

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Самигуллина Лилия Гафуровна



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ
НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ МИКРООБРАЗЦОВ**

25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Щипачев А.М.

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА.....	9
1.1 Анализ технического состояния эксплуатируемых газонефтепроводов	9
1.2 Анализ изменения физико-механических характеристик в процессе эксплуатации нефтегазопроводов.....	11
1.3 Анализ нормативной и методической базы по оценке текущего состояния и остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов	16
1.3.1 Анализ методов определения остаточного ресурса объектов нефтегазовых трубопроводов	18
1.3.2 Методы определения физико-механических характеристик трубопроводных сталей	22
1.4 Альтернативные методы определения физико-механических характеристик при помощи метода микрообразцов (SPT)	24
1.5 Выводы по Главе 1	30
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРООБРАЗЦОВ ПРИ ИХ ИСПЫТАНИЯХ.....	32
2.1 Разработка математической модели проведения механических испытаний микрообразцов	32
2.2 Разработка методики проведения лабораторных механических испытаний микрообразцов	44
2.3 Проверка адекватности математической модели и лабораторной методики с применением микрообразцов из стали марки 10	50
2.4 Выводы по Главе 2	58
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ МИКРООБРАЗЦОВЫМ МЕТОДОМ.....	59

3.1	Методика проведения экспериментальных исследований трубопроводных сталей микрообразцовым методом.....	59
3.1.1	Основные положения методики проведения механических испытаний микрообразцов трубопроводных сталей методом SPT	59
3.1.2	Обработка экспериментальных данных, полученных при испытаниях микрообразцов методом SPT	61
3.2	Результаты испытаний микрообразцов из стали марки СТЗ.....	62
3.3	Результаты испытаний микрообразцов из стали марки 10.....	67
3.4	Результаты испытания микрообразцов из стали марки 20	72
3.5	Выводы по Главе 3	77
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕГАЗОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....		78
4.1	Обоснование критериев оценки технического состояния стальных трубопроводов	80
4.2	Определение остаточного ресурса газонефтепроводов с применением критериев технического состояния, основанных на результатах испытаний микрообразцов	86
4.3	Методика определения остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов с использованием микрообразцового метода.....	91
4.4	Рекомендации по отбору проб для микрообразцового метода SPT при определении остаточного ресурса.....	93
4.5	Выводы по Главе 4	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		100
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свойства стали СТЗ.....		115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Сведения о машине Zwick/Roell Z100.....		117
ПРИЛОЖЕНИЕ В Экспериментальные диаграммы.....		119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

На территории России, в настоящее время, эксплуатируется более 250 тыс. км магистральных газонефтепроводов и свыше 500 тыс. км промысловых и технологических трубопроводов. С учетом того, что средний срок службы, на который рассчитывается амортизация газонефтепроводов составляет от 20 до 30 лет, для эксплуатируемых трубопроводов наблюдается тенденция к их износу и устареванию. Данная ситуация усугубляется тем, что нефтегазовые трубопроводы работают в сложных природно-климатических условиях при высоком уровне механических и технологических нагрузок, а также высокой коррозионной активности перекачиваемых продуктов. Эти причины обуславливают резкое ухудшение физико-механических свойств используемых сталей, что в свою очередь является причиной возникновения дефектов и повреждений трубопроводов.

По официальным данным Ростехнадзора за последние 5 лет, статистические показатели аварийности на объектах транспорта и хранения нефти и газа колеблются в широких пределах $-1,4 \cdot 10^{-3} \dots 3,4 \cdot 10^{-3}$.

Современный опыт эксплуатации линейных нефтегазопроводов показывает, что их устойчивая работа обеспечивается путем проведения технического диагностирования, определения технического состояния и оценки сроков дальнейшей безаварийной эксплуатации. Для этого требуется проведение оперативного контроля состояния поврежденности и напряженно-деформированного состояния металла трубопроводов с помощью механических испытаний микрообразцов, полученных щадящими способами воздействия на металл.

Таким образом, совершенствование процедур оценки технического состояния нефтегазопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса по изменению физико-механических характеристик материалов в процессе эксплуатации является актуальной научной задачей, решение которой имеет

теоретическое и практическое значение, так как может позволить снизить аварийность и сократить затраты на обеспечение надежной эксплуатации нефтегазовых трубопроводов.

