

На правах рукописи



Парфенов Владислав Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПРОШИВКИ НА ДВУХВАЛКОВЫХ ВИНТОВЫХ СТАНАХ
МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА
ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГИЛЬЗ
ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН).

Научный руководитель:

Шелест Анатолий Ефимович, доктор технических наук, профессор.

Консультант:

Чепурин Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Чикалов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук.

Заместитель Генерального Директора по научно-техническому развитию и техническим продажам Публичного акционерного общества «Трубная металлургическая компания», г. Москва.

Скрипаленко Михаил Михайлович, кандидат технических наук.

Доцент кафедры Обработки металлов давлением Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС), г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет».

Защита состоится «27» ноября 2019 года в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д. 002.060.02 на базе ИМЕТ РАН по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Калашников И. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интенсивное развитие машиностроения, теплоэнергетики, химической, нефтедобывающей и газовой промышленности требует не только значительного увеличения объема производства труб, но и постоянного улучшения их качества и повышения эффективности технологии. В мировой практике все большую долю труб массового назначения получают из непрерывнолитых заготовок. В СССР первый опыт использования непрерывнолитой круглой заготовки был осуществлен еще в 1955г. Подробное исследование качества полученных труб показало перспективность и целесообразность использования непрерывнолитого металла в трубном производстве. Отечественные и зарубежные тенденции получения бесшовных горячекатанных труб с каждым годом увеличивают использование непрерывнолитых заготовок, что делает весьма актуальным разработку новых методов оценки воздействия пластической деформации на структуру заготовки-гильзы, учитывающих винтовое движение прошиваемой заготовки и ее циклическую деформацию.

При использовании непрерывнолитых или частично деформированных заготовок одной из актуальных задач является предварительное или полное преобразование их литой структуры. Если при продольной прокатке литая структура может быть преобразована при коэффициенте вытяжки $\mu = 8 \div 10$, то при винтовой прокатке – при $\mu \geq 4$. Можно предположить, что подобное различие при винтовом движении заготовки-гильзы объясняется развитой поперечной деформацией, которая за счет макросдвигов способствует проработке литой структуры.

Вместе с тем, широкий диапазон изменения настроечных параметров прошивных станов вызывает определенные трудности в совершенствовании условий прошивки для достижения увеличения интенсивности поперечной деформации. В частности, для процесса двухвалковой винтовой прошивки преодоление этих трудностей возможно с помощью математической модели, которая позволяет на каждом шаге подачи рассчитывать параметры циклического формоизменения. Следует отметить, что в указанном процессе форма оправки и направляющих линеек, а также их положение в очаге деформации являются теми факторами, которые определяют условия формоизменения металла.

Поэтому детальное исследование влияния настроек стана на долю поперечной деформации на каждом шаге подачи представляется актуальным, что позволит предложить конкретные рекомендации по обеспечению качества гильз из непрерывнолитых заготовок.

Цели и задачи работы

Целью работы является совершенствование процесса двухвалковой винтовой прошивки, основанное на математическом моделировании параметров циклического формоизменения по длине очага деформации, обеспечивающих повышение качества гильз за счет увеличения интенсивности проработки литой структуры непрерывнолитых заготовок.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать методику оценки интенсивности проработки литой структуры на каждом шаге подачи при прошивке на двухвалковых станах.
- Усовершенствовать математическое описание трехмерного течения металла на каждом шаге подачи, позволяющее свести к минимуму расхождение между экспериментальными и расчетными (по математической модели) значениями площади поперечного сечения заготовки-гильзы по всей длине очага формоизменения. Обеспечить расчет характеристик очага формоизменения с учетом поперечного течения металла, позволяющих определить настроечные параметры двухвалковых прошивных станов.
- Разработать методики расчета параметров циклического формоизменения, в том числе доли поперечной деформации, в зависимости от формы и положения направляющего инструмента (линеек) и оправки.
- Исследовать по всей длине очага формоизменения влияние на долю поперечной деформации следующих параметров прошивки: формы и положение направляющего инструмента и оправки, угла подачи, обжатия в пережиме, диаметра заготовки.
- Установить рациональные форму и положение направляющего инструмента, позволяющие увеличить проработку структуры непрерывнолитой заготовки, и на их основе разработать рекомендации по совершенствованию настроек промышленного стана.

Научная новизна

- Предложены новые аналитические зависимости для расчета доли поперечной деформации по всей длине очага формоизменения при двухвалковой винтовой прошивке.
- Получены новые аналитические зависимости для расчета геометрических параметров очага деформации, учитывающие течение металла в поперечном направлении.
- Определены новые аналитические зависимости для расчета профиля линейки и оправки, позволяющие оценить влияние профиля инструмента на параметры деформации.
- Исследовано влияние на долю поперечной деформации следующих настроек стана: форма и положение направляющего инструмента (гребень линейки у носка оправки и в пережиме); форма оправки и доля оправки в конусе прошивки, составляющая от 5% до 70%; угол подачи от 8° до 14°; обжатие в пережиме от 8% до 14%; диаметр заготовки (прошивка «размер в размер», «на посад» и «на подъем»).

Практическая значимость

- Усовершенствованная математическая модель МЭИ может использоваться для разработки технологий прошивки, способствующих проработке структуры гильзы.

- Произведено совершенствование настроек стана, обеспечивающих повышение качества гильз для действующих режимов прошивки на Северском трубном заводе (ПАО «СТЗ»).
- Разработана и запатентована новая форма направляющего инструмента, позволяющая повышать проработку структуры непрерывнолитых заготовок (патент РФ № 2518040 «Технологический инструмент для прошивки непрерывнолитых заготовок»).

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие во всех этапах работы: постановке целей и задач исследования, планировании и выполнении экспериментов, включая обработку и анализ полученных результатов, формулировке выводов, рекомендаций и подготовке материалов к публикации, а именно:

- в разработке методики аналитического представления трехмерного течения металла при винтовой прокатке, учитывающей, в частности, течение металла в тангенциальном направлении;
- в разработке усовершенствованной математической модели для определения параметров очага деформации при винтовой прошивке, учитывающая течение металла в поперечном направлении;
- в разработке новой методики расчета доли поперечной деформации на каждом шаге формоизменения при винтовой прошивке;
- в обработке и интерпретации экспериментальных данных, полученных при прошивке на двухвалковом стане ПАО «СТЗ»;

Методология и методы исследования:

Для исследования процессов двухвалковой винтовой прошивки использовалось математическое моделирование.

