

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, к.т.н.

_____ А.А. Корсаков
_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Д.А. Винник
_____ 2020 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ
МАТЕРИАЛОВ И СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБЖАТИЯ
ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ НИР ЮУрГУ–
22.04.02.2020.148. ПЗ ВК НИР

Руководитель работы, доцент, к.т.н.

_____ Н.Т. Карева
_____ 2020 г.

Автор ВКР

студент группы П-243

_____ Н.А. Заварцев
_____ 2020 г.

Нормоконтролер, доцент, к.т.н.

_____ Н.Т. Карева
_____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Заварцев Н.А. Исследование технологической пластичности материалов и создание программного продукта для обеспечения рациональных условий обжата трубных заготовок. – Челябинск: ЮУрГУ, 2020, 119 с, 40 ил, библиографический список – 43 наим.

Исследована технологическая пластичность заготовок из стали марки 15X13H2 в интервале температур от 1000 до 1250 °С. Построены графики зависимости крутящего момента от угла поворота и количества кручений до разрушения от температуры нагрева. Для оценки равномерности распределения пластических свойств по сечению осуществлено сопоставление результатов испытаний образцов из периферийной и центральной зон заготовок. Исследование осуществлялось при помощи системы термомеханического моделирования «Gleeble 3800». Определены температурные интервалы нагрева заготовки, в которых обеспечивается ее максимальная технологическая пластичность для достижения наименьшей вероятности образования дефектов обжатой заготовки. Для процесса обжата кованой заготовки из стали 15X13H2 наиболее рациональным является температурный интервал от 1050 до 1125 °С (в данном интервале относительное отклонение показателей технологической пластичности не превышает 11 %). Среднее количество кручений образцов до разрушения в пределах рационального интервала температур составляет $17,2 \pm 1,4$. Максимальное количество кручений до разрушения (18,5) наблюдалось при температуре нагрева образцов 1100 °С, минимально (11,1) – при температуре нагрева образцов 1250 °С. С увеличением температуры нагрева образцов выше 1100 °С наблюдалось монотонное снижение технологической пластичности стали. Обжатие кованых заготовок из стали марки 15X13H2 вне интервала

максимальной технологической пластичности может стать причиной образования дефектов.

Разработан программный продукт для ЭВМ: «Reduction Motor Load 2020» (RML2020), включающий расчетное ядро на базе разработанной ранее сотрудниками ОАО «РосНИТИ» математической модели, модуль анализа исходных данных, систему граничных условий и интерфейс с возможностью отображения результатов расчета и анализа в виде графиков. Для повышения точности расчетов проведена работа по адаптации расчетного ядра для условий обжата трубных заготовок из различных марок сталей на трехвалковом раскатном стане Ассела ТПЦ-1 с учетом фактических данных, предоставленных специалистами АО «ВТЗ».

Программный продукт позволяет производить как расчет токовых нагрузок на привод стана Ассела при обжате заготовок из разных марок сталей, так и анализ допустимых значений различных исходных параметров (диаметры исходной и обжатой заготовки, температура исходной заготовки, угол подачи и частота вращения валков) для обеспечения работы станов в допустимом диапазоне токовых нагрузок.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
1.1 Общие сведения о трубных сталях.....	11
1.2 Стали мартенситного класса содержащие 13 % хрома, применяемые в трубной промышленности.....	16
1.3 Влияние основных легирующих элементов на фазовый состав, структуру и свойства супермартенситных сталей	19
1.4 Применение высокотемпературной термомеханической обработки для супермартенситных сталей.....	22
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	27
2.1 Материал и методика исследования.....	27
2.2 План исследования.....	30
3 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	34
3.1 Исследования температурно-деформационных режимов.....	34
3.2 Разработка программного продукта на основе математической модели	48
3.3 Адаптация программного продукта «Reduction Motor Load 2020», предназначенного для расчета значений токовых нагрузок при обжати заготовок	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	79
Приложение А (обязательное) Блок-схема программы «Reduction Motor Load 2020»	84
Приложение Б (справочное) Альбом графиков, проанализированных данных по кампаниям обжати.....	90

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается повышение спроса на производство труб из нержавеющей сталей, в особенности для нефтяной и газовой промышленности, в частности сталей типа 13Cr. Данные стали обладают рядом уникальных свойств, которыми, несмотря на высокую стоимость изделий из данного материала, обоснована необходимость их применения [1, 2].

Способность сталей и сплавов подвергаться обработке давлением на трубопрокатных агрегатах определяется двумя основными показателями – пластичностью и сопротивлением деформации, которые в совокупности обеспечивают технологическую пластичность металлов.

Оба этих показателя взаимосвязаны и зависят от природы металла, его структурного состояния, температурно-скоростных условий деформации, состояния поверхности заготовки, окружающей среды и других факторов.

Винтовая прокатка один из самых распространенных и производительных способов производства бесшовных труб. Благоприятная схема напряженного состояния, присущая процессу винтовой прокатки, позволяет деформировать мало пластичные материалы, такие как непрерывно литые заготовки или трудно деформируемые сплавы [3].

Схема напряженного состояния при обжатии на стане винтовой прокатки резко отличается от схемы напряженного состояния при любом применяемом способе испытания металлов. Поэтому экспериментальные данные о механических свойствах сталей, характеризующие возможность получения обжатой заготовки без дефектов при обжатии в горячем состоянии (сопротивление растяжению, сжатию, динамическая проба на удар и др.), не показательны в этом случае и практически не могут быть использованы. Значительно более надежные результаты дает способ испытания на горячее кручение.

С целью получения новых данных по изменению технологической пластичности сталей в зависимости от температуры в настоящей работе

проведены испытания для образцов из кованной и непрерывнолитой заготовок из стали марки 15X13H2 и сравнение с уже полученными данными [4] для сталей марок 20 и 10ГФБЮ.

Даже при известных данных о температурно-деформационных режимах обжата задача возможности его осуществления на имеющемся оборудовании остается крайне трудоемким процессом, хотя и представляет из себя четкий алгоритм действий, в результате которого, для определённой степени обжата, температуры, марки стали и других параметров вычисляется токовая нагрузка на привод стана.

Расчет нагрузок на приводы раскатных станов Ассела при обжате трубных заготовок даже с использованием математической модели является трудоемкой инженерной задачей, поскольку очаг деформации разбивается на трети шага подачи заготовки и на каждом этапе рассчитываются значения параметров, влияющих на следующий шаг. В случае изменения какого-либо параметра процесс расчета необходимо начинать заново. Поэтому задача разработки программного продукта, позволяющего использовать математическую модель для различных исходных данных, является актуальной.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Общие сведения о трубных сталях

В производстве труб применяется свыше ста марок сталей. Развитие производства стальных труб в мире постоянно опережает развитие остальных специализированных отраслей черной металлургии. Высокие темпы наращивания мощностей и расширения сортамента стальных труб обусловлены интенсивным ростом их потребления.

Повышение эксплуатационных характеристик труб обуславливает все возрастающие требования потребителей к их механическим свойствам, точности размеров и качеству поверхности. В связи с этим, неизбежно возрастает выпуск труб, получаемых с использованием наиболее современных процессов. [5]

1.1.1 Исходные материалы для производства труб

В настоящее время сталь, предназначенную для производства труб, относят к категории качественных. От рядовых сталей она отличается более низким содержанием вредных примесей – фосфора и серы.

Повышенное качество трубной стали должно обеспечиваться и низким содержанием растворенных в ней газов – азота, кислорода, водорода. Кроме контроля на содержание химических элементов, некоторые трубные марки стали дополнительно подвергают специальным испытаниям (на механические свойства), а также проводят контроль макро- и микроструктуры.

Выплавляют сталь для труб в конверторах и дуговых электропечах.

Исходным материалом для производства бесшовных труб обычно является спокойная сталь, для сварных труб используют спокойную, полуспокойную и кипящую сталь.

Кипящая сталь имеет большой ряд преимуществ: меньший размер первичной усадочной раковины, полное отсутствие вторичной усадочной раковины, меньшее количество неметаллических включений, лучшее качество поверхности, высокая

пластичность металла, низкая прочность металла, высокая вязкость, низкая стоимость производства. Но, также кипящая сталь имеет и недостатки, например, высокая концентрация вредных примесей и более интенсивное старение металла и меньшая устойчивость к коррозии.

Спокойная сталь в свою очередь, имеет меньшую концентрацию вредных примесей и отсутствие подкорковых пузырей, но качество поверхности у нее хуже, в отличие от кипящей стали.

При изготовлении бесшовных труб кипящую сталь и полуспокойную сталь используют только для труб менее ответственного назначения именно из-за высокой концентрации вредных примесей и значительного количества подкорковых пузырей.

В последние годы для повышения качества трубной стали применяют продувку аргоном, вакуумирование, обработку стали синтетическими шлаками, добавки порошковых реагентов.

Стали с повышенным содержанием углерода используют для изготовления труб большого диаметра, которые применяются в нефтедобывающей промышленности в качестве обсадных и бурильных, а также для других труб ответственного назначения. Стали с более низким содержанием углерода используют для производства паропроводных, котельных и других видов труб.

В зависимости от способа производства и назначения труб исходным материалом может быть катаная и кованая заготовка, а также слитки. [5]

1.1.2 Марки сталей, используемые при производстве труб

Большинство труб прокатывают из низкоуглеродистых сталей. Из легированных сталей наиболее широко применяют стали перлитного класса. Для изготовления нержавеющей труб используют стали аустенитного класса.

Кроме того, трубы изготавливают из сталей ферритных, аустенитно-ферритных, мартенситно-ферритных, мартенситных и мартенситно-аустенитных, а также никелевых, титановых, циркониевых, ниобиевых, молибденовых, и

танталовых сплавов.

Сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций.

К этой категории стали, в частности, относится марка 09Г2С и ее заменители 09Г2, 09Г2ДТ, 09Г2Т, 10Г2С, содержащие 0,12 % углерода, добавки марганца (1,3-1,7 %), кремния (0,5-0,8 %), по 0,3 % никеля, хрома, меди и незначительные вкрапления других легирующих компонентов. Эти добавки повышают прочность и стойкость к коррозии, а стали находят применение в производстве газлифтных (предназначенных для подъема газа и нефти из недр) труб. Такие трубы эксплуатируются в суровых климатических условиях, поэтому должны выдерживать очень низкие температуры. Также требуется устойчивость к контакту с агрессивной средой, коррозии, способность выдерживать значительное давление.

Сталь 09Г2С отличается высокой прочностью и пластичностью. Она не склонна к поражению флокенами (образование полостей и трещин внутри структуры) и отпускной хрупкости (снижение ударной вязкости после закалки), хорошо противостоит нагрузкам. Сварку труб из такой стали можно производить в любых условиях, без ограничений. Их эксплуатация возможна в температурном диапазоне от -70°C до $+425^{\circ}\text{C}$.

Сталь конструкционная углеродистая качественная

Качественными считаются стали с пониженным, до 0,035 %, содержанием вредных примесей – фосфора и серы. Благодаря этому снижается их ломкость при низких температурах (хладноломкость) и склонность к образованию трещин при обработке под давлением при высоких температурах (красноломкость). Такие стали пригодны для ответственных сварных конструкций.

В частности, сталь 20ПВ, принадлежащая к этой группе, применяется для изготовления труб, которые используются с паровыми котлами высокого давления как элементы трубопроводов, коллекторов и перегревателей. Эту сталь еще называют «котельной», трубы из нее выдерживают давление и температуру пара при высоких и сверхкритических параметрах.

Она относится к низкоуглеродистым (содержание углерода 0,18 – 0,24 %),

имеет незначительные добавки марганца (0,35 – 0,65 %) и кремния (0,17 – 0,37 %) и минимальное содержание вредных примесей (до 0,015 %).

Сталь конструкционная углеродистая обыкновенного качества

Сталь обыкновенного качества отличается более высоким содержанием примесей фосфора и серы, до 0,05 %. Некоторые стали этой категории применяются в трубопрокатном производстве. Из стали Ст2 и Ст3 ПС/СП изготавливают электросварные трубы, которые могут использоваться только при плюсовых температурах, выдерживают температуру до 300 °С и давление до 1,6 Н/мм². Это низкоуглеродистые стали с незначительным содержанием легирующих добавок, они достаточно пластичны; свариваются без ограничений.

Сталь конструкционная легированная

Основная особенность легированных сталей – содержание легирующих компонентов, которые улучшают физические и химические характеристики стали. Кремний, марганец и никель повышают твердость, но содержание свыше 1 % легирующих элементов, кроме никеля, делает сталь хрупкой.

Никель и кремний повышают предел текучести стали, ее устойчивость к незначительным пластическим деформациям. Кремний также делает ее более устойчивой к низким температурам [6].

Для повышения прокаливаемости стали, то есть увеличения толщины закаленного слоя, используют молибден, ванадий и бор (в малых дозах). Никель и хром обеспечивают стойкость к коррозии, а медь еще и кислотостойкость.

В производстве труб в основном применяются цементируемые легированные стали. Если важна стойкость к коррозии, используется сталь с высоким содержанием хрома.

Одна из наиболее ходовых марок для бесшовных горячекатаных труб – сталь 30ХГСА и ее заменители (40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 25ХГСА, 35ХГСА). Она является среднеуглеродистой, содержит по 0,8 – 1,1 % хрома и марганца и 0,9 – 1,2 % кремния. Сталь относится к ограниченно свариваемым, подвержена образованию флокенов и склонна к отпускной хрупкости.

