

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

ЦЮЦЮРА ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПЛАСТИЧНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК И ИЗНОСА
ВАЛКОВ ПРИ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКЕ НА КАЧЕСТВО ТРУБ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Современное трубопрокатное производство базируется на непрерывнолитой заготовке (НЛЗ). Непрерывная разливка стали, по сравнению с разливкой в слитки и дальнейшей прокаткой, обеспечивает получение готовой металлопродукции с наименьшими затратами за счёт минимизации числа производственных операций при сохранении уровня качества продукции.

Прошивка заготовок в гильзу в горячем состоянии на стане винтовой прокатки (винтовая прошивка) является наиболее распространенной в трубопрокатном производстве, благодаря получению гильз большой длины и массы на высокопроизводительных прошивных станах. Однако эта операция формоизменения осуществляется в очаге деформации в условиях сложного напряженно-деформированного состояния с циклическим знакопеременным пластическим изгибом всех слоёв металла. Дефекты, которые получают на гильзах, при последующей пластической деформации на других станах трубопрокатного агрегата, как правило, не устраняются и остаются на готовых трубах, так как в наибольшей мере их появление обусловлено наружными пороками исходной заготовки. С одной стороны, металл для труб должен быть по возможности более дешевым, с другой – качество этого металла должно быть высоким, обеспечивающим минимальную отбраковку труб и высокий выход годного. В связи с этим, к исходным заготовкам предъявляются достаточно жесткие требования по технологической пластичности, зависящей от химического состава, макроструктуры, состояния наружной поверхности, центральной пористости, ликвации и др. Несмотря на такие ужесточения требований к НЛЗ, отбраковка труб по внутренним и наружным плёнам достигает нескольких процентов. Наряду с совершенствованием технологии непрерывной разливки и химического состава стали, оптимальным вектором повышения уровня качественных показателей труб является ведение процессов формоизменения металла при винтовой прошивке и раскатке при рациональных режимах с учётом износа инструмента и технологической

пластичности металла, которую целесообразно оценивать специальными методами, максимально приближенными к условиям на станах винтовой прокатки.

Степень разработанности темы исследования.

Работы по определению рациональных режимов деформации при прошивке НЛЗ и их влияние на качественные показатели труб являются актуальными и значимыми в связи с развитием нефтегазодобывающей отечественной промышленности.

Исследованиям условий дефектообразования, скручивания и разрушения металла при винтовой прошивке посвящены работы Емельяненко П.Т., Полухина П.И., Потапова И.Н., Фомичева И.А., Данилова Ф.А. и ряда других авторов. Так в работах Потапова И.Н., Полухина П.И. подробно изложены практические исследования формоизменения (пластического изгиба) стенки металла заготовки-гильзы и влияние износа рабочих валков на параметры формоизменения в очаге деформации и качество труб.

В связи с многообразием химических составов трубных сталей, спецификой технологии и оборудования для производства НЛЗ большого диаметра, в настоящее время развиваются основные направления по повышению качества исходной заготовки, однако, ввиду пониженных пластических свойств по сравнению с горячедеформированной выполненной из НЛЗ, вопросы оценки технологической пластичности при прошивке и влияния износа рабочего износа инструмента на стабильность процесса прокатки освещены недостаточно.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является исследование влияния технологической пластичности металла НЛЗ больших диаметров (более 300 мм) и износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения на качество труб и, на основании этих исследований, определение рациональных режимов винтовой прошивки НЛЗ для получения гильз повышенного качества по состоянию поверхности.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие **задачи**:

- выполнить анализ научно-технической литературы по прокатке заготовок в двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки;
- провести анализ несовершенств формы поперечного сечения, наружной поверхности, макроструктуры НЛЗ и деформационно-скоростных условий при прошивке заготовок на промышленных двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки;
- разработать конструкцию испытательной машины для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в условиях, максимально приближенных к процессам винтовой прокатки;
- разработать методику проведения испытаний стальных образцов в горячем состоянии на знакопеременный изгиб, выполнить испытания технологической пластичности НЛЗ и моделирование процесса знакопеременного изгиба стальных образцов в горячем состоянии;
- провести исследование износа рабочих валков промышленных прошивных станов различного конструктивного исполнения при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок;
- на основании экспериментальных исследований определить рациональные режимы процесса прошивки НЛЗ в гильзы повышенного качества по состоянию поверхности.

Научную новизну составляют:

- испытательная машина оригинальной конструкции, обеспечивающая реализацию процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в горячем и холодном состоянии (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб);
- методика проведения специальных испытаний, на разработанной испытательной машине, образцов на знакопеременный пластический изгиб и его моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программе QForm,

позволяющая оценивать технологическую пластичность заготовки в условиях, которые максимально приближены к реальному процессу винтовой прокатки. Установлено, что для получения горячекатаных труб из исходной заготовки с минимальным уровнем дефектов на наружной и внутренней поверхности гильз, количество циклов в очаге деформации двухвалкового прошивного стана следует ограничить для углеродистых сталей - не более 20, для нержавеющей стали - не более 15;

– результаты исследований износа рабочей поверхности валков прошивных станов винтовой прокатки различного конструктивного исполнения, которые показали, что вне зависимости от калибровки и расположения рабочих валков, глубина износа имеет линейную зависимость от количества прокатанных заготовок. При этом по мере износа рабочих валков вынужденно изменяют настройку стана, что приводит к увеличению цикличности деформации в очаге и ухудшению состояния поверхности гильз и труб. Величина материалостойкости рабочих валков составила: ТПА 159-426 (сталь 50Х) при прокатке НЛЗ диаметром 340 и 410 мм – 4,4 т/см³, ТПА 50-200 (сталь 18ХГСА) при прокатке заготовок диаметром от 90 до 260 мм – 2,1 т/см³, МИСиС-130Д (сталь 45) при прокатке заготовок из жаропрочных сплавов – 0,4 т/см³.

