

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

На правах рукописи

БУДНИКОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСКАТКИ И  
КАЛИБРОВАНИЯ ТРУБ В ТРЕХВАЛКОВЫХ СТАНАХ ВИНТОВОЙ  
ПРОКАТКИ**

Специальность 05.02.09 – «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доцент к.т.н. Е.А. Харитонов

Москва – 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

В современных экономических условиях возрастает потребность в оперативном производстве труб широкого размерно-марочного сортамента партиями различных объемов. В связи с этим возникает необходимость совершенствования и разработки новых схем и способов прокатки труб с высокой маневренностью и технологической гибкостью, в том числе, в условиях действующих трубопрокатных агрегатов.

Трубопрокатные агрегаты (ТПА) с трехвалковыми раскатными станами винтовой прокатки имеют высокую эффективность для производства высокоточных толстостенных труб. Однако существующая схема прокатки труб на ТПА с раскатным станом винтовой прокатки не вполне удовлетворяет современным условиям по технологической мобильности. В связи с этим становится актуальным совершенствование технологии с целью расширения сортамента труб при сокращении размерного ряда исходных заготовок, а также возможностью использования непрерывнолитой заготовки (НЛЗ).

### **Цели и задачи работы**

**Целью** работы является совершенствование процессов раскатки и калибрования труб, позволяющее расширить технологические возможности ТПА с трехвалковым раскатным станом винтовой прокатки.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

- провести теоретическое и экспериментальное исследования геометрических, деформационных, энергосиловых параметров процессов винтовой раскатки и безоправочной прокатки (калибрования);
- разработать методику анализа деформационных параметров и силовых условий процессов раскатки и безоправочной прокатки с учетом овальности трубы в очаге деформации трехвалкового стана;

- разработать технологические режимы обжатия по диаметру при прокатке труб широкого размерно-марочного сортамента из одного, двух типоразмеров заготовки, в том числе непрерывнолитой;
- разработать калибровки валков раскатного и калибровочного станов ТПА-160 АО «ПНТЗ», позволяющие осуществлять раскатку и калибрование труб с увеличенным обжатием по диаметру (до 50%);
- разработать валковые узлы трехвалковых станов повышенной конструктивной прочности для расширения сортамента прокатываемых труб.

**Научная новизна работы.** Получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

- экспериментально и компьютерным моделированием исследовано формоизменение металла в очаге деформации трехвалкового стана винтовой прокатки при раскатке на оправке и безоправочной прокатке;

- установлена новая аналитическая зависимость контактного напряжения от диаметра рабочих валков, толщины стенки трубы, коэффициента, учитывающего влияния внешних зон при раскатке, на участках редуцирования и обжатия стенки трубы;

- исследовано распределение коэффициента овальности по длине очага деформации в зависимости от отношения диаметра к толщине стенки трубы, углов подачи и раскатки, получены новые аналитические зависимости частного обжатия от коэффициента овальности трубы;

- определена математическая зависимость между изменением толщины стенки трубы и параметрами обжимного участка очага деформации, отношения  $D/S$ , суммарного обжатия по диаметру при безоправочной винтовой прокатке;

- создана методика расчета геометрических параметров валкового узла раскатных станов винтовой прокатки, позволяющая повысить его нагрузочную способность.

## **Практическая значимость и реализация работы**

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические режимы обжатия труб по диаметру при прокатке, а также калибровки рабочих валков, предназначенные для осуществления процессов раскатки и калибрования (редуцирования) с повышенным обжатием по диаметру. Новые технологические решения могут быть реализованы как автономно, так и в сочетании с существующими режимами, применяемыми на ТПА 160 АО «ПНТЗ».

Разработаны и предложены к внедрению технологические режимы прокатки труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА 160, без предварительного обжатия.

Разработаны компьютерные программы расчета энергосиловых и деформационных параметров процессов раскатки и безопрочной прокатки, а также – геометрических параметров валковых узлов трехвалковых станков.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров кафедры ОМД «НИТУ «МИСиС».

## **Методы исследования и достоверность результатов**

Разработанная технология, выводы и рекомендации основаны на исследованиях, осуществленных с использованием экспериментальных и теоретических методов, а также математической обработки результатов и компьютерного моделирования.

При измерении геометрических параметров гильз и труб, заторможенных образцов применялся контактный мерительный инструмент. Анализ результатов экспериментального исследования включает данные по настройкам станков, геометрические параметры гильз, энергосиловые параметры, фото и видео материалы.

Обработка результатов эксперимента осуществлялась при помощи систем автоматизированного проектирования (SOLIDWORKS 3D и Компас 2D).

**Достоверность** полученных результатов была подтверждена экспериментальными исследованиями на трехвалковом стане винтовой прокатки МИСиС 130, а также проведено опытно-промышленное опробование разработанных режимов прокатки в условиях ТПА 160 АО «ПНТЗ».

Компьютерное моделирование процессов раскатки и редуцирования осуществлялось в программах QFORM 3D и DEFORM 3D. Проверка адекватности результатов компьютерной модели осуществлялась на основании результатов экспериментального исследования на опытно-промышленных станах МИСиС 100Т и МИСиС 130Т и раскатном трехвалковом стане ТПА 160.

Вычислительные операции, а также разработка программ осуществлялись при помощи программ MS Excel и языков программирования Visual Basic for Application и Visual Basic .NET.

#### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены и обсуждены на международной, межвузовской и институтской научно-технической конференции «70-е дни науки студентов МИСиС (Москва, 2015); XI конгрессе прокатчиков (Магнитогорск, 2017); XXIII международной научно-практической конференции Трубы 2018 (Челябинск, 2018); III Международной молодежной научно-практической конференции (Магнитогорск, 2018); форуме «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 2019).

Методики расчета деформационных и энергосиловых параметров процесса раскатки и калибрования труб, а также проектирования валковых узлов с повышенной прочностью, грузоподъемностью и определения максимального диаметра рабочего вала трехвалкового стана винтовой прокатки используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Разработанные калибровки валков раскатного и калибровочного станков, режимы обжатия внедрены на ТПА 160.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, из них 2 журнала входят в категорию Q3, 2 статьи, включённые в базы данных Scopus, переведены на иностранный язык (английский). Все опубликованные статьи входят в базу данных РИНЦ. По результатам работы получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, выводов и приложений, изложена на 147-ми страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 23 таблицу, библиографический список из 73 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена и обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены цель и задачи, приведен план исследований, краткая характеристика работы, научная новизна, отмечены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор научно-технической литературы, связанный с особенностями процессов раскатки, калибрования, а также оборудования трехвалковых станов винтовой прокатки. Рассмотрены отечественные и зарубежные трубопрокатные агрегаты, в составе которых имеются различные станы, реализующие винтовую раскатку труб.