Сталь жаропрочная низколегированная

Жаропрочность (окалиностойкость) стали – это ее устойчивость к газовой коррозии под действием высоких температур. При температуре свыше 550 °С в газовой атмосфере на поверхности изделий из железных сплавов образуется оксид железа (окалина). Чтобы предотвратить это явление, в сплав добавляют никель, хром, алюминий. Значительно повышает жаропрочность молибден, в меньшей степени – кремний. Содержание углерода в большинстве марок стали этой категории не превышает 0,15 – 0,18 %.

Процентное соотношение легирующих добавок в разных сталях этой группы различается, что обуславливает возможности их применения. Самые высокие температуры (до 600 – 650 °С) выдерживает, не окисляясь, сталь мартенситного класса 15Х5М, содержащая 4,5 – 6 % хрома. А вот трубы из сталей 12ХМ, 15ХМ, в которых содержание добавок хрома и молибдена менее 1 %, выдерживают температуры до 500 °С. [6]

В заключении можно сказать, что при производстве деталей из трубной стали следует учитывать условия эксплуатации, а именно выдержку при высоких и низких температурах, коррозионную стойкость, а также деформируемость и свариваемость.

1.2 Стали мартенситного класса содержащие 13 % хрома, применяемые в трубной промышленности

1.2.1 Общие сведения

За последние годы наблюдается постоянный рост числа нефтяных и газовых месторождений, содержащих в добываемой продукции коррозионно- активные компоненты, в первую очередь углекислый газ и сероводород. По данным [7] на 2010 г. из общего количества эксплуатируемых в РФ скважин 16 % относятся к осложненным коррозией, в то время как в 2003 г. их число составляло лишь 6 %. Наличие коррозионно-активных сред приводит к преждевременному выходу из строя обсадных и насосно-компрессорных труб, что часто сопровождается аварийными разрушениями, материальные и экологические потери вследствие которых весьма значительны [8].

Соответственно спрос на коррозионностойкие материалы для изготовления труб постоянно повышается, так как обеспечить требуемую эксплуатационную стойкость с помощью применения низкоуглеродистых и углеродистых низколегированные сталей не представляется возможным (рисунок 1.1). Расходы, связанные с необходимостью защиты таких сталей от коррозии делает их применение экономически невыгодным. К тому же при использовании таких сталей необходимы частые проверки на отсутствие критических коррозионных разрушений. Так как в настоящее время активно развивается освоение арктических районов, помимо требований предъявляемым к коррозионной стойкости предъявляются высокие требования к хладостойкости, а сложные, арктические условия эксплуатации делают еще менее выгодным частые работы по контролю состояния труб.

В настоящем обзоре основное внимание уделено трубам, стойким к углекислотной коррозии.

За последние 30 лет мировой практики, сталями нефтяного сортамента (ОСТГ), зарекомендовавшими себя как наиболее успешные по стойкости к

углекислотной коррозии, как равномерной, так и локальной, являются стали содержащие от 13%Cr и выше.

Такое положительное влияние хрома в количестве 13 % обусловлено переводом стали в пассивное состояние в агрессивной среде за счет образования на поверхности тонких защитных пленок из продуктов коррозии, обогащенных хромом в виде аморфного гидроксида хрома $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Способность сталей к пассивации увеличивается с ростом концентрации Cr в стали [10]. При этом, содержание хрома в стали должно быть не менее 10,5 % (рисунок 1.2).

Общим признаком, которым обладают все стали рассматриваемого типа, является наличие в их химическом составе 13% хрома. Такие стали используют систему легирования, благодаря которой реализуется особенный механизм упрочнения. Содержание углерода в таких сталях не превышает 0,4%, дополнительно они легированы никелем (2 - 6 %) и молибденом (0,4 - 2,5 %).

Такой подход к легированию позволил обеспечить следующее:

- повышение стойкости к общей и локальной коррозии, а также к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН);
- обеспечение механических свойств, соответствующих пределу текучести не менее 758 МПа;
- улучшение свариваемости [11].

Супермартенситные стали (13Cr–2Mo–5Ni) обладают большей коррозионной стойкостью при высоких температурах в среде углекислого газа и сероводорода. Супермартенситная сталь (13Cr-2Mo– 5Ni) показывает более высокие характеристики в среде с парциальным давлением углекислого газа, равным 10,3 МПа, при температуре 160°C, и концентрации хлорида натрия 20 % в статичной среде [12]. В аналогичных условиях при температуре 200 °С, приемлемые характеристики показала хромистая сталь 15Cr. В некоторых случаях, например, в присутствии сильных кислот, мартенситная сталь может обеспечить более высокую коррозионную стойкость, чем другие стали, в которых происходит

селективное растворение ферритной фазы [13].

Сталь данного класса включена в стандарт API 5CRA/ISO13680:2008 и в недавно разработанный ГОСТ Р ИСО 13680 (условное обозначение марки стали 13-5-2) [14, 15].

Кроме того, данные стали являются стойкими к коррозионным повреждениям при содержании ионов хлора (Cl^-) не более 50 ppm (0,005 %).

1.2.2 Коррозионная стойкость высокохромистых сталей

Увеличение парциального давления CO_2 увеличивает скорость коррозии тем больше, чем выше температура рабочей среды (рисунок 1.3).

Углекислотная коррозия (коррозия в бессернистой среде) вызывает повреждение металла вследствие кислотных свойств раствора углекислого газа (т. е. угольной кислоты). В замедлении скорости коррозии значительную роль играют солеотложения или пленки, которые отчасти выполняют защитную функцию. Образование и удаление таких отложений зависят от температуры. Наибольшая скорость коррозии углеродистой стали наблюдается при температуре 93°C .

В некоторых случаях для снижения разрушающего воздействия в условиях более высоких температур можно использовать насосно-компрессорные трубы (НКТ) из хромистой стали 13Cr. Легирование стали хромом повышает прочность, улучшает сцепление продуктов коррозии с поверхностью за счет наличия оксидов хрома, а также снижает электропроводность пленки. Даже незначительное содержание хрома может существенно улучшить свойства стали при низких температурах. При более высоких температурах этот эффект ослабевает, причем хромистые стали могут корродировать даже быстрее, чем углеродистые. В 1980-е и 1990-е годы широкое применение получила хромистая сталь 9Cr. Тем не менее, в последние годы НКТ 9Cr используются реже, поскольку стала доступна сталь 13Cr при незначительной разнице в цене. В последнее время в скважинах с низкой или умеренной температурой на забое менее 150°C , при наличии углекислого газа, при нулевом или малом содержании сероводорода и малом содержании

хлористых солей стали широко применяться НКТ из стали 13Cr, а НКТ L80 13Cr включены в стандарт API Spec 5CT. Пленка, которая образуется на поверхности стали 13Cr и отчасти выполняет защитную функцию, может повреждаться под действием высокой скорости потока или абразивных частиц.

Вместе с тем, сталь 20X13 не лишена ряда недостатков. К ним относятся:

- склонность к хрупкому разрушению при отрицательных температурах;
- температура эксплуатации не выше 150 °С;
- стойкость к сероводородному растрескиванию под напряжением (СРН)

резко снижается при парциальном давлении сероводорода 10^{-2} МПа и более [17];

1.3 Влияние основных легирующих элементов на фазовый состав, структуру и свойства стали 15X13H2

Влияние, оказываемое основными легирующими элементами на такие характеристики как фазовый состав, структура и механические свойства занимает важное место в изучении материалов, а значит требуют обязательного рассмотрения.

Для стали 15X13H2 основными легирующими элементами являются Cr и Ni, но, также важно отметить присутствие таких элементов как Mn и Si, присутствующих в количестве не более 0,5%, оставшихся в стали после операции раскисления, необходимой для того, чтобы получить спокойную сталь на стадии выплавки.

Воспользуемся диаграммой состояния системы Fe-Cr, чтобы оценить влияние содержания хрома на фазовый состав стали (рисунок 1.4).

Из диаграммы следует, что на кривых ликвидус и солидус при 22% (ат.) Cr и 1507 °С наблюдается минимум. Хром стабилизирует ОЦК модификации железа и образует с этими модификациями непрерывные ряды твердых растворов. Область твердых растворов хрома в ГЦК модификации железа сравнительно узкая и простирается до 13,3% Cr. Хром снижает температуру полиморфного превращения железа от 910 до 830 °С при содержании ~7,5%. При дальнейшем увеличении содержания хрома, эта температура резко возрастает [18, 19].

Хром в стали является ферритообразующим легирующим элементом. На диаграмме состояния системы Fe-Cr (рисунок 1.4) видно, что при температурах от 900 до 1200 °С и содержании Cr ~13% сплав может находиться в двухфазной области, и даже малые изменения в содержании хрома могут способствовать переходу в однофазную область. К тому же, присутствие других легирующих элементов может сместить данный интервал.

В составе стали 15X13H2 также присутствует никель, воспользуемся диаграммой состояния системы Fe-Ni, чтобы оценить его влияние на данную сталь.

Никель в составе сталей является аустенитообразующим элементом. По диаграмме (рисунок 1.5) видно, что Fe и никель образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов. Никель, растворяясь в железе повышает температуру превращения от 1390 до 1512 °С, при этой температуре протекает перитектическая реакция. Сплавы данной системы кристаллизуются в узком интервале температур, не превышающем 10-15 °С. Кривые ликвидус и солидус имеют минимум при 1436 °С и содержании 68% Ni. Кривые соприкасаются в точке минимума [18, 20].

При понижении температуры возрастает равновесная концентрация Ni в твердом растворе и при 300 °С достигает ~7,5%. Также, с понижением температуры, значительно расширяется двухфазная область. При температурах ниже 500 °С диффузионные процессы крайне замедлены.

Так как хром выклинивает α -область и при содержании его 13% и более полиморфного превращения не происходит, можно сделать вывод что такая сталь относится к ферритному классу, потому что во всем интервале температур имеет ферритную структуру. В зависимости от содержания других легирующих элементов может меняться как структура, так и класс стали.

Обычно, легирующие элементы нержавеющей сталей делят на две группы:

- 1) Ферритообразующие – легирующие элементы, способствующие получению ферритной структуры, а именно Mo, Nb, Ti, Si (действующие подобно

хрому);

2) Аустенитообразующие – способствующие получению аустенитной структуры, это Mn и C (действующие подобно никелю), причем Mn действует в 2 раза слабее никеля, а углерод в 30 раз сильнее.

Судить о том, к какому классу будет принадлежать материал из данной стали можно с помощью диаграммы Шефлера (рисунок 1.6).

На диаграмме Шефлера указаны структуры, полученные после закалки с температуры 1050 °С. Нержавеющие стали по структуре основы можно разделить на:

- Аустенито-ферритные
- Аустенито-мартенситные
- Мартенсито-ферритные

Чтобы определить к какому классу принадлежит сталь 15X13H2 необходимо рассчитать эквиваленты никеля и хрома.

Эквивалент никеля рассчитываем по следующей формуле [21]:

$$Ni_{\text{экв}} = (Ni) + (Co) + 0,5(Mn) + 0,3(Cu) + 25(N) + 30(C), \quad (1.1)$$

Чтобы рассчитать эквивалент хрома воспользуемся выражением [21]:

$$Cr_{\text{экв}} = (Cr) + 2(Si) + (Mo) + 5(V) + 5,5(Al) + 1,75(Nb) + 1,5(Ti) + 0,75(W), \quad (1.2)$$

Для стали 15X13H2:

$$Ni_{\text{экв}} = 1,9 + 0,5 \cdot 0,45 + 25 \cdot 0,017 + 30 \cdot 0,14 = 6,75$$

$$Cr_{\text{экв}} = 12,9 + 2 \cdot 0,34 + 1,5 \cdot 0,06 + 5 \cdot 0,02 + 1,75 \cdot 0,01 + 1,5 \cdot 0,02 = 13,8$$

По полученным данным можно сделать вывод, что сталь 15X13H2 принадлежит к мартенсито-ферритному классу нержавеющей сталей.

В составе данной стали имеются микродобавки таких легирующих элементов

как Ni, Mo, Ti, V. Данные элементы добавляются в очень малом количестве (не более 0,05%), тем не менее оказывают довольно заметный эффект на свойства. Такое микролегирование делает данную сталь наследственно мелкозернистой, а небольшое содержание азота (не более 0,02%) позволяет образовывать нитриды, которые сдерживают рост зерна, а значит, измельчают структуру.

1.4 Применение высокотемпературной термомеханической обработки для сталей типа 13Cr

Стали типа 13Cr могут быть использованы в различных неблагоприятных условиях, благодаря уникальному набору свойств, которые могут быть достигнуты при соблюдении требований к производству изделий. Требования к обсадным и насосно-компрессорным трубам из стали типа 13Cr регламентируются стандартом API 5CT. Российские предприятия выпускают данную продукцию в соответствии с техническими условиями [22].

С целью достижения наилучших свойств в настоящее время используется множество разных видов и режимов термической и деформационной обработки, такое разнообразие обусловлено не только различными механическими свойствами, получаемыми в результате, но и влиянием на себестоимость продукции [23]. Улучшение физико-механических свойств в разной степени также может быть достигнуто за счет: модифицирования [24], изотермической закалки [25], совмещением термомеханической и термической обработок [26], комбинированной термической обработки [27] и др.