Практическая значимость работы:

– разработана конструкция и создано оборудование машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб;

– разработана методика проведения технологических испытаний образцов на знакопеременный пластический изгиб; выполнены испытания технологической пластичности НЛЗ из различных марок стали;

– определено максимальное число циклов знакопеременного пластического изгиба стенки гильзы в очаге деформации прошивных станов винтовой прокатки для получения горячекатаных труб из исходной НЛЗ с минимальным уровнем дефектов на наружной и внутренней поверхности;

– на основании экспериментальных исследований даны практические рекомендации диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 в зависимости от их диаметра и твердости поверхности;

– определена материалостойкость рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения и разработана методика определения величины выделенного показателя износа входного конуса - количества материала валка, затрачиваемого на захват заготовки, в зависимости от количества прошитых заготовок;

– на основании экспериментальных исследований даны практические рекомендации диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426, обеспечивающие рациональную цикличность деформации в очаге и стабильное качество гильз и труб по состоянию поверхности.

– результаты теоретических и экспериментальных исследований находят отражение при выполнении практических занятий студентами бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Методология и методы исследования.

Теоретические исследования проведены на основе положений теории обработки металлов давлением. Анализ деформационно-скоростных условий процесса винтовой прошивки, поиск закономерностей износа рабочих валков, качества получаемых гильз и труб осуществлен с использованием статистических данных о работе промышленных прошивных станов винтовой прокатки в условиях АО «ВТЗ» (г. Волжский).

Экспериментальные исследования технологической пластичности стальных образцов на знакопеременный пластический изгиб в горячем состоянии реализованы в условиях «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ «МИСиС», г. Москва) на испытательной машине оригинальной конструкции. Анализ полученных результатов выполнен с использованием регистрирующей аппаратуры, измерительных приборов и применением прикладного программного обеспечения MS Excel и программного комплекса QForm.

Расчеты и разработка конструкции оборудования машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб осуществлены на основе полученных экспериментальных данных и общих положений проектирования и конструирования машин с применением прикладного программного обеспечения SolidWorks 3D и КОМПАС-3D.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие разработки, выполненные автором и отличающиеся научной и технической новизной:

– конструкция машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб) и методика испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб;

– методика определения величины выделенного показателя износа входного конуса – количества материала валка, затрачиваемого на захват заготовки, в зависимости от количества прошитых заготовок;

– рациональные режимы винтовой прошивки НЛЗ с ограничением числа циклов деформации для углеродистой и нержавеющей стали.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается использованием современных методов исследования, включающих моделирование с применением МКЭ в программном комплексе QForm; физические эксперименты, выполненные на оригинальной испытательной машине для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба стальных образцов в горячем и холодном состоянии, промышленных прошивных станах ТПА 159-426, ТПА 50-200 и опытно-промышленном прошивном стане МИСиС-130Д с использованием современной регистрирующей аппаратуры, качественным и количественным согласованием результатов виртуальных и физических экспериментов.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

– 52-ой, 53-ей и 54-ой научных конференциях Волгоградского государственного технического университета (Волгоград: ФГБОУВПО «ВолгГТУ»), 2015, 2016 и 2017 гг., соответственно;

– X, XII, XIII и XIV молодежных научно-практических конференциях «Совершенство мысли и творчества» (Волжский: АО «Волжский трубный завод»), 2014, 2016, 2017 и 2018 гг., соответственно);

– X Молодежная научно-техническая конференция Трубной Металлургической Компании, г. Сочи, 2014 г.;

– XXII международной промышленной выставке «Металл-Экспо 2016», премия «Молодые ученые» (Москва: ВВЦ, 2016).

Публикации.

Основное содержание диссертационной работы отражено в 6-ти печатных работах, в том числе в 3-х изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в 1 патенте РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, и списка использованной литературы из 77 наименований отечественных и зарубежных авторов. Текст диссертации содержит 107 страниц машинописного текста, включающего 20 таблиц и 70 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя обоснование актуальности темы диссертационной работы, степень её разработанности, цель и задачи, решение которых необходимо для её достижения, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов исследований, апробацию работы, публикации, структуру и объем диссертации.

В первой главе проведен обзор литературных источников, посвященных негативному влиянию несовершенств формы поперечного сечения, поверхности и макроструктуры НЛЗ при их промышленном производстве на качество гильз и труб. Отмечается, что, несмотря на непрерывное совершенствование технологии производства НЛЗ и химического состава стали, существенное влияние на качество внутренней поверхности гильз и труб оказывают дефекты макроструктуры.

Прошивка НЛЗ большого диаметра в станах винтовой прокатки является основной и наиболее ответственной операцией, обеспечивающей начальный уровень качества и точности горячекатаных труб, в связи с этим процесс прошивки необходимо осуществлять при рациональных режимах, исключающих образование дефектов на внутренней и наружной поверхности гильз. Очевидно, что износ технологического инструмента прошивного стана, его своевременная замена оказывают значительное влияние на качество продукции и производительность трубопрокатного агрегата. Техно-экономические показатели эксплуатации прошивного стана определяются износостойкостью и работоспособностью рабочих валков. Большое влияние на износостойкость валков, помимо качества их изготовления, связанного с выбором материала и технологией производства, оказывают условия их эксплуатации.

Приведены сравнительные данные по средней стойкости рабочих валков до переточки промышленных прошивных станов винтовой прокатки

различного конструктивного исполнения. Установлено различие результатов оценки износостойкости рабочих валков, полученных при прокатке НЛЗ больших диаметров на стане с бочковидными рабочими валками индивидуальной калибровки и станах с универсальной калибровкой валков.

Формоизменение металла в очаге деформации станов винтовой прокатки сопровождается значительными знакопеременными деформациями и напряжениями, что наряду с цикличностью процесса, нарастающей по мере увеличения износа рабочих валков, приводит к образованию дефектов на внутренней и наружной поверхности, что и определило основное направление исследований в работе.

Вторая глава посвящена подробному описанию особенностей НЛЗ при их промышленном производстве: несовершенства формы поперечного сечения, наружной поверхности, макроструктуры и их влияние на процесс прошивки с оценкой качества горячекатаных труб.

