

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

ИСХАКОВ РУСЛАН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

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

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Галкин Сергей Павлович

Москва – 2025

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° 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.

Напряжённно-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°) 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 РСП 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 РСП 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, поставлены задачи для её достижения, сформулирована научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы представлены современные тенденции применения непрерывнолитой заготовки для изготовления бесшовных труб,

которая предоставляет определённые экономические преимущества, связанные со снижением затрат на производство. Однако, в связи с наличием дефектов структуры характерных данного типа заготовки (осевая пористость и/или ликвация, а также пониженная пластичность) и обусловленных способом её производства, потенциально могут приводить к возникновению неустраняемых дефектов на внутренней поверхности труб. Риск образования дефектов внутренней поверхности труб возрастает с увеличением количества легирующих элементов.

В главе приведены способы применения винтовой (радиально-сдвиговой) прокатки для предварительной деформации непрерывнолитой заготовки с целью повышения технологической пластичности перед прокаткой труб. Подробно рассмотрена радиально-сдвиговая прокатка (РСП) как универсальный способ интенсивной пластической деформации (ИПД), её особенности, предпосылки создания процесса и исследовательские достижения коллектива учёных «МИСИС». Показана перспективность и преимущества включения обжимных станов РСП в технологическую схему производства бесшовных труб из непрерывнолитых заготовок.

В конце главы приведён текущий успешный опыт применения радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки в условиях действующих трубопрокатных агрегатов на заводах Российской Федерации и ближнего зарубежья, рассмотрены варианты реализации данного процесса в условиях АО «ПНТЗ», сделан акцент на необходимости дальнейшего исследования влияния радиально-сдвиговой прокатки на механические и эксплуатационные свойства получаемых бесшовных труб, в том числе из хромсодержащих марок стали.

Вторая глава посвящена прямому экспериментальному исследованию влияния предварительной деформации НЛЗ способом радиально-сдвиговой прокатки при углах подачи до 21° на структуру деформированной заготовки и свойства бесшовных труб из хромсодержащих марок стали, полученных в условиях АО «ПНТЗ».

Радиально-сдвиговой прокатке на стане МИСиС-130Т подвергали НЛЗ диаметром 150 и 156 мм из стали марок 12Х1МФ, 18ХМФБ и 18Х3МФБ в количестве 10 т. Режимы опытной прокатки НЛЗ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы прокатки НЛЗ на стане РСП МИСиС-130Т.

№ п/п	Марка стали	Температура нагрева, °С	Угол подачи, град.	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

Макроструктура исходных и деформированных заготовок контролировалась в трёх зонах: в центре; на середине радиуса; на периферии.

Исходные НЛЗ 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. Центральная пористость находится в пределах 3 балла.

В результате РСП с коэффициентом вытяжки 2,0-3,0 происходит практически сквозная проработка металла по поперечному сечению и получение достаточно однородной структуры по всему сечению заготовки. При этом наиболее дисперсная и однородная структура наблюдается в поверхностных слоях. Центральная пористость также снижается и составляет не более 1 балла (рисунок 1).

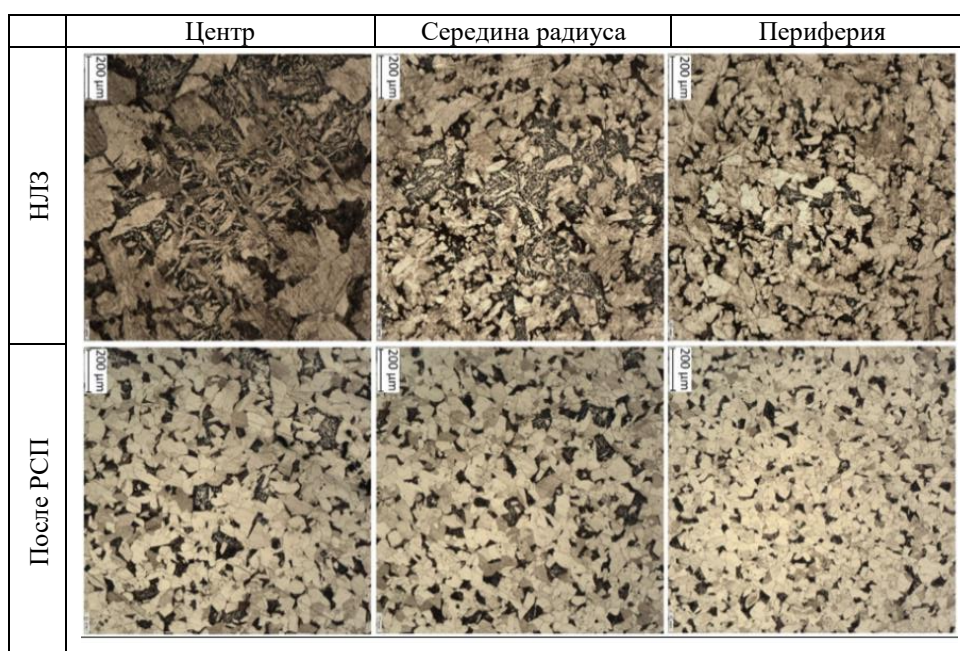


Рисунок 1 – Микроструктура НЛЗ из стали 12Х1МФ и деформированной заготовки после РСП по маршруту $\varnothing 150 \rightarrow \varnothing 105$ мм. В центре прутка, в середине радиуса и на периферии.

Полноту проработки металла можно оценить, относительной долей (процентом) остаточной литой структуры (рисунок 2).

