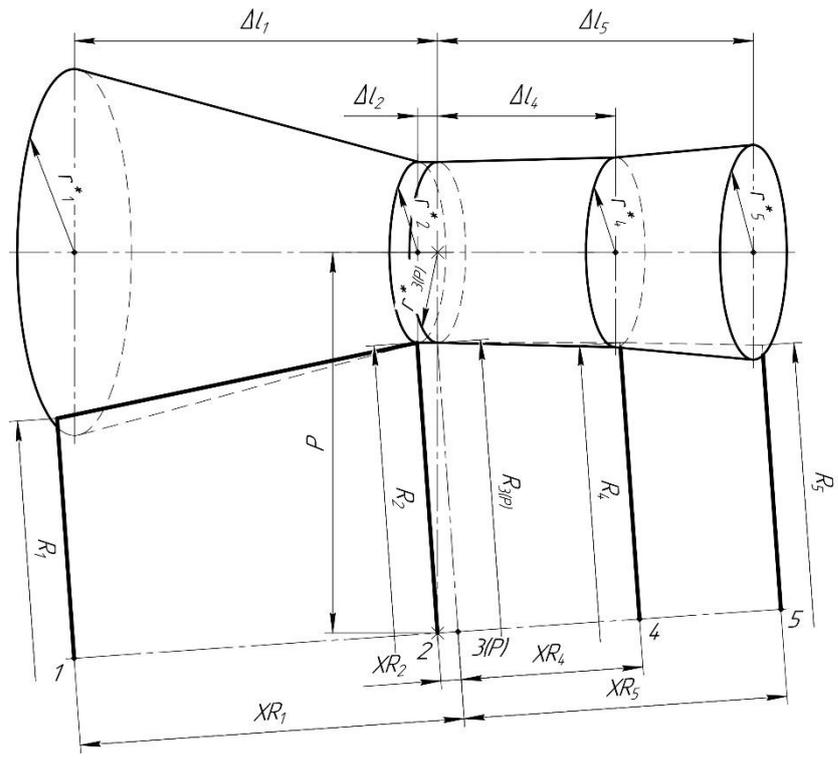


Рисунок 3.7 – Обозначения геометрических размеров валка и очага деформации специализированной клетки. Утолщённая линия – валок, основная – очаг деформации. 1, 2, ... 5 – сечения входа и выхода валка, соответственно, 3 (Р) – сечение технологического пережима.

## ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РСП ПРИ ОТНОШЕНИИ ДИАМЕТРА ВАЛКОВ К ДИАМЕТРУ ЗАГОТОВКИ 1,3-1,8.

### 4.1 Порядок выполнения моделирования и анализа результатов.

Для исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) и энергосиловых параметров винтовой прокатки заготовки в зависимости от диаметра валков было проведено сравнительное конечно-элементное моделирование с использованием программного комплекса QForm (лицензия АО «ПНТЗ» № R2-U2196-011217U171).

В качестве критериев сравнения НДС были выбраны параметры, которые позволяют наиболее полно оценить процесс радиально-сдвиговой прокатки – скорость деформации (интенсивность скорости деформации), пластическая (эквивалентная, накопленная) деформация, коэффициент (показатель) жёсткости напряженного состояния. Однако, известны и другие способы анализа процесса РСП с помощью конечно-элементного моделирования направленные на повышение качества получаемых прутков, например, в работе [114] рассмотрен пример определения причин возникновения кольцевого разрушения прутков из жаропрочных сплавов с помощью модифицированного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма и температурного поля деформационного разогрева.

Интенсивность скорости деформации определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}, \quad (4.1)$$

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

Поле интенсивности скорости деформации используется для оценки очага пластической деформации. В процессековки и штамповки данное поле применяют для определения застойных зон, в которых интенсивность скорости деформации близка к нулю, а в очаге пластической деформации напротив – достигает максимальных величин [115]. Для процесса РСП поле интенсивности

деформации удобно использовать с целью определения глубины проникновения внешней зоны II (рисунок 1.12, а) – зоны интенсивных сдвиговых деформаций, наличие которой способствует интенсивной проработке структуры металла и снижает неравномерность деформации по сечению заготовки.

Для комплексной характеристики влияния технологического процесса на свойства материала используют так называемую эффективную (эквивалентную, накопленную). Её определяют либо как сумму интенсивности приращений пластических деформаций, вычисленную вдоль траектории движения материальной частицы, либо как степень деформации, получаемую интегрированием скорости деформации по времени вдоль траектории движения материальной частицы. В программе QForm при определении накопленной деформации используется численное интегрирование интенсивности скоростей деформации для каждого узла:

$$\bar{\varepsilon}^p = \sum_n \dot{\varepsilon}^n \cdot \Delta t_n, \quad (4.2)$$

где  $n$  – номер шага расчёта по времени  $\Delta t_n$  [115].

Высокие значения накопленных деформаций в совокупности с положительными средними напряжениями и большими значениями первых главных напряжений, в частности, позволяют на качественном уровне прогнозировать наиболее опасные области, в которых может произойти разрушение металла при ковке и штамповке. В общем случае, поля накопленных деформаций характеризуют проработку структуры металла [115].

Пластическая деформация металлических материалов возможна вследствие их пластичности. Пластичность – свойство материала необратимо изменять свою форму и размеры под действием нагрузки, сохраняя при этом целостность. Предельная деформация без разрушения, которая может быть достигнута в конкретном технологическом процессе, зависит не только от пластичности металла, но и от параметров этого технологического процесса. Для характеристики способности к пластической деформации в конкретных условиях напряжённого состояния, температуры и скорости деформации

используют термины «деформируемость» или «технологическая пластичность». Экспериментально установлено, что чем больше уровень сжимающих напряжений в схеме напряжённого состояния, тем больших пластических деформаций без разрушения можно достигнуть. Численно уровень сжимающих напряжений оценивают с помощью нормализованного среднего нормального напряжения или показателя жёсткости напряженного состояния [115]

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}, \quad (4.3)$$

т. е. отношения среднего нормального напряжения к интенсивности напряжений.

При сжатии средние нормальные напряжения становятся отрицательными, поэтому с уменьшением показателя жёсткости напряженного состояния возрастает технологическая пластичность [115]. Для радиально-сдвиговой прокатки с помощью показателя напряжённого состояния можно оценивать эффективность устранения («залечивания») дефектов литой структуры НЛЗ осевой зоны или прогнозировать их развитие.

Для проведения указанных исследований, выбраны основные технологические параметры характерные для специализированной и штатной клетей раскатного стана ТПА-160. Угол подачи в обоих вариантах выбран одинаковым и равным  $18^\circ$  (таблица 4.1). С целью учёта охлаждения заготовки во время транспортировки от кольцевой печи до раскатного стана задавалось предварительное охлаждение заготовки на воздухе в течение 30 с.

Таблица 4.1 – Технологические параметры и параметры настройки программы QForm для проведения моделирования.

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Диаметр бочки валка, мм	280	430
Частота вращения валков, об/мин	64	49
Угол раскатки, °	-4	-7
Угол подачи, °	18	
Материал заготовки (из стандартной базы QForm)	сталь 15XM	
Температура нагрева заготовки, °С	1200	
Материал валков (из стандартной базы QForm)	сталь Р6М5	
Температура валков, °С	80	
Коэффициент теплопередачи между заготовкой и валками, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	30000	
Закон трения на контакте «валки-заготовка»	Леванов	
Фактор трения	3	
Температура окружающей среды, °С	20	
Коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	16,3	
Предельная адаптация сетки в заготовке	4	
Минимальное число слоёв элементов в заготовке	3	
Максимальный размер элементов на поверхности валков, мм	6	

Для проведения виртуального эксперимента была использована действующая калибровка валков специализированной клетки, по очагу деформации которой была построена калибровка валков  $\varnothing 430$  мм (рисунки 4.1 и 4.2), используя методику виртуальных пережимов, подробно рассмотренную в главе 3.

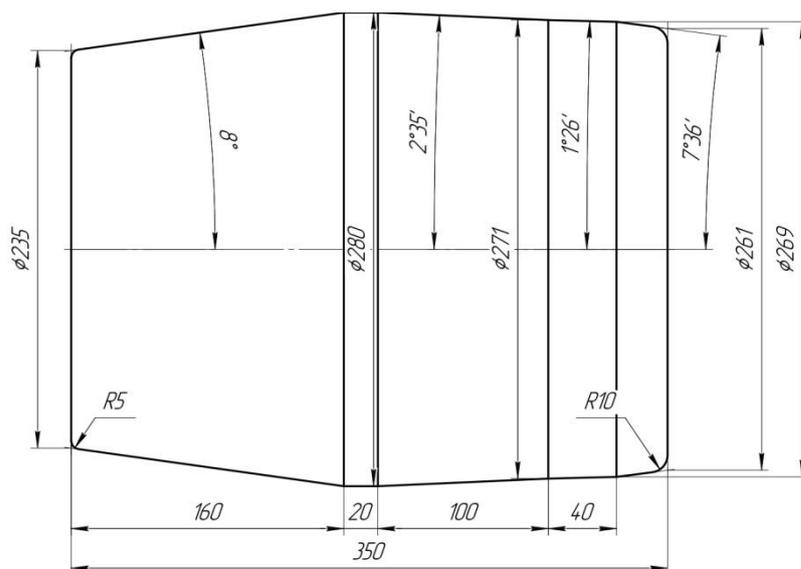


Рисунок 4.1 – Калибровка валка специализированной клетки РСП диаметром 280 мм (модернизированный вариант, чертёж 2-220001-01).

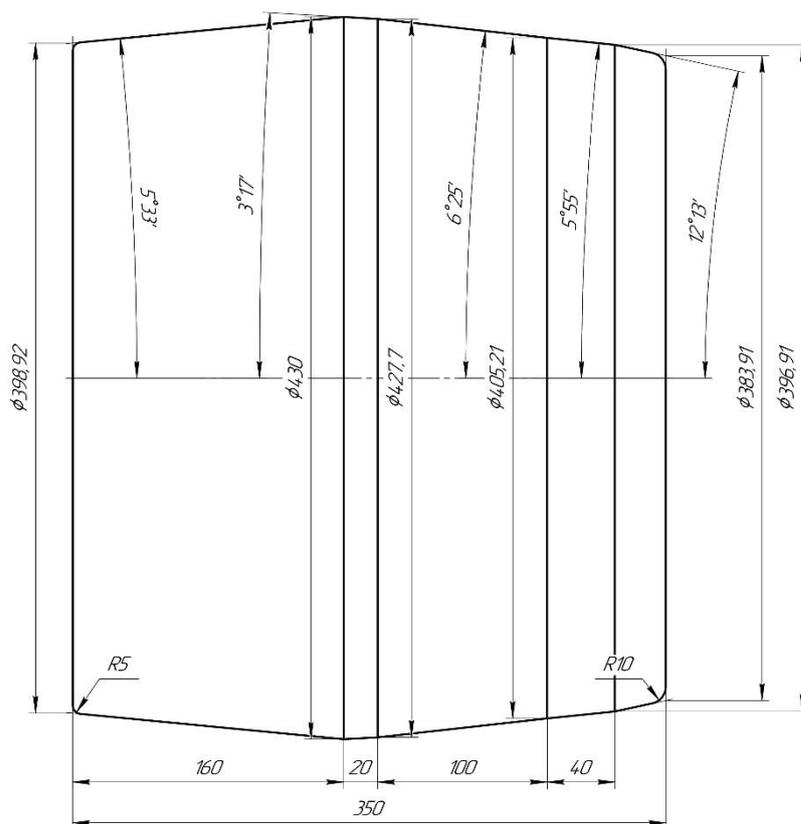


Рисунок 4.2 – Калибровка валка диаметром 430 мм.

Для проведения эксперимента выбрано 2 типоразмера заготовки  $\varnothing 156$  и  $220$  мм, при этом заготовку  $\varnothing 156$  мм запланировано прокатать до  $\varnothing 105$  мм,  $\varnothing 220$  – до  $\varnothing 170$  мм. Построены твердотельные модели по каждому из вариантов (рисунок 4.3 – для примера  $\varnothing 156$  мм).

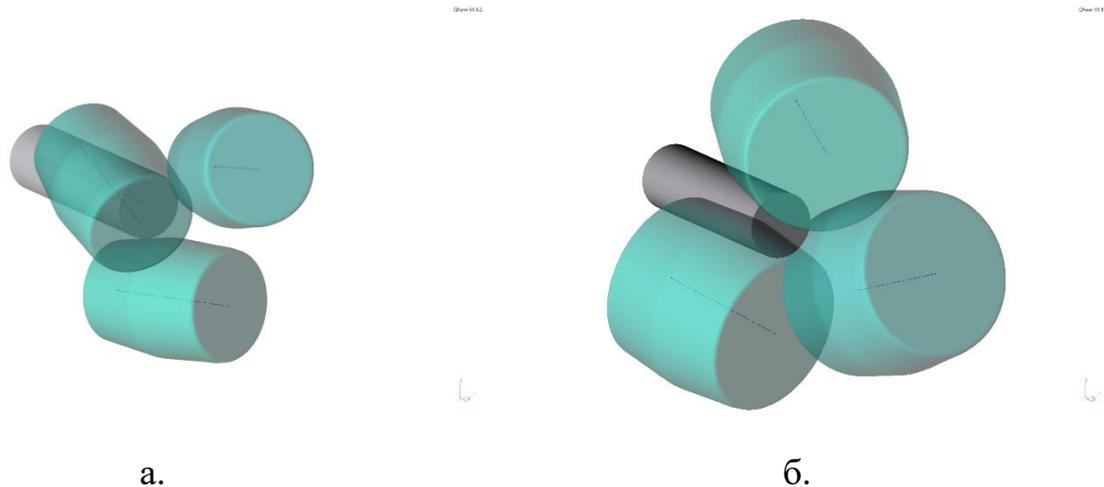


Рисунок 4.3 – Твердотельные модели прокатки заготовки  $\varnothing 156$  мм: а – валки диаметром 280 мм, б – валки диаметром 430 мм.

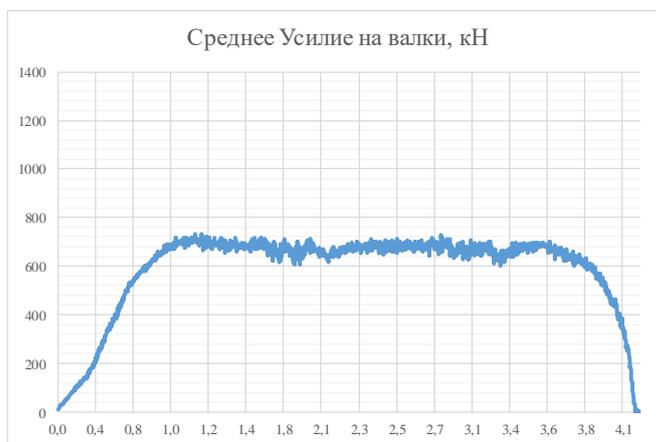
#### 4.2 Усилие, момент, мощность прокатки.

По результатам моделирования были получены данные по энергосиловым параметрам – моменту прокатки, результирующему усилию, действующему на валок и суммарной мощности прокатки (рисунки 4.7-4.9). Рассматривая результаты, следует отметить, что при увеличении диаметра валков с 280 до 430 мм величина усилия, действующего на валок, изменяется незначительно на 40-42 кН (на 4-5%), суммарная мощности прокатки увеличивается на 101-137 кВт (на 13-17%), тогда как момент прокатки увеличивается на маршруте обжатия  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$  мм с 30 до 46 кН·м (на 53%) и с 51 до 75 кН·м (на 47%) на маршруте  $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$  мм, что значительно превышает предельно допустимый момент прокатки для линии главного привода раскатного стана ТПА-160 – 40 кН·м (рисунок 4.10).

### Маршрут $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$ мм



а.



б.

### Маршрут $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$ мм



в.



г.

Рисунок 4.7 – Диаграмма усилия прокатки по исследуемым маршрутам при использовании валков диаметром 280 мм (а, в) и 430 мм (б, г).

### Маршрут $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$ мм



а.



б.

### Маршрут $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$ мм



в.



г.

Рисунок 4.8 – Диаграмма момента прокатки по исследуемым маршрутам при использовании валков диаметром 280 мм (а, в) и 430 мм (б, г).

### Маршрут $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$ мм



а.



б.

### Маршрут $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$ мм



в.



г.

Рисунок 4.9 – Диаграмма суммарной мощности прокатки по исследуемым маршрутам при использовании валков диаметром 280 мм (а, в) и 430 мм (б, г).

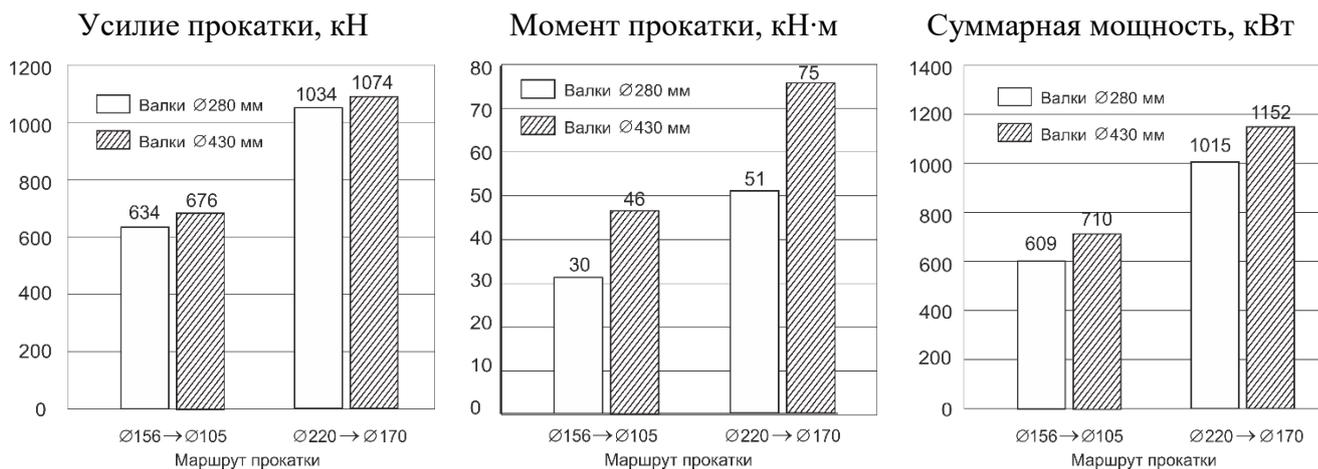


Рисунок 4.10 – Влияние диаметра валков на энергосиловые параметры РСП.

Применение валков диаметром 280 мм удовлетворяет характеристикам главного привода ТПА-160 по моменту и суммарной мощности при прокатке НЛЗ по исследуемым маршрутам.

#### 4.3 Скорость деформации, коэффициент жёсткости напряжённого состояния и накопленная пластическая деформация.

По результатам моделирования были получены поля распределения скорости деформации (рисунок 4.11), показателя жёсткости схемы напряжённого состояния  $\frac{\sigma}{T}$  (рисунок 4.12) и накопленной пластической деформации (рисунок 4.13). В рассмотренных вариантах моделирования не выявлено существенного влияния (в первую очередь негативного) соотношения диаметров валков и заготовки на характер распределения параметров напряжённо-деформированного состояния в объёме очага деформации. Это подтверждает возможность применения валков диаметром 280 мм в разрабатываемой клетки РСП специальной конструкции.

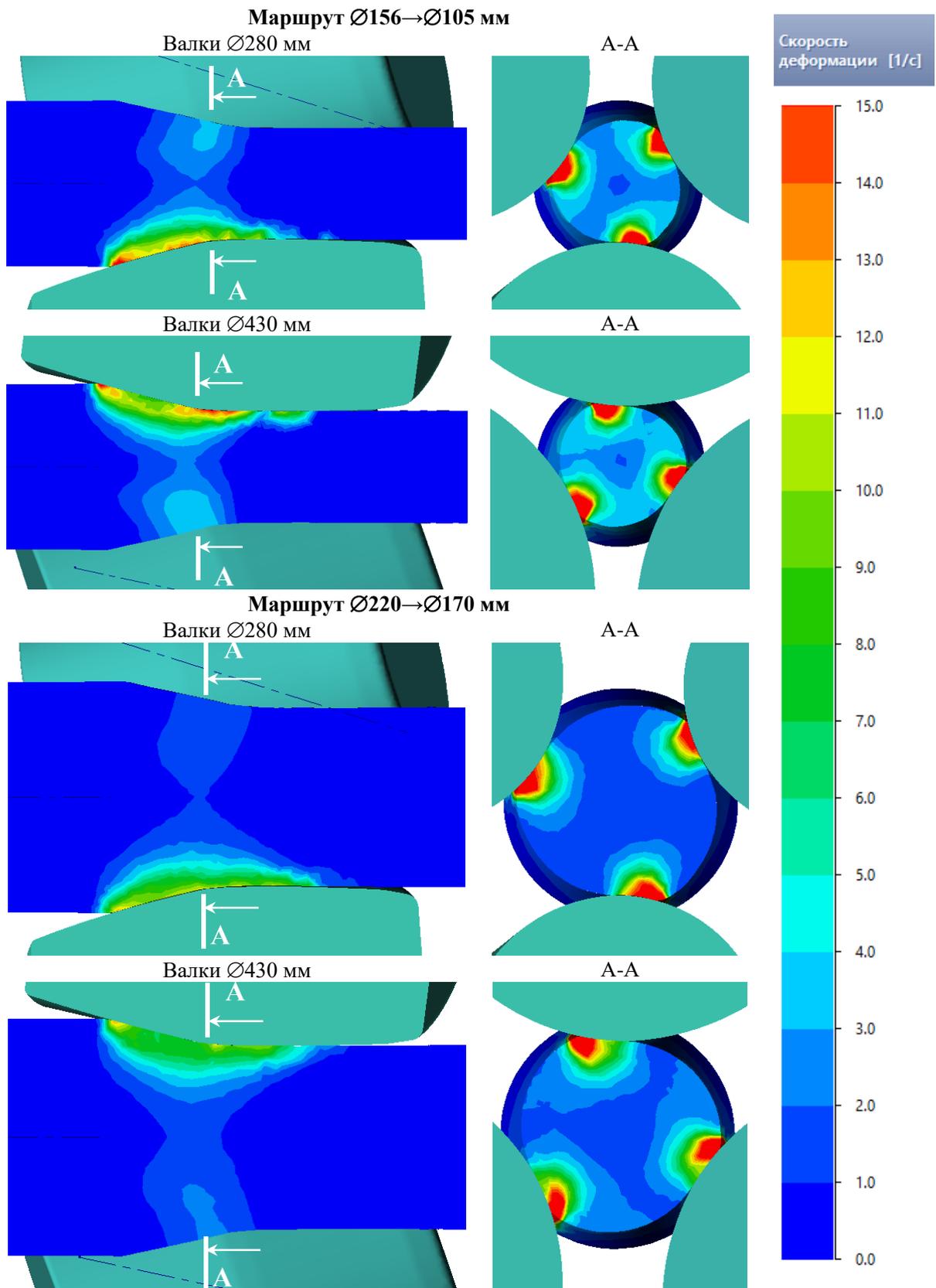


Рисунок 4.11 – Поля распределения скоростей деформации в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении очага при РСП по исследуемым маршрутам.

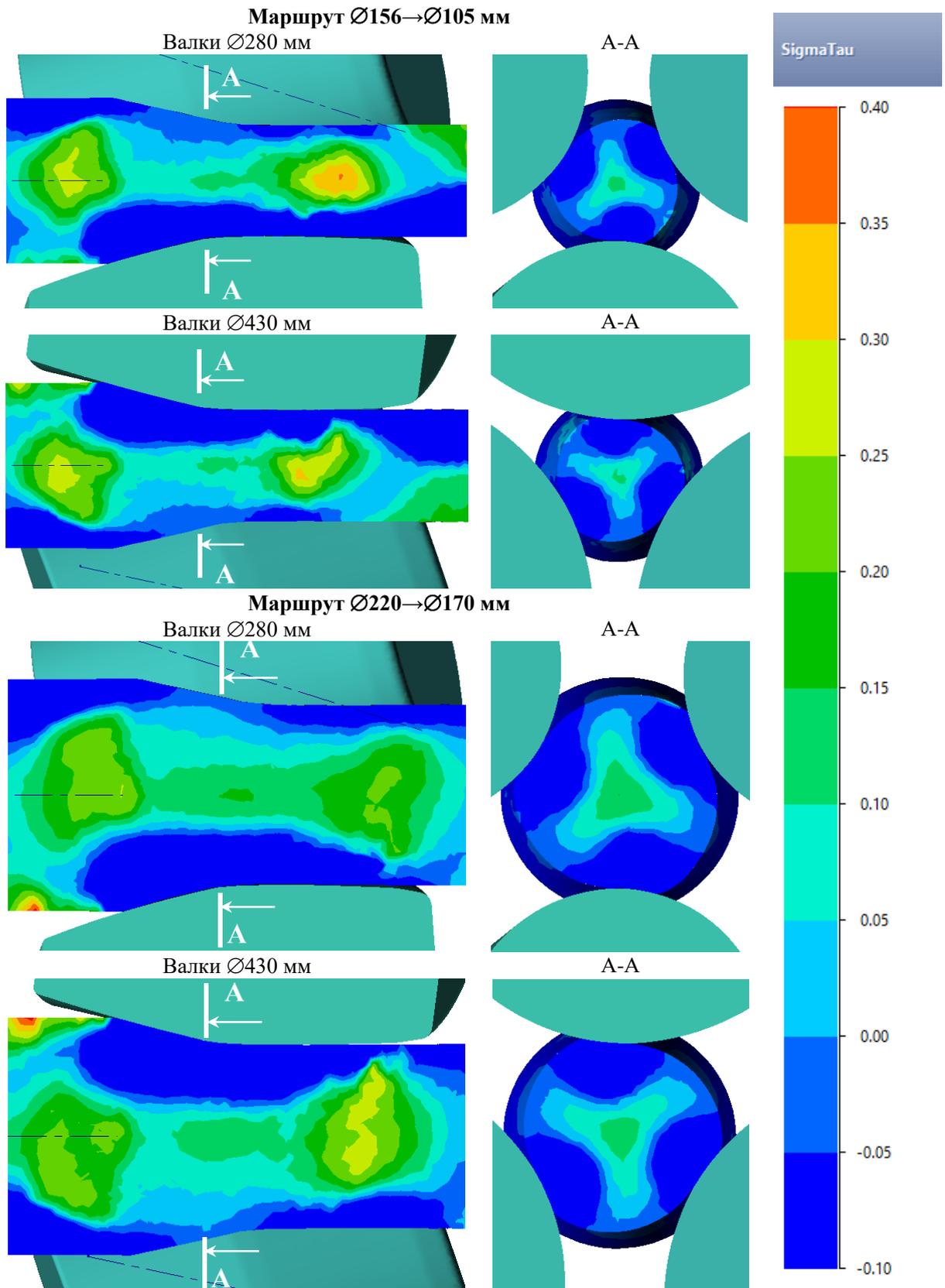


Рисунок 4.12 – Поля распределения показателя жёсткости напряженного состояния  $\frac{\sigma}{T}$  в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении очага при РСП по исследуемым маршрутам.

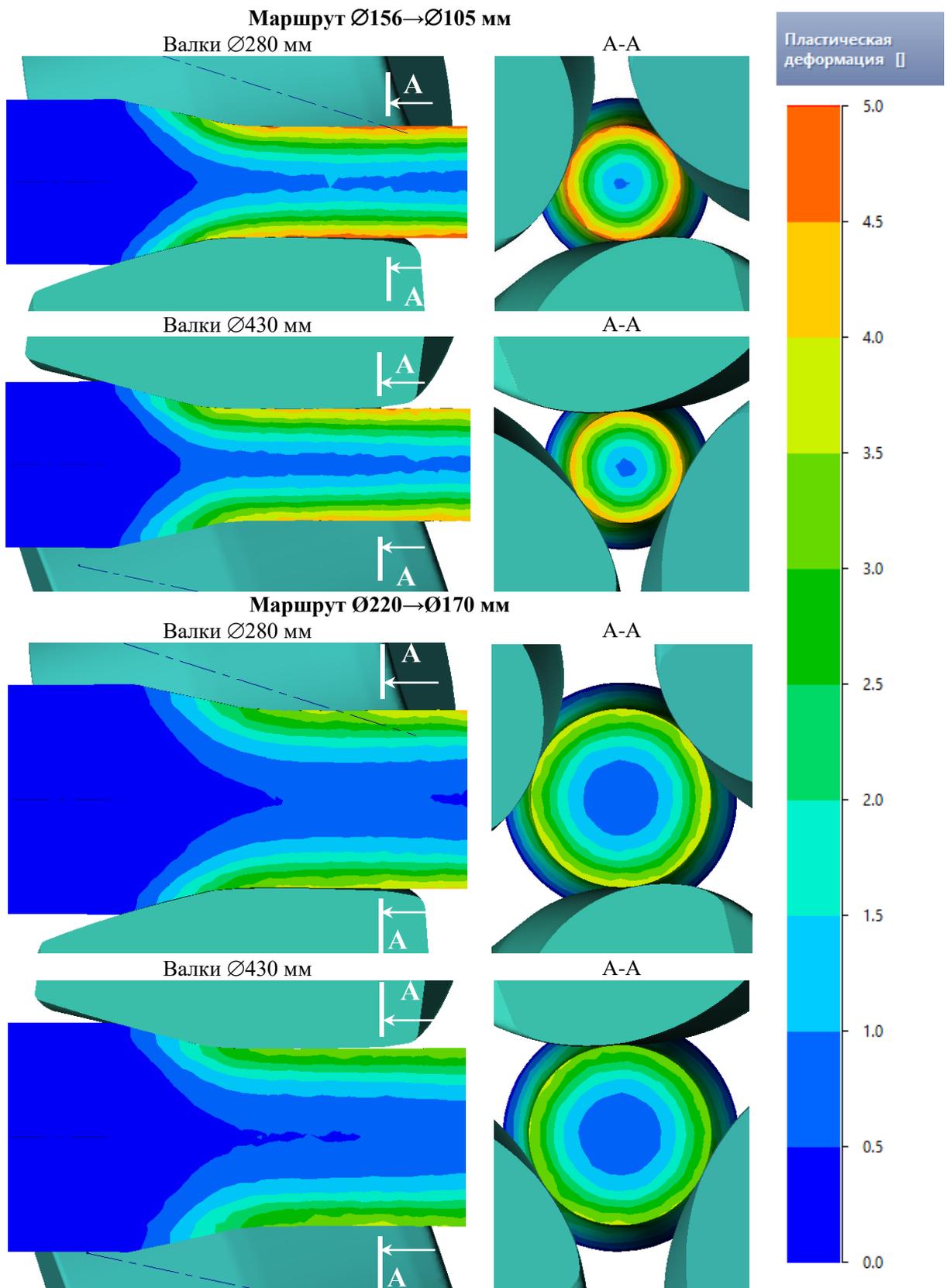


Рисунок 4.13 – Поля накопленной пластической деформации в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении очага при РСП по исследуемым маршрутам.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ КЛЕТИ РСП, СОВМЕСТИМОЙ С ОБОРУДОВАНИЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТРЁХВАЛКОВОГО РАСКАТНОГО СТАНА ТПА-160.**

### **5.1 Разработка объёмно-компоновочного решения клетки и схемы настройки рабочих валков.**

Рассматривая производственные и технологические условия АО «ПНТЗ» с точки зрения возможности внедрения технологии РСП были выделены следующие ограничения:

– строительство отдельного обжимного стана РСП с нагревательной печью, холодильником и отдельным зданием требует значительных капитальных вложений и в текущих условиях не эффективно (в здании ЭСПЦ отсутствуют свободные площади).

– необходимость обеспечения загрузки ТПА-160 с трёхвалковым раскатным станом Ассела в условиях возможного снижения спроса на толстостенные трубы машиностроительного сортамента.

– компактность расположения оборудования ТПА-160 (либо другого ТПА АО «ПНТЗ») не позволяет разместить в линии агрегата дополнительный стан РСП.

– необходимость обеспечения собственной предварительно деформированной заготовкой широкого размерного сортамента других ТПА АО «ПНТЗ» и заводов ПАО «ТМК».