Степень разработанности темы

Вопросами обеспечения прочности и устойчивости трубопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических условиях нашей страны занимались *В.Л. Березин, П.П. Бородавкин, Г.Г. Васильев, Ф.М. Мустафин, А.М. Шаммазов и др.* Вопросы оценки ресурса нефтегазопроводов, зарождения и развития дефектов (повреждений), а также разработки способов диагностики и ремонта трубопроводов посвящены труды отечественных и зарубежных ученых: *Н.А. Махутов, Р.В. Агиней, Земенков Ю.Д., А.С.Кузьбожьев, В.В. Притула, И.Р. Кузеев, В. В.Харионовский, Р. Копорік, К. Matocha и др.*

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: п.1 – «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ»; п.7 – «Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации».

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование методики оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов по результатам испытаний микрообразцов.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выполнить аналитический обзор состояния нефтегазопроводов, существующих методов оценки их технического состояния и остаточного ресурса;

2. Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния микрообразцов для оценки изменения прочностных характеристик трубопроводных сталей;

3. Выполнить экспериментальные измерения механических характеристик трубопроводных марок сталей;

4. Обосновать экспериментально-расчетный критерий, характеризующий степень повреждения стенки трубопровода;

5. Разработать методику оценки остаточного ресурса трубопровода по критерию степени повреждения стенки трубопровода.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Получены аналитические зависимости параметров напряженно-деформированного состояния, определяемых по диаграмме механических испытаний микрообразцов, от степени повреждения металла;

2. Обосновано применение интегрального критерия для оценки работоспособности и расчета остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложена методика проведения механических испытаний стальных микрообразцов с получением диаграммы нагружения;

2. Разработан алгоритм определения технического состояния и расчета остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов на основе оценки напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов;

3. Представлены рекомендации по применению технических средств для отбора микрообразцов для проведения испытаний;

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению при проектировании и эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, выполненных из углеродистых сталей.

Методология и методы исследования:

При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных

материалов; расчет внутренних напряжений в математической модели микрообразцов с применением программного комплекса Abaqus; проведение экспериментов на микрообразцах.

Положения, выносимые на защиту:

1) Зависимость уровня предварительного нагружения N (кН) и параметров диаграммы нагружения (F_m , F_e) микрообразцов из углеродистых сталей имеет линейный характер и может быть выражена уравнениями вида:

$$N = A_1 * F_m + B_1 \text{ и } N = A_2 * F_e + B_2;$$

2) Интегральный критерий технического состояния ΔS , определяемый по диаграмме нагружения микрообразцов как относительное изменение удельной работы разрушения, характеризует степень поврежденности стали от действия эксплуатационных нагрузок и позволяет оценить остаточный ресурс трубопровода.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом проведенных экспериментальных работ. Достоверность научных положений подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Достоверность выводов и результатов обеспечивается комплексным использованием современных методов исследования, согласованностью результатов лабораторных испытаний с результатами математического моделирования и сопоставлением результатов исследований с работами и выводами отечественных и зарубежных авторов.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались на III Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2016» (г. Екатеринбург, май 2016 г.), XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт - 2017» (г. Уфа, июнь 2017 г.), XXXIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты». (г. Новосибирск, июнь

2017 г.), XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (г. Москва, октябрь 2017 г.).

Личный вклад автора заключается в сборе и систематизации статистических данных по эксплуатации нефте- и газопроводов; обосновании применения микрообразцов для оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов; разработке математических моделей полей напряженно-деформированного состояния микрообразцов; обосновании выбора формы и размеров экспериментальных образцов; проведении экспериментальных исследований по оценке параметров углеродистых сталей; разработке методики оценки остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов и формулировке рекомендаций по применению оборудования для получения микрообразцов.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 научных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 122 страницы печатного текста, содержит 25 таблиц, 45 рисунков, 3 приложения. Список литературы включает 122 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

1.1 Анализ технического состояния эксплуатируемых газонефтепроводов

Трубопроводный транспорт в Российской Федерации является основным способом транспортировки нефти, нефтепродуктов и природного газа от мест добычи или производства к местам потребления. По официальным данным Федеральной службы государственной статистики, общая протяженность магистральных трубопроводов, без учета распределительных, промысловых и технологических трубопроводов, составляет более 252 тысяч километров, что включает в себя свыше 180 тыс. км газопроводов, 70 тыс. км нефтепроводов и более 19 тыс. км [22].

