

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет Материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент

Заведующий кафедрой

_____ Л.В. Радионова

« ____ » _____ 20__ г.

« ____ » _____ 20__ г.

Тема работы: « Сокращение расходного коэффициента металла за счет исследования формоизменения концов труб при непрерывной прокатке на оправке»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

ЮУрГУ-22.04.02.2018.181-00.00.00 ПЗ

Руководитель работы:

_____ / А.В. Выдрин /
Автор работы

_____ / Д.А. Ахмеров /

студент группы П-244

АНОТАЦИЯ

Ахмеров Д.А. Сокращение расходного коэффициента металла за счет исследования механического формоизменения концов труб при непрерывной прокатке на оправке
Диссертационная работа магистра – Челябинск: ЮУрГУ, 2018 г. – 76 с., 30 ил. 10 табл., библиогр. список – 43 наименования.

В диссертационной магистерской работе обоснована актуальность и освещена степень разработанности тематики исследования. Представлены особенности технологии и оборудования непрерывных раскатных станов продольной прокатки. Отмечены основные преимущества и недостатки процесса прокатки полых заготовок с использованием раскатного стана продольной прокатки с 2-х и 3-х валковыми клетями. Проведены исследования влияния количества валков и степени обжатия на величину концевой обрезки с помощью физического и компьютерного моделирования. Основываясь на результатах исследований, предложены технические решения.

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА НЕПРЕРЫВНЫХ РАСКАТНЫХ СТАНАХ.....	10
1.1 Современное состояние мировой трубной промышленности для производства бесшовных труб.....	10
1.2 Особенности технологии и оборудования непрерывно раскатных станов продольной прокатки.....	14
1.3 Исследования процесса прокатки труб на непрерывных станах с использованием калибров, образованных разным количеством валков.....	23
1.4 Обзор способов снижения концевой обрезки	31
1.5 Выводы и постановка задач исследования	38
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЛИБРОВ, ОБРАЗОВАННЫХ РАЗНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ВАЛКОВ.....	40
2.1 Постановка задачи физического моделирования.....	40
2.2 Оборудование для экспериментального исследования.....	40
2.3 План проведения эксперимента.....	43
2.4 Результаты эксперимента	44
2.5 Выводы по главе.....	51
3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ	
3.1 Задачи компьютерного моделирования	52

3.2 Компьютерное моделирование процесса раскатки гильз на 2-х и 3-х валковой системе калибров	52
4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УМЕНЬШЕНИЮ КОНЦЕВОЙ ОБРЕЗИ ТРУБ	59
4.1 Разработка системы калибров	59
4.2 Моделирование технологии процесса прокатки труб с использованием действующей и разработанной калибровки	66
4.3 Выводы по главе	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	70

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ТПА – трубопрокатный агрегат;
- FQM – Fine Quality Mill, трёхвалковый пятиклетевой НРС с удерживаемой оправкой
- PQF – Premium Quality Finishing, трёхвалковый пятиклетевой НРС с удерживаемой оправкой;
- PQF-ACO – Axial Change Over, конструкция стана PQF, имеющая станину туннельного типа, позволяющая осуществлять перевалку всего комплекта клетей в направлении оси прокатки;
- PQF-LCO – Lateral Change Over, конструкция стана PQF, позволяющая осуществлять замену отдельных клетей в боковом направлении, перпендикулярном оси прокатки;
- PQF-BCO – Bilateral Change Over, конструкция стана PQF, позволяющая осуществлять замену отдельных клетей в направлении, перпендикулярном оси прокатки, как с левой, так и с правой выдачей клетей;
- MPM – Multistand Pipe Mill, двухвалковый семиклетевой НРС с удерживаемой оправкой;
- SMS Meer – это часть ассоциированных предприятий «SMS group»;
- Danieli – концерн, специализирующийся на разработке, проектировании и выпуске машиностроительного оборудования для металлургической отрасли (г. Бутрио, Италия);
- НРС – непрерывный раскатной стан с удерживаемой или плавающей оправкой;
- РКМ – расходный коэффициент металла;

- Акку-Ролл – Accuracy Roll, раскатной, модернизированный стан
Дишера, с контролируемой оправкой;
- ФТТ – Front Tail Tapering, сведение на конус переднего конца
- ЭУ-ППТ – экспериментальная установка для исследования процесса
продольной прокатки труб;
- ОАО «РосНИТИ» – Открытое акционерное общество «Российский Научно-
Исследовательский Институт Трубной Промышленности»;
- ПК – передний конец раската по горячему переделу и готовых
труб;
- ЗК – задний конец раската по горячему переделу и готовых труб;
- ПАО «ТАГМЕТ» – Публичное акционерное общество «Таганрогский
Металлургический завод»;
- ПАО «СТЗ» – Публичное акционерное общество «Северский трубный
завод»;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- Qform – современный программный комплекс для моделирования
процессов обработки металлов давлением на основе МКЭ;
- НДС – напряженно-деформируемое состояние металла.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач, стоящей перед собственниками трубных заводов Российской Федерации для успешной конкурентной борьбы, является сокращение производственных издержек при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции.

Одними из основных факторов обеспечения конкурентоспособности продукции являются качество и сокращение издержек производства.

В формировании издержек на производство трубной продукции главную роль играют затраты на металл, доля которых в структуре общих затрат может составлять до 90% [1].

Решая вопрос о минимизации издержек, ведущие мировые производители металлопродукции, в том числе и трубной, начали активно переводить свои производственные мощности в Китай, Мексику, страны Юго-Восточной Азии, создавая тем самым, значительные экономические трудности для российских трубников не только на мировом рынке, но уже и на внутреннем. Зачастую в качестве направления снижения издержек рассматривают только инновационный путь, требующий значительных инвестиций [1].

При этом недооценивается другое, тоже чрезвычайно эффективное направление снижения себестоимости, в первую очередь для трубной промышленности, снижение расхода металла – непрерывное совершенствование.

Так как в трубном производстве затраты на металл составляют подавляющую часть издержек, то непрерывное совершенствование технологии должно быть направлено в первую очередь на сокращение потерь металла.

Основной тенденцией мирового развития трубопрокатного производства является применение в линии трубопрокатного агрегата непрерывного раскатного стана продольной прокатки. При производстве бесшовных труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом гильзу раскатывают в передельную трубу.

Окончательное формирование толщины стенки и наружного диаметра, с целью расширения производимого сортаментного ряда труб, осуществляется на редуционно-растяжных и калибровочных станах [2].

Характерной особенностью при продольной раскатке труб является образование утолщенных концов. Это явление связано с тем, что передний и задний концы подвергаются формоизменению в условиях отличных от деформации средней части трубы.

Снижение неравномерности деформации по периметру поперечного сечения раската можно достичь за счет увеличения количества валков в клети, образующих калибр, поэтому в последнее время все большее применение находят непрерывные раскатные станы с 3-х валковыми калибрами типа PQF и FQM.

Так как характер изменения толщины стенки на концах трубы определяет длину и массу концевой обрезки, а это значительной мере определяет экономические показатели всего трубопрокатного агрегата в целом.

Особенно остро проблема утолщенных концов стоит на ТПА, производящих относительно короткие трубы, так как в этом случае длина концевой обрезки составляет существенную часть от объема произведенной продукции.

При анализе технологии производства труб с точки зрения уменьшения РКМ, необходимо учитывать все технологические факторы, с целью определения влияния каждой из них на геометрические параметры раската.

Следует отметить, что процесс раскатки гильзы в черновую трубу на трёхвалковом непрерывном стане с удерживаемой оправкой мало изучен в России, так как первые НРС с 3-х валковыми калибрами установлены в России относительно недавно PQF (ПАО «ТАГМЕТ») (2008 г.) и FQM (ПАО «СТЗ») (2014г.). Информация о данном способе производства труб в основном носит рекламный характер, поэтому исследование новой технологии, её корректировка, совершенствование методик расчёта настроечных и энергосиловых параметров являются актуальными в настоящее время. Деформационные, скоростные

режимы, а также параметры калибровки валков, определяются согласно математическим моделям поставщика оборудования.

При этом в большинстве случаев описание формул и зависимостей для определения параметров процесса раскатки имеют различные эмпирические либо поправочные коэффициенты, значения которых определяют, либо в процессе горячих испытаний стана, либо на основе уже имеющегося опыта эксплуатации непрерывных раскатных станах.

С учётом постоянного ужесточением конкуренции на рынке трубной промышленности, требования по экономическим показателям, предъявляемым к бесшовным трубам, исследование новой технологии прокатки и её рациональная корректировка, с целью снижения РКМ являются актуальными в настоящее время.

Целью работы является повышение экономической эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и компьютерного моделирования процесса прокатки труб. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ технологий и особенностей процесса раскатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах продольной прокатки на основе обзора научно-технической информации;
- определить факторы, влияющие на концевую обрезь труб;
- провести в лабораторных условиях экспериментальные исследования, для анализа процессов образования концевой обрезки;
- провести компьютерное моделирование раскатки труб, с целью влияния НДС на величину концевой обрезки;
- разработать новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие уменьшение расходного коэффициента металла.

1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА НЕПРЕРЫВНЫХ РАСКАТНЫХ СТАНАХ

1.1 Современное состояние мировой трубной промышленности для производства бесшовных труб

На данный момент ни одна отрасль российской промышленности за последние годы не прошла через столь впечатляющий масштабный процесс модернизации, как трубная.

Количество произведенных в 1994-2006 годах, бесшовных труб в мире, колебалось на уровне 20 млн. тонн в год [3], а в 2012-2016 годах оно колебалось в районе 40 млн. тонн в год [4]. Рост объемов производства достигнут не только за счет установки новых мощностей, но и реконструкции старых ТПА. При этом, загрузка мощностей мирового трубного комплекса, составляет 50%. Загрузка станов в России составила 70%, что существенно выше мирового показателя.

В настоящее время, как в России, так и за рубежом используют различные высокотехнологичные и весьма эффективные способы производства бесшовных труб.

Это связано с повышением эффективности научных исследований, достигаемой за счет использования современных методов математического, компьютерного и физического моделирования [5-10].

Процесс раскатки гильз является ключевым процессом в технологической схеме получения передельных труб, так как он формирует все основные геометрические параметры труб.

Поэтому определяющим в ТПА является тип раскатного стана. Установленные в мире ТПА имеют раскатные станы разных типов. На данный момент в производстве используют в основном двухвалковые (МРМ) и трёхвалковые (PQF и FQM) непрерывно раскатные станы.

Из анализа объемов производства бесшовных труб (таблица 1) по типам раскатных станов следует, что процент труб произведенных с непрерывным станом вырос в два раза, а с новым непрерывным станом (с удерживаемой оправкой) вырос в 1,5 раза. Рост в два раза продукции с речных станов, представляется несколько завышенным, так как установка их могла происходить только в Китае, от национального производителя. В ходе модернизаций, ранее установленных в Европе речных станов, происходил рост производительности станов в 1,5-2 раза.

Таблица 1 – Объем производства труб, по типам раскатных станов, %

Источник, год выхода	Автомат стан	НРС	Пильгерстан	Речный стан	Прессова- ние	Осталь- ные
1996	30	34 (20 с удерж. оправ.)	14	8	5	10
2001	-	70 (30 с удерж. оправ.)	-	15	-	15

Учитывая то, что статистика в изданиях используется с большой задержкой и анализируя таблицу 1, с учетом источников [11,13,14] можно увидеть, что из 20 млн. тонн труб, 6 млн. тонн изготовили 10 станом МРМ, 8 млн. тонн изготовлено на 15 непрерывных станах с плавающей оправкой, 30 речных станом изготовили 3 млн. тонн, а остальные 30 агрегатов изготовили оставшиеся 3 млн. тонн.

Появление новых непрерывных станов PQF и FQM в количестве 30 штук и рост объемов производства труб на 20 млн. тонн достаточно хорошо коррелируется.

При этом, следует иметь в виду, что годовой объем производства в КНР, достигал в 2014 году уровня 31 млн. тонн бесшовных труб [4]. Это может объясняться тем, что большая часть новых станов установлена именно там.

С учетом некоторой корректировки, можно сделать вывод, что к 2017 году более 70% бесшовных труб в мире изготавливалась на непрерывных станах различных конструкций. При этом, после появления непрерывного стана типа MPM в 1983 году, практически перестали строить автомат- и пильгерстаны, а также непрерывные станы других типов. Продолжалась установка новых станов Асселя и Акку-Ролл на заводах Индии и Китая [11].

Количество раскатных станов, основных типов, в мире, на сегодняшний день приблизительно выровнялось, речных станов более 30 штук [12] (не учитывая КНР), станов PQF и FQM около 30 штук [13,14], станов (MPM + непрерывные с плавающей оправкой) более 30 штук.

В сумме остальных станов для производства бесшовных труб, пилигримовых, таких как Асселя, Дишера и Акку-Ролл, более 30 штук. Это оборудование западных изготовителей.

Из этого можно сделать вывод о том, что в мире, на сегодня, половина ТПА имеют непрерывные раскатные станы.

Данный факт связан с интенсивным развитием производства бесшовных труб на ТПА с непрерывным раскатным станом в отечественной и зарубежной практике в 70-80 гг. прошлого столетия. Именно в это время непрерывно раскатные станы вводятся в эксплуатацию на Первоуральском, Волжском, Синарском трубных заводах, а также в Германии, Италии, Австрии, Китае, Бразилии, Америке и др. странах мира [3].

После появления в 2003 году непрерывного стана типа PQF и в 2006 году стана FQM, установка новых станов других типов происходила на практике эпизодически, а ранее установленные станы других типов проходили или реконструкции, полную замену. Часть из демонтированных станов была установлена в Китае.

С 2003 года «SMS group» установила 21 стан PQF, 4 стана MPM (последний заказ в 2003 г.) [13].

С 2004 г. «Danieli» установлено станов MPM – 1, FQM – 12 [14].

Из рисунка 1 видно, что после появления в 2000 году непрерывного стана типа PQF установка новых станов других типов происходила на практике эпизодически, а ранее установленные станы других типов проходили или реконструкции, или полную замену.

MANDREL MILLS			PQF® – PREMIUM QUALITY FINISHING				
1	7'	V&M Mühlheim	1972	1	6 5/8"	TPCO	2001
2	7'	Baosteel	1979	2	18"	TPCO	2005
3	7'	V&M Belo Horizonte	1995	3	6 5/8"	BMZ	2005
4	4'	Hengyang Valin Steel Tube	1997	4	10 3/4"	TMK Tagmet	2006
MPM – MULTISTAND PIPE MILLS				5	7"	Jindal Saw Ltd.	2006
1	16"	Tenaris Dalmine	1978	6	6 5/8"	ISMT	2006
2	13 3/8"	Tenaris Tamsa	1983	7	9 5/8"	TPCO	2006
3	9 5/8"	US Steel Fairfield	1983	8	7"	Angang New Iron and Steel	2006
4	7"	Tenaris Algoma	1986	9	10 3/4"	Anhui Tianda Oil Pipe Co. Ltd.	2007
5	10 3/4"	V&M Star	1987	10	16"	Vallourec & Sumitomo	2007
6	10 3/4"	Tenaris Siderca	1988	11	18"	Yantai Baosteel	2008
7	16 3/4"	TMK-Volzhsy	1989	12	10 3/4"	Jiangsu Xigang Group	2008
8	9 5/8"	EBS de Tubos Acero Sin Costura (Sidor)	1990	13	7"	Tenaris Tamsa	2008
9	14"	TPCO	1992	14	14"	Tianjin Tianxin	2008
10	6 5/8"	ArcelorMittal South Africa	1993	15	4"	V&M Riesa	2008
11	16 3/4"	Sumitomo Metal Industries	1997	16	16"	ArcelorMittal Tubular Products Jubail Co.	2009
12	6 1/4"	W R Jednosc	1999	17	18"	Baotou Steel (Group)	2009
13	9 5/8"	Baotou Steel (Group)	2000	18	6 1/4"	Baotou Steel (Group)	2009
14	6 1/4"	Angang New Iron and Steel	2001	19	20"	Jiangsu Tianhuai Pipe	2009
15	13 3/8"	Hengyang Valin Steel Tube	2002	20	7"	Hengyang Valin Steel Tube	2010
16	14"	Chengdu (Pangang Group)	2003	21	5 1/2"	TPCO	2011

Рисунок 1– Динамика установки станов «SMS group»

1.2 Особенности технологии и оборудования непрерывно раскатных станов продольной прокатки

Известные технологии раскатки гильзы предусматривают использование различных процессов деформации, а именно шаговой прокатки на пилигримовых станах, винтовой прокатки на станах Ассела, проталкивания на речных станах, продольной прокатки на автомат-станах и станах непрерывного типа.