Математическое моделирование производилось на основе усовершенствованной математической модели МЭИ. Построение профилей поперечных сечений темплетов, полученных из заторможенной заготовки-гильзы, производилось с использованием САД системы Компас-3D. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при прошивке на ПАО «СТЗ».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая методика расчета течения металла в поперечном направлении при винтовой прошивке на двухвалковых станах с уточненной геометрией поперечных сечений заготовки-гильзы.
2. Методика расчета доли поперечной деформации с учетом цикличности процесса формоизменения.
3. Особенности влияния настроек стана на долю поперечной деформации по всей длине очага формоизменения.
4. Результаты совершенствования действующих режимов прошивки, основанные на применении настроек, способствующих более интенсивной проработке структуры гильзы.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: Всероссийская конференция молодых ученых «Будущее машиностроение России», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 г.; Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Россия, Москва, МЭИ, 2011, 2012, 2013, 2014 г.; XXXVI The International Studenta Scientific Session "The Applications of Information Technology at Metalurgy, Materials Science and Production Engineering Development", Poland, Czestochowa, 2012; IXI международный конгресс прокатчиков, Россия, Череповец, 2013 г.; 14 International Scientific Conference entitled "New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering", Poland, Czestochowa, 2013 г.; Российская ежегодная конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов», Россия, Москва, ИМЕТ РАН, 2012, 2013 г.

Публикации

Основное содержание диссертационной работы представлено в 4 научных статьях, которые входят в издания, включенные в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 89 наименований и приложения, изложена на 108 страницах и содержит 42 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы, включающая научную новизну, практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту. Обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Изложены цели и задачи исследования.

В **первой главе** на основе обзора научно-технической литературы представлены особенности технологии двухвалковой винтовой прошивки.

Проведен анализ работ Павлова Иг.М., Тетерина П.К., Емельяненко П.Т., Потапова И.Н., Финкельштейна Я.С., Галкина С.П., Пляцковского О.А., Друяна В.М., Голубчика Р.М., Меркулова Д.В., Чепурина М.В. и других авторов, посвященных аналитическому описанию процесса формоизменения при прошивке в двухвалковых станах.

Изучение и анализ научно-технической литературы по процессу моделирования винтовой прошивки в двухвалковых станах позволил установить, что задачи по совершенствованию технологии винтовой прошивки осуществлялись при следующих особенностях:

1. В существующей математической модели МЭИ расчет поперечного сечения заготовки-гильзы производился через эквивалентные эллипсы, без учета, наплывающего на валки металла.

2. Расчет доли поперечной деформации проводился по параметрам конечного формоизменения без учета истории формоизменения при циклическом процессе винтовой прокатки.

3. Отсутствуют исследования по влиянию на долю поперечной деформации таких параметров как форма и положение направляющего инструмента и оправки, угол подачи, величин обжатия и коэффициентов овализации, оказывающих существенное влияние на истечение металла в поперечном направлении.

Аналитический обзор позволил сформулировать цель диссертационной работы и выделить задачи, подлежащие решению.

Во **второй главе** приведена новая методика анализа течения металла при винтовой прошивке.

При прошивке наибольшую абсолютную величину имеет логарифмический коэффициент уменьшения толщины стенки гильзы. Объем, смещенный по высоте, распределяется между объемами, смещенными в поперечном и осевом направлениях. Для определения соотношения между смещенными объемами составим уравнение постоянства объема в виде баланса логарифмических коэффициентов (баланса смещенных объемов), разделив правую и левую часть на $\ln \frac{1}{\lambda}$:

$$\frac{\ln \theta}{\ln \frac{1}{\lambda}} + \frac{\ln \mu}{\ln \frac{1}{\lambda}} = 1, \quad (1)$$

где θ , λ и μ - показатели тангенциальной, радиальной и осевой деформации соответственно.

Первое слагаемое в левой части (1) описывает поперечное течение металла, определяя долю истинного обжатия по стенке (знаменатель), направленную на растяжение срединной окружности (числитель). Второе слагаемое выражает долю, обращенную в удлинение гильзы и характеризует осевое истечение металла. Введем обозначение для долей деформации:

$$A_{\theta} = \frac{\ln \theta}{\ln \frac{1}{\lambda}} \text{ и } A_{\mu} = \frac{\ln \mu}{\ln \frac{1}{\lambda}}$$

В теории сортовой прокатки отношение, характеризующее поперечную деформацию и полностью совпадающее по написанию с A_{θ} , называют показателем уширения. Соответственно, величину A_{θ} целесообразно назвать показателем тангенциальной раскатки. Для отношения A_{μ} специального термина не предусмотрено, поскольку имеет место равенство $A_{\mu} = 1 - A_{\theta}$, но по физической сущности A_{μ} является показателем продольной деформации (вытяжки).

Теоретический показатель тангенциальной раскатки A_{θ} для осесимметричной деформации с осевым удлинением лежит в пределах от -1 до 1. Отрицательные значения A_{θ} соответствуют схеме деформации с двумя главными компонентами сжатия и одним удлинения. Значения $A_{\theta} = -1$ приходится на случай прокатки сплошной круглой заготовки. Значению $A_{\theta} = 0$ отвечает плоская схема деформации с отсутствием тангенциальной раскатки и смещению всего обжимаемого объема металла только в осевом направлении. При $A_{\theta} = 1$ отсутствует удлинение заготовки, весь смещенный по толщине стенки объем трансформируется в увеличение периметра срединной окружности.

Оценка доли поперечного течения металла по параметрам конечного формоизменения не учитывает истории деформации по длине очага формоизменения, в связи с этим более правильным является оценка по параметрам циклического формоизменения.

Доля поперечной деформации A_θ показывает соотношение между поперечной и продольной деформацией. Отметим, что рассчитать коэффициент $\ln \theta$ достаточно сложно в силу особенностей течения металла при винтовой прокатке. Легче определить коэффициент радиальной деформации. Тогда из условия постоянства объема можно найти значение $\ln \theta$.

Истинная радиальная деформация на шаге подачи до и после встречи с оправкой:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{R_i}{R_{i-1} \cdot \xi_{i-1}}, \quad \varepsilon_r = \ln \frac{S_i}{S_{i-1}},$$

где R и S – текущие радиус деформируемой заготовки-гильзы и толщина стенки; ξ – коэффициент овализации; i и $i-1$ – номер рассматриваемого и предыдущего сечения на шаге подачи.

Истинная осевая деформация:

$$\varepsilon_l = \ln \frac{F_{i-1} + F_i}{F_i + F_{i+1}} = \ln \frac{h_{i+1}}{h_i},$$

где F_{i-1}, F_i, F_{i+1} – площади поперечных сечений, h_i – длина текущего шага подачи.