Для сталей типа 13Cr обычно применяют закалку и отпуск. Нагрев под закалку осуществляют до температур 980-1050 °С, в зависимости от разброса по химическому составу и специфике требуемых свойств. Отпуск проводится при температурах не ниже 620 °С, но в редких случаях может быть снижена до 600 °С. Данные стали характеризуются высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, соответственно, существует возможность их закалки на воздухе. В

качестве закалочной среды наибольшее распространение получило индустриальное масло, так как уровень внутренних напряжений существенно ниже чем при использовании воды, но закалка все еще проводится с меньшими временными затратами чем на воздухе.

Иногда для таких сталей применяется двойная закалка, причем первый нагрев производится при более высокой температуре, чем второй. Применение двойной закалки с последующим отпуском для хромистых сталей мартенситного класса, обладающих невысокой ударной вязкостью, целесообразно, поскольку такая термическая обработка в ряде случаев повышает ударную вязкость. Также может применяться двойной отпуск: первый при температуре 570 °С, а второй при 680-700 °С; такая обработка позволяет сократить количество остаточного аустенита в структуре.

Одним из наиболее интересных способов обработки стали является термомеханический контролируемый процесс или термомеханическая обработка (ТМО) сталей, также известная как контролируемая (термомеханическая) прокатка. Данный способ обработки материалов заключается в совокупности деформационной и термической обработки используемых строго определенным образом. Такая обработка позволяет значительно улучшить механические свойства стали [28]. В настоящее время в производстве применяется множество различных вариантов использования данного метода обработки материалов, стоит обратить внимание на две, наиболее используемые, разновидности:

1. Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО). Для осуществления данного вида термомеханической обработки необходимо нагреть сталь до температуры, обеспечивающей аустенитное состояние, после выдержке при данной температуре и выравнивания аустенитной структуры по всему сечению, необходимо охладить сталь до температуры ниже температуры рекристаллизации и провести деформацию при данной температуре. Следует отметить, что время, за которое необходимо провести деформационную обработку, ограничено инкубационным периодом. Появляется наклеп, плотность

дислокаций возрастает. После деформации, но до завершения инкубационного периода, необходимо выполнить закалку, охладить сталь достаточно быстро для получения мартенситной структуры. Полученный мартенсит наследует дислокационное упрочнение. Трудность при осуществлении НТМО – это узкий временной интервал осуществления, определяющийся инкубационным периодом;

2. Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО). Данный метод заключается в нагреве стали в аустенитное состояние и последующем охлаждении, и деформации, так чтобы деформация происходила при температурах выше температуры рекристаллизации. Обычно диапазон температур деформации делят на две части – черновая и чистовая деформация. Для такого разделения обычно вводят понятие температуры статической рекристаллизации в междеформационных паузах (T_{nr}), ниже которой данная рекристаллизация не происходит, но остается динамическая рекристаллизация. Черновая деформация проводится при температурах выше T_{nr} , а чистовая ниже. Окончательной операцией при ВТМО является отпуск. Благодаря ВТМО можно обеспечить повышение прочностных свойств и, что особенно важно, удается сохранить на высоком уровне характеристики пластичности, вязкости и сопротивления хрупкому разрушению или даже увеличить их [29]. Особенность этой обработки заключается в том, что она эффективно ослабляет развитие многих видов интеркристаллитной хрупкости [30].

Так на линиях ВТМО и термоотделов получают насосно-компрессорные трубы заданной группы прочности и муфтовые заготовки из углеродистых и легированных марок сталей (20, 35, 32Г2 и др.) [31]. В результате получается материал, обладающий очень высокими свойствами с минимальным разбросом значений в пределах плавки, что позволяет использовать отпуск или теплую деформацию в широких пределах в зависимости от требований к потребительским свойствам. Как показано в исследованиях [32], ВТМО обеспечивает для высокохромистой стали сравнительно небольшое повышение прочностных свойств, но ее ударная вязкость повышается значительно, учитывая, что ударная вязкость является одной из наиболее важных характеристик трубных

сталей, данный метод нашел широкое применение в производстве труб.

Во время горячей деформации протекают два конкурирующих процесса: упрочнение и разупрочнение. Разупрочнение происходит из-за наличия процессов динамического возврата и динамической рекристаллизации, упрочнение обусловлено образованием дефектов кристаллической решетки, по большей части дислокаций. С целью анализа особенностей поведения материалов при горячей деформации принято использовать диаграммы деформации, построенные в координатах напряжение - деформация, такие диаграммы позволяют судить о процессах, протекающих в деформируемом материале.

В общем случае по окончании горячей обработки стали в зависимости от условий деформации, определяемых величинами напряжений, температуры и скорости деформации, а также последеформационными выдержками, микроструктура металла может быть следующей [33]:

1. Состояние горячего наклепа с неупорядоченным распределением дислокаций. В данном случае, при последующей закалке, для свойств материала можно отметить повышение прочности и, одновременно, снижение сопротивления хрупкому разрушению;

2. Состояние, соответствующее началу образования субструктуры как результата динамического возврата, когда происходит падение прочности и повышается пластичность, вязкость, а также сопротивление хрупкому разрушению, а также при этом может частично сохраняться состояние горячего наклепа;

3. Совершенная и устойчивая субструктура, получаемая в результате динамической полигонизации, с помощью которой можно добиться более высоких значений механических свойств, когда наряду с упрочнением созданы предпосылки для релаксации напряжений в местах их концентрации, уменьшающей опасность преждевременного хрупкого разрушения;

4. Состояние динамической рекристаллизации, определяющей смягчение (падение прочности) при сильном горячем наклепе.

Данные виды микроструктуры впоследствии наследуются при мартенситном

превращении во время закалки. Режимы горячей деформации при осуществлении ВТМО разрабатываются с целью получения развитой субструктуры, получаемой в результате динамической полигонизации. При этом помимо повышения плотности дислокаций, а, соответственно, дислокационного упрочнения, происходит еще и измельчение зеренной структуры, благодаря тому, что дислокации формируют новые границы субзеренной структуры с малыми углами разориентировки. Именно в этом случае при ВТМО будет получен устойчивый комплекс свойств высокой прочности и высокого сопротивления хрупкому разрушению [34]. Важной особенностью структуры, формирующейся при осуществлении ВТМО, является искаженность границ зерен, выраженной в наличии зубчатости по границам зерен. Наличие зубчатости обусловлено миграцией большеугловых границ, которая неравномерна (миграция) вследствие неоднородности распределения структурных несовершенств [35].

Следует учитывать, что на протекание процессов упрочнения- разупрочнения помимо самого материала (его химического состава, наличия дисперсных выделений в его структуре и т.п.) влияют такие параметры, как скорость, степень и температура деформации. Поэтому данные параметры деформации важны при назначении режима ВТМО.

Высокие температура, степень и скорость деформации могут привести к развитию процессов рекристаллизации как динамической, так и статической в течении междеформационных пауз. При низкой температуре затруднено протекание динамического возврата, также слабо протекает процесс упрочнения при малых степенях деформации, а при низкой скорости деформации начинают превалировать процессы разупрочнения.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Материал и методика исследования

Материал исследования: образцы из стали марки 15X13H2 вырезанные из кованных и непрерывнолитых заготовок (НЛЗ). Химический состав стали приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав стали 15X13H2

Марка стали	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Nb	N
15X13H2	0,14	0,45	0,34	0,003	0,011	12,9	1,9	0,06	0,02	0,02	0,01	0,017

Для проведения исследований, предусмотренных настоящим этапом, выбрана цифровая замкнутая система термомеханического моделирования «Gleeble 3800» – одна из самых современных и технически оснащенных систем, позволяющая моделировать поведение металла и изменении его механических свойств в процессе прокатки,ковки,экструзии,литья,сваркиидр.Применяласьустановка«Gleeble 3800»смобильнымимодулямигорячегокручения(Torsion, рисунок 2.1-а)исжатия(Hydrawedge, рисунок 2.1-б).

Для проведения исследований были изготовлены стандартные для выбранной испытательной установки образцы, вырезанные из кованой заготовки диаметром 340 мм из стали марки 15X13H2 (рисунок 2.2) и из НЛЗ той же марки стали.

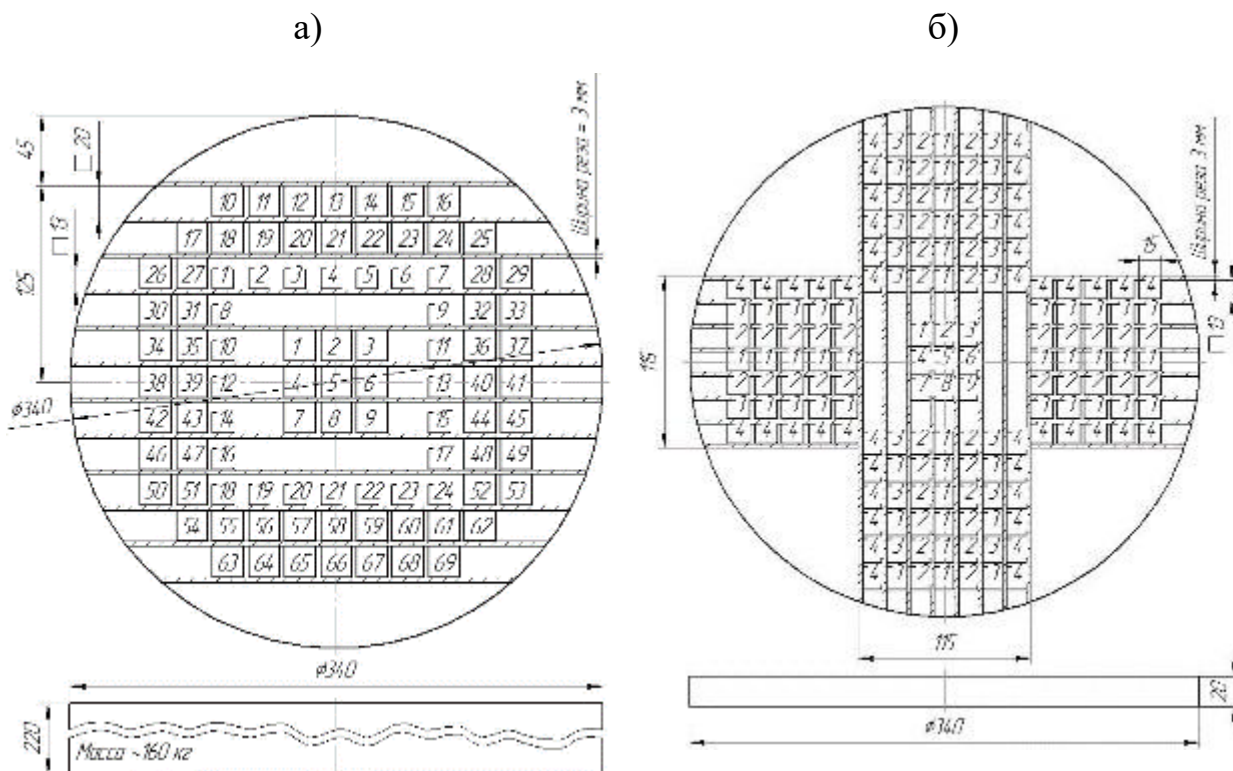


Рисунок 2.2 – Схема вырезки образцов для испытаний на: а) – кручение; б) – сжатие

Схема напряженного состояния при обжатии резко отличается от схемы напряженного состояния при любом применяемом способе испытания металлов. Поэтому экспериментальные данные о механических свойствах сталей в горячем состоянии (сопротивление растяжению, сжатию, динамическая проба на удар и др.) не показательны в этом случае и практически не могут быть использованы. Значительно более надежные результаты дает способ испытания на горячее кручение.

Сущность данного метода заключается в определении угла закручивания образца до его разрушения (характеристики пластических свойств стали) и

максимального скручивающего усилия или момента кручения (характеристика сопротивления деформации).

Хотя схема напряженного состояния при кручении отличается от схемы, имеющейся при обжатии, результаты таких испытаний хорошо согласуются с результатами испытаний на экспериментальном стане винтовой прокатки и практикой производства труб [2].

2.2 План исследования

Главная цель проведения исследований стали марки 15X13H2 на установке «Gleeble 3800» – определение рациональной температуры нагрева металла перед обжатием и корректировка температурно-деформационных режимов прокатки, при необходимости. Кроме того, представляет интерес определение критической степени деформации при которой происходит разрушение металла (проведение испытаний на сжатие).

Для достижения целей было необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести испытания на горячее кручение образцов, изготовленных из ковальной заготовки из стали марки 15X13H2;
- 2) Провести испытания на горячее кручение образцов, изготовленных из НЛЗ из стали марки 15X13H2;
- 3) Провести испытания на горячее сжатие образцов, изготовленных из ковальной заготовки из стали марки 15X13H2;
- 4) Сопоставить полученные данные в исследуемых диапазонах температур;
- 5) Сопоставить полученные данные для сталей марки 15X13H2 с данными полученными ранее для сталей марок 20 и 10ГФБЮ в исследуемых диапазонах температур;
- 6) Разработать рекомендации по выбору рациональной температуры заготовок для осуществления процесса обжатия.

Температура испытаний и количество образцов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Температура испытаний и количество образцов

Температура нагрева, °С	Количество образцов, шт.	
	15X13H2 (кованая)	15X13H2 (литая)
1000	3	3
1050	3	-
1075	3	-
1100	3	3
1125	3	-
1150	3	-
1175	3	-
1200	3	3
1225	3	-
1250	3	-

Дополнительно использовалось 3 образца, отобранных из осевой зоны кованной заготовки из стали марки 15X13H2.

