



На правах рукописи

**Аль-Кхузаи Ахмед Салим Олейви**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ  
ПРОКАТКЕ ТРУБ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ И РАЗУПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ**

05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск

2020

**Диссертация выполнена** в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

**Научный руководитель:** **Выдрин Александр Владимирович** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «ПиМ ОМД» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

**Официальные оппоненты:**

**Швейкин Владимир Павлович**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук» (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург.

**Чикишев Денис Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии обработки материалов «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ имени Г.И. Носова»), г. Магнитогорск.

**Ведущая организация** – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «09» сентября 2020 г. в 12:00 в ауд. 1001, на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

**С диссертацией можно ознакомиться** в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) и на сайте университета:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/al-khuzai-ahmed-salim-oleyvi>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-92-28. e-mail: asaalkhuzai@mail.ru

**Автореферат разослан** « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность работы.* Бесшовные стальные трубы являются продукцией, востребованной во многих сферах человеческой деятельности. При этом в зависимости от назначения заказы на трубы могут составлять от нескольких килограмм до сотен тысяч тонн. Естественно, что при производстве многотоннажных партий труб первостепенным вопросом становится производительность трубопрокатного агрегата. Но при этом должны удовлетворяться требования к качеству выпускаемой продукции. В настоящее время многие трубопрокатные заводы как в России, так и за рубежом оснастились современными трубопрокатными агрегатами, включающими прошивные станы Дишера и раскатные станы типа PQF (Premium Quality Finishing) и FQM (Fine Quality Mill). Такие агрегаты позволяют получать продукцию, удовлетворяющую наиболее жестким требованиям потребителей. Поэтому сегодня на первый план выходят вопросы, связанные с рациональным использованием фактического фонда рабочего времени.

Одним из факторов, снижающим фактическое время работы трубопрокатного агрегата, являются незапланированные простои. Значительная их доля связана с аварийными ситуациями в процессе работы. К таким ситуациям, в частности, относится поломка оборудования. В свою очередь снизить вероятность поломок позволяет грамотный расчет энергосиловых параметров процесса прокатки.

Известно, что точность определения силовых параметров, действующих на технологический инструмент прокатных станов, во многом определяется точностью вычисления сопротивления металлов пластической деформации. Поэтому задача по разработке методики определения сопротивления металла пластической деформации с учетом влияния на эту величину

термомеханических параметров процесса является актуальной в настоящее время.

### **Степень разработанности темы исследования.**

В настоящее время достаточно хорошо проработаны методические вопросы по определению сопротивления металлов пластической деформации. Для случаев холодной деформации металлов и сплавов при этом как правило используют разрывные машины. В качестве аппроксимирующей зависимости при этом принимают степенную зависимость сопротивления металла пластической деформации от накопленной степени деформации. Несколько сложнее определять сопротивление пластической деформации при горячем деформировании. Это связано с тем, что при высоких температурах на сопротивление пластической деформации оказывает влияние скорость и температура деформации. Поэтому для определения сопротивления металлов горячей пластической деформации применяют специальные машины, называемые пластометрами. Для аппроксимации искомых зависимостей используют степенные зависимости от степени и скорости деформации и экспоненциальную зависимость от температуры.

С другой стороны, известно, что при горячей деформации сопротивление металла пластической деформации имеет черты функционала. Однако несмотря усилия ряда ученых общепризнанной методики конструирования функционалов сопротивления металлов пластической деформации так и не получено.

Следует также отметить, что большая часть проведенных исследований касается либо холодной деформации при температурах 20...200<sup>0</sup>С, либо горячей деформации при температурах 750...1250<sup>0</sup>С. Температурный интервал 200...750<sup>0</sup> остается до сих пор не исследованным.

**Целью работы** является повышение точности определения энергосиловых параметров при непрерывной прокатке труб.

**Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:**

1. С помощью компьютерного моделирования определить характер изменения технологических параметров в линии непрерывного стана для раскатки гильз на длинной оправке.

2. Разработать методику экспериментального исследования сопротивления металла пластической деформации, учитывающую протекание процессов упрочнения и разупрочнения сталей.

3. Выполнить экспериментальное исследование процессов упрочнения и разупрочнения трубных марок стали при различных значениях термомеханических параметров процесса пластической деформации

4. Разработать программный продукт для расчета сопротивления металлов пластической деформации, учитывающий реальный характер изменения термомеханических параметров при непрерывной раскатке гильз.

5. Разработать предложения по повышению точности определения энергосиловых параметров на непрерывных раскатных станах и калибровочных станах термических отделах.

**Научная новизна работы:**

1. Получены закономерности изменения параметров напряженно-деформированного состояния металла гильзы при ее раскатке в непрерывном стане и соответствующее им изменение сопротивление металла пластической деформации.

2. Исследованы закономерности изменения сопротивления стали пластической деформации в диапазоне температур от 300<sup>0</sup>С до 600<sup>0</sup>С

3. Выявлен механизм разупрочнения металлов с перлитоферритной структурой в процессе деформации при температурах, соответствующих температуре отпуска.

4. Уточнены эмпирические зависимости сопротивления пластической деформации трубных сталей при температурах теплой деформации.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Выполнена классификация процессов деформации, используемых при производстве труб, с точки зрения использования методик определения сопротивления металла пластической деформации.