В настоящее время в условиях массового производства труб диаметром от 16 до 426 мм толщиной стенки от 2,0 до 25,0 мм преимущественно из углеродистых и низколегированных марок стали перспективно использовать высокопроизводительные (производительность до 1 млн. т/год) непрерывные прокатные станы [12]. К преимуществам способа прокатки на этих станах относят также благоприятные условия деформации трубы, минимальные технологические отходы (удельный расход металла 1050 кг/т) и удобное для автоматизации технологии расположение оборудования.

Использование данных станов позволяет производить трубы в большом диапазоне по наружному диаметру и толщине стенки (рисунок 2).

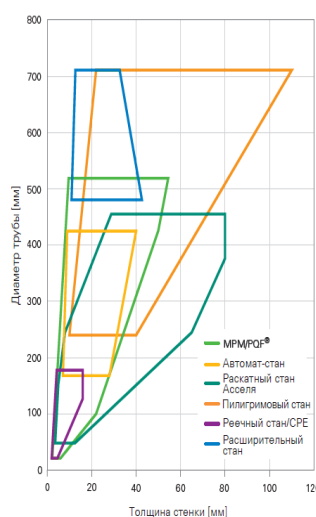


Рисунок 2 – Сортамент производства труб на ТПА с различными видами раскатных станов

Первые раскатные непрерывные станы имели двухвалковые клетки и плавающие оправки. При прокатке оправка принимает скорость перемещения гильзы. Прокатка происходит с уменьшением внутреннего диаметра и толщины стенок гильзы. Внутренний диаметр гильзы становится близким к диаметру оправок. Клетки непрерывного стана снабжены нажимными устройствами, позволяющими изменить раствор валков при настройке стана. Следует отметить, что данная технология применяется и в настоящее время.

На Синарском трубном заводе в 1987 г. был пущен ТПА-80 для выпуска насосно-компрессорных труб, труб общего назначения диаметром от 27 до 83 мм с толщиной стенки от 2,5 до 8,0 мм из углеродистых и легированных марок стали. Следует отметить, что данный ТПА успешно реализует свои возможности и на сегодняшний день.

Развитие данного способа непрерывной прокатки сдерживалось следующими ограничениями: длина черновой трубы не должна превышать 30000 мм, так как максимальная (по условиям изготовления) длина оправки составляла от 24000 до 30000 мм; увеличение диаметра трубы вызывало значительный рост массы оправки, что приводило к росту динамических нагрузок; уменьшение толщины стенки трубы затрудняло извлечение оправки.

Так же одной из основных проблем, связанной с использованием плавающей оправки, является то, что извлечение оправки из трубы после прокатки на НРС осуществляется на отдельно стоящем устройстве, при перемещении к которому передельная труба остывает, ее линейные размеры уменьшаются, плотность окова оправки увеличивается и при её извлечении появляются царапины и риски на внутренней поверхности трубы.

В связи с этим были разработаны способы прокатки с удержанием длинной оправки и принудительным перемещением ее в направлении прокатки обычно со скоростью, равной скорости прокатки в первой клетке. Такой режим перемещения оправки стабилизирует скоростные и силовые условия раскатки и температурный

профиль оправки, что создает благоприятные условия для получения равномерных значений толщины стенки и диаметра по всей длине черновой трубы. Кроме того, применение удерживаемой оправки позволило уменьшить ее длину и массу, по сравнению с обычной длинной подвижной оправкой, что обеспечило возможность прокатки труб большого диаметра (до 426 мм). После прокатки каждой трубы оправку, задний конец которой закреплен в каретке с электромеханическим приводом, отводят «назад» в положение, в котором производят ее охлаждение и смазку перед зарядкой в следующую гильзу или заменяют на другую оправку рабочего комплекта стана. В последнем случае, отработанная оправка поступает на линию рециркуляции, где ее охлаждают, смазывают и подогревают в проходной печи для выравнивания температуры по длине рабочей части. В обоих способах для облегчения извлечения оправки из трубы на выходе из раскатного стана используют извлекательно-калибровочный (4-9 клетей) стан.

В 1958-1959 гг. у А. Кальмеса (Albert Henri Calmes, Италия) появилась идея модернизировать технологию прокатки с плавающей оправкой в технологию МРМ, основная идея которой заключается в раскатке полых заготовок в клетях с 2-х валковыми калибрами на удерживаемой оправке, перемещающейся с постоянной заданной скоростью.

Взаимосвязь между клетями осуществляется через прокатываемый материал и оправку, характер движения которой также оказывает существенное влияние на параметры процесса раскатки. Процесс раскатки в МРМ дает возможность прокатки черновых труб значительной длины (до 40 м) с большой скоростью (до 6,5 м/с), что обеспечивает высокую производительность установки.

Постоянство скорости перемещения оправок в процессе раскатки, обеспечиваемое механизмом удержания оправки (ретайнер) позволило сократить длину и массу используемых оправок. Кроме того, технология МРМ позволила раскатывать тонкостенные трубы.

С этого момента развитие непрерывной прокатки характеризовалось интенсивным внедрением непрерывных раскатных станов типа МРМ. В то же время технология МРМ, в процессе её освоения, претерпевала некоторые изменения, в частности отмечался тренд по снижению количества клеток стана МРМ.

Теоретическим вопросам изучения процесса раскатки труб с двухвалковыми клетями с удерживаемой и плавающей оправкой посвящены многочисленные работы А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина, И.П. Савкина, И.А. Чекмарева, Г.И. Гуляева, В.Н. Данченко и т.д. По данной тематике было проведено большое количество исследований, освещающих отдельные вопросы теории и практики процесса непрерывной прокатки труб на длинной оправке, а также работ, посвященных разработке и исследованию рациональных технологических режимов и калибровок инструмента непрерывных оправочных станов.

Следует отметить, что данные работы проводились и были ориентированы на непрерывные станы с двухвалковыми клетями, с плавающей оправкой и не могут быть применены в полной мере к непрерывным оправочным станам с клетями трехвалковой конструкции в связи с некоторыми особенностями течения металла [2].

На сегодня, технология производства труб на непрерывных станах с трехвалковыми клетями с контролируемо-перемещаемой оправкой получает широкое распространение за рубежом и постепенно внедряется на отечественных предприятиях. Основными производителями оборудования непрерывных трубопрокатных станов подобной конструкции являются немецкая компания «SMS Meer» (стан PQF - Premium Quality Finishing mill) и итальянская – «Danieli» (стан FQM - Fine Quality Mill).

Концепция PQF – дальнейшее развитие МРМ-технологии была разработана немецкой компанией SMS Meer в 1999 году и является существенным шагом вперед в улучшении качества производимой продукции и расширении диапазона

размеров труб. Стан имеет следующие технологические и конструктивные особенности:

- калибры стана образованы тремя валками, что обеспечивает более равномерное обжатие трубы по периметру, позволяет расширить диапазон регулировки раствора валков в большем диапазоне (по сравнению с двухвалковым МРМ) без ущерба для точности по толщине стенки и в конечном итоге уменьшает парк номинальных размеров диаметров оправок для прокатки заданного сортамента труб;

- клетки-кассеты устанавливаются в общем контейнере туннельного типа воспринимающим усилие на валки посредством гидравлического нажимного устройства;

- перевалка клеток производится их перемещением на катках вдоль оси этого силового туннельного контейнера;

- узел каждого валка с комплектом подшипников и подушек установлен в поворотном устройстве, имеющем опорную зону, контактирующую с гидравлическим нажимным устройством и передающим радиальное усилие прокатки на силовой контейнер;

- поворотное устройство позволяет легко разбирать клетку для переточки валков в сборе с подушками на станке с ЧПУ.

Применение трехвалковой схемы вместо традиционной двухвалковой позволяет уменьшить неравномерность окружной скорости валков, а также параметров напряженно-деформированного состояния по периметру калибра. Результатом этого является уменьшение концевой обрезки. Например, на ТАГМЕТе и СТЗ, где установлены непрерывные прокатные станы, в производстве бесшовных труб достигнуто значительное снижение расходного коэффициента. С начала освоения новых процессов, снижение здесь уже составило более 100 кг на тонну, и эта тенденция сохраняется.

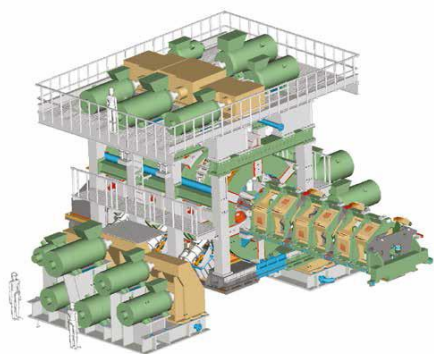
Так же следует отметить, что «SMS group» разрабатывает различные схемы станов (рисунок 3) [13]:

1. PQF ACO (туннельная конструкция), позволяющая осуществлять перевалку клетей в направлении оси прокатки. Однако использование данной конструкции имеет свои ограничения в виду того, что перевалка осуществляется одновременно для всего комплекта клетей, собранных в одну кассету. Для извлечения валков из клетки, в данной конструкции, предусмотрена система рычагов, позволяющая осуществлять поворот относительно своей оси. Правильность выставления калибра обеспечивается путем установки подкладок требуемой толщины на специализированном стенде настройки клетей. Для радиального смещения валков, с целью обеспечения требуемой высоты калибра, предусмотрено гидравлическое устройство, смонтированное в станине стана.

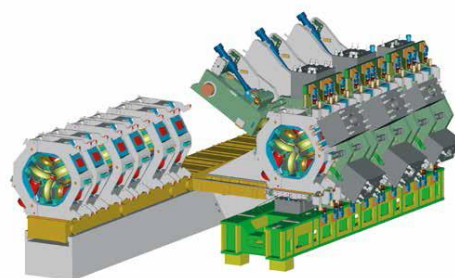
2. PQF LCO (быстрая смена клетей). Выгрузка и загрузка клетей производится в одну сторону, перпендикулярно оси прокатки. Стала возможна замена отдельных клетей, что позволило так же поднять скорость перевалки.

3. PQF BCO (смена клетей на обе стороны). На станах PQF-BCO перевалка проводится с меньшими затратами времени, так как для загрузки-выгрузки клетей задействованы две стороны, вместо одной, как у LCO.

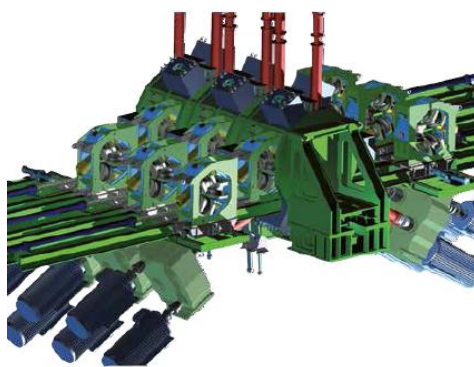
В России первый непрерывный раскатной стан типа PQF-LCO 10³/₄" был пущен в эксплуатацию в ПАО «ТАГМЕТ» в 2008 г. ТМК стала первой и единственной трубной компанией в России, запустившей подобное оборудование.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Схемы станов PQF: а) Тип ASCO – замена клеток в линии;
б) Тип LCO – замена клеток с одной стороны; в) Тип VCO – замена клеток с обеих сторон

Мощность установленного стана – 600 тыс. тонн труб в год. На нем производятся высококачественные бесшовные трубы диаметром от 73 до 273 мм и с толщиной стенки от 4,6 до 25 мм по международным стандартам.

Последней разработкой фирмы «Danieli» является стан FQM (Fine Quality Mill), который концептуально повторяет стан PQF, однако конструкция клеточной кассеты этого стана лишена недостатка клетки PQF заключающемся в том, что радиальное перемещение вала осуществляется по дуге окружности из-за поворотного устройства крепления валкового узла [15]. Перемещение валковых узлов в клетке FQM проходит строго по прямой в радиальном направлении, при

этом разборка клетки для переточки валков на станке с ЧПУ за счет конструктивных решений не сложнее, чем для клетки PQF.

Предложенный фирмой «Danieli» стан FQM содержит 5 клеток. Этот стан имеет повышенные технологические возможности:

– прокатка диапазона толщин стенок на оправке одного номинального диаметра, что сокращает парк оправок;

– автоматическое регулирование геометрических размеров прокатываемых труб посредством гидравлических исполнительных устройств (AGS) на основе аппаратно-измерительного комплекса контроля температуры и толщины стенки бесконтактным толщиномером лазерно-ультразвукового типа;

В России официальный пуск первого стана FQM LCO 14 $\frac{3}{8}$ " для производства труб наружным диаметром от 168 мм до 340 мм производительностью до 600 000 тонн в год состоялся в 2014 г. в ПАО «СТЗ» (г. Полевской). Раскатка гильз осуществляется в пятиклетевом стане трехвалкового типа с удерживаемой оправкой. Извлечение раската с оправки осуществляется станом-извлекателем. На сегодняшний день стан FQM 14 $\frac{3}{8}$ " является одним из передовых и высокоавтоматизированных станов для производства бесшовных труб в России. Для повышения качества раскатываемых труб, стабильности протекания процесса раскатки, а также повышения выхода годного стан FQM имеет различные системы автоматического управления, в частности:

а) систему автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана – ALS;

б) систему компенсации динамической нагрузки при захвате раската – ISC;

в) систему адаптивной балансировки валков – AFB;

г) систему адаптивной компенсации упругой деформации рабочего инструмента – АММС;

д) систему «гидроутонения» концов труб – FTT;

е) систему автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя – EDC и другие.

Таким образом, современный уровень технологий и оборудования базируется на применении процесса прокатки гильзы на удерживаемой (перемещаемой) оправке в последовательно установленных клетях с двухвалковыми (MPM) или трехвалковыми (PQF, FQM) калибрами, последующего извлечения оправки на непрерывной группе клетей извлекательно-калибровочного стана. Неотъемлемой особенностью современных непрерывных станов является использование индивидуального привода клетей с возможностью плавной регулировки частоты вращения, нажимных устройств гидравлического типа, систем контроля и автоматического регулирования параметров процесса (усилия, зазоры, скорость и т.п.).