Отмечен один из ключевых способов решения поставленных задач, заключающийся в перераспределении деформаций между основными стадиями получения труб, а именно повышение степени деформации гильз в раскатном стане за счет дополнительного обжатия по диаметру и увеличения обжатия черновой трубы в калибровочном стане.

**Во второй главе** рассмотрена методика определения энергосиловых и деформационных параметров процессов раскатки труб на оправке и безоправочной прокатки, приведены результаты компьютерного

моделирования и определения удельного усилия металла на валок в различных зонах очага деформации. Рассмотрена схема поперечного сечения очага деформации, в которой выделены две зоны деформирования гильзы: зона редуцирования и раскатки на оправке.

На участке  $AC$  (рисунок 1) осуществляется обжатие гильзы по радиусу и устранение зазора между оправкой и ее внутренней поверхностью. Этому участку соответствует зона редуцирования с шириной контактной поверхности  $b_p$ . Для оценки зоны редуцирования введено понятие величины частного обжатия гильзы по радиусу или частного редуцирования за один цикл деформации  $\Delta S_p$ , которое является частью суммарного частного обжатия и равно разнице между радиусами гильзы  $r_A$  и  $r_C$ . На участке от точки  $C$  до  $B$  располагается зона обжатия с шириной контактной поверхности  $b_c$ , на которой осуществляется деформация гильзы по толщине стенки на величину частного обжатия  $\Delta S_c$ , равную разнице между радиусами гильзы  $r_C$  и  $r_B$ . Суммарное частное обжатие  $\Delta S$  является суммой  $\Delta S_p$  и  $\Delta S_c$ . Суммарную ширину контактной поверхности  $b$  в поперечном сечении можно представить как сумму ширин  $b_p$  и  $b_c$ .

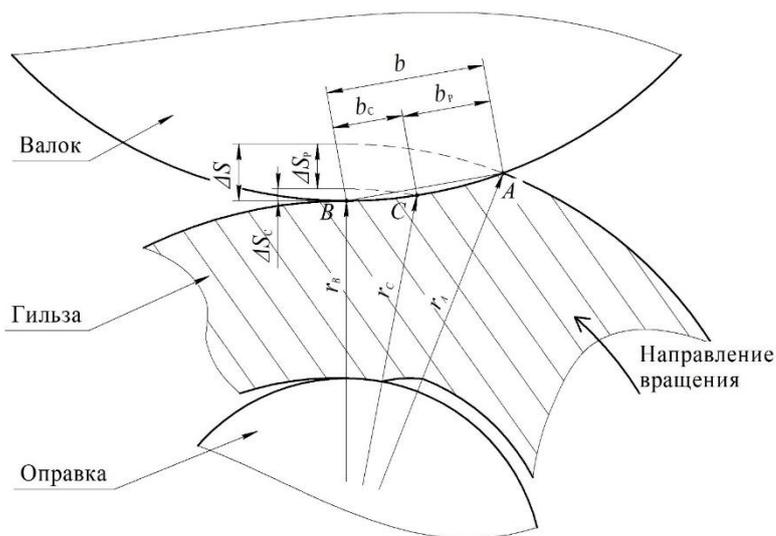


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения очага деформации трехвалкового раскатного стана

Овальность трубы в очаге деформации можно выразить коэффициентом овальности

$$\xi = \frac{r_A}{r_B}, \quad (1)$$

где  $r_A$  – радиус гильзы (раската) проведенный в точку на входе в контакт металла с валком, мм;

$r_B$  – радиус трубы под валком (радиус калибра), мм.

На рисунке 2 представлено изменение радиусов  $r_A$  и  $r_B$ , а также коэффициента овальности по длине очага деформации при компьютерном моделировании в DEFORM 3D процесса раскатки трубы диаметром 150 мм, с толщиной стенки 12,5 мм, ( $D/S=12$ ) из гильзы диаметром 181 мм, с толщиной стенки 28 мм. Моделирование процесса раскатки осуществлялось в валках с гребнем высотой 12,5 мм, углом наклона образующей к оси прокатки  $42^\circ$ , угол образующей входного участка к оси прокатки  $3^\circ$  (см. рисунок 2). Материал трубы – ШХ15, температура –  $1100^\circ\text{C}$ .

Наибольшего значения, коэффициент овальности достигает на калибрующем участке возле гребня на расстоянии  $1/3$  шага подачи от него. С учетом коэффициента овальности  $\Delta S_p$  можно определить по формуле:

$$\Delta S_p = r_B \cdot (\xi - \chi), \quad (2)$$

где  $\chi = \frac{\Delta S_C}{r_B} + 1$ .