2. Разработана методика экспериментального определения реологических коэффициентов металлов и сплавов, входящих в универсальную феноменологическую модель сопротивления металла пластической деформации

3. Получены значения реологических коэффициентов для трубной стали марок 32Г2У, 09Г2С, 32ХГА.

4. Получена база данных по сопротивлению пластической деформации стали марок 32Г2У, 09Г2С, 32ХГА в зависимости от степени деформации при температурах 20<sup>0</sup>С, 300<sup>0</sup>С, 600<sup>0</sup>С, 900<sup>0</sup>С и 1200<sup>0</sup>С при скорости деформации 10 с<sup>-1</sup>.

#### **Методология и методы исследования.**

1. Для решения поставленных задач использовали: компьютерное моделирование с применением программного продукта QForm основанного на методе конечных элементов, физическое моделирование с использованием многофункционального комплекса Gleeble 3800, метод наименьших квадратов для обработки экспериментальных данных.

2. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование реализованы в условиях Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск).

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Уточненная методика определения реологических коэффициентов универсальной феноменологической модели сопротивления металлов и сплавов пластической деформации.

2. Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла гильзы при ее раскатке в линии непрерывного раскатного стана.

3. Результаты экспериментально-теоретического исследования сопротивления пластической деформации стали марок 32Г2У, 09Г2С, 32ХГА.

**Степень достоверности результатов исследований.** Теоретические и численные исследования выполнены на основе современных численных методов с применением лицензированного программного продукта. Экспериментальные исследования выполнены с использованием поверенных приборов, технических средств и современных методик обработки данных с достаточной для практики сходимостью.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на The 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Engineering & Science (IconMEAS 2019) (г. Багдад, Ирак, 2019), The 4<sup>th</sup> International Youth Workshop Magnitogorsk Rolling Practice, (г. Магнитогорск, 2019), 11-я научная конференция Аспирантов и Докторантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2019), 77-я международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки и образования», (г. Магнитогорск, 2019), The 1<sup>st</sup> International Conference on Materials Engineering and Science (IconMEAS), Университет Ауден– (Турция, 2018), 8-я научная конференция Аспирантов и Докторантов ЮУрГУ, (г. Челябинск, 2016).

## **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

## **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 136 страницах машинописного текста, включающего 33 рисунок, 22 таблиц, список использованных источников из 136 наименований российских и зарубежных авторов.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор научно-технической литературы по вопросам расчёта величины сопротивления металла пластической деформации.

Выполненный обзор показал, что основными факторами, влияющими на величину сопротивления металла пластической деформации, являются температура при которой осуществляется деформация, скорость и величина деформации, история деформирования образца (величина накопленной деформации), его химический состав и микроструктура.

Анализ научно-технической литературы показал, что известные формулы позволяют рассчитывать величину сопротивления деформации либо в горячем, либо в холодном состоянии. При этом очень мало информации для расчёта тепловой деформации металла в диапазоне температур от 300°С до 800°С.

Определение на единой основе эмпирических коэффициентов для всего диапазона температур процессов обработки металлов давлением позволит

повысить точность расчётов технологических параметров, в частности энергосиловых.

Во **второй** главе при помощи компьютерного моделирования определены условия деформации металла трубы при прокатке на оправке в непрерывном стане.

Для определения характера изменения и диапазона, в котором меняются в процессе прокатки скорость деформации, величина накопленной деформации и температура, было проведено моделирование в программе QForm (рисунок 1).

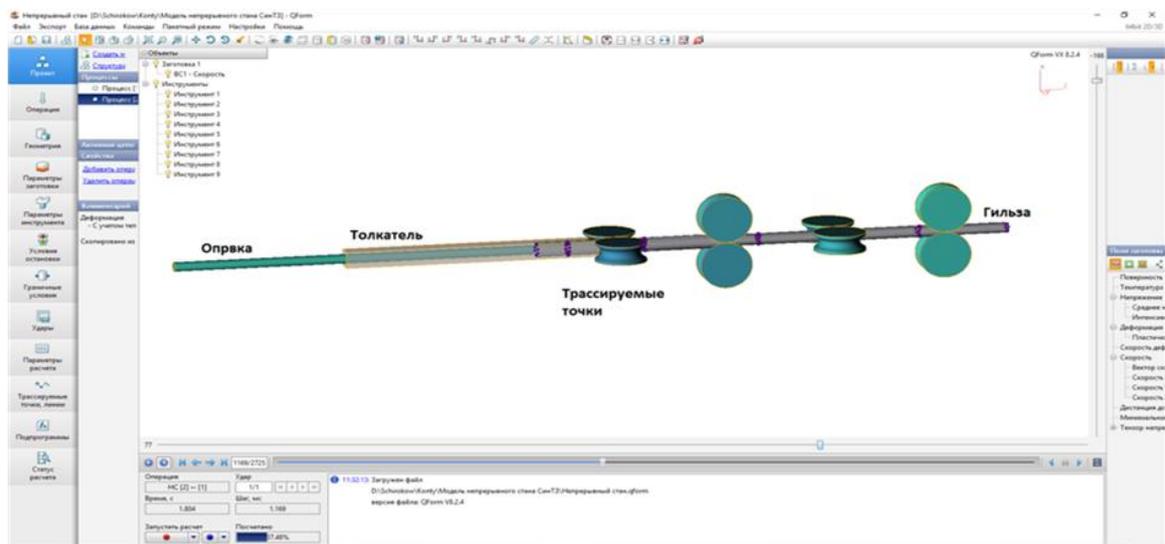


Рисунок 1 — Окно программы QForm с моделью стана

При проведении расчёта в трубе был создан массив из 265 трассируемых точек, для каждой из которых на каждом шаге в автоматическом режиме были определены значения таких параметров, как степень деформации, скорость деформации, температура металла.