Из условия постоянства объема тангенциальная деформация:

$$\varepsilon_\theta = -(\varepsilon_l + \varepsilon_r).$$

Доля поперечной деформации на шаге подачи:

$$A_\theta = -\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_r} = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_l}{\varepsilon_r} = 1 + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_r}.$$

Средняя доля поперечной деформации:

$$A_{\theta cp} = \frac{\int_A^F A_\theta dx}{L_{A-F}},$$

где A – координата входа заготовки в очаг деформации, F – координата выхода гильзы из очага деформации; L_{A-F} – полная длина очага деформации.

Из приведенных выкладок следует, что расчет доли поперечной деформации является актуальной задачей, позволяющей производить оценку степени преобразования литой структуры при прошивке. Однако расчет необходимо производить не по параметрам конечного формоизменения, а по параметрам циклического формоизменения, учитывающих историю процесса деформирования в очаге формоизменения.

Указанные положения являются основой методики оценки эффективности проработки литой структуры на каждом шаге подачи при прошивке на двухвалковых станах с использованием критерия «доля поперечной деформации».

Таким образом, с использованием математического моделирования процесса прошивки, представляется возможным производить

совершенствование режимов прошивки с использованием данного критерия, при условии, что математическая модель подтверждается экспериментальными данными.

Данное заключение формулирует основные направления совершенствования математической модели МЭИ, что является одной из главных задач, поставленных в настоящей работе.

В третьей главе представлена методика совершенствования существующей математической модели МЭИ.

Для обеспечения описания более полной и точной картины формоизменения при прошивке на двухвалковых станах, на основании существующей математической модели МЭИ, произведено её усовершенствование путем расчета поперечных сечений заготовка-гильза по всей длине очага формоизменения с учетом «напывающего» металла на валки.

Как было показано выше при производстве труб из литой заготовки качество готовой продукции напрямую связано с величиной вытяжки при прошивке. До настоящего времени определение вытяжки при прошивке производили только с учётом течения металла в продольном направлении. Однако такой подход не соответствует особенностям реального процесса прошивки. В данной работе была сделана попытка учёта трехмерного течения металла при винтовой прокатке.

Показано, что суммарный коэффициент вытяжки от исходной заготовки до сечения носка оправки μ_0 можно определить по формуле:

$$\mu_0 = \frac{1}{(1-u_0)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{u_0}{(1-u_0) \cdot n} \cdot \frac{1-q_m^{n-1}}{1-q_m}},$$

где u_0 – обжатие перед носком оправки; n - число шагов до носка оправки; q_m - доля металла идущего на уширение.

Влияние величины q_m , числа полуоборотов до носка оправки n и обжатия перед носком оправки u_0 на значение суммарного коэффициента вытяжки до носка оправки μ_0 в числовом выражении проиллюстрированы на рис. 1.

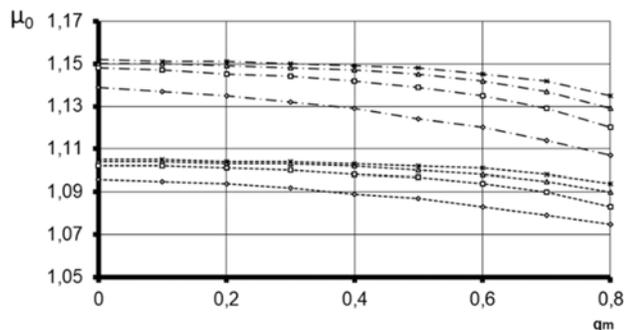


Рисунок 1. Зависимость суммарных коэффициентов вытяжки μ_0 до носка оправки, от доли металла q_m , идущего на уширение: \blacklozenge - $n=5$, \blacksquare - $n=10$, \blacktriangle - $n=15$, \times - $n=20$, - - - $u_0=5\%$, - - - $u_0=7\%$

Видно, что при одном и том же значении q_m и одном и том же обжатии перед носком оправки u_0 вытяжка растёт вместе с увеличением количества

циклов n , и этот рост вытяжки тем интенсивнее, чем меньше металла идёт в тангенциальном направлении.

При одинаковом числе оборотов n значение суммарных коэффициентов вытяжки μ_0 с ростом q_m уменьшается, что естественно, так как всё большая часть металла идёт на уширение.

Так как при расчёте суммарных коэффициентов вытяжки, необходимо учитывать долю металла q_m , идущего на уширение, то перейдём к оценке величины q_m .

Получено, что долю металла, идущего на уширение можно найти по формуле:

$$q_m = (1 - k_\lambda)^{2/3},$$

где $k_\lambda = \frac{1}{1 + \frac{\psi \cdot g \cdot \xi \left(\frac{\omega_\beta}{\omega_\lambda}\right)^{\alpha_t}}{\sqrt{\chi}}}$ - коэффициент определяющий долю металла,

ушедшего в длину, где ψ - характеристика контактного трения ($0 < \psi \leq 1$), которая в первом приближении может быть определена как $\psi \approx 2\mu$; g - параметр, учитывающий влияние жёстких концов прокатываемой полосы ($\frac{1}{\sqrt{2}} < g < 1$); ξ - параметр, учитывающий влияние стенок калибра ($0 < \xi < 1$,

если стенки калибра сдерживают уширение, $\xi=1$ при прокатке в гладких валках, $\xi > 1$ в калибрах типа разрезных); ω_β - сумма проекций на вертикальную плоскость тех поверхностей, через которые осуществляются

поперечные течения; ω_λ - сумма начальной и конечной площади поперечного сечения заготовки;

α_t - характеристика материала прокатываемой полосы, в частности для среднеуглеродистой стали

$\alpha_t = 1 + 0,4 \frac{t}{1000}$, где t - температура прокатки; χ - показатель высотной деформации.

С учетом металла, идущего на уширение, произведено усовершенствование математического описания трехмерного течения металла на каждом шаге подачи, позволяющее свести к минимуму расхождение между экспериментальными и расчетными (по математической модели) значениями площади поперечного сечения заготовка-гильза по всей длине очага формоизменения. Учет наплывающего металла на валки при прошивке на двухвалковых станах приводит к сокращению шага подачи, что отражается на всех параметрах циклического формоизменения.

Моделирование процесса прошивки в усовершенствованной математической модели МЭИ производится с учетом наплывающего металла на валки, что дает возможность производить расчет режимов прошивки наиболее приближенных к реальным.

В четвертой главе представлены результаты математического моделирования процесса прошивки заготовок с использованием усовершенствованной математической модели МЭИ.

