

На правах рукописи



Зинченко Анна Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
ВЫСАДКИ КОНЦОВ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)) и в открытом акционерном обществе «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»)

Научный руководитель ВЫДРИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: БОГАТОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВПО «УрФУ им. Первого Президента России
Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой
«Обработка металлов давлением»

ЛУБЕ ИВАН ИГОРЕВИЧ, кандидат технических
наук, Дирекция по технологии ОАО «Трубная
металлургическая компания», главный
специалист отдела главного прокатчика

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Национальный
исследовательский технологический
университет «Московский институт стали и
сплавов»

Защита состоится 16 октября 2013 г., в 14⁰⁰ часов, в ауд. 1001 (гл. корпус)
на заседании диссертационного совета Д 212.298.01, ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»
(НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»
(НИУ).

Автореферат разослан 13 сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мирзаев Джалал Аминулович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Бурильные трубы являются сложным и дорогостоящим видом трубной продукции. Интенсификация процессов и применение новых способов бурения требует производства труб с высокой эксплуатационной стойкостью, которая определяется отсутствием разрушения трубы в процессе определенного периода работы. Наиболее уязвимым местом бурильной трубы является участок перехода от тела трубы к утолщенному концу, получаемому высадкой. Именно там регистрируется наибольшее количество «промывов» бурильных труб, появление которых резко снижает эффективность процесса бурения из-за необходимости проведения трудоемких операций разборки и сборки бурильной колонны. Причиной появления промывов во многих случаях является наличие дефектов в высаженном конце.

Получение заданной конфигурации зон высаженного конца трубы и благоприятной макроструктуры металла является в настоящее время важнейшей задачей при проведении процесса высадки бурильных труб. Решение этой задачи требует точного расчета параметров процесса высадки, таких как величина деформации, длина нагреваемого участка трубы, длина переходной зоны и величина усилия, определяемых для каждой операции высадки. Ранние исследования процесса высадки концов труб практически не затрагивали вопросы формоизменения металла в переходной зоне высадки, а при определении величины усилия высадки использовались упрощенные аналитические зависимости, дающие существенную погрешность в расчетах. Все это снижает качество высаженных концов труб и производительность процесса, увеличивает затраты на инструмент, вызывает перегрузки пресса в отдельных операциях. Перечисленные факторы уменьшают эффективность технологического процесса высадки и всего цикла изготовления бурильных труб, а, следовательно, снижают конкурентоспособность отечественной трубной продукции. Поэтому, решение вопросов правильного определения параметров процесса высадки, как важного этапа технологии изготовления бурильных труб, является актуальной задачей трубного производства.

Цель работы

Повышение эффективности процесса высадки концов бурильных труб основанное на повышении производительности процесса, улучшении качества высаженных концов труб, сокращении расходов на инструмент.

Задачи исследования

1. Разработать математическую модель процесса высадки трубы с получением аналитических зависимостей для определения величины усилия высадки и длины внутренней переходной зоны.
2. Провести лабораторные исследования для проверки аналитических зависимостей, а также, для получения достоверной информации о параметрах (сопротивление металла пластической деформации и коэффициент

контактного трения) являющихся исходными данными при реализации математической модели.

3. На основе результатов математического и физического моделирования разработать методику расчета значений основных технологических параметров процесса высадки концов труб.

4. Численно реализовать методику в программном продукте, проверить ее работоспособность при изготовлении опытных партий труб и внести изменения в технологические режимы высадки и профилировку рабочего инструмента;

5. Разработать и внедрить новые технологические и конструктивные решения, обеспечивающие повышение экономической эффективности процесса высадки концов бурильных труб.

Степень разработанности

Диссертация является законченной научной работой, в которой теоретические и экспериментальные исследования доведены до конкретных математических зависимостей, использованных при определении технологических параметров высадки, что обеспечило повышение эффективности производства бурильных труб.

Научная новизна работы

1. С использованием метода линий скольжения впервые получена аналитическая зависимость для определения усилия высадки трубы, учитывающая все наиболее значимые факторы процесса.

2. Впервые получена аналитическая зависимость для определения длины внутренней переходной зоны высадки, учитывающая влияние толщины стенки трубы, размеров высадочного инструмента, длины усадки и коэффициента контактного трения.

3. С применением методов статистической обработки экспериментальных данных получены новые эмпирические зависимости величины сопротивления деформации сталей, используемых при изготовлении бурильных труб, от степени, скорости и температуры деформации; определена также зависимость коэффициента контактного трения от температуры деформации.

4. Впервые в численной форме определено влияние фактора разнотолщинности стенки трубы на длину внутренней переходной зоны высадки.

Методология и методы исследования

Методология исследования базируется на использовании математического и физического моделирования процесса высадки с применением теоретических методов обработки металлов давлением (метод сетки линий скольжения), математической статистики (метод наименьших квадратов), экспериментальных методов обработки металлов давлением (метод осадки образцов).

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечена применением методов теории обработки металлов давлением и количественным согласованием результатов математического моделирования процесса высадки с экспериментальными данными, полученными в лабораторных и промышленных условиях.

Практическая значимость работы

Основные расчетные зависимости, полученные при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния процесса высадки, использованы при разработке методики расчета параметров процесса высадки бурильных труб, которая, в свою очередь, реализована в виде программных продуктов. Программные продукты использованы для определения силовых параметров и формоизменения при высадке бурильных труб, что выразилось в совершенствовании существующей технологии их изготовления, в частности внесены изменения в режимы высадки и профилировку рабочего инструмента, которые отражены в последних редакциях технологических инструкций участков высадки ОАО «ТАГМЕТ». Результаты работы успешно использованы в учебном процессе при подготовке студентов направления «Металлургия» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

На уровне изобретений разработаны новые технологические схемы и режимы высадки, обеспечивающие получение продукции высокого качества. Предложены новая конструкция инструмента для высадки и способ комбинированной высадки концов труб, защищенные патентами Российской Федерации. Предложенная оригинальная методика графической оценки длины внутренней переходной зоны в промежуточных операциях высадки используется для оперативного контроля качества высаженных концов труб в технологическом процессе ОАО «ТАГМЕТ».

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту

1. Обобщенная математическая модель напряженно-деформированного состояния металла при высадке концов труб.

2. Результаты экспериментальных исследований, проведенных для проверки полученных аналитических зависимостей для определения усилия высадки и длины внутренней переходной зоны, а также эмпирические зависимости для определения сопротивления металла пластической деформации и коэффициента контактного трения.

3. Методика расчета параметров процесса высадки и профилировки рабочего инструмента.

4. Новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности процесса высадки концов бурильных труб.

Апробация работы

Основные результаты исследований опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе, на международных научно-технических конференциях «Трубы»

(Челябинск 2008, 2009, 2010, 2011; Сочи, 2012), VIII Конгрессе прокатчиков (Магнитогорск, 2010), IX Конгрессе прокатчиков (Череповец, 2010), международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением имени профессора А.Ф. Головина» (Екатеринбург, 2012), научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) (Челябинск, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 статей, в том числе две статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК; получено два патента на изобретения.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 164 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 18 таблиц, библиографический список из 93 наименований, четыре приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна полученных результатов и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ сортамента, технологии производства бурильных труб, а также предъявляемых к ним требований. Анализ технологии и оборудования для высадки концов труб показал, что наиболее перспективным является процесс высадки концов труб на прессах, который в современных условиях реализуется по заданному усилию высадки, создаваемому рабочим цилиндром пресса. Точность определения величины усилия высадки является важным фактором для получения требуемых формы и размеров высаженного конца трубы. При этом необходимо оперативно учитывать изменение толщины стенки трубы в пределах допускаемых отклонений.

Анализ научно-технической информации показал, что вопросы определения параметров формоизменения металла и усилий в процессе высадки концов труб освещены недостаточно, при разработке новых технологических режимов используются упрощенные аналитические зависимости или экспериментальные данные, полученные для конкретного вида продукции и не учитывающие ряда важных технологических факторов.

На основе проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены вопросы теоретического анализа и математического моделирования процесса высадки концов труб.

Процесс высадки рассматривается относительно цилиндрической системы координат, что позволяет свести его к схеме плоскопараллельного течения металла. Согласно имеющимся теоретическим и практическим

данным процесс высадки можно рассматривать как горячую изотермическую деформацию, что позволяет пренебречь изменением величины сопротивления металла пластической деформации. Однако, одной из проблем, возникающих при моделировании напряженно-деформированного состояния металла в рассматриваемом процессе, является то, что заранее не известна одна из границ очага деформации, поэтому решение задач подобного класса целесообразно осуществлять методом линий скольжения.

При моделировании высадки с односторонним течением металла (рисунок 1) сетка линий скольжения была разбита на три блока: прямоугольный равнобедренный треугольник AOB , сектор (центрированный в вершине) BOC и прямоугольный треугольник OCD .

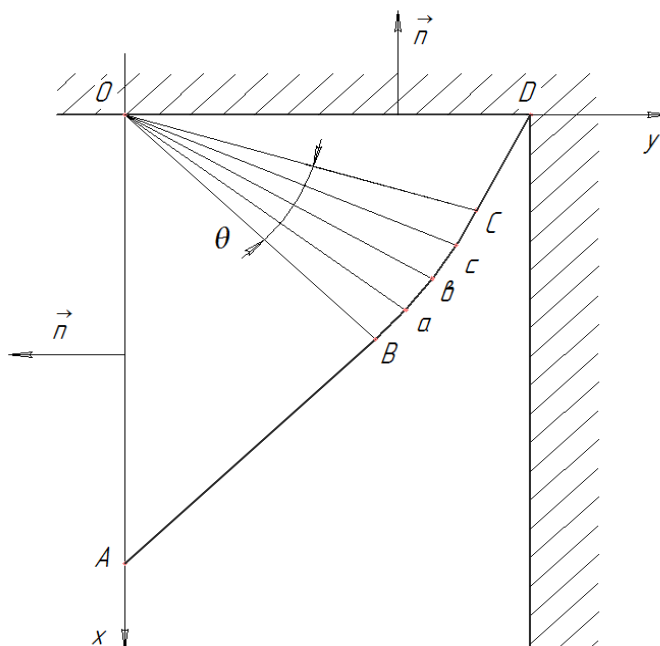


Рисунок 1 – Сетка линий скольжения при высадке с односторонним течением металла

Считаем, что линии OB , Oa , Ob , Oc , OC являются линиями семейства α . Соответственно, линия $ABCD$ будет являться линией семейства β .

Для определения напряженного состояния в области AOB использовались граничные условия на линии AO :

$$\varphi^* = \psi^* \pm \frac{1}{2} \arccos \frac{f_{\tau}^*}{\tau_s} + m\pi; \quad \sigma^* = f_n^* + \tau_s \sin 2(\varphi^* - \psi^*),$$

где ψ^* – угол между нормалью к контуру, описывающему границу области определения задачи и координатной осью Ox ; f_{τ}^* – касательное напряжение, действующее на границе области определения задачи; f_n^* – нормальное напряжение, действующее на границе области определения задачи.

Для треугольной области AOB получаем:

$$\varphi = \frac{\pi}{4}; \quad \sigma = -\tau_s; \quad \sigma_{xx} = -\tau_s - \tau_s \sin \frac{\pi}{2} = -2\tau_s;$$

$$\sigma_{yy} = -\tau_s + \tau_s \sin \frac{\pi}{2} = 0; \quad \sigma_{xy} = \tau_s \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Проведением аналогичного анализа для двух других блоков сетки линий скольжения, получено выражение для нормального напряжения на контакте пуансона и торца трубы, позволяющее определять величину усилия односторонней высадки.

$$f_n^* = -\tau_s \left[1 - \arccos \frac{f_\tau^*}{\tau_s} + \frac{\pi}{2} + \sin(\arccos \frac{f_\tau^*}{\tau_s}) \right] \quad (1)$$

При моделировании комбинированной (с двусторонним течением металла) высадки процесс формоизменения металла представлялся в виде совокупности пяти стадий, которые характеризуют: начало процесса пластической деформации (стадия I); симметричное течение металла в зоне пластической деформации в обе стороны от оси симметрии трубы (стадия II); одностороннее течение металла по контактной поверхности (стадия III); формирование двухступенчатой формы переходной зоны (стадия IV) и течение металла с сформировавшейся частью высаженного конца (стадия V). Сетка линий скольжения на стадиях I–IV представлена на рисунке 2.

Наибольший интерес представлял анализ напряженно-деформированного состояния металла на заключительной стадии процесса, сетка линий скольжения которой приведена на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что линией скольжения семейства α является линия $СВIJ$. Тогда в пределах центрированного угла $СВЕ$ угол φ изменяется от $\varphi_{CE} = \frac{\pi}{2}$ до $\varphi_{CE} = \frac{1}{2} \arccos \mu$.

В треугольнике ABC все линии скольжения прямые, следовательно: $\varphi_{ABC} = \text{const} = \varphi_{CB} = \frac{1}{2} \arccos \mu$.