Следующим этапом исследований явился анализ очага деформации заготовки-гильзы, заторможенной во время прокатки в двухвалковом прошивном стане ТПА 159-426 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Центральная пористость НЛЗ из стали марки 32ХГА Ø340 мм и дефект на внутренней поверхности гильзы

Сравнение фактических настроечных параметров с расчетными выявило следующее: обжатие в пережиме валков фактическое 14,51 %, настроечное - 14,64 %. Обжатие перед носком оправки 4,80 %, настроечное - 4,75 %. Анализ диаграммы токовой нагрузки приводов прошивного стана

позволил установить суммарное время первичного и вторичного захвата, которое составило 2,5 секунды, что свидетельствует о недостаточном обжатии заготовки до встречи её торца с оправкой для активного протекания процесса захвата, в какой-то мере его стабильность обеспечивается за счёт наличия накатки входного конуса валков глубиной 0,3...1,2 мм. Необходимо отметить, что на конкретной заторможенной заготовке металл сохраняет свою сплошность на коротком участке перед носком оправки, несмотря на образование центральной пористости, сосредоточенной по оси заготовки. В стенке полученной гильзы деформированный металл имеет плотную однородную структуру, однако выявлен грубый дефект в виде вырыва металла на внутренней поверхности гильзы, что свидетельствует о существенном влиянии литой структуры НЛЗ на качество гильз и труб.

В условиях промышленного трубного производства НЛЗ изготавливают без нормирования и контроля механических свойств согласно ГОСТ Р 53932-2010, в котором также регламентированы требования к макроструктуре трубных заготовок - непрерывнолитой и горячедеформированной, выполненной из НЛЗ. Следует отметить, что хотя механические свойства труб тонкостенного сортамента, изготовленных из НЛЗ и горячекатаной заготовок практически одинаковые, знания механических свойств НЛЗ в горячем состоянии весьма актуальны. Например, при расчёте усилий металла на инструмент используются данные механических испытаний образцов, выполненных из горячекатаных заготовок, поэтому на практике возможно получение непредсказуемых результатов по нагрузке на главные электроприводы. В этой связи проведена работа по отбору темплетов НЛЗ для изготовления образцов из различных марок стали, с целью испытаний на одноосное растяжение на универсальной испытательной машине УМЭ-10Т и определения твердости по поперечному сечению заготовки. Результаты испытаний механических свойств НЛЗ из углеродистой и нержавеющей стали мартенситного класса приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические свойства непрерывнолитых заготовок

Марка стали	Диаметр НЛЗ, мм	Место отбора	$\sigma_{0,2}$, МПа при 23 °С	σ_b , МПа при 23 °С	δ , % при 23 °С	Твердость, при 23 °С		
						НВ	HRB	HRC
20	410	- наружная	197,0	400,6	21,5	-	67-69	-
		- середина	190,1	399,4	15,4	-	78	-
		- центр	194,3	369,4	12,2	-	74-76	-
09Г2С	410	- наружная	244,6	410,2	38,3	131	72-76	-
		- середина	-	444,3	30,7	-	77-78	-
		- центр	253,0	431,0	21,3	-	73-78	-
34CrMo4	360	- наружная	610,9	716,1	2,9	241-285	100-103	24,1-25,3
		- середина	682,2	770,4	2,3	-	-	22-24
		- центр	586,0	675,2	1,7	-	-	19-22
08Х13Н4М1Ф (в отпущенном состоянии)	196	середина	670,0	860,0	12,0	255	-	26
10Х13Н3МФБ (в т/о состоянии)	190	середина	576,0	793,0	10,7	240	100	24

Анализ данных таблицы 1 показывает, что пластические свойства металла центральных слоев НЛЗ большого диаметра из углеродистых марок стали ниже, чем срединных и наружных слоев в 1,5 - 2 раза. Однако такие заготовки успешно используются для горячей прокатки труб на различных трубопрокатных агрегатах, при этом обеспечивается получение труб удовлетворительного качества. В то же время известно, что при недостаточной технологической пластичности металла, наличия развитой центральной пористости, повышенной цикличности в очаге деформации, особенно при раскатке стенки гильзы на оправке образуются плены, глубина залегания которых зависит от множества факторов: технологической пластичности металла, температурных и деформационно-скоростных условий прокатки и др. Однако, и следовательно, данные о механических свойствах металла, полученные при испытаниях образцов на одноосное растяжение в холодном состоянии, не позволяют объективно оценивать качество исходной НЛЗ.

Третья глава посвящена обоснованию проведения технологических испытаний на знакопеременный пластический изгиб, разработке конструкции испытательной машины и методики определения технологической пластичности образцов.

Ввиду того, что процесс прошивки заготовки в полуогу гильзу является циклическим, то основным фактором, влияющий на центральное разрушение

металла, является количество циклов в очаге деформации, а главным технологическим параметром, влияющим на цикличность процесса прошивки является угол подачи. Величина угла подачи влияет на объем подачи металла, проходящего через очаг деформации и величина которого обратно пропорциональна количеству циклов деформации (см. рисунок 2).

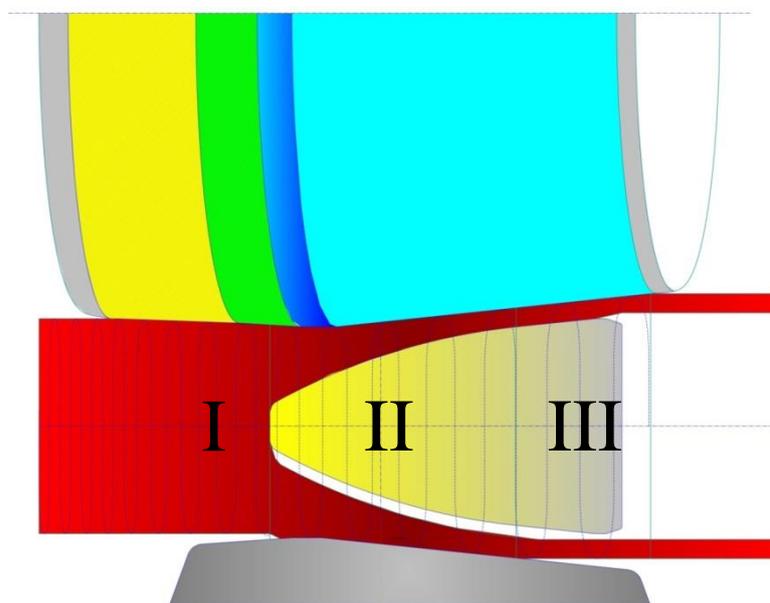


Рисунок 2 – Схема очага деформации прошивного стана с направляющими линейками

Количество шагов осевой подачи при прошивке определяется по формуле:

$$Ц_{\Sigma} = Ц_I + Ц_{II} + Ц_{III} \quad (1)$$

где $Ц_I$ - на участке первичного захвата заготовки; $Ц_{II}$ - при прохождении металла заготовки через носок и сферическую часть оправки; $Ц_{III}$ - при прохождении металла заготовки раскатного участка оправки и сходе металла с валков и оправки. Данные составляющие определяются из геометрии очага деформации и зависят от длины контакта металла заготовки во входном и выходном конусах валка, выдвижения носка оправки, коэффициента вытяжки, шага осевой подачи. Сравнение технологических параметров очага деформации прошивного стана при различных углах подачи представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение технологических параметров очага деформации прошивного стана ТПА 159-426