Образцы нагревались до необходимой температуры со скоростью 5 °С/с прямым пропусканием электрического тока с последующей выдержкой 1,5 мин. для достижения минимального градиента температур в рабочей зоне образца. Температура образца фиксировалась двумя термопарами, приваренными к образцу. Первая термопара приваривалась в центре рабочей зоны для контроля температуры нагрева образца перед испытанием. В непосредственной близости от рабочей зоны со стороны неподвижного захвата приваривалась вторая термопара, по показаниям которой оценивалось изменение температуры в процессе испытания.

Скорость деформации определялась согласно результатам расчетов по методике [1, 3]. В условиях работы стана ТПА 159-426 ОАО «ВТЗ» по очагу деформации она изменяется в пределах от 10 до 20 с⁻¹.

В работе [4] при испытаниях на горячее кручение сталей марок 20 и 10ГФБЮ для АО «ВТЗ» было выбрано усредненное значение скорости деформации 15 с⁻¹. При обжатии стали марки 15X13H2 на трехвалковом стане Ассела скорость

деформации практически равна скорости деформации при прошивке и также составляет $\sim 15 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, для обеспечения условий, при которых будет возможно наиболее корректное проведение сравнительного анализа для всех марок сталей скорость деформации принята единой для всех видов испытаний.

Перевод скорости деформации в скорость вращения зажима испытательной установки для испытаний на горячее кручение осуществлялся по зависимости [1, 4]:

$$\text{---} = \text{---} \quad (2.1)$$

где ε – степень деформации;

d – диаметр рабочей зоны образца ($d = 10 \text{ мм}$);

L – длина рабочей зоны образца ($L = 20 \text{ мм}$);

θ – угол скручивания ($\theta = 2 \pi N$, рад);

N – количество оборотов (кручений).

Таким образом $\varepsilon = 0,144 \theta$.

Если принять, что τ – это время поворота на угол θ , а f – это частота вращения зажима испытательной установки, то для скорости деформации будет справедливо:

$$\text{---} = \text{---} - \text{---} \quad (2.2)$$

Как было отмечено выше, среднее значение скорости деформации при обжатии составляет 15 с^{-1} , этому значению соответствует частота вращения зажима установки $f \approx 16,5 \text{ об/с}$.

Количество полных оборотов образца задавалось заведомо большим, чем образец способен выдержать не разрушаясь. Предварительные значения о количестве оборотов до разрушения были получены на настроенных образцах.

В процессе испытаний на горячее кручение в непрерывном режиме регистрировались: угол поворота, крутящий момент, температура в непосредственной близости от рабочей зоны образца, посредством термопары и

температура в рабочей зоне образца посредством пирометра. По полученным данным были построены графики зависимостей крутящего момента M от угла поворота θ и определены угол поворота θ_p и количество оборотов N_p до разрушения образца.

При испытаниях на сжатие для каждой температуры в первом приближении устанавливается максимальная степень деформации A , исходя из возможностей применяемого оборудования, затем, при наличии разрушения (появлении трещины), A постепенно уменьшается на 5-10 %, таким образом, методом последовательных приближений определяется значение критической степени деформации $A_{кр}$ для данного вида испытаний.

3 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Исследования температурно-деформационных режимов

3.1.1 Испытания на горячее кручение

Экспериментальные кривые кручения в координатах угол поворота – крутящий момент, полученные при различных температурах деформации образцов, представлены на рисунке 3.2 – для образцов из катаной заготовки, на рисунке 3.1 – для образцов из НЛЗ из стали марки 15Х13Н2. Для каждой температуры испытания приведены данные для трех образцов.

Из представленных рисунков видно, что с ростом угла поворота θ крутящий момент M , требуемый для деформирования, сначала возрастает и достигает максимального (пикового) значения. При последующем росте угла поворота наблюдается падение крутящего момента, вероятно связанное с деформационным разогревом. Согласно показаниям пирометра, разогрев в очаге деформации

составляет 200-400 °С в зависимости от температуры испытания (рисунок 3.3). Показания термопары в непосредственной близости от рабочей зоны в процессе деформации изменялись незначительно (не более 5 °С), что может свидетельствовать о ранней локализации деформации и, как следствие, деформационного разогрева.

Зависимость крутящего момента от угла поворота в одинаковых температурных условиях имеет хорошую воспроизводимость (кривые деформации для трех образцов, испытанных в одинаковых условиях, совпадают).

Под моментом начала разрушения образца понимается момент отрыва кривой деформации от касательной, проведенной к ниспадающему участку, связанному с деформационным разупрочнением (рисунок 3.4). Полученные таким образом данные для исследуемых сталей представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.5.

Для стали 15X13H2 в кованом состоянии зависимость технологической пластичности от температуры в начале деформации немонотонна и имеет максимум при температуре около 1100 °С (рисунок 3.5). Пиковое значение для этой зависимости составляет $17,25 \pm 1,8$ оборотов (область разброса экспериментальных данных составляет $\pm 10\%$).

Образцы, вырезанные из осевой зоны кованой заготовки, испытаны при температуре 1100 °С, поскольку при этой температуре определена максимальная технологическая пластичность стали 15X13H2 в кованом состоянии (наибольшее количество кручений до разрушения образцов). Полученные данные пластичности располагаются в нижней границе области разброса экспериментальных данных ($\pm 10\%$) для основного металла (красные маркеры в виде крестиков на рисунке 3.5).

Для стали марки 15X13H2 в литом состоянии технологическая пластичность существенно ниже, чем в кованом состоянии (таблица 3.1, рисунок 3.5). Возможно, это обусловлено наличием дефектов в исходном металле. Полученная при этом зависимость пластичности от температуры имеет иной характер – монотонно возрастает.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний для стали 15X13H2

Номер образца	Температура испытания, °С	Угол поворота до начала разрушения, рад	Обороты до начала разрушения
основной металл (15X13H2) – ковкая заготовка			
10	1250	67,5	10,7
14	1250	64	10,2
16	1250	77	12,3
18	1225	82	13,1
20	1225	79	12,6
22	1225	84	13,4
24	1200	97	15,4
26	1200	89,5	14,2
28	1200	86,5	13,8
30	1175	90,5	14,4
32	1175	108	17,2
34	1175	99	15,8
36	1150	95	15,1
38	1150	113,5	18,1
42	1150	93,5	14,9
44	1125	99,5	15,8

Продолжение таблицы 3.1

Номер образца	Температура испытания, °С	Угол поворота до начала разрушения, рад	Обороты до начала разрушения
46	1125	106	16,9
48	1125	109,5	17,4
58	1100	118	18,8
50	1100	118,5	18,9
52	1100	112,5	17,9
54	1075	108	17,2
56	1075	99	15,8
60	1075	103,5	16,5
62	1050	102	16,2
64	1050	109	17,3
66	1000	83,5	13,3
68	1000	76	12,1
из осевой зоны (15X13H2 (ось)) – ковровая заготовка			
7	1100	99	15,8
8	1100	95,5	15,2
9	1100	103	16,4
15X13H2 (НЛЗ) – непрерывнолитая заготовка			
1.1	1000	6	1
1.2	1000	4,5	0,7
1.3	1000	6	1
1.4	1100	24,5	3,9
1.5	1100	20	3,2
1.6	1100	38	6
1.7	1200	31	4,9
1.8	1200	55	8,8
1.9	1200	36	5,7

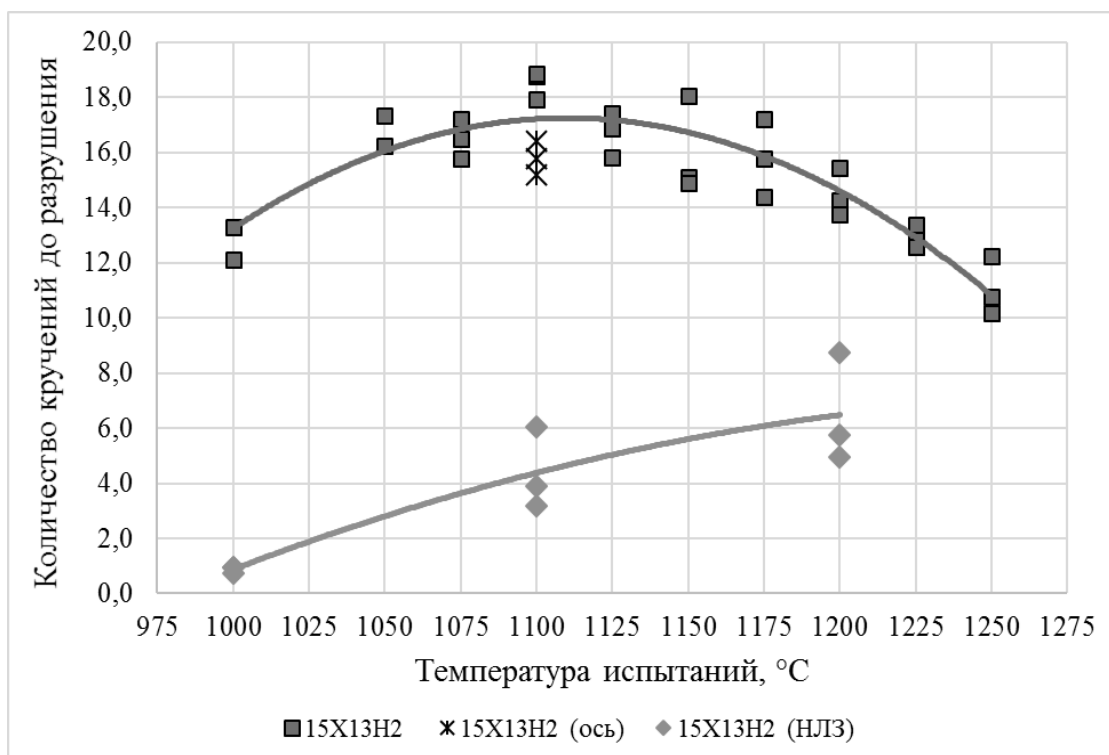


Рисунок 3.5 – Технологическая пластичность исследуемых сталей при различной температуре испытаний

На рисунке 3.6 представлен характерный вид рабочих зон образцов из стали марки 15X13H2 различных типов (вырезанных из кованой и непрерывнолитой заготовок) после испытаний на горячее кручение.

Таким образом, можно сделать вывод, что технологическая пластичность стали марки 15X13H2 в кованом состоянии существенно выше чем в литом (количество кручений до разрушения выше от 2 до 14 раз).

Рациональная температура нагрева заготовок перед обжатием определяется количеством оборотов до разрушения; то есть это температура, при которой образец способен выдержать больше кручений до момента его разрушения.

Усредненные значения количества оборотов до разрушения $\langle N_p \rangle$ в зависимости от температуры испытания образцов, вырезанных из периферийной части заготовок из стали марки 15X13H2, приведены на рисунках 3.7 и 3.8.

Образцы, вырезанные из ковальной заготовки, благодаря деформационной обработке имеют более равномерную структуру, а, соответственно, более равномерное распределение результатов испытаний. Технологическая пластичность возрастает, достигает максимума, а затем снова снижается. Такое поведение может быть связано либо с достижением температуры растворения нитридов и карбонитридов ниобия (~1150 °С), что приводит к ускоренному росту зерна, либо с усилением динамической рекристаллизации.

Образцы из литой заготовки отличаются высокой неоднородностью структуры как по химическому составу (ликвация), так и по форме и размеру частиц. При повышении температуры получают развитие процессы гомогенизации, происходит выравнивание структуры и свойств, что и приводит к повышению технологической пластичности.

Из анализа гистограмм следует, что различные типы заготовок из стали марки 15X13H2 (кованые и НЛЗ) имеют различные температурные интервалы максимальной технологической пластичности. Если считать допустимым отклонение $\pm 10\%$ от наилучшего значения, то температурный диапазон максимальной технологической пластичности для кованых заготовок начинается от 1050 °С и заканчивается при 1125 °С (при среднем количестве кручений до разрушения от 16,5 до 18,5 оборотов). Для непрерывнолитых заготовок температурный диапазон максимальной технологической пластичности начинается от 1200 °С и, вероятно, уходит за границы исследуемых интервалов температур (при более низких до 3 раз значениях среднего количества оборотов до разрушения, составляющих около 6,5 оборотов).

3.1.2 Испытания на сжатие

Результаты испытаний на сжатие оказались не показательными для стали марки 15X13H2 в кованом состоянии, поскольку ни на одном из режимов не удалось достичь разрушения боковой поверхности образца. Таким образом критическая степень деформации для данной марки стали и данного типа заготовки при сжатии в горячем состоянии не была установлена. В таблице 3.2 представлены фотографии образцов, вырезанных из кованой заготовки из стали марки 15X13H2, после испытаний на одноосную осадку (сжатие) при различных температурах.

Из таблицы видно, что на боковой поверхности всех образцов отсутствуют какие-либо признаки разрушения (трещины).

Предварительно была произведена оценка влияния времени выдержки перед испытанием на вид кривой деформирования. Для выдержек 5 и 1,5 мин различий в уровне напряжений не наблюдается (рисунок 3.9 – черная сплошная и зеленая пунктирная линии соответственно), поэтому во всех испытаниях время выдержки выбрано равным 1,5 мин.

Поскольку в испытаниях во избежание прилипания образца к поверхности рабочего инструмента помещалась молибденовая пластина, проведена также оценка влияния этого фактора на вид кривой деформирования. Для этого проведено испытание при температуре 1000 °С (где исключено прилипание образца к инструменту) с использованием графитовой фольги (рисунок 3.9 – синяя штрихпунктирная линия). Участок роста кривой после горизонтальной площадки при использовании графитовой фольги лежит ниже, чем при использовании молибденовой пластины.