Таким образом, исходя из этих ограничений была сформулирована следующая задача – обеспечить прокатку НЛЗ на углах подачи не менее  $18^\circ$  путём проектирования специализированной клетки на основе подхода и опыта создания министанов радиально-сдвиговой прокатки [116, 117]. Новая конструкция клетки должна обеспечивать кинематическое и силовое сопряжение с имеющимся приводом раскатного стана ТПА-160, совместную работу с

оборудованием входной и выходной сторон, и быстрый её монтаж при переходе с прокатки труб на обжатие сплошной заготовки.

Основной задачей, стоявшей при проектировании клетки, являлась стыковка рабочих валков и имеющегося привода раскатного стана ТПА-160. Главный привод раскатного стана – групповой и состоит из электродвигателя, редуктора, нескольких секций трансмиссионных валов и универсальных шпинделей (рисунок 5.1).

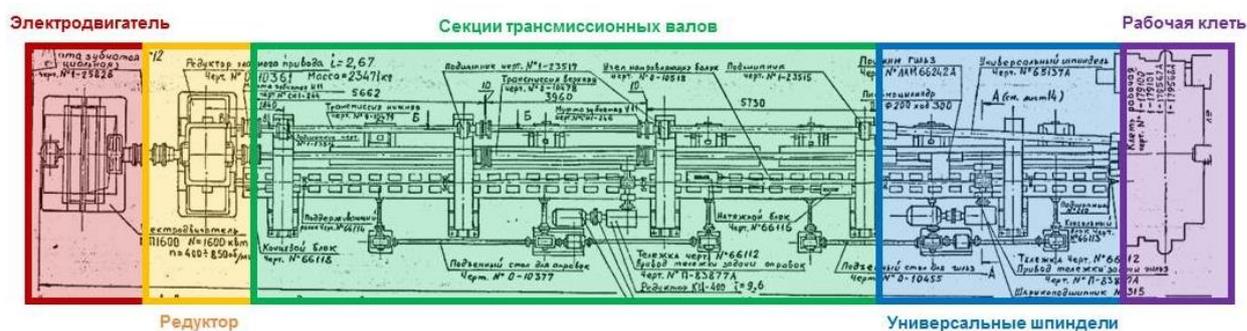


Рисунок 5.1 – Линия главного привода раскатного стана ТПА-160.

До проведения настоящих работ создание клеток РСП с углами подачи  $18^\circ$  и более, совместимых с групповым приводом трёхвалковых раскатных клеток считалось невозможным из-за превышения предельно допустимого угла перекоса в шарнирах шпинделей главного привода (рисунок 5.2) [117]. Согласно рабочим чертежам на универсальный шпindel, их допустимый угол перекоса составляет  $15^\circ$ .

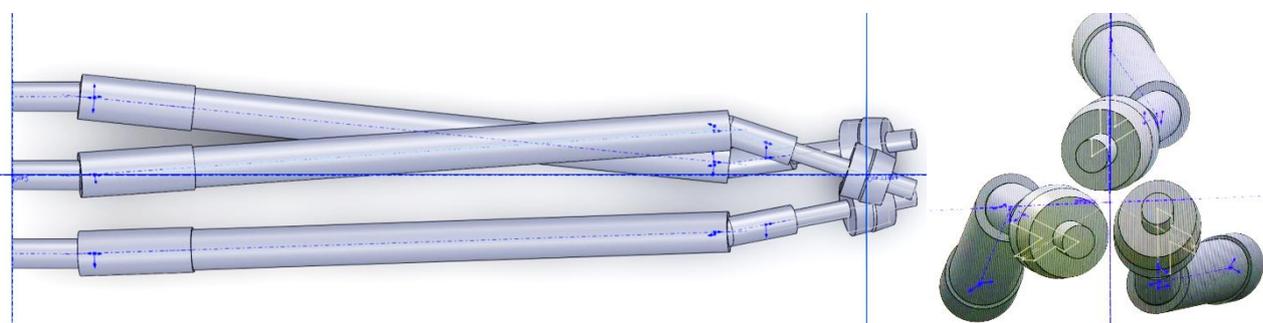


Рисунок 5.2 – Недопустимый угол перекоса в головках шпинделей равный  $21^\circ$  при штатном положении валков при развороте на угол подачи  $18^\circ$ .

Однако, на этапе предварительной проработки было найдено решение [46, 116, 117], позволяющее снизить углы перекоса в шарнирах шпинделей до допустимой величины ( $15^\circ$ ) при повороте валков на угол подачи  $18^\circ$ . Для этого необходимо изменить схему размещения рабочих валков путём их вращения по часовой стрелке относительно оси прокатки на  $60^\circ$  (рисунок 5.3). Конструктивно это можно было выполнить только проектированием новой специализированной клетки. «Зеркальный» способ уменьшения углов перекоса в шпиндельной передаче путём поворота шестеренной клетки предложен в работе [119].

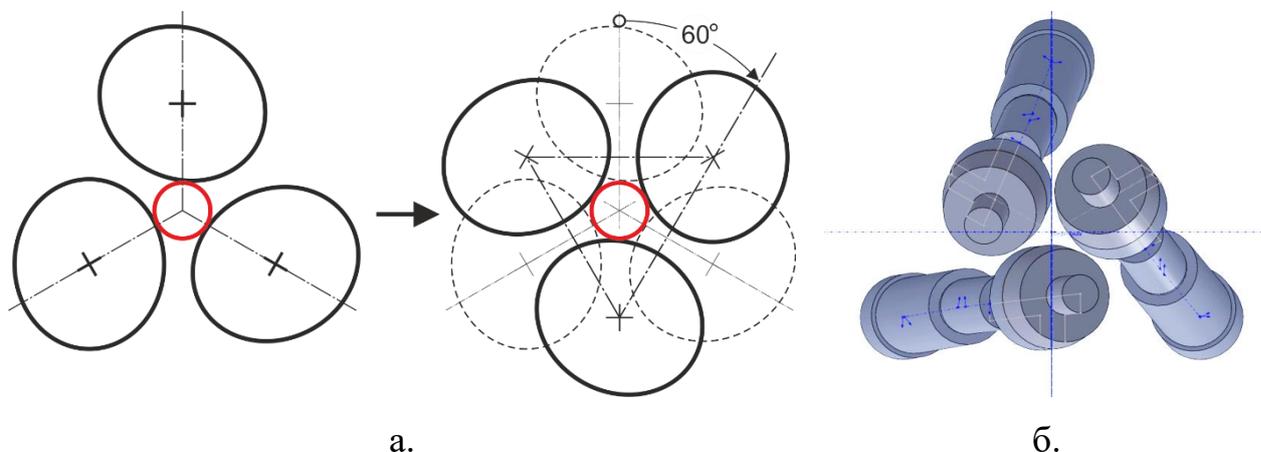


Рисунок 5.3 – Изменение пространственного расположения валков поворотом на  $60^\circ$  вокруг оси прокатки (а) и допустимый угол перекоса ( $\sim 15^\circ$ ) по новой схеме расположения валков при угле подачи  $18^\circ$  (б, предварительная оценка).

По причине того, что перевалка раскатного стана ТПА-160 производится кассетами, а не клетями как, например, на ТПА 50-200 АО «ВТЗ» и недостаточной грузоподъёмности кранов в становом пролёте, специализированная клеть должна размещаться на основании существующей клетки раскатного стана при демонтированных крышке станины и кассетах с рабочими валками, фиксация должна производиться штатным клиновым креплением (рисунок 5.4) [75, 116, 118, 120].

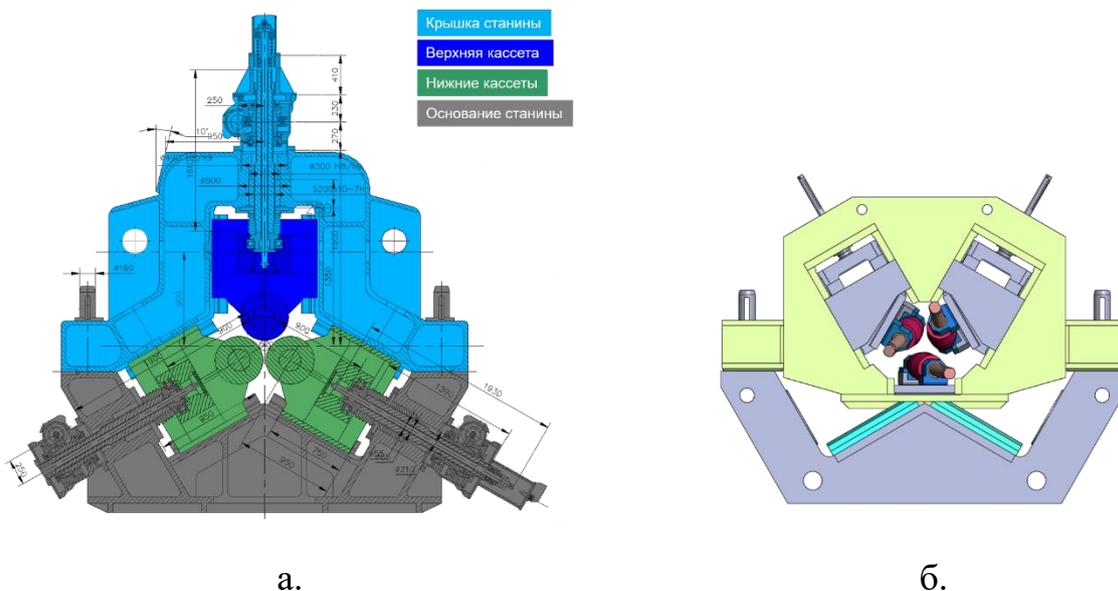


Рисунок 5.4 – Штатная клеть раскатного стана ТПА-160 конструкции ЭЗТМ (а) и схема установки сменной специализированной клетки РСП (б).

Указанные конструктивные особенности предопределили схему настройки валков специализированной клетки (рисунок 5.5) и максимально возможный диаметр рабочего валка 290 мм. В этой схеме один валок расположен снизу и два сверху. Нижний валок закреплен стационарно. Настройка калибра осуществляется перемещением верхних валков по направлению к центру нижнего вдоль линий  $V_{лС}$  и  $V_{пС}$ . При переходе с размера на размер положение нижней образующей выходящего проката (точка  $H_1$ ) остаётся неизменным. Это упрощает перенастройку входной и выходной сторон. В традиционных трёхвалковых станах все валки перемещаются к/от оси прокатки по радиальному направлению. Изменение угла подачи и раскатки в конструкции клетки не предусмотрено, их значения заданы конструктивно, исходя из необходимости стыковки с имеющейся конструкцией привода раскатного стана ТПА-160 [46, 116-118].

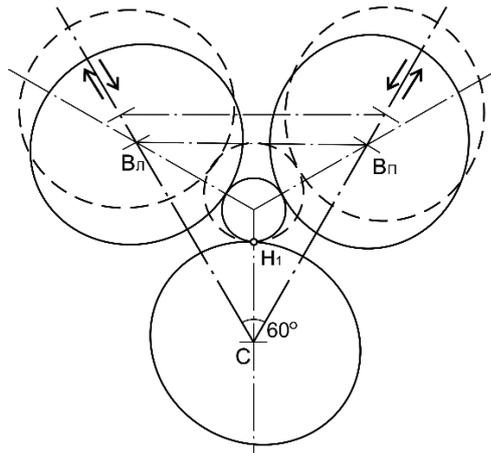


Рисунок 5.5 – Схема настройки валков специализированной клетки РСП.

## 5.2 Общее устройство клетки.

Трёхвалковая рабочая клетка (рисунок 5.6) радиально-сдвиговой прокатки представляет собой массивную сварную станину коробчатой формы 1. В сквозных проёмах размещаются две кассеты в сборе 2 с верхними рабочими валками 3 и кассета 4 с нижним стационарным рабочим валком 5. Нижний валок 5 жестко крепится к опорной пластине 6 для обеспечения фиксированного положения относительно вводной и выходной проводок [75, 118, 120].

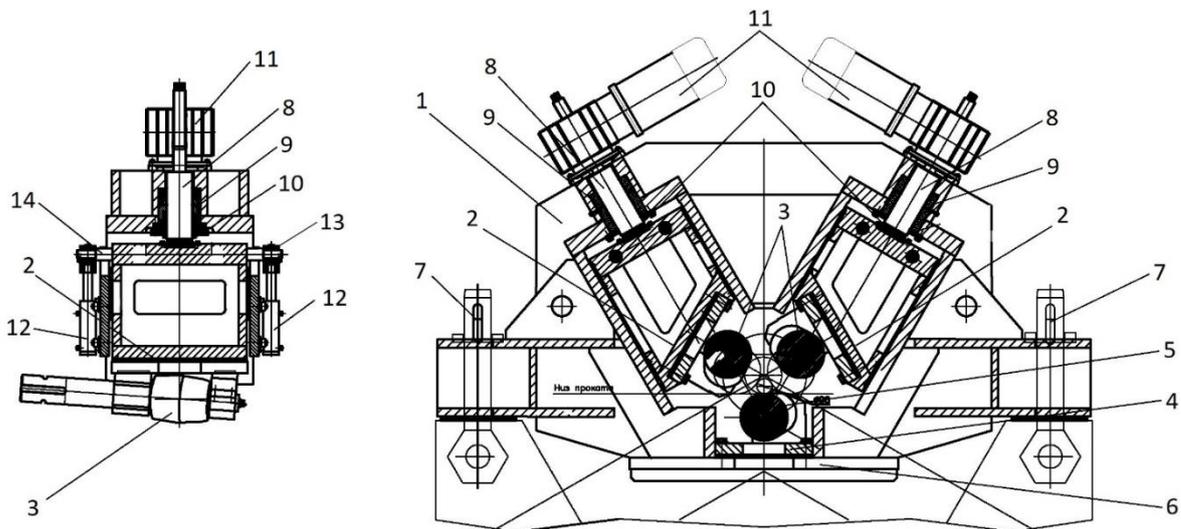


Рисунок 5.6 – Трёхвалковая специализированная клетка РСП.

1 – станина; 2 – кассета в сборе; 3 – верхние валки; 4 – кассета; 5 – нижний валок; 6 – пластина опорная; 7 – ось поворотная (штатной клетки раскатного стана ТПА-160); 8 – винт; 9 – гайка; 10 – подпятник; 11 – мотор-редуктор; 12 – гидроцилиндр; 13 – траверса; 14 – штанга.

Станина клетки состоит из двух вертикальных плит *1* толщиной 50 мм, которые установлены на основании *2*. Эти плиты воспринимают суммарное усилие прокатки, поэтому от них зависит жёсткость конструкции станины (рисунок 5.7). Слева и справа от основных плит имеются одинаковые сварные конструкции в виде тумб *3*, для установки на основание штатной клетки раскатного стана ТПА-160 и фиксации клиньями [75, 118, 120].

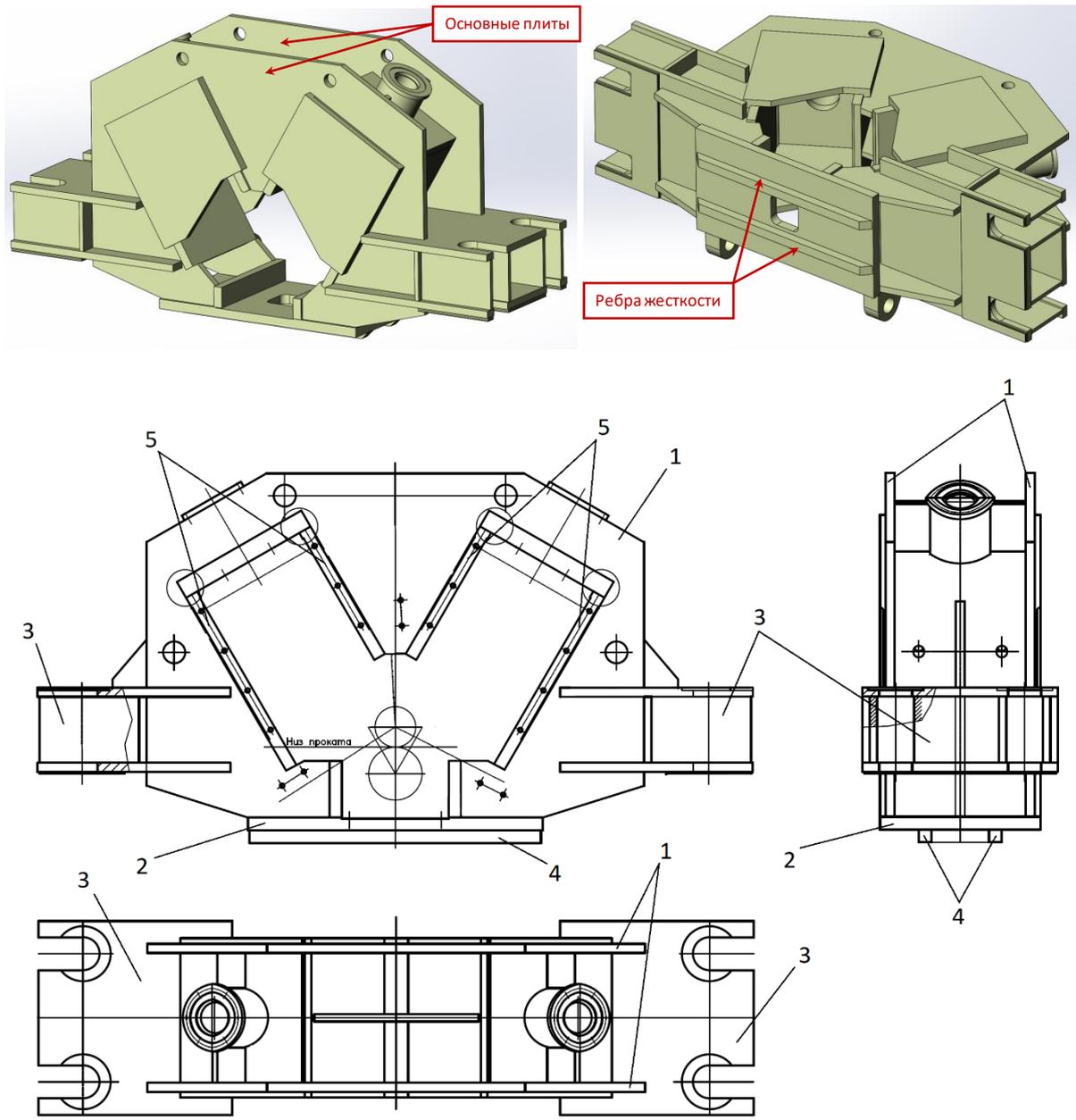


Рисунок 5.7 – Станина специализированной клетки закрытого типа.

*1* – плита; *2* – основание; *3* – тумба; *4* – рёбра; *5* – пластины.

Для придания жёсткости станины основание усилено ребрами жёсткости 4 толщиной 70 мм. Внутри вырезов плит приварены массивные пластины 5 толщиной 65 мм, служащие направляющими для установки кассет валков. В основных плитах выполнены два отверстия для монтажа/демонтажа клетки.

Кассета с рабочим валком состоит из непосредственно кассеты 1 с расточками, в которых установлен рабочий валок 2 с подушками 3 (рисунок 5.8). Подушки 3 рабочего валка фиксируются в расточках кассеты 1 с помощью выступов. Валок 2 смонтирован в подушках 3 на подшипниках скольжения 4. Верхняя часть подушек с расточками под валки крепится к кассете при помощи шпилек 5 и болтов 6. Для ограничения перемещения валка вдоль его оси с торцевой поверхности предусмотрен стопорный винт 7, который поджимает торец валка через шарик скольжения 8. Ограничения проворачивания подшипников скольжения обеспечивается винтами 9 [75, 118, 120].

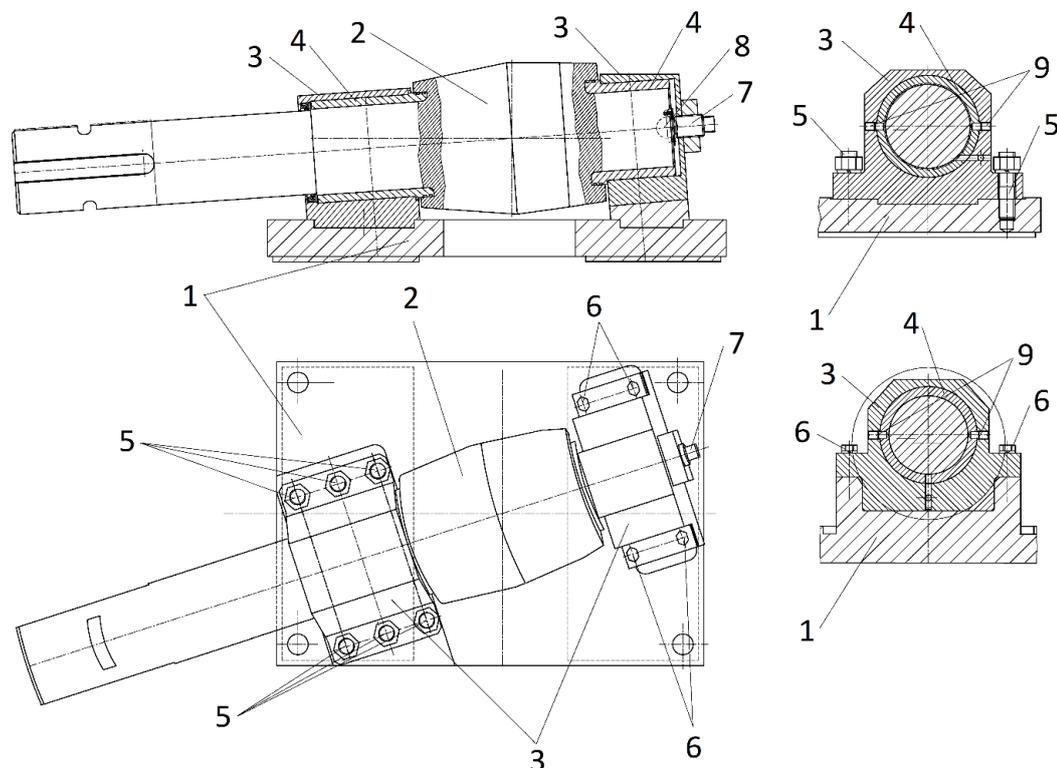


Рисунок 5.8 – Кассета с рабочим валком специализированной клетки.

1 – кассета; 2 – валок; 3 – подушки; 4 – подшипники скольжения; 5 – шпильки; 6 – крепёжные болты; 7 – стопорный винт; 8 – опорный шарик скольжения; 9 –

винты.

Нажимные механизмы верхних кассет 2 рабочих валков 3 выполнены в виде пары винт-гайка 8, 9, подпятника 10. Винты 8 приводятся во вращение от мотор-редукторов 11, смонтированных на верхней части станины 1 (рисунок 5.6).

Для устранения возможных зазоров между кассетой 2, нажимным механизмом 8-10 и станиной 1, каждая верхняя кассета снабжена гидравлическим уравнивающим устройством, состоящим из гидроцилиндра 12, шток которого крепится к траверсе 13 и штангам 14, проходящим через отверстия верхних кассет 2 [75, 118, 120].

Так как нижний валок является стационарным, положение оси прокатки при переходе с одного диаметра заготовки на другой будет изменять свое положение в пространстве. Поэтому для каждого типоразмера заготовки должна быть выполнена соответствующая настройка входной и выходной стороны. На рисунке 5.9 показано взаимное расположение оси прокатки штатной клетки раскатного стана, оси прокатки специализированной клетки при прокатке заготовки диаметром 90 мм (смещение от существующей оси на 35 мм вниз) и оси прокатки специализированной клетки при прокатке заготовки диаметром 190 мм (смещение от существующей оси на 15 мм вверх) [46, 116].

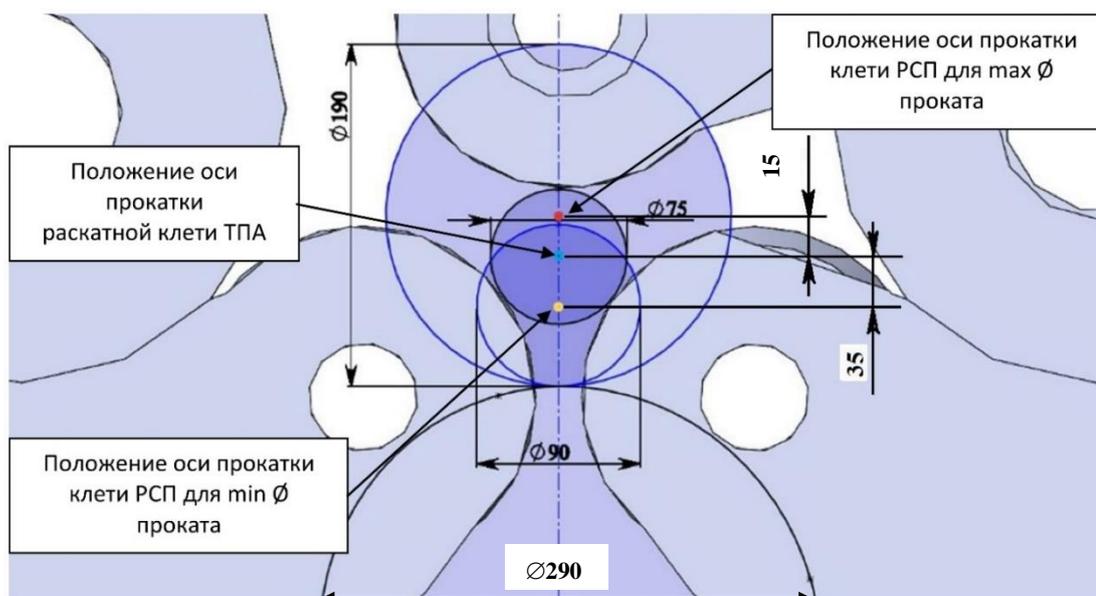


Рисунок 5.9 – Положение оси прокатки для различных диаметров проката (вид со стороны трёхроликового центрователя выходной стороны).

### 5.3 Сопряжение конструкции клетки по углам перекоса в шпиндельных устройствах и по допустимому моменту прокатки.

Далее, для выбранной схемы положения рабочих валков проводилась оценка возможных углов перекоса в зависимости от позиционирования рабочих валков в клетке (угла подачи, угла раскатки, установки рабочих валков на заданный калибр). Анализ проводился в программном комплексе SolidWorks с использованием построенных деталей и узлов клетки в 3D, а также универсального шпинделя раскатного стана ТПА-160 [116, 118]. Для этого по чертежу № 65137А СБ была создана трехмерная модель универсального шпинделя (рисунок 5.10).

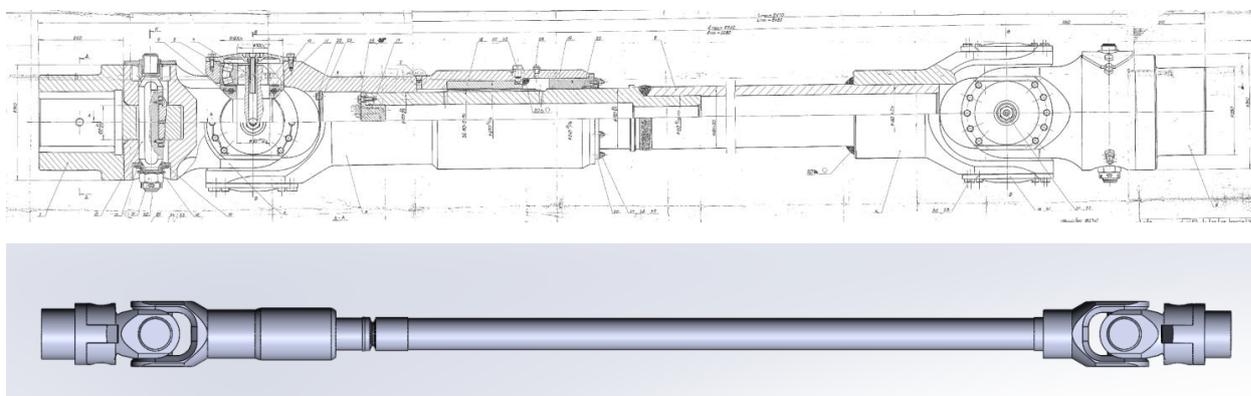


Рисунок 5.10 – Шпиндель универсальный раскатного стана ТПА-160.

Угол раскатки  $\delta$  варьировался от  $2^\circ$  до  $5^\circ$ . Угол подачи  $\beta$  варьировался от  $15^\circ$  до  $20^\circ$ . Разница между минимальным и максимальным диаметром калибра в пережиме валков должна обеспечивать охват размерного сортамента заготовок. С учётом диаметров исходных заготовок, диаметры калибров для анализа выбраны в диапазоне 90...190 мм. Общая модель для проведения анализа представлена на рисунке 5.11. Результаты проведенных измерений представлены в таблице 5.1.

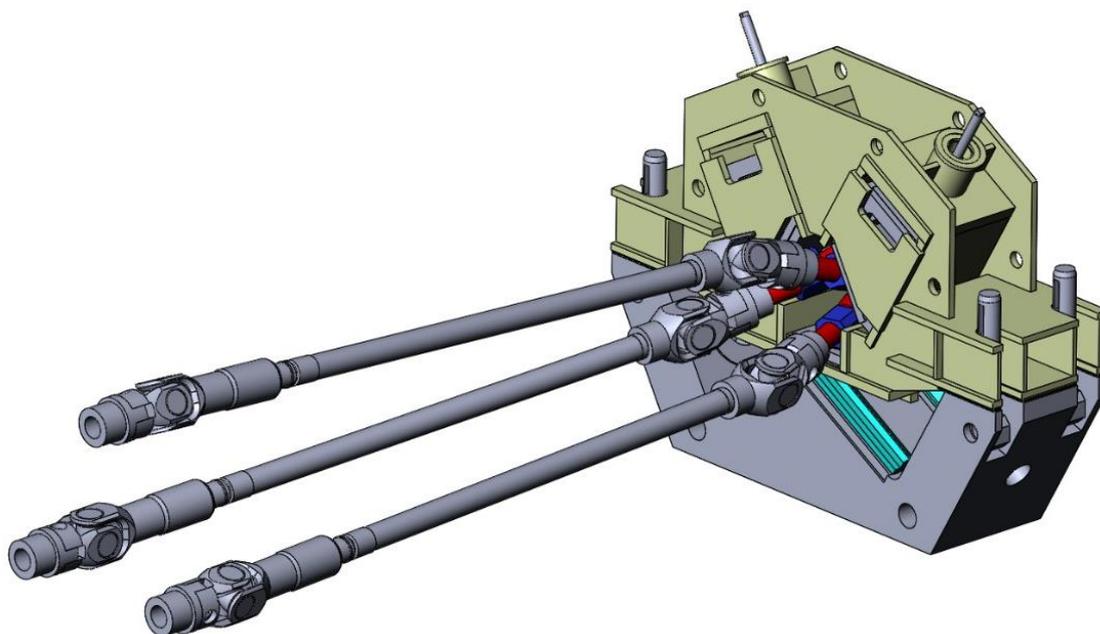


Рисунок 5.11 – Общая твердотельная модель клетки и шпиндельных устройств для проведения анализа.

Таблица 5.1 – Зависимость максимального угла перекоса от варьируемых параметров.

Варьируемый параметр		Максимальный угол перекоса, °
Угол раскатки $\delta$ , ° ( $\beta = 18^\circ, D_k = 100$ мм)	2	14,61
	3	14,68
	4	14,85
	5	15,12
Угол подачи $\beta$ , ° ( $\delta = 5^\circ, D_k = 100$ мм)	15	11,59
	18	15,12
	20	17,52
Диаметр калибра $D_k$ , мм ( $\delta = 5^\circ, \beta = 18^\circ$ )	90	15,10
	100	15,12
	125	15,15
	150	15,19
	170	15,22
	190	15,25

Установлено, что наиболее значимыми фактором, влияющим на пространственный угол перекося в шарнире шпинделя, является угол подачи [116, 118]. При увеличении угла раскатки на  $1^\circ$  угол перекося в шпинделе увеличивается в среднем на  $0,2^\circ$ . При увеличении угла подачи на  $1^\circ$  угол перекося в шпинделе увеличивается более чем на  $1^\circ$ . Как видно из таблицы 5.1, изменение расстояния между валками не оказывает значительного влияния на угол пространственного перекося в шарнире шпинделя. В диапазоне изменения от 90 до 190 мм угол меняется на  $0,15^\circ$ .

С учётом полученных данных измерений и описанных выше условий компоновки валковых узлов решено использовать в конструкции рабочие валки диаметром 290 мм с углом подачи  $\beta = 18^\circ$  и углом раскатки  $\delta = 4^\circ$  [116, 118].