№	Диаметр заготовки, мм	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Коэффициент выгязки	Обжатие в пережиме, %	Обжатие перед носком оправки, %	Угол подачи, градусов	Подсчёт шагов осевой подачи, шт				Время прошивки, с
								I	II	III	сумма	
1	410	506	37,9	2,43	7,3	5,8	7	4,7	10,9	2,6	18,2	22,5
2			38,2	2,41	8,0	7,6	8	5,6	8,7	2,6	16,9	18,0
3			38,2	2,41	8,0	7,6	9	5,0	7,5	2,6	15,1	15,5
4			37,6	2,45	7,6	5,8	10	3,5	6,0	2,6	12,1	13,0*

*расчёт

Величина подачи при прошивке, является эффективным параметром, влияющим на количество циклов и качество поверхности гильз и труб, изменение которых при различных углах подачи представлено на рисунке 3.

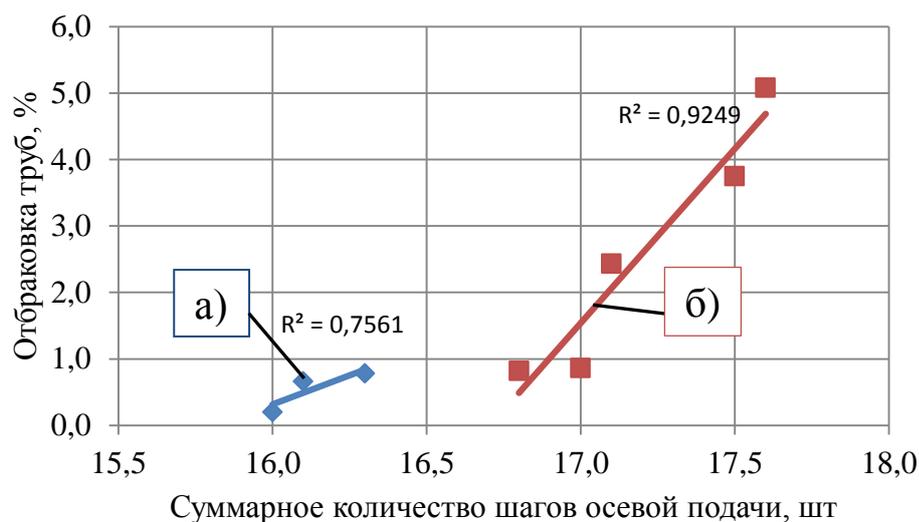


Рисунок 3 – Влияние суммарного количества шагов осевой подачи на качественные показатели труб из стали марки 10ГФБЮ НЛЗ диаметром 410 мм при прокатке с установкой различных углов подачи: а – 8 градусов; б – 7 градусов

В настоящее время прошивка НЛЗ большого диаметра, в особенности с увеличением наружного диаметра гильз относительно диаметра заготовки (“на подъем”), осуществляется с установкой рабочих валков на угол подачи от 8 до 10 градусов.

Известно, что за один оборот заготовки-гильзы в очаге деформации двухвалкового стана происходит четырехкратный пластический изгиб стенки (4 цикла), в ходе которого стенка гильзы испытывает напряжения сжатия со стороны рабочих валков и линейек, а на поверхности гильзы между валками и линейкой создается менее благоприятная схема напряженного состояния с растягивающими деформациями, приводящая к развитию и образованию дефектов на наружной поверхности.

Поперечные темплеты, вырезанные из заторможенной в прошивном стане заготовки-гильзы, показывают, что слои металла плавно изгибаются в зазоре между валком и направляющей линейкой на угол 40...90° и это формоизменение можно принять за цикл деформации в виде пластического изгиба.

Расчёт длительности цикла деформации заготовки-гильзы в очаге деформации можно определить по формуле:

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{60}{4 \cdot \left(\frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{з}}}\right) \cdot n_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{т}}} \quad (2)$$

где $D_{\text{в}}$ – диаметр бочки валка, мм; $D_{\text{з}}$ – диаметр заготовки, мм; $n_{\text{в}}$ – частота вращения валка, об/мин; $\eta_{\text{т}}$ – коэффициент тангенциальной скорости, принятый 0,95; 4 – количество циклов знакопеременного пластического изгиба.

В таблице 3 приведены результаты расчётов деформационно-скоростных условий при прошивке заготовок на промышленных прошивных станах винтовой прокатки.

Таблица 3 - Деформационно-скоростные условия при прошивке заготовок на промышленных прошивных станах

ТПА	Диаметр, мм		Частота вращения, об/мин		Длительность одного оборота заготовки, с	Длительность одного цикла деформации, с
	рабочих валков	заготовки	рабочих валков	заготовки		
159-426	1200	410	70	194,63	0,308	0,077
		260	80	350,77	0,171	0,043
50-200	1100	260	60	241,15	0,249	0,062
		90	110	1277,22	0,047	0,012

Влияние совокупности следующих факторов: высокая температура 1100...1150 °С, значительные знакопеременные пластические изгибы стенки во входном и выходном конусе очага деформации (общее количество которых может достигать 30), большие значения скоростей деформации заготовки в очаге деформации составили основу для технического задания на проектирование и изготовление испытательной машины для проведения специальных испытаний образцов на знакопеременный пластический изгиб, максимально приближенных к реальным процессам винтовой прокатки.

Пониженная пластичность металла НЛЗ, по сравнению с горячекатаным металлом, требует проведения специальных технологических испытаний, максимально приближенных к условиям реального процесса винтовой прокатки, разработки соответствующей методики оценки технологической пластичности заготовки, а также создания машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб в горячем состоянии, принцип работы которой основан на сопоставлении углов изгиба наружных слоёв металла с углом изгиба бруса, один конец которого закреплен (рисунок 4 а, б).