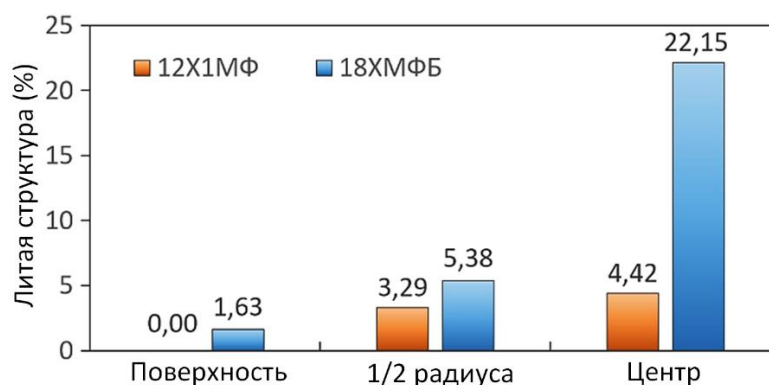


Рисунок 2 – Процент остаточной литой структуры сталей 12Х1МФ и 18ХМФБ в различных зонах проката после РСП.

Распределение доли литой структуры имеет градиентный характер, соответствующий неравномерности деформации при РСП и зависит от марки стали. Несмотря на то, что сталь 18ХМФБ деформирована с большим 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.

Из полученных, предварительно деформированных на стане РСП, заготовок на ТПА-160 и ТПА 140-1 АО «ПНТЗ» произведена опытная партия труб в соответствии с маршрутами таблицы 2.

Таблица 2 – Маршруты прокатки труб из предварительно деформированной заготовки на АО «ПНТЗ».

№ 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	18Х3МФБ	1210-1230	90	83×5,0	5,19

Оценка влияния радиально-сдвиговой прокатки (РСП) НЛЗ на механические свойства готовых труб проведена на примере стали 18ХМФБ в сравнении с серийной технологией (рисунок 3).

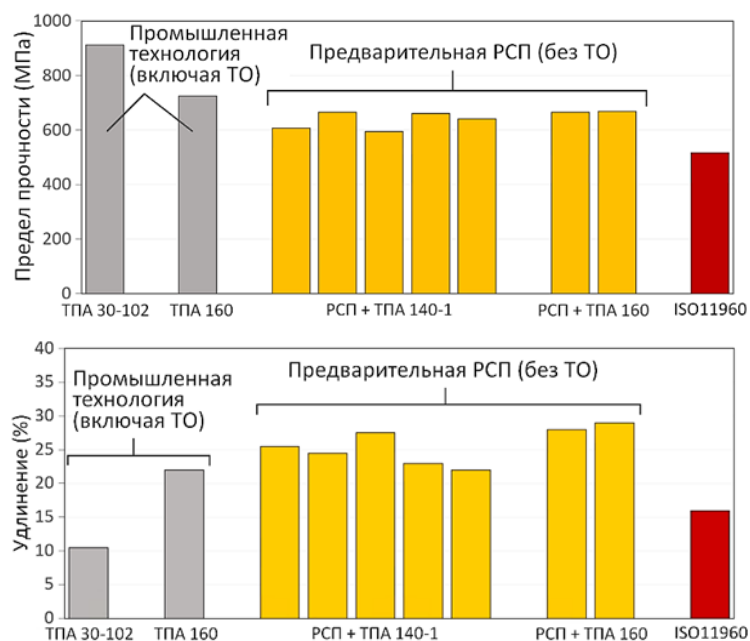


Рисунок 3 – Механические свойства бесшовных труб из стали 18ХМФБ полученные прокаткой из НЛЗ по действующей технологии на различных ТПА (серые столбики), из заготовки, предварительно деформированной на стане РСП (желтые столбики) и нормативные требования по ГОСТ Р 53366/ISO 11960 для группы прочности J55 (красные столбики).

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 (δ_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.

Включение в процесс предварительной деформации 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), а также получать более высокий уровень механических свойств.

В третьей главе описано развитие методики расчёта геометрических параметров винтовой (радиально-сдвиговой) прокатки, основанной на построении виртуальных пережимов применительно, к решению обратной задачи – построению продольного профиля очага деформации по заданной калибровке (продольного профиля) и настройке валков. Решение данной задачи имеет непосредственную практическую значимость, связанную с анализом действующих режимов прокатки, выявления потенциальных возможностей и недостатков калибровок валков, определения направлений для их дальнейшего совершенствования.

Для решения обратной задачи вводится понятие угла раскатки δ_i^* и подачи β_i^* заготовки относительно оси валка, которые изменяются вдоль оси валка.

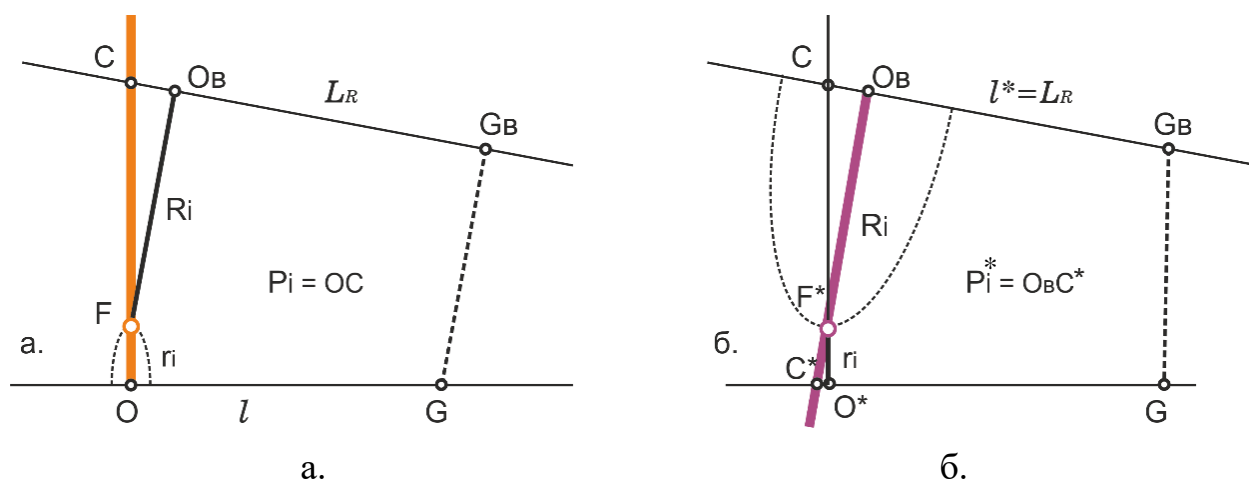


Рисунок 4 – Схема контакта «валок–заготовка» в технологическом пережиме для прямой (а) и обратной (б) задачи. CG_B – ось валка. OG (O^*G) – ось прокатки. OC – ось разворота валка на угол подачи β . $O_B C^*$ – ось разворота заготовки на угол подачи β^* .