Ещё одним важным критерием оценки при проектировании оборудования является уровень энергосиловых параметров – усилия металла на валок, момента и мощности прокатки [116, 118].

Для выбранных параметров валковых узлов проведена расчётная оценка усилия и момента прокатки заготовок диаметром 156 и 220 мм целевых марок сталей, с целью определить предельные маршруты прокатки по допускаемому крутящему моменту трансмиссии раскатного стана (40 кН·м) и использовать соответствующую максимальному моменту величину усилия для оптимизации конструкции, проведения прочностных расчётов станины специализированной клетки и её элементов.

Усилие прокатки  $P$  рассчитывается по формуле [4, 6-8]:

$$P = F \cdot p_{\text{ср}}, \quad (5.1)$$

где  $p_{\text{ср}}$  – среднее нормальное контактное напряжение, МПа;  $F$  – площадь контактной поверхности заготовки с валком,  $\text{мм}^2$ .

Вычисление момента прокатки  $M$  на одном валке выполняются по формуле [121]:

$$M = 0,5 \cdot P \cdot b_{\text{ср}} \cdot \left(1 + \frac{2R_{\text{В}}}{r_0 + r_{\text{П}}}\right), \quad (5.2)$$

где  $b_{\text{ср}}$  – средняя по очагу деформации ширина контактной поверхности

заготовки с валками, мм;  $R_B$  – радиус валка в пережиме, мм;  $r_0$  и  $r_{II}$  – исходный радиус заготовки и конечный радиус проката, соответственно, мм.

Дополнительно, момент прокатки определяется по формулам, учитывающим поцикловое формоизменение металла в очаге деформации. Для этого, в каждом цикле вычисляются элементарные моменты  $\Delta M(i)$ , необходимые для совершения частного обжатия

$$\Delta M(i) = 0,125 \cdot p_{cp} \cdot S(i) \cdot [b(i) + b(i - 1)]^2 \cdot \left[ 1 + \frac{2R_B}{r(i-1)+r(i)} \right], \quad (5.3)$$

где  $S(i)$  – шаг подачи в  $i$ -ом цикле, мм;  $b(i - 1)$  и  $b(i)$  – ширина контактной поверхности заготовки с валком в начале и конце  $i$ -го цикла, соответственно, мм;  $r(i - 1)$  и  $r(i)$  – минимальные расстояния от оси прокатки до поверхности валка (радиусы заготовки) в начале и конце  $i$ -го цикла, соответственно, мм.

Результирующий момент  $M_{ц}$  считается суммированием элементарных моментов  $\Delta M(i)$  по всем циклам деформации  $N$ :

$$M_{ц} = \sum_{i=1}^N \Delta M(i). \quad (5.4)$$

При этом  $M \geq M_{ц}$ . Данный факт позволяет принять  $M$  за верхнюю оценку крутящего момента, а  $M_{ц}$  – за нижнюю.

На основании обработки экспериментальных данных [65] установлено, что при радиально-сдвиговой прокатке отношение  $p_{cp}$  к сопротивлению деформации находится в пределах 1,10-1,20. Для случая углеродистых и низколегированных сталей  $p_{cp}$  можно принять равным 100 МПа.

Необходимые для дальнейшего расчёта параметры конечного и циклического формоизменения на обжимном участке очага деформации определяются в соответствии с методикой [56, 105] и иллюстрациями на рисунке 5.12.

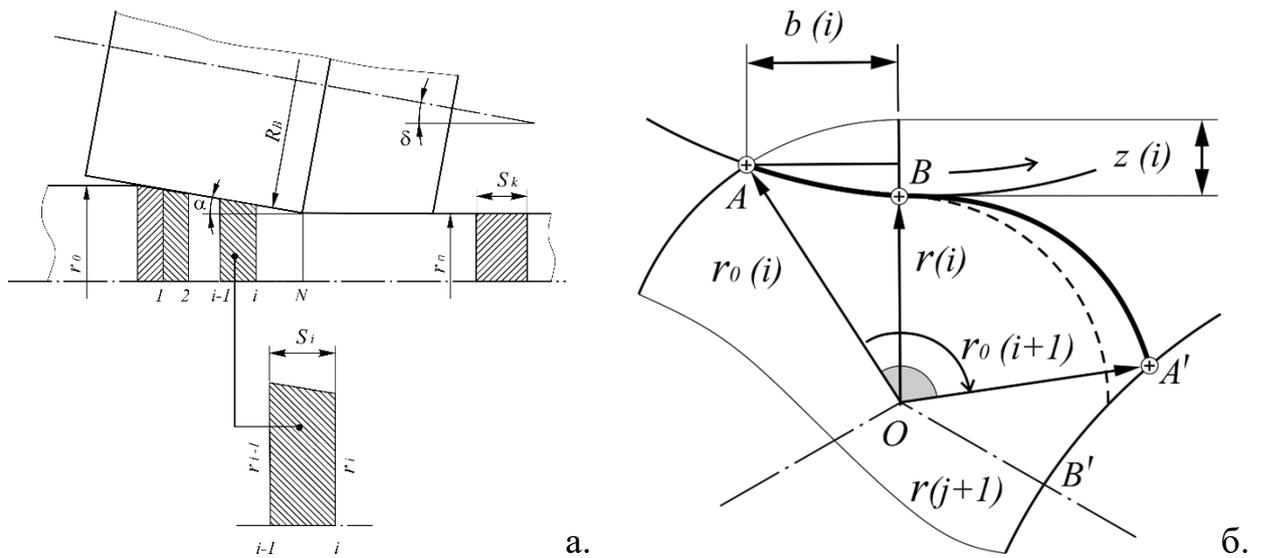


Рисунок 5.12 – Схема циклического формоизменения металла: а – в продольном сечении очага деформации; б – в проекции на плоскость поперечного сечения. Обозначения в тексте.

Значения следующих величин предполагаются заданными:

$r_0$  – исходный радиус заготовки, мм;

$r_{II}$  – радиус проката, мм;

$\beta$  – угол подачи, °;

$\alpha$  – угол конусности очага деформации на обжимном участке, °;

$a$  – коэффициент тангенциальной раскатки на обжимном участке;

$N_k$  – число циклов на калибрующем участке – 3;

$R_B$  – радиус валка в пережиме, мм.

К параметрам конечного формоизменения отнесены: коэффициенты радиального обжатия  $\eta$ , вытяжки  $\mu$ , изменения угла подъёма траектории  $\zeta$ , шаг подачи на выходе из валков  $S_k$ , постоянная очага  $C$ , количество циклов на обжимном участке  $N_{об}$ . Для вычисления данных параметров используются формулы (в порядке перечисления):

$$\eta = \frac{r_0}{r_{II}}; \quad (5.5)$$

$$\mu = \left(\frac{r_0}{r_{II}}\right)^2 = \eta^2; \quad (5.6)$$

$$\zeta = \left(\frac{r_0}{r_{\Pi}}\right)^3 = \eta^3; \quad (5.7)$$

$$C = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (5.8)$$

$$S_{\kappa} = \frac{C \cdot r_{\Pi}}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}; \quad (5.9)$$

$$N_{06} = \frac{1}{C} \cdot (\zeta - 1). \quad (5.10)$$

Далее определяются параметры циклического формоизменения:

– Расстояния от оси прокатки до поверхности валков (от точки О до точки В на рисунке 5.12, б) для  $N_{06}$  циклов деформации  $i = 0, 1, 2 \dots N_{06}$

$$r_1(i) = r_{\Pi} \cdot \sqrt[3]{(N_{06} - i) \cdot C + 1}, \quad (5.11)$$

при этом  $r_0(0) = r_1(0) = r_0$ .

– Расстояния от оси прокатки до точки начала контакта в цикле  $i+1$

$$r_0(i+1) = r_0(i)^{1-a} \cdot r_1(i)^a. \quad (5.12)$$

– Фактическое частное обжатие в  $i$ -ом цикле

$$z(i) = r_0(i) - r_1(i). \quad (5.13)$$

– Шаг подачи на обжимном участке в  $i$ -ом цикле

$$S(i) = \frac{r_1(i-1) - r_1(i)}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (5.14)$$

– Ширина контакта заготовки с валком в конце  $i$ -ого цикла деформации

$$b(i) = \sqrt{\frac{2 \cdot z(i)}{\frac{1}{r_1(i)} + \frac{1}{R_B}}}. \quad (5.15)$$

– Площадь контакта заготовки с валком на  $i$ -м цикле

$$\Delta F(i) = \frac{1}{2} \cdot [b(i) + b(i-1)] \cdot S(i), \quad (5.16)$$

с учётом того, что  $b(0) = 0$ .

– Общая площадь контактной поверхности заготовки с валком

$$F = \sum_{i=1}^{N_{об}+N_{к}} \Delta F(i). \quad (5.17)$$

– Средняя ширина контактной поверхности

$$b_{ср} = \frac{F}{\frac{r_0 - r_{п}}{\operatorname{tg} \alpha} + N_{к} S_{к}}. \quad (5.18)$$

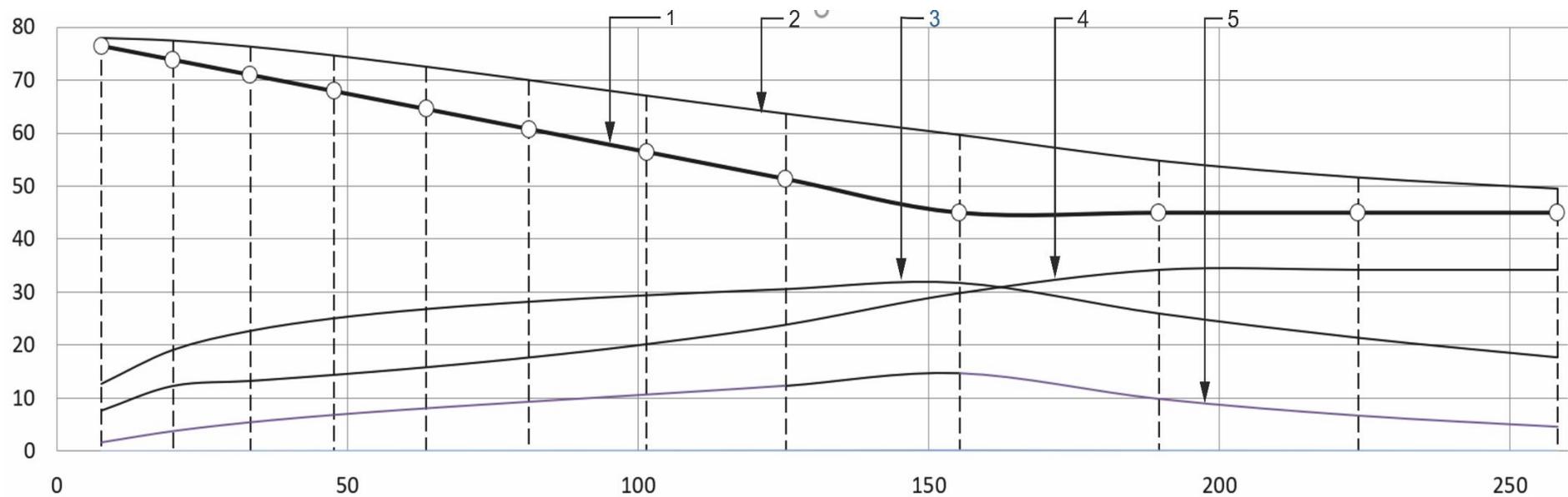


Рисунок 5.13 – Изменение параметров формоизменения металла вдоль оси очага деформации при прокатке заготовки диаметром 156 мм на круг диаметром 90 мм: 1 –  $r_1(i)$ ; 2 –  $r_0(i)$ ; 3 –  $b(i)$ ; 4 –  $S(i)$ ; 5 –  $z(i)$ . Расстояния между пунктирными линиями показывают изменение шагов подачи в очаге деформации.

Расчёты проводились для обжатия заготовки диаметром 156 мм на прутки диаметром 140, 130, 120, 110, 105, 100, 90 мм и для заготовки диаметром 220 мм на прутки диаметром 210, 200, 190, 180, 170, 160 мм. Диаметр валков принят равным 290 мм (радиус валка – 145 мм). Угол подачи равен  $20^\circ$ , угол конусности калибра по очагу деформации на обжимном участке –  $12^\circ$ , коэффициент тангенциальной раскатки на обжимном участке – 0,3, число циклов на калибрующем участке – 3 [46, 116, 118].

Результаты расчёта энергосиловых параметров представлены в таблице 5.3 и на рисунке 5.14.

Таблица 5.3 – Усилие и момент прокатки при прокатке заготовок диаметром 156 и 220 мм с различными обжатиями (коэффициентами вытяжки).

Диаметр, мм		Коэф. вытяжки	Обжатие по радиусу, мм	Усилие на валок $P$ , кН	Момент прокатки $M_{ц}$ , кН·м	Момент прокатки $M$ , кН·м
заготовки	проката					
156	140	1,24	8,0	380,2	10,6	10,8
	130	1,44	13,0	487,3	17,6	17,1
	120	1,69	18,0	558,8	23,2	21,8
	110	2,01	23,0	602,6	27,0	24,7
	105	2,21	25,5	617,1	28,3	25,6
	100	2,43	28,0	625,1	28,9	25,9
	90	3,00	33,0	624,6	28,7	25,4
220	210	1,10	5,0	474,1	9,4	10,0
	200	1,21	10,0	669,1	18,7	19,3
	190	1,34	15,0	837,3	29,1	29,4
	180	1,49	20,0	945,0	37,7	36,5
	170	1,67	25,0	1043,4	45,6	43,4
	160	1,89	30,0	1113,2	51,7	48,3

Для заготовки диаметром 156 мм максимальное усилие при обжатии на диаметр 90 мм составляет порядка 630 кН, а максимальный момент прокатки – менее 30 кН·м. Для заготовки диаметром 220 мм максимальное усилие при

обжатию на диаметр 160 мм будет составлять 1100 кН, а момент прокатки – около 50 кН·м. Так как шпиндельные устройства согласно чертежу № 65137А рассчитаны на максимальный крутящий момент 40 кН·м, то для заготовки диаметром 220 мм при углах подачи 20° возможно обжатие за проход до диаметра не менее, чем 180 мм. Исходя из данного ограничения, максимальное усилие при расчёте напряжений и деформаций проектируемой клетки было выбрано равным 1000 кН [46, 116, 118].

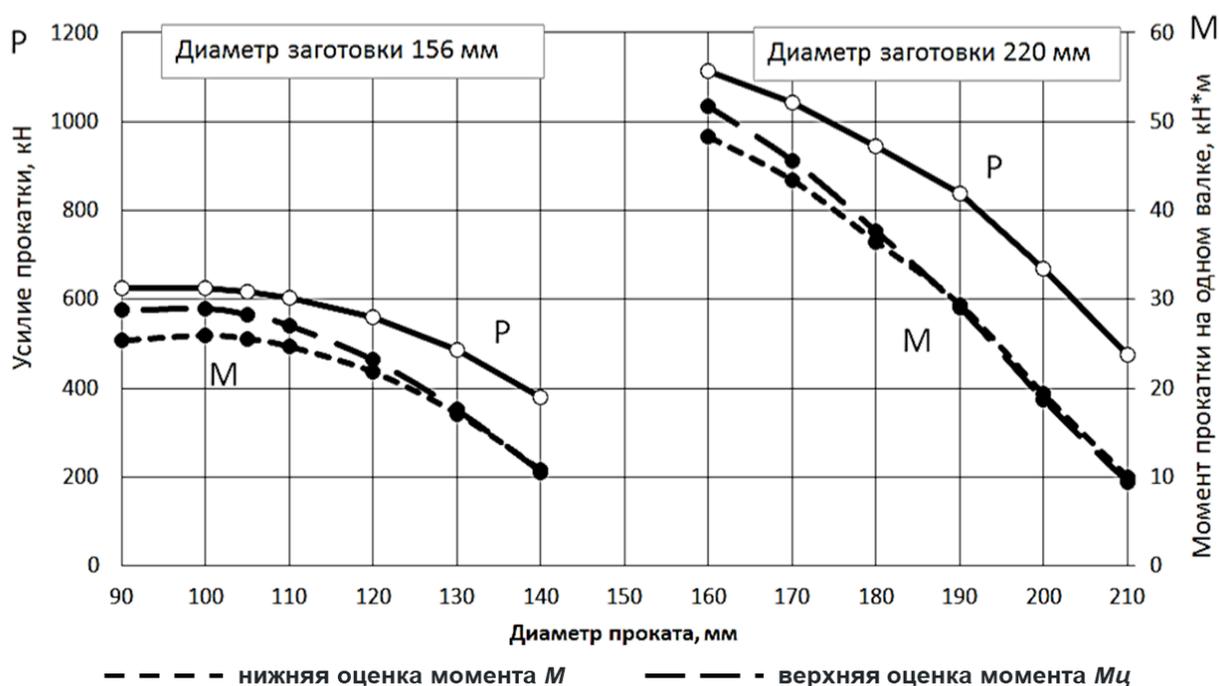


Рисунок 5.14 – Результаты расчёта усилия и момента прокатки заготовок диаметром 156 и 220 мм.

#### 5.4 Компьютерная оценка прочности и жёсткости элементов клетки.

##### Техническая характеристика клетки.

Для проверки конструкторских решений была проведена предварительная оценка жёсткости разработанной конструкции клетки, которая осуществлялась с помощью SolidWorks Simulation.

Жёсткость рабочей клетки – величина упругой деформации рабочей клетки при прокатке. Она характеризуется модулем жёсткости – величиной усилия прокатки, необходимого для единичной деформации. Жёсткость рабочей клетки

определяет фактические отклонения размеров проката от требуемых, т. е. точность проката, и зависит от жёсткости станины, упругости валкового узла, подшипников, нажимного устройства.

Для всех деталей станины из базы данных САПР-программы задан материал сталь 09Г2С, материал валка – сталь 5ХНМ, подшипники – бронза БрА10ЖЗМц2. После этого происходит крепление модели в пространстве. Клеть будет устанавливаться на основание раскатного стана ТПА-160, основными опорными поверхностями будут являться основания боковых рам (рисунок 5.15) [116, 118].

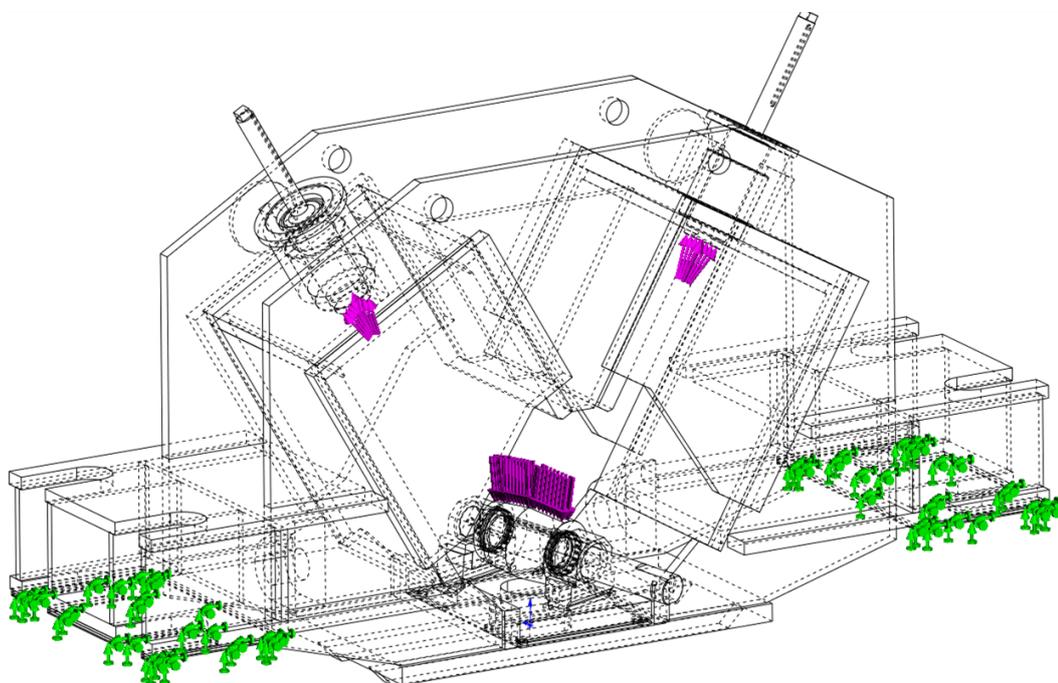


Рисунок 5.15 – Схема фиксации опорных поверхностей станины клетки в пространстве (зелёные стрелки) и приложения усилия к клетке (фиолетовые стрелки).

Далее происходит задание нагрузки в виде усилия, с которым заготовка действует на валки. Согласно расчётным данным, максимальное усилие, действующее на валки, составляет 1000 кН. Для упрощения рассчитываемой модели верхние валки и кассеты исключены из расчёта, усилие от верхних валков приложено к нажимным винтам (рисунок 5.15) [116, 118].

На последнем этапе расчётной модели задаётся сетка конечных элементов. После всех операций по заданию начальных условий виртуального эксперимента, выполняется расчёт конструкции. В результате расчёта получены эпюры напряжений (рисунок 5.16) и абсолютных перемещений станины рабочей клетки (рисунок 5.17). В результате проведённого виртуального эксперимента были получены данные, опираясь на которые можно произвести коррекцию модели на этапе проектирования [46, 116, 118].

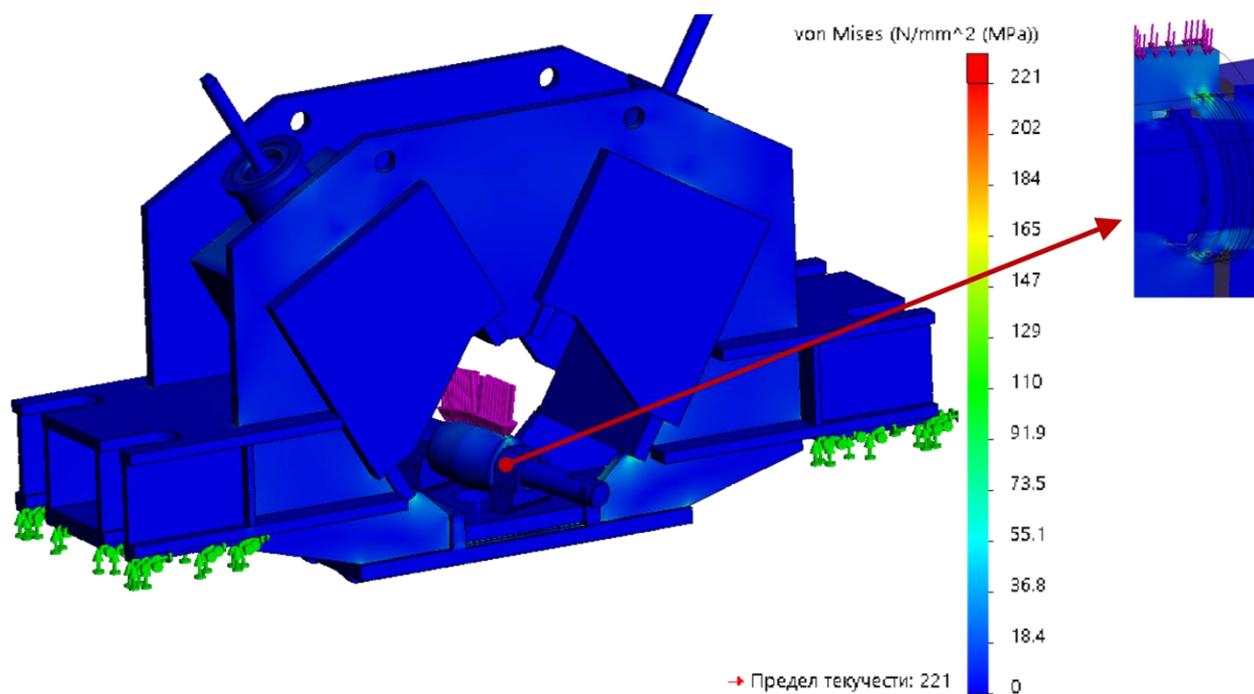


Рисунок 5.16 – Эпюра напряжений станины клетки под нагрузкой.

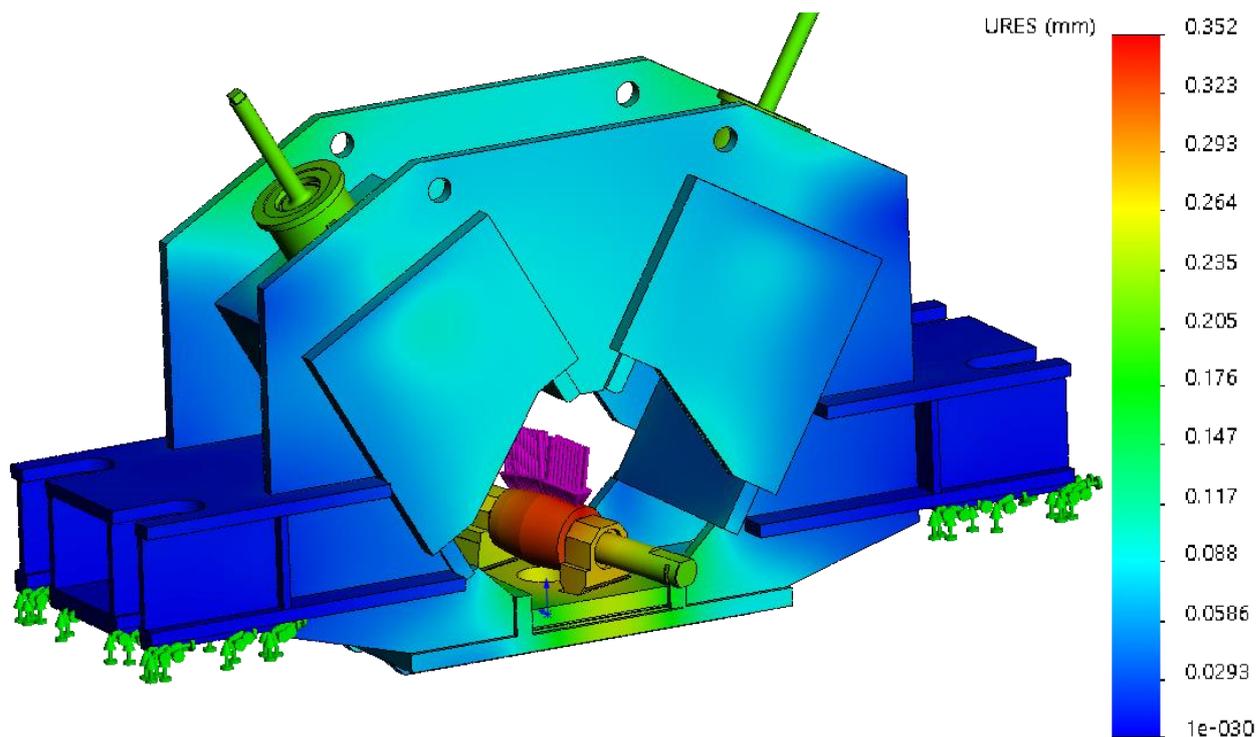


Рисунок 5.17 – Эпюра абсолютных перемещений станины клетки под нагрузкой.

Как видно из полученных данных, максимальные напряжения возникают в валковом узле и составляют 140 МПа. Эти значения возникают в местах приложения нагрузки и острых углах сопряжения деталей. Однако расчётная модель имеет ряд допущений, в частности, не учитываются скругления, фаски и сварные соединения, поэтому стоит предполагать, что в реальности, пиковых напряжений в местах сопряжений деталей станины возникать не будет. Для большей части станины напряжения не превышают 60 МПа, что в 3,7 раза меньше предела текучести для стали 09Г2С (221 МПа), следовательно, прочность станины клетки обеспечена [46, 116, 118].

Максимальные перемещения под действием нагрузки составляют 0,35 мм и возникают на нижнем валке в месте приложения нагрузки. Для уменьшения деформаций нижнего валкового узла основание станины дополнительно усилено ребрами жёсткости. Коэффициент жёсткости калибра составит:

$$c_k = \frac{P_{max}}{\Delta_{max}} = \frac{1}{0,35} = 2,86 \left( \frac{МН}{мм} \right). \quad (5.19)$$

Таким образом, результаты проведённого виртуального эксперимента свидетельствуют о том, что клеть имеет достаточный запас прочности и жёсткости [46, 116, 118].

По итогам выполненной работы были определены окончательные характеристики специализированной клетки РСП, принятые для дальнейшего проектирования (таблица 5.4), выполнена графическая и визуальная привязка к существующему оборудованию входной/выходной стороны и приводу раскатного стана ТПА-160 (рисунки 5.18 и 5.19) [46, 116].

Таблица 5.4 – Краткая техническая характеристика специализированной клетки РСП.

Наименование параметра	Значение
Диаметр исходной заготовки, мм	
диаметр	145-220
длина	2500-3800
Диаметр заготовки после прокатки, мм	
диаметр	90-190
длина	4200-8800
Диаметр вала, мм	290
Длина бочки вала, мм	350
Угол подачи, °	18
Угол раскатки, °	-4
Коэффициент вытяжки за проход	до 3
Максимальное усилие, действующее на валок, кН	1000
Максимальный крутящий момент на валке, кН·м	40
Нажимной механизм	Электромеханический (пара винт-гайка)
Тип привода	Групповой (привод РС ТПА-160)
Мощность привода, кВт	1600
Масса клетки (без учёта вспомогательных механизмов), т	15

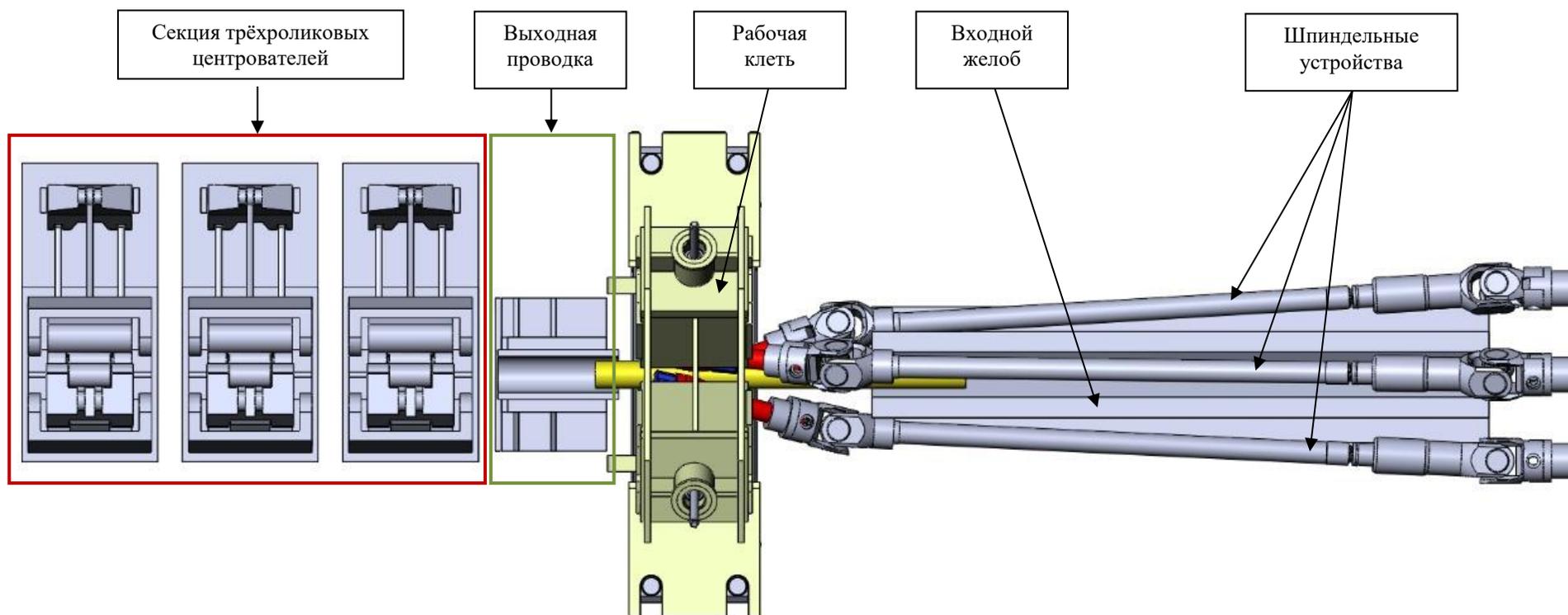


Рисунок 5.18 – Трёхмерная модель сборки рабочей специализированной клетки РСП с основными элементами оборудования входной и выходной сторон раскатного стана ТПА-160 (вид сверху).