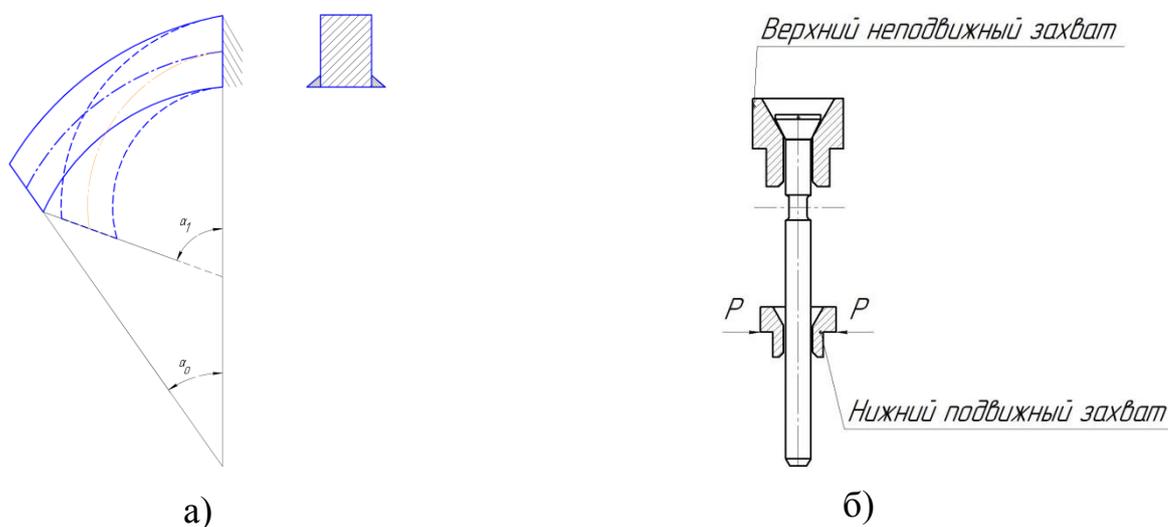


Рисунок 4 – Схема изгиба: а – кривого бруса; б – образца

В работе приведено подробное описание оригинальной конструкции узлов машины, в которой знакопеременный изгиб образцов достигается благодаря использованию кривошипно-шатунного механизма (рисунок 5).

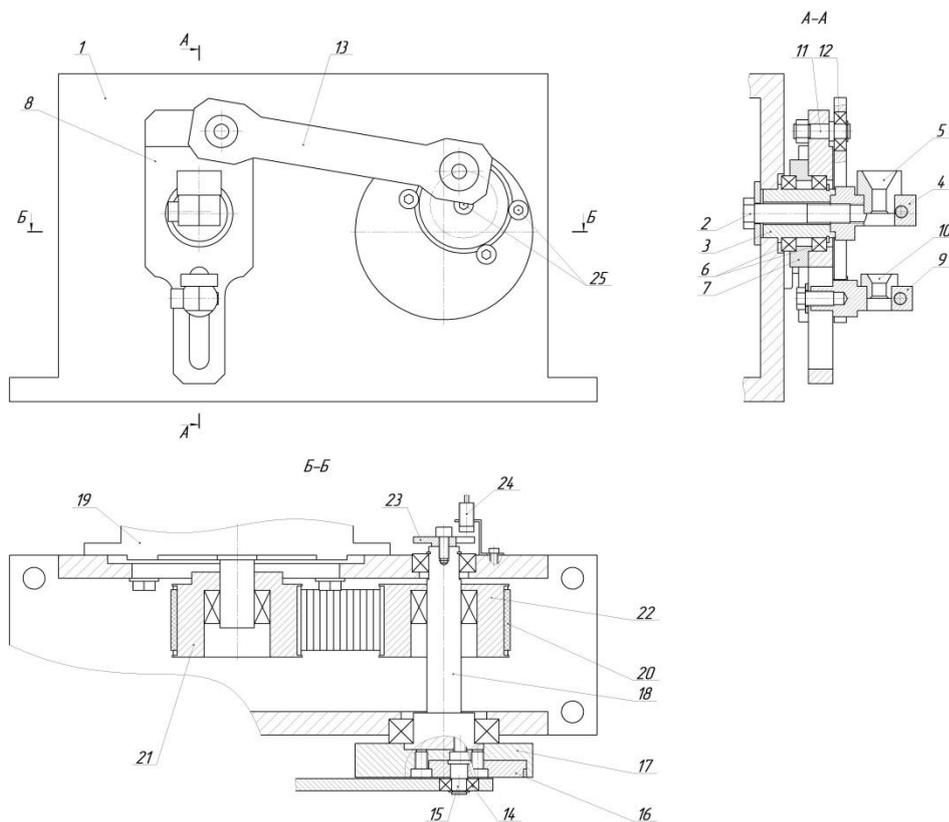


Рисунок 5 – Схема испытательной машины:

1 – корпус; 2 – болт; 3 – цилиндрическая втулка; 4 – верхний неподвижный захват; 5 – верхняя воронка; 6 – подшипники; 7 – кольцо; 8 – рычаг; 9 – нижний подвижный захват; 10 – нижняя направляющая воронка; 11 – палец; 12 – подшипники; 13 – шатун; 14 – подшипник; 15 – палец; 16 – диск; 17 – шкив; 18 – вал; 19 – электродвигатель; 20 – ремень; 21 – шкив; 22 – шкив; 23 – фигурная шайба; 24 – бесконтактный (индуктивный) датчик; 25 – винт.

На основании расчетных и экспериментальных данных по определению требуемого усилия для изгиба стального образца, нагретого до температуры 1150 °С, установлено, что при мощности электродвигателя привода 4 кВт на рычаге 8 создаётся крутящий момент 21 Н·м и усилие F от 9 до 320 Н на нижнем подвижном захвате в зависимости от его положения в рычаге 8. Это усилие позволяет изгибать образцы диаметром от 6 до 10 мм из различных сталей и сплавов как в горячем, так и в холодном состоянии. С применением прикладного программного обеспечения SolidWorks 3D и КОМПАС-3D произведены расчеты и создана испытательная машина, краткая техническая характеристика которой представлена в таблице 4.