Значительная часть нефтегазовых трубопроводов имеет значительный срок эксплуатации, иногда превышающий нормативные значения. Износ нефтепроводного парка по разным данным составляет порядка 50-70% и выше:

- по данным Генеральной прокуратуры, износ основных фондов трубопроводного транспорта превышает 70% [47], в частности для Ханты-Мансийского автономного округа, на территории которого добывается порядка 50% российской нефти, износ нефтепроводов и водоводов, эксплуатируемых нефтегазодобывающими предприятиями, составляет 50% [4];

- по данным экспертных оценок, износ основных фондов нефтедобывающих компаний составляет 60% [24].

По информации Ростехнадзора (письмо от 21 января 2016 г. № 00-06-04/133), на 2016 год 22% от общего количества промысловых (межпромысловых) трубопроводов имели фактический срок эксплуатации от 5 до 10 лет, 57% трубопроводов – от 10 до 20 лет, а 3,1% трубопроводов – свыше 20 лет.

Так, в 2017 году на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта произошло 12 аварий, экономический ущерб от них

составил 190 млн 799 тыс. руб. (в 2017 году – 79 млн 38 тыс. руб., из них экологический ущерб – 2 млн 113 тыс. руб. (в 2017 году – 62,1 тыс. руб.) [7].

По магистральным газопроводам показатели также подтверждают тенденцию устаревания производственных фондов. По данным ПАО «Газпром» [46], собственника единой системы газоснабжения, в 2012 г. доля газопроводов со сроком эксплуатации более 50 лет составляла около 8,4%, по итогам 2018 г. – уже 12%. На рисунке 1.1 приведена информация о структуре магистральных газопроводов по возрасту в процентном соотношении и по протяженности по состоянию на 31 декабря 2018 года.

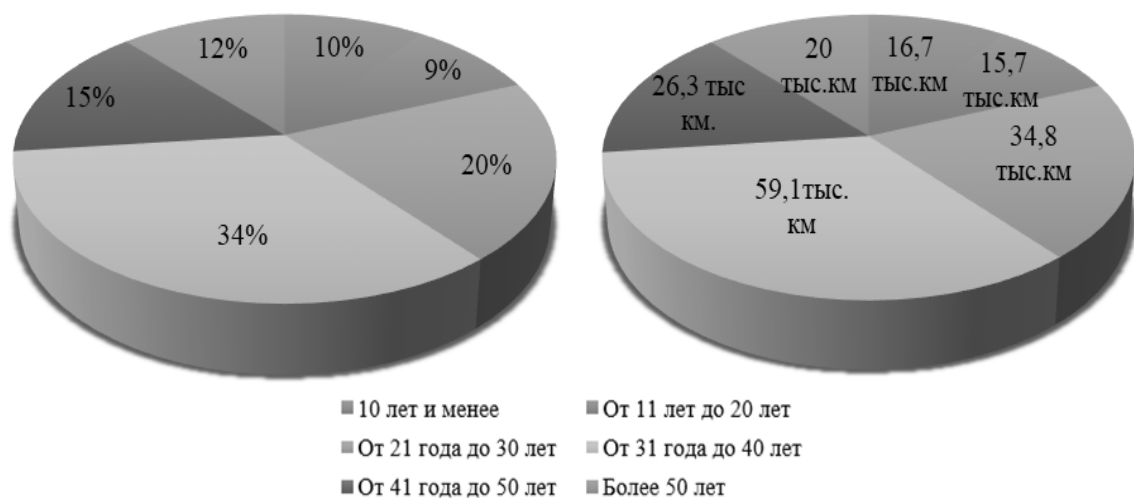


Рисунок 1.1 – Сведения по срокам эксплуатации магистральных газопроводов ПАО «Газпром»

С учетом того, что средний срок службы, на который рассчитывается амортизация газопровода составляет 25-30 лет [52], можно сделать вывод, что большая часть трубопроводов ПАО «Газпром» либо находится за чертой выработки, либо приближается к ней, что требует повышения уровня применяемых в эксплуатации технологий для обеспечения работоспособного состояния газопроводов.