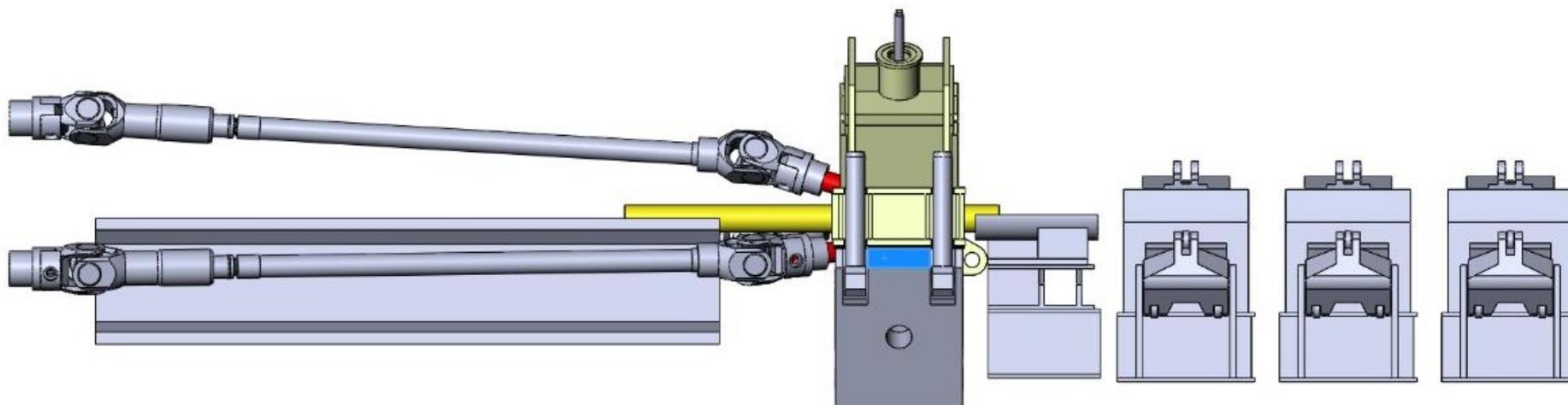


Рисунок 5.19 – Трёхмерная модель сборки рабочей специализированной клетки РСР с основными элементами оборудования входной и выходной сторон раскатного стана ТПА-160 (вид сбоку).

## ГЛАВА 6. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РСП И КЛЕТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ТПА-160.

### 6.1 Порядок освоения клетки РСП, как сменного оборудования раскатного стана.

С учётом полученных в настоящем исследовании результатов АО «Исток МЛ» был разработан необходимый комплект проектно-конструкторской документации, по которой в кооперации с ПАО «НЛМК» было изготовлено оборудование клетки РСП специальной конструкции и поставлено на АО «ПНТЗ».

При переходе на прокатку сплошной непрерывнолитой заготовки с использованием специализированной клетки РСП производится демонтаж крышки станины штатной клетки трёхвалкового раскатного стана совместно с верхней кассетой и валком, а также кассеты нижних валков (рисунок 5.4, а). При этом, нижнее основание станины остается, а клеть РСП устанавливается на него и фиксируется штатным способом (рисунок 6.1) [75, 118, 120].

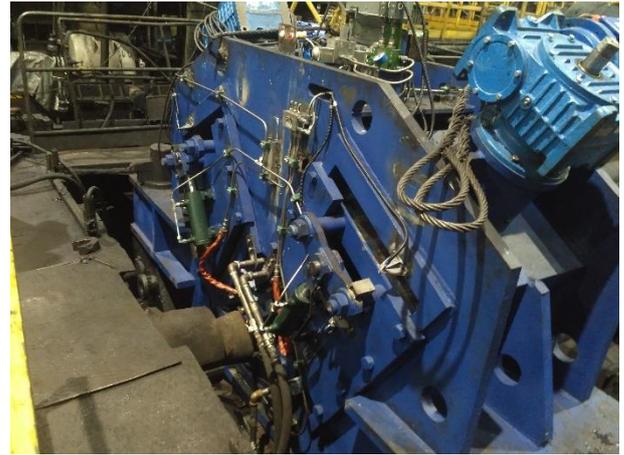
Выходные валы рабочих валков соединяются со шпинделями существующего главного привода. Настройка калибра выполняется с цифрового пульта управления синхронным перемещением двух верхних валков от/к центру нижнего (рисунок 5.5), при этом изменение расстояния  $\Delta H$  между центрами валков связано с изменением диаметра калибра  $\Delta d_k$  формулой

$$\Delta H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Delta d_k = 0,867 \cdot \Delta d_k, \quad (6.1)$$

Перед началом работы для прокатки сплошной заготовки с входной стороны клетки устанавливается входная проводка, которая крепится с одной стороны на приёмный жёлоб заготовок, а с другой стороны непосредственно на станине клетки. Выходная проводка устанавливается по высоте для свободного прохода проката, выходящего из валков. Охлаждение рабочих валков в процессе прокатки и в паузах обеспечивается технической водой оборотного цикла [120].



а.



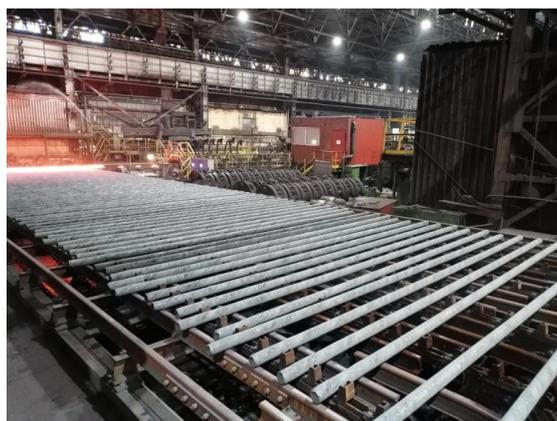
б.

Рисунок 6.1 – Общий вид специализированной клетки РСР, установленной в линии раскатного стана ТПА-160 с входной (а) и выходной стороны (б).

Исходная НЛЗ, нагретая в кольцевой печи ТПА-160 до температуры прокатки (рисунок 6.2, а), по транспортным устройствам передаётся на входную сторону раскатного стана в приёмный жёлоб. Задача заготовки в валки клетки осуществляется при помощи существующих механизмов задачи гильз раскатного стана. Заготовка захватывается валками и деформируется ими, перемещаясь по геликоидальной траектории. При этом диаметр заготовки уменьшается в соответствии с диаметром калибра, установленного между рабочими валками, а длина заготовки увеличивается пропорционально отношению площадей поперечного сечения заготовки до и после деформации (коэффициента вытяжки  $\mu$ ). Во время прокатки задний конец заготовки центрируется на входной стороне при помощи входной проводки, а передний конец заготовки – при помощи имеющихся механизмов трёхроликовых центрователей, настроенных в соответствии с диаметром проката. После выхода прокатанной заготовки из валков она при помощи существующих механизмов выходной стороны раскатного стана (тянущих роликов, подъёмно-приводных отводящих рольгангов и рычагов) передаётся с линии прокатки далее на отводящий рольганг и охлаждающий стол. После этого клетка РСР и все механизмы готовы к прокатке следующей заготовки [120].



а.



б.

Рисунок 6.2 – Непрерывнолитая заготовка на выдаче из нагревательной печи (а) и деформированные заготовки после РСП на охлаждающем столе ТПА-160 (б).

Согласно проектной документации завершающим этапом ввода клетки в эксплуатацию предусмотрено проведение холодных испытаний (испытаний без нагрузки), горячих испытаний (испытаний под нагрузкой) и гарантийных испытаний с целью доказательства, что оборудование отвечает характеристикам технологического процесса, заявленным в документации.

В ходе холодных испытаний произведена прокрутка специализированной клетки РСП с постепенным увеличением частоты вращения валков до максимальных рабочих значений 75-90 об/мин (200-240 об/мин – частота вращения якоря двигателя), контролем температурного режима подшипниковых узлов, отладкой работы системы подачи густой смазки и других систем.

По завершению холодных испытаний приступили к горячим испытаниям. В процессе горячих испытаний проводили прокатку НЛЗ из углеродистых марок стали 20 и 45 диаметром 156 мм длиной 3800 мм на диаметр 130 мм. Суммарно в период горячих испытаний было прокатано 177 заготовок (100 т). Токовая нагрузка на электродвигатель главного привода раскатного стана в период горячих испытаний составляла 1,2-1,4 кА, что значительно ниже максимально допустимой токовой нагрузки при прокатке сплошной заготовки (2,4 кА, что соответствует предельному крутящему моменту прокатки – 40 кН·м). Частота вращения якоря электродвигателя задавалась в пределах 180-200 об/мин под

нагрузкой. Для прокатки были использованы рабочие валки с пусковым вариантом калибровки (1, чертёж 2-219192, рисунок 3.6), построение которой направлено на максимальное сокращение площади контактной поверхности с целью минимизации энергосиловых параметров на начальном этапе освоения.

В ходе горячих испытаний установлено:

- не превышение максимальных крутящих моментов для трансмиссии и токовых нагрузок на электродвигателе главного привода раскатного стана;
- штатное функционирование электромеханических, гидравлических систем и средств автоматизации под нагрузкой;
- соответствие оборудования назначению и оперативных последовательностей работы оборудования технологическому процессу.

В дальнейшем, для подтверждения возможности получения регламентированных характеристик работы оборудования специализированной клетки (производительности максимальной часовой и общей производительности, расходного коэффициента металла, энергосиловых параметров) и качественных показателей получаемой заготовки (геометрических параметров, качества поверхности и макроструктуры) были проведены гарантийные испытания.

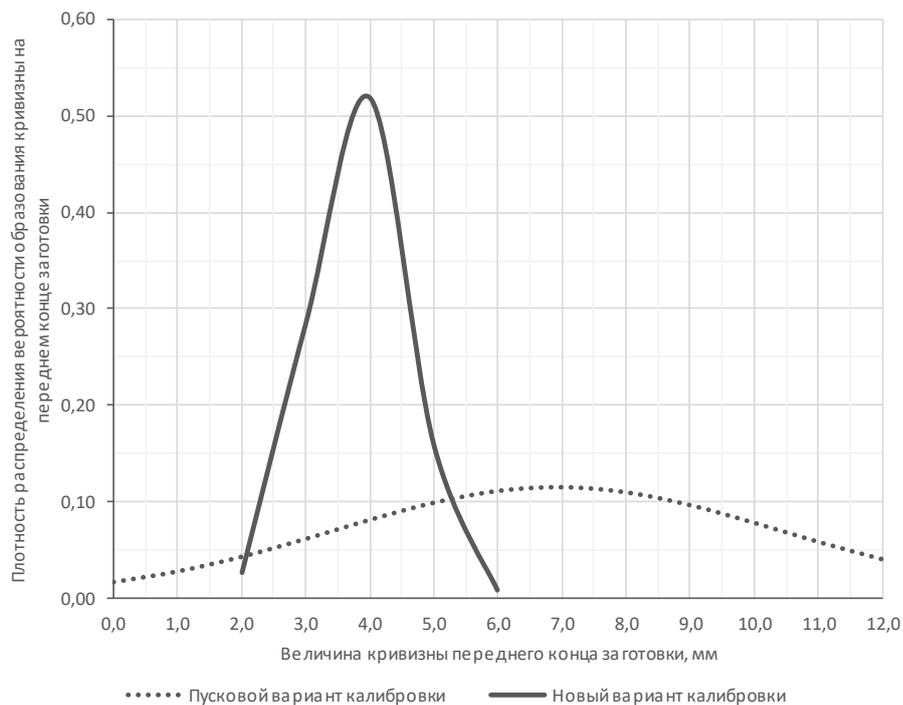
В период проведения гарантийных испытаний было прокатано суммарно 440 т (802 шт.) НЛЗ диаметром 150, 156 и 220 мм из сталей 12Х1МФ и 09Г2С. Режимы прокатки заготовки представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Режимы прокатки заготовки на специализированной клетки РСР раскатного стана ТПА-160 во время гарантийных испытаний.

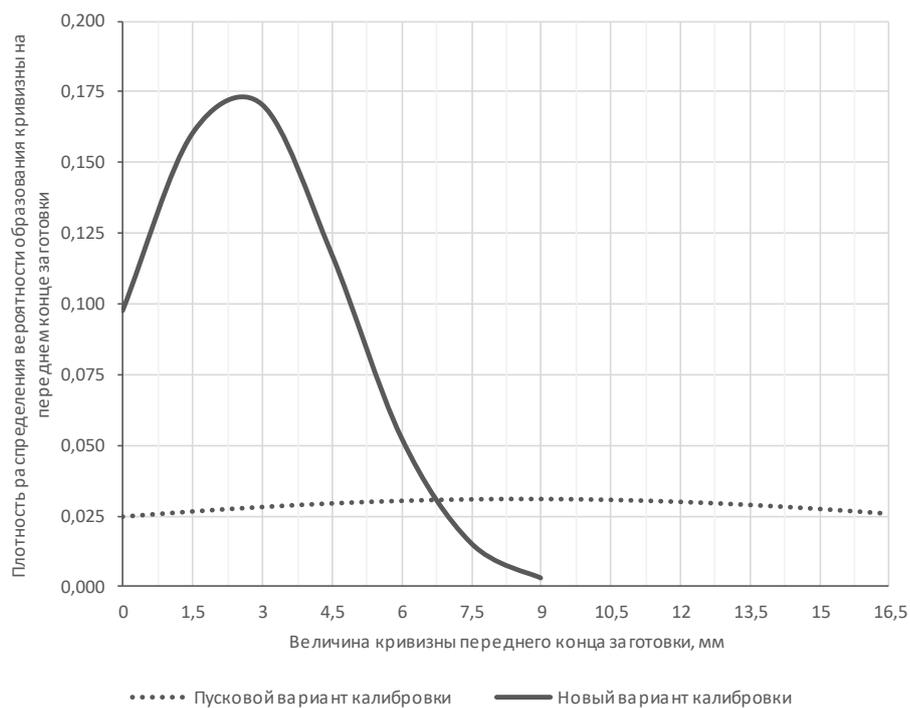
Вариант калибровки валков	Марка стали	Диаметр исходной заготовки, мм	Диаметр проката, мм	Коэф. вытяжки	Токовая нагрузка, кА	Частота вращения валков, об/мин	Количество прокатанной заготовки	
							шт.	т
1	12Х1МФ	156	105	2,21	2,0-2,1	220-250	210	99
1	09Г2С	220	190	1,34	1,9-2,0	100	51	56
2	12Х1МФ	150	105	2,04	1,9-2,1	200	415	185
2	12Х1МФ	156	105	2,21	2,0-2,2	200	72	38
2	09Г2С	220	190	1,34	2,3-2,5	150	54	62
							<b>802</b>	<b>440</b>

После охлаждения проводили оценку качества заготовки опытной партии, а именно производили осмотр поверхности, измерение диаметра заготовки в 5 сечениях по длине в двух взаимно перпендикулярных точках (на расстоянии 100 и 500 мм от концов, и в середине заготовки), а также кривизны переднего конца на длине 1 м.

По результатам измерений пусковой вариант калибровки валков ожидаемо не позволил обеспечить требуемую величину кривизны переднего конца заготовки, так кривизна передних концов 78% заготовок  $\varnothing 105$  мм превышала требования (не более 5 мм) и составляла от 5 до 12 мм (рисунок 6.3, а). Качество поверхности и овальность при этом соответствовала требованиям (не более 3 мм) и в среднем составляла 0,25-1,5 мм. Для  $\varnothing 190$  мм результаты по кривизне передних концов получены схожие – 80% всех заготовок имели максимальную величину изгиба переднего конца от 5 до 16 мм (рисунок 6.3, б).



а.



б.

Рисунок 6.3 – Гистограммы распределения величины кривизны переднего конца заготовки опытных партий: а –  $\varnothing 105$  мм; б –  $\varnothing 190$  мм.

Кроме того, на всех заготовках  $\varnothing 190$  мм отмечен углублённый винтовой след. Наличие данного винтового следа послужило причиной повышенной овальности заготовок данной партии, которая достигала величины 2-12 мм, при максимально допустимой не более 4 мм. Также стоит отметить, что при прокатке НЛЗ  $\varnothing 220$  мм на пусковом варианте калибровки не удалось поднять частоту вращения якоря двигателя свыше 100 об/мин в связи с пробуксовкой валков.

С целью обеспечения требуемых геометрических параметров получаемой заготовки (для всех диаметров) и увеличения тянущей способности валков (для заготовки диаметром 220 мм) было проведено совершенствование калибровки валков. Изменения касались конфигурации калибрующего участка валка и увеличения его длины, которая в конечном счёте увеличивает площадь контакта. Модернизированный вариант калибровки (2, чертёж 2-220001-01, рисунок 4.1) был выполнен переточкой пускового комплекта валков, диаметр валков при этом уменьшился до 280 мм. Изменение положения оси прокатки было скорректировано установкой дополнительных прокладок под кассету нижнего валка толщиной 10 мм.

По результатам измерений заготовок  $\varnothing 105$  мм, прокатанных на модернизированном варианте калибровки, лишь на одной заготовке отмечена кривизна переднего конца равная 6 мм, кривизна передних концов остальных заготовок укладывается в диапазон от 2 до 5 мм (рисунок 6.3, а). Качество поверхности и овальность при этом соответствовала требованиям и в среднем составляла 0,25-0,5 мм. Наружный диаметр заготовки по всем измерениям укладывался в диапазон 104,5-106,0 мм. Аналогичные результаты и для заготовки  $\varnothing 190$  мм – по всем контролируемым параметрам заготовка соответствовала предъявляемым требованиям: кривизна переднего конца составила 1,15-5,0 мм (рисунок 6.3, б), овальность по всем измерениям – не превышала 1,0 мм, наружный диаметр находился в диапазоне 190,0-192,0 мм.

Таким образом, новый вариант калибровки обеспечил получение заданных геометрических характеристик заготовки (кривизны концов и овальности

диаметра), при этом повышение энергосиловых параметров не превысило 10-15% от исходной величины. Рациональность нового варианта калибровки была подтверждена при анализе очага деформации на недокатанном образце заготовки  $\varnothing 145$  мм (рисунок 6.4).

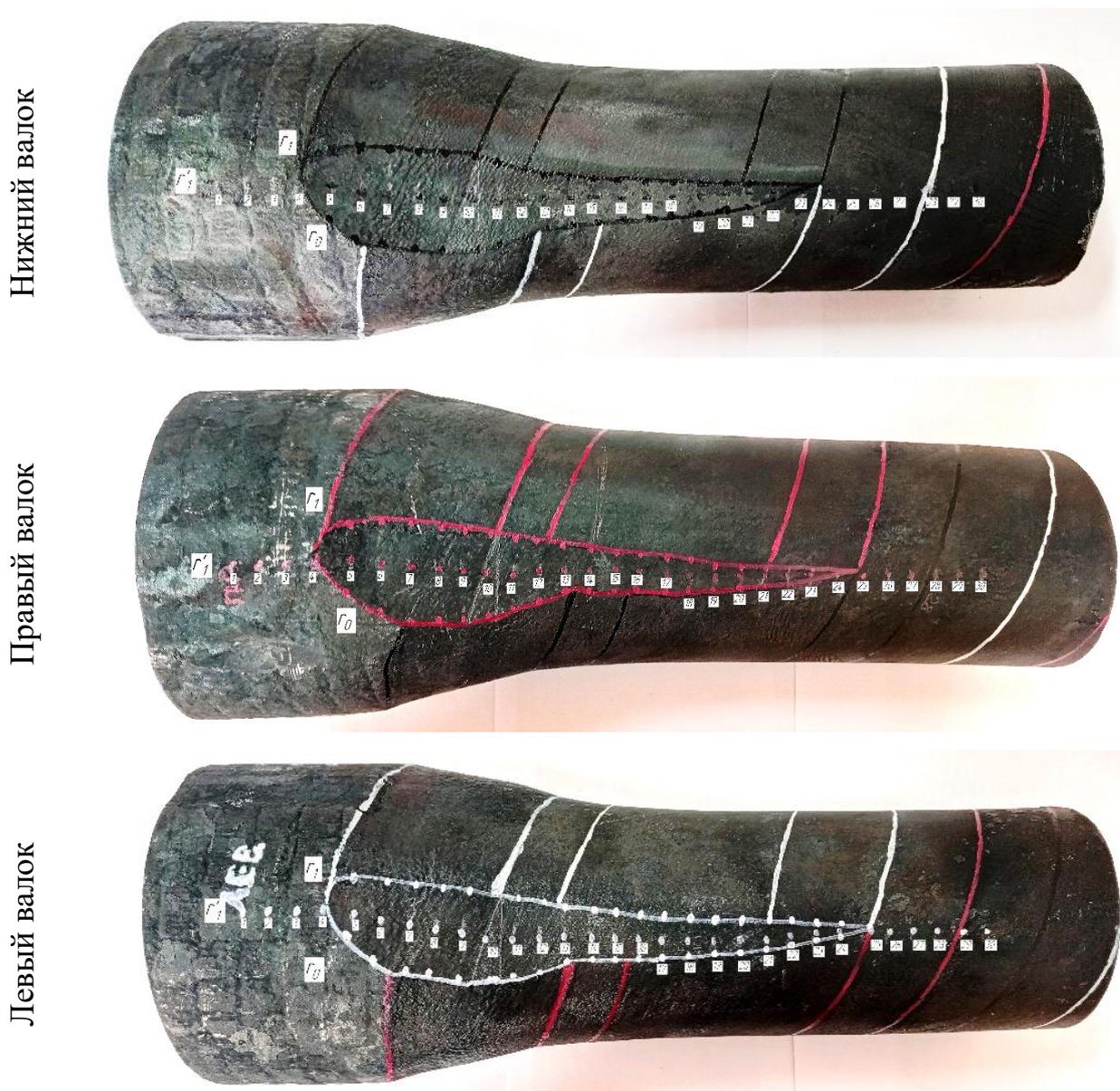


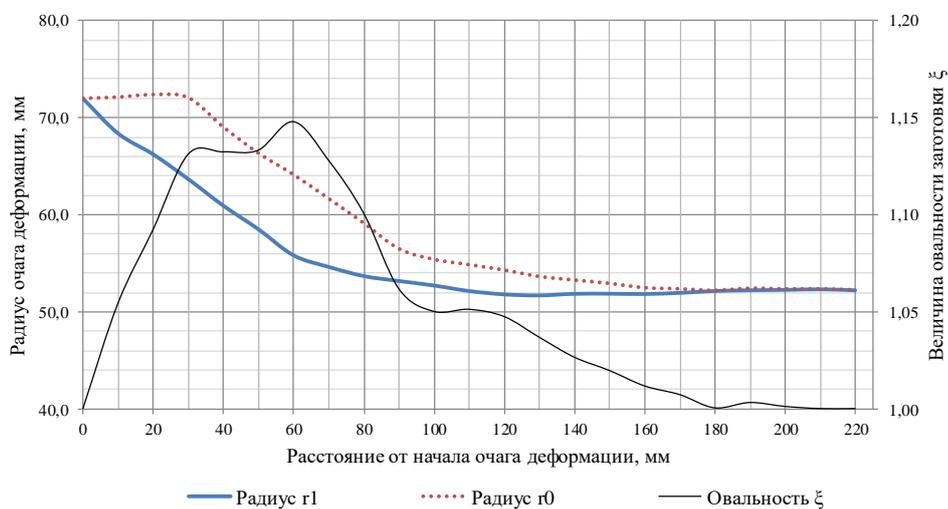
Рисунок 6.4 – Недокатанный образец заготовки  $\varnothing 145 \rightarrow \varnothing 105$  мм на специализированной клети РСП (сталь СТ0, вариант калибровки 2).

Определение радиусов очага деформации  $r_0$  и  $r_1$  на контакте металла с валками на недокатанном образце, соответствующие точкам А и В поперечного сечения (рисунок 5.12, б), производилось по методике работ [28, 112] через

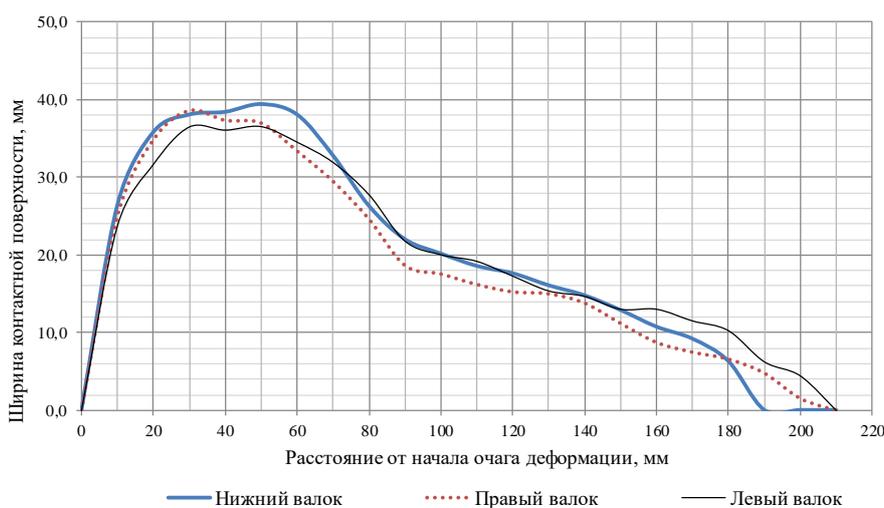
заданные интервалы длиной 10 мм. По результатам измерений были получены графики распределения радиусов  $r_0$  и  $r_1$  по длине очага деформации (рисунок 6.5, а) и ширины контактной поверхности  $b$  с каждым валком (рисунок 6.5, б). Кроме того, расчётным путём определена величина овальности заготовки в каждом измеряемом сечении по формуле

$$\xi = \frac{r_0}{r_1}, \quad (6.2)$$

построен график его изменения по длине очага деформации, из которого видно, что максимальная овальность заготовки составляет 1,15 и приходится на конец обжимного участка.



а.



б.

Рисунок 6.5 – Распределение радиусов  $r_0$  и  $r_1$ , овальности  $\xi$  (а) и ширины контактной поверхности  $b$  (б) заготовки с валками по длине очага деформации, полученные измерением недокатанного образца.

Обязательным этапом проведения гарантийных испытаний было исследование макро- и микроструктуры непрерывнолитой заготовки до и после прокатки на специализированной клетке РСП. По результатам исследования все параметры микроструктуры заготовки после прокатки соответствовали требованиям технического задания и нормативной документации. Если центральная пористость исходных НЛЗ Ø150 и 156 мм из стали 12Х1МФ достигает 3 балла (а на отдельных темплетах отмечено его превышение), то на заготовке Ø105 мм балл центральной пористости снижается в среднем до 1-2. Центральная пористость заготовки Ø190 мм из стали 09Г2С после прокатки находится в пределах 0,5-1 балла.

Исследование микроструктуры заготовки из стали 12Х1МФ, прокатанной на по маршруту Ø156→Ø105 мм, показали получение сравнительно однородной структуры по всему сечению заготовки (рисунок 6.6). Величина процента остаточной литой структуры и характер её распределения схожий с тем, что был зафиксирован при проведённых в главе 2 исследованиях.

Успешное завершение всех пуско-наладочных испытаний свидетельствовали о полном выполнении заявленных характеристик клетки РСП при работе под нагрузкой в производственном цикле. Данный факт был подтверждён подписанием Акта сдачи-приёмки оборудования специализированной клетки РСП раскатного стана ТПА-160, на основании которого данная единица оборудования была введена в эксплуатацию и подготовлено изменение для внесения соответствующего раздела в технологическую инструкцию ТИ ПНТЗ-ТР.ТБ-311 «Производство перекатанной (обжатой) непрерывнолитой заготовки на ТПА-160».

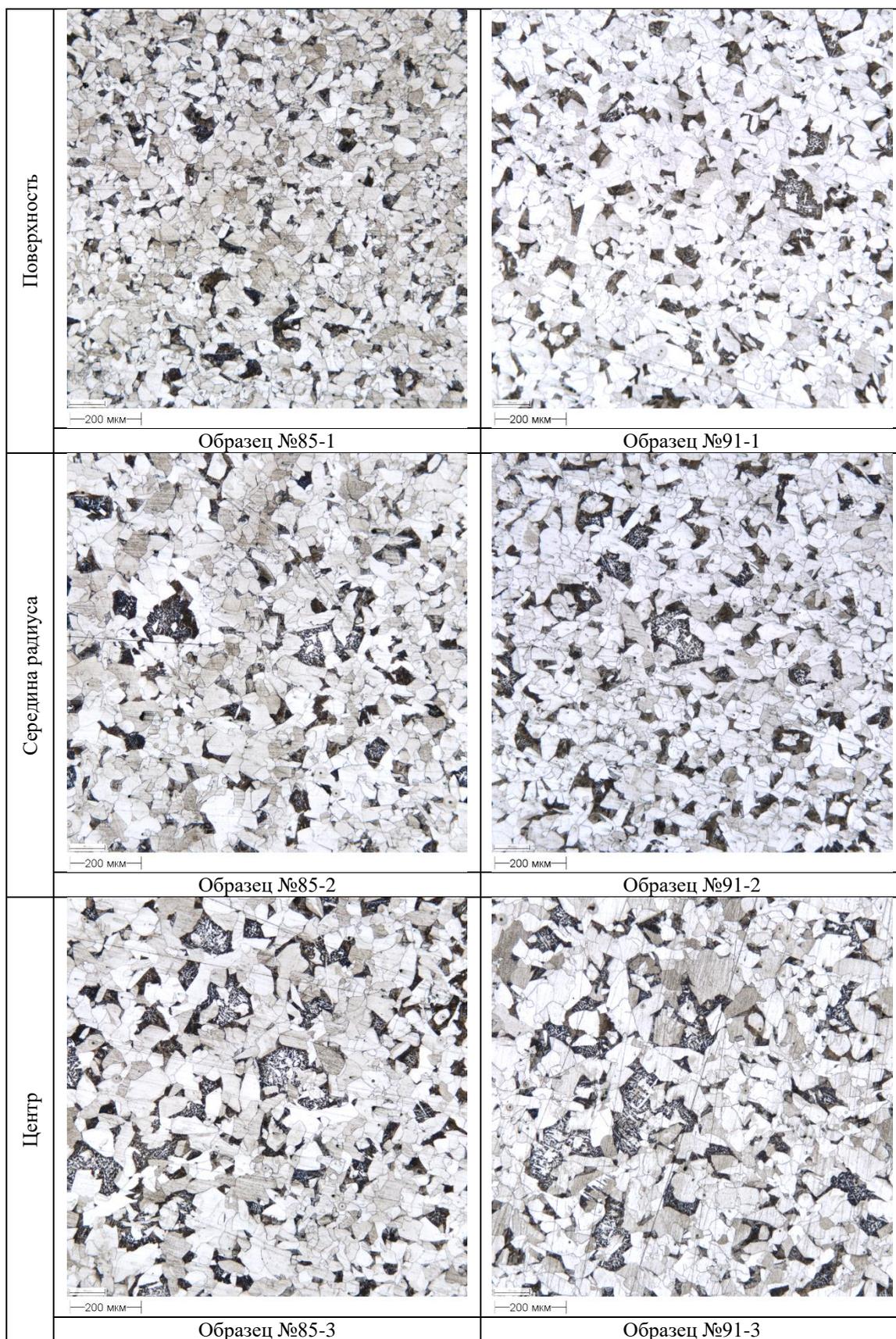


Рисунок 6.6 – Результаты исследования микроструктуры образцов заготовки из стали 12X1МФ (плавка 0R9707) после прокатки на специализированной клети РСП по маршруту  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$  мм, ( $\times 100$ ).

## 6.2 Совершенствование режима деформации НЛЗ в сочетании «РСП – прошивка».

Установка клетки РСП открывает дополнительные возможности совершенствования технологии путём рационального распределения деформации в связке «РСП – прошивка». Сопоставлены три варианта:

$$\begin{array}{c} \text{Вариант 1 (базовый)} \\ \text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 105 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15. \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Вариант 2 (промежуточный)} \\ \text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 100 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15. \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Вариант 3 (предлагаемый)} \\ \text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 95 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15. \end{array}$$

В качестве параметров сравнения выбраны:

- угол  $\beta_0$  подъёма траектории на поверхности прошиваемой заготовки;
- число циклов перед носком оправки  $N_0$  в процессе прошивки;
- суммарный эквивалентный (приведённый) коэффициент вытяжки  $\mu_{\text{ЭКВ}}^{\Sigma}$

за передел «РСП + прошивка».