Для дальнейшего вывода расчетных формул определены наиболее характерные размеры зоны пластической деформации и сетки линий скольжения.

Углом φ в треугольнике AIJ будет угол между отрезком IJ и положительным направлением оси OX . Анализ геометрии сетки линий скольжения показывает, что

$$\varphi_{AIJ} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \psi_2 = \frac{3}{4}\pi + \arcsin \frac{R_m - R_n - S_0 - W}{\frac{S_0}{\sqrt{2}} \cos(\frac{1}{2} \arccos \mu)},$$

где $W = \frac{S_0}{\sqrt{2}} \cos(\frac{1}{2} \arccos \mu) \sin(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \arccos \mu)$.

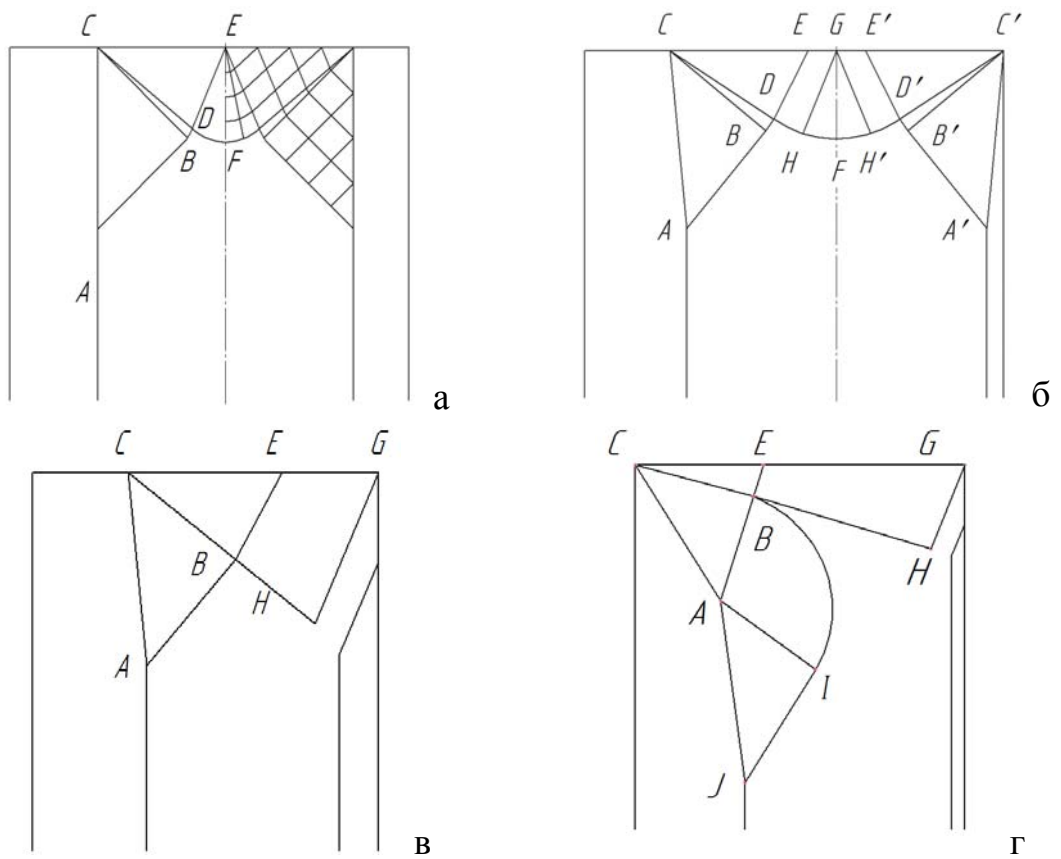


Рисунок 2 – Трансформация сетки линий скольжения при комбинированной высадке:
 а – стадия I; б – стадия II; в – стадия III; г - стадия IV

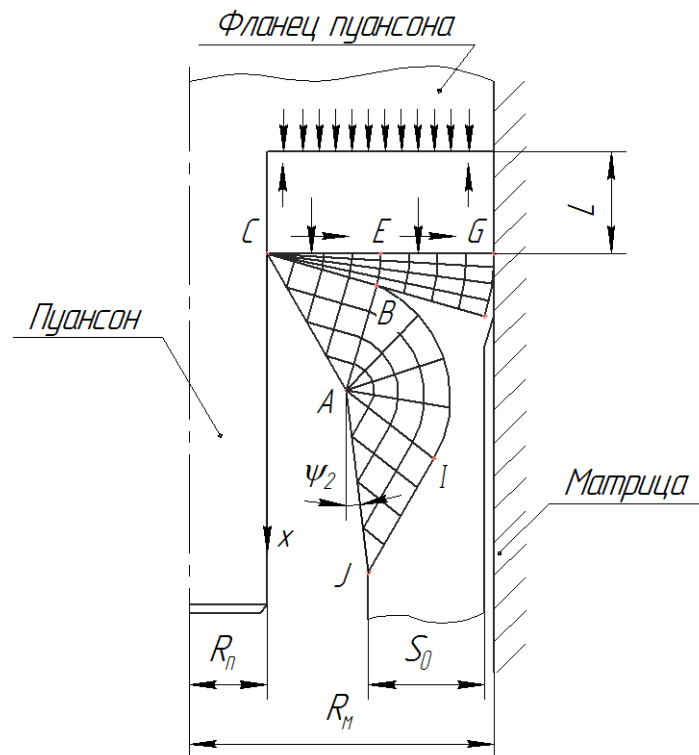


Рисунок 3 – Сетка линий скольжения в конечной стадии процесса (момент касания металлом стенки матрицы)

Для определения напряженного состояния, используя методику решения вырожденной задачи Римана, находим среднее нормальное напряжение в центрированных веерах ABI и CBE , после чего с учетом граничных условий получаем выражения для силы от нормальных напряжений f_n и силы от напряжений трения о стенки матрицы. На фланец пуансона действует сила, представляющая сумму этих сил. В конечном итоге, действующая на фланец пуансона нагрузка определяется зависимостью

$$T_{\sigma} = 2\tau_s \pi \left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{R_m - R_n - S_0 - W}{\frac{S_0}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{1}{2} \arccos \mu\right)} \right] \left[S_0 R_n \cos\left(\frac{1}{2} \arccos \mu\right) + \frac{S_0^2}{\sqrt{2}} \cos^2\left(\frac{1}{2} \arccos \mu\right) \right] + 2\pi \mu_k \sigma_s L (R_m + R_n), \quad (2)$$

где L – длина цилиндрического участка высаженного конца трубы; S_0 – толщина стенки трубы; μ_k – коэффициент трения на контакте со стенкой матрицы, μ – коэффициент трения на контакте с пуансоном; R_n – усредненная величина радиуса пуансона; R_m – радиус полости матрицы; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига; σ_s – сопротивление металла пластической деформации.