1.2 Анализ изменения физико-механических характеристик в процессе эксплуатации нефтегазопроводов

При длительной эксплуатации трубопроводов опасность отказов, обусловленных деградиационными процессами в металле, возрастает [2, 3, 77]. Поэтому даже при напряжениях, не всегда превышающих максимально допустимые, возможны разрушения.

Можно выделить ряд определенных негативных процессов [8]:

- трансформация геометрических размеров конструкции;
- повреждение поверхности конструкционных элементов коррозионными процессами;
- образование и развитие макродефекта;
- старение материала или деградация его механических свойств.

Под деградацией механических свойств материалов понимается протекание изменения механических характеристик сталей под воздействием различных эксплуатационных факторов. Проявляемые в результате этого процесса механические свойства отличаются от аналогичных, имеющих в документации на моменты пуска конструкции в эксплуатацию.

В качестве основных типов деградации механических свойств сталей можно выделить охрупчивание, упрочнение и разупрочнение металла. Факт изменения механических свойств устанавливается благодаря введению в практику контролируемых механических характеристик, список которых расширяется по мере развития научно-технического прогресса. В настоящее время к числу основных контролируемых механических характеристик при диагностике оборудования нефтегазовой отрасли относятся: предел прочности (или временное сопротивление металла), пределы: текучести, выносливости, относительные удлинения и сужения, критические величины: температура хрупкости, величина раскрытия трещины, относительные величины: отношение предела текучести к пределу прочности и др.

Насколько значим процесс длительной эксплуатации нефтегазопроводов на изменение механических характеристик используемых в их конструкции материалов, имеются различные мнения. В документации, регламентирующей эксплуатацию и строительство нефтегазопроводов, проблема изменения механических характеристик материалов труб при длительной эксплуатации не рассматривается [53, 65]. Однако в работах, посвященных изучению механических свойств металлов нефтепроводов, начатых в 80-х годах прошлого столетия, содержатся сведения о том, что при длительной эксплуатации в трубном материале идут процессы, вызывающие их упрочнение и охрупчивание, определяемые как деформационное старение малоуглеродистых сталей [16, 87]. С 2010 года также активно проводятся аналогичные работы по изучению изменения механических свойств материалов магистральных газопроводов [16, 19, 23, 35, 37, 43, 53, 75, 87]. Анализ литературных источников показал, что на современный момент существуют два различных мнения по поводу изменения свойств материалов нефтегазопроводов в течение их длительной эксплуатации.

Материал труб нефтегазопроводов, эксплуатируемых в заданном интервале температур, не испытывает значимых изменений в структуре [19, 23, 35, 37, 43, 75]. Это мнение основывается на проводимых прямых исследованиях структуры материалов труб нефтегазопроводов [19, 23, 35, 43], которые показывают, что механические свойства сталей даже при длительных сроках эксплуатации, входят в рамки допустимых значений [37, 75].

Устойчивость механических свойств материалов нефтегазопроводов объяснима прежде всего тем, что максимальные напряжения, возникающие в структуре сталей не превышают пределы текучести [65]. Однако, при подвергании материала нефтепровода пластической деформации, которая может иметь место во время его длительной эксплуатации, его механические свойства изменяются.

При продолжительной эксплуатации нефтегазопроводов в конструкционных материалах происходят процессы деградации металла, что можно определить как деформационное старение. В результате снижаются

параметры сопротивления разрушению, такие как критическое раскрытие трещины, работа разрушения, ударная вязкость. [19, 43, 75]. Значительная часть исследователей считает, что продолжительная эксплуатация нефтегазопроводов может вызывать значительные изменения стандартных механических свойств материалов, в частности понижение параметров пластичности (от 15% до 50%) и повышение прочностных характеристик (на 15-20%) [23, 35, 37, 41, 45, 67].

По мнению некоторых авторов работ, можно отметить четыре основных фактора, которые приводят к деградации свойств материала: «воздействие механических нагрузок, воздействие температуры, воздействие среды, воздействие излучений» [16, 73].