В качестве примера, где отсутствует влияние сил трения, приведен пересчет по интенсивности напряжений кривой деформирования при кручении (рисунок 3.9 – сплошная красная линия). Деформации оценены по формуле (2.1), а напряжения по формуле [36]:

В выражении (3.1) n – коэффициент деформационного упрочнения ($n = 0$), m – показатель скоростной зависимости напряжений ($m = 0,19$, взят как среднее для сталей из работы [36]).

На представленной кривой не наблюдается подъема напряжений после плато. Следовательно, участок подъема напряжений деформирования после плато связан исключительно с влиянием сил трения.

На рисунке 3.10 результаты испытаний на сжатие представлены графически. Уровень напряжений закономерно повышается с уменьшением температуры испытания. Наблюдается хорошая воспроизводимость для каждого температурного режима деформации. Кривые деформирования представлены участком упрочнения, выходящим на плато с последующим ростом, обусловленным особенностями контакта между образцом и рабочим инструментом.

3.1.3 Сравнительный анализ результатов испытаний на горячее кручение различных марок сталей

С целью проведения сравнительного анализа результатов испытаний на горячее кручения, полученных для различных марок сталей и типов заготовок, к графикам, представленным на рисунке 3.5 (полученным в рамках настоящего исследования) добавлены кривые, характеризующие технологическая пластичность сталей марок 20 и 10ГФБЮ в литом состоянии, полученные ранее в работе [4] при аналогичных условиях испытаний (рисунок 3.11).

Из рисунка 3.11 видно, что самые низкие показатели технологической пластичности у стали марки 15Х13Н2 в литом состоянии (среднее количество оборотов до разрушения изменяется от 1 до 6,5).

Анализируя технологическая пластичность рассматриваемых марок сталей по результатам испытаний образцов, вырезанных из периферийных областей заготовок, видно (рисунок 3.11), что стали марок 20 и 10ГФБЮ в литом состоянии имеют существенно большую технологическая пластичность чем сталь марки 15Х13Н2 в ковном состоянии: наибольшее количество оборотов до

разрушения наблюдается у стали марки 10ГФБЮ (в среднем от 33,7 до 44,5); промежуточное положение занимает сталь 20 (среднее количество оборотов до разрушения от 26,2 до 33,1); сталь марки 15Х13Н2 в ковном состоянии показывает в среднем от 11,1 до 18,5 оборотов до разрушения.

По-иному выглядит ситуация с образцами, вырезанными из центральных зон заготовок (рисунок 3.11):

- для стали марки 10ГФБЮ количество оборотов до разрушения образцов, вырезанных из осевой зоны заготовки, испытанных при температуре 1125 °С, в среднем составляет 36,7, что ниже на 14 % чем количество оборотов образцов (42,7), вырезанных из периферийных областей заготовки, испытанных при той же температуре;

- для стали 20 количество оборотов до разрушения образцов, вырезанных из осевой зоны заготовки, испытанных при температурах от 1100 до 1150 °С, в среднем составляет 13,2, что ниже на 58,5 % чем количество оборотов образцов (31,8), вырезанных из периферийных областей заготовки, испытанных при тех же температурах (т.е. ниже чем показатели стали марки 15Х13Н2 в ковном состоянии);

- для стали марки 15Х13Н2 в ковном состоянии количество оборотов до разрушения образцов, вырезанных из осевой зоны заготовки, испытанных при температуре 1125 °С, в среднем составляет 15,8, что ниже на 5,4 % чем количество оборотов образцов (16,7), вырезанных из периферийных областей заготовки, испытанных при той же температуре.

Таким образом для стали марки 15Х13Н2 в ковном состоянии не наблюдается такого существенного разброса пластичности по поперечному сечению заготовки от периферийных областей к осевой зоне как для сталей марок 20 и 10ГФБЮ в литом состоянии, а значит ниже риск образования внутренних дефектов, связанных с неоднородностью структуры металла по поперечному сечению заготовки.

На рисунке 3.12 представлены гистограммы отклонений показателей пластичности относительно наилучшего значения для различных марок сталей и видов заготовок в исследуемом интервале температур. Видно, что температурные интервалы максимальной технологической пластичности для всех марок сталей (за исключением стали 15X13H2 в литом состоянии) практически одинаковые, при этом, как было установлено выше, сталь марки 15X13H2 в кованом состоянии имеет более низкую технологическую пластичность чем стали марок 20 и 10ГФБЮ в литом состоянии, но более однородные свойства по поперечному сечению заготовки.

3.2 Разработка программного продукта на основе математической модели

После определения наилучших температурно-деформационных режимов остается вопрос об их применимости для конкретной заготовки в условиях производства, а именно на трехвалковых раскатных станах Ассела в ТПЦ-1 АО «ВТЗ», так как на данном стане имеются ограничения по нагрузке на привод. Данная задача решается с помощью расчета токовых нагрузок на привод стана и их сравнением с максимально допустимым значением. Расчет токовой нагрузки производится с помощью, ранее разработанной сотрудниками РосНИТИ [37] математической модели, которая учитывает калибровки валков и прочие особенности трехвалкового раскатного стана Ассела в ТПЦ-1 АО «ВТЗ». Тем не менее, данный расчет — это очень трудоемкий процесс, учитывая, что необходимо его проводить очень часто и с различными исходными данными, существует высокая вероятность случайных ошибок. Для упрощения данной процедуры было принято решение о необходимости разработки программы для ЭВМ, которая позволит производить данный расчет в автоматическом режиме. Так же представляла интерес возможность анализа всех вариантов использования определенного исходного параметра при уже заданных прочих, для чего был дополнительно разработан такой функционал.

Разрабатываемый программный продукт (программа для ЭВМ) предназначен для определения токовых нагрузок на приводы станов при обжатии заготовок на трехвалковых раскатных станах Ассела в ТПЦ-1 АО «ВТЗ» и состоит из трех основных элементов:

1) расчетное ядро, которое содержит математическую модель, разработанную сотрудниками ОАО «РосНИТИ» [37];

2) интерфейс, представляющий графическую оболочку программного продукта, в которой непосредственно работает пользователь;

3) система алгоритмов, которая обеспечивает связь между математической моделью (ядром) и интерфейсом. Реализованные алгоритмы содержат систему граничных условий процесса обжатия, тесты на корректность производимых

расчетов и модуль анализа допустимых степеней обжатия и других исходных данных, в том числе типоразмеров заготовок для обеспечения требуемой степени обжатия без превышения допустимых токовых нагрузок на каждый из двух раскатных станов РС-1 и РС-2 имеющихся в ТПЦ-1 АО «ВТЗ».

Разработка алгоритмов неразрывно связана с написанием программного кода. Процесс создания программного продукта был также разделен на три основных части: разработка интерфейса; перевод математической модели в программный код и написание программного кода для реализации алгоритмов расчета в соответствии с математической моделью и разработанным интерфейсом. В качестве платформы для написания программного продукта было выбрано использование объектно-ориентированного программирования на языке Python. Написание программы велось в соответствии с паттерном объектно-ориентированного программирования MVC (Model View Controller), математическая модель была вынесена в отдельный файл [38].

3.2.1 Разработка расчетного ядра программы «Reduction Motor Load 2020»

Для расчета энергосиловых параметров процесса обжатия трубной заготовки на трехвалковом раскатном стане Ассела сотрудниками ОАО «РосНИТИ» была разработана математическая модель, в основе которой заложена известная методика [39], которая была доработана и усовершенствована.

Согласно методике [39] общее усилие прокатки P определяется по формуле:

(3.2)

где – среднее давление на валок на i -ой трети шага подачи заготовки;

– площади контактной поверхности валка и заготовки на i -ой трети шага подачи заготовки.

Среднее давление определяется как:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (3.3)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий тип прокатки, $k_n = 1,1-1,4$; для процесса обжатия принимается $k_n = 1,4$;

– ширина контактной поверхности в рассматриваемом сечении;

– радиус заготовки в рассматриваемом сечении;

– среднее значение сопротивления металла пластической деформации, в рассматриваемом сечении, определяемое по формуле Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева [40]:

$$\text{---} \quad (3.4)$$

где – базовое значение сопротивления пластической деформации;

– скорость деформации в рассматриваемом сечении;

– степень деформации в рассматриваемом сечении;

T – температура металла;

k_u, k_e, k_T – термомеханические коэффициенты.

Площадь определяется по формуле:

$$\text{---} \quad (3.5)$$

где – треть шага подачи заготовки в i -ом сечении.

Исходная математическая модель была дополнена новыми условиями. Так сечение формирования окончательного диаметра обжатой заготовки на обжимном стане стало определяться не в конце выходного конуса валков, а по выражению:

$$(3.6)$$

где $X_{\text{пер}}$ – координата пережима валков;

$S_{\text{пер}}$ – треть шага подачи заготовки от сечения пережима валков.

Так же в модели дополнительно учитывается деформационный нагрев во время обжатия и его влияние на геометрические размеры заготовки путем умножения на коэффициент теплового расширения. Изменение размеров заготовки рассчитывается по выражению:

(3.7)

где α_T – коэффициент теплового расширения;

ΔT_i – изменение температуры заготовки на текущем шаге.

Для перевода математической модели в программный код был выбран процедурный стиль программирования. Так как расчет по математической модели является последовательным, отсутствует необходимость нелинейного использования кода. Тем не менее, программный код математической модели написан как статичный метод класса, которому присвоено имя «Model_MLC» (рисунок 3.13). Данная структура позволяет, используя такой принцип объектно-ориентированного программирования (ООП) как инкапсуляция, объединить данные и методы работы с ними, а также предоставляет возможность получения этих данных как полей сущности «Model_MLC» для вывода, отображения и возможности выбора элементов в главном окне программы [41].

Из рисунка 3.13 видно, что функция с математической моделью (math_model) принимает 10 аргументов:

$D1f$ – диаметр исходной заготовки, мм;

$Dohf$ – диаметр обжатой заготовки, мм;

Tf – исходная температура заготовки, $^{\circ}\text{C}$;

$\text{beta}f$ – угол подачи, град;

$Dvpf$ – диаметр валков в пережиме, мм;

ndf – частота вращения двигателя, мин^{-1} ;

key – ключевое слово – в данном случае марка стали;

colib_name – название калибровки валков;

ob_st – задаваемый вручную список сталей, задан по умолчанию как пустой список;

colibs – словарь с калибровками валков, задан по умолчанию как словарь colibs данного объекта.

Символ `f` в конце некоторых из аргументов добавлен для того, чтобы обозначить, что данный аргумент является аргументом функции и ее тип строка (не числовое, а текстовое значение, требующее преобразования). Так как Python – это язык программирования со строгой динамической типизацией – необходимо явное преобразование типов [42]. Главная задача модели – это расчет значений токовых нагрузок. Для обеспечения возможности вывода других значений расчета, была реализована возможность возвращать результат работы функции, тело которой представляет математическую модель, в виде списка. Такой тип данных как список наиболее приемлем в данной ситуации потому, что им легко управлять и имеется возможность его расширения при необходимости в будущем. В случае ошибки функция возвращает тоже список, но с другими значениями. Первым значением всегда является код, сигнализирующий об ошибке “1111”, такое значение выбрано ввиду того, что верные результаты расчета предоставляются моделью в амперах и вероятность совпадения результатов расчета с кодом об ошибке – не высока, а значит это позволит идентифицировать ошибку при работе программы, второе значение – это текст ошибки, который будет выведен пользователю.

Словарь `colibs` – это объект, представляющий калибровку валков раскатного стана Ассела, состоящий из пар ключ-значение. Ключ представляет из себя шифр, состоящий из трех частей (рисунок 3.15.14):

- 1) название участка:
 - a. `in1_` – входной № 1;
 - b. `crest_` – гребень;
 - c. `in2_` – входной № 2;

- d. pinch_ – пережим;
 - e. out1_ – выходной № 1;
 - f. out2_ – выходной № 2;
- 2) угол подачи;
 - 3) название параметра.

Такая схема упрощает процедуру получения доступа к необходимому параметру. Для калибровок без гребня значения параметров in1_ и crest_ выставляются равными 0. Затем с помощью данного словаря, включающего параметры для всех возможных углов подачи, необходимо выбирать те, которые необходимы для расчета при выбранном пользователем угле подачи. Для достижения этой цели был написан код, который формирует переменные в зависимости от задаваемого угла подачи, используя конкатенацию строк для формирования ключа и получения необходимого параметра (рисунок 3.15).

Данный подход отличается простотой реализации и легко воспринимается с первого взгляда, что повышает простоту использования данных, а заданные нулевые значения, при использовании калибровки без гребня, позволяют данному способу быть адаптивным.

Тем не менее при необходимости полностью избавиться от каких-либо значений появляется необходимость изменения нескольких блоков кода, так как данные переменные используются довольно часто.

База данных для различных марок сталей по умолчанию была сформирована с помощью данных из источника [40]. В ней также применяются пары ключ-значений, здесь ключ – это марка стали, а значение представлено списком из 4 параметров, σ_0 , a , b и c , соответственно.

При создании структуры преследовались следующие цели: обеспечение надежного функционирования, работающего при всех возможных исходных значениях, и обеспечение максимальной простоты восприятия, обслуживания и расширения функционала в будущем. Расчет поделен на 7 уровней, каждый из которых не имеет зависимостей с последующими, но имеет с предыдущими.