Сравнение выполнено с помощью адаптированной аналитической методики траекторно-скоростного анализа (разработка НИТУ «МИСИС») [123-125] с последующей экспериментальной проверкой в условиях ТПА-160 и промышленным освоением улучшенного варианта. Выбор методики обусловлен безразмерностью факторов процесса винтовой прокатки, входящих в расчётные формулы и достаточно высокой общностью подхода, основанном на законе постоянства объёма. Некоторые аналитические соотношения из источников [123-125] отредактированы для удобства применения, с сохранением тождественности.

В представленных ниже формулах приняты следующие обозначения:

$d_0, d_1$  – диаметр исходной заготовки и прошиваемой гильзы (или прутка), соответственно;

$\beta_0, \beta_1$  – угол подъёма траектории на поверхности прошиваемой заготовки и прошитой гильзы (или прутка), соответственно, °;

$s$  – толщина стенки прошиваемой гильзы;

$\eta_{\text{прош}}$  – коэффициент обжатия по диаметру при прошивке;

$\frac{d_1}{s}$  – параметр тонкостенности;

$\mu_{\text{РСП}}, \mu_{\text{прош}}$  – коэффициент вытяжки при РСП (определяемый по формуле (5.6)) и прошивке, соответственно;

$T_\beta$  – коэффициент подъёма траектории при прошивке;

$\varepsilon_i^{\text{РСП}}, \varepsilon_i^{\text{прош}}, \varepsilon_i^\Sigma$  – интенсивность деформации при РСП, прошивке и суммарная, соответственно;

$\mu_{\text{ЭКВ}}^{\text{прош}}, \mu_{\text{ЭКВ}}^\Sigma$  – эквивалентный коэффициент вытяжки при прошивке и суммарный, соответственно;

$N_0$  – число циклов перед носком оправки в процессе прошивки;

$\varepsilon_0$  – обжатие перед носком оправки;

$\alpha$  – угол конусности очага деформации на участке прошивки, °;

$C$  – постоянная очага деформации, определяемая по формуле (5.9);

$k$  – количество валков прошивного стана;

$W_{\text{спл}}$  – объём части очага деформации от входа до носка оправки, мм<sup>3</sup>;

$W_{\text{под}}$  – объём подачи при прошивке, мм<sup>3</sup>.

В таблице 6.2 приводится список основных формул расчёта параметров винтовой прошивки для настоящего исследования.

Таблица 6.2 – Расчётные формулы для анализа параметров винтовой прошивки.

Формула	Номер
$\eta_{\text{прош}} = \frac{d_0}{d_1}$	(6.3)
$\mu_{\text{прош}} = \frac{\eta_{\text{прош}}^2 \cdot \left(\frac{d_1}{s}\right)^2}{4 \cdot \left(\frac{d_1}{s} - 1\right)}$	(6.4)
$T_\beta = \frac{\text{tg } \beta_1}{\text{tg } \beta_0} = \mu_{\text{прош}} \cdot \eta_{\text{прош}} = \frac{\eta_{\text{прош}}^3 \cdot \left(\frac{d_1}{s}\right)^2}{4 \cdot \left(\frac{d_1}{s} - 1\right)}$	(6.5)
$\varepsilon_i^{\text{прош}} = \sqrt{\ln^2 \mu_{\text{прош}} + \frac{1}{3} \cdot \ln^2 \left(\frac{d_1}{s} - 1\right)}$	(6.6)
$\mu_{\text{экв}}^{\text{прош}} = \exp(\varepsilon_i^{\text{прош}})$	(6.7)
$\varepsilon_i^{\text{РСП}} = \ln \mu_{\text{РСП}}$	(6.8)
$\varepsilon_i^\Sigma = \varepsilon_i^{\text{РСП}} + \varepsilon_i^{\text{прош}}$	(6.9)
$\mu_{\text{экв}}^\Sigma = \exp(\varepsilon_i^\Sigma)$	(6.10)
$W_{\text{спл}} = \frac{\pi \cdot d_0^3}{24 \cdot \text{tg } \alpha} \cdot [1 - (1 - \varepsilon_0)^3]$	(6.11)
$W_{\text{под}} = \left(\frac{\pi \cdot d_0^2}{4}\right) \cdot \frac{1}{k} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \frac{\text{tg } \beta_1}{\mu_{\text{прош}} \cdot \eta_{\text{прош}}}$	(6.12)

Число циклов перед носком оправки  $N_0$  в процессе прошивки определяется как отношение объёма части очага деформации  $W_{\text{спл}}$  от входа до носка оправки к объёму подачи  $W_{\text{под}}$  и с учётом (5.9), (6.4), (6.11) и (6.12) составляет

$$N_0 = \frac{k \cdot \eta_{\text{прош}}^3 \cdot \left(\frac{d_1}{s}\right)^2 \cdot [1 - (1 - \varepsilon_0)^3]}{12 \cdot c \cdot \left(\frac{d_1}{s} - 1\right)}. \quad (6.13)$$

Угол подъёма геликоидальной траектории течения металла изменяется в очаге деформации от минимального значения  $\beta_0$  на входе до максимального –  $\beta_1$  на выходе, при этом они связаны соотношением (6.5). Значение угла  $\beta_1$  на

выходе из валков определяется углом подачи валков  $\beta$  с точностью до отношения коэффициентов осевой и тангенциальной скорости скольжения [3-8]. Аналитических формул, описывающих контактное скольжение прошиваемого металла относительно валков, к настоящему времени не установлено. В связи с этим для сравнительной оценки режимов деформации принято допущение о равенстве  $\beta_1 = \beta$  [125].

Важным параметром сравнения режимов прошивки является значение угла подъёма траектории на поверхности исходной заготовки  $\beta_0$  [125]. Очевидно, что, вероятность вскрытия полости перед носком оправки, уменьшается с увеличением углов подъёма в конусе прошивки (см. рисунок 1.3), уровень которых близок к  $\beta_0$ .

$$\beta_0 = \arctg \left[ \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \left( \frac{d_1}{s} - 1 \right)}{\eta_{\text{прош}}^3 \cdot \left( \frac{d_1}{s} \right)^2} \right]. \quad (6.13)$$

В таблице 6.3 приведены режимы деформации на этапе «НЛЗ → РСП → ПРОШИВКА» и расчётные значения параметров сравнения при производстве труб 63,5×7,6, 63,5×8,4 и 63,5×9,1 мм из НЛЗ диаметром 156 мм из стали 12Х1МФ. Угол подачи при РСП составлял 18°, а при прошивке – 12°. Угол конусности обжимного участка при РСП составлял 12,5±0,15°, а угол входного конуса при прошивке – 4±0,5°.

В базовом варианте 1 коэффициенты вытяжки при РСП и прошивке не значительно отличаются друг от друга, поскольку прошивка ведётся на «посад» при повышенных значениях коэффициента вытяжки. В промежуточном (вариант 2) и предлагаемом варианте (вариант 3) соотношение между коэффициентами вытяжки изменяется в сторону увеличения при РСП и уменьшения при прошивке. В процессе прошивки коэффициент вытяжки снижается за счёт уменьшения диаметра заготовки до 100 и 95 мм, соответственно вариантам 2 и 3. Все изменения выполняются в условиях постоянства диаметра исходной НЛЗ (156 мм) и размеров получаемых гильз (98×14-15 мм).

Таблица 6.3 – Режимы деформации на этапе «НЛЗ → РСП → ПРОШИВКА» и расчётные значения параметров сравнения при производстве труб 63,5×7,6, 63,5×8,4 и 63,5×9,1 мм из НЛЗ диаметром 156 мм из стали 12Х1МФ.

Вариант	Размер трубы, мм	РСП				ПРОШИВКА								Суммарная интенсивность деформации	Суммарный эквивалентный коэф. ВЫТЯЖКИ		
		Диаметр НЛЗ, мм	Диаметр прутка, мм	Коэф. вытяжки РСП	Интенсивность деформации при РСП	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Обжатие перед носком оправки, %	Параметр тонкостенности	Коэф. обжатия по диаметру при прошивке	Число циклов перед носком оправки	Угол подъёма траектории на поверхности заготовки, °	Коэф. вытяжки при прошивке			Интенсивность деформации при прошивке	Эквивалентный коэф. вытяжки при прошивке
			$d_0$	$\mu_{\text{РСП}}$	$\varepsilon_i^{\text{РСП}}$	$d_1$	$s$	$\varepsilon_0$	$\frac{d_1}{s}$	$\eta_{\text{прош}}$	$N_0$	$\beta_0$	$\mu_{\text{прош}}$	$\varepsilon_i^{\text{прош}}$	$\mu_{\text{ЭКВ}}^{\text{прош}}$	$\varepsilon_i^{\Sigma}$	$\mu_{\text{ЭКВ}}^{\Sigma}$
1	63,5×7,6	156	105	2,21	0,79	98	14	11,15	7,00	1,07	5,35	4,84	2,34	1,34	3,82	2,13	8,43
	63,5×8,4	156	105	2,21	0,79	98	14	11,15	7,00	1,07	5,35	4,84	2,34	1,34	3,82	2,13	8,43
	63,5×9,1	156	105	2,21	0,79	98	15	11,15	6,53	1,07	5,06	5,12	2,21	1,27	3,55	2,06	7,84
2	63,5×7,6	156	100	2,43	0,89	98	14	10,15	7,00	1,02	4,25	5,60	2,13	1,28	3,60	2,17	8,75
	63,5×8,4	156	100	2,43	0,89	98	14	10,15	7,00	1,02	4,25	5,60	2,13	1,28	3,60	2,17	8,75
	63,5×9,1	156	100	2,43	0,89	98	15	10,15	6,53	1,02	4,02	5,92	2,01	1,21	3,35	2,10	8,15
3	63,5×7,6	156	95	2,70	0,99	98	14	9,01	7,00	0,97	3,28	6,52	1,92	1,22	3,40	2,21	9,16
	63,5×8,4	156	95	2,70	0,99	98	14	9,01	7,00	0,97	3,28	6,52	1,92	1,22	3,40	2,21	9,16
	63,5×9,1	156	95	2,70	0,99	98	15	9,01	6,53	0,97	3,09	6,90	1,81	1,15	3,17	2,14	8,54

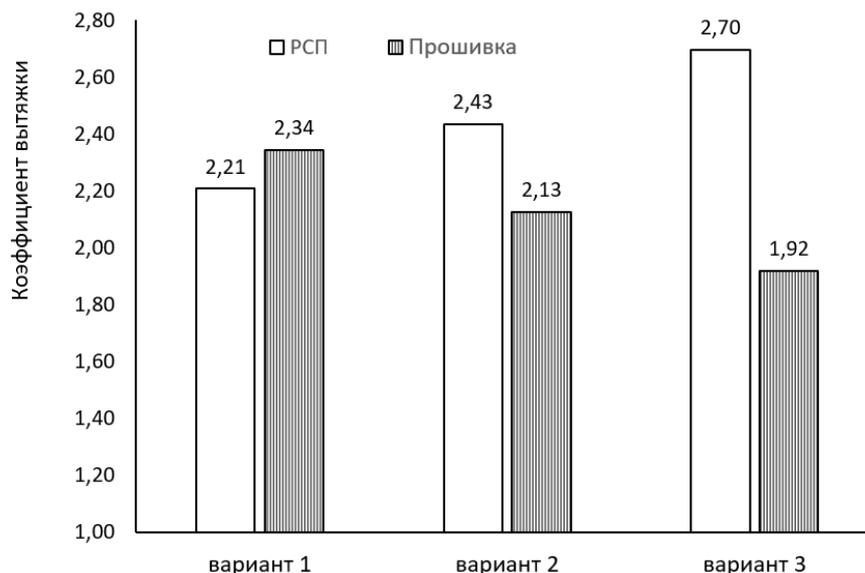


Рисунок 6.7 – Коэффициенты вытяжки при РСП и прошивке в сопоставляемых вариантах.

В результате такого перераспределения деформации существенно улучшаются показатели процесса в связке «РСП – прошивка», способствующие повышению деформируемости заготовок. Среди них:

1. Увеличение деформации при РСП (рисунок 6.7) способствует более полной проработке структуры литой заготовки и улучшает прошиваемость.

2. Повышение угла  $\beta_0$  подъёма траектории на поверхности прошиваемой заготовки почти на 35% (рисунок 6.8, а) увеличивает частные обжатия в конусе прошивки и снижает неравномерность деформации.

3. Уменьшение числа циклов перед носком оправки более, чем в 1,6 раза (рисунок 6.8, б) снижает вероятность вскрытия осевой полости и образования плён на внутренней поверхности гильзы.

Положительные эффекты 2 и 3 действуют в неразрывной взаимосвязи. При этом, нетрудно заметить, что теоретически они могут быть достигнуты и увеличением угла подачи  $\beta_1$ . Однако для этого, согласно расчётам по представленным выше формулам, необходимо увеличение  $\beta_1$ , невозможное для большинства современных прошивных станков. К примеру, чтобы осуществить прошивку по режиму варианта 1 и обеспечить число циклов

перед носком оправки предложенного варианта 3 ( $N_0 = 3,28$ ) необходим угол  $\beta_1 = 18,4^\circ$ .

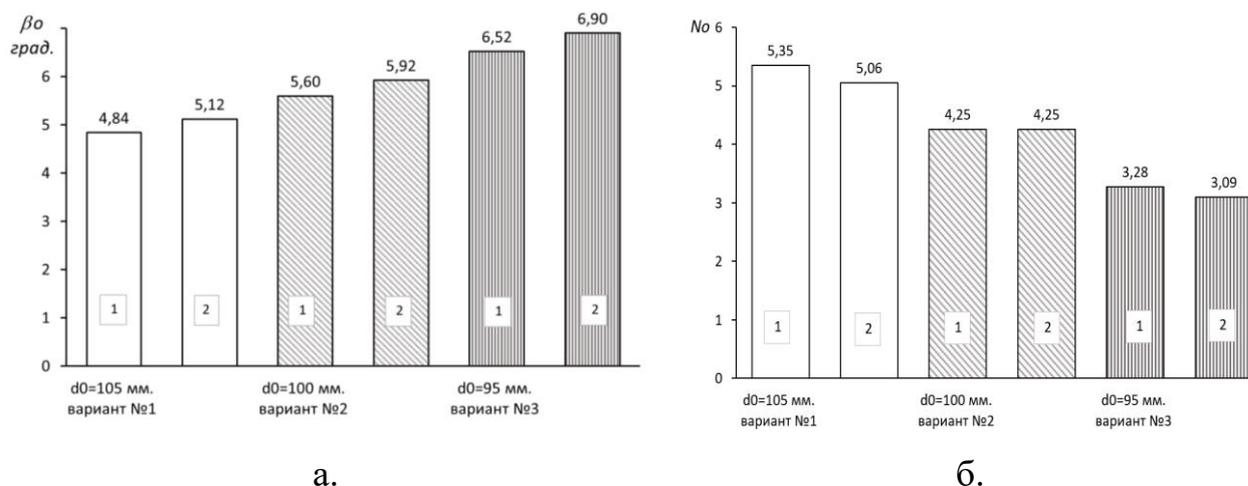


Рисунок 6.8 – Угол  $\beta_0$  подъёма траектории (а) и число циклов  $N_0$  (б) при прошивке заготовок различного диаметра  $d_0$  в гильзу диаметром 98 мм с толщиной стенки 14 (1) и 15 (2) мм.

Положительным аспектом предлагаемого варианта является увеличение эквивалентного коэффициента вытяжки с 7,8-8,4 (по базовому варианту 1) до 8,5-9,2.

### 6.3 Оценка накопленной деформации в сочетании «РСП – прошивка» в условиях ТПА-160.

Для оценки накопленной пластической деформации в сочетании процессов радиально-сдвиговой прокатки и прошивки в условиях ТПА-160 было проведено последовательное конечно-элементное моделирование в программном комплексе QForm двух процессов с наследованием заготовки после процесса РСП  $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 95$  мм на последующую прошивку  $\varnothing 95 \rightarrow 98 \times 14$  мм по предлагаемому варианту режима деформации (таблица 6.3).

Технологические параметры и параметры настройки программы QForm при РСП заданы в полном соответствии с вариантом 1 таблицы 4.1. При прошивке были использованы настроечные параметры, указанные в таблице 6.4.

По заданным параметрам построены твердотельные модели заготовки и инструмента.

Таблица 6.4 – Технологические параметры и параметры настройки программы QForm для проведения второй операции моделирования (прошивки).

Параметр	Значение
Диаметр бочки вала, мм	1005
Частота вращения валков, об/мин	50
Угол раскатки, °	0
Угол подачи, °	12
Расстояние между валками в пережиме, мм	86
Расстояние между линейками в пережиме, мм	95
Диаметр оправки, мм	64
Выдвижение носка оправки за «технологический пережим» (ось поворота на угол подачи) валков, мм	53
Материал валков (из стандартной базы QForm)	сталь 40Х
Материал линеек (из стандартной базы QForm)	сталь Х12МФ
Материал оправки (из стандартной базы QForm)	сталь 3Х3М3Ф
Температура инструмента прошивного стана, °С	80
Коэффициент теплопередачи между заготовкой и инструментом прошивного стана, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	30000
Закон трения на контакте «инструмент-заготовка»	Леванов
Фактор трения на контакте «валки-заготовка»	6
Фактор трения на контакте «линейки/оправка-заготовка»	0,8 (без смазки)
Температура окружающей среды, °С	20
Коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	16,3
Предельная адаптация сетки в заготовке	4
Минимальное число слоёв элементов в заготовке	3
Максимальный размер элементов на поверхности инструмента прошивного стана, мм	6

Перед прошивкой была введена дополнительная операция подогрева полученной на первом этапе заготовки, который проводился в окружающей среде с температурой равной 1200°С, коэффициентом теплоотдачи –  $30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  в течение 1200 с (20 мин). С целью учёта охлаждения заготовки во время транспортировки от кольцевой печи до прошивного стана задавалось предварительное охлаждение заготовки на воздухе в течение 20 с.

Дополнительно, для второй операции была включена функция учёта инерции вращения заготовки. Оправка была зафиксирована от перемещения в

осевом направлении, однако имела возможность свободного вращения во время контакта с заготовкой.

Для моделирования процесса прошивки была использована действующая калибровка инструмента прошивного стана ТПА-160 (рисунок 6.9). Установка оправки, линейек и подача заготовки производилась по оси прокатки, которая находится ниже оси рабочей клетки (плоскости, содержащей «технологический пережим» валков) на 10 мм, что соответствует конструктивной особенности прошивного стана ТПА-160.

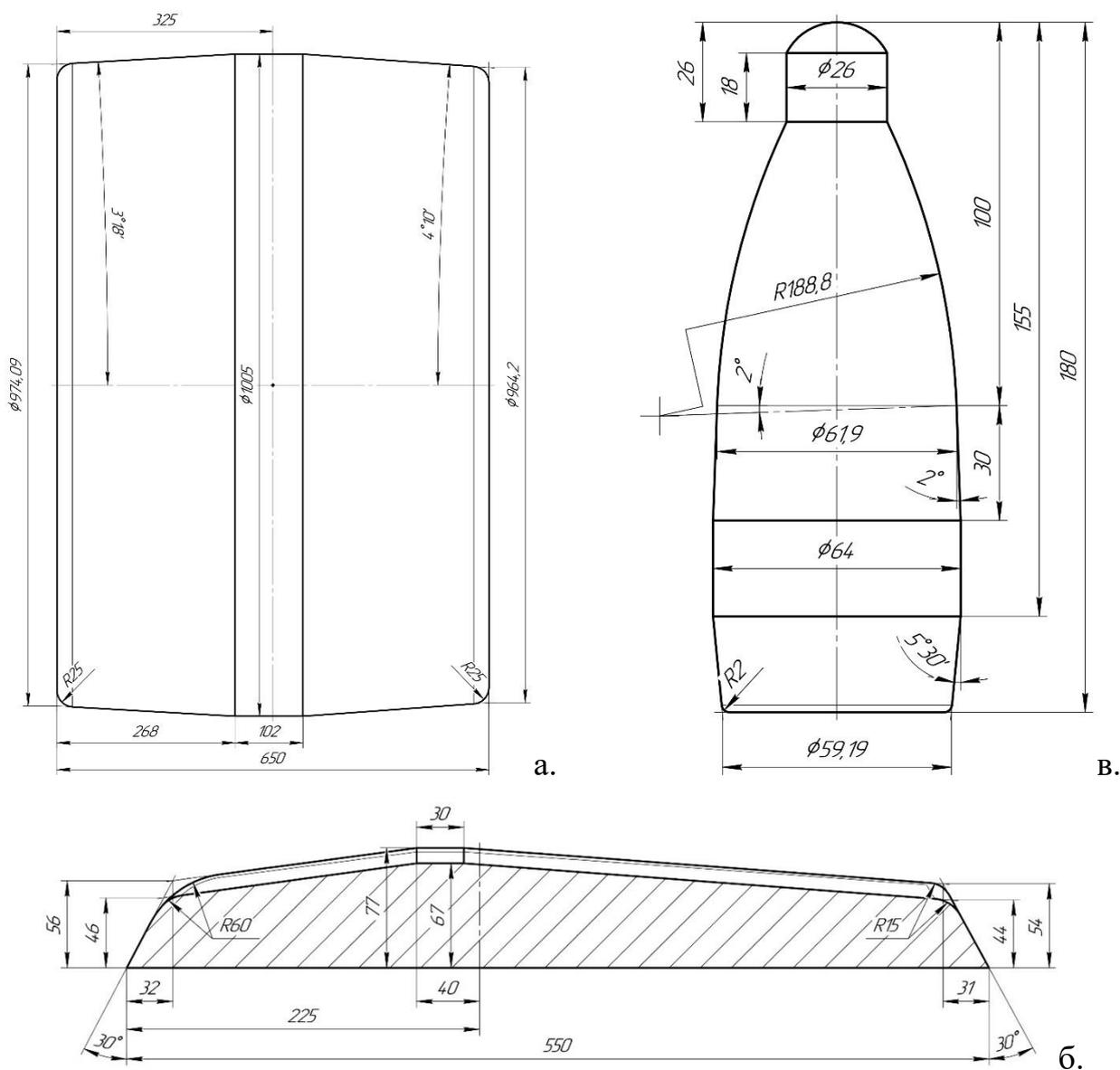


Рисунок 6.9 – Калибровка инструмента прошивного стана ТПА-160: валка (а, чертёж 49.665), линейки для заготовки  $\phi 90$  мм (б, чертёж ПШ-255, позиция -01), оправки  $\phi 64$  мм (в, чертёж 49.674, позиция -01).

По окончании расчёта были получены поля распределения накопленной пластической деформации при РСП, в процессе прошивки предварительно деформированной заготовки и суммарное поле после двух операций (рисунок 6.10).

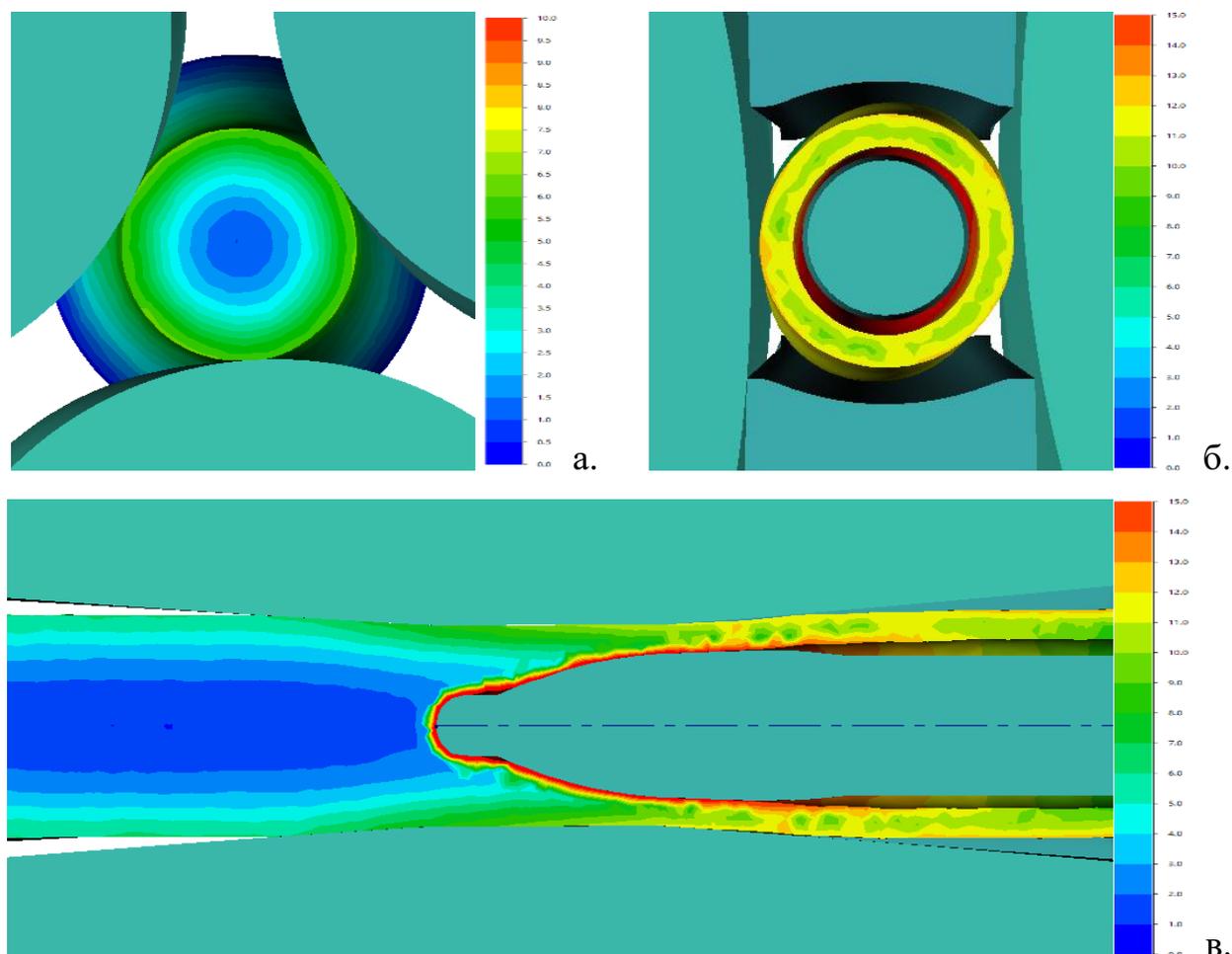


Рисунок 6.10 – Поле накопленной деформации при РСП (а), суммарное при РСП и прошивке (б) и в процессе прошивки предварительно деформированной заготовки (в).

Проведённое исследование позволило подтвердить тот факт, что сочетание РСП и прошивки весьма благоприятно в отношении повышения равномерности и результирующего уровня накопленной деформации и условий для проработки литой структуры. РСП формирует характерное градиентное поле накопленной деформации с максимальными значениями в периферийных слоях проката и минимальными – в центральных. При прошивке градиент обратный:

максимум достигается в слоях, прилегающих к внутренней поверхности гильзы, минимум – вблизи внешней поверхности. В суперпозиции этих полей образуется достаточно равномерное поле с уровнем деформации, которыйкратно превышает значения, определённые коэффициентами вытяжки.

#### **6.4 Выполненная программа предварительного обжатия НЛЗ.**

Производственный опыт освоения и эксплуатации клетки РСР подтвердил правильность предложенных технологических и проектно-конструкторских решений и достижение заявленных параметров.

За период с 2020 по 2024 год с момента окончания холодных испытаний специализированной клетки РСР раскатного стана ТПА-160 была выполнена программа прокатки в объёме более 10,5 тыс. т заготовки преимущественно из легированных (09Г2С и др.), в том числе хромсодержащих сталей (12Х1МФ, 15Х5М и др.).

Освоены режимы предварительной деформации НЛЗ Ø145-156 мм вплоть до Ø95 мм с обжатием до 61 мм за проход, НЛЗ Ø220 мм успешно прокатана с обжатием до 50 мм до Ø170 мм (таблица 6.6).

Достигнута регламентированная действующей технологией производительность ТПА-160 при обжатии заготовки (таблица 6.5), а на режимах прокатки НЛЗ Ø145-156 мм с обжатием более 40 мм определена возможность её увеличения.

Таблица 6.5 – Максимальная часовая производительность ТПА-160 по действующей технологии при обжатии заготовки.

Диаметр исходной заготовки, мм	Диаметр заготовки после прокатки, мм	Максимальная часовая производительность, т/ч
156	120-130	41
156	105-115	38
220	170-190	35

Таблица 6.6 – Выполненная программа прокатки НЛЗ за период эксплуатации специализированной клетки РСП раскатного стана ТПА-160.

Диаметр заготовки, мм		Количество прокатанной заготовки, т	Доля за период, %	Марки стали
НЛЗ	После РСП			
145	130	57	0,5	09Г2С
	120	24	0,2	30ХГМА
	115	30	0,3	40Х
	105	161	1,5	09Г2С, 40Х
150	130	42	0,4	09Г2С
	105	185	1,7	12Х1МФ
	100	594	5,5	12Х1МФ
	95	19	0,2	12Х1МФ
156	145	29	0,3	10, 34ХГМА
	140	22	0,2	30Х, 34ХГМА, 40Х
	130	529	4,9	09Г2С, 20, 40Х, 45, СТ0
	125	14	0,1	20ХН3А
	120	1464	13,5	09Г2С, 10, 15Х5М, 32Г1А, 35, 45
	115	595	5,5	09Г2С, 20, 30Х, 40Х
	105	3317	30,7	09Г2С, 12Х1МФ, 20, 25Х1Н3МФА, 30Х, 30ХГМА, 32Г2ФА, 34ХГМА, 35, 40Х
	100	1591	14,7	12Х1МФ
	95	1500	13,9	12Х1МФ
180	140	14	0,1	20
<b>196-175-145</b>	<b>110 (105)</b>	<b>12</b>	<b>0,1</b>	<b>08Х18Н10Т</b>
220	190	152	1,4	09Г2С, 20
	180	119	1,1	09Г2С, 12Х1МФ
	170	148	1,4	09Г2С
<b>Толстостенные трубы повышенной точности</b>				
105	106-109х23,5-24	3	0,0	25Х1Н3МФА
156	111хвн.44	24	0,2	35ХГМА, СТ0
	133хвн.56,3	162	1,5	35ХГМА
		<b>10807</b>		

Дополнительно, была проведена опытная работа по РСП заготовки из стали 08X18H10T на специализированной клети ТПА-160. Для этого были рассчитаны энергосиловые параметры по методике, приведённой в главе 5 (рисунок 6.11), с учётом величины сопротивления стали 08X18H10T принятое равным 180 МПа. На основании данных расчётов были определены маршруты прокатки. Так исходную НЛЗ Ø196 мм (производства АО «ВТЗ») было запланировано прокатать на Ø110 мм (для последующей обточки до Ø105 мм) за 3 прохода – Ø196→Ø175→Ø145→Ø110 мм с промежуточной порезкой на предчистовом размере и суммарным коэффициентом вытяжки  $\mu_{\Sigma} = 3,17$ .



Рисунок 6.11 – Результаты расчёта усилия и момента прокатки заготовок из стали 08X18H10T на специализированной клети РСП.

Фактически зафиксированная токовая нагрузка на двигателе по всем проходам составила не более 2,4-2,6 кА. Общий вид прокатанных заготовок Ø110 мм в начале первой секции охлаждающего стола представлен на рисунке 6.12, а. По результатам испытания металла центральной части заготовки конечного размера на горячее скручивание при температурах 1150 и 1180°C были получены стабильно высокие значения по количеству циклов – 21-32 и 26-29 соответственно. Для сравнения, согласно ТУ 14-1-565 на деформированную катаную или кованую трубную заготовку из стали 08X18H10T, производимую с

вытяжкой не менее 5, заводу-изготовителю регламентировано обеспечивать данный параметр на уровне не менее 20 циклов скручиваний при температуре  $1175 \pm 10^\circ\text{C}$ .

Успешные результаты работы подтвердили принципиальную возможность РСП на специализированной клети заготовки из высоколегированных нержавеющей марок стали и её положительное влияние на повышение технологической пластичности для последующего передела при относительно малых вытяжках.