Произведено моделирование действующих режимов прошивки Северского трубного завода. Сделана оценка влияния на долю поперечной деформации по длине очага формоизменения следующих параметров прошивки: формы и положение направляющего инструмента и оправки, угла подачи, обжатия в пережиме, диаметра заготовки.

Влияние угла подачи и диаметра заготовки. С помощью усовершенствованной математической модели прошивки были просчитаны режимы на разных углах подачи при прошивке «на посад», «размер в размер» и «на подъем» (рис. 2а).

Из представленных данных следует, что для повышения проработки структуры заготовки прошивку надо проводить на наименьших углах подачи. Действительно, тогда увеличивается количество циклов и количество частных обжатий, что приводит к росту объемных макросдвигов.

Следует заметить, что влияние угла подачи при прошивке «на подъем», «размер в размер» и «на посад» различно, причем большее влияние угол подачи оказывает на долю поперечной деформации при режиме прошивки «на посад».

Влияние положения оправки. Оправка является одним из основных видов инструментов при прошивке сплошных заготовок в гильзу. П.Т. Емельяненко показал, что при выдвигании оправки на 50 мм в сторону входа заготовки осевое скольжение возрастает, при выдвигании оправки на 50 мм в сторону выхода гильзы скольжение уменьшается, т.е. общепринятый коэффициент осевой скорости возрастает. В этой работе сделан вывод: с точки зрения производительности предпочтительно вести процесс при смещении оправки в конус раскатки.

Однако процесс прошивки, как любой процесс обработки металлов давлением, следует рассматривать не только как формообразующий, но и как процесс, воздействующий на изменение структуры. Этого в указанной работе не было сделано.

В настоящей работе сделана попытка рассмотреть и учесть влияние положения оправки на внутреннее строение заготовки-гильзы, которое оценивали по изменению параметров циклического формоизменения и доли поперечной деформации. При этом в каждом единичном обжатии определяли коэффициенты деформации по трем осям, число циклов на отдельных участках очага деформации, накопленную степень деформации сдвига, долю поперечной деформации и сопротивление деформации.

Для анализа положения оправки в очаге деформации был выбран относительный параметр $\rho = (L_I / (L_I + L_{II})) * 100\%$, показывающий долю длины рабочего участка оправки, расположенного в конусе прошивки, к полной длине рабочего участка оправки

Четыре заводских режима были рассчитаны на усовершенствованной математической модели МЭИ. Для них был определен показатель средней

доли поперечной деформации по всему очагу формоизменения. На рис. 2б. показано изменение $A_{\theta_{ср}}$ в зависимости от положения оправки (доли оправки в конусе прошивки ρ).

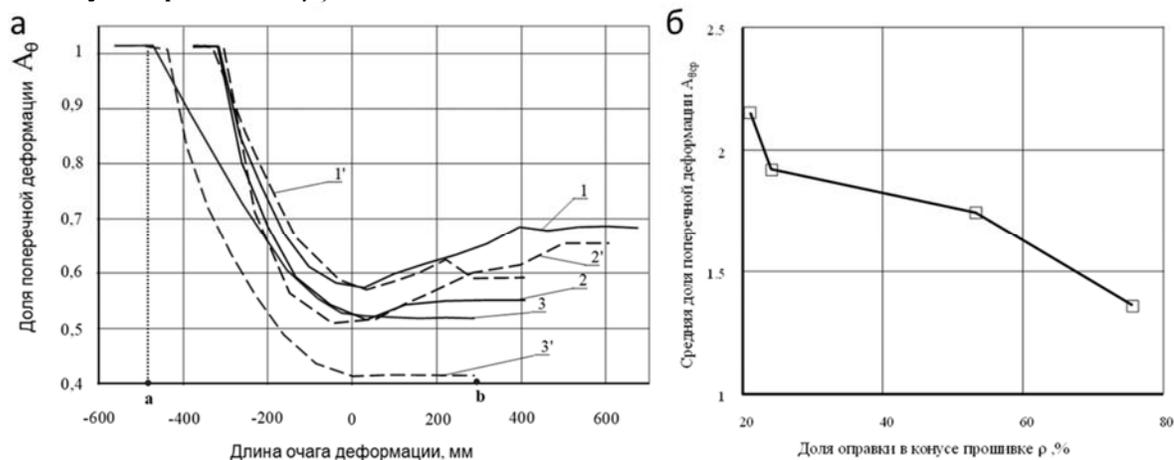


Рисунок 2. Изменение доли поперечной деформации. а- изменение доли поперечной деформации по длине очага формоизменения при углах подачи α : кривые 1-3 $\alpha=8^{\circ}$; 1'-3' $\alpha=12^{\circ}$; 1, 1'-прошивка «на подъем» ($D_3 = 360$ мм, $D_{\Gamma} = 400$ мм); 2, 2'- прошивка «размер в размер» ($D_3 = 360$ мм, $D_{\Gamma} = 360$ мм); 3, 3'- прошивка «на посад» ($D_3 = 400$ мм, $D_{\Gamma} = 360$ мм). б- зависимость средней доли поперечной деформации от положения оправки

С увеличением ρ средняя доля поперечной деформации $A_{\theta_{ср}}$ уменьшается, т.е. чем больше оправка выдвигается за пережим валков (в конус прошивки), тем ниже $A_{\theta_{ср}}$. Отметим, что на рис. 2б при $\rho = 75,5$ %, прошивка ведется по маршруту 360->350x73 ($D_3 \rightarrow D_{\Gamma} \times S_{\Gamma}$), а при $\rho = 53,2$ % по маршруту 360->370x89, т.е. работа «размер в размер»; при $\rho = 24,1$ и 21,1 % по маршрутам соответственно, 360->440x62,5 и 360->450x65, т.е. работа «на подъем».

Показатель $A_{\theta_{ср}}$ был рассчитан для 16 модельных режимов прошивки при различных обжатиях в пережиме валков $u_{п} = 8 \div 14$ % и различном положении оправки. На рис. 3 показано изменение средней доли поперечной деформации от выдвигения оправки за пережим валков (от отношения ρ) для обжатий перед носком оправки $u_0 = 5, 6, 7$ и 8%. Из рис. 3 следует, что при $u_{п} = const$, чем больше u_0 , тем выше значения A_{θ} . При $u_0 = const$, чем больше $u_{п}$, тем меньше значения A_{θ} .