Данное деление позволило реализовать код по частям, обеспечивая контроль правильности работы в процессе написания программного кода, а также значительно упростило нахождение определенной части кода в будущем, например, для исправления ошибки или добавления нового функционала. Тем не менее, у такого подхода есть и свои недостатки. Самый важный из них – это более строгая структура, а соответственно, при необходимости добавления новых переменных, взаимодействующих с обоими слоями и влияющих на них, возникнет необходимость редактирования сразу обоих слоев, так как они, в основном, представлены циклами.

Использование списков для хранения всех значений на всех шагах позволяет реализовать систему тестирования, представляющую обеспечивающую контроль всех значений, а не только результатов вычисления токовых нагрузок. Данная мера повышает стабильность системы в целом, так как для некоторых расчетов рассчитанные значения токовых нагрузок могут не отличаться из-за округления, в то же время для ряда других параметров эти значения могут сильно разниться. Данный подход помогает избежать подобных ситуаций проверяя каждое значение каждой переменной без округления при нескольких вариантах входных параметров, обеспечивая полное отсутствие ошибок в программном коде.

3.2.2 Разработка интерфейса программы «Reduction Motor Load 2020»

Интерфейс программы разработан с применением специализированной библиотеки «PyQt5», позволяющей создавать кроссплатформенные приложения с графическим интерфейсом, в соответствии с основными принципами создания программных интерфейсов [43]. Библиотека «PyQt5» является одним из наиболее часто используемых решений и повсеместно применяется на практике. Применение данной библиотеки позволило многократно упростить процесс создания интерфейса всех окон программы и обеспечить их надежную работу.

Главное окно программы включает в себя две вкладки – «Расчет» и «Анализ». Визуально интерфейс вкладки «Расчет» можно поделить на 3 части: ввод

исходных данных, вывод результатов расчета в виде графиков и вывод результатов расчета в виде числовых значений (рисунок 3.16-а). Интерфейс вкладки «Анализ» имеет аналогичную структуру (рисунок 3.16-б).

Область ввода исходных данных представляет набор полей для ввода всех необходимых для расчета данных (при работе во вкладке «Анализ» здесь же выбирается анализируемый параметр). Область вывода результатов расчета в виде графиков содержит интерактивный график, который изменяется в зависимости от результатов расчета в окне «Расчет» и от анализируемого параметра в окне «Анализ», а также содержит широкие возможности по измерению и сохранению его показаний. Область вывода результатов расчета в виде числовых значений содержит результаты расчета токовых нагрузок для обоих раскатных станах, а также, при работе во вкладке «Расчет», значения дополнительных параметров и формирование сводного отчета в формате документа Excel.

Так же имеются дополнительные окна, предназначенные для добавления новой марки стали в список и для настройки имеющегося списка добавленных марок сталей (рисунок 3.17).

3.2.3 Создание алгоритмов анализа и взаимодействия интерфейса с расчетным ядром

Данная часть работы необходима для обеспечения взаимодействия окон программы с расчетным ядром, используя его для получения расчетных значений, построения графиков и выполнения анализа. Код написан в ООП стиле, где каждый функционал программы представлен в виде отдельного класса. Принцип работы программы описан с помощью блок схемы в приложении А.

При расчете токовых нагрузок происходит проверка граничных условий (рисунок 3.18) для выявления ошибок в исходных данных, а также после завершения расчета значения токовых нагрузок проходят проверку на превышение максимально допустимых значений, при достижении которых, выводится предупреждение.

Для выполнения анализа, расчетное ядро используется до тех пор, пока значение не превышает условной границы, все рассчитанные без ошибок значения заносятся в список, с ошибкой игнорируются. Для каждого анализируемого параметра анализ проходит по циклу с необходимыми граничными параметрами. На рисунке 3.19 приведен фрагмент блок-схемы с циклом для анализа по диаметру исходной заготовки. В данном случае очевидно, что диаметр исходной заготовки не может быть меньше диаметра обжатой заготовки. Чтобы избежать возникновения ошибок анализ начинается с диаметра исходной заготовки на 10 мм больше диаметра обжатой заготовки и продолжается до тех пор, пока не превысит значение в два раза превышающее диаметр обжатой заготовки.

Предельные случаи расчета заранее определены. При выборе анализируемого параметра специальной переменной присваивается определенное значение, по которому определяется для какого параметра необходимо выполнить анализ.

3.3 Адаптация программного продукта «Reduction Motor Load 2020», предназначенного для расчета значений токовых нагрузок при обжатию заготовок

Необходимость адаптации программного продукта «Reduction Motor Load 2020», обусловлена тем, что у оборудования на производстве в процессе эксплуатации появляется ряд отклонений от идеальной системы. Математическая модель отражает закономерности самого процесса обжатия и изменения показателя токовой нагрузки в зависимости от ряда переменных. Однако очень сложно предусмотреть все возможные изменения, происходящие с оборудованием в процессе его эксплуатации. Но, опираясь на тот факт, что физические закономерности останутся прежними, целесообразно ввести поправочные коэффициенты, которые снизят отклонения между фактической и расчетной величиной токовой нагрузки.

Для проведения адаптации специалистами АО «ВТЗ» были предоставлены данные о фактических значениях токовых нагрузок при обжатию заготовок различного сортамента, из различных марок сталей, на различных режимах прокатки.

Данные были предоставлены в виде журналов о загрузке печей и выгрузки с базы данных работы раскатных станов. Данные о загрузке печей, предоставленные в виде фотографий (46 штук) (рисунок 3.20), были оцифрованы с созданием электронных таблиц (документов Excel, рисунок 3.21). Полученный объем информации составил 809 записей, с двух печей.

По результатам анализа данных из журналов загрузки печей была сделана выборка самых распространенных марок сталей (рисунок 3.22).

Из рисунка 10 видно, что сталь 20 является самой распространенной маркой стали при рассмотрении процесса обжата. Далее следует скачкообразное снижение к маркам сталей 45, 32ХГА, 40Х, 32Г1А, которые формируют подгруппу по частоте использования, затем следует еще одно скачкообразное снижение к остальным маркам сталей.

Исходя из распространенности, был определен список приоритетных марок сталей для проведения адаптации и обеспечения наибольшей точности определения поправочных коэффициентов (таблица 3.5.3).

Таблица 3.3 – Наиболее приоритетные марки стали

Марка стали	Количество записей
20	211
45	79
32ХГА	64
40Х	60
32Г1А	57
32Г2У	35

Распространенность марки стали была не единственным критерием выбора условий для проведения адаптации. С целью обеспечить наибольшее разнообразие данных в итоговой выборке, а значит большую корректность расчета программы после адаптации, выбирались наиболее отличные друг от друга кампании, при этом, важным параметром был объем заказа. Были составлены выборки данных из журнала по печи 1 (таблица 3.4) и по печи 2 (таблица 3.5). При выборе заказов с маленьким объемом, диапазон времени обжата и количество заготовок крайне ограничены, что негативно сказывается на качестве итоговой выборки. Затем из полученного перечня выбирались кампании наиболее часто используемых сталей, при условии, что данные имеются одновременно для РС-1 и для РС-2.

Таблица 3.4 – Выбранные кампании по печи 1

№	Дата начала смены	Дата конца смены	Смена	Время смены	Диаметр заготовки до обжарки, мм	Длина заготовки, м	Диаметр заготовки после обжарки, мм	Марка стали	Количество заготовок по заказу, тонн	Количество заготовок по заказу, штук	Время начала посадки заказа	Время начала выдачи заказа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	16.12.2019	16.12.2019	А	7:30-19:30	156	3,3	120	32ХГА	294,8	278	17:00	21:30
59	07.01.2020	07.01.2020	А	7:30-19:30	196	3,3	168	13ХФА-1	607	пл91	2:15	4:05
76	07.01.2020	08.01.2020	В	19:30-7:30	168	4,3	120	13ХФА-1	589,2	92	23:25	0:25
43	25.12.2019	26.12.2019	А	19:30-7:30	156	2,8	105	40Х	150,8	142	23:00	3:40
25	17.12.2019	17.12.2019	Б	19:30-7:30	160	40	120	32ХГМА	294	-	7:55	9:40
7	16.12.2019	17.12.2019	Б	19:30-7:30	156	2,8-4,1	115	20пр	59,2	45	0:20	1:25
120	17.01.2020	17.01.2020	А	7:30-19:30	156	2,8	95	20	97	18	14:30	16:15
177	25.01.2020	26.01.2020	Б	19:30-7:30	156	2,75-4,1	100	17Г1С	53	52	1:20	2:14
27	25.12.2019	25.12.2019	В	7:30-19:30	156	3,5	120	38Г2СФА	294,8	-	14:30	16:45
73	07.01.2020	07.01.2020	Г	7:30-19:30	156	2,8	110,5	45	236	пл95	18:55	22:50
140	17.01.2020	18.01.2020	Б	19:30-7:30	156	4	100	В	149,3	127	5:48	7:55
163	25.01.2020	25.01.2020	А	7:30-19:30	156	2,9	110	20	20	29	17:48	18:44
175	25.01.2020	26.01.2020	Б	19:30-7:30	156	2,7	100	45	15,6	24	23:25	23:55

Таблица 3.5 – Выбранные кампании по печи 2

№	Дата начала смены	Дата конца смены	Смена	Время смены	Диаметр заготовки до обжатия, мм	Длина заготовки, м	Диаметр заготовки после обжатия, мм	Марка стали	Количество заготовок по заказу, тонн	Количество заготовок по заказу, штук	Время начала посадки заказа	Время начала выдачи заказа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
162	02.08.2019	03.08.2019	Б	19:30-7:30	156	3	147	35	116	166	23:50	11:55
236	12.10.2019	13.10.2019	Г-А-Б	19:30-7:30	228	3,8	185	32Г2У	1376,6	пл61	4:10	23:30
310	04.11.2019	04.11.2019	Г	7:30-19:30	196	2,87	168	32ХГА	607,9	пл81	12:35	21:55
538	07.01.2020	08.01.2020	В	19:30-7:30	168	4,3	120	13ХФА-1	589,7	-	23:10	0:35
249	13.10.2019	14.10.2019	Б	19:30-7:30	156	3,8	130	Д	383,5	133	2:00	6:45
358	14.11.2019	15.11.2019	Б-В	19:30-7:30	196	4,4	175	32Г2У	1800	-	21:25	7:00
481	16.12.2019	17.12.2019	Б	19:30-7:30	160	4	120	30ХГМА	294	-	8:00	12:20
566	17.01.2020	17.01.2020	А	7:30-19:30	156	2,7-3,5	100	45	208	24	15:30	15:46
376	25.11.2019	26.11.2019	Г-А	19:30-7:30	156	4,1	120	38Г2СФА-1	842,4	пл122	1:20	21:10
171	03.08.2019	04.08.2019	А	19:30-7:30	156	2,8	95	20	364,9	252	0:00	4:35
23	10.06.2019	11.06.2019	Г	19:30-7:30	156	4	115	19ХГН	132,2	130	23:40	1:55
99	14.07.2019	14.07.2019	Г-А	7:30-19:30	156	3,6	120	26ХНФА-2	379,1	-	11:55	23:20
462	30.11.2019	01.12.2019	Б	19:30-7:30	156	4,4	120	09Г2С	500	49	7:50	9:50
495	25.12.2019	26.12.2019	А	19:30-7:30	156	3,6	105	40Х	150,8	134	23:20	3:50
544	07.01.2020	08.01.2020	В-Б	19:30-7:30	156	3,9	120	32Г1А	842,4	-	9:00	10:55
164	03.08.2019	03.08.2019	В	7:30-19:30	156	4,35	120	32Г2ФА	716	пл98	11:55	15:50

Окончание таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
142	20.07.2019	21.07.2019	Г	19:30-7:30	156	4	145,1	32ГСУ	148	100	5:15	7:30
218	22.08.2019	22.08.2019	А	7:30-19:30	156	3,4	115	40X	23	17	14:30	14:50
474	16.12.2019	17.12.2019	Б	19:30-7:30	156	2,4-4,1	115	40X	24,9	33	2:25	3:30

После выбора компаний были проанализированы данные фактических токовых нагрузок по выгрузке с базы данных АО «ВТЗ».

Выгрузка с базы данных АО «ВТЗ» представляла собой файлы в формате «*.csv». Совокупный объем полученных данных 19 836 000 записей (таблица 3.6).

Среди этих данных рассматривались следующие поля:

- Задаваемая частота вращения двигателя (Trend 1 ValueY);
- Измеренная частота двигателя (Trend 3 ValueY);
- Дата и время в момент измерения (Trend 4 Time);
- Фактическая токовая нагрузка (Trend 4 ValueY).

Таблица 3.6 – Вид выгрузки с базы данных АО «ВТЗ»

Trend 1 ValueY	Trend 3 ValueY	Trend 4 Time	Trend 4 ValueY
200,59	182,81	01.12.2019 0:00:00	2611,22
200,59	181,77	01.12.2019 0:00:01	2625,10
200,59	182,73	01.12.2019 0:00:02	2563,61
200,59	181,85	01.12.2019 0:00:03	2619,88
200,59	181,96	01.12.2019 0:00:04	2504,02
200,59	181,46	01.12.2019 0:00:05	2616,95
200,59	181,62	01.12.2019 0:00:06	2501,73
200,59	181,77	01.12.2019 0:00:07	2645,34
200,59	182,19	01.12.2019 0:00:08	2548,97
200,59	182,35	01.12.2019 0:00:09	2565,77
200,59	182,77	01.12.2019 0:00:10	2462,90

Ориентируясь на время начала выдачи заказа из печей, по данным журнала загрузки печей АО «ВТЗ», массив данных подвергался фильтрации для получения данных только за необходимый временной интервал, соответствующий известной марке стали, диаметру исходной заготовки, диаметру обжатой заготовки и длине заготовки. Всего были проанализированы и вынесены в отдельную выборку данные по 3 компаниям проката для сталей 20, 45, 40Х и по 1 компании для сталей 32ХГА и 32Г2У, а также 1 компания, состоящая из сталей 20ГР, 19ХГН, 30ХГСА, 20 по данным акта опытной прокатки.