Предварительный анализ полученных данных показал, что наиболее характерными, с точки зрения напряжённо-деформированного состояния, являются точки, расположенные на переднем конце трубы. При этом, в силу симметричности очага деформации, достаточно рассматривать две точки — одна из которых перемещается по маршруту «вершина калибра — разъём

калибра» (точка с кодовым обозначением P173), а вторая всё время оказывается в выпуске калибра (точка с кодовым обозначением P169). Дальнейший анализ выполнен для этих двух точек.

Для выбранных точек были построены графики изменения величины и скорости пластической деформации при прокатке в четырех клетях непрерывного раскатного стана (Рисунок 2, 3), характеризующие историю деформирования.

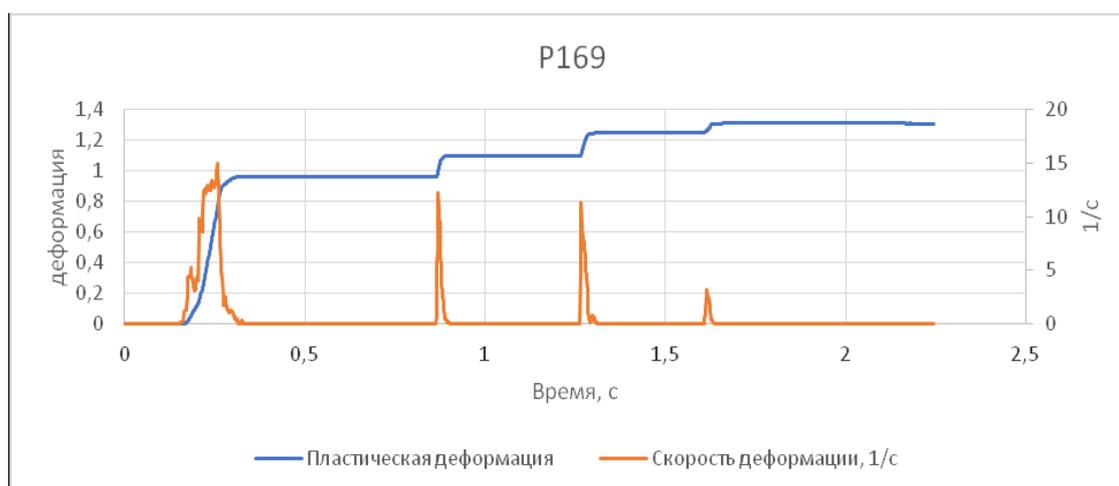


Рисунок 2 — Величина и скорость пластической деформации в точке P169

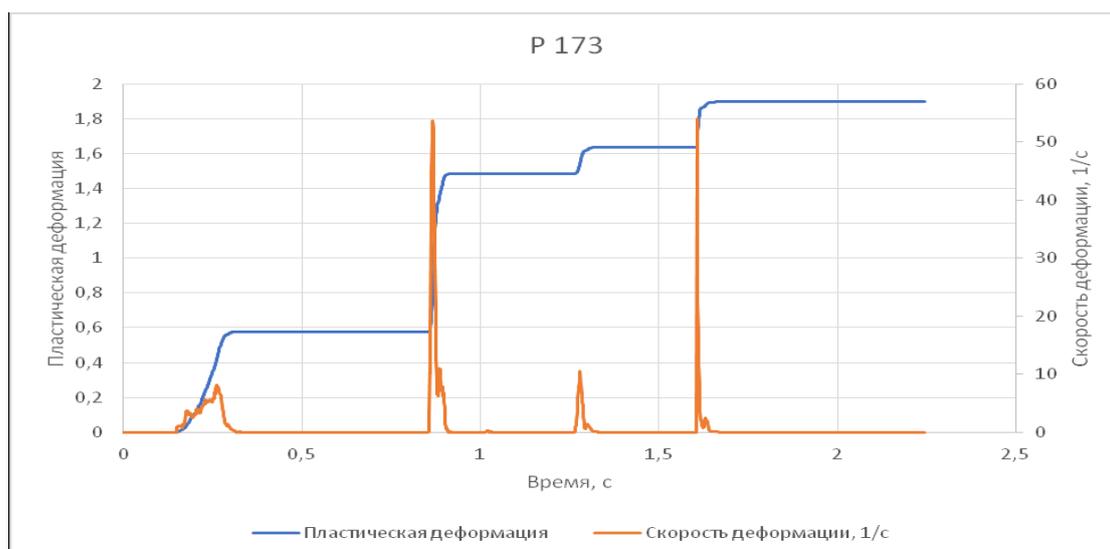


Рисунок 2 — Величина и скорость пластической деформации в точке P173

В результате анализа полученной информации было установлено, что суммарная деформация в первых четырёх клетях стана достигает значения 1,9. При максимальной деформации в одной клетке равной 0,9. А максимальное значение скорости пластической деформации равно 53,9 1/с. Также было установлено, что время необходимое на преодоление расстояния между очагами деформации составляет от 0,3 до 0,4 секунды.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показали, что при непрерывной раскатке гильз наблюдается сложный характер развития деформации во времени, заключающийся в чередовании процессов деформирования с различными степенями и разгрузки.