В рассматриваемом i -ом сечении угол раскатки δ_i^* определяется как дополнительный угол между осью заготовки и перпендикуляром к оси валка, пересекающим ось заготовки. В технологическом пережиме (рисунок 4) это дополнительный угол к углу между отрезками C^*G и $O_B C^*$. Угол подачи β_i^* представляет собой 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 GG_B на величину $L_{Ri} = O_B G_B$, известен его радиус R_i , определены угол раскатки δ_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 известной формуле для прямой задачи.

$$r_i = (P_i^* - R_i) \cdot \cos \delta_i^*. \quad (1)$$

$$\text{При этом } P_i^* = E \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{L_{Ri} \cdot \text{tg} \gamma}{E}\right)^2} \quad (2) \text{ и } \cos \delta_i^* = \frac{1 + \left(\frac{L_{Ri} \cdot \sin \gamma}{E}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_{Ri} \cdot \text{tg} \gamma}{E}\right)^2}}, \quad (3)$$

где γ – угол скрещивания осей валка и заготовки;

E – длина общего перпендикуляра GG_B к осям валка и заготовки (расстояние между осями валков и заготовки в геометрическом пережиме).

Для вычисления угла подачи β_i^* в этом сечении можно использовать формулы

$$\text{tg} \beta_i^* = \frac{E \cdot \text{tg} \gamma}{P_i^*} \quad (4) \text{ или } \text{ctg}^2 \beta_i^* = \text{ctg}^2 \gamma + \left(\frac{L_{Ri}}{E}\right)^2 \quad (5)$$

Точность обратного решения зависит от фактических углов подачи и раскатки и изменяется вдоль оси валка (рисунок 5) Со снижением δ_i^* и β_i^* точность расчёта существенно возрастает и для реального диапазона углов относительная погрешность не превышает 0,15-0,25%.

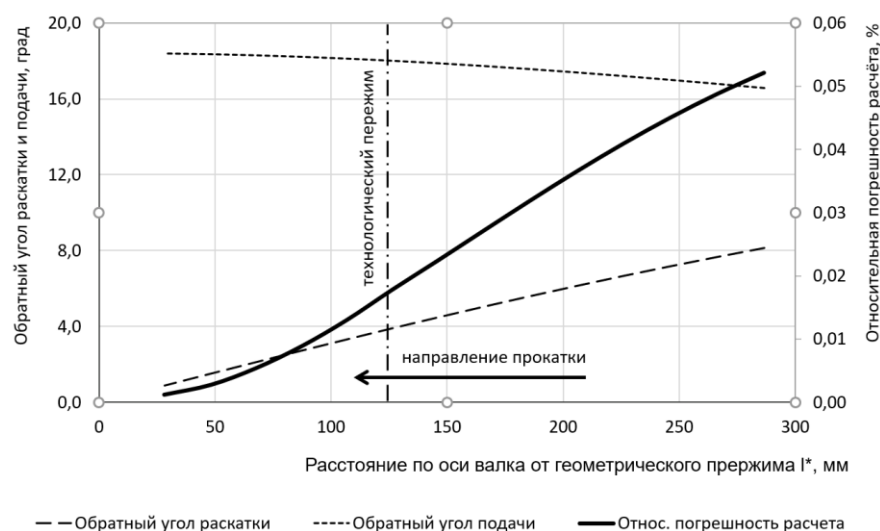


Рисунок 5 – Изменение относительной погрешности расчёта радиуса заготовки, обратных углов раскатки δ_i^* и подачи β_i^* заготовки вдоль оси валка (угол подачи валков – 18° , угол раскатки валков – 4°).

Расчётные размеры очага деформации при углах раскатки и подачи специализированной клетки, полученные по данной методике, с погрешностью не более 0,22% совпадают с аналогичными величинами, полученными построением в CAD-системе.

В четвертой главе представлено исследование влияния диаметра валков на энергосиловые параметры и напряжённо-деформированное состояние при РСП, выполненное конечно-элементным моделированием в программе QForm. Выбраны два варианта исходных параметров, характерные для специализированной и штатной клеток раскатного стана ТПА-160. Угол подачи в обоих вариантах выбран одинаковым и равным 18° (таблица 3).

Таблица 3 – Технологические параметры 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	
Температура нагрева, °С	1200	
Материал заготовки (из стандартной базы QForm)	сталь 15ХМ	

Для каждого варианта моделировалось два маршрута прокатки $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$ и $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$ мм. В варианте 1 применяются валки диаметром, составляющим 1,8-1,3 диаметра исходной заготовки.

Получены данные по усилию на валок, моменту и суммарной мощности прокатки (рисунок 6), а также поля распределения скорости деформации, показателя жесткости схемы напряжённого состояния $\frac{\sigma}{T}$ и накопленной пластической деформации.

Показано, что наибольшее влияние диаметр валков оказывает на момент прокатки. При увеличении диаметра валков с 280 до 430 мм, момент прокатки увеличивается на маршруте обжатия $\varnothing 156 \rightarrow \varnothing 105$ мм с 30 до 46 кН·м и с 51 до 75 кН·м на маршруте $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 170$ мм, существенно превышает предельно допустимый момент прокатки для линии главного привода раскатного стана ТПА-160 – 40 кН·м.