Следует отметить, что данная технология производства труб на непрерывном раскатном стане с трёхвалковой системой калибров недостаточно хорошо изучена в России. Его внедрение на российских предприятиях основано лишь на авторитете зарубежных поставщиков оборудования, которые подтверждают качество готовых труб и актуальность реконструкции с использованием непрерывных станов с клетями трехвалковой конструкции примерами успешного производства труб за рубежом. Однако какую-либо информацию о подобных непрерывных станах возможно получить из статей иностранных специалистов, а также из рекламных проспектов основных поставщиков данного оборудования – компании «SMS Meer» и «Danieli».

Прогрессивность данного способа, в сравнении с пилигримовыми и автоматическими станами, обуславливается как высокой производительностью, так и экономическими показателями [12].

1.3 Исследования процесса прокатки труб на непрерывных станах с использованием калибров, образованных разным количеством валков

При анализе технологии производства труб с точки зрения уменьшения РКМ, необходимо учитывать все технологические факторы.

В настоящее время производство бесшовных труб в основном организовано на трубопрокатных агрегатах. Основное отличие трубопрокатных агрегатов друг от друга определяется типом входящего в их состав раскатного стана. В работе [3] выполнен сравнительный анализ трубопрокатных агрегатов различного типа. наименьший расходный коэффициент достигается на непрерывных станах

Однако НРС с удерживаемой оправкой могут иметь клетки, как с двухвалковыми, так и с трехвалковыми калибрами (клетями), имеющие свои преимущества и недостатки, которые до настоящего времени не в полной мере отражены в литературных данных.

В работе [21] показано, что клетки с 3-х валковыми калибрами позволяют получать более высокую точность труб по толщине стенки благодаря более равномерному распределению обжатий в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана. Этому, в частности, способствует лучшее центрирование оправки за счет приложения нагрузки в трех направлениях. Более равномерное обжатие в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана снижает поперечную разнотолщинность стенки и способствует получению еще более точных труб.

В работе [22] также отмечаются преимущества станов с 3-х валковыми калибрами, к которым относятся минимальная разница окружных скоростей валка по периметру калибра и меньшее количество типоразмеров оправок в виду возможности большей величины радиальной регулировки валков. Минимальная разница окружных скоростей должна дать эффект с точки зрения уменьшения износа валков и улучшения качества поверхности трубы. Минимальное

количество типоразмеров оправок способствует снижению издержек на содержание инструмента.

Тем не менее, непрерывные станы с 3-валковыми клетями по сравнению со станами с 2-валковыми клетями имеют ряд недостатков. В частности, из материалов статьи [4] следует, что основным недостатком 3-валковых клетей является то, что для обеспечения одинаковой с 2-валковыми клетями нагрузочной способности опор рабочих валков конструктивно необходимо увеличивать диаметр валков. Это, в свою очередь, приводит к увеличению момента прокатки и, следовательно, к увеличению требуемой мощности двигателя и габаритов клетки в целом (рисунок 4).

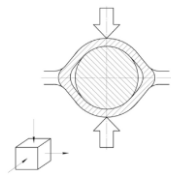
Освоение первых 3-валковых раскатных станов в КНР способствовало и появлению первых работ по анализу и изучению процесса раскатки: R. Jin (Baosteel) в работе [26] приводит сравнительную характеристику станов PQF и MPM, на основе имеющего опыта эксплуатации (таблица 2). По приведенным данным следует, что технология раскатки полых заготовок на ТПА со станом PQF имеет лучшие показатели как по точности раскатываемых труб, так и по расходу (износу) инструмента и выходу годного.



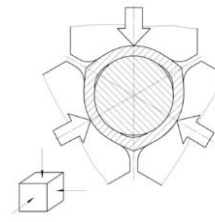
а



б



в



г

Рисунок 4 – Общие виды непрерывных раскатных станов с 2-валковыми клетями (а) и с 3-валковыми клетями (б). Очаг деформации непрерывного раскатного стана с 2-валковыми клетями (в) и с 3-валковыми клетями (г)

Проведенный анализ современного уровня развития трубопрокатных агрегатов подтверждает сделанные ранее [21] выводы о том, что при производстве прецизионных труб наиболее целесообразно применять ТПА с непрерывным раскатным станом, оснащенным удерживаемой оправкой и клетями с 3-валковым калибром.

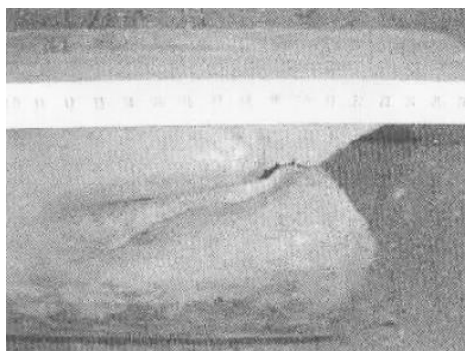
Таблица 2 – Сравнительный анализ технологии PQF и MPM [20]

№ п/п	Параметр	Тип стана	
		PQF	MPM
1.	Поле допуска по толщине стенки, %	$\pm (5 \div 8)$	$\pm (6 \div 9)$
2.	Поле допуска по наружному диаметру, %	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$

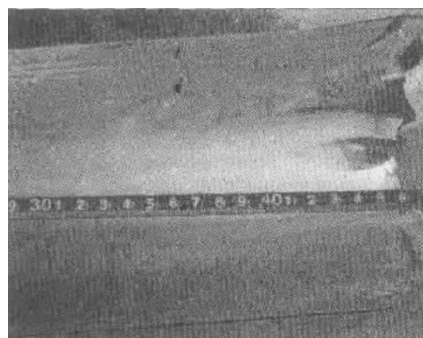
Продолжение таблицы 2

3.	Выход годного	0,943	0,937
4.	Расход (износ) инструмента, кг/тонн	0,67 ÷ 0,97	0,93 ÷ 1,23
5.	Рабочая длина оправки (макс), мм	19 000	21 100

Автором в работе [27] приводятся экспериментальные зависимости поля распределения толщины стенки от параметра D/S, результаты которых также говорят в пользу 3-валковых раскатных станов. Z. Yan и др. (Tianjin Steel Pipe Co., Ltd., Китай) в работе [28] проводят сравнительный анализ технологии PQF и MPM при раскатке труб наружным диаметром 139,70 мм с толщиной стенки 7,72 мм. По приведенным данным, длина некондиционного заднего конца передельной трубы, полученной по технологии PQF, значительно меньше (рисунок 5), что свидетельствует о снижении величины концевой обрезки труб и РКМ.



а



б

Рисунок 5 – Задний конец передельной трубы при раскатке гильзы на стане:

а – MPM; б – PQF

В трехвалковых рабочих клетях в сравнении с традиционными двухвалковыми осуществляются большие разовые обжатия. В этой связи общее количество

клетей в непрерывных станах новой конструкции гораздо меньше и составляет 4-5 против 8-9, используемых в традиционной раскатке.

В работе [20] проводится сравнительное исследование деформационных и энергосиловых параметров при раскатке в двух и трехвалковых клетях на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках.

Для изучения процесса формоизменения и деформации гильзы при обработке в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями сравнивались процессы в двух раскатных станах ТПА 80 в условиях ПАО "СинТЗ" и PQF 10 3/4" ПАО "ТАГМЕТ" при производстве одного типоразмера бесшовных труб.

В таблице 3 представлены исходные данные для проведения сопоставимого анализа.

Таблица 3 – Данные для проведения сопоставимого анализа

Параметр	Непрерывный стан с двухвалковыми клетями	Непрерывный стан с трехвалковыми клетями
Количество клетей, шт	8	5
Диаметр гильзы, мм	124	
Толщина стенки гильзы, мм	18	11
Диаметр черновой трубы, мм	94	
	5,5	6,5
Диаметр оправки непрерывного стана, мм	81	
Общая длина оправки непрерывного стана, мм	19500	17500
Материал оправки, сталь	35ХН2Ф	35Х5МФ

Продолжение таблицы 3

Температуры гильзы на входе в непрерывный стан, °С	1100	
Машинное время раскатки, с	12	
Скорость прокатки, м/с	4,3	4,0

Величины обжатий по стенке трубы в непрерывных станах с двухвалковыми клетями составляют: в первой клетке – от 32 до 50 %; во второй клетке – от 44 до 61 %; в последних клетях – от 2 до 9 %.

Деформация стенки трубы в непрерывных станах с трехвалковыми клетями происходит аналогичным образом, как и с двухвалковыми. Основная деформация по стенке трубы осуществляется в первых двух клетях: обжатие в первой клетке составляет от 46 до 49 %, во второй клетке – от 58 до 63 %. В последующих трех клетях формируется готовая стенка, при этом величина относительного обжатия стенки в последней клетке весьма мала (обжатие в последних клетях составляет от 2 до 7 %).

Деформация стенки трубы в непрерывных станах с трехвалковыми клетями происходит аналогичным образом, как и с двухвалковыми. Основная деформация по стенке трубы осуществляется в первых двух клетях: обжатие в первой клетке составляет от 46 до 49 %, во второй клетке – от 58 до 63 %. В последующих трех клетях формируется готовая стенка, при этом величина относительного обжатия стенки в последней клетке весьма мала (обжатие в последних клетях составляет от 2 до 7 %).

Анализ распределения относительных обжатий стенки по клетям, представленного на рисунке б, показал, что в сравнении с двухвалковыми трехвалковые клетки характеризуются большей разовой деформацией, что

позволяет раскатывать гильзы в меньшем количестве клетей. Так же из особенностей можно отметить отсутствие обжатий в седьмой и восьмой клетях непрерывного стана ТПА-80. Указанные клетки являются калибрующими в то время как для технологии раскатки PQF предусмотрен отдельный извлекательно-калибровочный стан.



Рисунок 6 – Распределение относительных обжатий по толщине стенки ($\frac{\Delta S}{S}$) при раскатке гильзы по клетям непрерывных станов

Клетки с 3-х валковыми калибрами позволяют получать более высокую точность труб по толщине стенки благодаря более равномерному распределению обжатий в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана. Этому, в частности, способствует лучшее центрирование оправки за счет приложения нагрузки в трех направлениях. Более равномерное обжатие в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана снижает поперечную разнотолщинность стенки. К преимуществам станов с 3-х валковыми калибрами относятся минимальная разница окружных скоростей валка по периметру калибра и меньшее количество

типоразмеров оправок в виду возможности большей величины радиальной регулировки валков.

Тем не менее, непрерывные станы с 3-х валковыми клетями по сравнению со станами с 2-х валковыми клетями имеют ряд недостатков, в частности, для обеспечения одинаковой с 2-х валковыми клетями нагрузочной способности опор рабочих валков конструктивно необходимо увеличивать диаметр валков. Это, в свою очередь, приводит к увеличению момента прокатки и, следовательно, к увеличению требуемой мощности двигателя и габаритов клетки в целом. Соответственно, строительство непрерывного раскатного стана с 3-х валковыми клетями влечет за собой повышенные капитальные затраты, а также дополнительные производственные и энергетические издержки. Следует отметить, что в настоящее время производителями прокатного оборудования активно ведутся работы по снижению металлоемкости станов с 3-х валковыми клетями.

В соответствии с литературными данными, основными преимуществами трёхвалковых раскатных станов являются следующие особенности процесса прокатки:

- при использовании трех валков для формирования очага деформации уменьшается глубина вреза ручья калибра в тело валка. Более равномерное распределение скоростей по периметру калибра уменьшает скольжение металла относительно валков на контактной поверхности. Это, в свою очередь, способствует устранению царапин, рисок, отпечатков и других дефектов на наружной поверхности труб;
- возможность прокатки труб из малопластичных и труднодеформируемых марок сталей и снижение средних и пиковых давлений сокращает износ инструмента.

При значительной исследованности процесса прокатки труб с использованием двух и трёхвалковых клетей остаются открытыми следующие вопросы:

формирование точности и концевой обрезки труб. Для изучения данного вопроса следует провести физическое моделирование процесса раскатки труб на НРС с разным количеством валков.

1.4 Обзор способов снижения концевой обрезки

Образование утолщенных концов – характерная особенность процесса непрерывной раскатки труб. Физическая суть этого явления состоит в том, что передний и задний концы подвергаются формоизменению в условиях, отличных от условий деформации средней части трубы.

Характер изменения толщины стенки на концах трубы определяет длину и массу концевой обрезки, что, в конечном счете, в значительной мере определяет экономические показатели всего трубопрокатного агрегата в целом. Проблема утолщенных концов особо остро стоит на ТПА, производящих относительно короткие трубы, т.к. в этом случае длина концевой обрезки составляет существенную часть от объема произведенной продукции. Толщина стенки задних концов черновых труб больше середины на 0,2-0,3 мм.

Данный дефект черновых труб сохраняется при последующем редуцировании и приводит к увеличению длины задних отрезаемых утолщенных концов готовых труб.

Таким образом, отмеченные составляющие общей разностенности труб оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели работы ТПА. В основном они связаны с физическими особенностями процессов прокатки в непрерывном и редуционном станах и могут быть устранены или существенно снижены только за счет специальных автоматических систем, изменяющих настройку стана в процессе прокатки трубы. Закономерный характер этих составляющих разностенности позволяет использовать в основе таких систем программный принцип управления.

Сокращение потерь металла на концевые отходы бесшовных труб является важной задачей, особенно актуальной при производстве труб на современных высокопроизводительных агрегатах с непрерывным станом.

Наиболее перспективен способ предварительного утонения концов черновых труб, чтобы на редуционных станах свести к минимуму концевую обрезь.

Однако для агрегатов с непрерывным станом решение этой задачи затрудняется вследствие высоких скоростей и темпа прокатки черновых труб одновременно в нескольких клетях стана на общей недеформируемой оправке.

Данный дефект пробовали решить ВНИИметмаш. В 1972 г. они разработали технологический процесс и оборудование для прокатки труб с утоненными концами в непрерывном длиннооправочном стане.

Утонение стенки на концах черновых труб осуществляется при прокатке в 9-клетевом непрерывном стане путем перемещения верхних валков в двух предчистовых клетях 6 и 7 с одновременным снижением скорости валков в предшествующих клетях стана. Перед прокаткой очередной трубы растворы валков в этих клетях устанавливаются уменьшенными на величину, соответствующую утонению стенки на переднем торце трубы. В процессе прокатки переднего конца трубы растворы последовательно увеличивают, при прокатке средней части трубы их сохраняют постоянными, а при проходе заднего конца трубы вновь уменьшают.

Такую же технологию, но более модернизированную предлагает Danieli Centro Tube. Для уменьшения потерь в виде обрезки и, в конечном счете, сокращения длины обрезаемых после обжатия концов они разработали модель и систему управления, называемую «FTT». Технология сведения на конус переднего конца (Front Tail Tapering), который может производить заданную более тонкую форму конца исходной трубы.

Для этого на стане FQM во время прокатки необходимо постоянно и одновременно менять скорости валков и нажимных устройств (гидравлических

капсул). Стенки утончаются на концах исходной трубы во время прокатки между 2-ой и N-ой клетью стана FQM путем перехода валков клетей на одновременное изменение скорости, в то время как 1-ая клеть используется для срабатывания управления для определения нужной длины прокатываемой части. Скорость валков и позиция гидравлических капсул рассчитывается как функция времени прокатки.

Расчеты проводятся с применением принципа секундного объема во время пластической деформации.

В работе [32] предлагают новую технологическую схему производства труб с применением катаной или непрерывнолитой заготовки, сохранение известных технологий подготовки металла к прокатке и прошивке заготовок сплошного сечения в полые толстостенные гильзы (возможно применение центробежнолитых полых гильз), а также операций охлаждения, порезки и отделки труб.