Для материальных частиц, лежащих на границе зон обжатия и выпуска, степень деформации по клетям меняется не очень существенно и прерывание деформации соответствует одному промежутку между клетями. В отличие от этого, материальные частицы, которые последовательно проходят через выпуск и вершину калибра имеют более сложный характер деформирования. Во-первых, степени деформации в вершинах калибра существенно больше и, во-вторых, время паузы между обжатиями при этом тоже больше, хотя в процессе прохождения через выпуск калибра имеет место небольшая деформация. По результатам моделирования также было установлено, что наибольшее падение температуры наблюдается в выпусках калибров, поскольку там практически отсутствует разогрев металла в результате деформации. Можно отметить, что температура металла гильзы в процессе раскатки достаточно стабильна по длине гильзы, хотя имеется некоторое различие по периметру.

Для оценки степени влияния представленного выше характера деформации на сопротивление металла пластической деформации были выполнены расчеты по известным методикам. Необходимые для расчёта

величины были получены в результате компьютерного моделирования и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия деформации рассматриваемого элементарного объёма металла при непрерывной прокатке

№ клетки / межклетевой промежуток	Время, с	Степень пластической деформации	Скорость деформации, 1/с
1	0,175667	0,960614	5,468391
1-2	0,532829	0,001418	0,002661
2	0,040365	0,134368	3,328851
2-3	0,356985	0,000185	0,000519
3	0,051281	0,148401	2,893854
3-4	0,290423	0,003743	0,012887
4	0,034087	0,056446	1,655924

Поскольку известная методика не учитывает процессы разупрочнения, при уменьшении степени деформации до нуля на выходе из очага деформации очередной клетки, сопротивление деформации тоже принимает нулевое значение. Однако, с учетом того, что, как показали расчеты, время нахождения металла в промежутке между клетями составляет десятые доли секунды (см. таблица 1), маловероятно, что за это время полностью произойдет разупрочнение металла. То есть при входе в последующую клетку металл имеет определенное упрочнение, и величина сопротивления металла пластической деформации должна быть больше, чем рассчитанная по известной формуле. Это является фактором риска, так как от сопротивления металла пластической деформации напрямую зависит величина энергосиловых параметров процесса прокатки. Если фактическое значение энергосиловых параметров будет выше расчетного, возникает вероятность появления аварийной ситуации.

**Третья глава** посвящена разработке феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации, учитывающей процессы упрочнения и разупрочнения при различных температурах.

Известно, что деформационное упрочнение хорошо описывается выражением вида:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + a\Lambda^n. \quad (1)$$

Известно уравнение остаточного упрочнения металла после паузы продолжительностью  $(t - t^*)$ :

$$\Delta\sigma_s(t) = \Delta\sigma_s(t^*) \exp\left(-\frac{t}{k}\right), \quad (2)$$

Где  $\Delta\sigma_s(t^*)$  — величина упрочнения металла к моменту времени  $t^*$ , то есть

$$\Delta\sigma_s(t^*) = \sigma_s(t^*) - \sigma_{s0}. \quad (3)$$

Обозначим изменение величины сопротивления металла пластическому деформированию в результате упрочнения как  $\sigma_s^+$ , в результате разупрочнения как  $\sigma_s^-$ , а суммарное изменение как  $\Delta\sigma_s$ . С учётом этого выражение (1) можно записать в виде:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + \Delta\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_s^+ - \sigma_s^-. \quad (4)$$

Тогда при рассмотрении процесса деформирования по шагам выражение (3) можно записать в виде:

$$\sigma_{si}^- = \sigma_{s(i-1)}^+ \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right). \quad (5)$$

Таким образом, изменение величины сопротивления металла пластической деформации в результате разупрочнения будет равно:

$$\Delta\sigma_{si} = \sigma_{s(i-1)}^+ - \sigma_{si}^- = \sigma_{s(i-1)}^+ \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right)\right). \quad (6)$$

Величина упрочнения металла на том же шаге будет равна:

$$\sigma_{si}^+ = a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n). \quad (7)$$

Поскольку на каждом шаге в металле одновременно происходят процессы как упрочнения, так и разупрочнения, то для учёта одновременности протекания этих процессов формулу (7) следует записать в следующем виде:

$$\Delta\sigma_{si} = a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) - a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right) \right). \quad (8)$$

Таким образом, величина сопротивления металла пластической деформации на  $i$ -том шаге будет равна:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s(i-1)} + \sigma_{si}^+ - \sigma_{si}^- = \sigma_{s0} + \Delta\sigma_{s(i-1)} + a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) - a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right) \right). \quad (9)$$

Для выполнения расчетов по представленной методике разработан алгоритм, включающий выделение общего временного интервала процесса пластического деформирования, с его разбивкой на этапы нагружения и разгрузки для трассирующих точек, принадлежащих различным участкам поперечного сечения трубы. Этот временной интервал разбивается на временные отрезки, продолжительностью 0,01 – 0,02с. Затем выполняется последовательный перебор временных отрезков, начиная с первого. Для каждого временного отрезка вычисляется сопротивление пластической деформации с учетом начальных условий. С целью автоматизации расчетов разработан оригинальный программный продукт в программной среде EXEL.

