

На правах рукописи

МАРЧЕНКО КИРИЛЛ ЛЕОНИДОВИЧ

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ  
НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ  
КАЧЕСТВА ТРУБ**

Специальность 05.16.05 – “Обработка металлов давлением”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре ТиОТП Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор Романцев Борис Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Голубчик Рудольф Михайлович

кандидат технических наук, доцент Леняшин Валерий Борисович

Ведущая организация: ОАО ЭЗТМ

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_мая\_\_\_ 2007г. в 14-00 в ауд. Б-436 на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_апреля\_\_\_ 2007 г.

Справки по телефону: 955-01-27

Ученый секретарь диссертационного совета

Ионов С.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из главных задач, стоящих перед трубной промышленностью России, является повышение качества и объемов выпускаемой продукции при существенном сокращении издержек производства. ОАО «Трубная металлургическая компания» считает, что перспективным направлением уменьшения себестоимости продукции и повышения ее конкурентоспособности на мировом рынке является использование непрерывнолитой заготовки при расширении сортамента выпускаемых труб.

Применение непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) по сравнению с использованием слитков позволяет значительно сократить отходы металла в обрезь, увеличить выход годного, повысить производительность и улучшить условия труда. К недостаткам непрерывнолитой заготовки относится наличие ярко выраженной зоны осевой ликвации и несплошности (пористости) по всей ее длине с участками, имеющими различную степень химической неоднородности по содержанию углерода и хрома. В процессе горячей пластической деформации пористость и химическая неоднородность металла осевой зоны заметно уменьшается, однако для полного устранения зоны осевой несплошности наряду с использованием различных методов подготовки расплава необходимо обеспечивать величину коэффициента вытяжки при обычной продольной прокатке на уровне не менее 12 – 15.

Использование операций горячей радиально-сдвиговой деформации с управляемыми макропотоками металла позволяет не только снизить величину необходимого для полной проработки металла коэффициента вытяжки до 5 – 7, но и обеспечить получение однородной гомогенной структуры по сечению и длине заготовки.

В связи с изложенным разработка эффективных технологических схем деформирования НЛЗ методами винтовой прокатки для производства горячекатаных труб является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящена настоящая работа.

Автором выносятся на защиту результаты исследований качества металла

непрерывнолитой заготовки методом металлографического анализа, обобщение данных, полученных в ходе промышленных экспериментов по радиально-сдвиговой прокатке (РСП) непрерывнолитой заготовки, результаты экспериментальных исследований процесса прошивки при повышенных обжатиях, новая технология производства труб из непрерывнолитой заготовки с получением гильз винтовой прокаткой при повышенных (до  $15^{\circ}$ ) значениях угла подачи и обжатиях в пережиме валков до 30 %, результаты физического и математического моделирования напряженно-деформированного состояния и поля температур направляющих линеек, результаты промышленного опробования новой технологии производства труб из непрерывнолитых заготовок, оценка качества прокатанных труб, данные технико-экономического анализа эффективности использования НЛЗ.

**Целью работы** является повышение качества труб, прокатываемых из непрерывнолитой заготовки, путем интенсификации винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с использованием научно обоснованной методики расчета параметров напряженно-деформированного состояния и поля температур направляющих линеек.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. На основании анализа научно-технической и патентной литературы выбрать рациональные варианты технологии прошивки непрерывнолитой заготовки для получения высококачественных бесшовных труб.
2. Провести исследования качества металла НЛЗ и промышленные эксперименты по использованию процессов РСП с разными режимами деформирования для оценки их влияния на состояние структуры металла в гильзах и трубах.
3. Разработать новую технологию горячего деформирования НЛЗ для интенсивной проработки структуры литого металла, обеспечивающую минимальные затраты на передел при высоком качестве получаемых горячекатаных труб.
4. Разработать комплексную методику проектирования направляющих линеек прошивного стана, реализованную в виде математической модели с помощью вычислительной системы Cosmos и на основе полученных результатов предложить режимы прошивки, обеспечивающие высокую износостойкость

инструмента и качество получаемых гильз.

**Научная новизна** заключается в следующем.

1. Разработан новый способ прошивки непрерывнолитой заготовки из сталей углеродистых и легированных марок с обжатию заготовки в пережиме валков до 30 % и «посадом» гильзы по диаметру относительно диаметра заготовки до 24 % (патент РФ №2250147, БИ № 11, 2005 г.).

2. Получены зависимости кинематических и энергосиловых параметров процесса от коэффициента вытяжки при прошивке на «посад» непрерывнолитой заготовки с обжатию в пережиме до 30 %, на основе которых разработаны рациональные режимы прошивки.

3. Разработана математическая модель для расчета параметров напряженно-деформированного состояния и поля температур направляющей линейки натуральных размеров при фактических условиях деформирования в режиме реального времени с использованием компьютерной вычислительной системы Cosmos и осуществлена проверка полученных результатов путем проведения эксперимента в промышленных условиях.

4. Выполнен анализ количественных характеристик напряженно-деформированного состояния и поля температур направляющей линейки и получены новые данные о значениях напряжений, накопленной деформации, распределении температуры по объему линейки на протяжении одного и нескольких циклов прокатки с учетом передачи и отвода тепла при неизотермических условиях и в периоды пауз.

5. С помощью экспериментальных, опытно-промышленных исследований и математического моделирования обосновано применение локальных сквозных полостей в теле линейки для изменения характера распределения напряжений и температуры по ее объему с целью повышения износостойкости и улучшения качества наружной поверхности гильз.