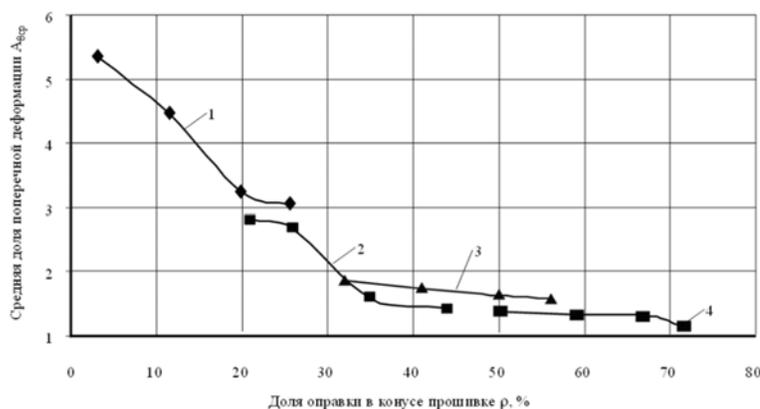


Рисунок 3. Зависимость средней доли поперечной деформации от положения оправки:
 1 – обжатие в пережиме валков $u_{п} = 8$ %; 2 – $u_{п} = 10$ %; 3 – $u_{п} = 12$ %; 4 – $u_{п} = 14$ %

Влияние формы рабочего участка оправки. Для расчетов были взяты 6 форм рабочих частей оправок (рис. 4а, поз. 1-6, участок II), при этом одинаковой принималась форма участков: носка, калибрующего, обратного конуса и стержня (рис. 4, участки I, III, IV и V).

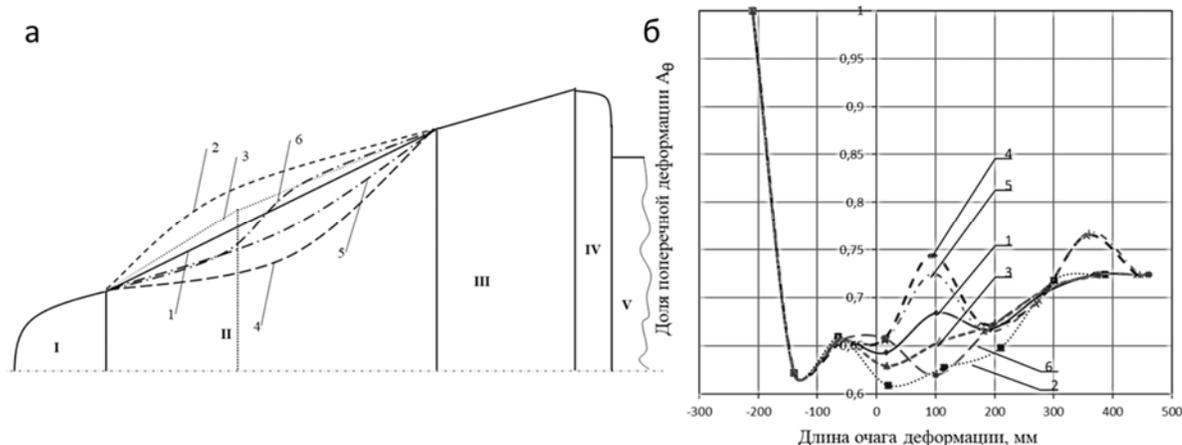


Рисунок 4. Влияние формы рабочего участка оправки. а-форма рабочей части прошивной оправки: I – участок носка оправки; II – рабочий участок; III – калибрующий участок; IV – участок обратного конуса, V – стержень оправки; 1 – конический рабочий участок; 2 – сферический; 3 – «двухконусный»; 4 – «шлемовидный», вогнутый; 5 – «Толмачев», 6 – [Новиков] с линейно-возрастающим законом изменения деформации. б- распределение доли поперечной деформации по длине очага деформации. 1 – конический рабочий участок; 2 – сферический; 3 – «двухконусный»; 4 – «шлемовидный», вогнутый; 5 – «Толмачев», 6 – с линейно-возрастающим законом изменения деформации

Для рабочего участка оправки с линейно возрастающим законом изменения деформации (рис. 4а, поз. б), итерационным методом через шаг подачи была подобрана форма оправки, обеспечивающая линейное возрастание по длине очага деформации по стенке гильзы: $\ln(S_i/S_{i-1}) = a + b \cdot x$.

Анализируя режимы с помощью критерия «доля поперечной деформации», можно сделать вывод о преимуществе использования оправки с линейно возрастающим законом изменения деформации (рис. 4б). При использовании оправок данного типа деформация будет увеличиваться монотонно, и, возможно, такое постепенное увеличение проработки литой структуры заготовки позволит получить более качественный металл на прошитой гильзе.

Анализ режимов с использование критерия «доля поперечной деформации» приведен в табл. 1. Режим с линейно-возрастающим законом изменения деформации имеет наибольшую долю поперечной деформации.

Табл. 1

№ оправки (рис. 4)	1	2	3	4	5	6
$A_{\theta \text{cp}}$	2.3	1.58	1.59	2.38	2.39	2.40

Влияние формы профиля направляющих линеек. Направляющий инструмент (линейка) обеспечивает замкнутый очаг формоизменения в поперечном направлении при винтовой прошивке на двухвалковых станах.

Рассмотрим влияние формы направляющего инструмента на эффективность преобразования структуры гильзы-заготовки, которое

оценивается по изменению параметров циклического формоизменения и доли поперечной деформации. С этой целью при каждом единичном обжати определяли: коэффициенты деформации по трем осям, число циклов до отдельных сечений очага деформации, накопленную степень деформации сдвига и долю поперечной деформации.

Схема прошивки на двухвалковом стане приведена на рис. 5, где позиция гребня линейки совпадает с пережимом валков (рис. 5, а). Форма линейки без криволинейной вогнутости и с криволинейной вогнутостью выходного участка показана на ступенчатом разрезе очага формоизменения (рис. 5, б, в).