Представленные выше зависимости содержат коэффициенты  $a$ ,  $n$ ,  $k$  и величину  $\sigma_{s0}$ , которые определяются экспериментально.

В ряде работ было показано, что часть этих коэффициентов имеют числовые значения, определяемые химическим составом и структурой металла, а другие коэффициенты являются функциями от температуры металла. Также в этих работах предложен вид соответствующих функций, определенный в соответствии с возможностью их линеаризации. Однако в качестве примера определения этих эмпирических коэффициентов и функций были использованы только литературные данные для ограниченного числа металлов. В представляемой работе, касающейся

процесса раскатки гильз в непрерывном стане, были отобраны образцы от трех характерных марок трубной стали – 32Г2У, 09Г2С и 32ХГА.

Определение их прочностных свойств было выполнено с использованием многофункционального испытательного комплекса Gleeble 3800.

При разработке методики экспериментального исследования решались следующие задачи:

- исследование сопротивления пластической деформации в диапазоне температур от 20°C до 1200°C;
- достижение максимального единообразия в проводимых экспериментах;
- определение параметров разупрочнения для всего диапазона температур.

Экспериментальное исследование предполагало проведение испытаний следующих видов:

- Для определения величины деформационного упрочнения, характеризуемого эмпирическими коэффициентами  $a$  и  $n$ , проводились испытания на растяжение при температуре 20°C.
- Для определения влияния температуры стали на величину  $\sigma_{s0}$  были проведены испытания на растяжение при температурах 20°C, 300°C, 600°C, 900°C и 1200°C.
- Для определения коэффициента  $k$ , характеризующего процесс разупрочнения в соответствии с зависимостью (3) были проведены испытания на сжатие при температурах 300°C, 600°C, 900°C и 1200°C.

Под каждый вид испытаний и для каждой температуры использовалось по 3 образца.

Влияние температуры нагрева металла на сопротивление пластической деформации учитывалось с помощью выражения:

$$\sigma_{s_0}(\theta) = \tilde{\sigma}_{s_0} \exp\left(-A\left(\frac{\theta_0 - \theta_0^\circ}{\theta_{nl} - \theta_0}\right)\right)^N. \quad (10)$$

где  $A$  и  $N$  - эмпирические коэффициенты.

Влияние температуры нагрева металла на величину коэффициента  $k$  учитывалось с помощью выражения

$$k = c\left(\frac{\theta_{nl} - \theta}{\theta + 20}\right). \quad (11)$$

где  $\theta_{nl}$  и  $\theta$  – температуры плавления металла и температура металла в рассматриваемый момент времени, соответственно;

$c$  – эмпирический коэффициент.

Для определения закономерностей разупрочнения металла опыты на сжатие осуществлялись за три удара при температурах 300°, 600°С, 900°С, 1200°С с фиксацией изменения сопротивления металла пластической деформации между ударами. Полученные в результате эксперимента данные в дальнейшем обрабатывались при помощи программ Origin и MSExcel.

Общий вид кривых, полученных в результате обработки компьютерными средствами установки Gleeble 3800, для различных температур представлен на рисунке 4.

При температурах 300°С, 900°С и 1200°С сопротивление деформации с увеличением степени деформации монотонно увеличивается. Величина сопротивления деформации с ростом температуры, как и должно быть, уменьшается, но качественно характер кривых остается одинаковым.

В отличие от этого, при температуре 600°С после достижения некоторой степени деформации наблюдается четко выраженное разупрочнение. Для

объяснения этого явления был выполнен анализ микроструктуры осажденных образцов<sup>1</sup>.