Кроме указанной выше работы, была изготовлена партия особотолстостенных труб повышенной точности размером 106x23,5, 109x24, 111xвн.44 и 133xвн.56,3 мм из стали 35ХГМА и др. в объёме 189 т по схеме, описанной в работе [29] (рисунок 6.12, б). В приложении 2 представлены результаты измерения толщины стенки труб размером 133xвн.56,3 мм при прокатке на углах подачи  $14^\circ$  (штатная клеть раскатного стана) и  $18^\circ$  (специализированная клеть РСП), остальные настроечные параметры станов ТПА-160 были идентичными (таблица 6.7). Измерение проведено в 4 точках и множестве поперечных сечений по всей длине труб с помощью ручного ультразвукового прибора. Данные измерений показывают значительное повышение точности труб по толщине стенки, которое заключается в снижении разностенности в 1,5-2,0 раза, как в отдельных поперечных сечениях, так и в целом по длине трубы.

Таблица 6.7 – Технологические параметры настройки ТПА-160 при прокатке труб размером 133xвн.56,3 мм.

Диаметр заготовки, мм	Сумм. коэф. вытяжки	ПРОШИВНОЙ СТАН								РАСКАТНОЙ СТАН					КС
		Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Угол подачи, °	Расстояние между валками, мм	Расстояние между линейками, мм	Диаметр оправки, мм	Выдвижение оправки за техн. пережим, мм	Коэф. вытяжки	Диаметр черн. трубы, мм	Толщина стенки черн. трубы, мм	Диаметр калибра, мм	Диаметр оправки, мм	Коэф. вытяжки	
156	1,62	165	43	8	144	155	70	22	1,16	136	39,5	132	53	1,38	134,5

Полученные результаты подтвердили целесообразность перехода на углы подачи  $18^\circ$  при прокатке труб данного сортамента в раскатном стане для дальнейшего повышения их качества и эксплуатационных характеристик. Ранее, схожие тенденции были зафиксированы и подробно рассмотрены в других исследованиях [126-136].



а.



б.

Рисунок 6.12 – Заготовки  $\text{Ø}110$  мм из стали 08X18H10T (а) и трубы размером 133хвн.56,3 мм из стали 35ХГМА после РСП на специализированной клети в начале первой секции охлаждающего стола (со стороны заднего конца).

Таким образом, практически установлено, что использование клети радиально-сдвиговой прокатки (РСП) с углами подачи валков  $18^\circ$  обеспечивает обжатие непрерывнолитых заготовок диаметром 145-220 мм из углеродистых и легированных сталей (включая хромосодержащие типа 12Х1МФ и др.) со

свободным выбором коэффициентов вытяжки за проход в пределах до 2,2-3,0. Становится возможной замена катаной покупной заготовки на непрерывнолитую заготовку собственного производства без снижения выхода годного при производстве труб из углеродистых и легированных марок стали.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработана, исследована и внедрена технология радиально-сдвиговой прокатки в клети оригинальной конструкции для деформации при углах подачи  $18^\circ$  непрерывнолитых заготовок диаметром 145-220 мм из углеродистых и легированных сталей в условиях ТПА-160.
2. Разработана и внедрена специальная конструкция сменной клети РСП, совместимая с оборудованием трёхвалковых раскатных станков действующих трубопрокатных агрегатов типа ТПА-160 и реализующая технологические режимы прокатки непрерывнолитых заготовок из углеродистых и легированных сталей с коэффициентами вытяжки до 3,0.
3. Установлены закономерности пластического течения металла и энергосиловых параметров при РСП при отношении диаметра валков к диаметру заготовки 1,3-1,8.
4. Выявлено положительное влияние предварительного обжатия способом РСП на особенности структурного строения деформированных НЛЗ, в частности, показано, что относительный объём металла с остатками литой структуры зависит от марки стали и уменьшается от центра заготовки к периферии в пределах 4,42-0% для стали 12Х1МФ и 22,15-1,62% для стали 18ХМФБ при коэффициентах вытяжки 2,0-3,0.
5. Выполнено развитие аналитической методики расчёта геометрических параметров очага деформации при РСП по заданной калибровке валков с применением фактических углов подачи и раскатки заготовки относительно оси валков и с учётом их продольного (вдоль оси валков) изменения.
6. Внедрение в производство предложенных технических решений расширило размерный сортамент заготовок под прошивку и позволяет в ряде случаев, заменить катаную заготовку непрерывнолитой собственного производства без снижения выхода при производстве труб из легированных сталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС НДТ 27-2023 «Производство изделий дальнейшего передела черных металлов». [Электронный ресурс] // <https://rst.gov.ru:8443/file-service/file/load/1702543433698>.
2. Развитие трубного производства / Л.А. Кондратов – М.: Metallurgizdat, 2015. – 256 с.
3. Процессы и современные технологии производства листового проката и труб: учебник / А.П. Коликов, А.С. Алещенко. – Москва : Издательский дом НИТУ МИСИС, 2024. – 752 с.
4. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1972. – 591 с.
5. Технология производства труб / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.Н. Данченко и др. – М.: Metallurgiya, 1994. – 528 с.
6. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
7. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
8. Трубное производство: учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Издательский Дом МИСИС, 2011. – 970 с.
9. Mao, F., Wang, F., Shuang, Y., Hu, J., & Chen, J. (2020). Deformation behavior and experiments on a light alloy seamless tube via a tandem skew rolling process. *Metals*, 10(1) <https://doi.org/10.3390/met10010059>.
10. Chechulin, Y. B., Fedulov, A. A., Dronov, A. I., Morgunov, V. A., & Bulganina, M. Y. (2020). Theoretical research on the pipe rolling process in order to determine the deformation of the pipe billet and the load on the rolling tool. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering, 718(1)  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/718/1/012004>.

11. Smyrnov, Y. N., Skliar, V. A., Belevitin, V. A., Shmyglya, R. A., & Smyrnov, O. Y. (2016). Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Translation*, 46(5), 325-328. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050132>.

12. Guo, F., Wang, X., Wang, J., Misra, R. D. K., & Shang, C. (2020). The significance of central segregation of continuously cast billet on banded microstructure and mechanical properties of section steel. *Metals*, 10(1) <https://doi.org/10.3390/met10010076>.

13. Совершенствование производства стальных труб / В.Г. Зимовец, В.Ю. Кузнецов, А.П. Коликов – М.: МИСиС, 1996. – 480 с.

14. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки / Чикалов С.Г. – Волгоград : Комитет по печати и информации. 1999. – 416 с.

15. Чикалов С.Г. Теоретические основы, исследование, разработка и внедрение высокоэффективных технологий производства бесшовных труб с использованием непрерывнолитой заготовки: диссертация ... доктора технических наук: 05.16.05. – Москва, 2004. – 407 с.: ил.

16. Патент №2250147 С1 РФ, МПК В21В 19/04. Способ винтовой прошивки литой заготовки / Пумпянский Д.А., Марченко Л.Г., Фадеев М.М. и др. – заявл. 09.01.2004 г., опубл. 20.04.2005 г.

17. Марченко К.Л. Интенсификация процесса винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с целью повышения качества труб: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2007. – 160 с.: ил.

18. Патент №2489220 С1 РФ, МПК В21В 19/04. Способ винтовой прошивки литой заготовки / Пышминцев И.Ю., Курятников А.В., Король А.В. и др. – заявл. 11.01.2012 г., опубл. 10.08.2013 г.

19. Патент №2489221 С1 РФ, МПК В21В 19/04. Способ производства горячекатаных труб / Пышминцев И.Ю., Курятников А.В., Король А.В. и др. – заявл. 19.01.2012 г., опубл. 10.08.2013 г.

20. Корсаков А.А. Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Челябинск, 2015. – 158 с.: ил.

21. Будников А.С., Харитонов Е.А., Сорокин Ф.В. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трёхвалковом стане винтовой прокатки // Сталь. – 2017. – №10. – С. 31-34.

22. Будников А.С., Сабуркин В.Д., Исхаков Р.В. Исследование процесса редуцирования труб в трёхвалковом калибровочном стане винтовой прокатки применительно к условиям ТПА 160 АО «ПНТЗ» // XXIII Международная научно-практическая конференция «Трубы-2018». Стендовый доклад. – Челябинск. – 2018.

23. Будников А.С., Харитонов Е.А., Исхаков Р.В., Сабуркин В.Д. Исследование редуцирования труб на трёхвалковом калибровочном стане винтовой прокатки ТПА-160 // Сталь. – 2019. – №8. – С. 43-46.

24. Будников А.С., Харитонов Е.А., Алещенко А.С., Исхаков Р.В. Влияние безоправочной деформации в трёхвалковом стане винтовой прокатки на изменение толщины стенки трубы // Чёрные металлы. – 2019. – №12. – С. 41-45.

25. Будников А.С., Харитонов Е.А., Исхаков Р.В. Исследование безоправочной винтовой прокатки бесшовных труб с повышенным обжатием по диаметру // Сталь. – 2020. – №9. – С. 43-46.

26. Будников А.С., Харитонов Е.А., Исхаков Р.В. Исследование деформационно-силовых параметров процесса раскатки и безоправочной винтовой прокатки труб на трёхвалковых станах // Чёрные металлы. – 2021. – №4. – С. 20-24. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.04.04>.

27. Патент №2723494 С1 РФ, МПК В21В 19/06. Способ раскатки полой заготовки на оправке в трёхвалковом стане винтовой прокатки и валок для его осуществления / Харитонов Е.А., Алещенко А.С., Будников А.С. и др. – заявл. 19.09.2019 г., опубл. 11.06.2020 г.

28. Будников А.С. Совершенствование процессов раскатки и калибрования труб в трёхвалковых станах винтовой прокатки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.09. – Москва, 2020. – 147 с.: ил.

29. Исхаков Р.В., Шверин Е.В., Савкин В.С., Тихонов А.Ф., Балакин Д.А. Разработка технологии и освоение производства особотолстостенных труб для бурильных замков на Первоуральском новотрубном заводе // Чёрные металлы. – 2024. – №4. – С. 40-41.

30. Тазетдинов Б.В., Осадчий В.Я., Кузнецов А.В., Баузер В.Е., Луценко Д.В. Разработка инновационной технологии производства обсадных труб с соотношением D/S более 31 в условиях ТПА-140 ПАО «ЧТПЗ» // Технология металлов. – 2020. – №12. – С. 49-56.

31. Орлов Д.А. Совершенствование технологии двойной прошивки заготовок на станах винтовой прокатки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2021. – 133 с.: ил.

32. Харитонов Е.А. Исследование винтовой прокатки титановых сплавов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 1980.

33. Романцев Б.А., Матыко О.К., Фартушный Р.Н., Гончарук А.В., Мульчин В.В., Зинченко А.В. Совершенствование технологии прошивки непрерывнолитых заготовок из легированных сталей на ТПА с пилигримовым станом // Производство проката. – 2008. – №8. – С. 33-35.

34. Лубе И.И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2010. – 147 с.: ил.

35. Алещенко А.А. Исследование и разработка методики проектирования технологического инструмента станов винтовой прокатки гильз и труб: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2010. – 147 с.: ил.

36. Патент №2419497 С1 РФ, МПК В21В 19/04. Способ прокатки гильзы на прошивном стане / Толмачев В.С., Зуев М.В., Топоров В.А и др. – заявл. 15.03.2010 г., опубл. 27.05.2011 г.

37. Топоров В.А., Толмачёв В.С., Степанов А.И., Панасенко О.А. Освоение современной технологии производства труб из непрерывнолитых заготовок // Сталь. – 2013. – №1. – С. 39-43.

38. Топоров В.А., Степанов А.И., Толмачёв В.С., Панасенко О.А. Совершенствование технологии производства гильз прошивном стане ОАО СТЗ // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2013. – №7. – С. 41-46.

39. Король А.В. Совершенствование двухвалковой винтовой прошивке на основе моделирования и разработки новых технических решений: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Челябинск, 2016. – 139 с.: ил.

40. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.

41. Парфёнов В.А. Исследование и совершенствование процесса прошивки на двухвалковых винтовых станах моделирование очага деформации для обеспечения качества гильз из непрерывнолитых заготовок: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2019. – 108 с.: ил.

42. Бобарикин Ю.Л., Герасимов Ю.Л. Влияние технологических параметров прошивки непрерывнолитых заготовок в косовалковом прошивном стане Дишера на дефектообразования внутренней поверхности гильз // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2019. – №3(78). – С. 33-44.

43. Кузнецов Е.В., Полятыкин М. Чтобы упрочнить трубу // Техника молодёжи. – 1985. – №06. – С. 30-33.

44. Galkin, S.P., Kharitonov, E.A. & Romanenko, V.P. Screw rolling for pipe-blank production. Steel Transl. 39, 700-703 (2009). <https://doi.org/10.3103/S096709120908018X>.

45. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывнолитой заготовки // Чёрные металлы. – 2012. – №3. – С. 18-21.

46. Алещенко А.С., Исхаков Р.В., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кадач М.В. Технология и клеть радиально-сдвиговой прокатки специальной конструкции для предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок в условиях ТПА-160 АО «Первоуральский новотрубный завод» при повышенных углах подачи валков // Чёрные металлы. – 2024. – №11. – С. 45-52.

47. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.

48. Совершенствование процесса прошивки заготовок с целью улучшения качества труб, повышения производительности стана и стойкости инструмента: отчет о НИР / МИСиС. – Москва, 1970. – 152 с.

49. Новотрубный завод: отцы и дети: литературно-документальная летопись / Ю. А. Дунаев. – Первоуральск, 2015. – 480 с.

50. Технологические процессы и оборудование трубного производства. Научное издание. Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета) – 75 лет. Становление и развитие / П.И. Полухин, А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: МИСиС, 1997, – 628 с.

51. Зимин В.Я. Исследование процесса деформирования непрерывнолитых заготовок в станах винтовой прокатки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 1981.

52. Радиально-сдвиговая прокатка – новый способ обработки давлением. Научное издание. Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета) – 75 лет. Становление и

развитие / И.Н. Потапов, П.И. Полухин, Е.А. Харитонов, В.П. Романенко. – М.: МИСиС, 1997, – 628 с.

53. А.с. 1055551 СССР, В 21 В 1/02, 19/04. Способ винтовой прокатки круглых заготовок сплошного профиля / П.И. Полухин, И.Н. Потапов, А.В. Демидов и др. – Оpubл. 23.11.83, Бюл. № 42.

54. Исследование качества проката, деформированного из слитков и непрерывнолитых заготовок жаропрочных сплавов на станах винтовой прокатки. Разработка технологии производства сортового проката из непрерывнолитых заготовок сталей ШХ15 и 12Х18Н10Т с применением метода винтовой прокатки: отчёт о НИР (промежуточный). Часть 1 / Электростальский металлургический завод им. И.Ф. Тевосяна – МИСиС; рук. В.П. Степанов, И.Н. Потапов. – Электросталь-Москва, 1983. – 46 с.

55. А.с. 786120 СССР, В 21 В 1/02, 19/04. Способ винтовой прокатки круглых заготовок сплошного профиля / П.И. Полухин, И.Н. Потапов, Е.А. Харитонов и др. – Оpubл. 23.08.2023, Бюл. № 24.

56. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов: автореф. дисс. докт. техн. наук. – М.: МИСиС, 1998. – 41 с.

57. Никулин А.Н., Стрелецкий В.В. Деформационное воздействие винтовой прокатки на непрерывнолитой металл // Металлург. – 2005. – №3. – С. 41-44.

58. Технологическая механика процессов винтовой прокатки / А.Н. Никулин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургиздат, 2024. – 476 с.

59. Karpov, B.V., Patrin, P.V., Galkin, S.P. et al. Radial-Shear Rolling of Titanium Alloy VT-8 Bars with Controlled Structure for Small Diameter Ingots ( $\leq 200$  mm). Metallurgist 61, 884–890 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0581-6>.

60. Патрин П.В., Карпов Б.В., Алещенко А.С., Галкин С.П. Оценка технологических возможностей радиально-сдвиговой прокатки сортового проката из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ // Сталь. – 2020. – №1. – С. 18-21.

61. Галкин С.П. Разработка и исследование процесса винтовой прокатки сплошных заготовок из малопластичных сталей и сплавов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – М.: МИСиС, 1983. – 192 с.

62. А.с. 1284064 СССР. Способ винтовой прокатки круглых профилей из легированных металлов и сплавов / И.Н. Потапов, П.И. Полухин, С.П. Галкин и др. – Оpubл. 23.08.2023, Бюл. № 24.

63. А.с. 1438072 СССР. Способ реверсивной винтовой прокатки сплошных заготовок / И.Н. Потапов, П.И. Полухин, С.П. Галкин и др. – Оpubл. 23.08.2023, Бюл. № 24.

64. Галкин С.П., Харитонов Е.А., Михайлов В.К. Реверсивная радиально-сдвиговая прокатка. сущность, возможности, преимущества // Титан. – 2003. – №1. – С. 39.

65. Потапов Н.И. Разработка и внедрение технологии и рабочего инструмента радиально-сдвиговой прокатки высоколегированных сталей и сплавов: автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1987. – 21 с.

66. Воробьев С.И. Разработка и внедрение промышленной технологии радиально-сдвиговой прокатки высоколегированных сталей и сплавов: автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1990. – 22 с.

67. M. Albedyhl, E. Bretsehneider. The 3-roll planetary mille a new high reduction machine, Iron Steel Eng. 56 (4) (1979) 57-60.

68. Конструкция станов поперечно-винтовой прокатки с планетарно-дифференциальным приводом рабочих валков за рубежом (Обзор. информ. Сер. Трубное производство. Вып. 3) // В.Н. Шевченко, З.С. Вольшонок, В.И. Солодихина и др. / Ин-т «Черметинформация». – М., 1989. – 26 с.

69. Bartel, Erich; Surmund, Jörg; Connell, Patrick. Kocks Rotation Mill [KRM] – An innovative elongation method for seamless tube, p. 240-245. In: 52° Seminário de Laminação, Rio de Janeiro, 2015. <https://doi.org/10.5151/1983-4764-26563>.
70. Copper Tube Production. Integrated systems for all requirements // SMS Group GmbH. Business Unit Forging Plants. Copper Plants. – Mönchengladbach, Germany. – 2016. – 24 p.
71. Shih, Chih-Kang & Hsu, R. & Hung, Chinghua. (2002). A study on seamless tube in the planetary rolling process. Journal of Materials Processing Technology. 121. 273-284. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01265-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01265-1).
72. Yeong-Maw Hwang, W.M. Tsai, F.H. Tsai, I. Her. 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, Volume 46, Issues 12–13, 2006, Pages 1555-1562. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.013>.
73. Галкин С.П., Михайлов В.К., Романцев Б.А. Технология и мини-стан винтовой прокатки как технико-технологическая система // Производство проката. – 1999. – №6. – С. 42.
74. 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, (9), pp. 35-39, (2014).
75. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Романцев Б.А. Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки // Чёрные металлы. – 2021. – №12. – С. 51-58. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.12.09>.
76. Naizabekov, A.B., Lezhnev, S.N., Arbuz, A.S. The Effect of Radial-Shear Rolling on the Microstructure and Mechanical Properties of Technical Titanium. Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. pp. 565–570. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.565>.

77. Gamin Yu.V., Galkin S.P., Nguyen X.D., Akopyan T.K. Analysis of temperature-deformation conditions for rolling aluminum alloy Al–Mg–Sc based on FEM modeling, *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2022. Vol.3 pp. 57-67. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-57-67>

78. Diez M., Kim H.-E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 612. pp. 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.061>.

79. Arbuz A, Kawalek A, Ozhmegov K, Dyja H, Panin E, Lepsibayev A, Sultanbekov S, Shamenova R. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. *Materials*. 2020; 13(19):4306. <https://doi.org/10.3390/ma13194306>.

80. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кин Т.Ю., Костин С.А. Экспериментальное опробование радиально-сдвиговой прокатки для получения деформированного сплава системы Co – Cr – Mo. // Чёрные металлы. – 2023. – №9. – С. 47-53. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.09.08>.

81. Sheremetyev, V., Kudryashova, A., Cheverikin, V., Korotitskiy, A., Galkin, S., Prokoshkin, S., Brailovski, V. Hot radial shear rolling and rotary forging of metastable beta Ti-18Zr-14Nb (at. %) alloy for bone implants: Microstructure, texture and functional properties. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 800, 5 September 2019, Pages 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.041>.

82. Galkin S.P., Kin T.Yu., Gamin Yu.V., Aleshchenko A.S., Karpov B.V. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology. *CIS Iron and Steel Review*. 2024. Т. 27. С. 35-47. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2024.01.06>.

83. Галкин С.П., Романцев Б.А., Смердин В.Н., Аверьянов А.А., Некрасов М.В. Инновационная технология рециклинга насосных штанг с применением технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки в условиях ОАО

«Очерский машиностроительный завод» // Инженерная практика. – 2014. – №9. – С. 58-62.

84. Galkin S.P. Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory. *Steel in Translation*. 2004. Т. 34. № 7. С. 57-60.

85. Патент №2293619 С1 РФ, МПК В21В 19/00. Способ винтовой прокатки / Галкин С.П. – заявл. 04.04.2006 г., опубл. 20.02.2007 г.

86. Galkin, S.P., Aleschenko, A.S., Romantsev, B.A., Gamin Yu. V., Iskhakov R. V. Effect of Preliminary Deformation of Continuously Cast Billets by Radial-Shear Rolling on the Structure and Properties of Hot-Rolled Chromium-Containing Steel Pipes. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. pp. 185-195. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4>.

87. Патент №2361689 РФ, МПК В21В 19/04. Способ получения гильз / Овчинников Д.В. и др. – заявл. 06.12.2007 г., опубл. 20.07.2009 г.

88. Тартаковский Б.И. Разработка, внедрение и освоение нового оборудования и технологии для производства горячекатаных труб: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.13 – Москва, 2012. – 262 с.

89. Патент №2245751 РФ, МПК В21В 19/04. Способ получения гильз / Фролочкин В.В., Кузнецов В.Ю., Марченко К.Л. и др. – заявл. 08.10.2003 г., опубл. 10.02.2005 г.

90. Фролочкин В.В., Фадеев М.М., Кузнецов В.Ю., Романцев Б.А., Харитонов Е.А. Освоение прокатки непрерывнолитой заготовки на ТПА 50-200 // *Сталь*. – 2002. – №7. – С. 56-58.

91. Балакин В.Ф., Степаненко А.Н., Гармашов Д.Ю., Угрюмов Ю.Д., Невилько Т.Н. Освоение переката сплошной заготовки на меньшие диаметры и производства труб из них в условиях ТПА 50-200 ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» // *Трубное производство*. – 2015. – №6. – С. 44-48.

92. Чернышев Ю.М., Исайкин А.Н., Халдин Д.В., Белокозович Ю.Б., Ошурков А.Л., Чечулин Ю.Б., Песин Ю.В., Кузнецов В.И. Освоение обжатия

непрерывнолитой заготовки на трехвалковом стане // Сталь. – №5. – 2016. – С. 35-40.

93. Чернышев Ю.М., Халдин Д.В., Белокозович Ю.Б., Ошурков А.Л., Чечулин Ю.Б. Освоение обжатия непрерывнолитой заготовки на трехвалковом стане Асселя ОАО «ПНТЗ» // В сб.: Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы-2016). Труды XXII Международной научно-практической конференции. Под редакцией И.Ю. Пышминцева. – Челябинск. – 2016. – С. 76-83.

94. Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Заварцев Н.А., Красиков А.В., Тыщук И.Н., Ульянов А.Г., Байков В.В. Разработка математической модели и компьютерной программы для расчета энергосиловых параметров процесса обжатия непрерывнолитых заготовок на трехвалковых станах винтовой прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. Т. 77. – №1. – С. 55-62.  
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-1-55-62>.

95. Chikalov S.G., Klempert E.D., Golubchik R.M., Merkulov D.V., Novikov M.V. Obtaining the required range of continuous-cast pipe blanks for piercing. Steel in Translation. 2007. Т. 37. № 3. С. 305-308.  
<https://doi.org/10.3103/S096709120703031X>.

96. Головин В.В., Субботин С.А., Осадчий В.Я. Исследование и разработка процесса прокатки непрерывнолитой заготовки в трехвалковом стане Первоуральского новотрубного завода (ПНТЗ) // В сб: Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Московский технологический университет, Физико-технологический институт. – 2016. – С. 279-283.

97. Патент №2586177 РФ, МПК В21В 19/04. Агрегат для изготовления бесшовных труб / Баричко Б.В., Выдрин А.В., Клачков А.А. и др. – заявл. 18.12.2014 г., опубл. 10.06.2016 г.

98. Пумпянский Д.А., Выдрин А.В., Баричко Б.В., Яковлева К.Ю. Новая концепция трубопрокатного агрегата с непрерывным станом // Сталь. – 2022. – №6. – С. 20-23.

99. Патент №2274503 РФ, МПК В21В 1/18, В21В 23/00. Способ и прокатная установка для изготовления проволоки, прутков или бесшовных труб / Леферинк М. – заявл. 08.01.2003 г.; опубл. 20.04.2006 г.

100. Лубе И.И., Ботников С.А., Турбар В.П. Применение непрерывнолитой заготовки круглого сечения для сортопрокатного производства // Сталь. – 2014. – №12 – С. 41-42.

101. Pat. US No 6089066, B21B19/04. Process for manufacturing seamless tubes. Ettore Cernuschi, Gerhard Kulesa, Thomas Leisten, Jürgen Pietsch, Walter Randerath, Frank Salomon, assignee Mannesmann AG, Düsseldorf, Germany – No 09/262,474, filed Mar. 4, 1999, Date of Patent Jul. 18, 2000.

102. Исследование процесса винтовой (радиально-сдвиговой) прокатки непрерывно-литой заготовки производства АО «ПНТЗ» при углах подачи 18-21 (24) градусов и анализ возможности проведения реконструктивных мероприятий на раскатном и калибровочном станах ТПА-160 с целью повышения углов подачи валков: отчёт о НИР. Договор № 414 от 24.01.2019 г. АО «ПНТЗ» / МИСиС. – Москва, 2019. – 104 с.

103. Быстров И.А. Исследование влияния предварительного обжатия НЛЗ на критические обжатия // Сборник докладов XII Научно-практической конференции молодых специалистов имени С.З. Афолина. – Выкса. – 2019.

104. Akopyan T.K., Belov N.A., Aleshchenko A.S., et al. Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al-Zn-Mg-Fe-Ni system processed by radial-shear rolling. Mater. Sci. Eng. A, 746, pp. 134-144, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.029>.

105. Та Динь Суан. Исследование и разработка технологического процесса получения прутков мелких сечений из биосовместимых сверхупругих сплавов нового поколения системы Ti-Zr-Nb с применением радиально-сдвиговой

прокатки и ротационной ковки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 2020. – 145 с.: ил.

106. Shurkin P.K., Akopyan T.K., Galkin S.P., Aleshchenko A.S. Effect of Radial Shear Rolling on the Structure and Mechanical Properties of a New-Generation High-Strength Aluminum Alloy Based on the Al – Zn – Mg – Ni – Fe System. *Metal Science and Heat Treatment*, 60(11-12), pp. 764-769, (2019). <https://doi.org/10.1007/s11041-019-00353-x>.

107. Gamin, Y., Akopyan, T., Koshmin, A. et al. Investigation of the microstructure evolution and properties of A1050 aluminum alloy during radial-shear rolling using FEM analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 108, 695–704 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05227-8>.

108. Теория поперечной и винтовой прокатки / П.К. Тетерин – М.: Металлургия, 1983. – 269 с.

109. Миронов Ю.М. Геометрические параметры процесса кривой прокатки // В сб. «Производство труб» (УкрНИТИ), вып. 6. – М.: Металлургиздат. – 1962. – С. 20-23.

110. Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Методика виртуальных пережимов для расчета мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки // Производство проката. – 2016. – №2. – С. 27-35.

111. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А.Н. Шаповал, С.М. Горбатюк, А.А Шаповал. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2006. – 356 с.

112. Выдрин А.В., Король А.В. Определение настроечных параметров процесса прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2016. – Т. 16, №2. – С. 74-80. <http://dx.doi.org/10.14529/met160211>.

113. Галкин С.П., Фадеев В.А., Исхаков Р.В., Гамин Ю.В., Мамкина А.С. Геометрия радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки на плоскости с решением

обратной задачи // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2024. – №22. – С. 1-9.

114. Галкин С.П., Стебунов С.А., Алещенко А.С., Власов А.В., Патрин П.В., Фомин А.В. Моделирование и экспериментальная оценка условий кольцевого разрушения при горячей радиально-сдвиговой прокатке // Metallurg. – 2020. – №3. – С. 64-70.

115. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объёмной штамповки: учебное пособие / А.В. Власов, С.А. Стебунов, С.А. Евсюков, Н.В. Биба, А.А. Шитиков – М.: издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 – 383 с.

116. Исхаков Р.В., Алещенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В. Специализированная клеть радиально-сдвиговой прокатки для деформации непрерывно-литых заготовок при повышенных углах подачи в условиях ТПА-160 // Труды XXIV Международной научно-практической конференции «Трубы-2021». Сборник докладов. – Челябинск, 2021.

117. Исхаков Р.В., Алещенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кадач М.В. Освоение клетки радиально-сдвиговой прокатки специальной конструкции для обжатия непрерывнолитых заготовок в условиях ТПА-160 АО «ПНТЗ» // Труды XIII Международного конгресса прокатчиков. Сборник докладов. – Москва, 2022. – Т.2.

118. R.V. Iskhakov, Y.V. Gamin, M.V. Kadach, A.S. Budnikov. Development of radial-shear rolling mill special stands for continuous cast billets deformation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 966 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012074>.

119. Тартаковский И.К. Развитие и создание нового поколения высокопроизводительных и надежных станов для производства горячекатаных бесшовных труб: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.02.13 – Москва, 2009. – 58 с.

120. 1-119320РЭ. Клеть трёхвалковая. Руководство по эксплуатации / АО «Исток МЛ». – Москва, 2020. – 44 с.: ил.

121. Электрооборудование прошивных и раскатных станов винтовой прокатки. Учебное пособие / А.С. Михайлов, С.П. Галкин, И.И. Лубе, В.В. Гуреев. – Выкса, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС», 2010. – 74 с.

122. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л., «Машиностроение», 1972. – 360 с.

123. Галкин С.П., Романцев Б.А., Гончарук А.В., Фадеев М.А. Траекторно-скоростные условия процесса прошивки в станах винтовой прокатки // Производство проката. – 2007. – №5. – С. 37-42.

124. Галкин С.П., Романцев Б.А., Гончарук А.В., Фадеев М.А. Оценка интенсивности деформации при прошивке в станах винтовой прокатки // Производство проката. – 2008. – №4. – С. 29-33.

125. Галкин С.П., Романцев Б.А., Гончарук А.В., Фадеев М.А. Анализ влияния безразмерных факторов прошивки на частные параметры формоизменения металла перед оправкой // Производство проката. – 2008. – №6. – С. 35-40.

126. Потапов И.Н., Полухин П.И., Шаманаев В.И., Романцев Б.А. Редуцирование особо толстостенных полых тел при больших углах подачи // Изв. Вузов Черная металлургия. – 1974. – №11. – С. 73-77.

127. Потапов И.Н., Романцев Б.А., Шаманаев В.И. Получение особотолстостенных труб на стане винтовой прокатки // Труды Московского института стали и сплавов: науч. труды / МИСиС. – М.: Металлургия. Вып.85: Пластическая деформация металлов и сплавов: Сб. статей / МИСиС, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1975. – С. 100-105.

128. Потапов И.Н., Романцев Б.А., Шаманаев В.И., Матурина Л.Ф. Редуцирование на стане винтовой прокатки // Труды Московского института стали и сплавов: науч. труды / МИСиС. – М.: Металлургия. Вып.96: Теория и технология деформации металлов: Сб. статей / МИСиС, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1976. – С. 43-46.

129. Шаманаев В.И. Исследование процесса винтовой прокатки толстостенных гильз и труб: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05. – Москва, 1979. – 251 с.

130. Pat. US No 4510787, B21B 19/04. Method of manufacturing hollow rods Chihiro Hayashi, Kazuyuki Nakasuji; assignee Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, Japan – No 508,718, filed Jun 28, 1983, Date of Patent Apr. 16, 1985.