Каждая компания была проанализирована по следующему алгоритму:

1. Анализ токовых нагрузок и частоты вращения двигателя на временном диапазоне всей кампании, интерпретация данных;
2. Выбор участков для занесения в итоговую выборку данных и последующего анализа;
3. Занесение данных по каждой заготовке в итоговую выборку.

Данные по анализу всех кампаний представлены в Приложении Б.

Реализация алгоритма обработки данных на примере одной кампании представлена ниже.

3.3.1 Анализ токовых нагрузок в пределах всей кампании обжата заготовок

Реализация данного пункта осуществлялась посредством построения графика токовых нагрузок для временного диапазона всей кампании с нанесением частот вращения двигателя как вспомогательной оси (рисунок 3.23).

Из графика видно, что имеется стабильный установившийся процесс, тем не менее не на всем временном интервале. В начале временного диапазона средний показатель токовой нагрузки ниже, чем у установившегося процесса, он соответствует завершению обжата предыдущего заказа. По журналу загрузки печей эти данные соответствуют стали 09Г2С при той же величине обжата, при этом частота вращения двигателя выше, чем при стабильном процессе обжата стали 45, что говорит о том, что процесс обжата проходит с меньшей нагрузкой. Данный вывод закономерен и подтверждает то, что там действительно происходило обжата стали марки 09Г2С потому, что благодаря меньшему содержанию углерода, одного из основных упрочняющих элементов сталей процесс ее обжата должен проходить с меньшей нагрузкой. Убедившись в том, что рассматривается верный участок, приступали к выбору участков для занесения в выборку. В течении стабильного процесса имеются отклонения по частоте вращения двигателя, малые повышения частоты в начале процесса

обжатия. Более широкое отклонения по частоте соответствует двум паузам, это видно, как по значениям токовой нагрузки, так и по значениям частоты вращения двигателя. Так или иначе, данные отклонения не отражают стабильного процесса обжатия, а значит, не должны попасть в итоговую выборку.

Описанной выше процедуре подвергались также данные с РС-2 (рисунок 3.24). Для больших заказов данные с обоих раскатных станов практически одинаковы, но для меньших объемов загрузки может быть иначе, для утверждения требуемой компании проката, сверялись данные сразу с двух журналов загрузки печей в течении одного временного интервала. В спорных ситуациях выявлялись дополнительные закономерности, или, в случае большой неоднозначности, выбирался другой временной диапазон, с более очевидными данными.

Общий вид графика имеет заметное сходство с графиком для РС-1, за исключением отклонений по частоте во время стабильного процесса обжатия. Тем не менее, паузы наблюдаются для РС-2 в тех же временных промежутках.

3.3.2 Определение обжимаемых заготовок для занесения в итоговую выборку данных

При выборе участков для занесения в итоговую выборку данных и последующего анализа главным приоритетом была максимально возможная равномерность распределения данных (установившийся процесс обжатия). Всего выбиралось по 3 участка от каждой кампании. Участки выбирались с начала кампании (участок № 1), ее середины (участок № 2) и конца (участок № 3). Для каждого участка выбиралось по 3, следующих друг за другом, заготовки (рисунок 3.25).

Все участки выбирались из условия, что они имеют приблизительно одинаковую форму, паузу между заготовками, время обжата и средний показатель токовой нагрузки, для исключения вмешательства других факторов и более точной адаптации.

Данные полученные по результатам опытной прокатки взяты со скриншотов программы отображения информации из базы данных (рисунок 3.26).

3.3.3 Формирование итоговой выборки данных по токовым нагрузкам при обжате заготовок для осуществления адаптации

Занесение данных в итоговую выборку осуществлялось для каждой заготовки по следующим полям:

- a) время начала обжата;
- b) время завершения обжата;
- c) задаваемая частота вращения двигателя;
- d) фактическая частота вращения двигателя;

е) среднее значение фактической токовой нагрузки.

В итоге получена выборка размером 243 записи, состоящая из 12 компаний проката разных марок сталей. В данную выборку внесены значения рассчитанные с помощью программы «Reduction Motor Load 2020», а также разница значений фактической и расчетной токовой нагрузки, процент отклонения результата расчета от фактического значения и коэффициент корреляции, отображающий величину поправки необходимой для приведения расчета к фактическим результатам на производстве (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Вид итоговой выборки

Номер строки	Запись	Участок	Заготовка	Частота вращения задаваемая, мин ⁻¹	Частота вращения фактическая, мин ⁻¹	Дата и время начала обжатия	Дата и время завершения обжатия	Время обжатия, сек.	Токовая нагрузка фактическая, А	Длина заготовки, м.	Диаметр исходной заготовки, мм.	Диаметр обжатой заготовки, мм.	Расчетный угол подачи, град.	Степень обжатия, %	Марка стали	№ РС	Компания проката	Токовая нагрузка расчетная по задаваемой частоте, А	Разница токовых нагрузок, А	Отклонение, %	Коэффициент корреляции
1	1	1	1	202	188	16.12.2019 17:06	16.12.2019 17:07	0:00:19	1975,74	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	775,74	39,26	1,64
2	1	1	2	202	188	16.12.2019 17:07	16.12.2019 17:07	0:00:18	1927,44	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	727,44	37,74	1,60
3	1	1	3	202	188	16.12.2019 17:07	16.12.2019 17:08	0:00:19	1934,91	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	734,91	37,98	1,61
4	1	2	1	202	188	16.12.2019 18:08	16.12.2019 18:09	0:00:17	1944,05	3,3	150	120	11,00	20	32ХГА	1	а	1290	654,05	33,64	1,50
5	1	2	2	202	188	16.12.2019 18:09	16.12.2019 18:09	0:00:17	1938,01	3,3	150	120	11,00	20	32ХГА	1	а	1290	648,01	33,43	1,50
6	1	2	3	202	188	16.12.2019 18:09	16.12.2019 18:09	0:00:18	1978,51	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	778,51	39,34	1,64
7	1	3	1	202	188	16.12.2019 19:08	16.12.2019 19:08	0:00:18	1977,37	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	777,37	39,31	1,64
8	1	3	2	202	187	16.12.2019 19:09	16.12.2019 19:09	0:00:19	1996,59	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	796,59	39,89	1,66
9	1	3	3	202	188	16.12.2019 19:09	16.12.2019 19:09	0:00:18	1993,25	3,3	150	120	10,00	20	32ХГА	1	а	1200	793,25	39,79	1,66
10	1	4	1	201	185	16.12.2019 20:02	16.12.2019 20:03	0:00:14	2302,06	3,3	150	120	12,00	20	32ХГА	1	а	1370	932,06	40,48	1,68

На основании полученной выборки составлены сводные таблицы с фактическими и расчетными значениями токовых нагрузок (таблица 3.8) и отклонений расчетных значений токовой нагрузки от фактических (таблица 3.9) для представления и анализа всех собранных для адаптации данных. Значения для РС-1 и для РС-2 имеют явное различие, а именно, отклонения на РС-2 значительно больше. Данный факт имеет важное значение и, соответственно, предполагает использование разных поправочных коэффициентов.

Таблица 3.8 – Сводная таблица фактических и расчетных значений токовой нагрузки

Марка стали	РС, А													
	1а		1б		1в		1оп		2а		2б		2в	
	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет
20	2655	1700	2745	2137	2811	1340	2902	1760	2651	1410	2824	1300	2907	1170
35	-	-	-	-	-	-	2894	2240	-	-	-	-	-	-
45	2641	2380	2172	1420	2686	2110	-	-	2782	1460	2462	1390	2566	1440
19ХГН	-	-	-	-	-	-	2693	1643	-	-	-	-	-	-
20ГР	-	-	-	-	-	-	2700	1505	-	-	-	-	-	-
30ХГСА	-	-	-	-	-	-	3039	2120	-	-	-	-	-	-
32Г2У	2938	2415	-	-	-	-	-	-	2879	1857	-	-	-	-
32ХГА	2044	1258	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40Х	2685	1760	2397	1590	2362	1600	-	-	2683	1320	2499	1430	2483	1310

* а, б, в – компании проката; оп – компания по акту опытной прокатки

Таблица 3.9 – Сводная таблица отклонений расчетных значений токовой нагрузки от фактических

Марка стали	РС, %							Среднее отклонение по сталям, обжатым на РС-1, %	Среднее отклонение по сталям, обжатым на РС-2, %	Среднее отклонение по сталям, %
	1				2					
	а	б	в	оп	а	б	в			
20	36	22	52	38	47	54	60	37	53	45
35	-	-	-	23	-	-	-	23	-	23
45	10	35	21	-	47	44	44	28	45	33
19ХГН	-	-	-	39	-	-	-	39	-	42
20ГР	-	-	-	44	-	-	-	44	-	44
30ХГСА	-	-	-	30	-	-	-	30	-	30
32Г2У	18	-	-	-	35	-	-	-	-	28
32ХГА	38	-	-	-	-	-	-	38	-	38
40Х	34	34	32	-	51	43	47	33	47	40
Среднее отклонение, %	29	30	35	35	45	47	50	34	48	39

* а, б, в – компании проката; оп – компания по акту опытной прокатки

Несмотря на то, что большая часть данных успешно согласуется, имеются выпадающие значения (выделено цветом). Так как этих значений всего 3, они были признаны ошибочными и не принимались в учет для адаптации.

По результатам сводного анализа отклонений результатов расчета токовых нагрузок программой от фактических значений можно сделать вывод, что для РС-1 среднее отклонение составляет 34%, без учета значений, выделенных желтым цветом, так как они являются выпадающими. В случае с РС-2 выпадающие значения отсутствуют, среднее отклонение составляет 48%. Так же стоит отметить разницу в задаваемой и фактической частоте вращения двигателя для РС-1, которая отсутствует на РС-2, где оба значения одинаковы для всего массива данных (рисунок 3.27).

Так как видна значительная разница между отклонениями на РС-1 и РС-2, а разница между отдельными компаниями на каждом из них значительно меньше, было принято решение применять разные коэффициенты корреляции для каждого из них (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Сводная таблица коэффициентов корреляции

Марка стали	РС							Среднее по сталям, обжатым на РС-1	Среднее по сталям, обжатым на РС-2
	1				2				
	а	б	в	оп	а	б	в		
20	1,56	1,29	2,10	1,63	1,88	2,17	2,50	1,64	2,18
35	-	-	-	1,29	-	-	-	1,29	-
45	-	1,53	1,27	-	1,91	1,77	1,78	1,40	1,82
19ХГН	-	-	-	1,65	-	-	-	1,65	-
20ГР	-	-	-	1,79	-	-	-	1,79	-
30ХГСА	-	-	-	1,44	-	-	-	1,44	-
32ХГА	1,63	-	-	-	-	-	-	1,63	-
40Х	1,53	1,51	1,48	-	2,03	1,75	1,90	1,50	1,89
Среднее по компаниям	1,44	1,44	1,62	1,56	1,84	1,90	2,06	1,51	2,08

* а, б, в – компании проката; оп – компания по акту опытной прокатки

Из таблицы 8 следует, что для РС-1 среднее значение коэффициента – 1,51, а для РС-2 – 2,08.

Для компании проката заготовок из акта опытной прокатки получен коэффициент корреляции – 1,56, что соответствует выбранному для РС-1 коэффициенту 1,51. Соответственно можно сделать вывод о том, что коэффициент выбран верно, а также о правильности суждений и принятых в ходе адаптации решений.

3.4 Применение программы с целью определения возможности обжатия стали 15X13H2

Для определения возможности обжатия заготовок использовались данные о температурно-деформационных режимах, полученные в разделе 3.1, а именно температурный интервал наибольшей технологической пластичности 1050÷1125 °С, и программа «Reduction Motor Load 2020» разработанная и адаптированная для применения к процессу обжатия на трехвалковом раскатном стане Ассела в ТПЦ-1 АО «ВТЗ» в разделах 3.2 и 3.3.

Из рисунка 3.27 видно, что обжатие заготовки с диаметра 156 до диаметра 120, что является одним из часто используемых вариантов обжатий, невозможно даже при самой высокой температуре из допустимого интервала, так как ограничения токовой нагрузки на раскатном стане №1 – 3520 А, а на раскатном стане 2 – 3840 А.

В случае возникновения необходимости определения максимально допустимого диаметра исходной заготовки при обжатии до 120 мм можно воспользоваться вкладкой «Анализ» с выбором параметра «Использовать диаметр исходной заготовки», а затем с выбором параметра «Использовать диаметр обжатой заготовки», чтобы узнать до какого минимального диаметра возможно обжатие заготовки с диаметром 156 мм. Результаты представлены на рисунках 3.28 и 3.29.

Из рисунка 3.28 видно, что для обжатия на раскатном стане №1 наибольший возможный диаметр – 153 мм, а для раскатного стана №2 – 151 мм. Для анализа по диаметру обжатой заготовки, из рисунка 3.29 следует, что на раскатном стане №1 исходную заготовку диаметром 156 мм можно обжать до 124 мм, а на раскатном стане №2 до 127 мм.