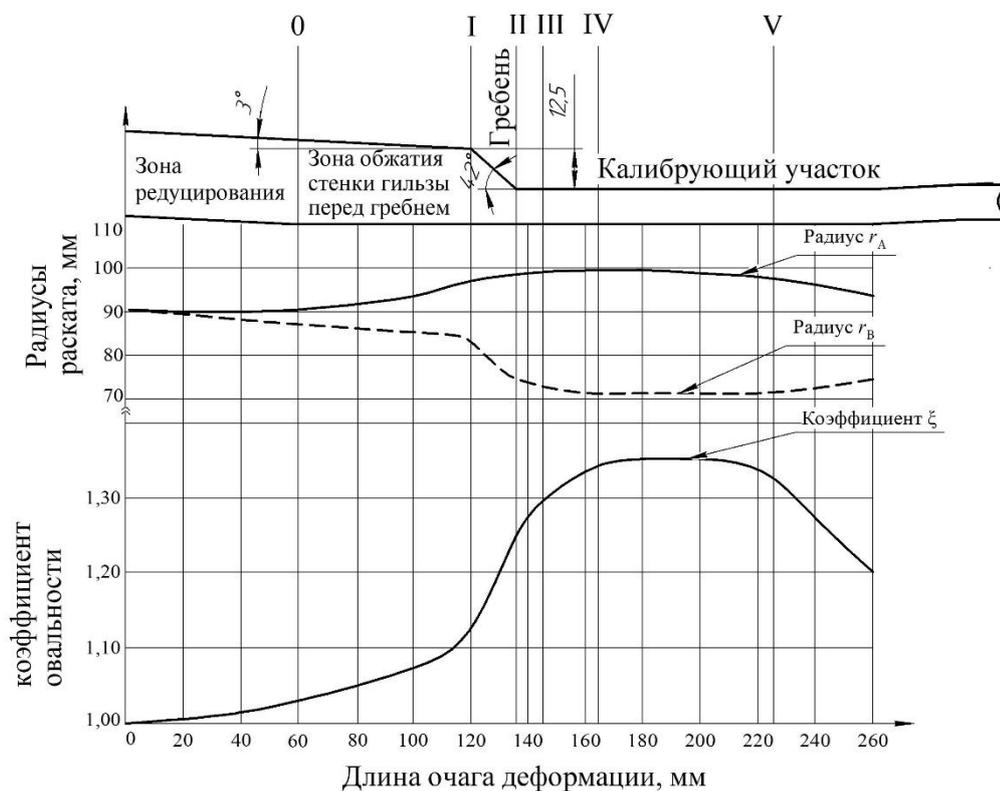


Рисунок 2 – Распределение радиусов трубы (раската) и коэффициента овальности по длине очаге деформации

Рост овальности трубы приводит к увеличению зоны редуцирования, ширины и площади ее контактной поверхности с валками. На рисунке 3 представлена эпюра ширины контактной поверхности гильзы с валком в зонах редуцирования и обжатия стенки, полученная при моделировании.

Очевидно, что при наличии овальности, ширина и площадь контактной поверхности зоны редуцирования гораздо больше, чем зоны обжатия стенки, в связи с чем зону редуцирования необходимо учитывать при расчете энергосиловых параметров.

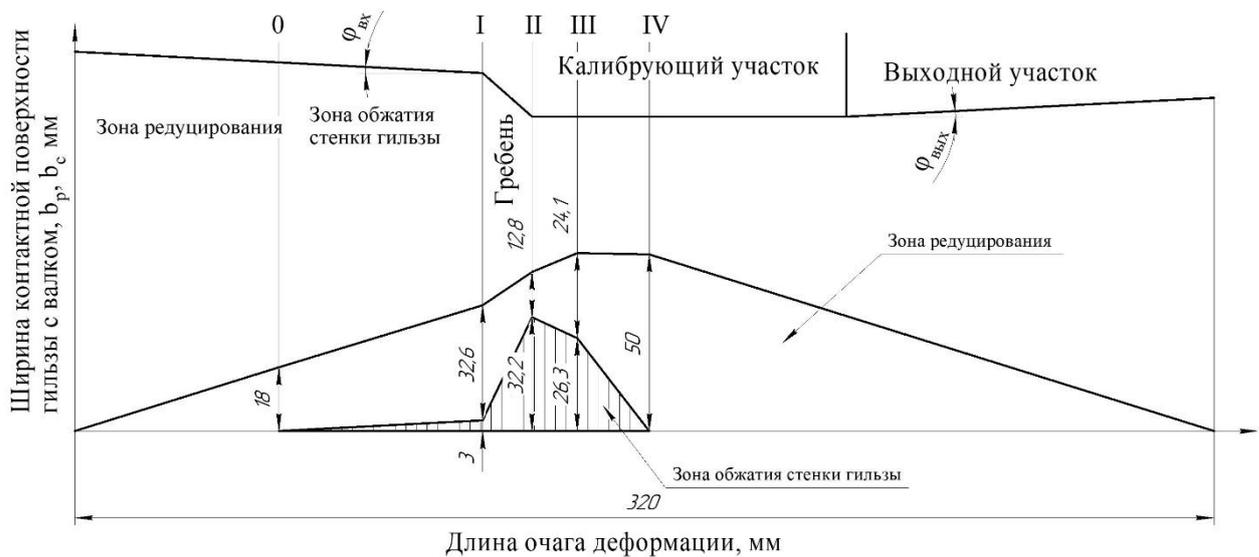


Рисунок 3 – Распределение ширины контактной поверхности по длине очага деформации

Для решения задачи по определению среднего удельного усилия в зоне редуцирования и в зоне обжатия использовали методику академика А.И. Целикова. Рассмотрен случай сжатия полого цилиндрического образца с внешним и внутренним радиусами равными соответственно  $R$  и  $r$ .

Цилиндр нагружен усилием  $p_p$ , соответствующим усилию в зоне редуцирования по внешнему контуру на некоторой ширине поверхности равной  $b_p$ , которая характеризует ширину контактной поверхности металла с валком в зоне редуцирования. В толщине стенки полого цилиндра возникают сжимающие радиальные и растягивающие тангенциальные напряжения. Тогда среднее удельное усилие  $p_p$ , действующее на контактной поверхности металла с валком, определяется по формуле:

$$p_p = \mu \cdot \sigma_\phi \cdot n''_\sigma \left[ \left( 2 + \frac{1}{S} D_B \right) \ln \left( 2S \frac{1}{D_B} + 1 \right) - 1 \right], \quad (3)$$

где  $D_B$  – диаметр валка, мм;

$S$  – толщина стенки раската, мм;

$\mu$  – коэффициент схемы напряженного состояния равный 1,15;

$n''_{\sigma}$  – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон при раскатке труб, может изменяться от 1,18 до 1,36.

$\sigma_{\phi}$  – сопротивление металла пластической деформации МПа.

Среднее удельное усилие в различных точках очага деформации трехвалкового раскатного стана можно определить при помощи компьютерного моделирования.

Оценка адекватности результатов моделирования прокатки трубы диаметром 150 мм с  $D/S=12$  осуществлялась путем сравнения с экспериментальными данными усилия раскатки труб, представленным в работе М.А. Минтаханова. Установлено, что разница между экспериментальными значениями усилий и результатами компьютерного моделирования составляет не более 10 %.

По ширине контактной поверхности удельные усилия в зоне редуцирования  $p_p$  достигают 96 МПа на обжимном и 89 МПа на калибрующем участке очага деформации, что меньше удельных усилий в зоне обжатия гильзы по стенке  $p_c$ , которая составляет 115 МПа на обжимном участке и 139 МПа на гребне вала. В процессе раскатки  $p_p/p_c$  изменяется от 0,69 до 0,83 в поперечных сечениях очага деформации. Отношение  $p_p/p_c$  на входном участке и гребне вала уменьшается, а на калибрующем участке в зоне обжатия стенки – увеличивается. Среднее значение отношения  $p_p/p_c$  также составляет 0,76.