Чаще всего, основными причинами разрушения нефтегазопроводов считают дефекты, которые образуются в результате коррозионного воздействия и дефекты, возникающие в результате механических напряжений. В качестве механических факторов выделяют прежде всего те, которые могут вызвать образование дефекта – это нагружения на сжатие и на удар. Такого рода дефекты могут возникнуть, например, при воздействии на покрытие подземного трубопровода различного рода камней. Нагружение на удар возможно при транспортировке и укладке трубных конструкций. Повреждения, способные вызвать разрушение трубопровода, способны образоваться как при производстве, так и при транспортировке, укладке и эксплуатации трубопроводов. Образование такого рода повреждений происходит чаще всего на поверхности или в объемах, прилегающих к поверхности металла труб.

Нефте- и газотрубопроводы испытывают три вида нагрузки: нагрузку от внутреннего давления, вибрационную нагрузку вблизи компрессорных станций и периодические перегрузки (порядка $10^3 - 10^5$ циклов за время эксплуатации) при смене параметров эксплуатации. В настоящее время при анализе работоспособности труб нефтепроводов внутреннее давление обычно рассматривается как статическая нагрузка. Однако известны отдельные работы, например [1, 79], в которых показано, что в действительности давление в трубе при ее эксплуатации непостоянное – оно изменяется вследствие неизбежного

изменения условий транспортировки нефти. При этом все эти нагрузки значительно меньше статического предела текучести. Однако при этих напряжениях в низколегированных и низкоуглеродистых сталях протекают процессы микропластической деформации и деформационного старения [34, 51, 71, 72]. Процессы старения в нормализованных сталях протекают и без нагрузки. При этом несколько повышаются прочностные свойства (особенно предел текучести) и снижаются характеристики пластичности. Под нагрузкой (статической или циклической) процессы динамического деформационного старения интенсифицируются. Поскольку процессы движения и размножения дислокаций в локальных объемах металла протекают при напряжениях значительно меньших статического предела текучести, то и процессы деформационного старения в трубных сталях протекают при эксплуатационных нагрузках. В работе [20] было показано, что статическое и динамическое деформационное старение в низкоуглеродистой стали при повторном растяжении наблюдается при напряжениях значительно меньших предела выносливости. Деформационное упрочнение и старение приводит также к снижению характеристик трещиностойкости [21].

Наблюдаемые при длительной эксплуатации процессы деформационного старения трубных сталей магистральных газопроводов исследователи объясняют перераспределением углерода, азота, повышением содержания водорода, распадом цементита, эволюцией дислокационной субкультуры, а также ростом внутренних напряжений, увеличением микротрещин, воздействием коррозионных факторов, уменьшающих толщину стенки трубы [23, 35, 37, 41, 45, 67].

В работе [109] представлены данные об изменении механических свойств стали 17ГС после длительной эксплуатации в составе магистральных газопроводов «Шебелинка – Диканька – Киев» и «Елец – Диканька – Киев» (наружный диаметр 1020 мм, толщина стенки 10 мм) сроком 38 лет и 31 год соответственно. Из металла газопроводов были отобраны цилиндрические образцы и испытаны на растяжение, диаграммы деформирования представлены на рисунке 1.2.