Таблица 4 - Краткая техническая характеристика испытательной машины

Параметр	Значение
Мощность привода электродвигателя 100L4y2, кВт	4
Электропитание установки, В	380, трёхфазное
Частота вращения вала электродвигателя, об/сек	от 0 до 30
Тип привода	ременный
Тип механизма качания	кривошипно-шатунный
Диаметр испытываемых образцов, мм	от 6 до 10
Длина испытываемых образцов, мм	от 60 до 160
Угол пластического изгиба образца, градусов	до ± 52
Длительность одного цикла деформации, с ⁻¹	от 0 до 0,03

Привод кривошипно-шатунного механизма испытательной машины осуществляется за счет передачи крутящего момента от асинхронного электродвигателя через ременную передачу, а частота его вращения регулируется изменением частоты электрического напряжения от частотного преобразователя. Для защиты от движущихся частей машины и обломков горячих образцов предусмотрены быстросъемные защитные кожухи. Испытательная машина укомплектована камерной нагревательной печью с силитовыми нагревателями.

Методика проведения технологических испытаний образцов на знакопеременный изгиб в разработанной машине заключается в следующем: перед началом работы осуществляется подготовка - установка соосности отверстий (см. рисунок 5) верхней 5 и нижней 10 воронок путем вращения шкива 22. Установка угла отклонения рычага 8 в диапазоне от 0 до 104 ° осуществляется путем ослабления винтов 25 и поворота диска 16 с нанесенной на него шкалой относительно контрольной риски на шкиве 17. Для испытания образцов различных диаметров (10; 8; 6 мм) предусмотрена возможность замены верхней 5 и нижней 10 воронок с таким же диаметром отверстий в верхнем 4 и нижнем 9 захватах, соответственно. Установка требуемой частоты, направления вращения и количества оборотов электродвигателя производится и регистрируется при помощи электронных табло на электрошкафе (рисунок 6).



Рисунок 6 – Фото испытательной машины в процессе работы

Нагретый в камерной электропечи цилиндрический образец загружают в вертикальном положении в отверстия, выполненные в верхней 5 и нижней 10 воронках, затем включают пуск. Во время испытания верхний захват 4 неподвижен, а нижний 9 отклоняется относительно вертикальной оси на установленный ранее угол (не более $\pm 52^\circ$), совершая пластический изгиб образца. Бесконтактный датчик 24, отсчитав заданное количество оборотов фигурной шайбы 23, подает сигнал счетчику импульсов, связанному с частотным преобразователем, для выключения электродвигателя 19. После установки рычага 8 в вертикальное положение, деформированный образец вручную извлекается из верхней 5 и нижней 10 воронок - испытание образца завершено. После испытаний и охлаждения измеряются геометрические параметры образцов для определения относительного удлинения, относительного сужения шейки, оценки формы шейки и др.

Таким образом, в созданной машине испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб можно проводить по различным вариантам: в горячем или холодном состоянии, с изгибом до разрушения или с изгибом на заданное количество циклов и длительностью испытаний, соответствующей реальному процессу винтовой прошивки.

В четвертой главе выполнено определение рациональной конфигурации формы образцов, исследование их технологической пластичности на знакопеременный изгиб путем моделирования МКЭ и в горячем состоянии изготовленных из горячекатаного прутка и НЛЗ диаметром 360 мм и 410 мм из различных марок стали.

С целью определения рациональной конфигурации формы образца, в программном комплексе QForm 3D проведено моделирование процесса знакопеременного изгиба образцов трех видов: с лыской, с квадратной и круглой базами. На основании моделирования установлено, что процесс максимально стабильно протекает в случае использования цилиндрического образца с круглой базой (рисунок 7).

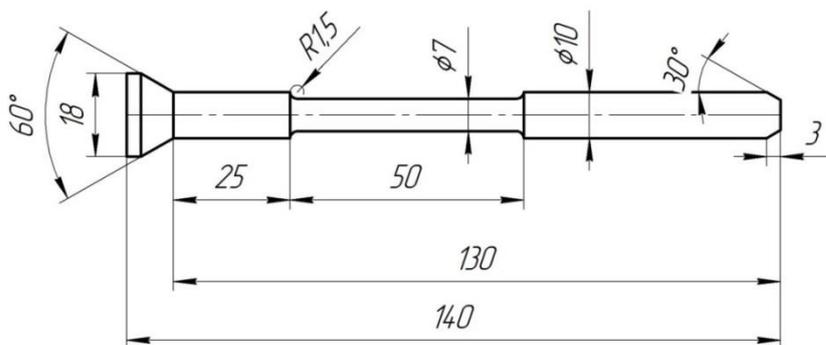


Рисунок 7 – Эскиз предварительного варианта образца с базой $\varnothing 7$ мм длиной 50 мм

Проведенные испытания образцов при режимах: суммарный угол отклонения нижнего захвата – 75° ; частота вращения двигателя - 23 об/сек; количество циклов – 20, 30, 40, 50, 60; температура 1100°C позволили установить образование отчётливо выраженной шейки при 40 циклах, значительно смещенной к верхней части образца. Дальнейшие испытания при пониженном угле на 15° отклонения нижнего захвата выявили значительное искривление базовой части образца, что создавало затруднения при определении её удлинения. На основании этих результатов произведена доработка конфигурации формы образца путем уменьшения длины базовой части до 10 мм и её смещения к верхней части образца на 3 мм, при этом общая длина и диаметральные размеры оставлены без изменений (рисунок 8).

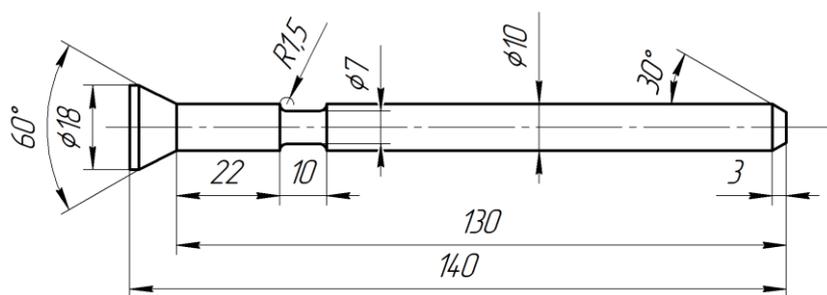


Рисунок 8 – Эскиз варианта образца с базой $\varnothing 7$ мм длиной 10 мм

Для изготовления образцов применяли горячекатаные прутки из сталей 45, 09Г2С и 12Х18Н10Т. Для сравнения результатов испытаний разных материалов, эксперимент проведен при одних и тех же параметрах для указанных марок стали. Суммарный угол отклонения нижнего захвата составил 75° , а частота вращения двигателя - 23 об/сек. Для каждой марки стали проведено несколько испытаний с различным количеством циклов. В процессе знакопеременного изгиба наибольшей деформации подвергается именно «база» образца. С увеличением количества циклов происходит удлинение «базы», а также ее утонение с последующим образованием шейки. При этом получаемое сечение шейки имеет овальную форму вследствие преимущественной деформации в одном направлении. После охлаждения были измерены геометрические размеры образцов и проведен расчет относительного удлинения и сужения шейки базы при изгибе. Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С весьма близки результатам испытаний образцов стали 45. Образцы из стали марки 12Х18Н10Т показали меньшую пластичность по сравнению со сталью 09Г2С и 45.