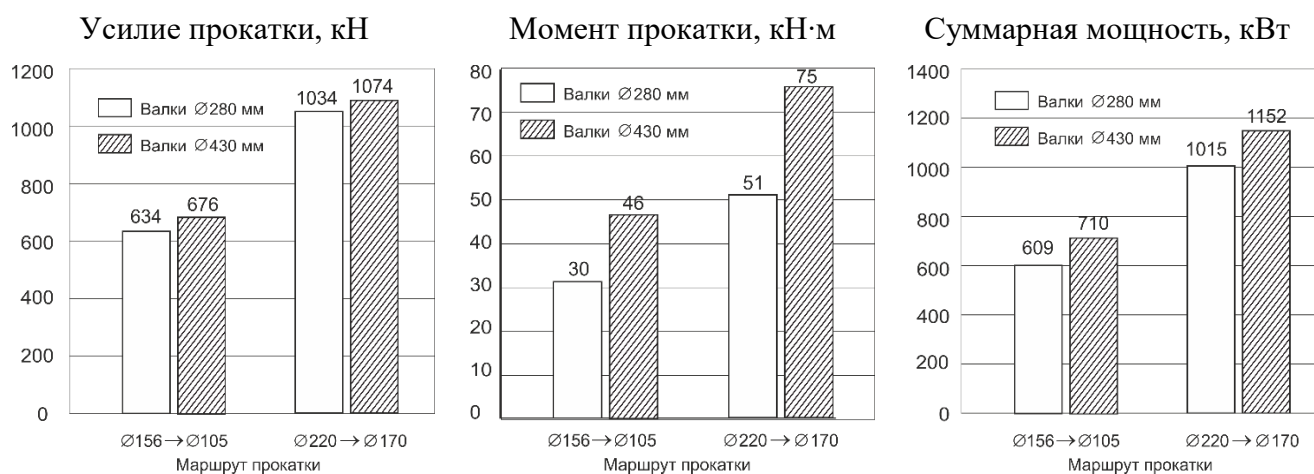


Рисунок 6 – Влияние диаметра валков на энергосиловые параметры РСП.

В целом для рассмотренных вариантов напряжённо-деформированное состояние металла по исследуемым параметрам практически не зависит от соотношения диаметра валка к диаметру заготовки.

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

В пятой главе представлены результаты работы по реализации опробованного в ходе экспериментального исследования способа предварительной деформации НЛЗ методом РСП в условиях АО «ПНТЗ».

Были рассмотрены известные варианты практической реализации, проанализированы производственные и технологические условия и ограничения АО «ПНТЗ», возникающие при внедрении технологии РСП, исходя из чего была сформулирована следующая задача – обеспечить прокатку НЛЗ на углах подачи не менее 18° путём проектирования специализированной клетки раскатного стана ТПА-160 на основе подхода и опыта создания министанов винтовой прокатки.

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.

До проведения настоящих работ создание клеток РСП с углами подачи 18° и более, совместимых с групповым приводом трёхвалковых раскатных клеток считалось невозможным из-за превышения предельно допустимого угла перекоса в шарнирах шпинделей главного привода. Однако, на этапе предварительной проработки было найдено решение, позволяющее снизить углы перекоса в шарнирах шпинделей до допустимой величины (15°) при повороте валков на угол подачи 18° . Для этого необходимо изменить схему расположения и настройки рабочих валков путём их вращения по часовой стрелке относительно оси прокатки на 60° (рисунок 7).

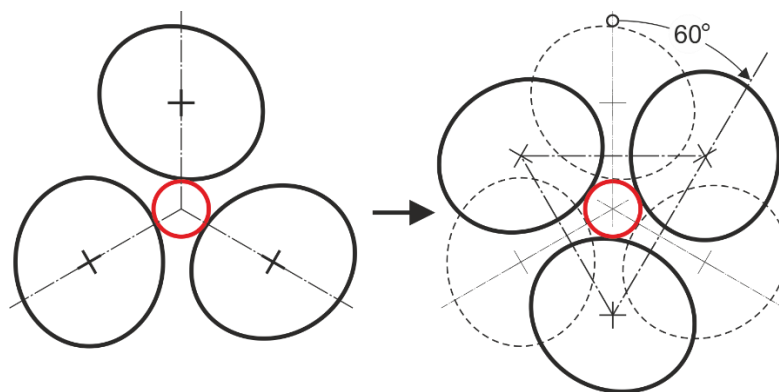


Рисунок 7 – Изменение пространственного расположения валков поворотом на 60° вокруг оси прокатки.

Конструктивно это можно было выполнить только проектированием новой специализированной клетки, которая размещается на основании существующей клетки раскатного стана при демонтированных крышке станины и кассетах с рабочими валками, и фиксируется штатным клиновым креплением (рисунок 8).