В данной работе предлагают непрерывный стан совмещенной прокатки, со следующей технологической схемой: «раскатку трубы по толщине стенки в группах калибров на оправке неоднократно чередуют с редуцированием. При этом повышенная продольная концевая разностенность (утолщенные концы), являющаяся результатом редуцирования с натяжением, или внутренняя граненость на трубах после редуцирования толстостенных труб раскатываются в последующей группе калибров на оправке» [32].

Однако чередование нескольких групп калибров раскатки и редуцирования в одном агрегате возможно, но сделает невозможным извлечение для охлаждения оправки (ее длина должна быть не менее суммарной длины непрерывного и редуцирующего станов), переменного диаметра. Следовательно, приведет к увеличению времени цикла и падению производительности.

В работе [30] проведен анализ 10 эмпирических формул для определения длины утолщенных концов труб после редуцирования труб, однако некоторые из

них можно применить и на непрерывных станах. Ряд из этих формул (формулы А.А. Шевченко, Г.И. Гуляева и В.А. Юргеленаса, Д. Валенты и др.) дают равные значения для длины утолщенных концов на переднем и заднем концах труб. Формулы А.З. Глейберга, А. Трзаски, И. Котрбаты и П. Власека позволяют дифференцировано определять длину утолщенных концов на переднем и заднем концах труб.

Анализ вышеперечисленных формул показывает, что величина утолщения стенки на концах трубы и длина утолщенных концов в основном зависят от трех параметров прокатки:

- величины вытяжки;
- межклетевого расстояния;
- среднего по стану коэффициента пластического натяжения.

На непрерывном раскатном стане из приведённых выше параметров, для уменьшения длины некондиционных концов, мы сможем воздействовать только на величину вытяжки.

В работе [33] авторами проведено теоретическое исследование формирования концевой обрезки раската на трубопрокатных агрегатах с непрерывными станами. Выявлено, что большинство из имеющихся формул адаптированы для расчета концевой обрезки при раскатке черновой трубы в линии ТПА с использованием непрерывных станов двухвалкового типа с удерживаемой либо плавающей оправкой.

На непрерывном оправочном стане PQF имеется система гидроутонения (аналог технологии FTT) предназначенная для раскатки заднего конца гильзы с большим коэффициентом вытяжки. Система гидроутонения выравнивает толщину стенки по телу раската, нивелируя утолщенный задний конец, однако величина абсолютной разнотолщинности стенки на заднем конце значительно превосходит разнотолщинность стенки на переднем.

В процессе промышленного исследования технологии производства труб в линии ТПА со станом PQF было определено, что основными технологическими факторами, влияющими на формирование концевой обрезки на участке горячего передела, являются наличие системы гидроутонаения непрерывного стана, коэффициент вытяжки по горячему переделу, отношение наружного диаметра к толщине стенки раската (D/S), тоннаж (прокатная компания), использование различных систем калибров стана PQF.

Анализ промышленных данных показал, что начиная с сортамента наружным диаметром 114 мм и выше, величина обрезки металла с переднего и заднего концов одинакова и приближена к величине 0,3 м с каждого конца; величина концевой обрезки на сортаменте труб наружным диаметром в диапазоне от 73 до 108 мм и частично до 114 мм уменьшается с увеличением величины наружного диаметра труб, что логично, так как с увеличением наружного диаметра при прокатке сортаментного ряда труб для одного калибра НС уменьшается число задействованных в деформации клетей РРС, а также общая деформация раската по наружному диаметру при редуцировании.

На основании анализа промышленных данных получена степенная зависимость величины суммарной концевой обрезки u от безразмерного коэффициента x , представленная на рисунке 7.

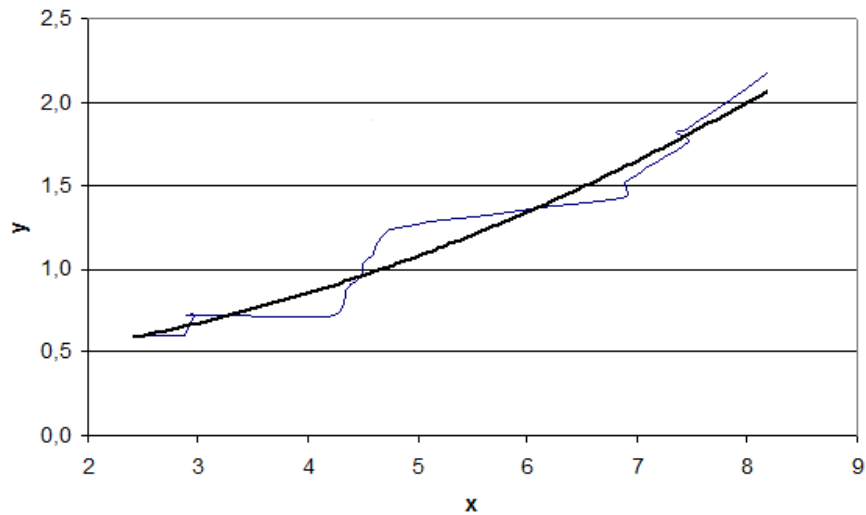


Рисунок 7 – Зависимость величины суммарной концевой обрезки «у» от коэффициента «х»

Безразмерный коэффициент x определяется следующей формулой:

$$x = \frac{D_{НС}}{D_{РРС}} \mu_{ИКС} \mu_{РРС} \quad (1)$$

где $D_{НС}$ – наружный диаметр трубы после непрерывного оправочного стана, в мм;

$D_{РРС}$ – наружный диаметр трубы после редуционно-растяжного стана, в мм;

$\mu_{ИКС}$, $\mu_{РРС}$ – коэффициенты вытяжки в извлекательно-калибровочном стане и редуционно-растяжном стане соответственно.

Данная зависимость получена для диаметров готовых труб от 73 до 273 мм и толщин стенок от 5 до 25 мм и позволяет с коэффициентом достоверности $R^2=0,9693$ рассчитать длину концевой обрезки для любой трубы из данного сортамента.

Формула для расчёта суммарной величины концевой обрезки труб имеет следующим вид:

$$L_{об} = 0,0214 \left(\frac{D_{HC}}{D_{PPC}} \mu_{ИКС} \mu_{PPC} \right)^2 + 0,0297 \frac{D_{HC}}{D_{PPC}} \mu_{ИКС} \mu_{PPC} + 0,3935 \quad (2)$$

Результаты, полученные по данной зависимости, согласуются с рекомендациями А.А. Шевченко, приведенными в работе [34]: При небольших натяжениях и деформациях длина отрезаемых концов равна 200-300 мм. То есть при небольших обжатиях по диаметру (что характерно при получении труб больших диаметров из сортаментного ряда) величина суммарной обрезки стремится к величине 400-600 мм.

В работах [2, 36] были разработаны новые калибровки валков для трёхвалковых станков FQM и PQF, которые повлияли на уменьшение неравномерности деформаций при прокатке и обеспечили более равномерным истечение металла в продольном направлении. Использование новых калибров в промышленных условиях, также позволило уменьшить величину концевой обрезки.

Из данных работ можно сделать вывод, что на концевую обрезку можно влиять путем разработки новой калибровки с более равномерной деформацией по клетям. Однако при разработке данной калибровки, нужно не забывать и о других параметрах, таких как точность труб, разностенность и т.д.

В основном вопросы касающиеся концевой обрезки решают на редуционных станках. Но даже там вопрос не изучен в полной мере, так как большинство аналитических исследований выполнены для установившейся стадии редуцирования. Другим фактором, повлиявшим на малую освещенность этого

вопроса, является зависимость длины утолщенных концов от конструкции и состояния самого стана [35].

Однако большинство авторов сходятся во мнении, что наибольшее влияние оказывают величины межклетевых натяжений и расстояние между клетями. Таким образом, известные зависимости для определения длины утолщенных концов носят полуэмпирический характер и достоверно описывают только конкретный стан [35].

1.5 Выводы и постановка задач исследования

На основании обзора научно-технической информации следует отметить следующее:

- процесс раскатки в НРС является одним из определяющих с точки зрения формирования длины отрезаемых концов труб, который в значительной мере определяет экономические показатели ТПА;

- в настоящее время трёхвалковые НРС удерживаемой оправкой типа (PQF, FQM) для раскатки полых заготовок (гильз) получают широкое применение как в России так и за рубежом;

- вопрос об уменьшении длины некондиционных концов в основном решают уже непосредственно на редуцированных станах;

- усовершенствование калибров на НРС является одним из решений при помощи которого мы можем влиять на концевую обрезь.

С учётом постоянного ужесточением конкуренции на рынке трубной промышленности, требования по экономическим показателям, предъявляемым к бесшовным трубам, исследование новой технологии прокатки и её рациональная корректировка, с целью снижения РКМ являются актуальными в настоящее время.

Целью работы является минимизация длины утолщенных концов труб за счет исследований

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

- провести анализ технологий и особенностей процесса раскатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах продольной прокатки на основе обзора научно-технической информации;
- определить факторы, влияющие на концевую обрезь труб;
- провести в лабораторных условиях экспериментальные исследования, для анализа концевой обреза;
- провести компьютерное моделирование раскатки труб, с целью оценки влияния НДС на концевую обрезь;
- разработать новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие уменьшение расходного коэффициента металла.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЛИБРОВ, ОБРАЗОВАННЫХ РАЗНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ВАЛКОВ

2.1 Постановка задачи физического моделирования

Для разработки технических решений направленных на уменьшение концевой обрезки на НРС, целесообразно провести экспериментальное исследование процесса раскатки труб, для определения влияния определенных факторов на концевую обрезку.

Из литературного обзора выяснилось, что наиболее существенными характеристиками влияющими на концевую обрезку в НРС могут являться степень обжатия по толщине стенки и отношение D_1/S_1 .

Таким образом, можно выделить следующие основные задачи экспериментального исследования:

1. Сравнение результатов при использовании 2-х и 3-х валковой калибровки.
2. Получение зависимости длины концевой обрезки от определяющих параметров.

Сравнение калибров, образованных разным количеством валков на основании экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, позволит определить применение каких клетей в большей степени способствует получению труб с наименьшей концевой обрезью.

2.2 Оборудование для экспериментального исследования

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стане установленном в ОАО «РосНИТИ» (рисунок 8).

Стан представляет собой классическую конструкцию со станиной закрытого типа, со стационарным нижним валковым узлом и перемещаемым в вертикальном направлении верхним валковым узлом.



а)



б)

Рисунок 8 – Общий вид экспериментальной установки: а) с 3-х валковой системой калибров; б) с 2-х валковой системой калибров

При прокатке патрубков на лабораторном стане целесообразно использовать сурьмянистый свинец, так как он является подходящим модельным материалом для исследования процессов горячей деформации [37] и исключает влияние фактора неравномерного распределения температуры по телу образца на результат эксперимента.

Геометрические параметры образцов представлены на рисунке 9.

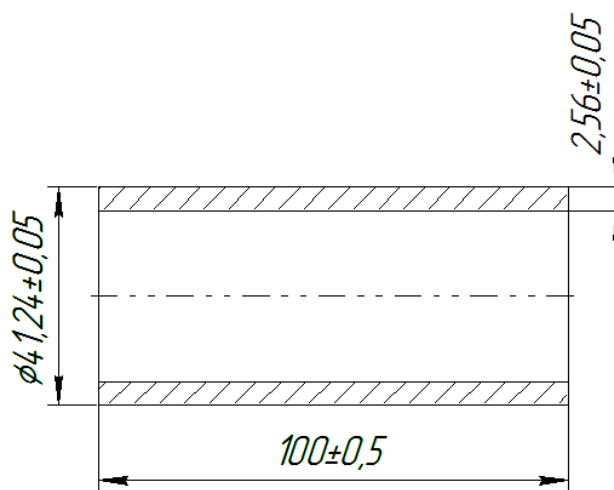


Рисунок 9 – Геометрические параметры исходной заготовки (гильзы)

Прокатка образцов в калибрах осуществлялась на плавающих оправках диаметром 31,8 и 33,3 мм (рисунок 10) с частотой вращения валков 5,0 об/мин.

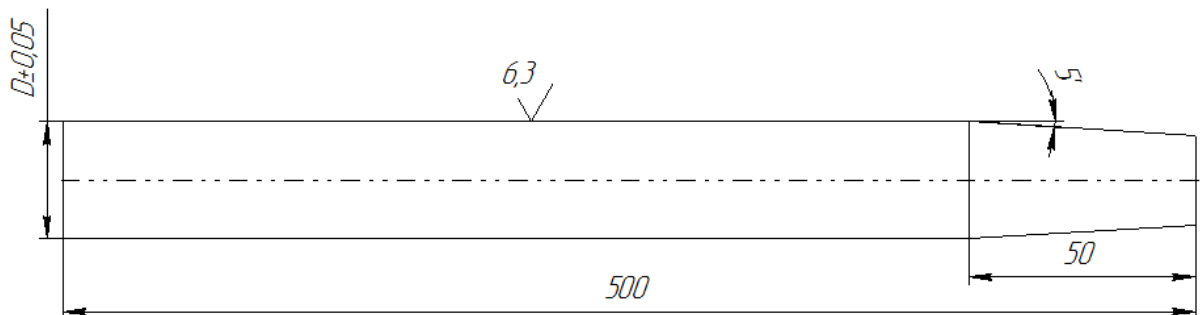


Рисунок 10 – Геометрические параметры оправки

Свинцовые патрубки получены путем расплавления свинцового лома с последующей разливкой в специальную форму (рисунок 11). Под необходимый размер литые заготовки обтачивались и растачивались на токарном станке.



Рисунок 11– Сплошная и полая заготовки

Экспериментальные исследования проводились при прокатке образцов на цилиндрической оправке с использованием 2-х и 3-х валковых калибров. По результатам эксперимента осуществлялась качественная и количественная оценка параметров формоизменения.

2.3 План проведения эксперимента

Прокатка полых заготовок осуществлялась с 6-кратным повторением опытов. Для эксперимента подготовлено 22 полые заготовки с геометрическими параметрами, приведенными на рисунке 9.

Эксперимент состоял из 4 этапов:

- 1) Прокатка в двухвалковом калибре с обжатием 38,67 %;
- 2) Прокатка в двухвалковом калибре калибров с обжатием 9,38 %;
- 3) Прокатка в трехвалковом калибре с обжатием 38,67 %;
- 4) Прокатка в трехвалковом калибре с обжатием 9,38 %.

Параметры калибровки валков и оправки с использованием различных систем калибров приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры рабочего инструмента

Количество валков	2		3	
Шифр калибра	СЛ120		К300	
Диаметр оправки, мм	33,3	31,8	33,3	31,8
Овальность калибра	1,04	1,04	1,09	1,09

Данные параметры обеспечивают при диаметре оправки 33,3 мм – обжатие по толщине стенки 38,67 %, при диаметре оправки 31,8 мм – 9,38 %.

2.4 Результаты эксперимента

Для проведения экспериментального исследования в качестве изменяемых факторов были выбраны: степень обжатия по толщине стенки и количество валков, образующих калибр.

После прокатки на готовом образце измерялись длины некондиционных передние концы и задние концы раската (рисунок 12,13).



Рисунок 12 – Форма готового раската

2-х валковая система калибров.
Степень обжатия 38,67 %

3-х валковая система калибров.
Степень обжатия 38,67 %

2-х валковая система калибров.
Степень обжатия 9,38 %

3-х валковая система калибров.
Степень обжатия 9,38 %



Рисунок 13 – Заготовки после прокатки

Для более точных измерений образцы фотографировались и загружались в программный комплекс КОМПАС-3D (рисунок 14). В программе фотография масштабировалась под нужный размер.