В инженерных расчетах  $p_c$  можно определить по соотношению:

$$p_c = \frac{p_p}{k} \quad (4)$$

где  $k = 0,70-0,8$

В работе так же представлены теоретические и экспериментальные исследования изменения толщины стенки трубы при безправочной винтовой прокатке с обжатием по диаметру более 5 %. При увеличении толщины стенки в зоне редуцирования суммарное обжатие по стенке становится больше, что приводит к увеличению усилия, действующего со стороны гильзы на валок. Для того, чтобы компенсировать увеличение толщины стенки при редуцировании, необходимо уменьшить толщину стенки гильзы, полученной в прошивном стане.

При прокатке черновой трубы (рисунок 4) диаметром  $D_0$  с толщиной стенки  $S_0$  в очаге деформации, образованном валками с углом наклона образующей обжимного участка к оси прокатки  $\varphi$  и длиной  $l$ , обжатием по диаметру  $\Delta D$ , получена труба диаметром  $D_T$  с толщиной стенки  $S_T$ , при этом толщина стенки увеличилась на  $\Delta S$ . Интенсивность изменения толщины стенки можно охарактеризовать углом  $\tau$ , с увеличением которого толщина стенки изменяется больше.

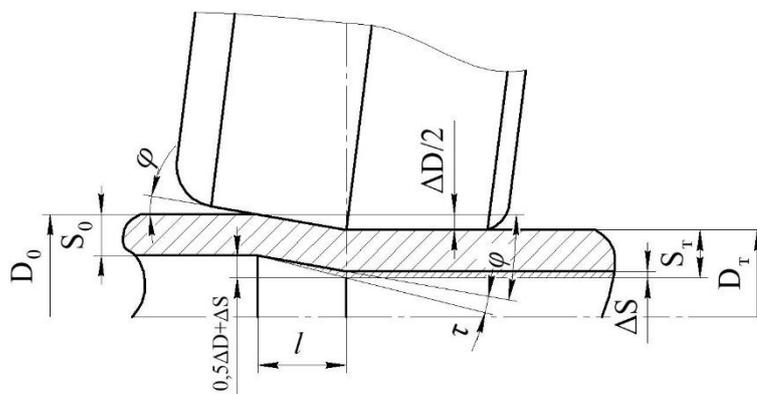


Рисунок 4 – Схема изменения геометрических размеров трубы в процессе безправочной винтовой прокатки

Угол  $\tau$  можно определить путем измерений толщины стенки черновой и готовой труб:

$$tg \tau = \frac{\Delta S \cdot tg \varphi}{0,5 \cdot \Delta D + tg^2 \varphi \cdot (0,5 \cdot \varepsilon_d \cdot D_0 + \Delta S)}. \quad (5)$$

Изменение толщины стенки определяется по формуле (6):

$$\Delta S = 0,5 \cdot \Delta D \cdot \frac{tg \tau \cdot (1 + tg^2 \varphi)}{tg \varphi \cdot (1 - tg \tau \cdot tg \varphi)}, \quad (6)$$

где  $\Delta D$  – абсолютное обжатие по диаметру, мм.

Величины  $\tau$  и  $\Delta S$  необходимы при проектировании режимов прокатки и калибровки рабочих валков.

Расширение сортамента в сторону уменьшения размеров получаемых труб, а также использование новых режимов процесса раскатки и калибрования требует модернизации конструкции валкового узла рабочей клетки. С целью возможности применения подшипников большей грузоподъемности за счет изменения пространственного расположения валкового узла в станине, проведен анализ геометрических параметров валкового узла трехвалковых станов винтовой прокатки.

Рассчитаны и определены значения внутреннего диаметра опоры валкового узла и подшипников при различном смещении вала относительно оси поворота на угол подачи на примере калибровочного трехвалкового стана ТПА 70-270 АО «ВМЗ». Смещение вала на 115 мм позволяет повысить динамическую грузоподъемность с 456 кН до 590 кН, а на 190 мм – до 840 кН.

Установлено, что максимально допустимое перемещение вала определяется конструктивными особенностями валкового узла и ограничивается размерами второй подшипниковой опоры. Представленный метод расчета подшипниковых опор лег в основу разработанной компьютерной программы.

**В третьей главе** представлена методика компьютерного моделирования прокатки полых заготовок на раскатном и калибровочном трехвалковых станах в программах QFORM 3D и DEFORM 3D. К основным задачам, решаемым с помощью компьютерного моделирования, относятся:

- разработка конечно-элементной модели процессов раскатки и калибрования труб на трехвалковом стане винтовой прокатки;
- проверка адекватности результатов компьютерного моделирования;
- комплексные исследования влияния отношения диаметра к толщине стенки трубы, угла подачи, раскатки, калибровки рабочих валков на формоизменение металла в очаге деформации, геометрические размеры, деформационные и энергосиловые параметры раскатки труб на оправке;
- исследование влияния суммарного обжатия по диаметру, отношение диаметра к толщине стенки трубы, углов подачи и калибровки рабочего вала на безоправочную прокатку.

Для оценки адекватности моделирования в QFORM 3D и DEFORM 3D выбраны:

- параметры формоизменения трубы в очаге деформации;
- энергосиловые параметры.

Для проверки адекватности осуществлена экспериментальная прокатка гильз диаметром 90 мм с  $D/S = 7$  с обжатием по диаметру 25 % из стали 40X при температуре 950 °С на стане МИСиС 130 Т.

Измерялись радиусы гильз  $r_A$  и  $r_B$ , коэффициент овальности  $\xi$  и толщина стенки  $s$ . В процессе прокатки фиксировали потребляемую мощность. Аналогичные параметры анализировали при компьютерном моделировании.

Для процессов раскатки гильзы на оправке и безоправочной прокатки, разница между значениями радиусов  $r_A$  и  $r_B$  не превышает 10 %. Максимальное значение коэффициента овальности гильзы при моделировании в QFORM 3D и DEFORM 3D соответствуют коэффициентам овальности, полученным на стане.

Исследование овальности при раскатке гильзы на оправке показало, что с увеличением  $D/S$  получаемой трубы максимальное значение коэффициента овальности гильзы в очаге деформации увеличивается.