**Практическая полезность работы.**

1. Внедрен в производство новый способ прошивки НЛЗ из углеродистых и легированных сталей с обжатию заготовки в пережиме до 30%.

2. Разработаны и внедрены в производство новые кинематические и

температурно-деформационные режимы прошивки НЛЗ, обеспечивающие повышение выхода годного при прокатке труб широкого сортамента и увеличение производительности трубопрокатного агрегата.

**3.** Разработана методика расчета таблиц прокатки по новым режимам для всего сортамента труб, прокатываемых на ТПА 50 - 200 ОАО ВТЗ и методика проектирования технологического инструмента прошивного стана.

**Методы исследования.** Для исследования процесса прошивки выбран экспериментальный метод физического моделирования и методы математического моделирования на основе численных методов решения нелинейных задач нестационарной теплопроводности с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для компьютерной вычислительной системы Cosmos. Использовали также методы построения геометрических моделей с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР) AutoCad и Solid Works, методы металлографического анализа структуры металла.

**Достоверность результатов.** Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретически и базируются на данных, достоверность которых подтверждается использованием современных технических средств и оборудования, применением экспериментальных и теоретических методов исследования, результатами математической обработки данных с использованием вычислительной техники, промышленным апробированием.

**Реализация результатов работы.** Разработанная технологическая схема производства бесшовных труб и способ прошивки НЛЗ внедрены на Волжском трубном заводе. Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе на кафедре Технологии и оборудования трубного производства МИСиС.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на отраслевой конференции «Продукция предприятий ТМК как одно из средств решения проблем ресурсо- и энергосбережения в энергетике России», г. Волжский, 2002 г.; III международном конгрессе прокатчиков, г. Липецк; международных конференциях «Трубы – 2004», г. Екатеринбург и «Трубы – 2005», г. Челябинск.

**Публикации.** По теме работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых научно-технических журналах, получен патент РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит \_\_\_\_\_ страницы, в том числе \_\_\_\_\_ страниц машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, включает 56 рисунков, \_\_\_\_\_ таблиц, библиографический список из 87 наименований и приложения.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована научная новизна и изложены основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор научно-технических публикаций, посвященных различным методам прошивки заготовок, проведен их анализ по ряду показателей: технологическим возможностям; качеству гильз и труб; износостойкости инструмента и его стоимости; производительности; энергоемкости.

Показано, что в конце XX века одно из направлений развития трубопрокатного производства было связано с разработкой И.Н. Потаповым с сотрудниками технологических режимов винтовой прокатки при повышенных значениях угла подачи (до  $28^{\circ}$ ). Главная отличительная особенность новых режимов состоит в том, что в этом случае полностью исключается возможность вскрытия полости при любых практически возможных (до 25 %) степенях обжатий. В области повышенных и больших значений угла подачи перед носком оправки не происходит какого-либо разрыхления центральных слоев металла заготовки, благодаря чему обеспечивается улучшение качества гильз и труб по состоянию внутренней поверхности.

В связи с этим особый интерес представляют исследования процесса прошивки НЛЗ при повышенных обжатиях в пережиме и перед носком оправки, который позволяет улучшить проработку литой структуры металла, но вместе с тем создает условия для образования дефектов на внутренней и наружной поверхностях гильзы. Изучение процесса прошивки с повышенными обжатиями представляется необходимым также вследствие широкого применения в

последнее время для получения гильз непрерывнолитой заготовки.

Получение трубной заготовки из непрерывнолитой заготовки осуществляется по различным технологическим схемам, но, как правило, включает горячую прокатку исходного металла на трубозаготовочном или обжимном стане с определенным коэффициентом вытяжки, что повышает стоимость трубной заготовки и снижает эффективность ее применения для изготовления труб.

**Во второй главе** приведены результаты исследования качества непрерывнолитой заготовки и на этой основе предложены различные схемы производства труб. Исследование влияния макроструктуры на качественные характеристики труб, полученных из непрерывнолитой заготовки, проводили на образцах, вырезанных из заготовок сталей марок, склонных к образованию поверхностных дефектов.

Макроструктуру металла исследовали на поперечных темплетах. Установлено, что на заготовках имеется центральная пористость различной степени развития, на некоторых темплетах – усадочная рыхлость по оси заготовки или смещенная относительно нее.

При деформации заготовок с центральной пористостью и усадочной рыхлостью вскрытие полости перед носком оправки наблюдалось начиная со степени деформации 2 – 3 %. Небольшая величина критической деформации свидетельствует о повышенной чувствительности литой структуры непрерывнолитого металла к знакопеременным нагрузкам в отличие от структуры горячекатаной заготовки, вскрытие полости в которой происходит при обжатии 8 – 12 % и более.

В результате проведенных экспериментальных исследований по деформированию непрерывнолитого металла в трехвалковых станах винтовой прокатки ТПА 50 - 200 была установлена принципиальная возможность получения заготовок для производства труб широкого сортамента в условиях ВТЗ. Для обеспечения требуемого уровня проработки литой структуры угол подачи на трехвалковом раскатном стане был увеличен до  $14^{\circ}$ ; разработана специальная калибровка валков трехвалкового стана, позволяющая выполнить обжатие непрерывнолитой заготовки до 40 % за проход.

Однако рациональной такую технологию получения трубной заготовки считать нельзя, так как трубопрокатный агрегат используется частично и не по прямому назначению.

Поэтому наиболее предпочтительными следует признать технологии трубного производства, при которых используется непрерывнолитая заготовка без предварительного деформирования, например, новый технологический процесс прошивки “на посад”, обеспечивающий получение из одной исходной заготовки гильз нескольких типоразмеров при высоком качестве наружной и внутренней поверхностей.