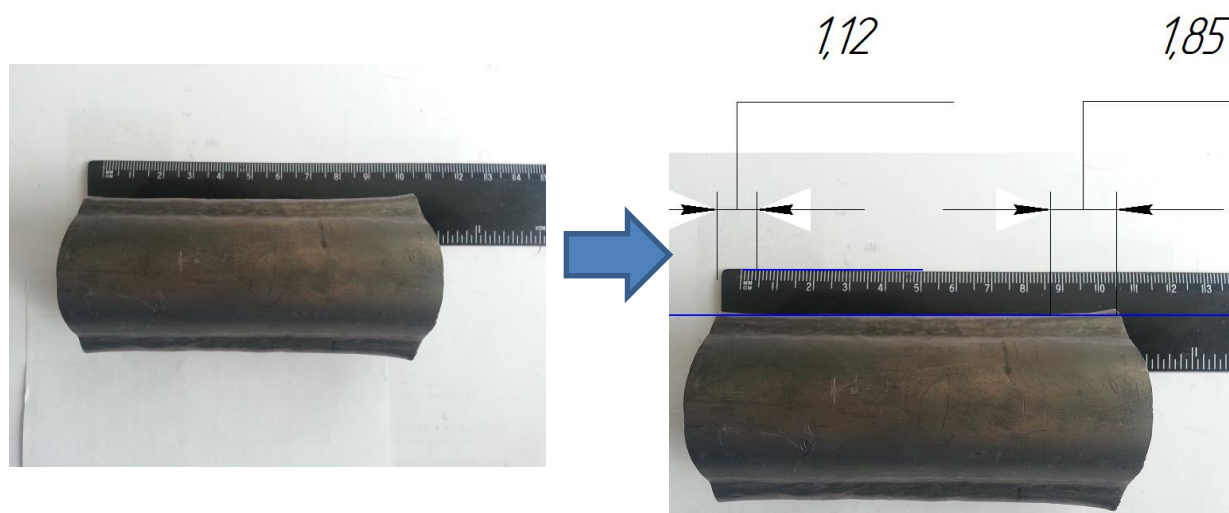


Рисунок 14 – Схема измерений величины концевой обрезки

В таблице 5 приведены результаты измерений после проведения эксперимента.

Таблица 5 – Результаты измерений после раскатки

№ Опыта	D _{опр} , мм	Кол-во валков	D ₀ , мм	S ₀ , мм	D ₁ , мм	S ₁ , мм	λ	ПК, мм	ЗК, мм	ε , %
1	31,80	2	41,24	2,56	36,71	2,39	1,21	11,2	18,5	9,38
2	31,80	2	41,24	2,56	36,69	2,38	1,21	10,8	16,7	9,38
3	31,80	2	41,24	2,56	36,68	2,36	1,22	11,3	15,8	9,38
4	31,80	2	41,24	2,56	36,67	2,39	1,21	10,9	18,7	9,38
5	31,80	2	41,24	2,56	36,80	2,39	1,20	10,8	15,3	9,38
6	31,80	2	41,24	2,56	36,70	2,35	1,23	11,9	15,7	9,38
Сред. знач., мм								11,15	16,78	
7	33,30	2	41,24	2,56	36,87	1,67	1,68	8,9	29,2	38,67
8	33,30	2	41,24	2,56	36,82	1,61	1,75	11,4	32,2	38,67
9	33,30	2	41,24	2,56	36,80	1,70	1,66	10,5	31,3	38,67
10	33,30	2	41,24	2,56	36,81	1,63	1,73	13,0	28,6	38,67
11	33,30	2	41,24	2,56	36,80	1,69	1,67	11,8	21,9	38,67
12	33,30	2	41,24	2,56	36,81	1,73	1,63	12,5	22,0	38,67
Сред. знач., мм								11,35	27,53	

Продолжение таблицы 5

13	31,8	3	41,24	2,56	36,8	2,2	1,30	7,0	12,1	9,38
14	31,8	3	41,24	2,56	36,3	2,22	1,31	7,9	13,5	9,38
15	31,8	3	41,24	2,56	36,5	2,18	1,32	8,8	12,7	9,38
16	31,8	3	41,24	2,56	36,8	2,2	1,30	7,7	11,7	9,38
17	31,8	3	41,24	2,56	36,6	2,19	1,31	7,4	13,0	9,38
Сред. знач., мм								7,76	12,6	
18	33,3	3	41,24	2,56	35,9	1,58	1,83	9,3	17,9	38,67
19	33,3	3	41,24	2,56	36,14	1,51	1,89	9,3	16,9	38,67
20	33,3	3	41,24	2,56	36,5	1,5	1,89	9,4	15,7	38,67
21	33,3	3	41,24	2,56	36,8	1,53	1,83	8,5	12,7	38,67
22	33,3	3	41,24	2,56	36,6	1,52	1,86	9,6	17,4	38,67
Сред. знач., мм								9,22	16,12	

На рисунках 15, 16 для визуализации представлены графики измерений переднего и заднего некондиционного конца для 2-х и 3-х валковых системы калибров.

Из рисунков видно, что более значимое влияние исследованные факторы оказывают на задний конец.

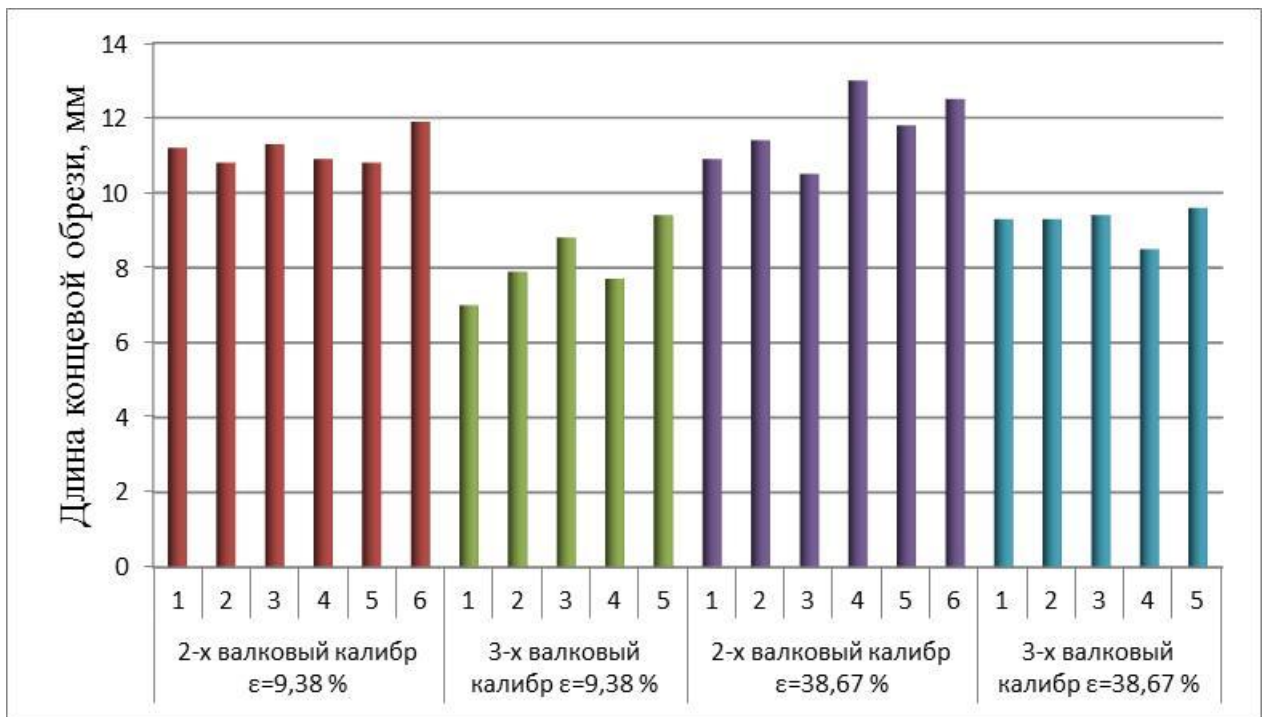


Рисунок 15 – Результаты измерений ПК

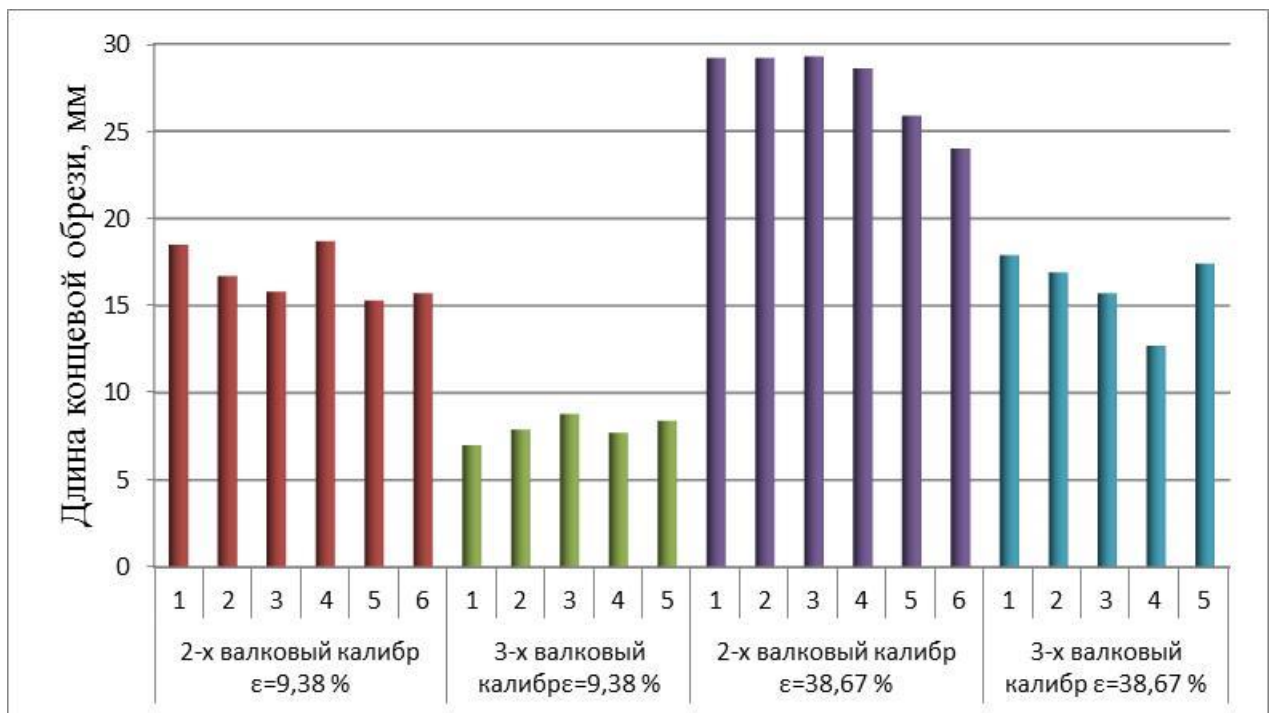


Рисунок 16 – Результаты измерений ЗК

Для анализа зависимости количества валков образующих калибр и степени обжата, в первом приближении был принят линейный вид регрессионной функции. Параметры данной функции оценивались методом наименьших квадратов (МНК) в среде Microsoft Office Excel.

Значения весовых коэффициентов регрессионной функции, имеющей линейный вид, приведены в таблице 6.

Знак «-» перед коэффициентом указывает на убывающее действие данного параметра на выходные данные процесса, знак «+» указывает на возрастающее действие.

Таблица 6 – Значения коэффициентов регрессионной функции

№	Обозначение	Влияющий параметр	Значение коэффициента
1	x_1	Отношение D_1/S_1	0,751
2	x_2	Количество валков	3,032
3	x_3	Коэффициент вытяжки	-14,02

После нахождения коэффициентов регрессионной функции линейного вида, было получено соответствующее уравнение для длины концевой обреза.

$$L = 5,04 + 0,751 \cdot \frac{D_1}{S_1} + 3,032 \cdot N - 14,0229 \cdot \mu, \quad (3)$$

где $\frac{D_1}{S_1}$ – отношение конечного диаметра и конечной стенки трубы;

N – количество валков;

μ – коэффициент вытяжки.

Так же с помощью полученных значений длин некондиционных концов, можно получить графическую интерпритацию концевой обрезки от степени обжарки и D/S (рисунки 17-18)

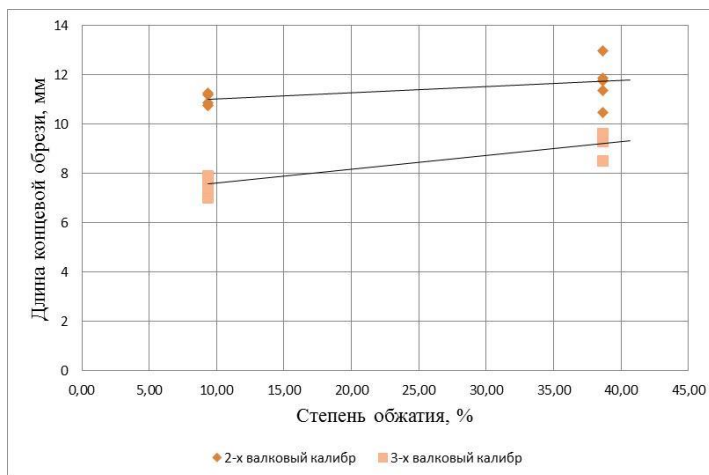


Рисунок 17 – Изменение длины концевой обрезки от степени обжарки для переднего некондиционного конца

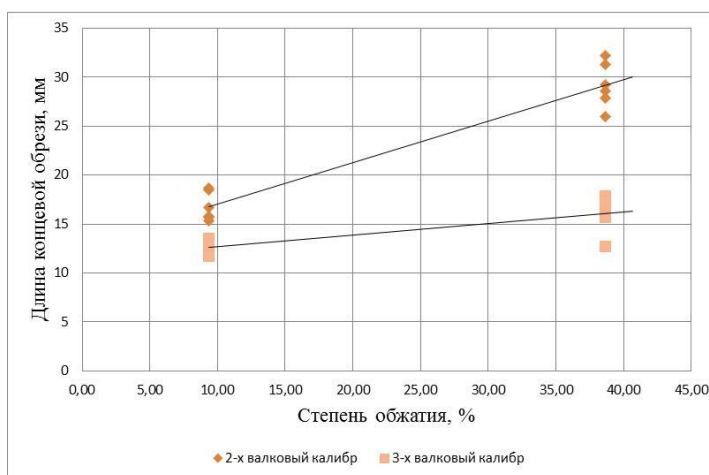


Рисунок 18 – Изменение длины концевой обрезки от степени обжарки для переднего некондиционного конца

2.5 Выводы по главе

Исследование характера формоизменения трубы при прокатке на основе физического моделирования, с использованием систем калибров, имеющих двух и трехвалковые калибры с практически идентичными параметрами, позволяющие получить одинаковые параметры готовой трубы, позволило сделать следующие выводы:

1. Определенно, что использование 3-х валков образующих калибр позволяет снизить в 1,5 раза суммарную концевую обрезь в отличие от 2-х валков.
2. Получены зависимости влияния различных параметров характеристик процесса на величину концевой обреза.

3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ

3.1 Задачи компьютерного моделирования

Современные непрерывные трубопрокатные станы представляют собой сложные, дорогостоящие электромеханические системы.