Анализ по температуре (рисунок 3.30) показал, что для раскатного стана №1 минимально допустимая температура обжатия 1183 °С, а для раскатного стана №2 – 1237 °С, оба значения значительно превышают температурный интервал наибольшей технологической пластичности стали 15X13H2.

Возможный вариант решения данной проблемы – это проведение обжата в два этапа, в таком случае, из за снижения степени деформации, произойдет снижение токовой нагрузки, что сделает возможным обжатие заготовки из данной стали при температуре в интервале 1050÷1125 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из полученных данных следует, что наиболее рациональным, с точки зрения технологической пластичности, для процесса обжатия кованой заготовки из стали 15X13H2 является температурный интервал $1050 \div 1125$ °С (в данном интервале относительное отклонение показателей пластичности не превышает 11 %). Среднее число кручений образцов до разрушения в пределах рационального интервала температур составляет $17,2 \pm 1,4$ оборота. Максимальное количество кручений до разрушения (18,5 оборотов) наблюдается при температуре нагрева образцов 1100 °С. Минимально (11,1 оборотов) – при температуре нагрева образцов 1250 °С. С увеличением температуры нагрева образцов выше 1100 °С наблюдается монотонное снижение пластичности стали.

2. Для стали 15X13H2 в литом состоянии наблюдается монотонное повышение пластичности с увеличением температуры деформации. При этом полученные значения пластичности расположены существенно ниже (на $8 \div 14$ оборотов) значений, полученных для данной марки стали в кованом состоянии. Таким образом, использование НЛЗ из стали марки 15X13H2 для получения обжатой заготовки связано с образованием большого количества дефектов.

3. В испытании на горячую осадку наблюдается хорошая воспроизводимость результатов. Также показано, что наблюдаемый участок подъема напряжений при больших деформациях связан с условиями трения между образцом и рабочим инструментом.

4. Проведенные испытания на горячую осадку не позволили определить критическую степень деформации для стали марки 15X13H2 в кованом состоянии, при которой наступает разрушение материала, поскольку разрушение боковой поверхности образца не было достигнуто при максимальной степени деформации, которую способно развить испытательное оборудование во всем диапазоне температур. Таким образом, для данной марки стали не являются критическими степени деформации при осадке от 77,5% и ниже, что соответствует вытяжке 4,44.

5. Сравнительный анализ результатов испытаний на горячее кручение различных марок сталей показал, что стали марок 20 и 10ГФБЮ в литом состоянии имеют значительно лучшую технологическая пластичность по сравнению со сталью марки 15Х13Н2 в ковном состоянии (количество кручений до разрушения образцов в 2 и более раз выше). При этом НЛЗ и сталей марок 20 и 10ГФБЮ имеют существенную неоднородность свойств по поперечному сечению (технологическая пластичность значительно ухудшается от периферийных областей к осевой зоне). Сталь марки 15Х13Н2 в ковном состоянии лишена данного недостатка. Благодаря тому, что заготовка прошла предварительную деформационную обработку – достигнута однородность свойств по поперечному сечению заготовки, поэтому данную марку стали можно успешно обжимать на станах винтовой прокатки с получением обжатой заготовки надлежащего качества.

6. Разработан программный продукт для ЭВМ ««Reduction Motor Load 2020» (сокращенное название: RML2020), позволяющий осуществлять расчет токовых нагрузок на приводы трехвалковых раскатных станов Ассела при обжатии трубных заготовок из различных марок сталей, в различных условиях и на различных режимах деформации.

7. Программный продукт RML2020 дополнительно оснащен модулем анализа исходных данных, который позволяет определять возможные диапазоны варьирования исходных данных, которые обеспечивают стабильную работу оборудования раскатных станов без превышения допустимых значений токовых нагрузок.

8. Проведена адаптация программного продукта RML2020 для условий работы раскатных станов Ассела РС-1 и РС-2 ТПЦ-1 АО «ВТЗ»:

- а) Установлено различие в задаваемой и фактической частоте вращения двигателя на РС-1, в то же время на РС-2 такого не наблюдается. Предположительно, это может быть следствием некорректной работы оборудования фиксации данных.

б) Установлено что значения, рассчитанные с помощью математической модели занижены по отношению к фактическим значениям токовой нагрузки.

с) Выбран метод адаптации, который заключается в использовании определенных поправочных коэффициентов, различных для РС-1 и РС-2, ввиду разницы отклонений на каждом из них, 34% и 48% соответственно. Поправочный коэффициент для РС-1 составил 1,51, для РС-2 – 2,08.

9. Разработанная программа показала, в частности, что обжатие кованных заготовок из стали 15X13H2 с исходного диаметра 156 мм до 120 мм в предлагаемом интервале температур максимальной технологической пластичности 1050-1125 °С на имеющемся оборудовании невозможно: нужны более высокие температуры нагрева заготовок 1183 °С и 1235 °С, а их исходный диаметр не должен превышать 153 мм и 151 мм для РС-1 и РС-2 соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трутнев Н. В. и др. Освоение производства бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr на ТПА 159–426 АО ВТЗ // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – №. 12. – С. 68-71.

2. Лаев К. А. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства коррозионностойких высокохромистых сталей мартенситного и супермартенситного классов для изготовления труб нефтегазового сортамента: дис. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, 2016 г, 2016.

3. Urbanski S., Kazanecki J. Assessment of the strain distribution in the rotary piercing process by the finite element method // Journal of materials processing technology. – 1994. – Т. 45. – №. 1-4. – С. 335-340.

4. Курятников, А.В. Определение температурного интервала максимальной технологической пластичности металла методом горячего кручения применительно к процессу косовалковой прошивки / А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков и др. // Производство проката. – 2014 – № 1. – С. 20-27.

5. Друян В.М. Теория и технология трубного производства / В.М. Друян, Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов – Учебник: Днепропетровск, РИА «Днепр-ВАЛ», 2011. – 544 с.

6. Сорокин В.Г. Сплавы и стали / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев, И.В. Гервасьева, С.Я. Палеева – Марочник: Справ. Изд. – М.: Металлургия, 2001. – 608 с.

7. Шакиров, Э.И. Эксплуатация скважин коррозионного фонда «РН – Пурнефтегаз». Методы борьбы с коррозией / Э.И. Шакиров. // Инженерная практика. – 2010. – № 6. – С. 56 – 65.

8. Лаев, К.А. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства коррозионностойких высокохромистых сталей мартенситного и

супермартенситного классов для изготовления труб нефтегазового сортамента:
Дис. канд. тех. наук: 05.16.01. /Лаев Константин Анатольевич. – Челябинск, 2016.
– 142 с.

9. V&M 13% Cr & Super 13% Cr steel grades for Sweet CO2 corrosion service
V&M – Режим доступа: http://www.vallourec.com/OCTG/EN/E-Library/gradesbrochures/Lists/Publications/13CR_4v_1210.pdf. (2014)

10. Химушин, Ф.Ф. Нержавеющие стали / Ф.Ф. Химушин – М.:
Металлургия, 1967 –800 с.

11. Лукин, В.И. Свариваемость жаропрочных сталей мартенситного
класса / В.И. Лукин, В.Е. Лазаренко, В.Г. Ковальчук // ISSN 0491-6441. Сварочное
производство. -2004 - № 6. – С 10-16.

12. Hervé Marchebois / SSC performance of a Super 13% Cr martensitic
stainless steel for octg: three-dimensional fitness-for-purpose mapping according to
PH2S, ph and chloride content / Hervé Marchebois, Jean Leyer // NACE Corrosion
2007 Conference & EXPO, 2007. – № 07090 –26 p.

13. Jonathan Bellarby. Well Completion Design / Jonathan Bellarby. – V 56,
Elsevier, 2009 – 711 p.

14. ANSI/API Spec 5CRA. Спецификация по бесшовным трубам из
коррозионностойкого сплава для использования в качестве обсадных, насосно-
компрессорных труб и соединительных муфт. – 1-е изд. – Американский
нефтяной институт, 2010. – 100 с.

15. ГОСТ Р ИСО 13680-2011 Трубы бесшовные обсадные, насосно-
компрессорные и трубные заготовки для муфт из коррозионностойких
высоколегированных сталей и сплавов для нефтяной и газовой промышленности
технические условия. – Введ. 2011.-10-30. –: Стандартинформ, 2013. – 62 с.

16. JFE Steel Corporation - Pipes and Tubes – OCTG, Режим доступа:
<http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/pipes/ru-octg/products/wcs.html>

17. Sumitomo Metal Industries Ltd, Режим доступа:
<http://www.sumitomometals.co.jp/e/business/sm-series.pdf>

18. Банных, О. А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др. // М.: Металлургия. – 1986. – Т. 440.
19. Гольдштейн, М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер; под ред. М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – 2-е изд., пераб. и доп. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
20. Гольдштейн, Я.Е. Конструкционные стали повышенной обрабатываемости / Я.Е. Гольдштейн, Я.М. Заславский – М.: «Металлургия», 1977. – 248 с.
21. Ляхович, Л.С. Специальные стали // Минск: Высшая школа. – 1985. – 208 с.
22. Технические условия 14-ЗР-121-2011. Трубы насосно-компрессорные бесшовные и муфты к ним из сталей мартенситного класса типа 13Cr и типа супер 13Cr с газогерметичными резьбовыми соединениями «ТМК FMT» и «ТМК PF» для месторождений ОАО «ГазПром». – Челябинск, 2011. – 32 с.
23. Афонин, В.К. Металлы и сплавы: справочник / В.К. Афонин, Б.С. Ермаков, Е.Л. Лебедев и др.; под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: Профессионал, 2007. – 1089 с.
24. Миннеханов, Р.Г. Влияние модифицирования наночастицами тугоплавких соединений на служебные свойства стали / Р.Г. Миннеханов, Е.Н. Еремин, Г.Н. Митраков, Г.Н. Миннеханов // Вестник ОмГТУ. – 2012.
25. Корниенко, О.Ю. Оценка возможности применения изотермической закалки для повышения конструктивной прочности толстостенных труб повышенной надежности / О.Ю. Корниенко, С.В. Беликов, К.И. Сергеева и др. // Вестник УПИ. – 2012.
26. Выбойщик, М.А. Повышение конструктивной прочности труб за счет совмещения термомеханической и термической обработок / М.А. Выбойщик, Л.Г. Марченко // Петербургские чтения по проблемам прочности: Сборник тезисов – СПб.: 2003. – С. 209-210.

27. Кудряков, О.В. Повышение функциональных свойств трубной стали при комбинированной термической обработке / О.В. Кудряков, И.Г. Погорелов // Вестник ДГТУ. – 2007 – №2. – С.182-190.
28. Райцес, В.Б. Термическая обработка: в помощь рабочему-термисту / В.Б. Райцес – М.: Машиностроение, 1980. —193 с.
29. Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали / М.А. Смирнов, В.М. Счастливец, Л.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 494 с.
30. Смирнов, Л.В. Влияние пластической деформации в аустенитном состоянии на хрупкость при отпуске конструкционных легированных сталей / Л.В. Смирнов, Е.Н. Соколов, В.Д. Садовский // ДАН СССР. – 1955. – Т. 103, №4. – С. 609-610.
31. Булгаков, В.П. Высокотемпературная термомеханическая обработка в технологии производства бесшовных труб / В.П. Булгаков // Производство бесшовных труб из непрерывнолитых заготовок АН ГССР, Ин-т металлургии им. 50-летия СССР. – 1988. – С. 86-90.
32. Смирнов, М.А. Высокотемпературная термомеханическая обработка и хрупкость сталей и сплавов / М. А. Смирнов, С.Н. Петрова., Л.В. Смирнов. –М.: Наука, 1991. –167 с.
33. Берштейн, М.Л. Термомеханическая обработка стали / М.Л. Берштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
34. Бернштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов, т. 1-2 /М.Л. Бернштейн. – М., 1968.
35. Храмов Е. В. Повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования: дис. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, 2017.
36. M. Akhmedyanov, S. V. Rushchits, and M. A. Smirnov, “Hot deformation of martensitic and supermartensitic stainless steels” in International Conference on

Industrial Engineering-2016, Materials Science Forum 870 (Trans Tech Publications, Switzerland, 2016), 259–264.

37. Михалкин, Д.В. Разработка калибровки валков трехвалкового раскатного стана Асселя обеспечивающей уменьшение нагрузок на привод при обжатию заготовок. / Д.В. Михалкин, А.А. Корсаков, Е.В. Алютина и др. // Труды XXIII Международной научно-практической конференции «Трубы-2018». Сборник докладов / под редакцией Пышминцева И.Ю. – ОАО «РосНИТИ», Челябинск, 2018. – Часть II. – С. 63-69

38. Гамма, Э. Примеры объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. / Э.Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон и др.; пер. с англ. А. Слинкина. – СПб.: Питер, 2001. – 368с.

39. Чекмарев, А.П. Прошивка в косовалковых станах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин. – М.: Металлургия, 1967. – 240с.

40. Остапенко, А.Л. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета/ А.Л. Остапенко, Л.А. Забира // Черная металлургия. – 2009. – № 3. – С. 54–79.

41. Пышкин, Е.В. Основные концепции и механизмы объектно-ориентированного программирования (+ CD). – БХВ-Петербург, 2005.

42. Pierce V.C., Benjamin C. Types and programming languages. – MIT press, 2002.

43. Прохоренок, Н.А. Python 3 и PyQt5. Разработка приложений // Н.А. Прохоренок, В.А. Дронов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 832 с.