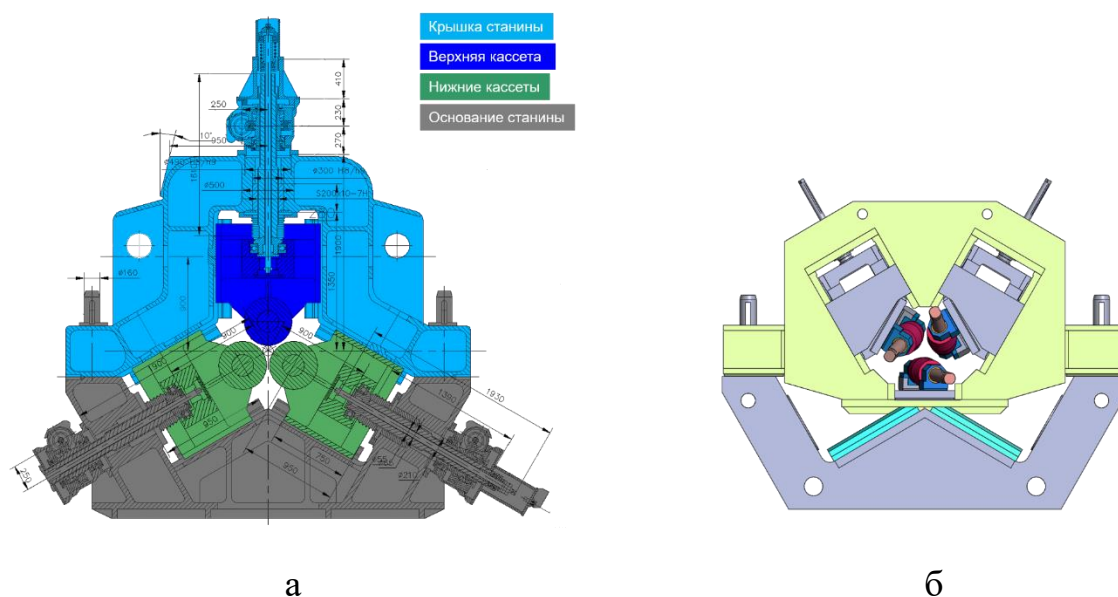


Рисунок 8 – Штатная клетка раскатного стана ТПА-160 конструкции ЭЗТМ (а) и схема установки сменной специализированной клетки РСП (б).

Указанные конструктивные особенности predeterminedелили схему настройки валков специализированной клетки (рисунок 9) 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.

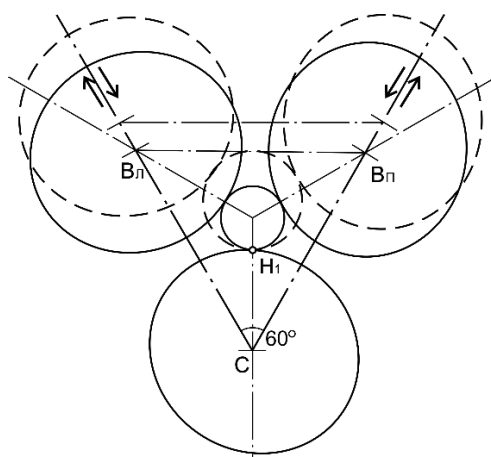


Рисунок 9 – Схема настройки валков специализированной клетки.

Далее, для заданного расположения рабочих валков и их диаметра с помощью твердотельного моделирования в программном комплексе SolidWorks (рисунок 10) производилась оптимизация углов пространственного положения валков в клетке (угла подачи и угла раскатки) с учётом предельно возможного угла перекоса в шарнирах шпинделей главного привода. Выбранный диапазон диаметров калибра в пережиме валков (90...190 мм) обеспечивает охват всего размерного сортамента заготовок. Угол раскатки варьировался в пределах $2...5^\circ$, угол подачи – в пределах $15...20^\circ$.

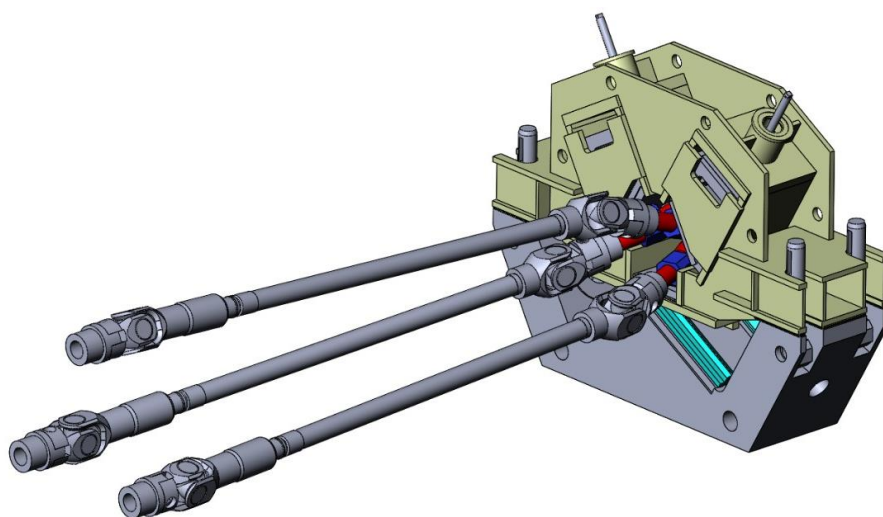


Рисунок 10 – Общая твердотельная модель клетки и шпиндельных устройств для проведения анализа.

По результатам оптимизации приняты к дальнейшему проектированию клетки РСП следующие параметры: диаметр рабочих валков – 290 мм, угол подачи – 18°, угол раскатки – 4°.

На следующем этапе работы были проведены прочностные расчёты станины специализированной клетки и её элементов с помощью SolidWorks Simulation. В качестве исходных данных из базы данных программы заданы материал станины клетки (сталь 09Г2С), материал рабочих валков (сталь 5ХНМ), материал втулок подшипников (бронза БрА10ЖЗМц2). Крепление клетки производилось по опорным поверхностям боковых тумб. Усилие от верхних валков для упрощения расчётов прикладывалось к нажимным винтам. Максимальная величина усилия, действующего на валки, была определена с помощью аналитического расчёта энергосиловых параметров прокатки заготовок диаметром 156 и 220 мм целевых марок сталей при углах подачи 20° и соответствовала максимальному крутящему моменту трансмиссии раскатного стана равному 40 кН·м. Результаты расчёта энергосиловых параметров прокатки и эпюры абсолютных перемещений станины рабочей клетки представлены на рисунке 11. Согласно расчётным данным, максимальное усилие, действующее на валки, соответствуют максимальному крутящему моменту при прокатке заготовки по маршруту $\varnothing 220 \rightarrow \varnothing 180$ мм из стали 12Х1МФ при углах подачи 20° и составляет 1000 кН.