Поэтому с целью каких-либо исследований, либо модернизации технологии целесообразно выполнить исследования процессов, протекающих при непрерывной раскатке гильз на оправке, с помощью компьютерного моделирования.

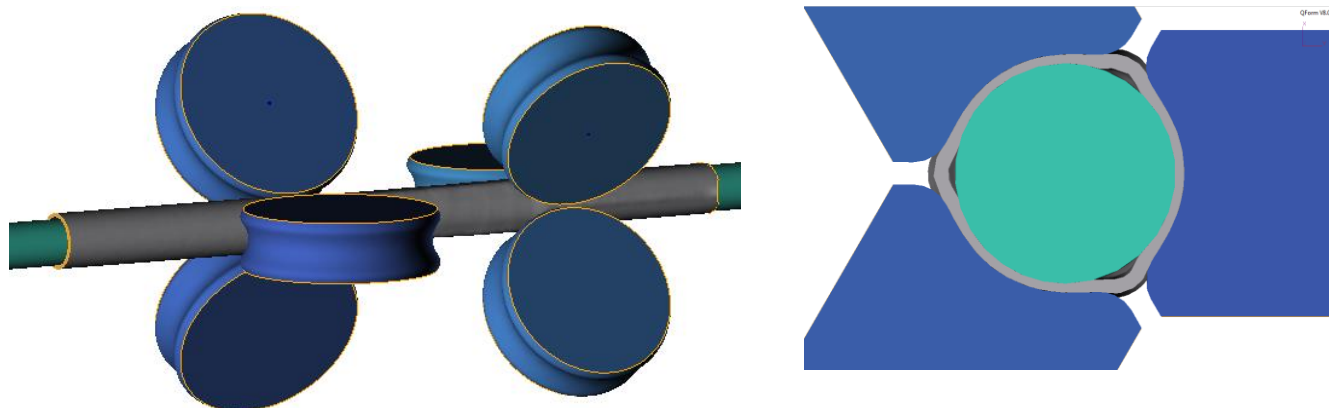
С целью исследования процесса раскатки гильз на непрерывном стане с 2-х и 3-х валковой калибровкой и предсказания возможности уменьшения длины некондиционных концов поставлены следующие задачи:

- сравнить данные, полученные при экспериментальном исследовании при прокатке в 3-х валковой клетки;
- определение характера изменения напряженно деформированного состояния профиля металла при деформации в клетях с 2-х и 3-х валковой системой калибров;
- выявление участков по длине стана с наиболее неблагоприятными условиями деформирования, которые влияют на концевую обрезь труб.

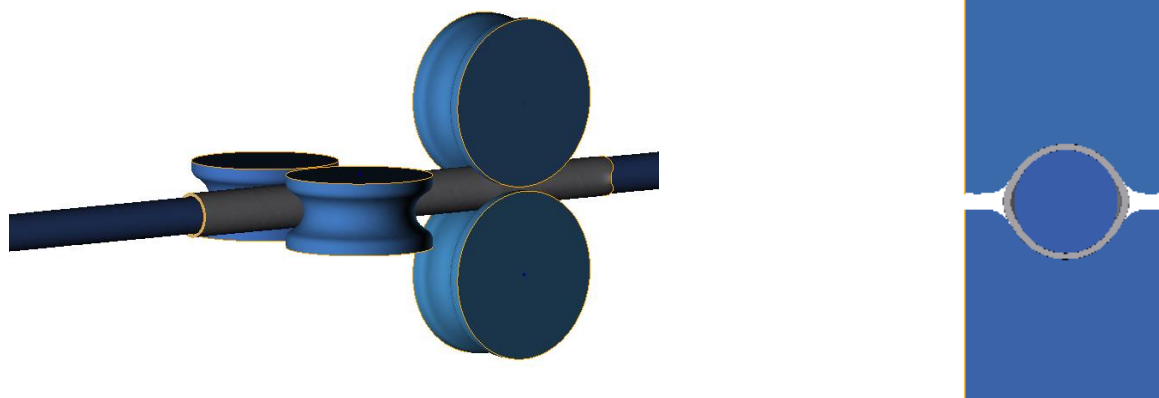
3.2 Компьютерное моделирование процесса раскатки гильз на 2-х и 3-х валковой системе калибров

По результатам эксперимента было выявлено что на длину концевой обрезки влияет степень обжатия и количество валков образующих калибр. Для проверки данного утверждения проведем компьютерное моделирование процесса прокатки труб в двух клетях для калибров образованных 2-мя и 3-мя валками (рисунок 19).

Данный анализ выполнен с использованием лицензионного программного продукта «QForm 3D», реализующего алгоритм на основе метода конечных элементов.



а)



б)

Рисунок 19 – 3D модели раскатки гильзы и поперечное сечение очага деформации первой клетки: а) трёхвалковые калибры; б) двухвалковые калибры

В качестве оценки напряжений, возникающих в процессе раскатки гильз в 2-х и 3-х валковых НРС, использованы показатели НДС, рассчитываемые в конечно-элементной компьютерной программе QForm-3D:

Показатель σ/τ (НДС), вычисляемый по формуле:

$$k = \frac{\sigma}{\tau}, \quad (4)$$

где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение, МПа;

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \text{ – интенсивность касательных напряжений,}$$

МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа.

Моделирование технологии прокатки труб с использованием 3-х валкового и 2-х валкового стана в среде QForm (таблица 7).

В модели были приняты следующие допущения:

- коэффициент трения между валками и заготовкой: 0,6 по закону Зибеля;
- коэффициент трения между оправкой и заготовкой: 0,1 по закону Зибеля;
- материал и температура инструмента: 40Х, абсолютно жесткий; 150°С;
- начальная температура заготовки: 1200°С.

Таблица 7– Исходные данные для моделирования

Исходные данные			
Количество валков		2	3
Название	Обозначение	Величина	
Диаметр гильзы, мм	D_g , мм	222	222
Толщина стенки гильзы, мм	S_g , мм	16,22	16,22
Температура гильзы, °С	T , С°	1200	1200
Диаметр оправки, мм	D_o , мм	179,55	179,55
Скорость удержания оправки, мм/с	V_o , мм/с	600	600
Расстояние между первой и второй клетью стана	G1-G2	1050	1050
Марка стали	Сталь 20		

Обработка результатов моделирования осуществлялась с использованием трассирующих точек (рисунки 20, 21) по которым регистрировались максимальные значения показателей НДС. Трассирующая точка №1 соответствует вершине калибра для первой клетки, но во второй эта точка в выпуске калибра.

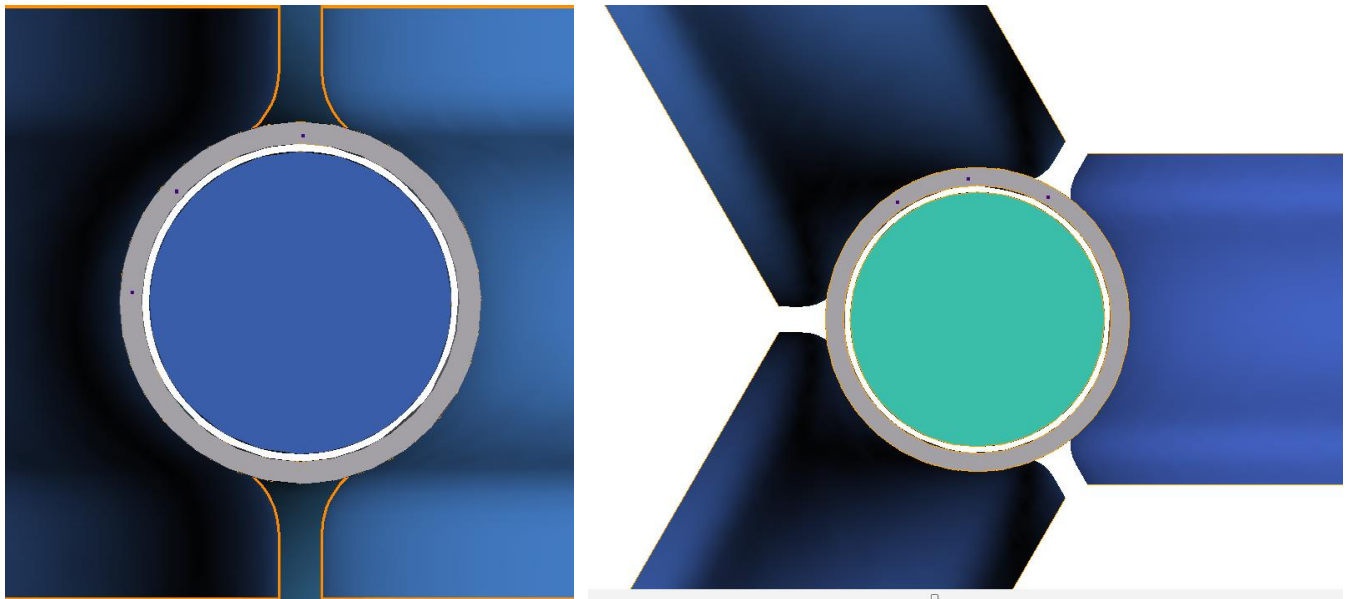


Рисунок 20 – Схема поперечного расположения точек: а) в двухвалковой системе калибров; б) в трёхвалковой системе калибров

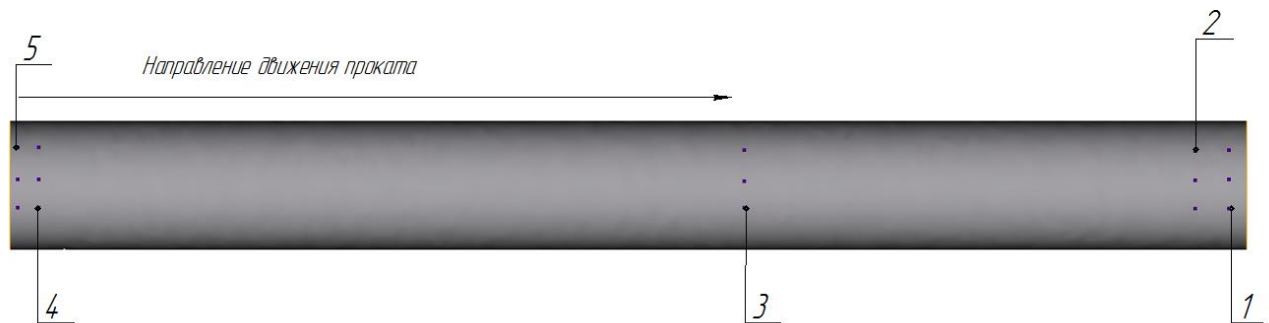


Рисунок 21 – Схема продольного расположения точек

Номерами отмечены зоны, в которых будут рассмотрены степень деформации и напряжения. Зоны 1-2 для переднего конца трубы, зона 3 – для середины трубы, зона 4–5 для заднего конца трубы.

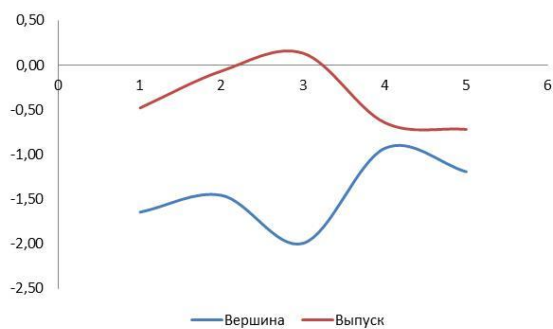
В экспериментальном исследовании было показано, что наиболее благоприятным с точки зрения РКМ, за счет механического формоизменения концов, является 3-х валковая система калибров в НРС.

С целью исследования процесса раскатки гильз на непрерывном стане и исследования параметров для уменьшения концевой обрезки:

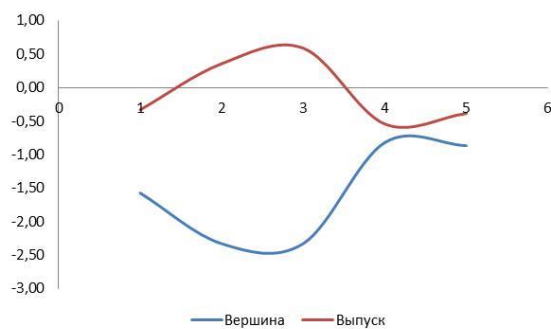
- определение характера изменения напряженного состояния по длине трубы профиля металла при деформации в клетях стана;

- определение длины концевой обрезки.

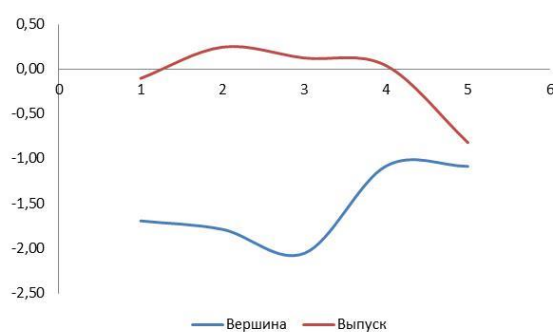
На рисунке 22 представлены графики изменения показателя НДС по различным зонам участка трубы, представленных выше (рисунки 20,21). Как видно из рисунка 22, показатель напряженного состояния в обеих моделях имеют практически одинаковую динамику. Как уже отмечалось ранее, концевая обрезка образуется из-за неравномерности деформации середины и концов труб. Поэтому для того, чтобы минимизировать длину концевой обрезки, нам нужно иметь одинаковые или близкие значения напряжений на концах и середине трубы. Наиболее благоприятное в этом плане имеет 3-х валковый калибр.



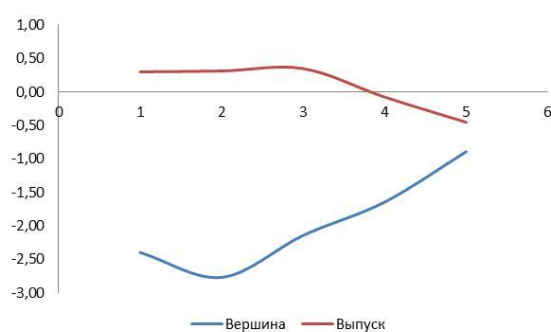
а)



б)



в)



г)

Рисунок 22 – Показатель $\frac{\sigma}{\tau}$ в вершине и выпуске калибра по участкам продольного сечения трубы при раскатке гильз при: (а) – 1 клеть 2-х валковой системе калибров; (б) – 2 клеть 2-х валковой системе калибров; (в) – 1 клеть 3-х валковой системе калибров; (г) – 2 клеть 3-х валковой системе калибров.

Минимальная длина концевой обреза будет наблюдаться при показателе. Показатель $\frac{\sigma}{\tau}$ в виде прямой линии с минимальными отклонениями показателя $\frac{\sigma}{\tau}$ середины трубы от концов. Данную зависимость можно достичь путем разработок новых калибровок, либо уменьшением или увеличением зазора между валками, иначе говоря управлениями степени деформации по клетям.

4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УМЕНЬШЕНИЕ КОНЦЕВОЙ ОБРЕЗИ ТРУБ

Результаты теоретического, компьютерного и физического исследования процесса продольной прокатки труб в клетях раскатных станов позволили выявить факторы, влияющие на концевую обрезь.

Полученные результаты показали, что наиболее значимыми факторами, определяющими повышенную концевую обрезь, являются: отношение наружного диаметра к толщине стенки и коэффициенты вытяжки по клетям стана.