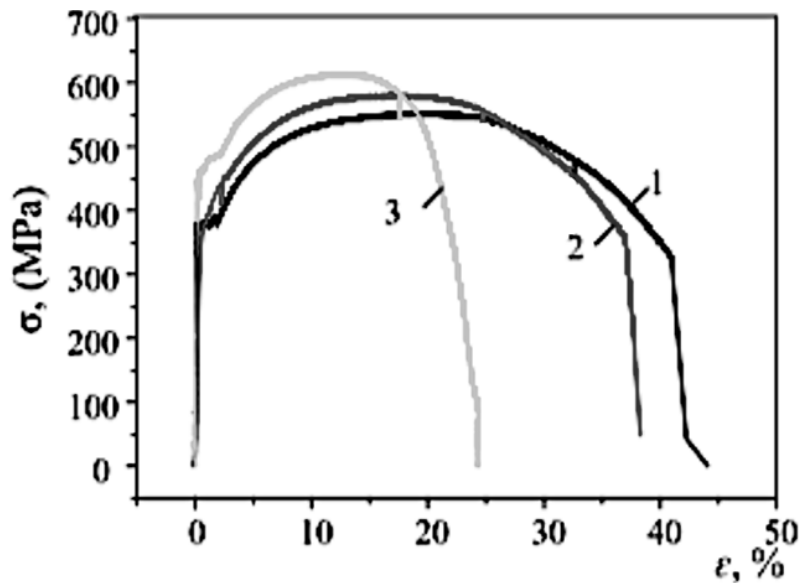


Рисунок 1.2 – Диаграмма деформирования образцов из стали 17ГС:

1 – металл в исходном состоянии; 2 – металл газопровода «Шебелинка – Диканька – Киев» после 38 лет эксплуатации; 3 – металл газопровода «Елец – Диканька – Киев» после 31 года эксплуатации

Как видно из рисунка 1.2, с увеличением срока эксплуатации существенно возрастают значения механических характеристик металла (предела текучести и прочности), увеличенная кривизна формы диаграммы «напряжение – деформация» подтверждает протекание процессов деградации на макроуровне.

В другом исследовании [48] изучалось изменение механических свойств конструкционных сталей 17Г1С и 19Г.

Наиболее значительные изменения свойств были обнаружены при определении ударной вязкости по Шарпи (KCV) сталей после длительной эксплуатации. У стали 17Г1С снижение ударной вязкости находилось в пределах 17-34%, а у стали 19Г в пределах 13-33% по сравнению с аварийным запасом. Это обусловлено процессами деформационного старения в течение 25 лет, вследствие чего структура и механические характеристики металла претерпевают существенные изменения.

Установлено, что «с увеличением времени эксплуатации, увеличиваются пределы прочности и текучести (на 5-15%), уменьшается ударная вязкость (на 20-

25%), смещается температура хрупко-вязкого перехода в повышенные зоны температур» [42]. При этом основная трудность в установлении деградации свойств материала заключается в испытании значительного количества образцов и дальнейшей статистической обработке результатов.

Состояние металла труб, кроме срока эксплуатации, зависит также от параметров, которые можно определить как силовые, и которые могут быть разными при различном удалении трубопровода от насосной станции. Чем больше перепад рабочего давления трубопроводов на выходе из насосных станций от среднего уровня напряжений, тем больше процессов деградации металла и накопления дефектов в материале труб. Литературные данные об изменениях механических свойств трубных сталей после длительной эксплуатации в трубопроводах показали, что основные и дополнительные (ударная вязкость по Шарпи, суммарная работа разрушения, работа зарождения трещины) механические свойства трубных сталей чувствительны к изменению в результате длительной эксплуатации трубопроводов. При этом наиболее опасным фактором является воздействие механических нагрузок на трубопровод.

Таким образом, при работе трубы испытывают перепады давления и температуры, динамические и статические нагрузки, что приводит к негативным изменениям, которые выражаются в ухудшении эксплуатационных свойств материала (повышение сопротивления микропластической деформации, увеличение опасности появления в металле локальных «пиков» напряжений, склонности стали к хрупкому разрушению).

1.3 Анализ нормативной и методической базы по оценке текущего состояния и остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов

В классификации методов оценки и прогнозирования ресурса для технических объектов, в том числе и трубопроводных систем, можно выделить четыре группы: статистические, физико-статистические, экспертные и детерминированные.

У каждой из этих групп можно выделить определенные преимущества и недостатки, поэтому наиболее целесообразным видится использование этих методов в совокупности, комплексно, и основной вывод о значении ресурса возможен лишь при сравнении результатов различных методов.

Статистические методы. Для этой группы методов для определения значения остаточного ресурса требуется значительный объем информации по отказам и по наработке исправно работающего оборудования. Чаще всего в реальных условиях эксплуатации трубопроводов выборки обычно бывают неполными, и в силу различного рода причин (как объективных, так и субъективных) могут иметь большую степень неопределенности.