Длина переходной зоны высадки в конечной стадии процесса комбинированной высадки с учетом особенностей трансформации сетки линий скольжения описывается выражением

$$L = \left(\frac{L_0}{\Delta L} - 1 \right) \sqrt{2S_0^2 \cos^2 \left\{ \frac{1}{2} [\pi - \arccos(-\mu)] \right\} - (d - s_0)^2}, \quad (3)$$

где L_0 – длина высаживаемого участка трубы; ΔL – длина усадки; S_0 – толщина стенки трубы; d – зазор между пуансоном и матрицей; μ – коэффициент трения на контакте между рабочим инструментом и деформируемым металлом.

Численная проверка показала, что полученные аналитические зависимости (2) и (3) не противоречат существующим теоретическим положениям и практическим данным обработки металлов давлением.

Третья глава посвящена результатам экспериментального исследования процесса высадки.

Для определения величины сопротивления пластической деформации сталей, используемых для изготовления бурильных труб, проведены исследования по осадке цилиндрических образцов на автоматизированном кулачковом пластометре ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Результаты исследований в виде кривых упрочнения обрабатывались с использованием метода наименьших квадратов. Полученные зависимости сопротивления деформации исследуемых сталей от скорости (U_c), степени (ε_1) и температуры (t) деформации имели вид:

– сталь 32Г2

$$\sigma_{sc} = 2347 \cdot U_c^{0,1314} \cdot \varepsilon_1^{0,1244} \cdot \exp(-0,00313 \cdot t) \quad (4)$$

(коэффициент множественной корреляции $R^2 = 0,981$; расчетное число Фишера $F_p = 246,087$; табличное число Фишера $F_{0,95} = 2,021$);
сталь 25ХГМА

$$\sigma_{sc} = 2186 \cdot U_c^{0,1196} \cdot \varepsilon_1^{0,1558} \cdot \exp(-0,00299 \cdot t) \quad (5)$$

(коэффициент множественной корреляции $R^2 = 0,989$; расчетное число Фишера $F_p = 424,311$; табличное число Фишера $F_{0,95} = 2,021$).

Поскольку расчетное число Фишера больше его табличного значения для обоих полученных уравнений, то последние являются статистически надежным отображением зависимости сопротивления деформации исследованных сталей от термомеханических параметров процесса.

Из рисунка 4, отражающего зависимость величины сопротивления деформации исследованных сталей от температуры высадки, видно, что сопротивление деформации обеих сталей имеет наименьшие значения (ниже 50 МПа) в диапазоне температур от 1125°C до 1200°C.

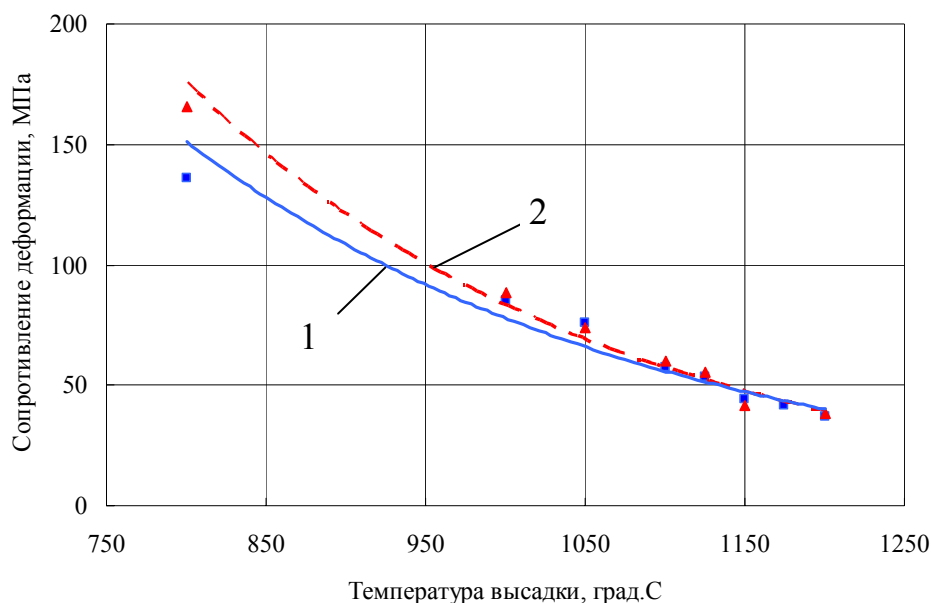


Рисунок 4 – Зависимость величины сопротивления деформации исследованных сталей от температуры высадки ($U_c = 0,2-0,25$; $\varepsilon_1 = 0,3-0,5$): 1 – сталь 32Г2; 2 – сталь 25ХГМА

Изменение температуры в этом диапазоне в меньшей степени влияет на изменение величины сопротивления деформации, чем в диапазоне 1050–1125°C. При снижении температуры нагрева величина сопротивления деформации возрастает, причем большая динамика роста наблюдается для стали 25ХГМА.

При высадке на прессах используются технологические смазки на основе графита. Для определения коэффициента контактного трения был использован метод осадки образцов. Проведение исследования по осадке образцов сталей бурильных труб было совмещено с пластометрическими испытаниями. При этом были сделаны допущения, что стали близкого химического состава обладают близкими фрикционными свойствами при горячей обработке давлением и скорость перемещения пуансона при высадке не оказывает существенного влияния на величину коэффициента трения. Используемая при пластометрических испытаниях смазка – графит, соответствовала смазке, применяемой при высадке.

Для интервала температур от 1050°C до 1175°C была получена зависимость величины коэффициента трения от температуры деформации (t) вида

$$\mu = 0,0013 \cdot e^{0,0046t} \quad (6)$$

Анализ зависимости (6) показал, что при высадке в интервале температур от 1150°C до 1170°C величина коэффициента трения изменяется от 0,26 до 0,31, при этом среднее значение коэффициента трения составляет 0,285.