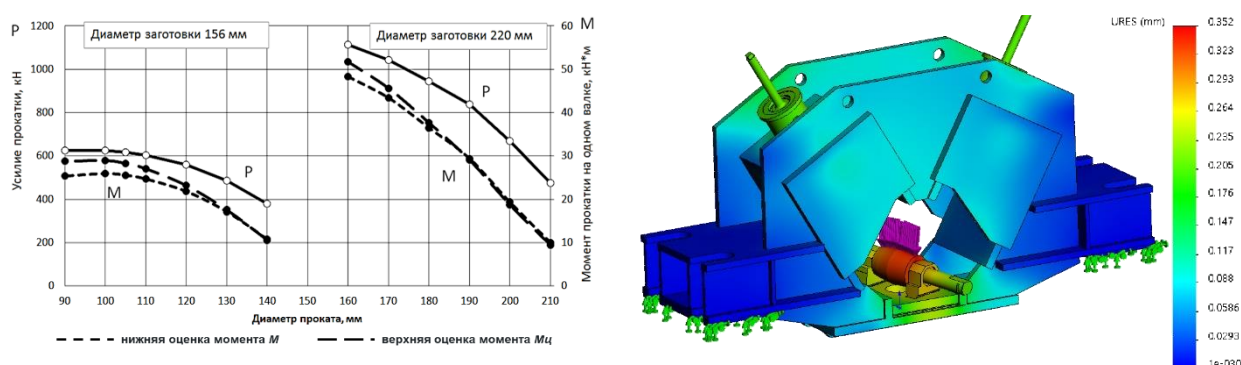


Рисунок 11 – Результаты расчёта энергосиловых параметров и эпюра деформаций специализированной клетки при максимальном усилии прокатки

По результатам расчётов была подтверждена достаточность запаса прочности клетки. Максимальные напряжения возникают в валковом узле и составляют 140 МПа, при этом для большинства элементов станины клетки не превышают 60 МПа, что более чем в 3,7 раз меньше предела текучести для стали 09Г2С (221 МПа). Максимальные перемещения под действием нагрузки составляют 0,35 мм и возникают на нижнем валке в месте приложения нагрузки. Коэффициент жёсткости калибра равен

$$c_k = \frac{P_{max}}{\Delta_{max}} = \frac{1}{0,35} = 2,86 \left(\frac{МН}{мм} \right). \quad (6)$$

По итогам выполненной работы были определены окончательные характеристики специализированной клетки РСЦ, принятые для дальнейшего проектирования (таблица 4).

Таблица 4 – Краткая техническая характеристика специализированной клетки РСЦ

Наименование параметра	Значение
Диаметр исходной заготовки, мм	145-220
диаметр длина	2500-3800
Диаметр заготовки после прокатки, мм	90-190
диаметр длина	4200-8800
Диаметр валка, мм	290
Длина бочки валка, 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 главного привода, кВт	1600
Масса клетки (без учёта вспомогательных механизмов), т	15

В шестой главе описывается промышленное освоение технологии и клетки РСЦ в условиях ТПА-160. АО «Исток МЛ» с учётом полученных в настоящем

исследовании результатов разработал необходимый комплект проектно-конструкторской документации, в кооперации с ПАО «НЛМК» изготовил и поставил на АО «ПНТЗ» клеть РСП специальной конструкции.

Клеть устанавливается на основание станины существующего трёхвалкового раскатного стана и фиксируется штатным способом (рисунок 12).

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, при этом изменение расстояния ΔH между центрами валков связано с изменением диаметра калибра Δd_k формулой

$$\Delta H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \Delta d_k = 0,867 \cdot \Delta d_k, \quad (7)$$

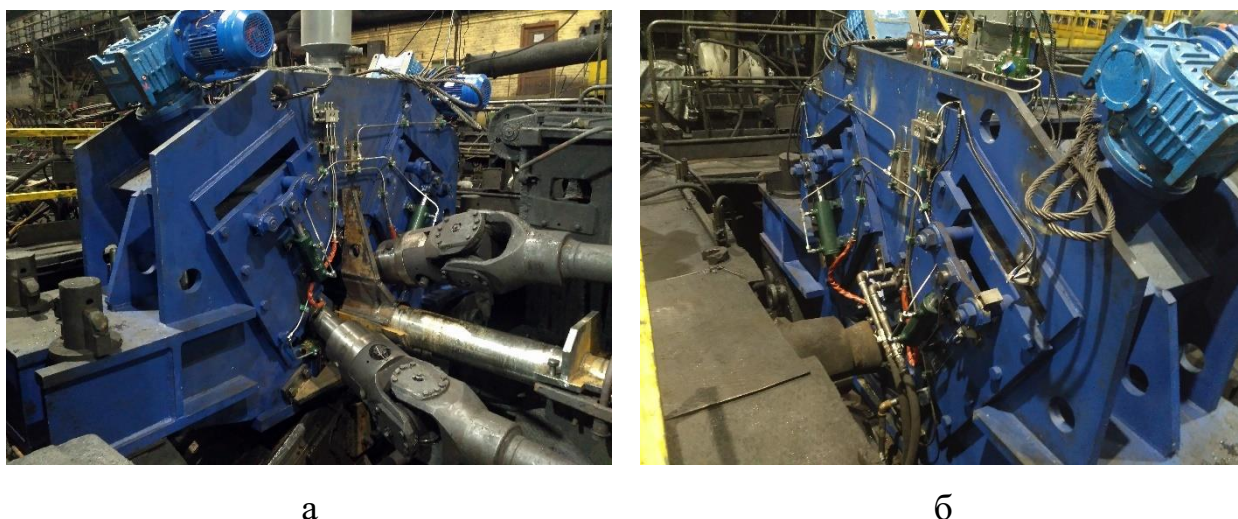
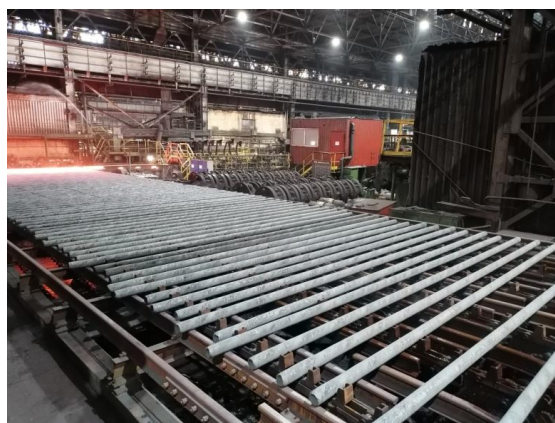