Для исследования влияния отношения  $D/S$  получаемой трубы на овальность при раскатке на оправке осуществлено компьютерное моделирование процесса раскатки труб диаметром 150 мм с толщиной стенки 18,8 мм ( $D/S=8$ ); 15 мм ( $D/S=10$ ); 12,5 мм ( $D/S=12$ ) из гильз диаметром 179 мм с толщиной стенки 33,5 мм; 29,6 мм и диаметром 181 мм с толщиной стенки 28,0 мм с применением валков имеющих гребень высотой 12,5 мм с углом наклона образующей к оси прокатки  $42^\circ$ , угол наклона образующей входного участка валка  $3^\circ$ .

При раскатке трубы с  $D/S=8$ , максимальное значение коэффициента овальности в установившемся режиме составляет 1,13, при раскатке трубы с  $D/S=10$  максимальный коэффициент овальности составляет 1,22; при раскатке трубы с  $D/S=12$  – 1,27. Дальнейшее увеличение  $D/S$  приводит к образованию трехгранного раструба на заднем конце трубы.

Влияние угла подачи рассмотрено при моделировании процесса раскатки трубы с  $D/S=12$ . При увеличении угла подачи от  $4$  до  $10^\circ$ , за счет увеличения осевого перемещения раската в очаге деформации, максимальное значение коэффициент овальности увеличивается с 1,10 до 1,35. При раскатке на угле подачи  $4^\circ$  сила, действующая со стороны металла на валок, составляет 510 кН, мощность на валке – 340 кВт, а при раскатке на угле подачи  $10^\circ$  сила металла на валок составляет 780 кН, мощность на валке – 520 кВт.

Угол раскатки, характеризующий схему прокатки, оказывает незначительное влияние на овальность раската в очаге деформации. Овальность раската при раскатке на грибовидных валках с углом раскатки  $12^\circ$  и бочковидных одинаковая и на 1-3 % ниже, чем при раскатке в чашевидных валках с углом раскатки  $12^\circ$ .

Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования показали, что максимальную овальность в установившемся режиме, можно определить по эмпирической зависимости:

$$\xi_k^{max} = a \cdot e^{m \cdot D/S}, \quad (7)$$

где  $m$  – параметр, зависящий от размеров трубы и угла подачи;

$$e = 2,718.$$

При угле подачи менее  $8^\circ$ – $10^\circ$  и  $D/S$  трубы менее 8  $m$  составляет 0,015...0,020, а при больших значениях угла подачи и  $D/S$  трубы более 8  $m$  составляет 0,025...0,030.

В главе представлены результаты исследований калибрования с повышенными обжатиями по диаметру (безопрочно́й прокатке). Поскольку процесс калибрования с обжатиями по диаметру более 5 % является малоисследованным, то для проведения экспериментальной прокатки в условиях ТПА 160 требуется разработать калибровку рабочего вала, имеющего обжимной участок, как для раскатного, так и для калибровочного станов. С этой целью осуществлено исследование влияния калибровки обжимного участка, а именно угла наклона образующей обжимного участка вала к оси прокатки –  $\varphi$  на изменение толщины стенки трубы, качество получаемых труб и энергосиловые параметры.

Фиксированные параметры: диаметр гильзы – 106 мм; толщина стенки – 15,1 мм;  $D/S$  – 7; обжатие по диаметру – 17 %; материал – сталь 40X; угол подачи –  $10^\circ$ , температура гильзы –  $950^\circ\text{C}$ .

На рисунке 5 представлена гистограмма изменения толщины стенки гильзы при безопрочно́й прокатке. Наибольшее увеличение толщины стенки 14,1 % наблюдается в процессе калибрования на валках с гребнем, имеющим угол наклона образующей к оси прокатки  $\varphi_r = 20^\circ$ , высотой 5 мм. Разностенность составляет 4,9 %, что меньше, чем при прокатке на валках с

$\varphi = 1^\circ$ , где разностенность составляет 8,6 %, но больше, чем в остальных случаях.

Приемлемыми можно считать значения  $\varphi$  в пределах 5-10°. Разностенность гильз не превышает 5 %, максимальное отклонение диаметра от среднего значения не превышает 0,6 %. Изменение угла  $\varphi$  не оказывает существенного влияния на мощность процесса прокатки.

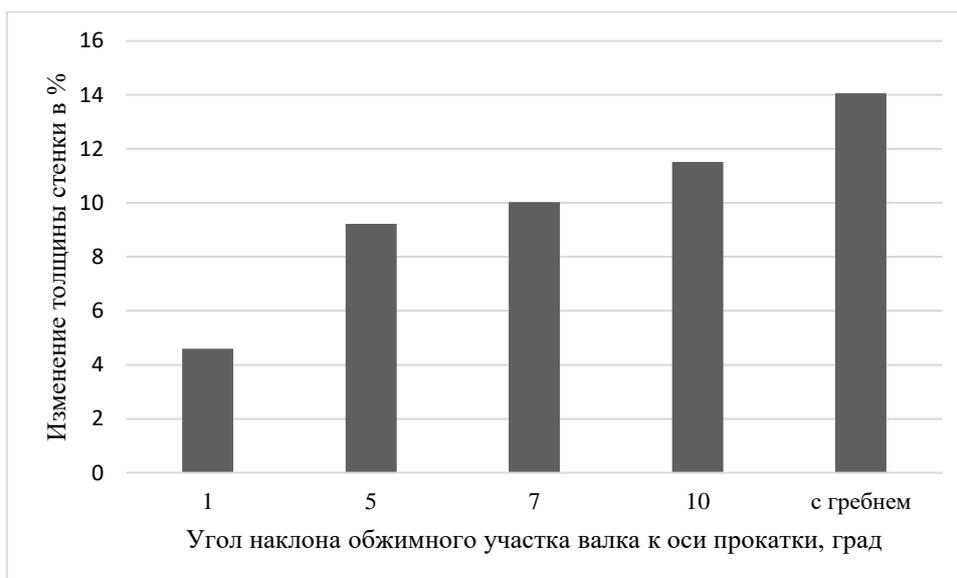


Рисунок 5 – Увеличение толщины стенки при изменении угла наклона обжимного участка вала

Исследование безоправочной прокатки с обжатием 17 % по диаметру и с углом  $\varphi=10^\circ$  на углах подачи 6, 8, 10 и 12° показало, что угол подачи незначительно влияет на изменение толщины стенки трубы. Толщина стенки трубы увеличивается в пределах 8,5-9,0 %. Угол подачи оказывает влияние на потребляемую мощность процесса прокатки. При увеличении угла подачи с 6 до 12°, мощность увеличивается с 50 кВт до 90 кВт.