Для экспериментальной проверки аналитической зависимости (2), проведены лабораторные исследования по высадке полых цилиндрических образцов из свинца. Высадка проводилась на гидравлическом прессе ППП–125 (1250 кН), с установкой инструмента (матрица и пуансон), размеры которого в масштабе 3:1 были пропорциональны размерам инструмента для высадки бурильных труб 127×9,2 мм. Точность определения длины усадки составляла ±0,1 мм. Величина усилия высадки регистрировалась месдозой СМ–Т10 «Dacell» усилием до 100 кН, связанной с программным комплексом цифровой обработки сигнала и персональным компьютером. Точность определения величины усилия составляла ±0,5 кН. Высадка проводилась по трем режимам (с течением металла внутрь, наружу и комбинированном), причем на каждом режиме использовалось два варианта: с технологической смазкой и без смазки.

На рисунке 5 показаны кривые нагружения при комбинированной высадке и кривая расчетных значений усилия высадки, построенная с использованием зависимости (2) для условий проведения эксперимента без смазки. В расчетах сопротивление деформации свинца определялось по известной зависимости $\sigma_s = 20,14U^{0,213}(10\varepsilon)^{0,37}$, где ε – степень деформации, скорость деформации принималась равной $U = 1 \text{ с}^{-1}$, а коэффициент сухого (без смазки) трения свинца по стали $\mu = 0,15$ считался одинаковым для всех поверхностей контакта.

Анализ полученных данных показал, что относительная ошибка в определении величины усилия высадки не превышает 5,2%, что свидетельствовало о корректности разработанной математической модели процесса.

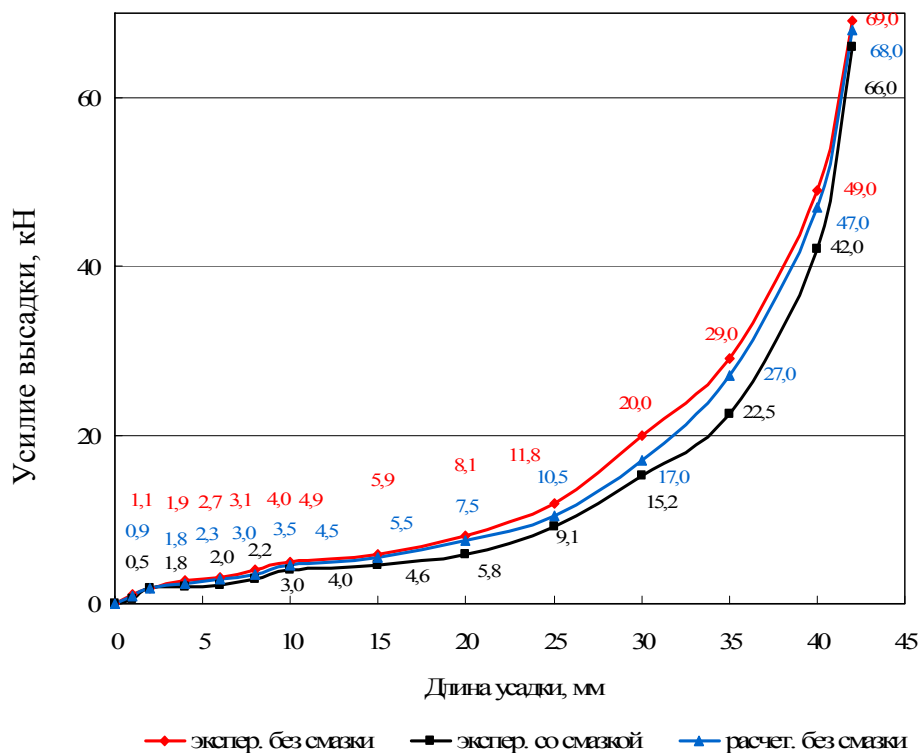


Рисунок – Кривые нагружения при комбинированной высадке

Для оценки корректности использования зависимости (3) при расчете длины внутренней переходной зоны, проведена серия измерений темплетов-планок бурильных труб размерами 127,0×9,19 мм группы прочности X.

На абрисах планок высаженных концов наносились линии, соответствующие диаметрам пуансонов по операциям, пересечение которых с линией контура трубы, соответствовало границе внутренней переходной зоны в конкретной операции высадки. Автором не найдено подобной методики в научно-технической информации, касающейся вопросов высадки концов труб.

Измерялись высаженные концы с заданной длиной переходной зоны двух размеров: 100 и 120 мм, при этом формировались группы от трех до пяти темплетов-планок труб различной толщины стенки ($S = 9,2$ мм; $9,6$ мм; $10,0$ мм). Погрешность измерения не превышала $\pm 0,5$ мм.

Анализ результатов показал удовлетворительную сходимость расчетных данных с фактической длиной переходной зоны. Максимальная величина относительной ошибки между расчетными и фактическими данными о длине внутренней переходной зоны не превышала 9,0% (рисунок 6).

Для оперативного прогнозирования величины отклонения длины внутренней переходной зоны в пределах готовой высадки путем статистической обработки большого массива экспериментальных данных получена зависимость этого параметра от отклонения толщины стенки трубы (ΔS), имеющая вид $\Delta l_2 = 13,1\Delta S + 0,135$.

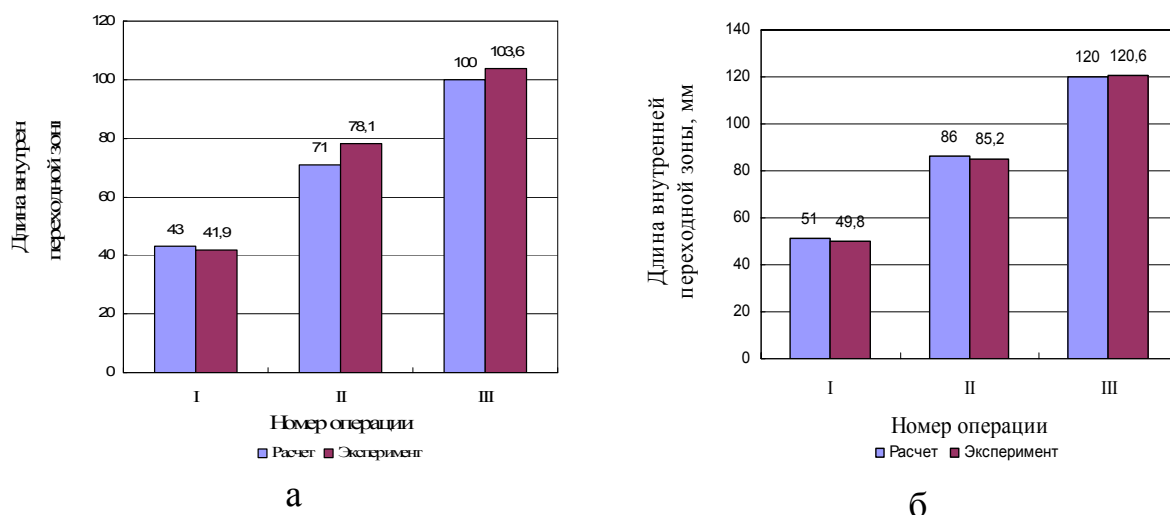


Рисунок 6 – Сравнение расчетной и фактической длины внутренней переходной зоны при толщине стенки трубы 10,0 мм при заданной длине зоны 100 мм (а) и 120 мм (б)

Четвертая глава посвящена разработке и проверке методики определения параметров процесса высадки, включающей несколько блоков параметров: геометрические, кинематические, температурные и силовые.