Рисунок 12 – Общий вид специализированной клетки РСП, установленной в линии раскатного стана ТПА-160 с входной (а) и выходной стороны (б).

Для нагрева НЛЗ перед прокаткой, транспортировки их к клету РСП, отведения обжатых заготовок и их охлаждения используется существующее оборудование ТПА-160 (рисунок 13).



а



б

Рисунок 13 – Непрерывнолитая заготовка на выдаче из нагревательной печи (а) и деформированные заготовки после РСП на охлаждающем столе ТПА-160 (б).

Проведены холодные, горячие и гарантийные испытания, которые подтвердили полное выполнение заявленных характеристик клетки РСП при работе под нагрузкой в производственном цикле. Эксплуатация клетки РСП регламентируется документом «1-119320РЭ. Клеть трёхвалковая. Руководство по эксплуатации» и выделенным разделом «Перекатка (обжатие) заготовки с использованием специализированной клетки» в технологической инструкции ТИ ПНТЗ-ТР.ТБ-311 «Производство перекатанной (обжатой) непрерывнолитой заготовки на ТПА-160».

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

Вариант 1 (базовый)

$$\text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 105 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15.$$

Вариант 2 (промежуточный)

$$\text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 100 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15.$$

Вариант 3 (предлагаемый)

$$\text{НЛЗ } \varnothing 156 \xrightarrow{\text{РСП}} \varnothing 95 \xrightarrow{\text{Прошивка}} 98 \times 14 \dots 15.$$

В качестве параметров сравнения выбраны:

- угол β_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 предел «РСП + прошивка».

Сравнение выполнено с помощью адаптированной аналитической методики траекторно-скоростного анализа (разработка НИТУ «МИСИС») с последующей экспериментальной проверкой в условиях ТПА-160 и промышленным освоением улучшенного варианта.

Расчётные значения угла β_0 и числа циклов N_0 при прошивке заготовки диаметром d_0 в гильзу диаметром d_1 с толщиной стенки s с обжатием перед носком оправки ε_0 при углах подачи валков β_1 и угле конусности очага деформации на участке прошивки α определяются по формулам

$$\beta_0 = \arctg \left[\frac{4 \cdot \text{tg } \beta_1 \cdot \left(\frac{d_1}{s} - 1 \right)}{\left(\frac{d_0}{d_1} \right)^3 \cdot \left(\frac{d_1}{s} \right)^2} \right] \quad (8) \text{ и } N_0 = \frac{1 - (1 - \varepsilon_0)^3}{3 \cdot \pi \cdot \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } \beta_0}, \quad (9)$$

соответственно.

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).

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

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

2. Повышение угла β_0 подъёма траектории на поверхности прошиваемой заготовки почти на 35% (рисунок 14, 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 14, б) снижает вероятность вскрытия осевой полости и образования плёнок на внутренней поверхности гильзы.

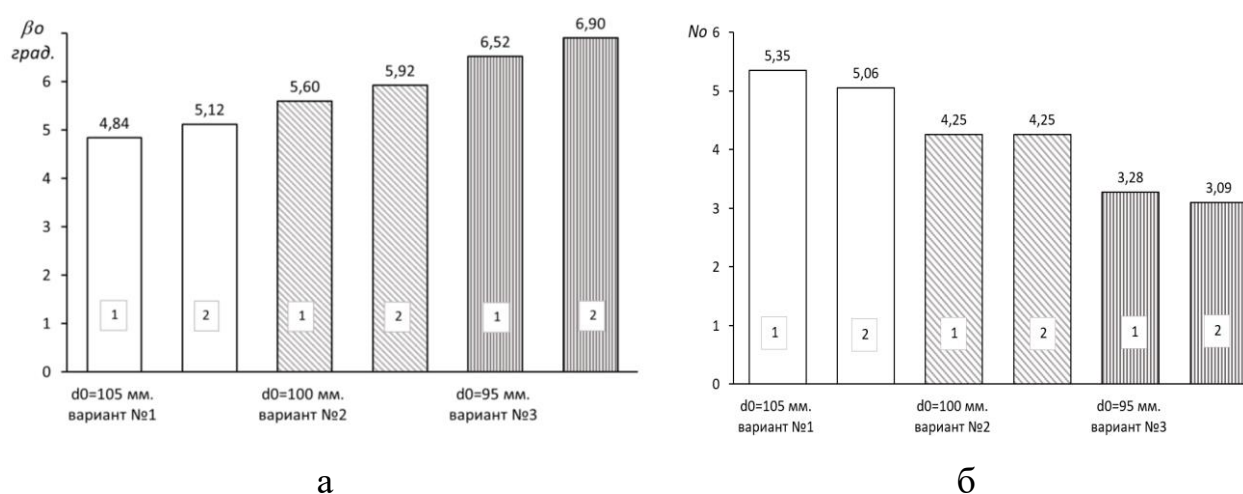


Рисунок 14 – Угол β_0 подъёма траектории (а) и число циклов N_0 (б) при прошивке заготовок различного диаметра d_0 в гильзу диаметром 98 мм с толщиной стенки 14 (1) и 15 (2) мм.