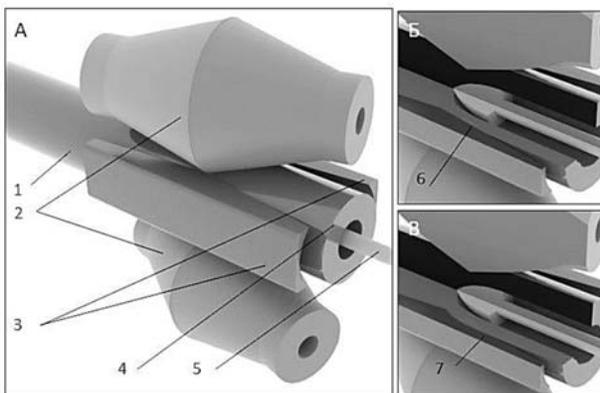


Рисунок 5. Очаг формоизменения (деформации): а — схема винтовой прошивки; б, в — ступенчатый разрез очага формоизменения с демонстрацией выходного участка линейки; 1 — заготовка; 2 — бочковидные валки; 3 — направляющий инструмент (линейки); 4 — гильза; 5 — оправка; 6 — профиль выходного участка линейки; 7 — выходной участок линейки с криволинейной вогнутостью

Влияние формы выходного участка линейки. В этом случае моделируются параметры формоизменения по длине очага деформации для двух случаев: с прямолинейным и с криволинейным профилем выходного участка линейки. Криволинейный профиль с вогнутостью удовлетворяет условию сохранения координаты схода с линейки гильзы, как и для случая прямолинейного профиля. Задание профиля можно выполнить с помощью степенной функции:

$$y = nx^{\tau},$$

где y — расстояние от оси прошивки до линейки; x — расстояние от гребня линейки; n — коэффициент, задающий высоту криволинейного профиля; τ — показатель, характеризующий кривизну профиля. Коэффициент n выбирается так, чтобы функция проходила через координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) .

Изменение профиля выходного участка линейки влияет на коэффициент овализации и, следовательно, на долю поперечной деформации (рис. 6). Из представленной зависимости видно, что профиль линейки с криволинейной вогнутостью на выходном участке, где осуществляется основная деформация по толщине стенки, позволяет повысить долю поперечной деформации, что увеличивает проработку литой структуры.

Отметим, что конечная поперечная деформация не зависит от профиля линейки и соответствует значению, определенному по параметрам конечного формоизменения.

Влияние положения линеек. Оценим влияние смещения гребня линейки в сторону положения носка оправки (рис. 6, б) на долю поперечной деформации по длине очага формоизменения. Отличие по распределению доли поперечной деформации от профиля направляющих линеек и положения гребня линеек относительно пережима валков приведены на рис. 6, в.

Характер накопления истинных деформаций по всем трем осям показан на рис. 6, г. Нижняя кривая — радиальное обжатие, две верхние кривые — поперечная деформация. Видно, что сумма трех логарифмических коэффициентов деформации равна нулю в любом сечении. Точками показаны шаги подач, на каждом конкретном шаге проводится суммирование коэффициентов деформаций — в качестве проверки условия постоянства объема при пластическом формоизменении. Попарное изменение коэффициентов продольной и поперечной деформации — это разный характер изменения коэффициентов овализации по длине очага деформации за счет предполагаемых внесенных изменений в продольный профиль выходного сечения линейки. Кривые 2 и 3 относятся к действующим (существующим на стане) линейкам, а кривые 2' и 3' — к линейкам с непрямолинейным профилем выходного участка (предлагаемый направляющий инструмент). При увеличении коэффициентов овализации за счет изменения профиля линеек увеличивается доля поперечной деформации, что способствует проработке литой структуры, естественно это уменьшает долю продольной деформации и изменяет количество шагов (число циклов по итогу и до сечений в очаге деформации). Сравнение числа шагов на участке, где изменяется коэффициент овализации, подтверждает сделанные предположения. Изменение числа шагов составляет 10 %.

Приведенные данные убедительно подтверждают целесообразность изменения профиля выходного участка линейки на криволинейно-вогнутый. Смещение гребня линейки в сторону входа в очаг деформации до положения носка оправки, выдвинутого за пережим валков, также изменяет характер распределения коэффициента овализации в сторону увеличения доли поперечной деформации. Указанные мероприятия способствуют лучшей проработке исходной литой структуры.

Как показали расчеты (для режимов прошивки непрерывнолитых заготовок на Северском трубном заводе), в зависимости от тонкостенности гильзы доля поперечной деформации при использовании предлагаемого технологического решения возрастет на 8 – 15,5 %. Увеличение поперечной деформации способствует лучшей проработке непрерывнолитой структуры. В тоже время смещение гребня способствует еще более интенсивной проработке непрерывнолитой структуры.