Расчетная схема определения геометрических параметров высадки приведена на рисунке 7.

В основу расчета положен закон постоянства объема металла при горячей деформации. Суммарный смещенный объем металла определяется зависимостью

$$V = \frac{\pi}{4} (D_M^2 - D_{гор}^2) (l_3 + \delta + 0,5l_4) + \frac{\pi}{4} (d_{гор}^2 - D_n^2) (l_1 + \delta + k_f l_2), \quad (7)$$

где $D_{гор}$, $d_{гор}$ – соответственно наружный и внутренний диаметр трубы в горячем состоянии, мм; D_M , D_n – соответственно диаметр полости матрицы и средний диаметр рабочего участка пуансона, мм; l_3 , l_1 – длина соответственно наружной и внутренней цилиндрических зон высадки, мм; l_4 , l_2 – длина соответственно наружной и внутренней переходных зон высадки, мм; δ – припуск на торцовку высаженного конца; k_f – коэффициент, учитывающий форму внутренней переходной зоны высадки.

Расчет ведется с конечной операции высадки, в которой известны геометрические размеры зон и высадочного инструмента (матрицы и пуансона), заданные нормативной документацией на бурильную трубу с учетом припусков на механическую обработку высаженного конца.

Расчет длины внутренней переходной зоны производится по аналитической зависимости (3), что является существенным отличием от известных методик, в которых эту величину назначают исходя из имеющихся статистических данных.

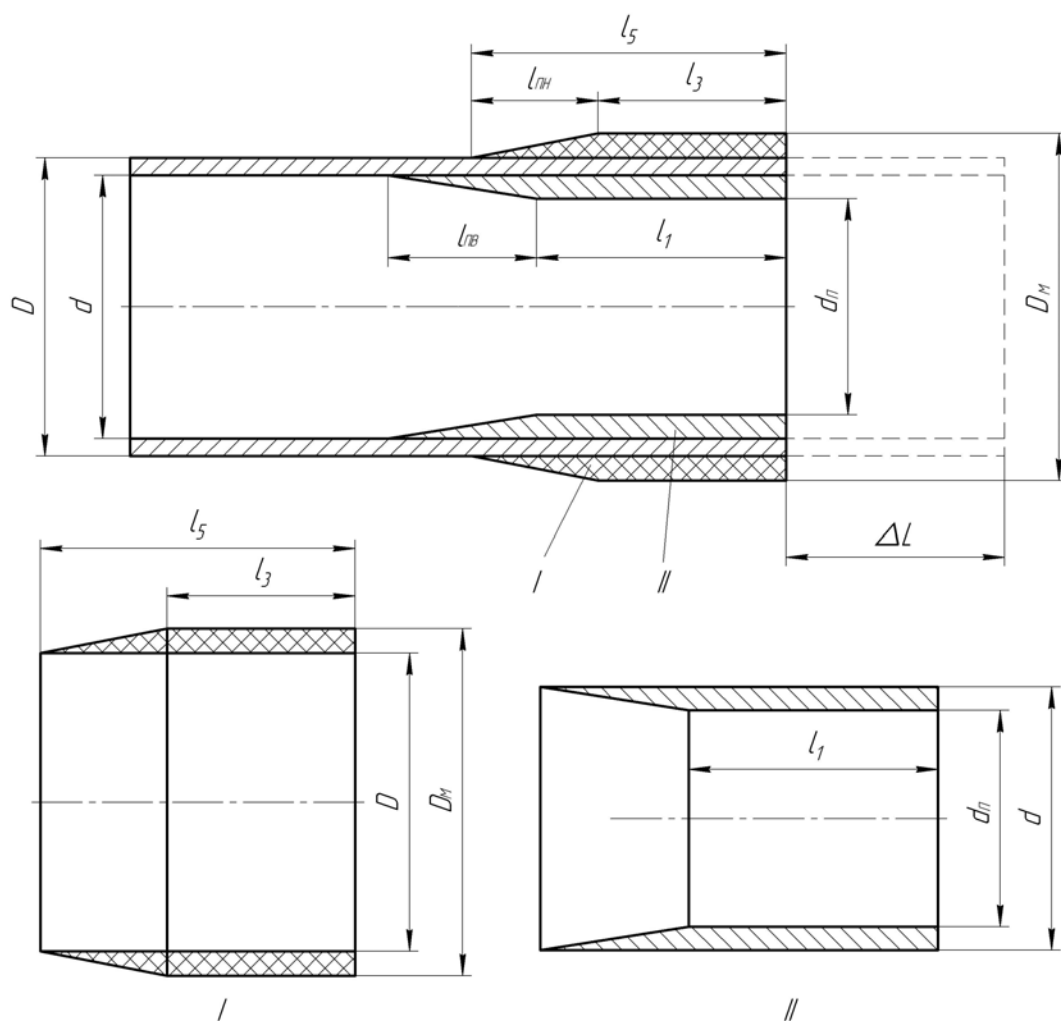


Рисунок 7 – К расчету смещенного объема металла при высадке

Величина усилия высадки в методике определяется по аналитической зависимости (2) более корректно, по сравнению с известными зависимостями, поскольку учитывает большее количество значимых факторов, базируется на достоверной экспериментальной информации о величинах сопротивления деформации и коэффициента трения. Этому также способствует более точное определение длины зон высадки. Учитывая то, что высадка ведется по заданному давлению в гидроцилиндре пресса, фактор повышения точности расчета усилия высадки является определяющим для получения заданной геометрии высадки.

Методика численно реализована в программных продуктах «Upset» и «Upset-API», позволяющих проектировать технологические режимы и профилировку инструмента при высадке бурильных труб с учетом специфики прессов 3000 кН и 2800 кН ОАО «ТАГМЕТ». Программы составлены на языке «Visual Basic Application» применительно для работы в приложении «Excel» пакета «Microsoft Office». Программа «Upset» предусматривает возможность не только разрабатывать режимы высадки применительно к

прессу 3000 кН, но и проектировать произвольный процесс высадки, не привязанный к конкретному типу прессового оборудования.