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

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 (рисунок 15). В суперпозиции этих

полей образуется достаточно равномерное поле с уровнем деформации, который кратно превышает значения, определённые коэффициентами вытяжки.

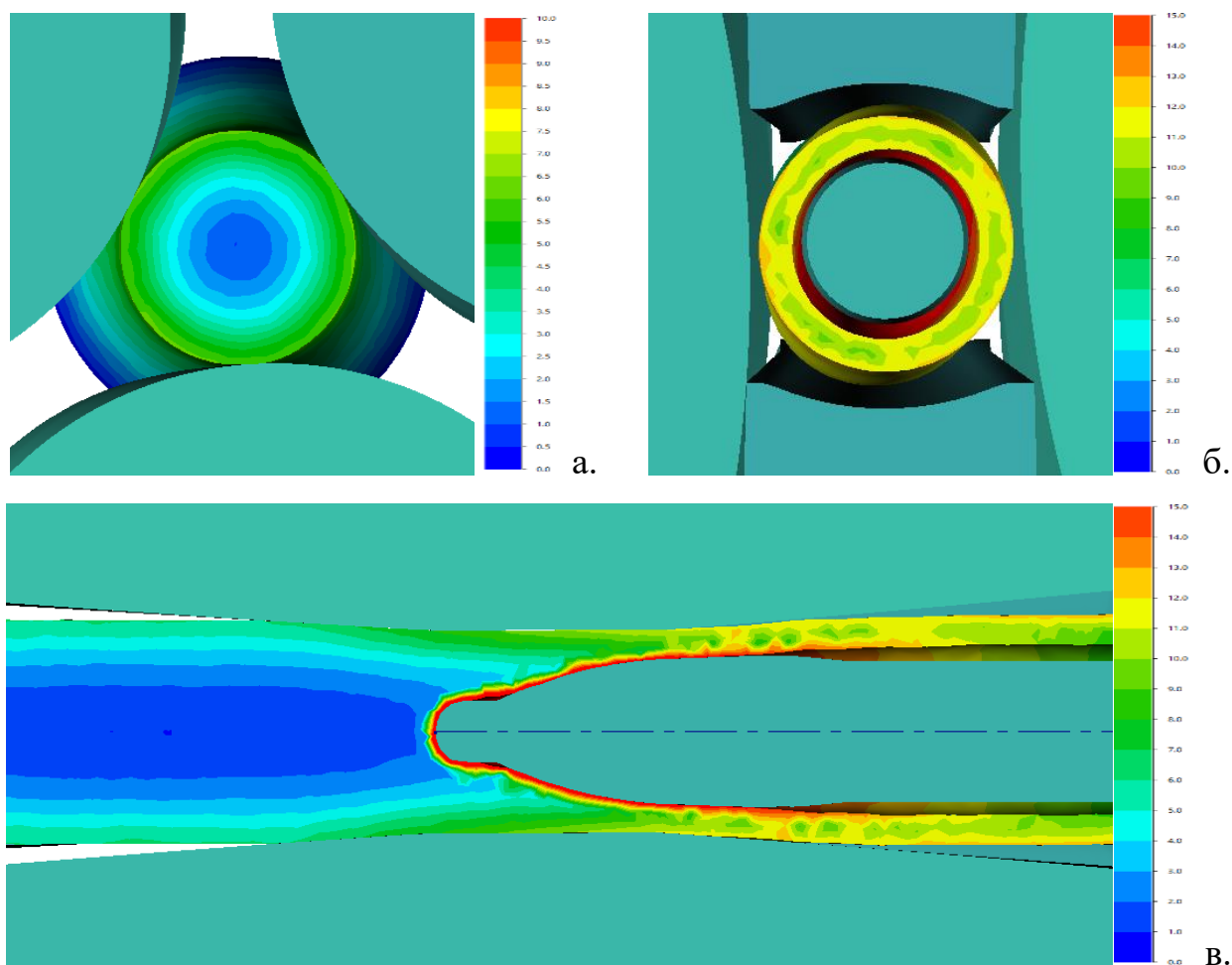


Рисунок 15 – Поле накопленной деформации при РСП (а), суммарное при РСП и прошивке (б) и в процессе прошивки предварительно деформированной заготовки (в).

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

За период с 2020 по 2024 год прокатано более 10,5 тыс. т заготовки преимущественно из легированных (09Г2С и др.), в том числе хромсодержащих сталей (12Х1МФ, 15Х5М и др.), опробована и подтверждена принципиальная возможность радиально-сдвиговой прокатки НЛЗ из нержавеющей стали 08Х18Н10Т на ТПА-160, изготовлена партия особотолстостенных труб

повышенной точности из легированных хромомолибденовых сталей (35ХГМА и др.).

Практически установлено, что использование клетки радиально-сдвиговой прокатки (РСП) с углами подачи валков 18° 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° 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 станов 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. 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>.

2. 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.

Aleshchenko, Alexander & Iskhakov, R. & Galkin, S. & Gamin, Yury & Kadach, M.. (2024). Technology and stand for radial-shear rolling of special design for preliminary reduction of continuously cast billets in conditions of Tube Rolling Mill 160 of JSC Pervouralsk New Pipe Plant at increased roll feed angles. Chernye Metally. 45-52. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.11.08>.

3. Галкин С.П., Алещенко А.С., Романцев Б.А., Гамин Ю.В., Исхаков Р.В. Влияние предварительной деформации непрерывнолитых заготовок радиально-сдвиговой прокаткой на структуру и свойства горячекатаных труб из хромосодержащих марок стали // Metallurg, – 2021. – №2. – С. 54-61.

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>.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

Budnikov, A. & Kharitonov, E. & Iskhakov, R.. (2021). Study of deformation-force parameters of rolling-off process and plugless screw rolling of pipes on three-roll mills. Chernye Metally. 20-24. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.04.04>.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.