В связи с изложенным **в третьей главе** были проведены исследования процесса прошивки с целью выявления возможности получения качественных гильз при повышенных обжатиях заготовки в пережиме.

Экспериментальные исследования процесса прошивки выполнены в лабораторных условиях на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д, в производственных условиях на прошивном стане ТПА 50 - 200 ОАО ВТЗ.

Главной задачей на первом этапе экспериментального исследования процесса прошивки на стане МИСиС-130Д было выявление основных факторов, определяющих параметры процесса прошивки, в частности, величины обжатия заготовки в пережиме валков.

Заготовки из углеродистых и легированных сталей марок 45, 36Г2С, ШХ15 и др. после нагрева в камерной электрической печи сопротивления до температуры прокатки прошивали на сферических оправках диаметром 38, 42,46 и 50 мм, изготовленных из стали марки 20ХН4ФА.

Рабочие валки, изготовленные из стали 45 с твердостью рабочей поверхности HB190 - 195, имели симметричную калибровку с углами конусности  $\varphi_1 = \varphi_2 = 2^\circ 30'$ . В качестве направляющего инструмента использовали линейки из высоколегированного сплава (бидулоидного чугуна) с твердостью  $HRC = 56 - 58$ . В процессе исследований фиксировали шаги винтовой линии на наружной поверхности гильз  $L$ , машинное время прошивки  $\tau_m$ , усилие металла на валок  $P$ , осевое усилие на оправку  $Q$ , крутящий момент  $M_{кр}$ , потребляемую мощность  $N$ , коэффициенты осевой  $\eta_o$  и тангенциальной  $\eta_T$  скорости. Осматривали наружную и

внутреннюю поверхности прокатанных гильз и труб, определяли их геометрические размеры. По полученным данным рассчитывали коэффициенты осевой и тангенциальной скоростей, фактическую скорость прошивки, удельный расход энергии.

Наиболее существенными факторами, определяющими характер процесса прошивки, являются угол подачи  $\beta$  и коэффициент вытяжки  $\mu$ . На свойства гильз и труб, в том числе качество их поверхности, значительное влияние оказывает угол раскатки.

На стане МИСиС-130Д осуществляли прошивку заготовок диаметром 60 мм по чашевидной, грибовидной и бочковидной схемам при значениях угла раскатки  $\delta = 0$  и  $\delta = \pm 17^0$ . Полученные зависимости изменения скоростных параметров процесса прошивки от значений угла подачи при бочковидной схеме характерны также для чашевидной и грибовидной схем. Так, во всех случаях увеличение  $\beta$  приводит к сокращению времени прошивки и возрастанию длины шага винтовой линии. Однако, возрастание длины шага с увеличением  $\beta$  происходит во время прокатки по чашевидной схеме более интенсивно, чем по грибовидной схеме. Этим, в основном, объясняется отмеченное выше различие в скоростях протекания процесса прошивки по разным схемам.

Таким образом, по скоростным показателям процесс прошивки заготовок по чашевидной схеме с большими значениями угла подачи имеет преимущество перед остальными схемами, даже если диаметр гильзы равен диаметру заготовки или больше его.

В результате анализа энергосиловых параметров процесса прошивки по различным схемам установлено, что усилие металла на валки при прокатке по чашевидной схеме меньше, чем по грибовидной. Это объясняется, в основном, меньшей площадью контактной поверхности металла с валком при прокатке по чашевидной схеме.

Крутящий момент на валке и мощность, потребляемая при прошивке, имеют более высокие значения при прошивке по грибовидной схеме по сравнению с бочковидной и чашевидной схемами. Наиболее объективным критерием сравнения экономичности процессов прокатки по различным схемам является

удельный расход энергии. С увеличением угла подачи от 6 до 30° удельный расход энергии при прокатке по чашевидной схеме ( $\delta = 10^0$ ) снижается от 115,2 до 64,08 МДж/т, по грибовидной – от 131,4 до 69,8 МДж/т ( $\mu = 2,43$ ).

Для определения влияния коэффициента вытяжки на параметры процесса прошивали заготовки диаметром 60 мм при значениях угла подачи 9, 12, 18, 24 и 30° на оправках диаметром 38, 42, 46, 50 мм при обжатии в пережиме валков 12 %; соответственно коэффициент вытяжки  $\mu$  составлял 1,73 2,06 2,43 и 2,74 (рисунок 1). Кроме того, прошивку осуществляли на тех же оправках при постоянной толщине стенки с обжатиями в пережиме 12,5, 18,3, 26,6 %, при этом коэффициент вытяжки  $\mu$  изменялся от 2,59 до 3,07 за счет уменьшения диаметра гильзы (рисунок 2).