Методика прошла опытную проверку применительно к технологическому процессу высадки бурильных труб ОАО «ТАГМЕТ». Например, при высадке труб размерами 127×9,2 мм группы прочности М на прессе 3000 кН относительная ошибка в определении длины внутренней переходной зоны высадки не превышала 4,1%, а относительная ошибка в определении усилия высадки не превышала 8,5%.

Разработанные программные продукты используются для оперативного определения параметров процесса и корректировки штатных технологических режимов высадки концов труб на прессах ОАО «ТАГМЕТ». Методика расчета параметров высадки концов труб и программные продукты использованы в учебном процессе кафедры «Машины и технология процессов обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

В пятой главе представлены новые технические решения, направленные на повышение эффективности процесса высадки концов бурильных труб.

Для уменьшения усилия извлечения пуансона при высадке концов труб разработан пуансон для высадки концов труб, содержащий рабочий участок конической формы, высадочный фланец и хвостовик, закрепленный на штоке исполнительного механизма высадочного устройства, причем, рабочий участок конической формы с высадочным фланцем размещены в хвостовике с возможностью поворота относительно своей оси на 10÷30 градусов. Кроме того, рабочий участок с высадочным фланцем соединен с хвостовиком посредством втулки (патент РФ №2446905). Обеспечение возможности поворота рабочего участка пуансона с высадочным фланцем в процессе извлечения пуансона из высаженного конца трубы уменьшает осевое усилие, снижает вероятность искажения формы высаженного конца трубы, повышает ресурс работы пресса и рабочего инструмента.

Для совершенствования технологии изготовления бурильных труб с удлиненной внутренней переходной зоной комбинированной высадки предложено новое техническое решение (патент РФ № №2474485), которое решает техническую задачу повышения качества высаженных концов труб за счет снижения эффекта волнообразного выпучивания металла в первой операции высадки. Поставленная цель достигается за счет того, что в первой операции комбинированной высадки осуществляют деформацию конца трубы с уменьшением только внутреннего диаметра высадки до величины 1,03÷1,07 от его заданного значения, при этом коэффициент усадки в первой операции устанавливают из соотношения:

$$\lambda = 1,8\left(\frac{D}{S}\right)^{-0,1} \left(\frac{l_2}{70}\right)^{0,1}, \quad (8)$$

где D – наружный диаметр трубы, мм; S – толщина стенки трубы, мм; l_2 – длина внутренней переходной зоны высадки, мм.

Комбинированная высадка бурильных труб с требованиями по API Spec 5DP требует проведения горячей деформации с более высоким суммарным коэффициентом усадки, поэтому по штатной технологии она осуществляется на прессе 2800 кН «SMS Meer» в четыре операции: два цикла по две операции. Описанное выше техническое решение было реализовано автором в технологии высадки концов бурильных труб групп прочности G, S размерами 127×9,19 мм API Spec 5DP/ISO 11961, PSL1 с удлиненной внутренней переходной зоной. Данная технология осуществляется в три операции высадки без потери качества высаженного конца трубы. Это удалось достигнуть за счет более рационального распределения деформации в операциях высадки и точного определения ее параметров, что было достигнуто за счет использования методики расчета и программного продукта «Upset-API».

Изготовление опытных партий труб подтвердило корректность расчётных данных. На рисунке 8,а показан общий вид темплета-планки высаженного конца бурильной трубы размерами 127×9,19 мм группы прочности G, а на рисунке 8,б – фрагмент этого темплета, иллюстрирующий макроструктуру волокна.



а



б

Рисунок 8 – Общий вид темплета-планки высаженного конца трубы размерами 127×9,19 мм (а) и его фрагмент, иллюстрирующий макроструктуру волокна (б)

Использование технологии высадки концов труб в три операции позволило увеличить производительность прессы высадки «SMS Meer» 2800 кН примерно в 1,5 раза, сокращая при этом одну операцию нагрева конца трубы под высадку. Кроме того, при высадке концов бурильных труб в три операции используется меньшее количества пуансонов, что снизило затраты

на приобретение высадочного инструмента. Предложенная технология высадки обеспечила сокращение расходов при производстве каждой тонны бурильных труб на 631,98 руб.

«Слабым местом» технологии высадки в три операции труб высоких групп прочности (группа прочности S) является наличие критической величины деформации в операциях. Это предопределяет повышенное усилие высадки и снижает устойчивость высаживаемого отрезка трубы в полости между матрицей и пуансоном, что ухудшает качество высаженных концов труб и отрицательно сказывается на работе высадочного оборудования.

В трехоперационной технологической схеме высадки опытных партий бурильных труб размерами 127×9,19 мм группы прочности S с требованиями по API Spec 5DP, PSL2 на прессе «SMS Meer» ОАО «ТАГМЕТ» регистрируемое усилие высадки по операциям составляло, соответственно 1910/ 2080/ 2140 кН. В третьей операции высадки величина усилия близка к предельной, установленной технической характеристикой прессы.

Высадка в четыре операции дает более благоприятное распределение величины усилия, но при этом снижается производительность процесса, что связано с наличием дополнительной операции и необходимостью установки четвертого пуансона (конструкция прессы предусматривает одновременную установку только трех пуансонов).

Для устранения этого недостатка предложена технология высадки в четыре операции, предусматривающая повторное использование одного из пуансонов в смежных операциях (заявка на изобретение №2013136283 от 01.08.2013 г.).

Предлагаемая схема была опробована на прессе «SMS Meer» ОАО «ТАГМЕТ». Распределение усилия высадки по операциям составило 1910/1950/1510/1930 кН, при этом производительность технологического процесса была на 15% выше, чем при высадке в четыре операции. Кроме того, были снижены расходы на изготовление технологического инструмента, поскольку вместо четырех использовались три пуансона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для описания напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации с применением метода линий скольжения разработана обобщенная математическая модель процесса высадки конца трубы, в которой рассмотрены возможные варианты процесса: с односторонним и двухсторонним (комбинированным) течением металла. Для варианта высадки с односторонним течением металла определена величина напряжения на контакте пуансона и торца трубы, позволяющая рассчитывать усилие высадки.

2. С использованием метода линий скольжения для случая комбинированной высадки с впервые получены аналитические выражения для определения длины внутренней переходной зоны и действующего на пуансон

усилия, с учетом его изменения в процессе высадки при различных условиях контактного трения на границе «металл–инструмент».