Для более детального изучения поведения металла при изгибе была создана модель процесса и проведено моделирование процесса знакопеременного изгиба с помощью МКЭ в программе QForm. Разрушение образца произошло уже на 10 цикле, в то время как в реальных условиях при тех же настройках испытательной машины количество циклов до разрушения образца из стали 45 превышает 40, следовательно, созданная модель требует уточнения.

Для проведения опытов по исследованию технологической пластичности образцов из НЛЗ марок стали 20, 09Г2С и 34CrMo4, из отобранных темплетов (поверхностные слои, середина радиуса и центр) изготовлены специальные заготовки для изготовления образцов. Для сравнения результатов, эксперимент был проведен при одних и тех же параметрах: суммарный угол отклонения нижнего захвата составил 75 °, частота вращения вала электродвигателя - 23 об/сек; температура 1100 °С. Для каждой марки стали проведено несколько испытаний с различным количеством циклов. После охлаждения образцов измерены их геометрические размеры для определения удлинения базы, сужения в шейке. В таблице 5 приведены результаты испытаний образцов из сталей 20, 45, 09Г2С, 34CrMo4, 12Х18Н10Т, выполненных из горячекатаного прутка и НЛЗ.

Таблица 5 - Результаты испытаний образцов из сталей 20, 45, 09Г2С, 34CrMo4, 12Х18Н10Т

Марка стали	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 09Г2С		34CrMo4	12Х18Н10Т
Исходная заготовка	НЛЗ, Ø410 мм, центр	пруток	пруток	НЛЗ, Ø410 мм, центр	НЛЗ, Ø360 мм, центр	пруток
Количество циклов, шт	16	-	-	16	16	-
	20	20	-	20	20	20
	30	30	31	30	30	24
	40	40	40	40	40	30
	-	46	44	-	-	-

Следует отметить, что количество циклов до разрушения образцов (значения выделены жирным шрифтом) из горячекатаных прутков выше, чем из НЛЗ. Наибольшие пластические свойства зафиксированы на образцах, отобранных из середины радиуса темплета, а наименьшие – на образцах из центральной части темплета. Поверхностные и центральные части НЛЗ менее пластичны и более склонны к разрушению при знакопеременном изгибе.

Таким образом, с использованием моделирования и опытным путем выбраны рациональные геометрические параметры образцов для испытаний на машине, позволяющей осуществлять знакопеременный изгиб с максимальным приближением условий деформации к условиям процесса винтовой прошивки. Для снижения вероятности образования дефектов наружной и внутренней

поверхности гильз, разрушения металла НЛЗ при прошивке, цикличность в очаге деформации следует ограничить для углеродистых марок стали максимальным числом – не более 20, а для нержавеющей стали – до 15.

Пятая глава посвящена исследованиям износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения линий ТПА 159-426, ТПА 50-200, МИСиС-130Д. Рассмотрены основные механизмы, влияющие на износ рабочей поверхности валков: абразивное и механическое изнашивание; выведена формула определения показателя абразивного износа входного конуса:

$$V'_{\text{вх.к}} = V_{\text{вх.к}} - \left(\frac{V_{\text{вх.к}} \cdot \mu_{\text{вх.к}}}{\mu_{\Sigma}} - V_{\text{вых.к}} \right), \quad (3)$$

где $V_{\text{вх.к}}$, $V_{\text{вых.к}}$ – объем изношенной части входного и выходного конуса, мм³; $\mu_{\text{вх.к}}$ – усредненное значение коэффициента вытяжки во входном конусе; μ_{Σ} – коэффициент вытяжки на выходе гильзы из очага деформации.

Исходя из объема набранных статистических данных по износу входной и выходной части рабочих валков прошивных станов ТПА 159-426 и ТПА 50-200, установлена линейная связь между выделенным показателем износа входного конуса вследствие влияния абразивного износа, затрачиваемого на захват заготовок и количества прошитых заготовок, вне зависимости от калибровки валков. Обобщенные зависимости расхода материала входного конуса рабочих валков обоих прошивных станов от количества прокатанных заготовок имеют тенденцию к непрерывному снижению, что можно объяснить упрочнением материала валка на участке максимального износа. По мере увеличения количества прокатанных заготовок увеличивается твердость в месте максимального износа валков, что приводит к заполировке рабочей поверхности, снижению тянущей способности валков, но при этом происходит незначительное увеличение материалостойкости.

Особое внимание уделено единичному случаю, связанному с образованием продольной сквозной трещины вдоль бочки нижнего валка и подробному анализу зависимости качественных показателей труб (рисунок 9).