131. А.с. 1616733 СССР, В 21 В 23/00, 19/02. Способ получения полых заготовок из высокопрочных материалов / Б.А. Романцев, И.Н. Потапов, В.А. Попов, А.В. Гончарук, и др. – Опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

132. K.Nakasuji, K.Kuroda, C.Hayaschi: Reduce rolling characteristics of hollow piece by rotary rolling mill, ISIJ International36 (1996), No. 5, pp. 572–578. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.572>.

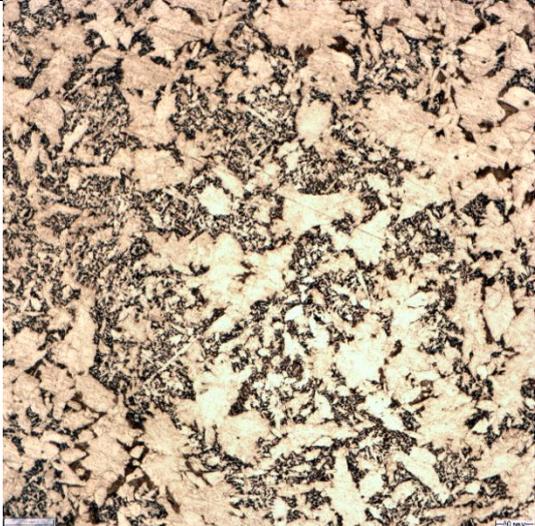
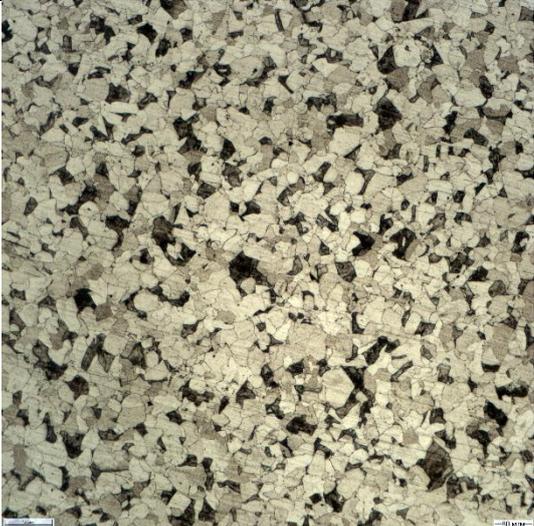
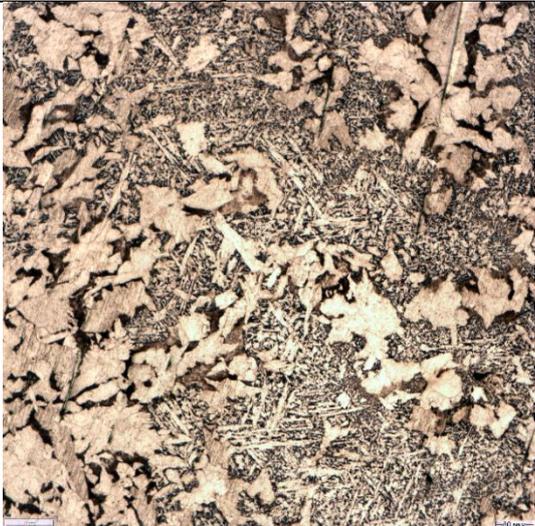
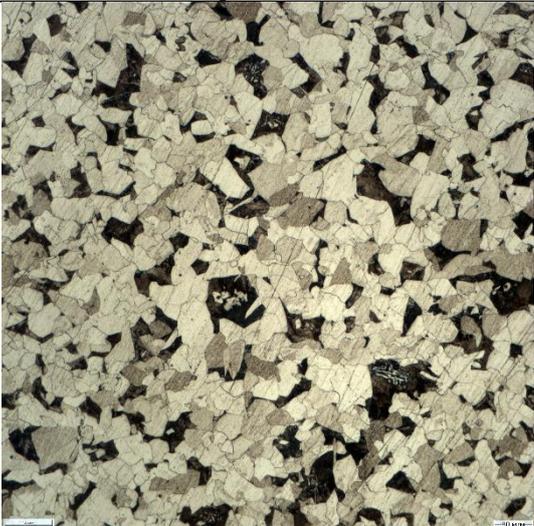
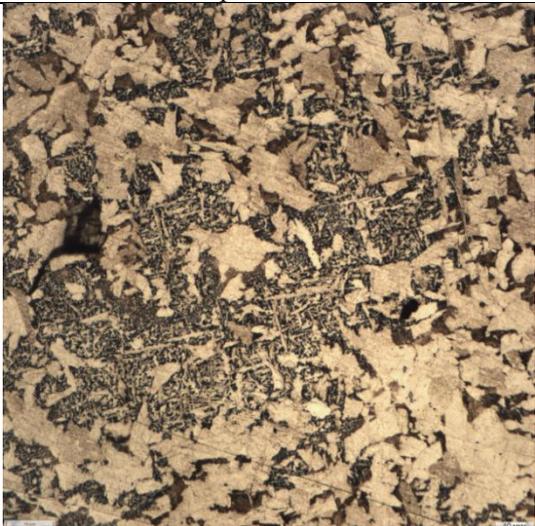
133. Pat. US No 5699690, B21B 19/04. Method and apparatus manufacturing hollow steel bars. Munekatsu Furugen, Shotaro Hamazaki, Norimasa Kameoka, Atsumi Okamoto; assignee Sumitomo Metal Industries, Ltd., Osaka, Japan – No 661,700, filed Jun 11, 1996, Date of Patent Dec. 23, 1997.

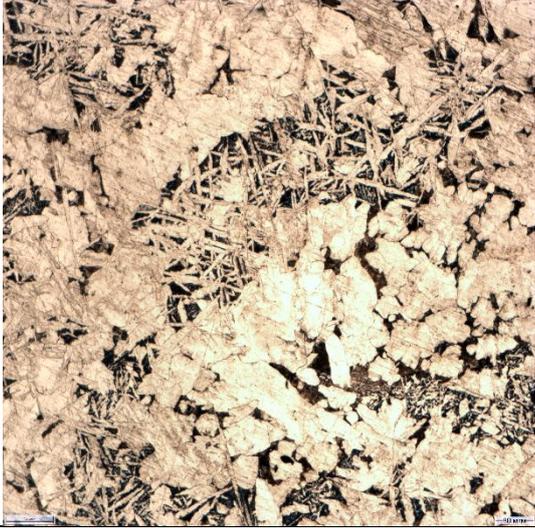
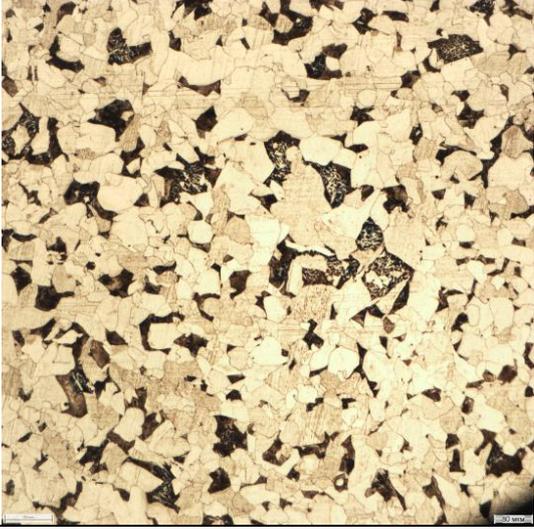
134. Тартаковский Б.И., Хисматуллин Р.Р. Трёхвалковый универсальный стан винтовой прокатки // Труды XXI Международной научно-практической конференции «Трубы-2014». Сборник докладов. – Челябинск, 2014. – Т.1. – С. 179-180.

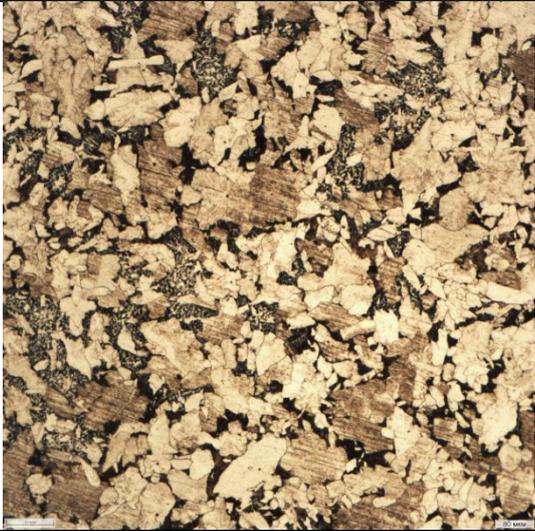
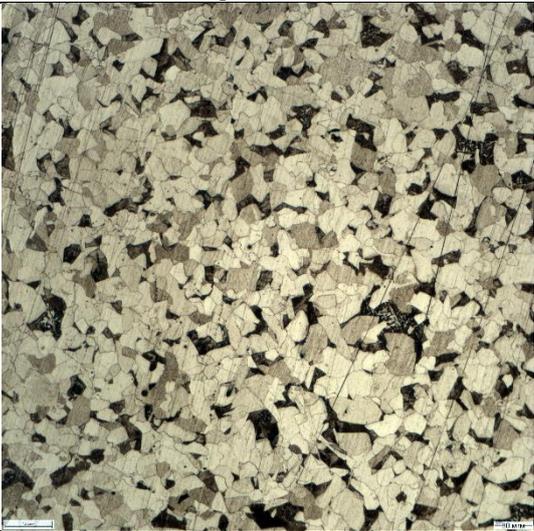
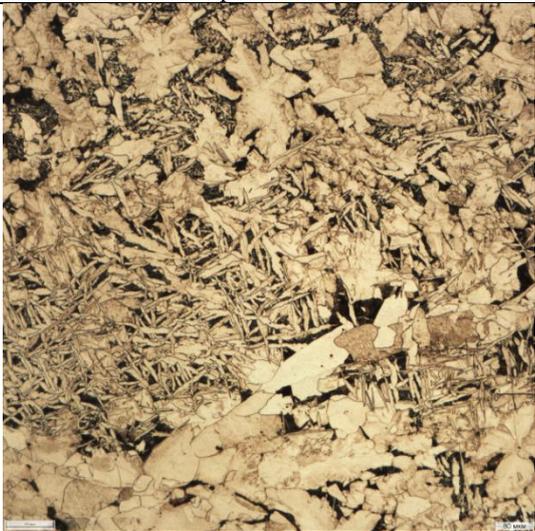
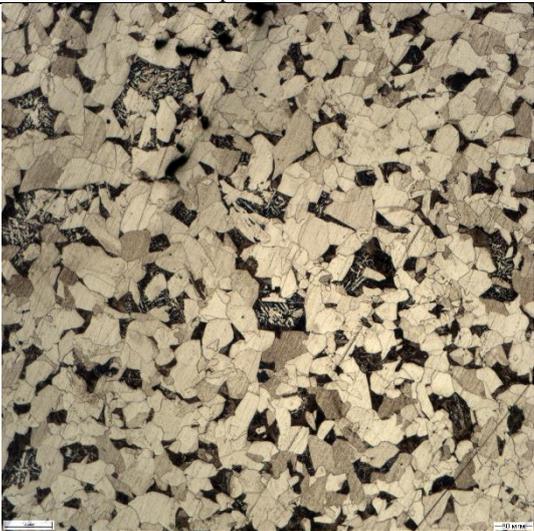
135. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Гамин Ю.В. Получение полых толстостенных профилей и труб из титановых сплавов методом винтовой прокатки // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 2015. №4. – С. 38-41. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-4-38-41>.

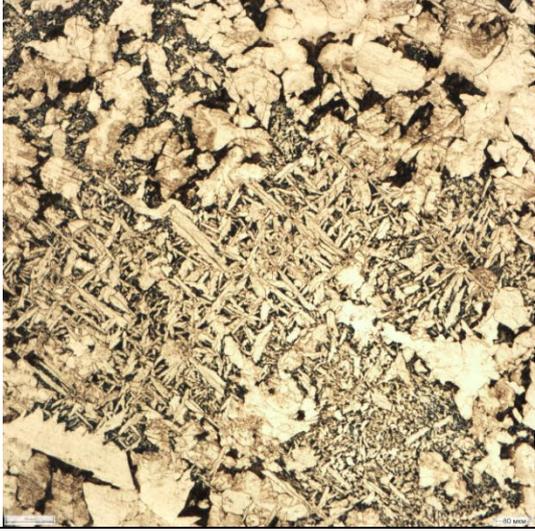
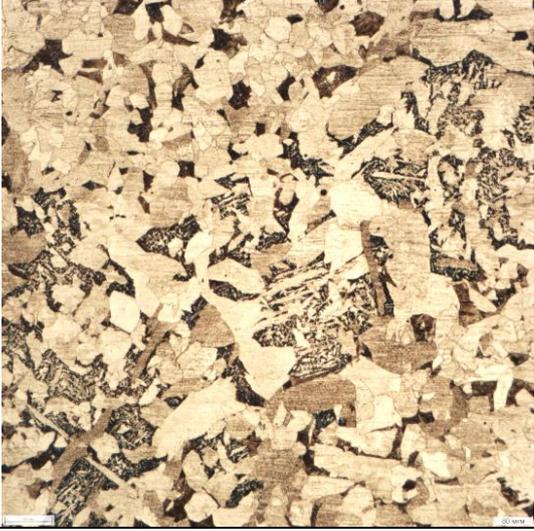
136. Гамин Ю.В., Романцев Б.А., Пашков А.Н., Патрин П.В., Быстров И.А., Фомин А.В., Кадач М.В. Получение полых полуфабрикатов изделий из медных сплавов электротехнического назначения способом винтовой прокатки // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 2020. – №1. – С. 27-38. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-27-38>.

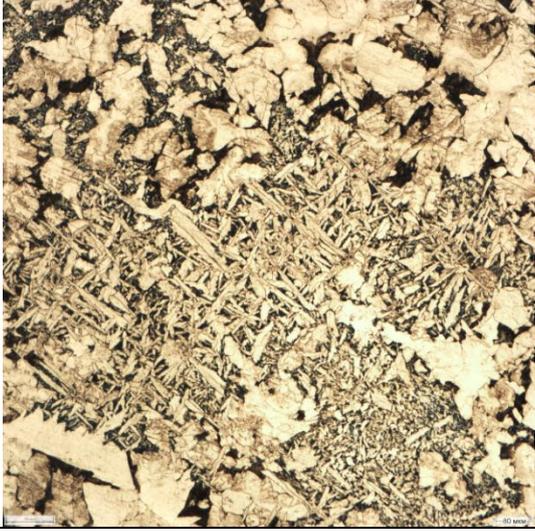
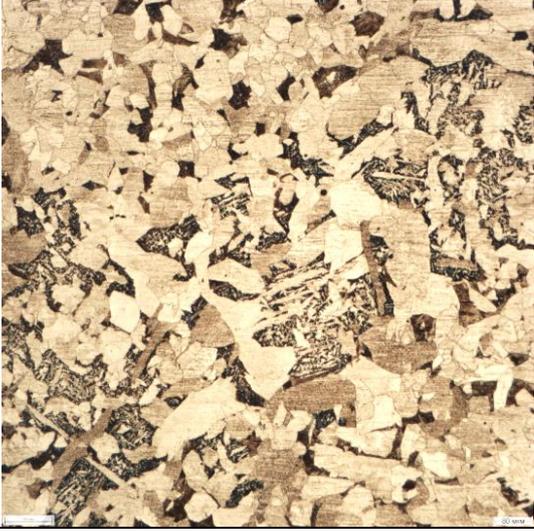
Результаты исследования микроструктуры образцов НЛЗ опытной партии до и после РСП на стане МИСиС-130Т, ( $\times 100$ )

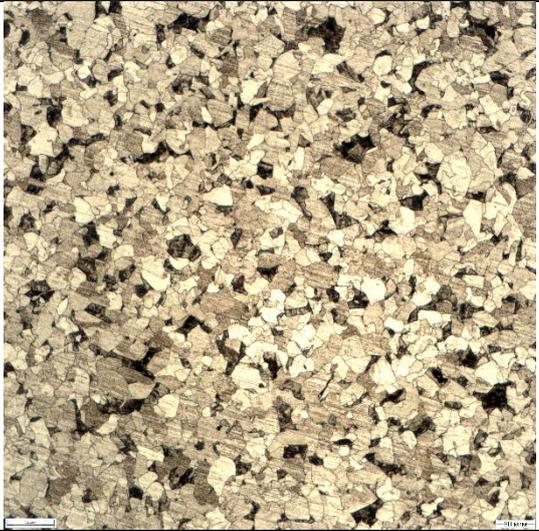
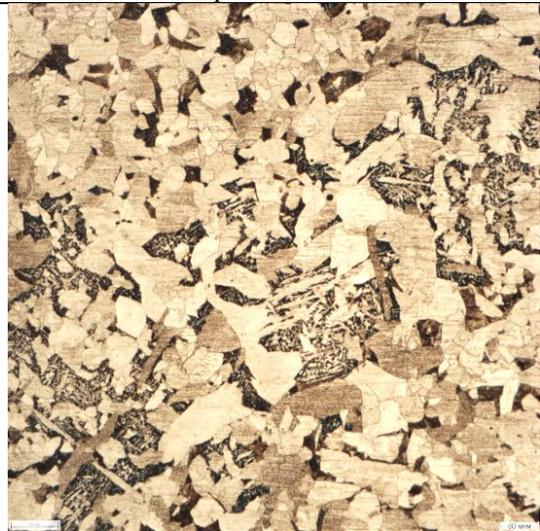
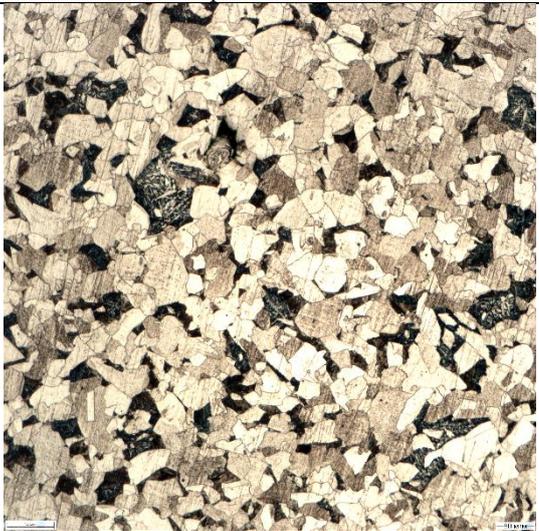
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F0105	
		НЛЗ, $\varnothing 150$	После РСП, $\varnothing 105$
Поверхность			
	Образец №1-7	Образец №1-1	
Середина радиуса			
	Образец №1-5	Образец №1-2	
Центр			
	Образец №1-4	Образец №1-3	

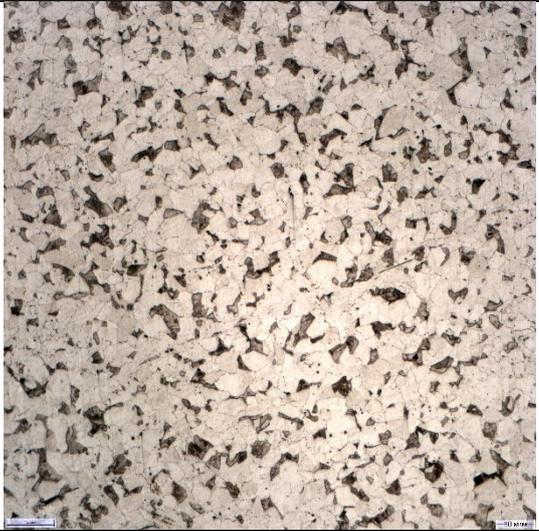
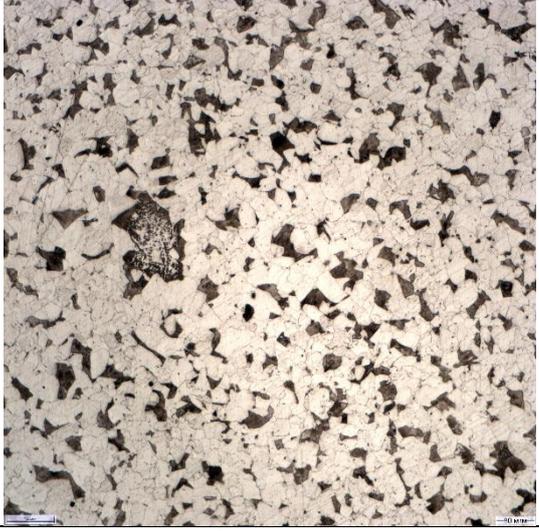
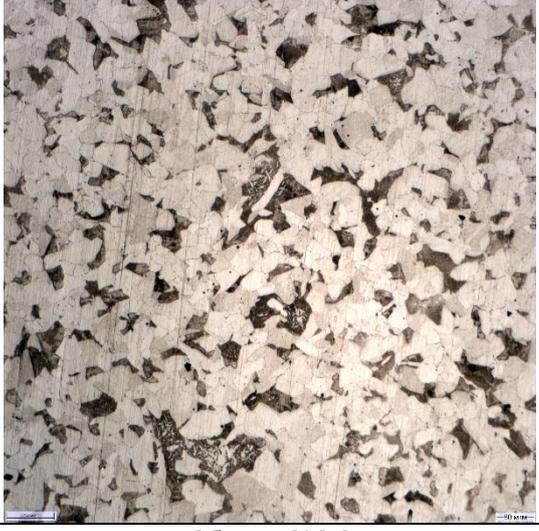
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø105
Поверхность			
	Образец №2-1	Образец №2-5	
Середина радиуса			
	Образец №2-3	Образец №2-4	
Центр			
	Образец №2-4	Образец №2-3	

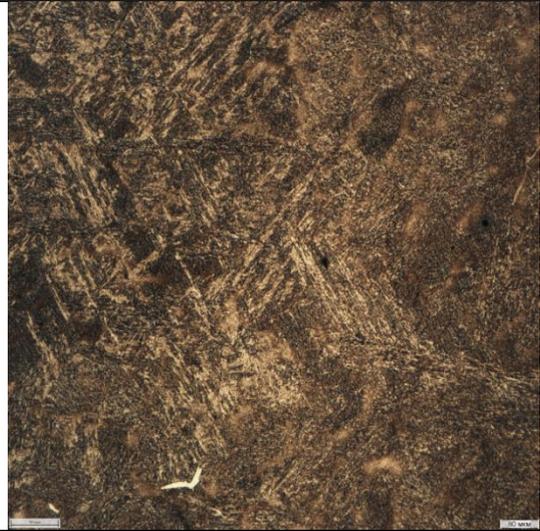
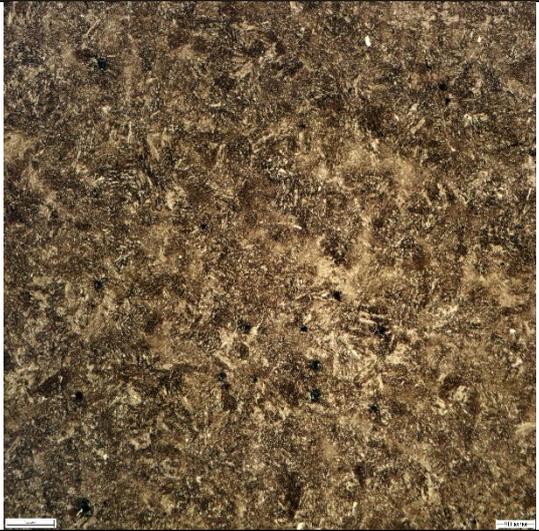
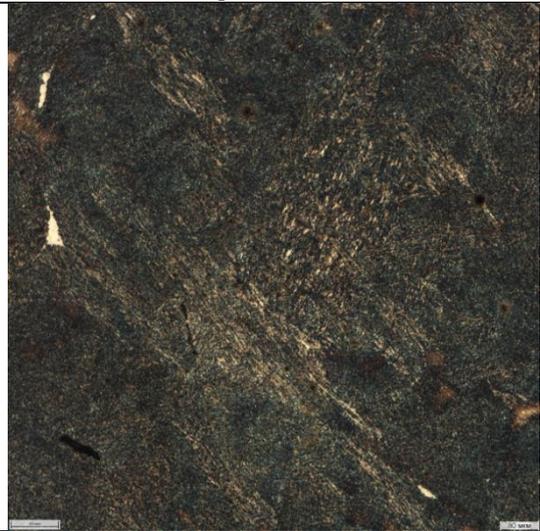
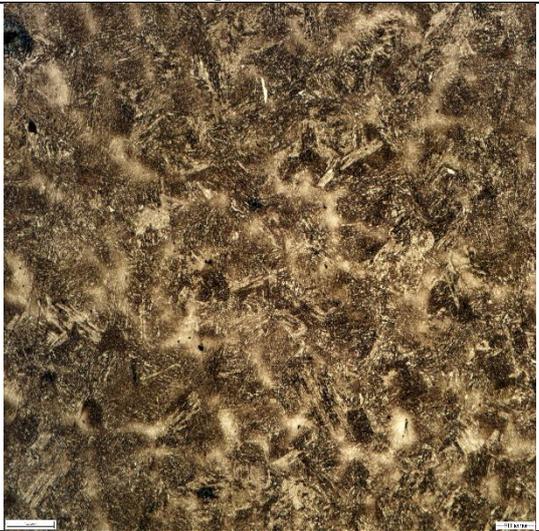
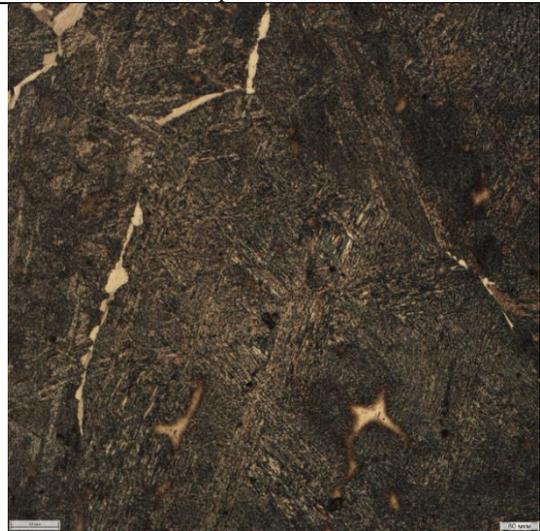
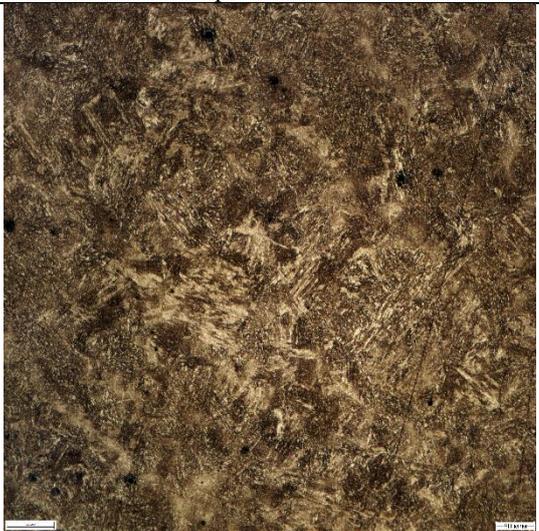
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø105
Поверхность			
	Образец №4-1	Образец №4-1	
Середина радиуса			
	Образец №4-2	Образец №4-2	
Центр			
	Образец №4-4	Образец №4-3	

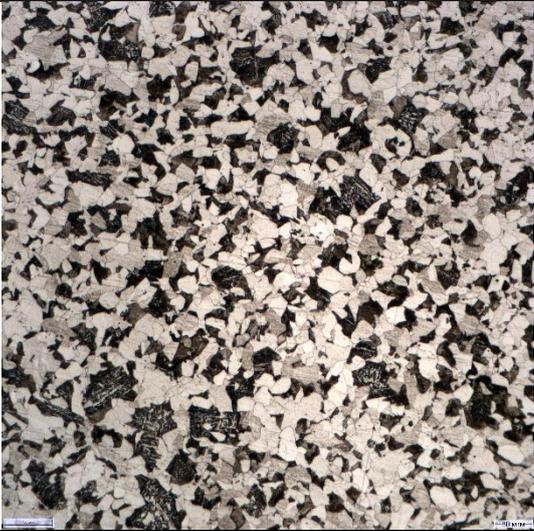
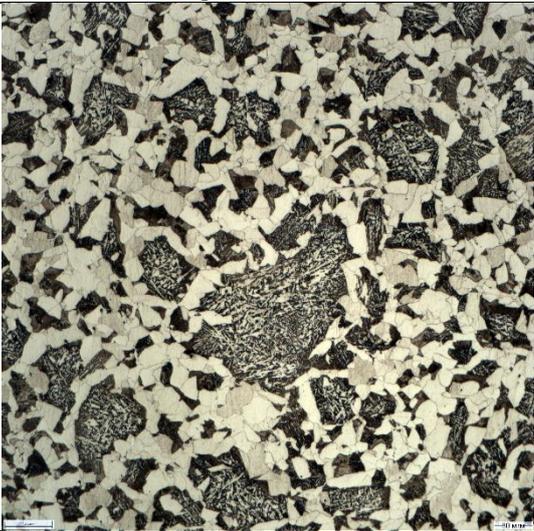
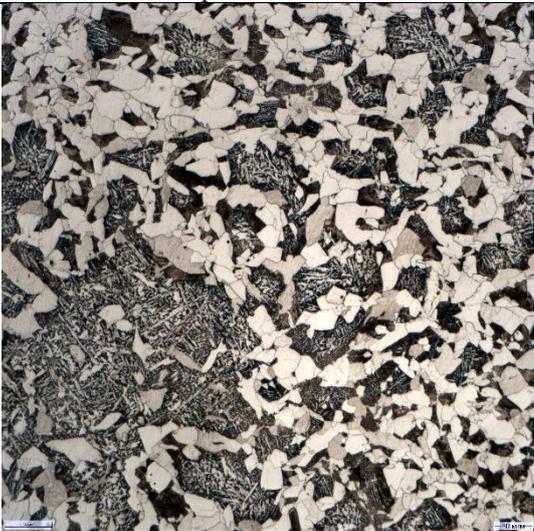
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø130
Поверхность			
	Образец №6-1	Образец №6-1-1	
Середина радиуса			
	Образец №6-2	Образец №6-1-2	
Центр			
	Образец №6-4	Образец №6-1-3	

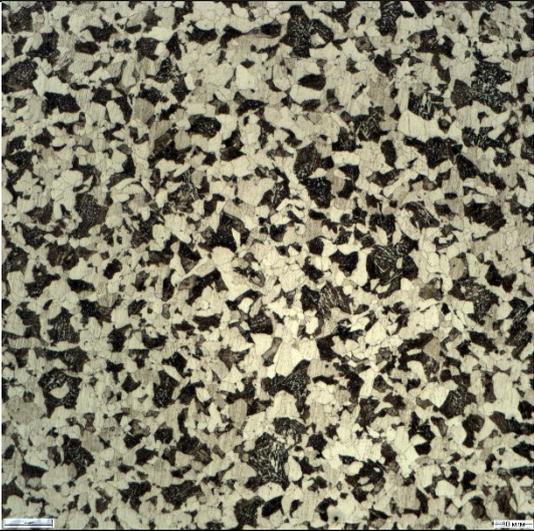
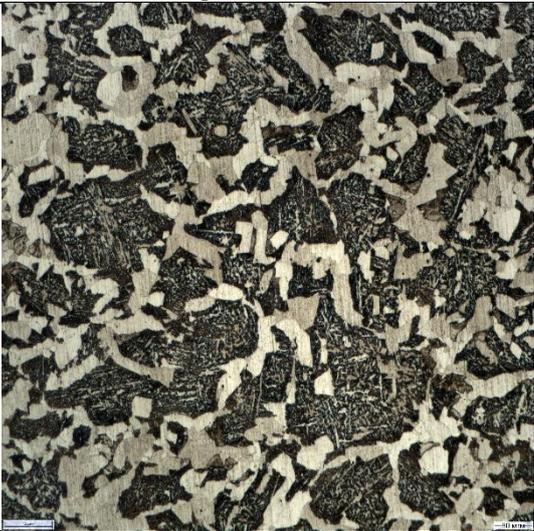
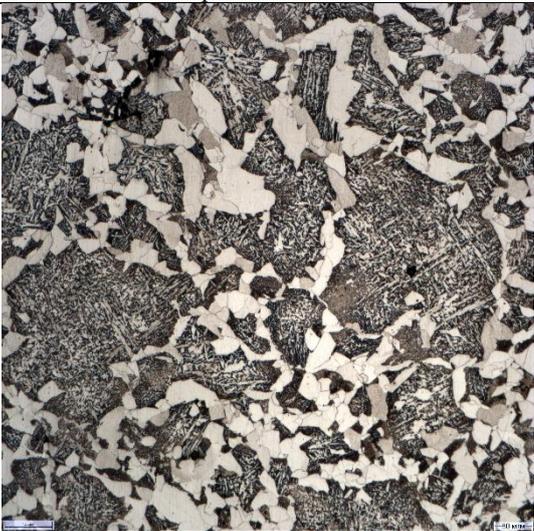
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø130
Поверхность			
	Образец №6-1	Образец №6-1-1	
Середина радиуса			
	Образец №6-2	Образец №6-1-2	
Центр			
	Образец №6-4	Образец №6-1-3	