3. Достоверность полученных аналитических зависимостей подтверждена результатами лабораторных исследований, в которых максимальная относительная величина расхождения расчетных и экспериментальных данных при определении величины усилия высадки не превышала 5,2%, а при определении длины внутренней переходной зоны – 9,0%. Предложенная методика графического определения длины внутренней переходной зоны по операциям высадки показала достаточную точность и используется для контроля этого параметра в реальном технологическом процессе.

5. Статистической обработкой результатов пластометрического исследования получены зависимости для определения величины сопротивления деформации сталей 32Г2 и 25ХГМА. При оценке достоверности полученных зависимостей использован критерий Фишера. Для условий применения технологической смазки на основе графита экспериментально определена величина коэффициента контактного трения в зависимости от температуры деформации. Получена эмпирическая зависимость отклонения длины внутренней переходной зоны высадки от разнотолщинности стенки трубы в поперечном сечении.

6. На основе результатов теоретического и экспериментального исследования процесса разработана методика расчета основных технологических параметров процесса высадки концов труб. Алгоритм методики реализован в компьютерных программах «Upset» и «Upset-API», позволяющих оперативно проводить расчеты технологических параметров и профилировки инструмента при высадке концов бурильных труб на прессах 3000 кН и 2800 кН ОАО «ТАГМЕТ».

7. С целью проверки методики расчета проведено изготовление опытных партий бурильных труб и проанализированы полученные результаты, которые подтвердили ее хорошую работоспособность. С использованием программных продуктов определена максимальная длина внутренней переходной зоны комбинированной высадки концов бурильных труб при высадке на прессах ОАО «ТАГМЕТ», что было использовано при планировании сортаментной загрузки участков высадки.

8. На основе полученных научных данных разработаны новые технические решения по совершенствованию процесса высадки концов бурильных труб с удлиненной внутренней переходной зоной, в том числе высоких групп прочности направленные на повышение эффективности производства.

9. Результаты работы использованы в реальном производстве при назначении новых схем, режимов технологического процесса высадки и профилировки рабочего инструмента, что отражено в соответствующих технологических инструкциях ОАО «ТАГМЕТ». Внедрение результатов работы обеспечило повышение эффективности процесса изготовления

бурильных труб на ОАО «ТАГМЕТ» за счет сокращения расходов при производстве каждой тонны бурильных труб на 631,98 руб.

Методика расчета параметров высадки концов труб и программные продукты, созданные на ее основе, использованы в учебном процессе кафедры «Машины и технология процессов обработки материалов давлением» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Основные результаты опубликованы в работах:

1. Фартушный, Р.Н. Определение сопротивления деформации сталей бурильных труб / Р.Н. Фартушный, А.В. Зинченко, Б.В. Баричко и др. // *Металлург.* – 2008. – №7 – С.52–54 (**издание рекомендовано ВАК**).

2. Выдрин, А.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния при осадке высокой полосы (двухстороннее течение металла) / А.В. Выдрин, А.В. Зинченко, Б.В. Баричко // *Вестник ЮУрГУ: серия «Металлургия».* – Вып.18. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. – № 15 – С. 126–128 (**издание рекомендовано ВАК**).

3. Баричко, Б.В. Оценка возможности получения бурильных труб с удлиненной высадкой в условиях ТПЦ-2 ОАО «ТАГМЕТ» / Б.В. Баричко, А.В. Зинченко А.В., Р.Н. Фартушный // *Труды 16 Международной научно-практической конференции «Трубы–2008».* – Челябинск: ОАО «РосНИТИ» – ООО «Полиграф-мастер». – 2008. – С. 196–200.

4. Кузнецов, В.И. Оценка влияния вида технологической смазки на силовые параметры высадки концов бурильных труб / В.И. Кузнецов, Б.В. Баричко, А.В. Зинченко и др. // *Труды 17 Международной научно-практической конференции «Трубы–2009»*, Челябинск, 2009 Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2009. – С. 237–238.

5. Кузнецов, В.И. Оценка влияния выбора технологической смазки на силовые параметры высадки концов бурильных труб / В.И. Кузнецов, Б.В. Баричко, А.В. Зинченко и др. // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия».* – М. «Черметинформация», 2010. – №1. – С.61–62.

6. Баричко, Б.В. Исследование процесса высадки концов бурильных труб/ Б.В. Баричко, А.В. Выдрин. А.В. Зинченко // *Труды 18 Международной научно-практической конференции «Трубы–2010»*, Челябинск: ОАО «РосНИТИ», ООО «Полиграф-мастер» – 2010. – Ч.1 – С. 192–195.

7. Баричко, Б.В. Исследование процесса высадки концов бурильных труб/ Б.В. Баричко, А.В. Выдрин. А.В. Зинченко // *Труды VIII Конгресса прокатчиков*, Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2010. – Т.1. – С. 284–290.

8. Выдрин, А.В. Математическая модель процесса высадки концов труб / А.В. Выдрин, А.В. Зинченко, Б.В. Баричко // *Труды 19 Международной*

научно-практической конф. «Трубы–2011» – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2011. – Ч. II – С. 270–275.

9. Зинченко, А.В. Разработка ресурсосберегающей технологии высадки концов труб // Труды VI Международной молодежной научно-практической конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012 – С. 601–603.

10. Зинченко, А.В. Повышение эффективности процесса высадки концов труб / А.В. Зинченко, Б.В. Баричко, А.В. Выдрин // Труды 20 Международной научно-практической конференции «Трубы–2012». – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2013. Ч. II – С. 10–13.

11. Мульчин, В.В. Анализ процесса высадки бурильных труб для получения удлиненной внутренней переходной зоны / В.В. Мульчин, А.В. Зинченко, Д.В. Понимаш // Труды IX Конгресса прокатчиков, Череповец: МОО «Объединение прокатчиков», 2013. – Т. I. – С. 225–229.

12. Пат. 2446905 Российская Федерация, МПК⁷ В21J5/08. Пуансон для высадки концов труб / Б.В. Баричко, А.В. Зинченко, В.И. Чурбанов и др. – №2010117694/02; – заявл. 04.05.10; опубл. 10.04.12. – Бюл. №10.

13. Пат. 2474485 Российская Федерация, МПК⁷ В21J5/08. Способ комбинированной высадки концов труб / Б.В. Баричко, А.В. Зинченко, А.В. Выдрин и др. – №2011112244/02; – заявл. 30.03.11; опубл. 10.02.13. – Бюл. №4.