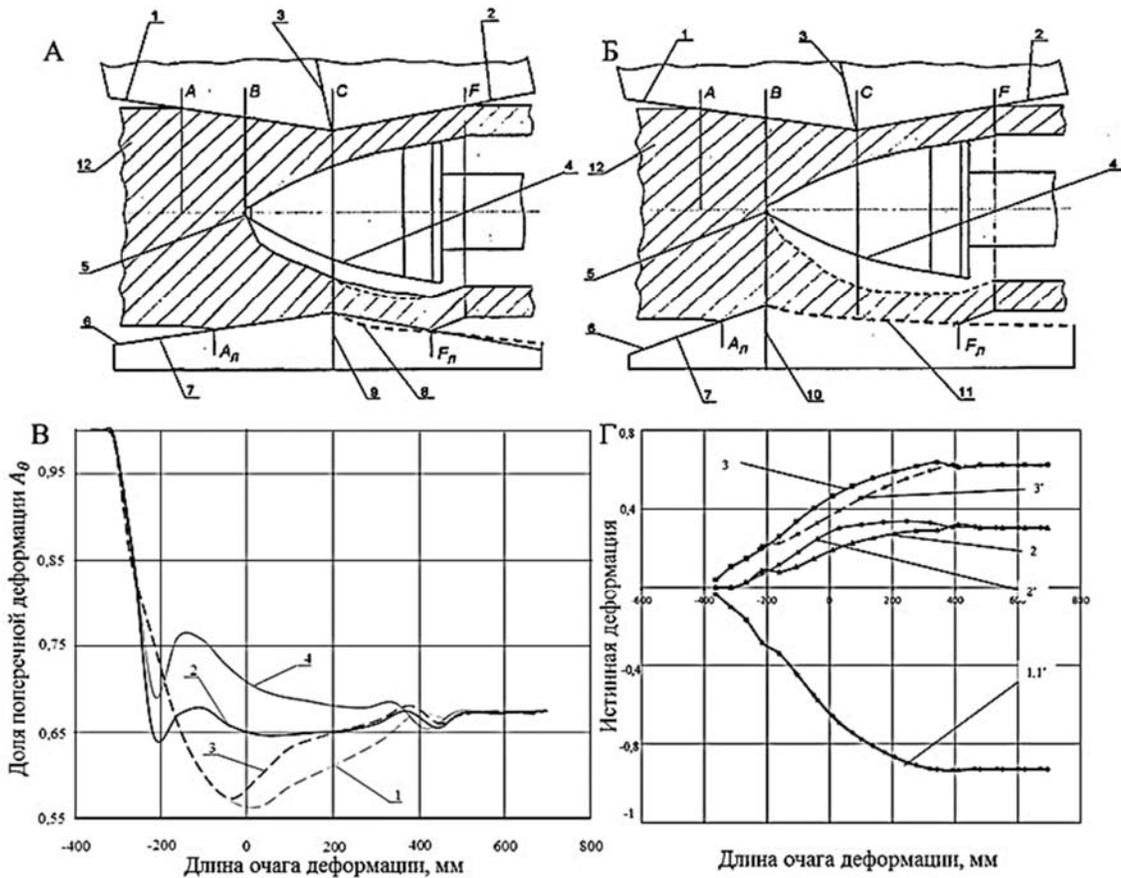


Рисунок 6. Варианты положения направляющей линейки в очаге деформации: *a* — продольный профиль очага деформации без смещенного гребня линейки относительно пережима валков; *б* — продольный профиль очага деформации со смещенным гребнем линейки относительно пережима валков в сторону входа заготовки; 1 — входной и 2 — выходной конусы вала; 3 — пережим вала; 4 — оправка; 5 — носок оправки; 6 — линейка; 7 — входной конический участок линейки; 8 — выходной участок линейки с криволинейной вогнутостью; 9 и 10 — гребни линейки в пережиме валков 3 и в сечении носка оправки 8; 11 — выходной участок линейки с криволинейной вогнутостью при смещении гребня до носка оправки; 12 — заготовка; *в* — зависимость доли поперечной деформации от координаты по длине очага формоизменения на примере прошивки "на подъем" ($D_3 = 360$ мм, $D_7 = 400$ мм); 1, 2 — действующие линейки без смещения и со смещением гребня соответственно; 3 и 4 — новые продольные профили линеек без смещения и со смещением гребня; γ — изменения истинных деформаций для действующей линейки без смещения 1 – 3 и для новой линейки со смещением 1' – 3': 1, 1' — $\ln\lambda$; 2, 2' — $\ln\mu$; 3, 3' — $\ln\theta$

Применение предложенных технологических решений позволяет повысить проработку исходной литой структуры при прошивке непрерывнолитых заготовок и тем самым улучшить служебные свойства готовых труб.

На основе проведенного анализа заводских режимов прошивки непрерывнолитых заготовок, было выявлено, что используется разное расположение оправки в очаге деформации. По уточненной математической модели МЭИ проведены расчеты параметров циклического формоизменения для оценки проработки литой структуры в зависимости от положения оправки.

В итоге установлено, что все перечисленные параметры прошивки оказывают влияние на долю поперечной деформации, причем наиболее сильное влияние оказывают форма и положение линеек и обжатие в пережиме.

В пятой главе приведены практические рекомендации по настройкам стана и их применение.

Произведена экспериментальная проверка усовершенствованной математической модели. Для учета части материала заготовки, идущей на уширение, в предыдущих главах была выведена аналитическая зависимость уточненного поперечного сечения до носка оправки. С целью проверки этой части усовершенствованной математической модели МЭИ был проведен эксперимент на промышленном прошивном стане Северского трубного завода.

Эксперимент представлял собой остановку процесса прошивки в тот момент, когда гильза вышла из валков на два-три диаметра. На заторможенной в валках гильзе наносились засечки в местах, где в дальнейшем были произведены разрезы, причем места выбирались для максимальной информативности и полезности.

Для проведения измерений были вырезаны два темплета: темплет 1 - перед носком оправки и темплет 2 - в пережиме. Для возможности сравнения реального профиля темплетов с профилем, описываемым математической моделью, профили темплетов были оцифрованы (рис. 7).

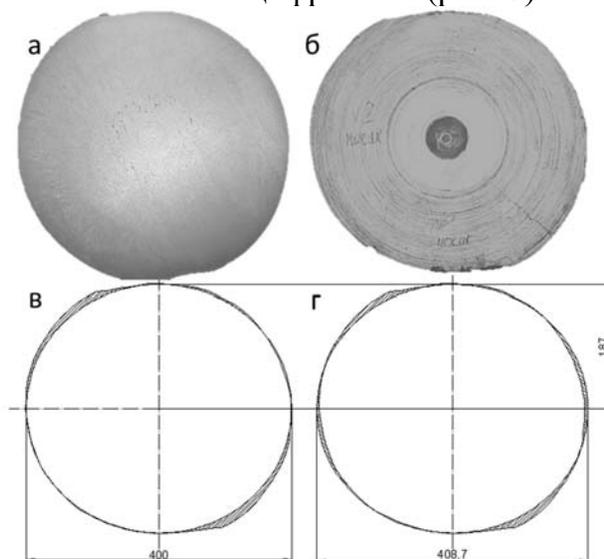


Рисунок 7. Экспериментальное определение элементов формоизменения по длине очага деформации. а- емплет 1 толщиной 20 мм изъятый из сечения у носка, периметр 1240мм, вид со стороны входа заготовки; б- темплет 1, вид со стороны выхода заготовки; в- эллипс используемый в математической модели до уточнения площади поперечного сечения; г- эквивалентный эллипс используемый в усовершенствованной математической модели МЭИ после уточнения площади поперечного сечения

Разница площадей между экспериментальными данными и модельными до учета площади течения металла поперек в сечении перед носком оправки составляет 2,6%. Разница площадей между

экспериментальными данными и модельными после учета площади течения металла поперек в сечении перед носком оправки составляет 0,6%.

В результате, после учета дополнительной составляющей площади поперечного сечения разница экспериментальной площади и площади, полученной по усовершенствованной математической модели МЭИ в сечении у носка оправки, менее 0,7 %. Число шагов до носка оправки увеличилось на 9,8% с 5,1 до 5,6. Данные результаты подтверждают теоретические выкладки, положенные в основу усовершенствованной математической модели МЭИ, которая обеспечивает более точное моделирование процесса прошивки.

Новизна и полезность предложений по совершенствованию процесса прошивки на двухвалковых станах на основе усовершенствованной математической модели МЭИ подтверждается патентом РФ №2514040 на «Технологический инструмент для прошивки непрерывнолитых заготовок».

Применение усовершенствованных режимов прошивки. По договору с ПАО «Северский трубный завод» были проанализированы существующие режимы прошивки заготовок из углеродистых сталей и предложены усовершенствованные, учитывающие увеличение поперечных деформаций металла для проработки литой структуры. На рис. 8 приведены действующие заводские режимы и предложенные усовершенствованные.