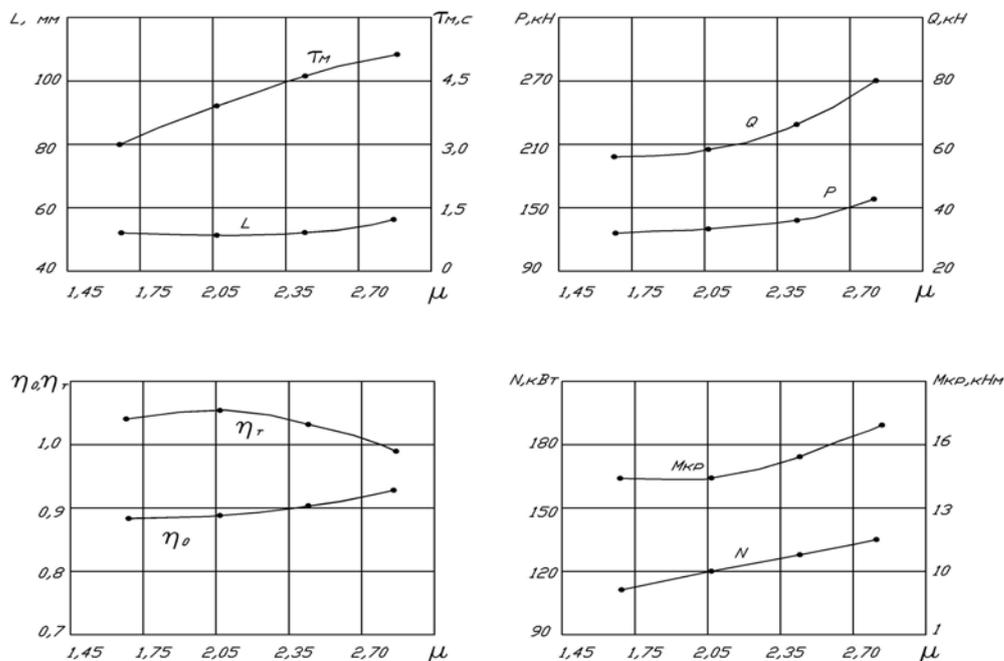


Рисунок 1 – Зависимость параметров процесса прошивки заготовок из стали 45 от коэффициента вытяжки ( $\delta = -17^0$ )

Увеличение коэффициента вытяжки за счет уменьшения диаметра гильзы сопровождается уменьшением длины среднего шага винтовой линии с 50 до 47,3 мм. Это обуславливает эффективность ведения прошивки при отрицательных значениях угла раскатки (чашевидная схема), т.к. при этом уменьшается ширина контактной поверхности в выходном конусе валков, что предопределяет снижение энергосиловых параметров по сравнению с прокаткой без уменьшения диаметра гильзы.

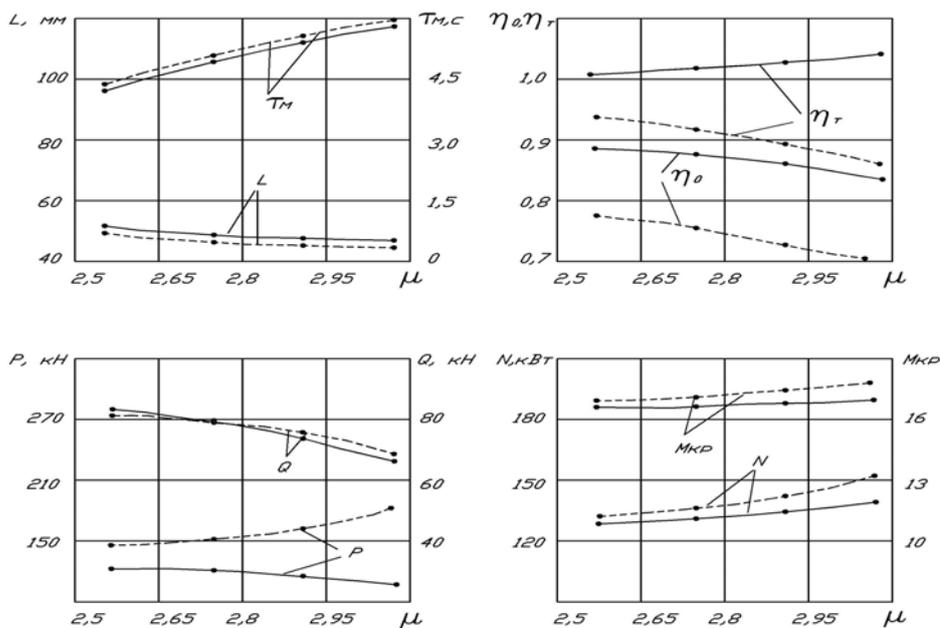


Рисунок 2 - Зависимость параметров процесса прошивки заготовок диаметром 60 мм из стали 45 от коэффициента вытяжки при уменьшении диаметра гильзы ( -  $\delta = -17^\circ$ , ----- -  $\delta = +17^\circ$ )

Исследование энергосиловых параметров процесса прошивки показало, что влияние коэффициента вытяжки на усилие металла на валки сказывается в большей степени, чем влияние угла подачи. Например, с увеличением  $\mu$  от 1,73 до 2,74 значение  $P$  возрастает при  $\beta = 18^\circ$  на 20 %, а с увеличением угла подачи от 12 до 30° усилие металла на валки повышается только на 5 %. Значительное влияние коэффициент вытяжки оказывает на осевое усилие металла на оправку. С повышением  $\mu$  от 1,73 до 2,74  $Q$  возрастает при  $\beta = 18^\circ$  на 42,3 %. Характер зависимостей  $P$  и  $Q$  от коэффициента вытяжки сохраняется практически одинаковым во всей области значений угла подачи (рисунок 1).

Отмечено значительное влияние коэффициента вытяжки на крутящий момент и мощность прошивки. Так, при увеличении  $\mu$  от 1,73 до 2,74 крутящий момент возрастает на 20,7 %, мощность – на 21,6 %, при этом удельный расход энергии повышается.

В то же время при увеличении коэффициента вытяжки за счет уменьшения диаметра гильзы усилие металла на валки, крутящий момент и мощность прошивки возрастают лишь на 8 – 10 %. Это объясняется, как уже было отмечено, уменьшением осевой подачи металла и площади контакта металла с валком. При этом усилие металла на оправку даже незначительно уменьшается (см. рисунок 2).