Физико-статистические методы. Данная группа методов при определении остаточного ресурса рассматривает влияние физико-химических факторов на развитие процессов деградации в конструкционных материалах трубопроводов, при этом учитывая и эксплуатационные нагрузки. При этом, все эксплуатационные нагрузки несущая способность конструкционных материалов анализируются с помощью методов математической статистики. Именно эта группа методов, как показывает опыт использования различных моделей определения остаточного ресурса, дает наиболее адекватные результаты.

Экспертные методы оценки и прогнозирования остаточного ресурса. Эти методы связаны, прежде всего, с ограничениями в выборе экспертов и фактором субъективности при выдаче результатов. Положительной стороной метода экспертных оценок является возможность достаточно быстрого получения результатов при относительно небольших затратах. Основным минусом данного метода является субъективность оценок эксперта, конечный результат менее точен по сравнению с математическими методами.

Детерминированные методы оценки ресурса. Эти методы рассматривают зависимости, возникающие в результате длительной эксплуатации объекта (время до разрушения объекта в зависимости от характеристик эксплуатационных нагрузок, от различных параметров физико-химических процессов). В качестве недостатка этих методов можно отметить то, что они не учитывают случайных

эксплуатационных нагрузок и, как результат, случайных изменений в материале конструкций.

Оценка технического состояния объекта осуществляется по параметрам, обеспечивающим его надежную и безопасную эксплуатацию согласно нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, а остаточный ресурс – по определяющим параметрам технического состояния. В качестве последних принимаются параметры, изменение которых может привести объект в неработоспособное или предельное состояние.

Параметрами технического состояния объекта могут служить:

- характеристики материалов: пределы текучести, выносливости, прочности, ползучести, твердость, трещиностойкость, химический состав, микроструктура и т.д.;
- коэффициенты запасов прочности и устойчивости (по пределам текучести, прочности, длительной прочности, ползучести, трещиностойкости, устойчивости, по числу циклов или напряжениям при расчетах на циклическую прочность);
- технологические показатели: температура, давление, выход продукта, параметры вибрации, режимы работы и т.д.

1.3.1 Анализ методов определения остаточного ресурса объектов нефтегазовых трубопроводов

Безопасную и безаварийную эксплуатацию объектов трубопроводного транспорта необходимо осуществлять с учетом мониторинга значений результатов технической диагностики, по которым определяется остаточный ресурс [29, 31].

При анализе остаточного ресурса нефтегазовых объектов могут быть использованы различные принципы и алгоритмы [40].

Чаще всего пользуются двумя ключевыми классами моделей (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Группы моделей – методов определения остаточного ресурса нефтегазовых объектов

Признаки модели	Источник
Математические модели (включая логические)	
Проводится сбор и обработка сведений о долговечности аналогичных рассматриваемому объектов	[39]
По известным математическим законам вычисляется вероятность возникновения отказа	[13]
Риск - ориентированные вычисления, позволяющие определить показатели риска аварийности либо техногенного риска	[21]
Расчет формальных значений конструктивной надежности объектов	[117]
Категорирование объектов по признакам технического состояния различных элементов конструкций	[70]
Физические модели	
Выявление основного технического параметра для текущего состояния объекта	[80]
Периодическое определение величины физического износа элементов конструкций	[6]
Расчет длительности эксплуатации между ремонтами	[56]
Определение коэффициента запаса для конкретного вида предельного состояния объекта	[69]
Расчет степени деградационных признаков конструкций	[18]

1) Вероятностно-статистические (математические) модели. Эти модели рассматривают возникновение дефектов или разрушений как случайные события. Функции в данной модели не несут конкретный физический смысл, берутся как

формальный параметр от нуля до единицы и обозначают величину, которая равна вероятности риска аварии, отказа объекта;

2) Детерминистические (физические) модели. Модели, имеющие в своей основе физические законы механики разрушения. В данных моделях функции имеют конкретный физический смысл: время нагружения, изменение сопротивления, поврежденность, деформации, уровень физического износа, коэффициент запаса для предельного состояния и т.д.

Для примера рассматриваются некоторые принципы, на которых основаны перечисленные выше методики. Модель «деградации надежности представлена степенной функцией (1.1):

$$\theta(t) = \theta_0(1 - kt^n), \quad (1.1)$$

где $\theta(t)$, θ_0 – текущее в момент времени t и начальное значения запаса безопасности (разности прочности и нагрузки); k – постоянный коэффициент; n – характеристика моды деградационного процесса (при линейной деградации $n=1$)» [117].