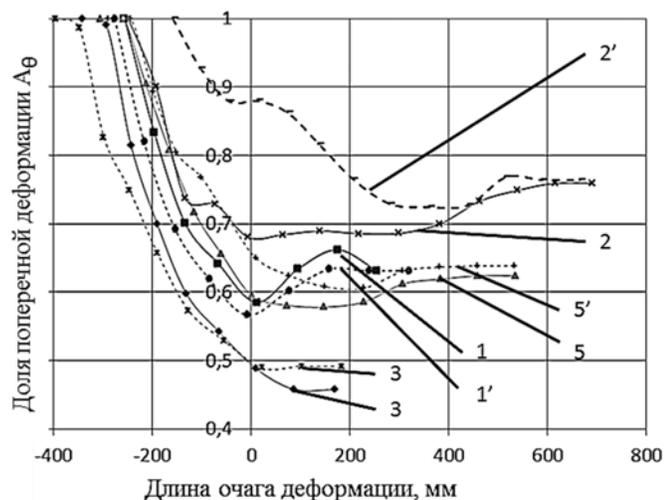


Рисунок 8. Изменение доли поперечной деформации по длине очага формоизменения: 1-3,5 заводские режимы прошивки заготовок, штриховые линии- предлагаемые режимы 1'-3',5'

Новизна и полезность предложений по совершенствованию процесса прошивки на двухвалковых станах на основе усовершенствованной математической модели МЭИ подтверждается патентом РФ №2514040 на «Технологический инструмент для прошивки непрерывнолитых заготовок».

Выводы

1. Разработана методика аналитического представления трехмерного течения металла при винтовой прокатке, учитывающая, в частности, течение металла в тангенциальном направлении, описываемого

уравнением спирали. Установлено, что при этом изменение площади поперечного-сечения заготовки составляет до 2%.

2. Обоснована усовершенствованная математическая модель определения параметров очага деформации при винтовой прошивке, учитывающая течение металла в поперечном направлении. Результаты экспериментов, выполненных в производственных условиях, показали, что относительная ошибка при расчете поперечных сечений заготовки гильзы снизились с 2,6% до 0,6%.
3. Предложена новая методика расчета доли поперечной деформации на каждом шаге формоизменения при винтовой прошивке, позволяющая производить оценку степени проработки исходной структуры заготовки, на основании которой можно совершенствовать режимы прошивки. Подтверждено влияние на долю поперечной деформации A_θ следующих параметров настройки:
 - диаметра заготовки (отличие A_θ в конусе раскатки между прошивкой «на посад» и «на подъем» составляет 0.42% и 0.68%);
 - угла подачи (A_θ изменяется с 0.52 до 0.41 в конусе раскатки при изменении угла подачи с 8° до 12° , соответственно);
 - положения оправки (средняя доля поперечной деформации $A_{\theta ср}$ изменяется от 1.4 до 2.2 при выдвигании оправки в конус прошивки на 20 и 70 %, соответственно);
 - обжатия в пережиме ($A_{\theta ср}$ изменяется с 1.5 при обжатии 14% до 5.4 при обжатии 8%);
 - формы рабочего участка оправки ($A_{\theta ср}$ изменяется от 1.58 до 2.4 в случае сферической и с линейно-возрастающим законом изменения деформации, соответственно);
 - формы и положения направляющего инструмента, выдвигание направляющих линеек в сторону конуса прошивки (накопленная доля поперечной деформации $A_{\theta макс}$ изменяется на 11% при использовании линейки с криволинейной вогнутостью и смещении гребня линейки к носику оправки).

Из всех перечисленных параметров прошивки наиболее сильное влияние на долю поперечной деформации оказывают форма и положение линеек и обжатие в пережиме.

4. Даны рекомендованные усовершенствованные режимы для прошивного стана Северского трубного завода, позволяющие увеличить долю поперечной деформации на 10%. Предложено техническое решение, позволяющее увеличить степень преобразования непрерывнолитой структуры при винтовой прошивке путем использования направляющего инструмента с криволинейной вогнутостью выходного участка.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. В.А. Парфенов, А.Е. Шелест, Ю.Д. Хесуани, В.С. Юсупов, М.В. Чепурин. Совершенствование процесса прошивки непрерывнолитых

- заготовок на двухвалковых винтовых станах с использованием направляющего инструмента. Сталь 2019. №3. С. 30-33.
2. Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Топоров В.А., Чепурин М.В., Парфенов В.А.. Оценка размеров прошиваемых заготовок по параметрам циклического формоизменения. Сталь 2012 г., № 12, стр. 40..
 3. Меркулов Д.В., Голубчик Р.М., Топоров В.А., Парфенов В.А. Положение оправки в очаге деформации при прошивке заготовок. Производство проката. 2013. № 5. С. 17-24.
 4. Топоров В.А., Чепурин М.В., Парфенов В.А. Степанов А.И. Исследование винтовой прокатки при прошивке заготовок Сталь. 2014. № 6. С. 63-66.

Другие публикации

5. V. A. Toporov, M. V. Chepurin, V. A. Parfenov, and A. I. Stepanov. Skew Rolling in the Piercing of Blanks. Steel in Translation, 2014, Vol. 44, No. 6, pp. 452–455.
6. V. A. Parfenov, A. E. Shelest, Yu. D. Khesuani, V. S. Yusupov, and M. V. Chepurin. Piercing of Continuous-Cast Billet on Two-Roller Screw Mills with Liners. Steel in Translation, 2019, Vol. 49, No. 3, pp. 194–197.
7. Golubchik R.M., Merkulov D.V., Toporov V.A., Parfenov V.A. Ways of structure reaming enhancement when piercing uninterruptedly casted sections. 14 International Scientific Conference entitled «New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering». Poland, Czestochowa, 2013г.
8. Оценка доли поперечной деформации при винтовой прошивке непрерывнолитых заготовок. Сборник материалов Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов» М.: ИМЕТ, 2012, с. 569-571.
9. Меркулов Д.В., Голубчик Р.М. Парфенов В.А. Влияние положения оправки в очаге деформации прошивного стана на проработку структуры непрерывнолитых. 14 International Scientific Conference entitled "New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering" Poland, Czestochowa, 2013г.
10. Меркулов Д.В., Голубчик Р.М., Топоров В.А., Чепурин М.В., Парфенов В.А. Медведева С.Е. Влияние диаметра заготовки на проработку литой структуры и количество дефектов. Труды IXI международного конгресса прокатчиков, ООО "Объединение прокатчиков", (Череповец, 16-18 апреля 2013) с. 184 - 193.
11. Патент RU № 2518040 С2 Российская Федерация, В21И 19/04 (2006.01) Технологический инструмент для прошивки непрерывнолитых заготовок. Д.В. Меркулов, Р.М. Голубчик, В.А. Топоров, В.С. Толмачев, А.И. Степанов, В.А. Парфенов; заявл. 01.10.12; опубл. 10.06.14 Бюл. № 16.