Проведенные исследования показали, что при повышенных значениях угла подачи ( $15^0$  и более) увеличение обжатия заготовки перед носком оправки, а также обжатия в пережиме валков не приводит к ухудшению качества гильз. Таким образом, в ряде случаев возможно и целесообразно получение из заготовки одного диаметра гильз нескольких типоразмеров в результате варьирования величины обжатия заготовки в пережиме при прошивке по чашевидной схеме.

На основании проведенных исследований предложен способ прошивки заготовок с повышенными обжатиями по диаметру в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками.

При разработке предлагаемого способа прошивки были учтены следующие факторы:

- обжатие перед носком оправки  $U_0$  составляет 6 - 8 %, как и при традиционном способе прошивки; такая величина  $U_0$  при прокатке в области значений угла подачи  $\beta = 12 - 15^0$  позволяет обеспечивать ведение процесса без центрального разрушения металла перед носком оправки, что, в свою очередь, является гарантией высокого качества гильз и труб по состоянию внутренней поверхности;

- «посад» гильзы по диаметру относительно диаметра заготовки может достигать 20 - 23 %, а величина обжатия заготовки в пережиме валков  $U_n - 30$  %;

- энергосиловые параметры - усилие металла на валок, крутящий момент, потребляемая мощность, осевое усилие металла на оправку - не должны существенно отличаться от значений, характерных для традиционного процесса прошивки;

- проработка структуры металла НЛЗ обеспечивается большими значениями коэффициента вытяжки, благоприятной схемой напряженно – деформированного состояния металла и эквивалентными кинематическими условиями на контактной поверхности рабочих валков с заготовкой–гильзой по длине очага деформации, образованного чашевидными валками;

- направляющие линейки по длине очага деформации позволяют обеспечивать овальность очага деформации в пределах 1,10...1,15, что

ограничивает течение металла в тангенциальном направлении и способствует уменьшению площади контактной поверхности металла с валком;

- прошивная оправка со сферической рабочей частью выполнена удлиненной, а начало ее раскатного конического участка совпадает с началом выходного конуса рабочих валков, что способствует стабилизации положения оправки в очаге деформации во время прошивки.

Для реализации нового способа прошивки с повышенными обжатиями заготовки был разработан и спроектирован инструмент прошивного стана: рабочие валки, оправки и направляющие линейки.

Исследования процесса прошивки с повышенными обжатиями в промышленных условиях проводили при прокатке труб размерами 108 x 10 и 95 x 11 мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 156 мм из стали 45 с использованием разработанного технологического инструмента при повышенных углах подачи. По действующей технологии для производства таких труб используется заготовка диаметром 120 мм.

Прошивку осуществляли при двух вариантах настройки стана на оправках диаметром 86 мм; при первом варианте настройки получили гильзу размерами 120 x 18 мм для прокатки труб размерами 108 x 10 мм, при втором варианте получили гильзы 119 x 16 мм для прокатки труб 95 x 11 мм. Всего прокатали шесть труб размерами 108 x 10 мм и четыре трубы размерами 95 x 11 мм, а для исследования очага деформации в стане затормозили заготовки при обжатии в пережиме 28 % и значениях угла подачи 8 и 12<sup>0</sup>.

Отмечено, что с увеличением коэффициента вытяжки от 2,2 до 3,86 энергосиловые параметры практически не изменились, процесс прошивки протекал стабильно. При этом было зафиксировано существенное повышение температуры гильзы после прошивки – от 1150 до 1200 °С - из-за разогрева металла при деформации во время прокатки, что, в свою очередь, позволяет осуществлять последующий процесс раскатки при более высокой температуре.

В результате визуального осмотра поверхности дефектов на трубах не обнаружено, при глубоком травлении отобранных образцов труб остатки литой структуры в металле не выявлены.

Таким образом, установлена принципиальная возможность прошивки НЛЗ в гильзы на «посад» с уменьшением диаметра исходной заготовки до 23 % за один проход при высокой точности геометрических размеров и отсутствии дефектов на внутренней и наружной поверхности гильз. Впервые при прошивке толстостенных гильз, с отношением  $D/S = 7$  и  $7,44$ , полученных из непрерывнолитой заготовки, достигнута полная проработка литой структуры исходной заготовки при значениях коэффициента вытяжки, равных соответственно 3,13 и 3,7.

Промышленное апробирование технологии прокатки труб на ТПА 50 - 200 с использованием процесса прошивки НЛЗ с повышенными обжатиями проводили по всему технологическому циклу изготовления труб различного назначения и размеров из сталей марок 35, 45, 40X, 15X5M из заготовок диаметром 156 и 196 мм (НЛЗ) и 140 мм.

При прокатке промышленной партии толстостенных труб с отношением диаметра к толщине стенки  $4,2...7,9$  установлено, что процесс прокатки толстостенных труб протекал устойчиво, нагрузки на главные приводы прокатных станов не превышали значений, регламентированных технической характеристикой оборудования.

В ходе промышленного апробирования проводилась также прокатка тонкостенных труб размерами 114 x 8 мм ( $D/S = 14,2$ ), 127 x 8 мм ( $D/S = 15,9$ ) и 114 x 9 мм ( $D/S = 12,7$ ) из сталей марок 20, 20X, 40X, 35Г1, 35 и др.