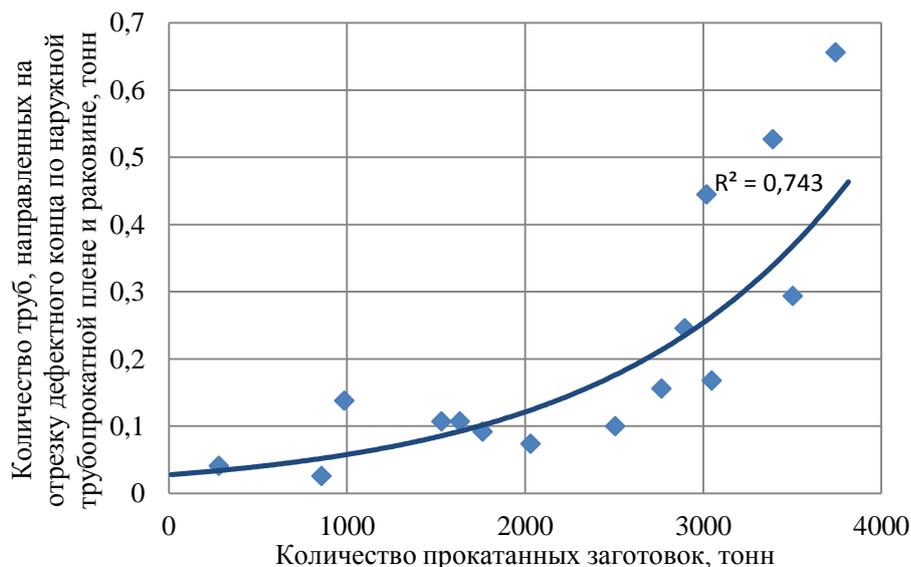


Рисунок 9 – Влияние износа рабочих валков на качество труб

Следует отметить, что продольная трещина на рабочей поверхности валка оказалась недостаточно широкой, чтобы прокатываемый металл смог заполнить её пространство, поэтому не оказала явного влияния на качество наружной поверхности гильз и труб, однако его дальнейшая переточка и эксплуатация оказались невозможными.

Пороки непрерывнолитого металла, которые в совокупности с процессом прошивки на "подъем" преобразуются в расслоения металла, вызывая тем самым появление плен на поверхности гильз и труб, которые имеют тенденцию к возрастанию по мере увеличения износа рабочей поверхности валков и удлинении контактной поверхности металла с валком в выходном конусе очага деформации.

Для осуществления устойчивого процесса прошивки необходимо уменьшать расстояние между валками, увеличивая тем самым обжатие в пережиме, а для сохранения геометрических параметров получаемых гильз уменьшают выдвигание носка оправки за пережим, отодвигая оправку по ходу прошивки. Увеличение обжатия перед носком оправки приводит к возрастанию числа шагов осевой подачи на участках II и III (см. рисунок 3) и, как следствие,

увеличению количества циклов знакопеременных изгибов стенки, в связи с этим износ рабочих валков ограничивается наработкой прокатанного металла.

Анализ экспериментальных данных по износу рабочих валков опытно-промышленного прошивного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д и при моделировании в DEFORM-3D показал, что характер изнашивания принципиально одинаковый, но имеет разную величину, которую можно объяснить некоторыми различиями радиального истечения металла в реальном процессе и при моделировании, а основной зоной на длине бочки валка, подверженной интенсивному изнашиванию, является участок входного конуса валка от точки касания заготовки с валком до его пережима.

Таким образом, исследованы особенности износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения ТПА 159-426, ТПА 50-200, МИСиС-130Д при прокатке НЛЗ больших диаметров, стальных горячекатаных заготовок и заготовок из жаропрочных сплавов. Наиболее интенсивное изнашивание происходит в месте встречи заготовки с валками в результате механического повреждения валка острыми кромками торца заготовки, не вращающейся в момент подачи толкателем в стан. Проведенные исследования показали, что материалостойкость и глубина износа рабочего инструмента имеет линейную зависимость от количества прокатанных заготовок. Использование компьютерного моделирования при исследовании процесса прошивки в стане винтовой прокатки может быть эффективным инструментом для прогнозирования износа рабочего инструмента. Это позволяет оценить примерный ресурс работы для валков прошивных станов винтовой прокатки, используемых в промышленности.

Основные выводы и результаты работы.

В результате выполненной диссертационной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Создана оригинальная испытательная машина (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на

знакопеременный изгиб) для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в горячем и холодном состоянии.

2. Разработана методика испытания технологической пластичности образцов и на её основе проведены испытания стальных образцов в горячем состоянии и моделирование процесса знакопеременного изгиба, а также исследования по определению технологической пластичности НЛЗ из сталей различных марок.

3. На основании экспериментальных исследований установлено, что поверхностные и центральные части НЛЗ менее пластичны и более склонны к разрушению при знакопеременных изгибах. Цикличность в очаге деформации следует ограничить для углеродистых сталей – не более 20 циклов, для нержавеющей стали – до 15 циклов.

4. Проведено исследование износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения ТПА 159-426, ТПА 50-200, МИСиС-130Д и определена их материалостойкость. Разработана методика расчета показателя абразивного износа входного конуса валка в зависимости от количества прокатанного металла.

Даны практические рекомендации по диапазону наработки рабочих валков прошивного стана, обеспечивающие рациональную цикличность деформации в очаге и стабильное качество гильз и труб по состоянию поверхности.

Результаты работы использованы АО «Волжский трубный завод» в качестве практических рекомендаций диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426, при корректировке таблиц прокатки и разработке настроечных параметров, обеспечивающих рациональные режимы процесса прошивки непрерывнолитых заготовок в гильзы повышенного качества по состоянию поверхности.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // Производство проката. 2016. № 6. С. 20–26.

2. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Цюцюра В.Ю., Тыщук И.Н., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200 при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок // Metallurg. 2016. № 10. С. 57-61. Romantsev B. A., Aleshchenko A. S., Tsyutsyura V. Yu., Tyshuk I. N., Lube I.I. Features of piercing mill TPA 50-200 working roll wear during rolling continuously-cast and hot-rolled billets // Metallurgist. 2017.Vol. 60. Issue 9–10. P. 1062–1069. DOI 10.1007/s11015-017-0408-x.

3. Алещенко А.С., Гамин Ю.В., Чан Б.Х., Цюцюра В.Ю. Особенности износа рабочего инструмента при прошивке жаропрочных сплавов // Черные металлы. 2018. № 8. С. 63-70.

Патенты:

4. Патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб / Романцев Б.А., Цюцюра В.Ю., Даненко В.Ф., Алещенко А.С. и др. – заявл. 27.09.2018 г., опубл. 15.01.2019 г.

Другие публикации:

5. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Гамин Ю.В., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И., Орлов М.М. Особенности износа оправок прошивного стана ТПА 159-426 при прошивке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. №4. С. 22–31.

6. Цюцюра В.Ю., Андрианов К.А., Романец В.А. Испытательная машина для исследования влияния цикличности процесса прошивки непрерывнолитых заготовок на уровень образования дефектов поверхности горячекатаных труб. Труды XII международного конгресса прокатчиков (том 1) Сборник статей. - Москва: Грин Принт, 2019. С. 133-139.