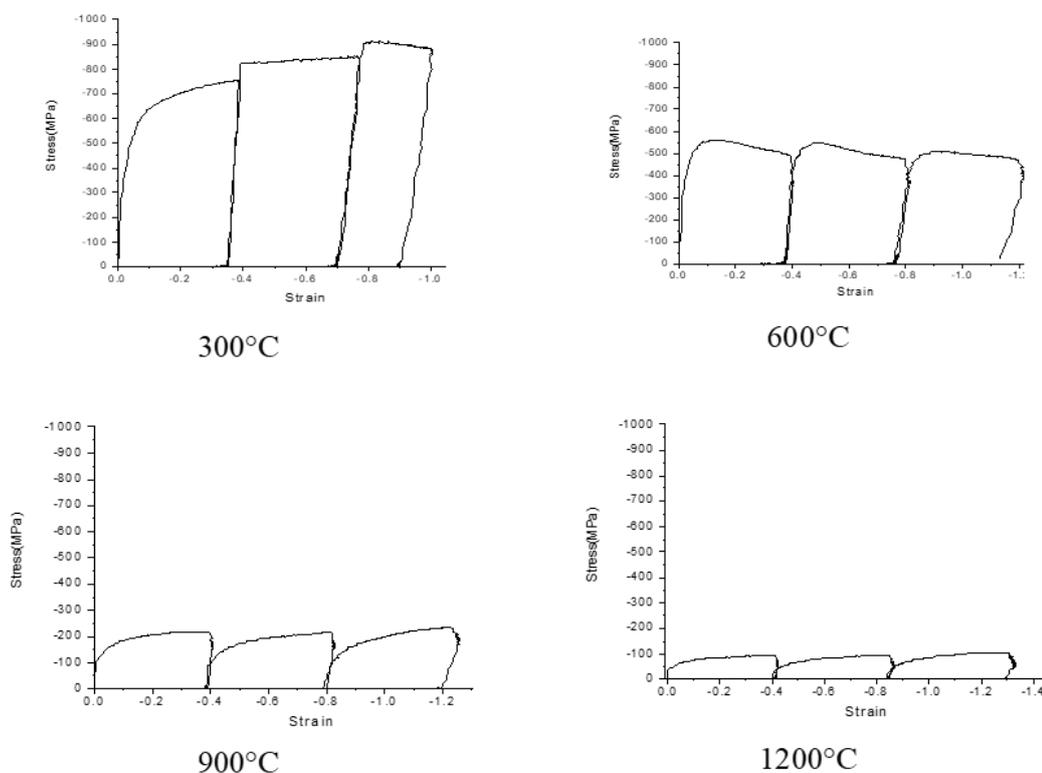


Рисунок 4 — Зависимость величины сопротивления деформации стали от величины деформации при различных температурах

Исследования микроструктуры металла, после деформации при 600°C, показали, что исходная структура представляет собой зерна перлита, окруженные зернами феррита (Рисунок 5а).

В процессе деформации зерна феррита вытягиваются в направлении течения металла, но при этом практически не происходит изменения их фазового состава. В зернах перлита пластическая деформация приводит к разрушению прослоек цементита, отдельные фрагменты которых благодаря диффузии коагулируют с образованием колоний шаровидных карбидов

---

<sup>1</sup> Анализ микроструктур выполнен при научных консультациях профессора М.А. Смирнова

(Рисунок 5б). В результате прочностные свойства металла снижаются несмотря на отсутствие фазовых превращений. Анализ микроструктуры образцов после деформации при температурах 500°C и 700°C показал аналогичный характер.

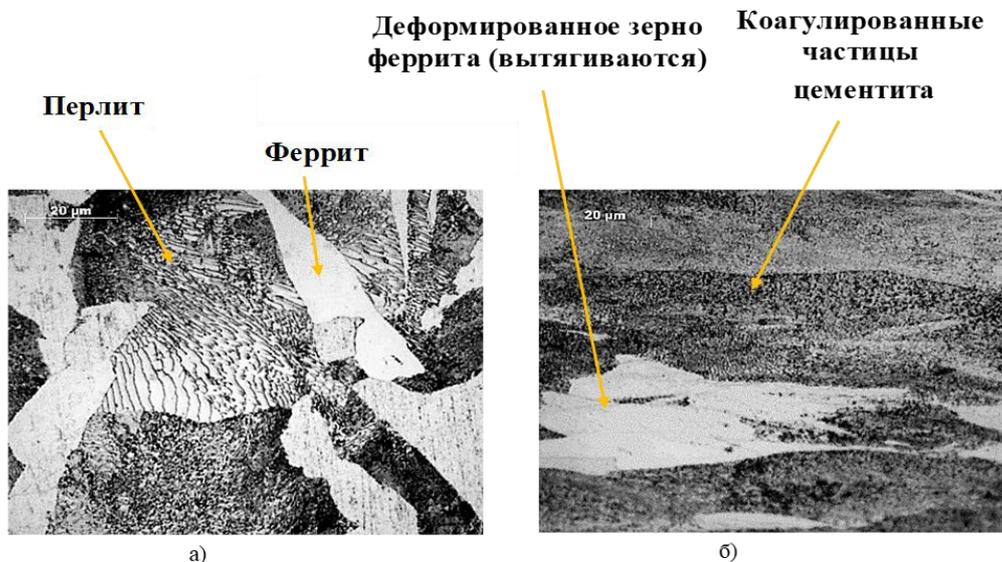


Рисунок 5 — Микроструктура: а) исходная; б) после деформации при 600°C

Для определения коэффициента  $k$  входящего в формулу (5), необходимо знать закономерности поведения металла в паузах между обжатиями. С этой целью с использованием средств обработки данных комплекса Gleeble 3800 были получены графики, описывающие изменение сопротивления металла в процессе единичного обжатия и последующей после него паузы

После обработки полученных графиков были определены численные значения величины остаточного упрочнения металлов  $\Delta\sigma_s$  в разные моменты времени паузы, величина остаточного упрочнения к моменту окончания деформирования  $\Delta\sigma_s$  и интервал времени  $\Delta t$ . С использованием этих эмпирических данных было рассчитано эмпирическое значение

коэффициента  $c$ , входящего в формулу (11), для расчета коэффициента разупрочнения  $k$ .