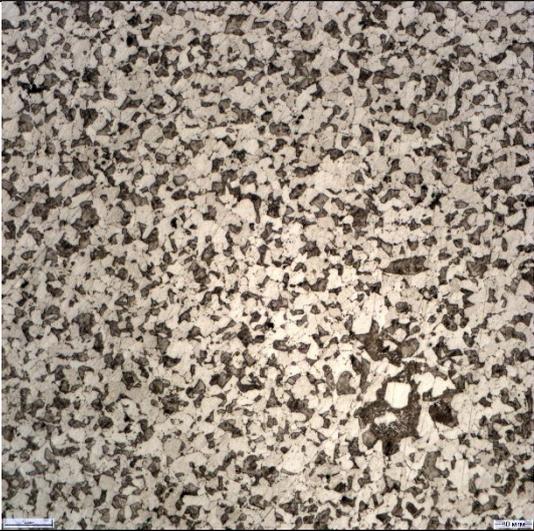
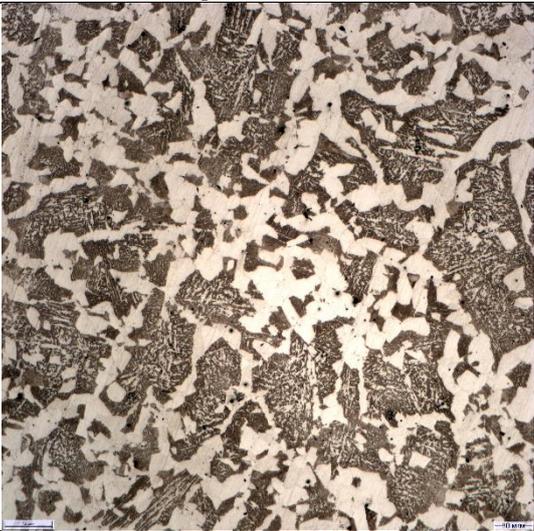
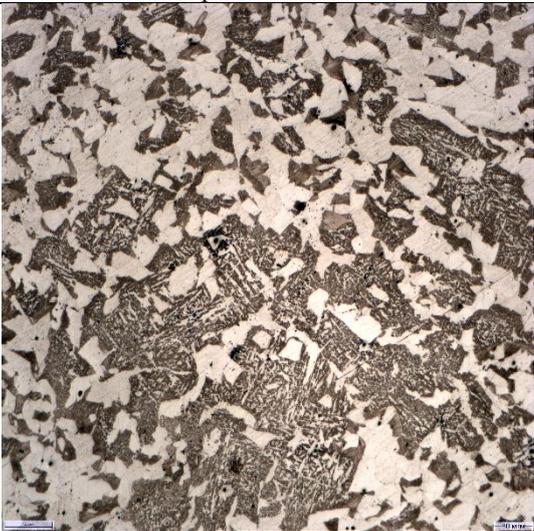
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		После РСП, Ø130	После РСП, Ø105
Поверхность			
	Образец №6-1-1	Образец №6-2-1	
	Середина радиуса		
Образец №6-1-2		Образец №6-2-2	
Центр			
	Образец №6-1-3	Образец №6-2-3	

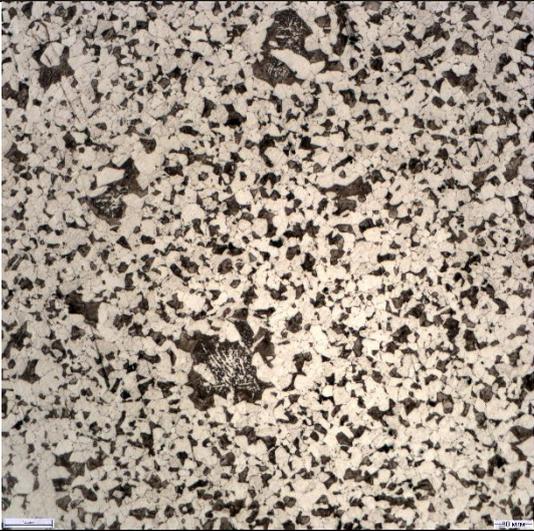
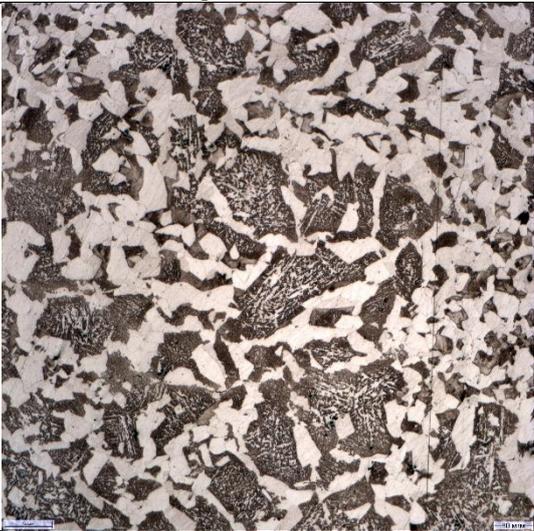
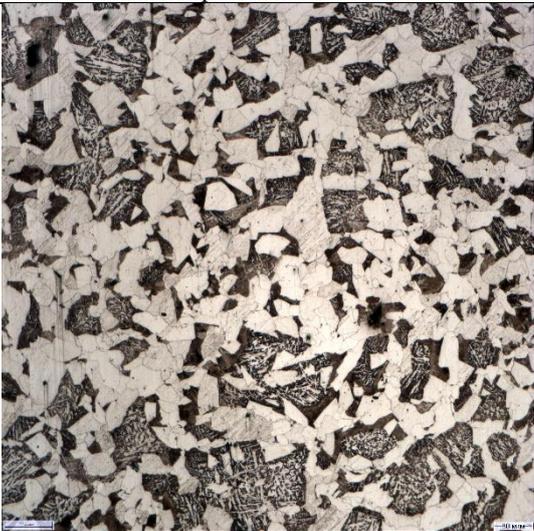
		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F4924	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø105
Поверхность		Образец №8-7	
			Образец №8-5
Середина радиуса		Образец №8-3	
			Образец №8-2
Центр		Образец №8-4	
			Образец №8-3

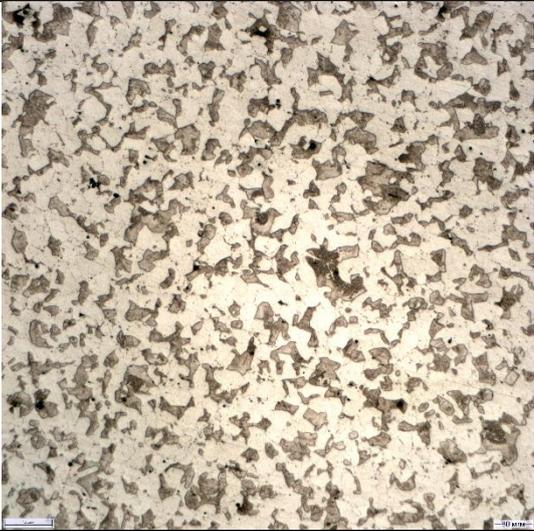
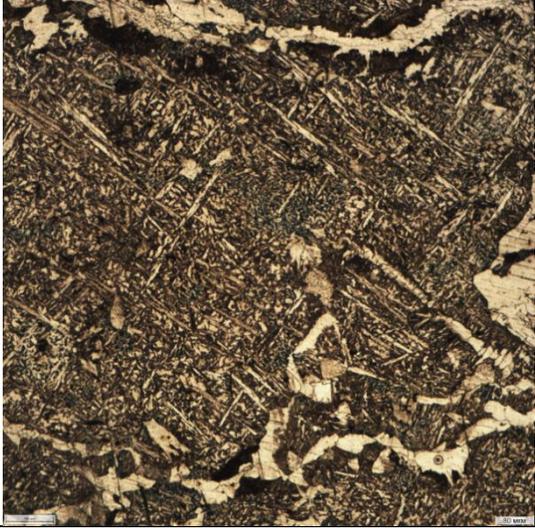
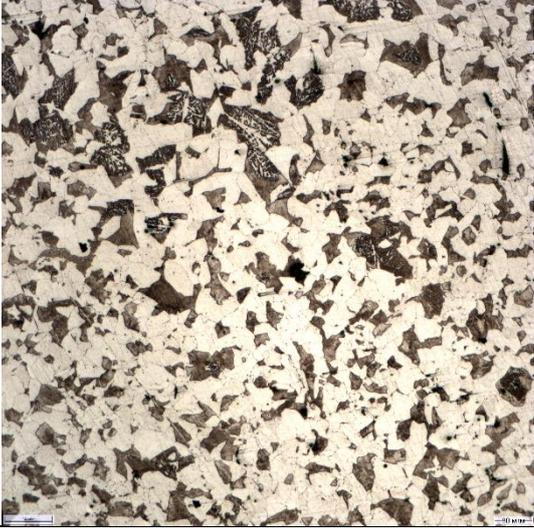
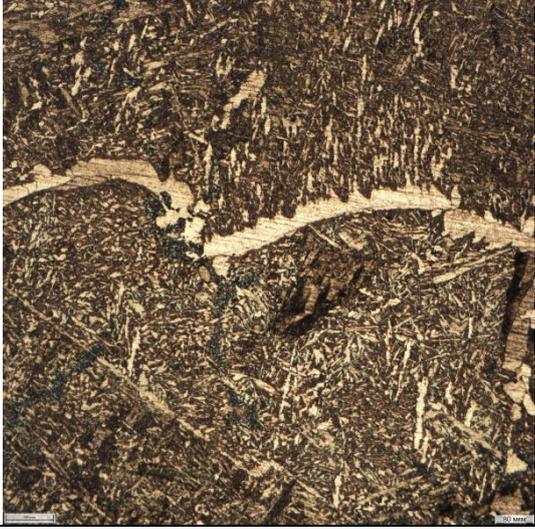
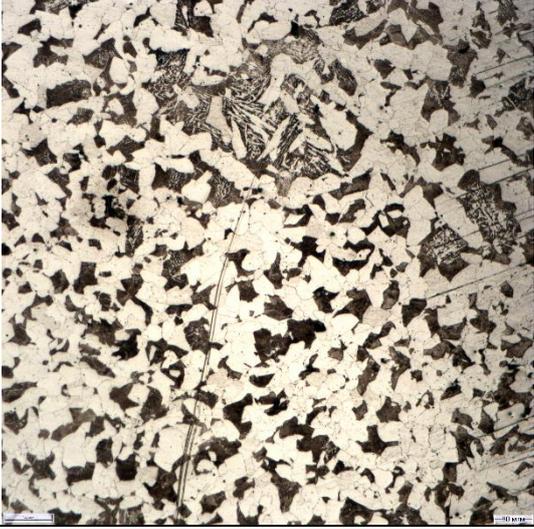
		Марка стали 18Х3МФБ, номер плавки 7F1786	
		НЛЗ, Ø150	После РСП, Ø90
Поверхность			
	Образец №10-1	Образец №10-1	
Середина радиуса			
	Образец №10-2	Образец №10-4	
Центр			
	Образец №10-4	Образец №10-3	

		Марка стали 18ХМФБ, номер плавки 8F4346	
		НЛЗ, Ø156	После РСП, Ø90, $\beta = 21^\circ$ (в два прохода)
Поверхность			
	Образец №11-7	Образец №11-0-1	
	Середина радиуса		
Образец №11-6		Образец №11-0-2	
Центр			
	Образец №11-4	Образец №11-0-3	

		Марка стали 18ХМФБ, номер плавки 8F4346	
		НЛЗ, Ø156	После РСП, Ø90, $\beta = 15^\circ$
Поверхность	Середина радиуса		
		Образец №11-7	Образец №11-1-1
			
		Образец №11-6	Образец №11-1-2
Центр			
		Образец №11-4	Образец №11-1-3

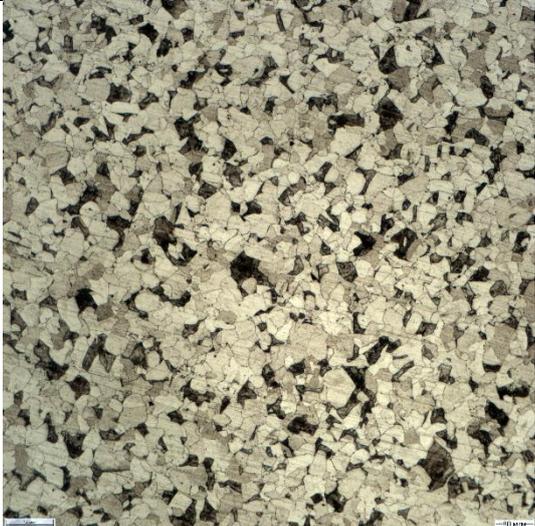
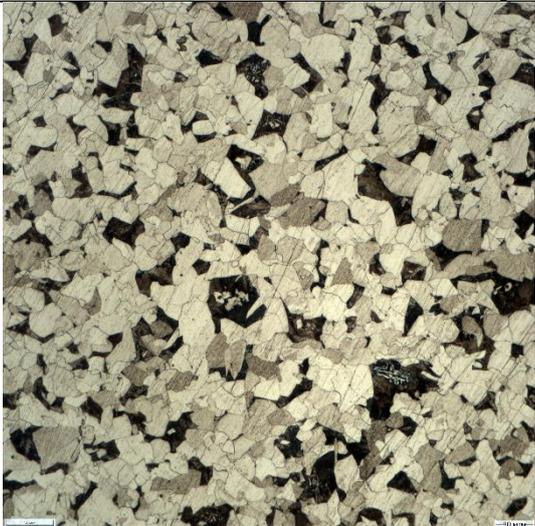
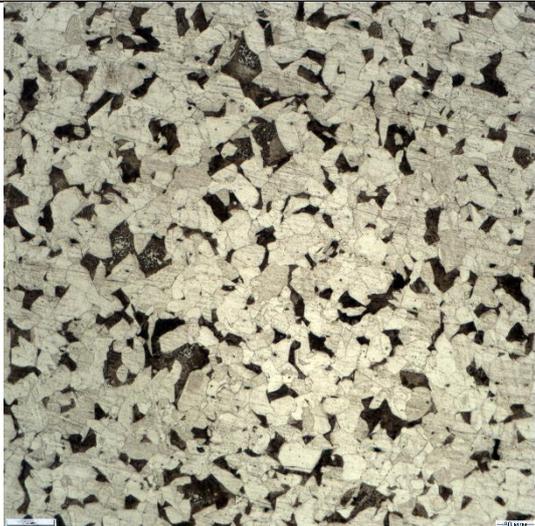
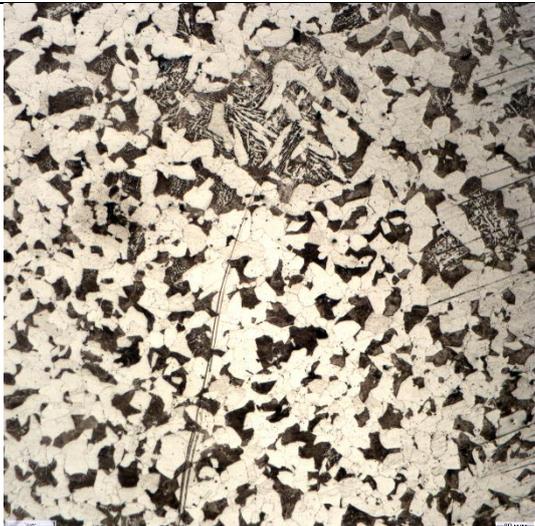
		Марка стали 18ХМФБ, номер плавки 8F4346	
		НЛЗ, Ø156	После РСП, Ø90, $\beta = 18^\circ$
Поверхность		Образец №11-7	
		Образец №11-6	
		Образец №11-4	
Середина радиуса			
Центр			

		Марка стали 18ХМФБ, номер плавки 8F4346	
		НЛЗ, Ø156	После РСП, Ø90, $\beta = 21^\circ$
Поверхность			
	Образец №11-7	Образец №11-3-1	
	Середина радиуса		
Образец №11-6		Образец №11-3-2	
Центр			
	Образец №11-4	Образец №11-3-3	

		Марка стали 18ХМФБ, номер плавки 9F0385	
		НЛЗ, Ø156	После РСП, Ø105
Поверхность			
	Образец №13-1	Образец №13-5	
Середина радиуса			
	Образец №13-2	Образец №13-4	
Центр			
	Образец №13-4	Образец №13-3	

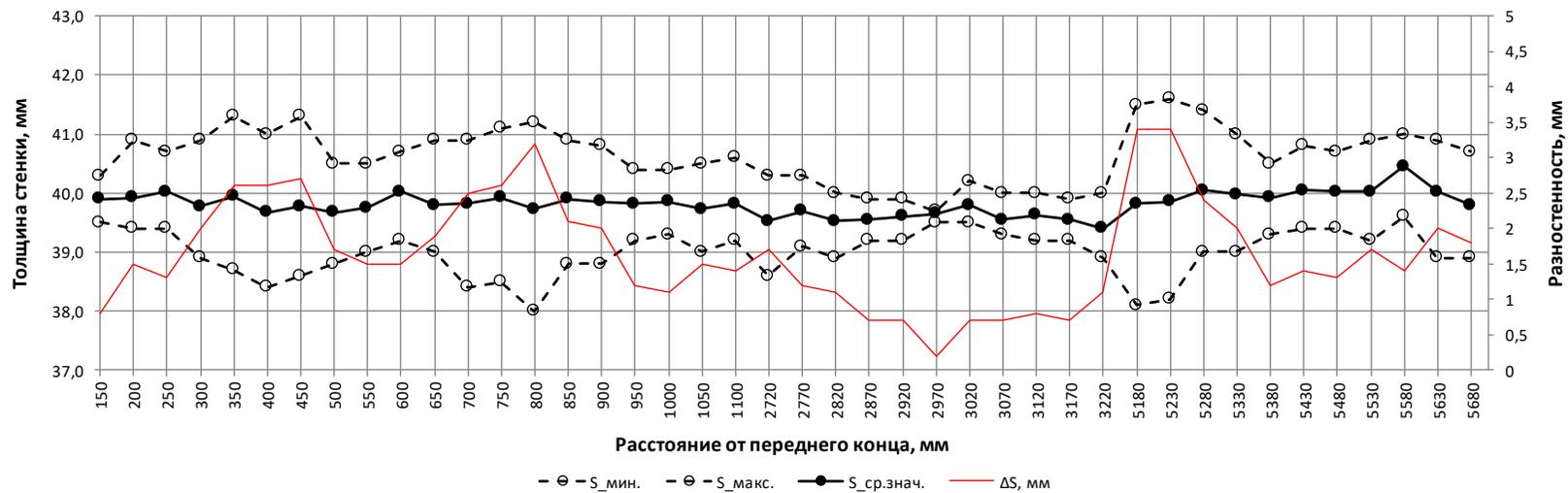
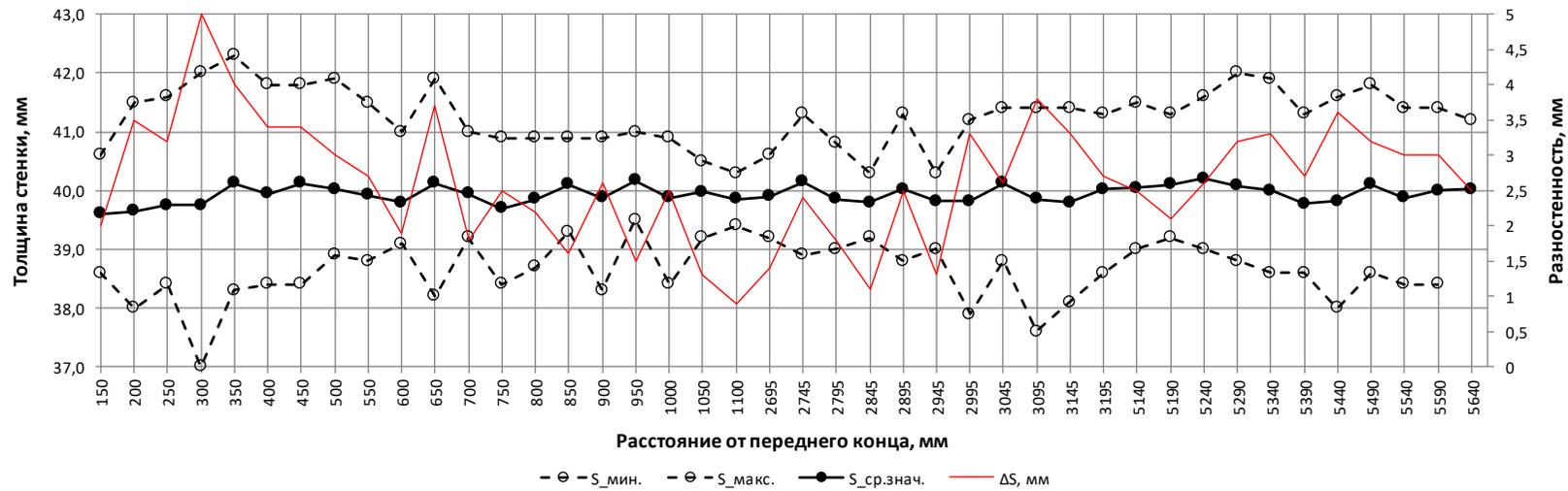
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Результаты сравнения микроструктуры образцов НЛЗ опытной партии после РСП на стане МИСиС-130Т в поперечном и продольном направлении, ( $\times 100$ )

		Марка стали 12Х1МФ, номер плавки 7F0105	
		После РСП, $\varnothing 105$ , поперечный	После РСП, $\varnothing 105$ , продольный
Поверхность			
		Образец №1-1	
Середина радиуса			
		Образец №1-2	
Центр			
		Образец №1-3	

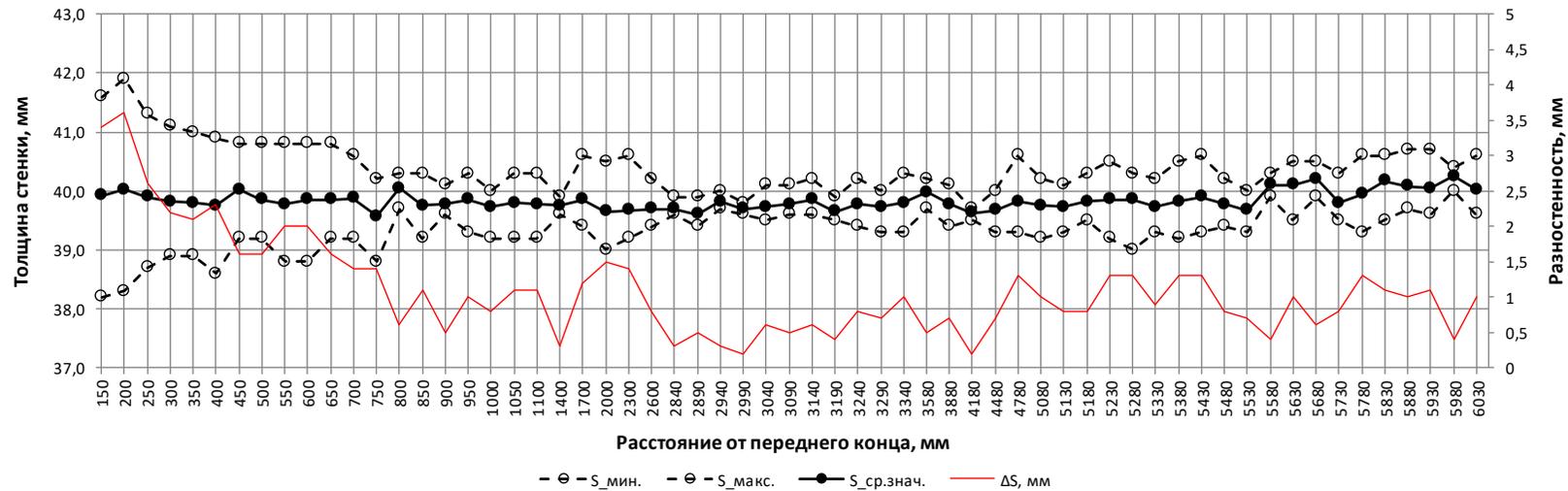
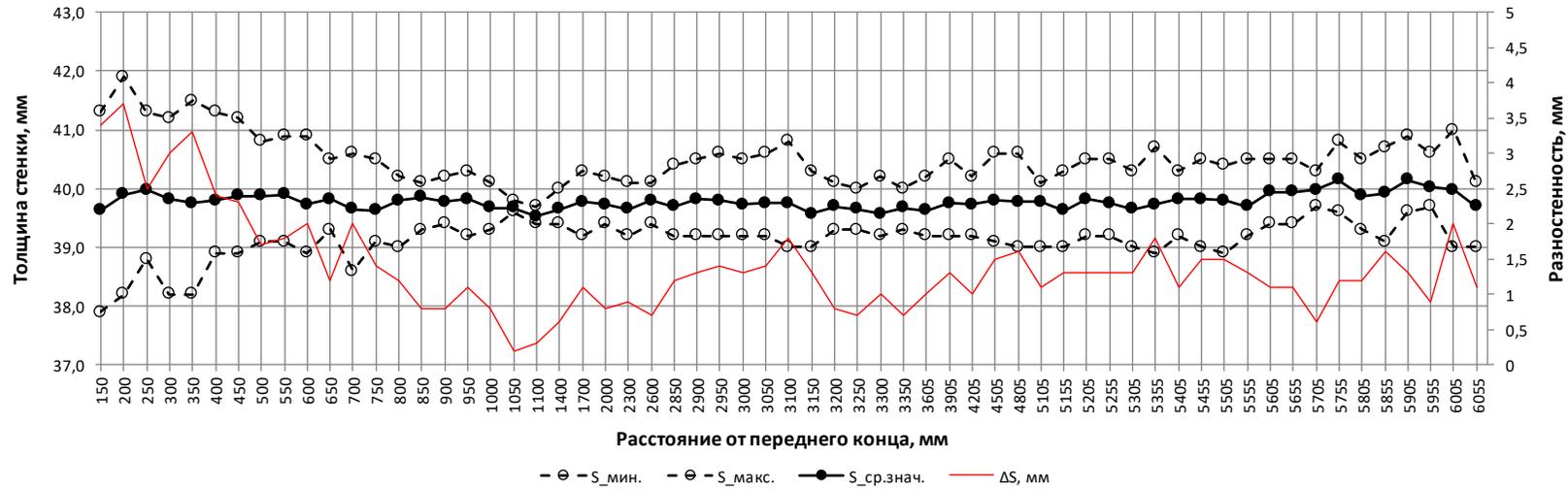
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты измерения толщины стенки труб размером 133хвн.56,3 мм из стали 35ХГМА при прокатке на углах подачи 14° (штатная клеть раскатного стана).



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты измерения толщины стенки труб размером 133хвн.56,3 мм из стали 35ХГМА при прокатке на углах подачи 18° (специализированная клеть РСП).





А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О  
ПЕРВОУРАЛЬСКИЙ НОВОТРУБНЫЙ ЗАВОД



УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер АО «ПНТЗ»

К.В. Батюков

«24» 05 2024

## АКТ

### О применении технологии радиально-сдвиговой прокати на трёхвалковой клети специальной конструкции для предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок перед прошивкой.

Настоящий акт составлен о том, что с февраля 2021 года в составе в ТПА-160 применяется технология предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок с применением клети радиально-сдвиговой прокатки (РСП) специальной конструкции. Клеть эксплуатируется как сменное оборудование к трёхвалковому раскатному стану. Работа клети регламентируется специально разработанными инструкциями.

Применение клети РСП повышает гибкость и эффективность производства бесшовных труб, в том числе, из легированных марок сталей за счет:

- расширения размерного сортамента заготовок под прошивку из НЛЗ в диапазоне диаметров 145-220 мм;
- ослабления влияния негативных особенностей структурного строения непрерывнолитого металла на качество труб;
- возможности, в ряде случаев, использования непрерывнолитой предварительно деформированной заготовки собственного производства взамен покупной катаной;
- интенсификации деформации по схеме обжатие РСП на диаметр меньше диаметра гильзы и последующая прошивка на подъём.

В технологии предварительного обжатия и конструкции специализированной клети РСП использован ряд научно-технических решений, разработанных в диссертационной работе Исхакова Р.В., в частности:

- схемы прокатки, калибровки валков;
- объёмно-компоновочное решение и параметры клети, обеспечивающие совместимость с групповым приводом существующего раскатного стана ТПА-160.
- схемы деформации в связке «РСП + прошивка».

Начальник трубопрокатного цеха №5

А.Л. Ошурков

Заместитель главного инженера-  
начальник технологического управления

А.И. Домрачев

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИСТОК МЛ»

Утверждаю  
Генеральный директор АО «Исток МЛ»  
Дмитриева Л.Г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Исхакова Р.В. на тему «Исследование и разработка технологии и специализированной клетки радиально-сдвиговой прокатки непрерывнолитых заготовок из легированных сталей в условиях ТПА с трехвалковыми станами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Настоящий Акт составлен в том, что ряд научно-технических положений, разработанных в диссертационной работе Исхакова Р.В., использован при проектировании специализированной клетки радиально-сдвиговой прокатки (РСП) для установки в составе ТПА 160 АО «ПНТЗ с трехвалковым раскатным станом.

В частности, применены:

- схемы предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок методом РСП, калибровки рабочих валков, результаты расчета энергосиловых параметров;
- объёмно-компоновочное решение специализированной клетки РСП, схема настройки валков, параметры основных узлов и механизмов.

Клеть изготовлена АО «Исток МЛ в кооперации с ПАО «НЛМК» и поставлена в адрес АО «ПНТЗ».

Инженер

Кадач М.В.

Директор института  
Экотехнологий и инжиниринга  
НИТУ МИСИС

А.Я. Травянов

«28» 05. 2024 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Исхакова Р.В. в учебный процесс на кафедре ОМД НИТУ МИСИС

Настоящий Акт составлен в том, в учебном процессе на кафедре ОМД НИТУ МИСИС применяются результаты диссертационной работы Исхакова Р.В. на тему «Исследование и разработка технологии и специализированной клетки радиально-сдвиговой прокатки непрерывнолитых заготовок из легированных сталей в условиях ТПА с трехвалковыми станами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В частности, при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудование» используются:

- аналитическая методика расчета геометрических параметров очага деформации в процессе радиально-сдвиговой прокатки (РСП) по заданному профилю валков и их 3D расположения относительно оси прокатки;
- технологические возможности клетки РСП специальной конструкции;
- результаты FEM моделирования процесса РСП с применением валков экстремально малого диаметра.

Заведующий каф. ОМД  
Ученый секретарь каф. ОМД  
Научный руководитель

А.С. Алещенко  
Т.Ю. Сидорова  
С.П. Галкин

XXVII МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ПРОМЫШЛЕННАЯ  
ВЫСТАВКА  
МЕТАЛЛ-ЭКСПО'2021



XXVII INTERNATIONAL  
INDUSTRIAL  
EXHIBITION  
METAL-EXPO'2021

**Награждается коллектив**

**НИТУ «МИСиС»**

за разработку технологии и создание стана радиально-сдвиговой прокатки специальной конструкции для предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок в условиях ТПА 160 АО «ПНТЗ» при повышенных углах подачи валков ( $18^{\circ}$ )

**ЗОЛОТОЙ  
МЕДАЛЬЮ**

**лауреата международной выставки  
«Металл-Экспо»**

(Алещенко А.С., Галкин С.П., Романцев Б.А.,  
Гамин Ю.В., Кадач М.В., Исхаков Р.В.)

Сопредседатель Оргкомитета «Металл-Экспо»

Президент Российского союза  
поставщиков металлопродукции

А.Г. Романов