Полученные результаты позволили разработать мероприятия, направленные на снижение величины концевой обреза труб.

Длина некондиционных концов труб во многом зависит также от конструкции стана. Но так как исследование проводилось для конкретного ТПА и конструкцию стана нельзя поменять. Поэтому решением видится разработка новых режимов обжатий за счет разработок новых систем калибров, нацеленных на снижение концевой обреза, но в то же время обеспечивающих должное качество производимой продукции.

4.1 Разработка системы калибров

С целью обеспечения минимизации длины концевой обреза раскатываемых труб на стане, разработаем новую систему калибров для прокатки труб 325×8 мм.

На основании результатов физического моделирования можем определить условия при которых деформация раската будет давать минимальную длину концевой обреза, с помощью формулы (3).

Для действующей калибровки применяется штатная гильза наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм.

На рисунке 23 и в таблице 8 представлены действующие параметры калибровки.

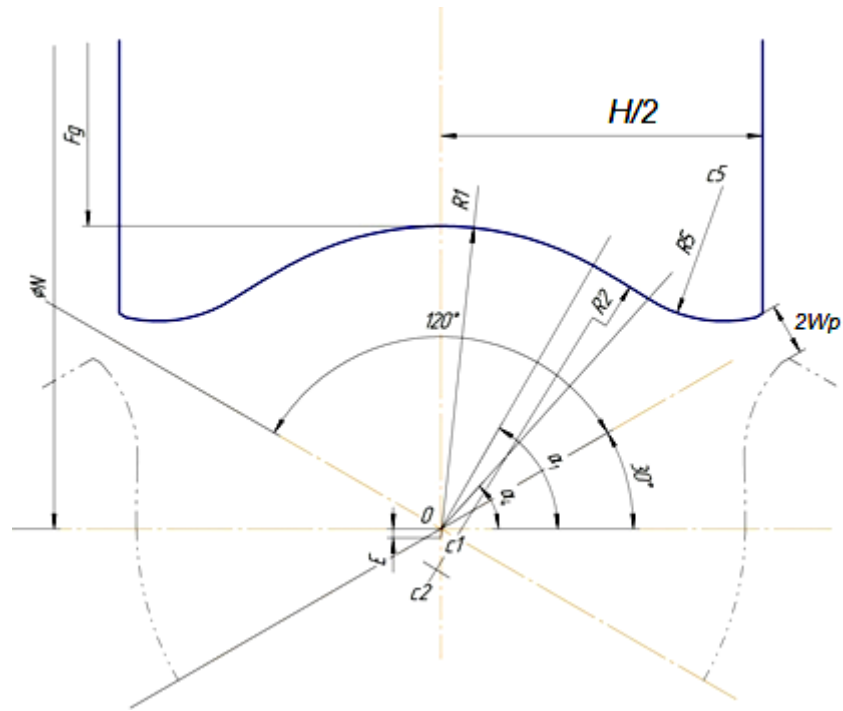


Рисунок 23 – Схема калибровки валков

Таблица 8 – Параметры действующей калибровки

№ клетки	R ₁	R ₂	R ₅	X _{c1}	X _{c2}	X _{c5}	Y _{c1}	Y _{c2}	Y _{c5}
1	204	612	90	0	-198,8	184,56	-6	-362,3	225,791
2	198,6	595	53	0	-195,9	178,58	-3	-348,475	181,272
3	192,6	577,8	48	0	-192,6	176,21	0	-333,593	171,974
4	192	480	27	0	-144	178,58	0	-249,41	144,536
5	192	480	27	0	-144	184,56	0	-249,41	144,536

С помощью специальной программы в ОАО «РосНИТИ» рассчитаем основные необходимые параметры для разработки новой калибровки. Определим коэффициенты вытяжки (рисунок 24) и параметры D_1/S_1 .

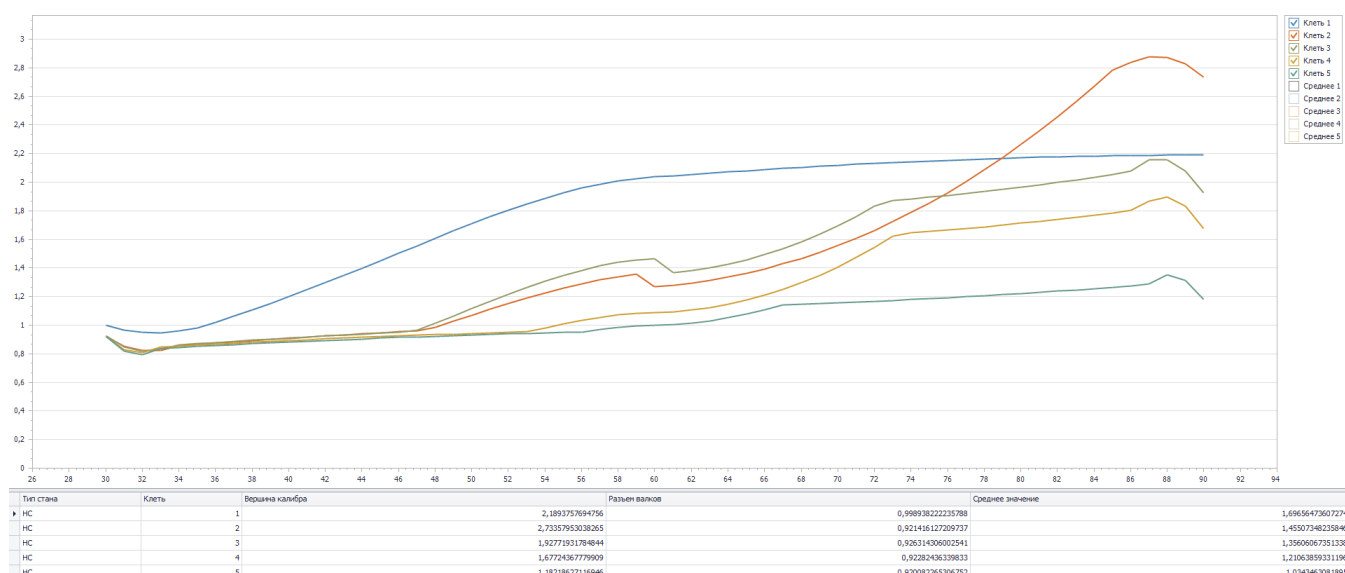


Рисунок 24 – Скриншот из программы «ТРА-тех» при расчете коэффициента
ВЫТЯЖКИ

Данная программа считает коэффициенты вытяжки в вершине калибра, в выпуске и рассчитывает средние коэффициенты, поэтому, исходя из логических суждений, ориентируемся на средние коэффициенты.

Результаты изменения коэффициента вытяжки при прокатке труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм с использованием действующей калибровки представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Коэффициенты вытяжки при действующей калибровке

№ Клет	Коэффициент вытяжки
1	1,69
2	1,45
3	1,35
4	1,21
5	1,03
Сумма	4,12

Для определения геометрических параметров валков, образующих калибр для СК 344 мм стана FQM, в первом приближении, с использованием САД-системы твердотельного моделирования Компас-3D, проведено масштабирование параметров калибровки валков СК 384 мм. Результаты показаны на рисунке 25.

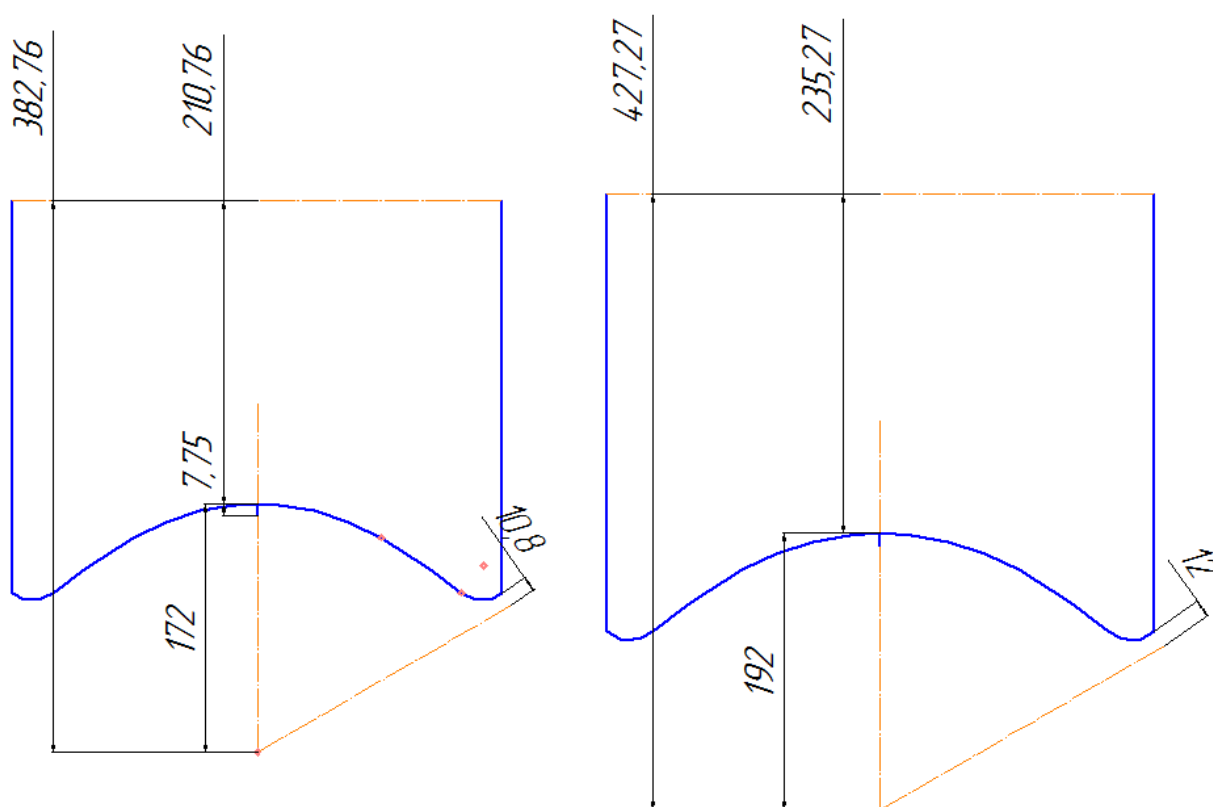


Рисунок 25 – Калибр последней клетки стана для СК 344 и СК 384

На следующем этапе проведено сопоставление коэффициентов вытяжек и режимов обжатий по клетям стана при условии получения трубной заготовки наружным диаметром 384 мм с толщиной стенки 8,0 мм (СК 384 мм), наружным диаметром 344 мм с толщиной стенки 8,0 мм (СК 344 мм). Для СК 384 мм применена штатная гильза наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм и оправка диаметром 368.

Для СК 344 мм, согласно проектным требованиям нужно применить оправку диаметром 328,5 мм и гильзу наружным диаметром 395 мм с толщиной стенки 25,0 мм.

Результаты изменения коэффициента вытяжки и относительного обжатия по клетям стана при прокатке труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм с использованием СК 384 мм, СК 344 мм представлены в таблице 10 и на рисунке 26.

Таблица 10 – Режимы деформации по клетям стана

№ Клетей	СК 384	СК 344
	Коэффициент вытяжки	Коэффициент вытяжки
1	1,585	1,50
2	1,366	1,36
3	1,326	1,30
4	1,172	1,16
5	1,036	1,02

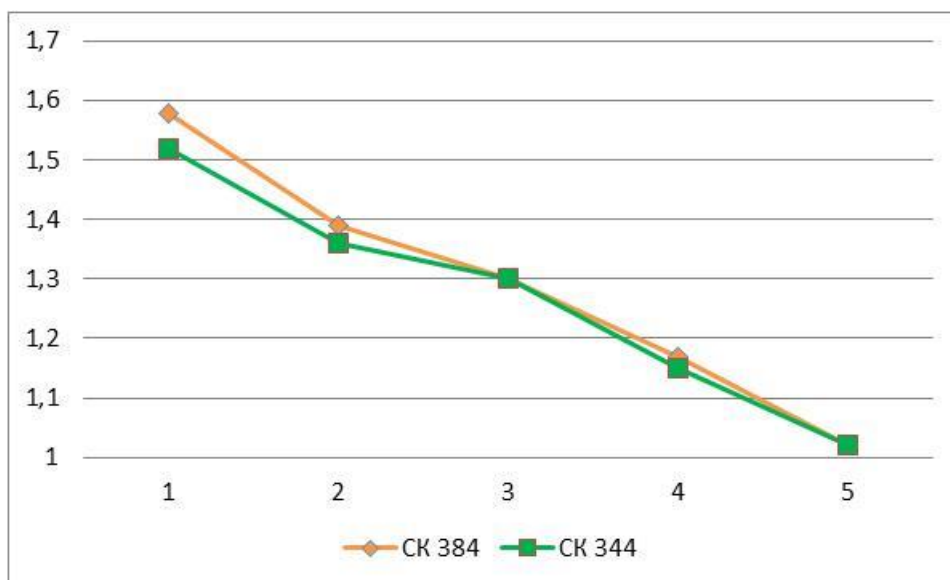


Рисунок 26 – Распределение коэффициента вытяжки по клетям стана

На основании полученных результатов, следует:

1) при прокатке труб с использованием СК 344 мм значение коэффициента вытяжки по клетям стана ниже, чем в СК 384 мм, что в свою очередь способствует:

- снижению вероятности образования дефектов поверхности;
- повышению точности раскатываемых труб за счет снижения неравномерности деформации по периметру поперечного сечения раската;
- возможности освоения новой технологии прокатки труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 7,0 мм.

2) при прокатке труб с использованием СК 344 мм значение коэффициента вытяжки в первой клетке стана ниже, чем в СК 384 мм. В свою очередь, это оказывает благоприятное воздействие с точки зрения улучшений условий захвата металла валками в первой клетке стана и способствует снижению неравномерности деформации по периметру поперечного сечения раската.

3) при прокатке труб с использованием СК 344 мм образуется меньшая концевая обрезь труб (рисунок 27).

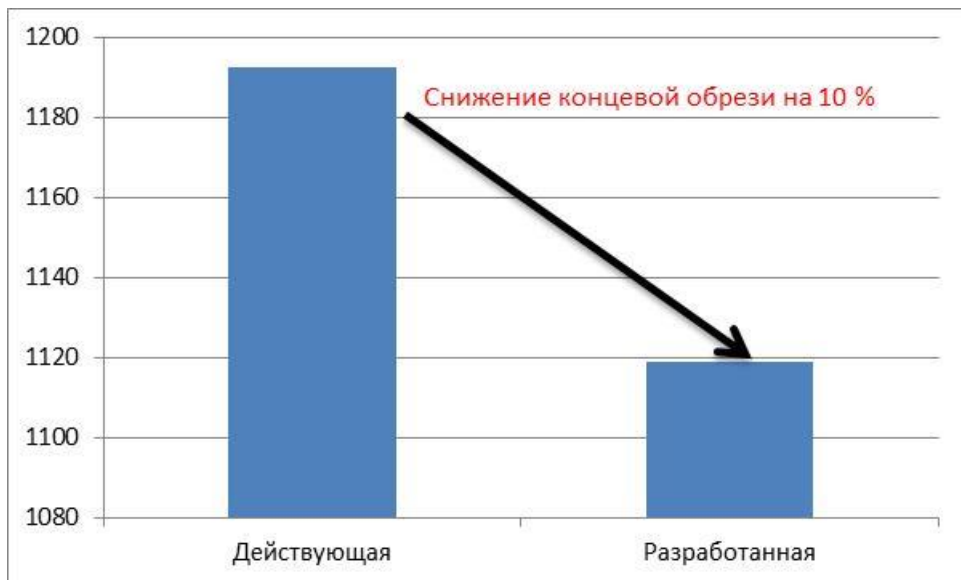


Рисунок 27 – Влияние параметров калибровки на концевую обрезь

Сравнение калибровок СК 384 и СК 344 по энергосиловым параметрам произведем с помощью программы «ТРА-тех».