Для определения эмпирических коэффициентов  $A$  и  $N$  были проведены эксперименты по растяжению образцов при различных температурах.

После аппроксимации экспериментальных данных получены следующие зависимости:

для стали 32Г2У

$$\sigma_{s0} = 485 \exp \left( -0,959 \left( \frac{\theta_0 - 20}{1389 - \theta_0} \right) \right)^{0,43} . \quad (12)$$

для стали 09Г2С

$$\sigma_{s0} = 408 \exp \left( -0,9347 \left( \frac{\theta_0 - 20}{1474 - \theta_0} \right) \right)^{0,563} . \quad (13)$$

для стали 32ХГА

$$\sigma_{s0} = 542 \exp \left( -0,902 \left( \frac{\theta_0 - 20}{1395 - \theta_0} \right) \right)^{0,615} . \quad (14)$$

Для определения параметров деформационного упрочнения использовались кривые растяжения для температуры испытания 20°C. При этом аппроксимация кривых растяжения осуществлялась методом наименьших квадратов.

Благодаря проведенным исследованиям получены следующие математические зависимости для описания характера изменения сопротивления металла пластической деформации при сложном нагружении:

Сталь 32Г2У

$$\sigma_{si} = 485 \exp \left[ -0,959 \left( \frac{\theta_s - 20}{1389 - \theta_s} \right) \right]^{0,43} + \sum_{i=1}^m \left\{ 7474 (\Lambda_i^{1,27} - \Lambda_i^{1,27}) \left( \sigma_{s(i-1)} - 485 \exp \left[ -0,959 \left( \frac{\theta_s - 20}{1389 - \theta_s} \right) \right]^{0,43} \right) \left( \exp \left( \frac{(-\Delta t)}{0,098 \left( \frac{1389 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right) \right\}$$

### Сталь 09Г2С

$$\sigma_{si} = 408 \exp \left[ -0.934 \left( \frac{\theta_o - 20}{1474 - \theta_o} \right) \right]^{0.56} + \sum_{i=1}^m \left\{ 843,6 (\Lambda_i^{0,58} - \Lambda_i^{0,58}) \left( \sigma_{s(i-1)} - 408 \exp \left[ -0.934 \left( \frac{\theta_o - 20}{1474 - \theta_o} \right) \right]^{0.56} \right) \left( \exp \left( \frac{(-\Delta t)}{0.0685 \left( \frac{1474 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right) \right\}$$

### Сталь 32ХГА

$$\sigma_{si} = 542 \exp \left[ -0.902 \left( \frac{\theta_o - 20}{1395 - \theta_o} \right) \right]^{0.61} + \sum_{i=1}^m \left\{ 3796 (\Lambda_i^{0,91} - \Lambda_i^{0,91}) \left( \sigma_{s(i-1)} - 542 \exp \left[ -0.902 \left( \frac{\theta_o - 20}{1395 - \theta_o} \right) \right]^{0.61} \right) \left( \exp \left( \frac{(-\Delta t)}{0.0225 \left( \frac{1395 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right) \right\}$$

Полученные выражения были импортированы в разработанную программу расчета сопротивления металла деформации при раскатке гильз в непрерывном стане. Для оценки адекватности полученной модели были проведены расчёты для условий непрерывной раскатки гильз из стали 09Г2С. Для расчёта были взяты те же величины что и во второй главе (см. Таблица 1). Результаты расчёта по разработанной и известной методике представлены в виде графиков (Рисунок 6)

Известная методика не учитывает процессы разупрочнения, и, следовательно, при использовании для расчёта при многоступенчатой деформации изначально дает заниженные результаты. В то время как, методика, построенная с учетом процессов как упрочнения, так и разупрочнения позволяет более корректно оценить процессы, происходящие при перемещении металла между клетями непрерывного стана.