Рассмотрено влияние таких факторов как: угол наклона образующей обжимного участка вала к оси прокатки  $\varphi$  со значениями 1°, 10°; обжатие по диаметру  $\varepsilon_d$  со значениями 5, 25 %; отношение диаметра к толщине стенки  $D/S$

исходной гильзы, со значениями 4, 11, на увеличение толщины стенки трубы  $\Delta S$  при безоправочной прокатке. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\Delta S_{\%} = 10,39 - 3,69 \cdot \frac{(\varphi-5,5)}{4,5} + 6,96 \cdot \frac{(\varepsilon_d-15)}{10} + 10,23 \cdot \frac{(\frac{D_0}{S_0}-7,5)}{3,5} - 2,39 \cdot \frac{(\varphi-5,5) \cdot (\varepsilon_d-15)}{45} + 7,94 \cdot \frac{(\frac{D_0}{S_0}-7,5) \cdot (\varepsilon_d-15)}{45} . \quad (8)$$

где  $\frac{D_0}{S_0}$  – отношение диаметра к толщине стенки полой исходной заготовки.

Проверка значимости коэффициентов регрессии показала, что все рассмотренные факторы значимы и оказывают влияние на изменение толщины стенки. Наибольшее влияние оказывает отношение  $D/S$  исходной гильзы. При прокатке тонкостенных гильз интенсивность изменения толщины стенки выше. Следующим по значимости является суммарное обжатие трубы по диаметру. Наименьшее влияние на изменение толщины стенки оказывает угол  $\varphi$ .

На основе полученной модели и проведенных исследований осуществлялась разработка режимов прокатки с повышенным обжатием по диаметру в раскатном и калибровочном станах ТПА 160, а также калибровок рабочих валков.

**В четвертой главе** представлены методика проведения и результаты экспериментального исследования безоправочной прокатки на стане МИСиС 130 Т, результаты промышленного опробования технологии прокатки труб с повышенным обжатием по диаметру на раскатном и калибровочном станах ТПА 160 с использованием разработанных калибровок рабочих валков. Проведен анализ размерного и марочного сортаментов прокатанных труб, качества поверхности, механических свойств, точности по диаметру и толщине стенки, а также оценен уровень энергосиловых параметров.

Для измерения геометрических размеров и коэффициента овальности в очаге деформации при безоправочной прокатке труб на стане МИСиС 130 Т получены образцы, заторможенные в процессе прокатки. Редуцирование труб с  $D/S=10$  осуществлялось на 16,5 %, а  $D/S=7$  – на 25 %.

Коэффициент овальности тонкостенных труб с  $D/S=10$  (рисунок 6) изменяется более интенсивно, чем толстостенных с  $D/S=7$ . При обжатии по диаметру на 16 %, овальность труб с  $D/S=10$  составляет 1,10, а с  $D/S=7$  – 1,08.

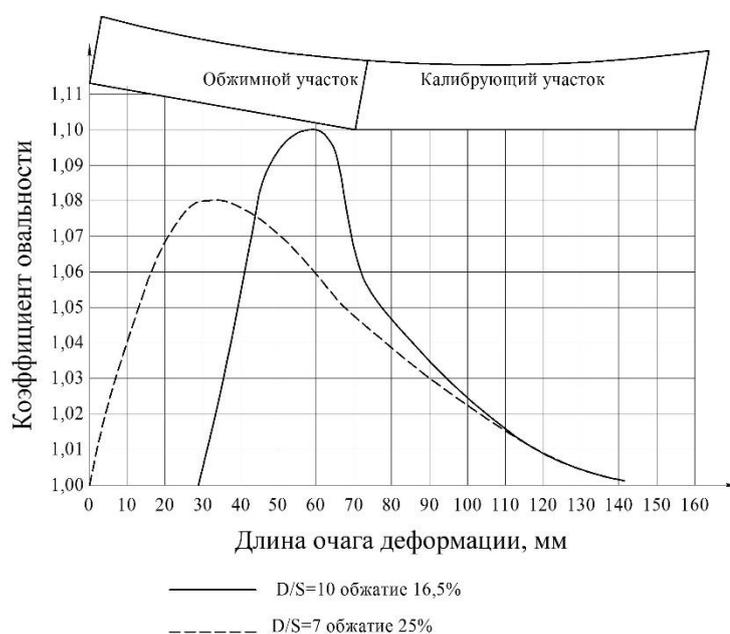


Рисунок 6 – Изменение коэффициента овальности трубы в очаге деформации

Исследование изменения разностенности труб в поперечном сечении (поперечной разностенности) осуществлялось как на трубах, полученных безоправочной прокаткой на стане МИСиС 130 Т, так и при помощи результатов компьютерного моделирования в программе DEFORM.

В процессе редуцирования разностенность труб снижается. При обжатии гильз с  $D/S=5$  на 5 %, разностенность снижается с 9,7 до 7,2 %, т.е. в 1,3 раза, а при обжатии на 25 % – до 6,2 % т.е. в 1,5 раза. Аналогичная картина наблюдается при обжатии гильз с  $D/S=10$ . В результате обжатия на 5 % разностенность снижается с 20,9 до 13,5 % т.е. в 1,5 раза, а в результате обжатия на 25 % – до 11,4 %, т.е. в 1,8 раза.

Компьютерное моделирование гильз с заданной разностенностью: 0 %; 10,7 %; 19,8 %; 21,4 % показывает, что при безоправочной прокатке гильзы с нулевой исходной разностенностью, наблюдается ее повышение до 5,4 %. В остальных случаях, разностенность снижается в 1,2 – 1,7 раза и приближается к значению 5,4 %.

Важной особенностью безоправочной прокатки или раскатки с повышенным обжатием по диаметру является изменение толщины стенки трубы в процессе деформирования.

На основании экспериментальных данных получено уравнение регрессии для определения относительного изменения толщины стенки трубы –  $\varepsilon_s$ :

$$\varepsilon_s = 13,1 + \left(\frac{\varepsilon_d - 15}{10}\right) \cdot 7,5 + \left(\frac{D_0 - 7,5}{S_0 - 2,5}\right) \cdot 3,5. \quad (9)$$

Анализ коэффициентов регрессии показал, что рассмотренные факторы  $\varepsilon_d$  и  $D_0/S_0$  значимы и существенно влияют на изменение толщины стенки трубы, что не противоречит результатам компьютерного моделирования, описанного ранее (см. уравнение 8).