На основании результатов прокатки промышленной партии было установлено:

- процесс прошивки первых 200-250 тонн заготовок по чашевидной схеме протекал устойчиво, затем наблюдалось ухудшение условий захвата заготовок по причине снижения шероховатости рабочих валков прошивного стана и снижения их тянущей способности;

- износостойкость прошивных оправок составила в среднем 230 проходов, т.е. соответствовала износостойкости оправок при прошивке по бочковидной схеме;

- износостойкость направляющих линеек составила в среднем 132 прохода, причем верхняя линейка изнашивалась примерно в два раза интенсивнее нижней, из-за чего приходилось часто корректировать настройку стана.

Снижение износостойкости технологического инструмента прошивного стана, частая его замена, привели к некоторому уменьшению производительности и ухудшению качества труб. Например, выход годного по тонкостенным трубам составил 97,22 % при нормативе 98,8 %.

Очевидно, что успешное внедрение новой технологии прошивки непрерывнолитой заготовки с повышенными обжатиями из углеродистых и легированных сталей, возможно только при достаточно высокой износостойкости технологического инструмента, в особенности направляющих линеек, и хорошей тянущей способности рабочих валков.

**Четвертая глава** посвящена анализу напряженно-деформированного состояния и поля температур направляющих линеек.

Анализ поверхности линеек после эксплуатации, показал, что основной причиной выхода их из строя является растрескивание и выкрашивание поверхности на участках контакта с заготовкой. На основании этого было сделано предположение о том, что характер передачи тепла в области контакта с заготовкой аналогичен «тепловому удару». Поэтому актуальной задачей является расчет значений температуры и напряжений как в поверхностных слоях, так и в объеме линеек. Изучение полей этих параметров на различных этапах технологического цикла, выполняли методом математического моделирования с применением ЭВМ в несколько этапов.

Основное отличие предложенного подхода к анализу температурных условий работы направляющего инструмента от ранее выполненных теоретических исследований состоит в использовании математической модели, обеспечивающей комплексный расчет температуры и напряжений в заданных точках. Реализация такой модели позволила изучить зависимость температурных условий работы инструмента от конструкционных и эксплуатационных факторов процесса прошивки на исследуемом временном интервале.

На первом шаге расчета в связи с недостаточной изученностью теплового состояния инструмента было признано необходимым установить заданное распределение температуры при известных технологических параметрах и условиях процесса прошивки.

Для описания распределения температуры в инструменте использовали уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \chi \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_3^2} \right), \quad (1)$$

с начальным условием  $\theta = \theta_0 \quad (t = 0)$  (2)

и граничными условиями

$$\lambda_{11} \frac{\partial \theta}{\partial x_1} l_1 + \lambda_{22} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} l_2 + \lambda_{33} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} l_3 + q + \alpha(\theta - \theta_\infty) = 0 \quad (3)$$

на  $S_1$  и  $\theta = \theta_M$  на  $S_2$ , (4)

где  $\chi$  - коэффициент температуропроводности,  $\lambda_{ii}$  - коэффициент теплопроводности,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $\theta_\infty$  - температура окружающей среды,  $S_1$  и  $S_2$  - обозначение участков контакта поверхности с инструментом, охлаждаемых водой, и соответственно опорной поверхности линейек.

Для решения задачи, описываемой уравнениями (1) - (4), использовали метод И.Г. Бубнова - Б.Г. Галеркина. Применение данного метода в сочетании с алгоритмами метода конечных элементов (МКЭ) позволило свести рассмотренную задачу к системе линейных алгебраических уравнений.

Связь между температурой  $\theta$  конечного элемента и узловыми параметрами задавали в виде

$$\theta = [N]\{\Theta\}_e, \quad (5)$$

где  $[N]$  - матрица функций формы конечного элемента,  $\{\Theta\}_e$  - матрица столбец температуры в узлах произвольного элемента  $e$ .

В соответствии с методом Б.Г. Галеркина запись уравнения для одного элемента, соответствующего одному шагу по времени, имеет вид

$$\begin{bmatrix} \left( -\frac{1}{2}[C] + \frac{\Delta t}{3}[K] \right) & \left( \frac{1}{2}[C] + \frac{\Delta t}{6}[K] \right) \\ \left( -\frac{1}{2}[C] + \frac{\Delta t}{6}[K] \right) & \left( \frac{1}{2}[C] + \frac{\Delta t}{3}[K] \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\theta\}_i \\ \{\theta\}_j \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \{F\}_i \\ \{F\}_j \end{Bmatrix} = 0. \quad (6)$$

Здесь индексы  $i$  и  $j$  используются для обозначения двух узловых значений, разделенных во времени на величину шага длиной  $\Delta t$ .

Напряженное состояние направляющей линейки, находящейся в равновесии под действием внешних сил, описывается системами уравнений равновесия, уравнений связи напряжений и деформаций в форме закона Гука, уравнений связи перемещений и деформаций и граничными условиями, записанными в декартовой системе координат. Вариационное уравнение, соответствующее началу возможных перемещений, согласно вариационному принципу Ж.Лагранжа, записывали применительно к деформируемому телу в виде

$$\delta\Pi = \delta(U - W) = 0, \quad (7)$$

где  $U$ - потенциальная энергия деформаций,

$W$  - работа внешних сил,

$\Pi = U - W$  - полная потенциальная энергия системы.

Пренебрегая сосредоточенными силами и силами инерции, величину  $\Pi$  представили в матричной форме

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V (\{\varepsilon\}^T - \{\varepsilon_0\}^T) \{\sigma\} dV - \int_S \{u\} \{p\} dS = 0, \quad (8)$$

где  $\{\sigma\}$ - вектор напряжений,  $\{\varepsilon\}$  – вектор деформаций,  $\{\varepsilon_0\}$  – вектор деформаций, связанных с тепловым расширением,  $\{u\}$  - вектор перемещений,  $\{p\}$  - вектор поверхностной нагрузки.