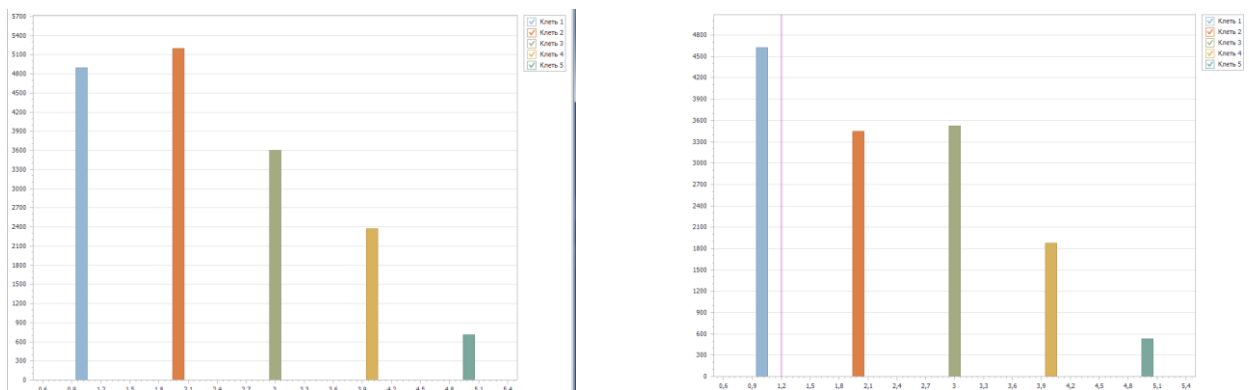


Рисунок 28 – Усилие на валки по клетям

Из рисунка 28 следует, что при прокатке в СК 344 ожидается снижение усилия на валки.

4.2 Моделирование технологии процесса прокатки труб с использованием действующей и разработанной калибровки

С целью исследования процесса деформации раската по клетям стана с использованием СК 344 и СК 384.

В модели были приняты следующие параметры:

- коэффициент трения на контакте валок-раскат: 0,4 по закону Зибеля;
- коэффициент трения на контакте раскат-оправка: 0,1 по закону Зибеля;
- коэффициент теплопередачи между инструментом и заготовкой: 30 кВт/м²К;
- скорость удержания оправки стана: 915 мм/с;
- начальная температура гильзы: 1150 °С;
- геометрические параметры гильзы ($D \times S$): для действующей – $\varnothing 433 \times 26,9$ мм; для разработанной – $\varnothing 385 \times 24$ мм.

По завершению компьютерного моделирования для каждой исследуемой СК осуществляется:

1. Определение напряжённого состояния раската по клетям стана с использованием трассирующих точек, соответствующих вершине и выпуску калибра, по которым регистрируются максимальные значения показателей:

- средних напряжений (σ) и интенсивности касательных напряжений (T);
- напряженного состояния раската, равного отношению средних напряжений к интенсивности касательных напряжений (σ/T);

2. Определение усилия на инструмент (валки, оправка) и угла охвата оправки на выходе из очага деформации после каждой клетки стана.

Анализ напряжённого состояния раската по клетям стана осуществлён с использованием трассирующих точек, соответствующих вершине и выпуску калибра по которым регистрировались значения средних напряжений, интенсивности касательных напряжений и показателя σ/T .

На рисунке 29 представлены графики изменения показателя напряжённого состояния σ/T по клетям стана при раскатке труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм с использованием СК 384 и СК 344.

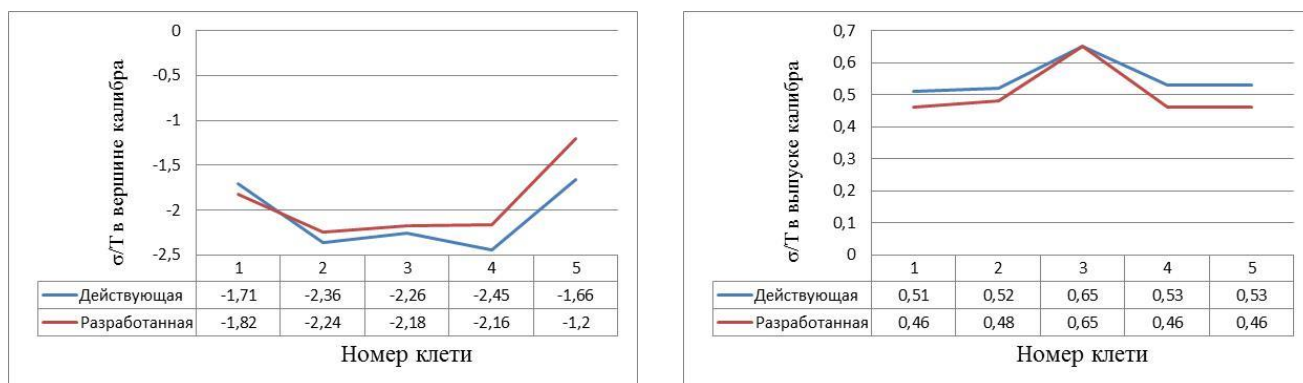


Рисунок 29 – Изменение показателя σ/T по клетям:

а – вершине калибра; б – в выпуске калибра

На основании результатов, приведенных на рисунке 29 установлено, что использование новой калибровки валков в клетях способствует снижению напряженного состояния раската как по вершине, так и по выпуску калибра.

Усилие на валки при деформации раската по клетям стана определено с использованием приложения QForm. Результаты представлены на рисунке 30.

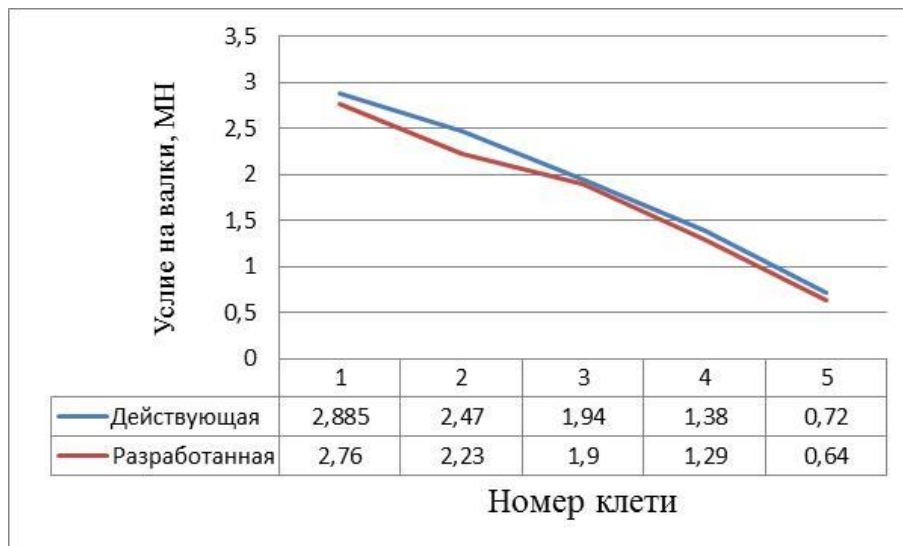


Рисунок 30 – Усилие на валки по клетям стана

На основе полученных результатов следует, что при прокате с использованием новой СК ожидается снижение усилия на валки по клетям стана.

4.3 Выводы по главе

1. Выполнен анализ влияния параметров гильзы, оправки и калибровки валков на величину концевой обреза.
2. Разработана калибровка валков для прокатки труб 325×8 мм, уменьшающая концевую обреза на 10 %.
3. Системы калибров проанализированы с помощью компьютерного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной магистерской диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Исследована база научно-технической литературы, показавшая, что данная тематика работы является актуальной на данный момент.

2. Вопросы, касающиеся уменьшения концевой обрезки, решают в основном на редуционных станах.

3. Установлена и численно отражена взаимосвязь между величиной обжатия калибров непрерывного раскатного стана с 3-х валковыми и 2-х валковыми клетями и длины концевой обрезки. Показано, что минимальная длина концевой обрезки, за непрерывным раскатным станом, получается при 3-х валковой калибровке.

4. Получена эмпирическая формула для расчета длины концевой обрезки, которая позволяет оценить влияние количества валков клетки, отношения D_1/S_1 и коэффициента вытяжки.

5. На основе исследований раскатки труб на НРС разработаны технические решения, способствующие уменьшению концевой обрезки труб, обеспечивающие уменьшение РКМ.

6. Разработана система калибров, которая позволила уменьшить длину концевой обрезки на 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Селецкий Э.Б. Совершенствование управления расходом металла в трубном производстве [Текст] / автореферат дис. Э.Б. Селецкий канд. экон. наук: 08.00.05; Урал. гос. техн. ун-т - УПИ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 25 с.
2. Шкуратов, Е. А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб [Текст] / дис. Е.А. Шкуратов канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 13.12.2017. – Ч., 2017 – 166 с.
3. Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов – М.: Издательство МГУПИ, 2012. – 370 с.
4. World Steel Tube Production – Forecast//ITA tube Journal //Журнал 2013 – 2016 г.
5. Выдрин, А.В. Новые решения для моделирования процессов горячей и холодной прокатки труб / А.В. Выдрин. Трубы. Украина 2007, Международная конференция «Современные направления производства сварных и бесшовных труб из черных и цветных металлов». С. 43 – 55.
6. Пышминцев, И.Ю. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И.Ю. Пышминцев, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко, А.Т. Кутепов, Д.В. Луценко, В.И. Чурбанов XVII международная конференция «Трубы – 2009» – Челябинск, 2009. – С. 147–150.
7. Выдрин, А.В. Моделирование технологических процессов в трубопрокатном производстве как способ повышения их эффективности / А.В. Выдрин, П.А. Мальцев, В.В. Широков, Д.В. Луценко, М.Д. Алютин, А.О. Малкова // Бюллетень «Черная металлургия». – М.: «Черметинформация», 2011. – №4. – С.69 – 72.

8. Дукмасов, В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 215 с.
9. Колмогоров, В.Л. Решение технологических задач ОМД на микро-ЭВМ / В.Л. Колмогоров, С.И. Паршаков, С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов и др. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
10. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
11. Provvedimento n.3622 (C2227) Fiatimpresit-Mannesmann Demag-Techint/Italimpianti// 15.02.1996г.// www.agcm.it
12. Современное состояние и перспективы развития способа производства труб на агрегатах с речным станом. Серия: «Трубное производство», Выпуск 3 - М.: Институт «Черметинформация»
13. Установки для производства бесшовных труб. Проспект SMSgroup. 2016 г.
14. DANIELI tube plants. DST-DWK. Заводы по производству труб. 2015г. Презентация.<http://www.amm.com/events/download.ashx/document/speaker/7563/a01D000000X0kA5MAJ/Presentation>
15. FQMTM: Danieli's 3-roll pass retained mandrel mill for high quality seamless tube production / E. Chernuschi // Danieli Centro Tube, Italy. – p.6. - www.danielicorp.com.
16. Стасовский Ю. Н., Степаненко А. Н., Угрюмов Ю. Д. Развитие процесса производства труб на агрегатах с речным станом.// Пластическая деформация металлов - Днепропетровск: Издательство «Акцент ПП», 2014г.
17. Provvedimento n.3622 (C2227) Fiatimpresit-Mannesmann Demag-Techint/Italimpianti// 15.02.1996г.// www.agcm.it
18. Потапов, И.Н. Теория трубного производства / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян – М.: Металлургия, 1991. – 424 с.

19. Романцев, Б.А. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
20. Красиков, А. В. Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок [Текст] / дис. А.В. Красиков канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 11.02.2015. – М., 2015 – 136 с.
21. Выдрин, А.В. Развитие технологий горячей прокатки бесшовных труб /А.В. Выдрин //Черные металлы. – 2012. - №9. – С. 16-20.
22. Ершов, Ю.Л. PQF/MPM – особенности проектирования непрерывного оправочного стана /Ю.Л. Ершов, Б.И. Тартаковский //Теория и практика металлургии. – 2009. - №5-6. – С. 3-14.
23. Столетний, М. Ф. Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.
24. Гуляев, Ю. Г. Повышение точности и качества труб / Ю. Г. Гуляев, М. З. Володарский, О. И. Лев, С. А. Михеев, Г. П. Кострижев, С. А. Чукмасов. – М.: Металлургия, 1992. – 283 с.
25. Выдрин, А.В. Моделирование поведения смазки в очаге деформации при обработке металлов давлением /А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, В.В. Ананян. /Сталь. – 2010. - №5. – С.100-102.
26. Jin, R. Development of MPM Tube Rolling Technology / R. Jin. – Baosteel Technology. – 2005. – p.10 – 14.
27. Zheng, Zh. Development of process technology of retained mandrel MPM / Zh. Zheng, Yu. Yekui. – Steel pipe. – 1999(10), Vol. 28, No. 5 – p. 1 – 6.
28. Zhou, X. Tube rolling technology analysis of MPM and PQF / Xiaofeng Zhou. – Research on Iron & Steel, 2008(6), Vol. 36, No.3. – p. 58 – 62.
29. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др.; Под ред. Г.И. Гуляева. - М.: Металлургия, 1975. - 264 с.

30. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Квитка Н.Ю. Теоретический анализ параметров непрерывной продольной безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом // Теория и практика металлургии. -2007. - №4-5. - С. 115-124.
31. FQMTM: Danieli's 3-roll pass retained mandrel mill for high quality seamless tube production / E. Chernuschi // Danieli Centro Tube, Italy. – p.6. - www.danielicorp.com.
32. Новая ресурсосберегающая технология непрерывной совмещенной прокатки труб и трубопрокатный стан нспп для ее осуществления. Сборник научных трудов: Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. Том 4, Москва 1994 г.
33. Черных, И.Н. Определение величины концевой обрезки труб, формирующейся в условиях ТПА с непрерывными станами типа PQF, FQM / И.Н. Черных, Д.О. Струин, Е.А. Шкуратов // Вестник ЮУрГУ 2014 г, том 14, № 4.
34. Шевченко, А.А. Непрерывная прокатка труб / А.А. Шевченко. – Харьков: Металлургия, 1954. – 268 с.
35. Храмов, Е.В. Повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования [Текст] / дис. Е.В. Храмов канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 06.09.2017. – Ч., 2017 – 168 с.
36. Струин, Д.О. Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений [Текст] / дис. Д.О. Струин канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 14.12.2016. – Ч., 2017 – 170 с.

37. Baines, K. Lead as a model material to simulate mandrel rolling of hot steel tube / K. Baines // Journal of Materials Processing Technology, 2001. – V. 118. – P. 422–428.
38. <http://cae.ustu.ru/cont/soft/qform.htm>
39. <http://arko-iris.com/node/28>
40. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / Колмогоров В.Л – М.: Издательство «Металлургия», 1970 – 229 с.
41. Грудев, А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов. – М.: Metallurgy, 1988, 240 с.
42. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. // А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. изд. – М: Metallurgy, 1982, С. 312.
43. Коновалов, Ю. В. Справочник прокатчика: в 2 кн. Кн. 1 Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.