Применительно к ТПА 160 разработана калибровка рабочего валка раскатного стана с возможностью ведения процесса раскатки с повышенным обжатием гильзы по диаметру. С этой целью рабочий валок оснащен участком редуцирования и участком обжатия раската перед гребнем. Участок редуцирования имеет длину 100 мм с углом наклона образующей к оси прокатки  $\varphi=10^\circ$ , который обеспечивает захват гильзы и обжатие по диаметру. Новая калибровка введена в число действующих калибровок валков раскатного стана на ТПА 160.

Также разработана калибровка рабочего валка калибровочного стана, позволяющая осуществлять процесс калибрования по существующей технологии и с повышенными обжатиями по диаметру. Участок

редуцирования длиной 85 мм и углом наклона образующей к оси прокатки  $\varphi_1$ , равным  $10^\circ$ , обеспечивает условие захвата и позволяет повысить обжатие по диаметру до 25 %. Существующий участок захвата с углом  $\varphi_2$ , равным  $2,5^\circ$ , длиной 50 мм позволяет осуществлять калибрование всего существующего размерного сортамента труб.

Исследование формоизменения в процессе раскатки гильзы на оправке с повышенным обжатием по диаметру осуществлено на раскатном трехвалковом стане ТПА 160 с валками, имеющими новую калибровку. Для этого получены заторможенные трубы с диаметром непрокатанной части трубы (гильзы) 145 мм, толщина стенки 24 мм, ( $D/S=6$ ), диаметр прокатанной части 103 мм, толщина стенки 17,5 мм, ( $D/S=6$ ).

На рисунке 7 представлен график изменения коэффициента овальности по длине очага деформации: максимальное значение (1,135) достигнуто в начале калибрующего участка непосредственно перед гребнем на расстоянии, соответствующем величине  $1/3$  шага подачи, что подтверждается результатами компьютерного моделирования.

За период опытно-промышленного апробирования было прокатано около 34 тыс. тонн труб, как по существующей технологии с использованием разработанных калибровок, так и по разработанной технологии с повышенным обжатием по диаметру в раскатном и калибровочном станах.

Исследование качества труб, полученных при безоправочной прокатке на калибровочном стане ТПА 160 с обжатием по диаметру до 17 % показывает, что наружная и внутренняя поверхность труб не имеет визуальных дефектов. Поверхность ровная, без морщин, плен и закатов. Согласно акту промышленного опробования отмечено улучшение качества наружной поверхности труб по сравнению с трубами, прокатанными по существующей технологии.

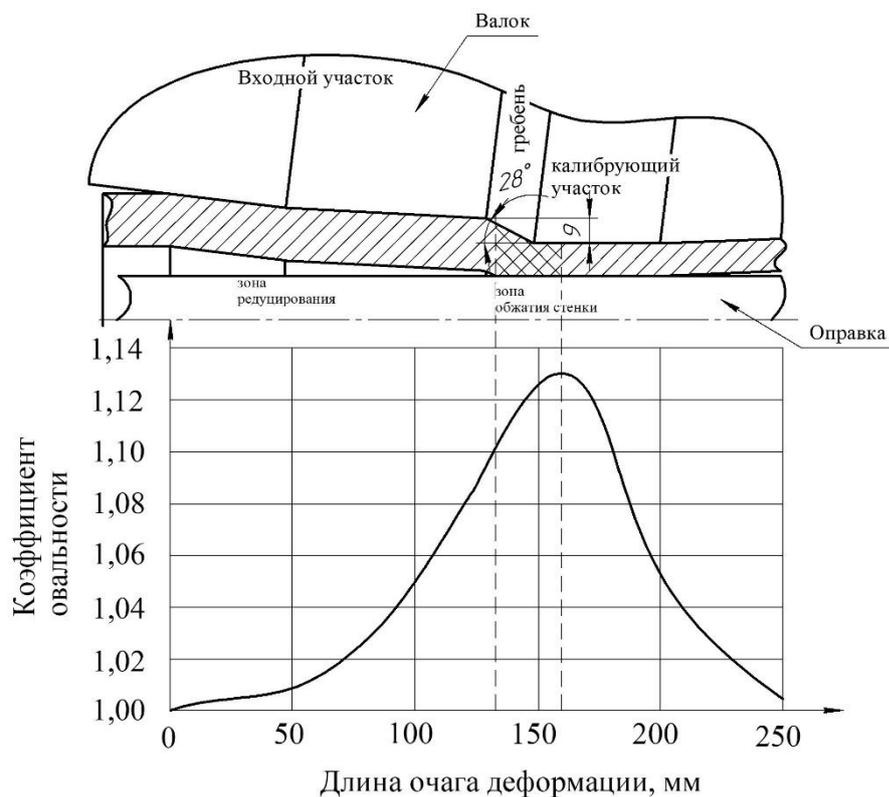


Рисунок 7 – Изменение коэффициента овальности трубы по длине очага деформации

Проведенные АО «ПНТЗ» испытания механических свойств показывают их соответствие нормативной документации. Разностенность большинства труб укладывается в интервал 2,5-6 %, что соответствует повышенной точности (ГОСТ 8732–78) и характерна для труб, полученных на трубопрокатных агрегатах с раскатным станом винтовой прокатки. Овальность диаметральных размеров не превышает 1,1 %, что также соответствует требованиям ГОСТ. Большинство труб имеют овальность диаметральных размеров в интервале 0,2-0,5 %.

Мощность раскатки по штатным режимам в зависимости от диаметра труб, суммарного обжатия по толщине стенки и марки стали изменяется в пределах 600-900 кВт. По результатам опытно-промышленной прокатки с обжатием по диаметру до 36 %, мощность раскатки возрастает до 1150-1500 кВт. Это соответствует техническим характеристикам привода

раскатного стана. При калибровании труб с обжатием до 15 % мощность процесса прокатки увеличивается до 190 кВт.

Процессы раскатки и калибрования с повышенным обжатием по диаметру позволяют осваивать новые режимы прокатки бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. На АО «ПНТЗ» осуществлена экспериментальная прокатка труб диаметром 168 мм с толщиной стенки 22 мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 220 мм.