Запись компонентов вектора напряжений имеет вид

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{12} \ \sigma_{13} \ \sigma_{23}\} \quad . \quad (9)$$

Компоненты вектора деформаций, записаны в той же последовательности

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{12} \ \varepsilon_{13} \ \varepsilon_{23}\}. \quad (10)$$

При разработке модели упругой среды, принимая тело изотропным, связь напряжений и деформаций записывали в виде

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad (11)$$

где  $[D]$  - матрица, содержащая упругие константы материала.

Соотношения между деформациями и перемещениями учитывали в виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i = 1 \dots 3; \quad j = 1 \dots 3. \quad (12)$$

где  $u$  – компоненты перемещений. Компоненты перемещений были выражены через узловые значения в виде

$$\{u\} = [N] \{U\}, \quad (13)$$

где  $[N]$  – матрица функций формы.

Для организации процесса вычислений в пакете Cosmos на каждом шаге времени была использована модель направляющей линейки прошивного стана, разработанная проф. ВлГУ А.В. Белевичем, программы, составленные в соответствии с разработанными им алгоритмами в виде блоков, были включены в программный комплекс.

В основу методики расчета были положены экспериментальные данные о структуре цикла прошивки. При этом были приняты во внимание виды нагрузки, характер их изменения и очередность действия на линейку на этапах технологического цикла.

По предложенной методике были выполнены расчеты температуры, напряжений и перемещений, характеризующих состояние линеек под действием нагрузки и в период паузы при прошивке различных партий заготовок.

Установлено, что, при прошивке партии трубных заготовок в количестве 20 штук в течение интервала времени 9 минут, несмотря на непрерывное охлаждение водой, перед началом каждого цикла прокатки происходило увеличение температуры в сечении и на поверхности линейки. Отмеченная тенденция связана с накоплением тепла во внутренних объемах линейки из-за недостаточной скорости отвода тепла при охлаждении. Одновременно с этим выявлена другая тенденция: увеличение значения растягивающих напряжений в объеме линейки и на ее рабочей поверхности.

Очевидно, что существующий режим охлаждения линеек путем подачи воды на наружную поверхность недостаточно эффективен. Особенно тяжелыми становятся условия работы линеек при прошивке с повышенными (до 30 %) обжатиями, при этом возрастает площадь контактной поверхности металла с линейкой, несколько увеличивается время контакта и усилие на линейку.

Для уменьшения амплитуды растягивающих напряжений предложено изменить тепловой режим эксплуатации линеек путем дополнительного охлаждения через внутренние каналы. Для решения задачи повышения стойкости линеек путем изменения конструктивных параметров в качестве переменных математической модели были выбраны следующие факторы: число каналов; диаметр каналов; положение каналов в теле линейки.

При выполнении расчетов на каждом шаге были заданы следующие параметры технологического цикла: машинное время прошивки - 10 с, время паузы - 8 с. Расчеты выполнены на интервале времени 900 с, что соответствовало 50-ти циклам прошивки. Рассмотрены результаты расчетов вариантов конструкции линеек, охлаждаемых водой, с использованием одного-, двух- и четырех каналов.

В результате расчетов было показано, что наиболее эффективное охлаждение линейки наблюдается при использовании конструкции с четырьмя охлаждающими каналами.

Расчеты показали, что наиболее высокий уровень сжимающих напряжений  $\sigma_x$  отмечается на поверхности контакта линейки с гильзой. Далее в слое толщиной 5,5 мм величина  $\sigma_x$  изменяется от -900 до -80 МПа. С удалением от каналов величина  $\sigma_x$  изменяется незначительно, при этом напряжения остаются сжимающими на большей части сечения. Вблизи центральных каналов  $\sigma_x$  становятся растягивающими. Значения  $\sigma_x$  на данных участках составляет + 250 МПа. Наиболее высокий уровень значений составляющей  $\sigma_y$  (до -800 МПа) наблюдается в слое, расположенном под поверхностью контакта с деформируемым металлом.

Это позволяет считать охлаждение с помощью каналов благоприятным с точки зрения состояния поверхностного слоя литейных изделий. Недостатком рассмотренной схемы охлаждения является высокий уровень сжимающих напряжений (до  $-800$  МПа) между внутренними каналами и концентрация напряжений на участках вблизи каналов. Этот эффект можно нивелировать путем подбора геометрических параметров каналов и изменения характера распределения температуры по поверхности линейки.

На основании приведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- сходство распределения температуры на 1-м, 5-м и 50-м циклах прошивки показывает, что рассмотренная конструкция линейки с каналами и заданные режимы охлаждения обеспечивают на заданном интервале времени стабильность теплового режима линейки перед началом очередного цикла прошивки.

- конструкция линейки с 4-мя каналами и заданный режим охлаждения при прошивке обеспечивают уменьшение температуры поверхности литейных изделий до  $450 - 400^{\circ}\text{C}$  перед началом каждого следующего цикла прошивки. Температура в центральной части к началу очередного цикла составляет  $120 - 200^{\circ}\text{C}$ .

**В пятой главе** представлены результаты промышленного опробования предложенной конструкции направляющей линейки с водоохлаждаемыми каналами.

С учетом результатов проведенных исследований в заводских условиях были изготовлены, опробованы и подвергнуты исследованию по видам и размерам износа, направляющие линейки с двумя каналами для охлаждения.