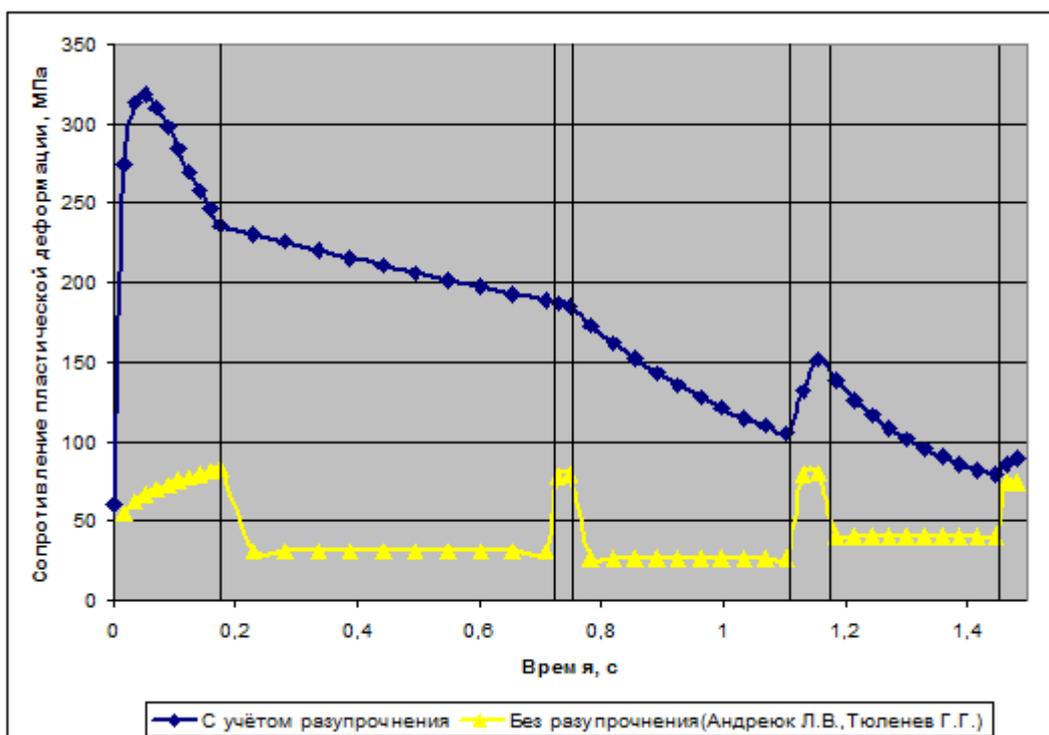


Рисунок 6 — Изменение величины сопротивления металла пластической деформации в процессе прокатки (вертикальными линиями показаны моменты входа-выхода из очагов деформации)

В четвертой главе представлены результаты практического применения полученных зависимостей.

Для расчета калибровки валков калибровочного стана термического отдела АО «ВТЗ» были рассчитаны значения величины сопротивления деформации в зависимости от степени деформации для температур, соответствующих температуре отпуска. Результаты исследования сопротивления деформации, переданные на Волжский трубный завод, также были представлены для использования на Северском трубном заводе.

#### Общие выводы и результаты работы:

В диссертационной работе выполнен комплекс исследований с применением современного программного обеспечения и современного испытательного оборудования, который позволил:

- Выявить закономерности деформированного состояния металла при раскатке гильз в непрерывном раскатном стане с учетом расположения рассматриваемой материальной частицы в начальный момент времени.
- Показано, что существующие методики определения сопротивления металла пластической деформации, при многошаговых и быстротечных процессах обработки металлов давлением дают заниженные результаты.
- Для учета функциональных свойств сопротивления металла пластической деформации создана автоматизированная система расчета, базирующаяся на феноменологической модели сопротивления пластической деформации.
- В результате экспериментального исследования стали марок 32Г2У, 09Г2С, 32ХГА отработана методика определения эмпирических коэффициентов, используемых в феноменологической модели сопротивления пластической деформации.
  - Полученная в результате исследования экспериментальная информация передана для использования в АО «ВТЗ» и ПАО «СТЗ».

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:**

1. Аль-Кхузаи, А.С.О. Исследование сопротивления металла пластической деформации стали марки 32Г2У в широком диапазоне изменения температур / А.С.О. Аль-Кхузаи, А.В. Выдрин, В.В. Широков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2020 г., Т.18, №1, С. 23-30. (ВАК РФ).
2. А.С.О. Аль-Кхузаи, В.В. Широков, А.В. Выдрин. Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 32ХГА / Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 80–86. (ВАК РФ).
3. А.С.О. Аль-Кхузаи, В.В. Широков, А.В. Выдрин. Определение диапазона изменения параметров напряжённно-деформированного

состояния металла при непрерывной прокатке труб / Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 74–79. (ВАК РФ).

4. Аль-Кхузаи, А.С.О. Расчет сопротивления металла пластической деформации с учетом его разупрочнения при непрерывной прокатке / .С.О. Аль-Кхузаи, А.В. Выдрин, В.В. Широков // «Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации». 2020. №3 (76). С. 258-263. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-3-258-262. (ВАК РФ).

5. Аль-Кхузаи, А. С. О. Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 09Г2С в широком диапазоне изменения температур / А.С.О. Аль-Кхузаи, А.В. Выдрин, В.В. Широков, О.А. Панасенко // «Черные металлы». 2020. №5. С. 15-19. (ВАК РФ и Scopus).

**Публикации в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web Science:**

6. A.S.O. Al-Khuzai, A. V. Vydrin and V. V. Shirokov, Study of the resistance of metal to plastic deformation of steel pipe in a wide range of temperature variation, (ELSEVIER). Materials Today: Proceedings, Volume:20, P4, 2020 Pages 617-620. (Scopus).

**Другие публикации в научных журналах:**

7. Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации. (ОМД), Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением, Магнитогорск. – 2018.- №4(27) -С. 61-69.

8. Ахмеров Д.А., Выдрин А.В., Струин Д.О., Шкуратов Е.А., Аль-Джумаили М. Ж. М, Аль-Кхузаи А. С. О. Исследование процесса продольной прокатки труб в калибрах, образованных разным количеством валков. (ОМД), Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением, Магнитогорск. – 2018. -№4(27) - С. 38-42.

9. Аль-Кхузайи А.С.О., Широков В.В., Выдрин А.В. Исследование процесса пластического сопротивления металла в широком диапазоне изменения температурного режима для трубной стали. MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции. 2019. С. 36-37.