Основным отличием нового способа является применение дополнительного обжатия – до 50 % по диаметру в раскатном стане и осуществление процесса калибрования черновых труб с обжатием по диаметру до 15 %. Разработанный способ позволяет перераспределить коэффициенты вытяжки между прошивным, раскатным и калибровочным станами с увеличением вытяжки при раскатке и калибровании. Это дает возможность получить качественные бесшовные трубы широкого размерного сортамента, а также позволяет сократить размерный ряд применяемых исходных заготовок, дает возможность использовать непрерывнолитую заготовку для широкого размерного сортамента получаемых труб, исключив операцию дополнительного переката заготовок на меньший диаметр.

### **Выводы**

1. В результате комплексных исследований, разработаны и внедрены новые научно-технические решения, повышающие производственную мобильность ТПА-160. Новые калибровки валков и режимы прокатки на раскатном и калибровочном станах позволяют существенно расширить размерный сортament труб, производимых из одной заготовки, в том числе непрерывнолитой.
2. Экспериментальными исследованиями и компьютерным моделированием установлено, что наибольшее влияние на деформационные параметры оказывает отношение  $D/S$  трубы и калибровка рабочих валков. Для безоправочной прокатки труб с  $D/S$  равным 5–10 разработана

рациональная калибровка рабочих валков без гребня с углом наклона образующей к оси прокатки 5-10°.

3. Разработана методика анализа деформационных параметров и силовых условий процессов раскатки и безоправочной прокатки, позволяющая учесть наличие овальности трубы в очаге деформации техвалкового стана. Установлена аналитическая зависимость контактного напряжения от диаметра рабочих валков, толщины стенки трубы, коэффициента, учитывающего влияния внешних зон при раскатке, на участках редуцирования и обжатия стенки трубы.
4. Выполнено исследование геометрических размеров труб при безоправочной прокатке, в результате которого было установлено, что прокатка толстостенных труб (с D/S равным 5-7) сопровождается с меньшим приращением толщины стенки, чем тонкостенных (с D/S до 10). С ростом суммарного обжатия трубы по диаметру, интенсивности изменения толщины стенки увеличивается.
5. разработана методика расчета изменения толщины стенки трубы при безоправочной прокатке с повышенными обжатиями по диаметру, которая позволяет определить толщину стенки получаемой трубы.
6. Разработаны валковые узлы трехвалковых станов винтовой прокатки с повышенной грузоподъемностью (в два раза) подшипниковых опор, которые позволяют расширить сортамент прокатываемых труб.
7. Согласно акту, предложенные технологические режимы обжатия черновых труб прошла промышленное опробование при прокатке 34 тыс. тон труб широкого размерно-марочного сортамента и предложена к внедрению в производство на ТПА-160. В настоящее время предложенные режимы обжатия и калибровки рабочих валков внедрены на ТПА-160.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Е.А. Харитонов, В.П. Романенко, А.С. Будников Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки // Сталь

№10 (2014) 44-47. (ВАК). E.A. Kharitonov, V.P. Romanenko, A.S. Budnikov Pipe Behavior in a Three-Roller Screw-Rolling Mill // Steel in Translation No 10, Vol 44 (2015) 769-772. (Scopus, ВАК).

2. Е.А. Харитонов, В.П. Романенко, **А.С. Будников** Разработка методики расчета деформационных параметров при раскатке гильз в трехвалковом стане винтовой прокатки // Известия вузов черная металлургия № 3 (2016) с 167-172.

E.A. Kharitonov, V.P. Romanenko, **A.S. Budnikov** Sleeve Deformation in a Three – Roller Screw – Rolling Mill // Steel in Translation No 3, Vol 46 (2016) 180-185. (Scopus, ВАК).

3 Е.А. Харитонов, **А.С. Будников**, Распределения удельной силы металла на валок в процессе раскатки труб на трехвалковом стане винтовой прокатки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Т. 59. № 9. (2016) 628-633 (ВАК).

4 **А.С. Будников**, Е.А. Харитонов, Ф.В. Сорокин Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки // Сталь № 10 (2017) 31-34. (ВАК).

5 **А. С. Будников**, Е. А. Харитонов, Р. В. Исхаков, В. Д. Сабуркин Исследование редуцирования труб на трехвалковом калибровочном стане винтовой прокатки ТПА-160 // Сталь № 8, (2019) 43-46. (ВАК).

6 Пат. 2556164 Российская федерация. Способ получения тонкостенных труб на трубопрокатных агрегатах с трехвалковым раскатным станом В21В 19/16 Харитонов Е.А., Романенко В.П., **Будников А.С.** заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС – № 2013156773; заявл. 20.12.13; опубл. 15.06.15, Бюл. № 19. – 10 с. (ВАК)

7 Алещенко А.С., **Будников А.С.**, Харитонов Е.А. Исследование формоизменения металла в процессе редуцирования труб на трехвалковом стане // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Том 62. № 10 (2019), 756-762 (ВАК).

- 8 **Будников А.С.**, Харитонов Е.А., Алещенко А.С. Влияние безоправочной деформации в трехвалковом стане винтовой прокатки на изменение толщины стенки трубы // Черные металлы, №12 (1056), декабрь 2019 г, 41-45 (ВАК).
- 9 Свид. 2016619610 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета энергосиловых параметров раскатки труб в трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки (ESP) / **А.С. Будников**, Е.А. Харитонов; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2016616813/69; заявлена 28.06.2016; опубл. 24.08.2016, Реестр программ для ЭВМ – 1 с.
- 10 Свид. 2017613235 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета диаметра подшипников в подушках трехвалковых станов винтовой прокатки (Geometry\_1) / **А.С. Будников**, Е.А. Харитонов, И.С. Деметрашвили; заявитель и правообладатель ФГАОУВО «НИТУ «МИСиС». – 2017613235/69; заявлена 17.01.2017; опубл. 14.03.2017, Реестр программ для ЭВМ – 1с.
- 11 Алещенко А.С., **Будников А.С.**, Харитонов Е.А. Исследование формоизменения металла в процессе редуцирования труб в трехвалковом стане. // труды XI конгресса прокатчиков Том 2 (2018) с. 208-2012.
- 12 **Будников А.С.**, Харитонов Е.А., Исхаков Р.В., Сабуркин В.Д. Исследование процесса редуцирования труб в трехвалковом калибровочном стане винтовой прокатки в условиях ТПА 160 АО «ПНТЗ» // XXIII международная научно-практическая конференция Трубы 2018, 38-47.
- 13 **Будников А.С.**, Сабуркин В.Д. Исследование процесса редуцирования труб в трехвалковых станах винтовой прокатки // Материалы III молодежной научно-практической конференции Магнитогорск 2018, 64-65.