После прошивки промышленных партий заготовок изношенный направляющий инструмент с каналами был подвергнут анализу с однотипным инструментом, эксплуатировавшимся при тех же условиях. Установлено, что при одинаковом числе циклов прошивки площадь изношенных участков направляющих литейных изделий с каналами ниже по сравнению с заводскими. При этом на поверхности литейных изделий, охлаждаемых с помощью каналов, отсутствовали трещины.

Проверка на модели напряженно-деформированного состояния и поля температур литейных изделий с учетом реальных условий прошивки в процессе промышленного опробования, проведенного в заводском эксперименте, показала

снижение уровня растягивающих напряжений в поверхностных слоях линейки при ее охлаждении снаружи и изнутри.

### **Основные результаты и выводы по работе**

1. Анализ процессов производства бесшовных труб показал, что перспективным направлением совершенствования технологического процесса является использование непрерывнолитой заготовки. Вместе с тем существующие процессы прошивки не обеспечивают стабильное получение из такой заготовки качественной гильзы вследствие низкого качества исходного металла и наличия дефектов в осевой зоне НЛЗ. Технологические схемы с предварительным деформированием НЛЗ методом винтовой прокатки, обеспечивающим большие макросдвиговые деформации, способствующие проработке литой структуры, являются весьма эффективными, но требуют использования дополнительного технологического передела.

2. Анализ качества непрерывнолитой заготовки показал наличие усадочной рыхлости по оси заготовки и центральной пористости различной степени, при деформации таких заготовок имело место вскрытие полости, начиная со степени деформации 2 – 3 %. Установлено, что предварительная винтовая прокатка заготовок диаметром 156, 196 и 228 мм с коэффициентом вытяжки 1,5 – 2,7 обеспечивает степень проработки литой структуры, достаточную для получения заданного уровня свойств и высокого качества внутренней поверхности труб.

3. С целью интенсификации процесса прошивки разработан новый способ прошивки заготовок при повышенных обжатиях в пережиме, обеспечивающий требуемую проработку структуры для достижения заданного уровня свойств, увеличение точности прокатываемых труб, снижение удельного расхода энергии при прошивке. Разработанный способ послужил основой для создания новой технологии прошивки непрерывнолитой заготовки.

4. Разработана комплексная методика исследований и проектирования направляющих линеек прошивного стана, включающая следующие этапы:

-математическое моделирование с помощью вычислительной системы Cosmos напряженно-деформированного состояния направляющей линейки с

учетом распределения температуры по её объему с целью определения рациональных режимов прошивки и охлаждения линейки;

-проверку результатов моделирования в промышленных условиях при прошивке НЛЗ из стали различных марок на прошивном стане ТПА 50-200 ВТЗ.

5. Разработаны новый способ прошивки в двухвалковом стане и конструкция направляющей линейки с внутренними каналами для охлаждения, позволяющие обеспечивать высокое качество получаемых труб при повышении износостойкости направляющего инструмента и увеличении производительности за счет сокращения времени на замену инструмента. Определены рациональные технологические режимы и параметры конструкции направляющей линейки, при которых в приповерхностном объеме линейки действуют только сжимающие напряжения, а перепад температуры по сечению линейки составляет не более 280<sup>0</sup>С.

6. На ТПА 50-200 ОАО ВТЗ с использованием разработанной технологии прошивки НЛЗ проведена промышленная прокатка труб повышенной точности в количестве свыше 13 тысяч тонн размерами DхS=139 - 194 х 8 - 36 мм. Выход годного составил 99,08 % по сравнению с 98,8 % по нормативной документации. Отмечено улучшение качества труб по состоянию внутренней поверхности при их прокатке по новым режимам.

7. По итогам выполненной технико-экономической оценки эффективности нового процесса было показано, что для получения высококачественных горячекатаных труб целесообразно осуществлять прокатку НЛЗ с обжатием заготовки в пережиме до 30 %.

#### **Публикации по теме диссертации.**

1. Опыт использования непрерывнолитой заготовки из углеродистой стали при производстве бесшовных труб/ К.Л. Марченко, В.Ю. Кузнецов, М.М. Фадеев и др.// Сталь. 2003. № 8. С. 53 - 54.
2. Расчетный анализ теплового и напряженного состояния направляющих линеек при прошивке труб/ А.В. Белевич, Б.А. Романцев, К.Л. Марченко и др. //Сб. тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Теория и технология

процессов пластической деформации – 2004», посвященной 85-летию научной школы МИСиС по обработке металлов давлением. 26 - 27 октября 2004 г. М: МИСиС, 2004. С. 104 - 105.

3. Чикалов С.Г., Неклюдов И.В., Марченко К.Л. Современное состояние и некоторые проблемы производства бесшовных труб в России// Сталь. 2004. № 9. С. 41 - 44.
4. Прошивка непрерывнолитой заготовки при повышенном обжатии/ К.Л. Марченко, К.А. Поляков, Б.А. Романцев и др.// Производство проката. 2005. № 2. С.14 - 17.
5. Пат. 2245751 РФ. Способ получения гильз / В.В. Фролочкин, В.Ю. Кузнецов, К.Л. Марченко и др. БИ № 4. 2005 г.
6. Марченко К.Л. Совершенствование технологии прошивки непрерывнолитой заготовки// Тр. XIII междунар. конф. «Трубы – 2005». Челябинск, 2005 г.
7. Влияние способа и степени деформации на структуру и свойства труб, изготавливаемых из непрерывнолитой заготовки/ Марченко К.Л., Кузнецов В.Ю., Романцев Б.А., Фадеев М.М.// Производство проката. 2006. № 4. С.26 - 30.