Функция изменения вероятности отказа (аварии) по времени является основой при оценке остаточного ресурса (рисунок 1.3). «Риск аварии определяется по выражению (1.2):

$$R = \frac{P_f}{P_t} = \frac{P_t + \Delta P}{P_t}, \quad (1.2)$$

где P_f – значение фактического риска аварии; P_t – значение теоретического риска аварии; ΔP – дополнительный риск, привнесенный ошибками проектирования, строительства и эксплуатации» [38].

Для прогнозирования срока службы пролетных конструкций железобетонных мостов определяется остаточный ресурс по показателю надежности или безотказности [39].

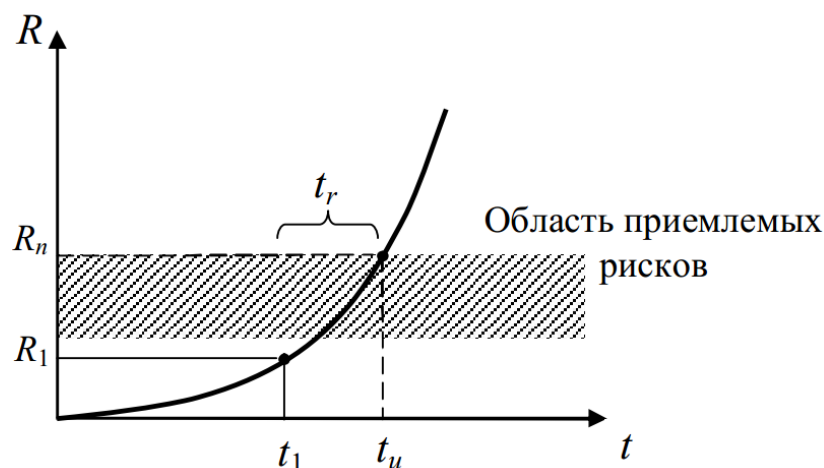


Рисунок 1.3 – Определение остаточного ресурса по показателю риска аварии

Регламентированное нормативное значение надежности равно $0,9986$, принимается для граничного показателя вероятности безотказной работы. Если проходит время приработки, равное t_0 , то вследствие износа снижается надежность (рисунок 1.4). Для показателя вероятности $P=0,5$ – определяется долговечность как предельное время службы t_u .

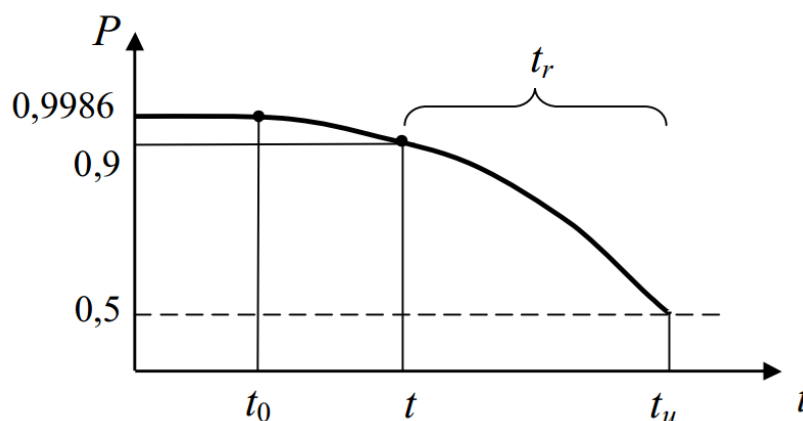


Рисунок 1.4 – Применение вероятности безотказной работы для оценки остаточного ресурса

Для текущего расчета величины остаточного ресурса могут применяться основные положения теории нечетких множеств, что приводит к некоторому облегчению вычислительных действий при определении вероятности отказа [33]. Здесь определяющее понятие надежности трансформируется в функцию, характеризующую распределения возможностей $\pi(t)$. Значение остаточного

ресурса вычисляется по интервальному и предельному значениям функции надежности (рисунок 1.5).

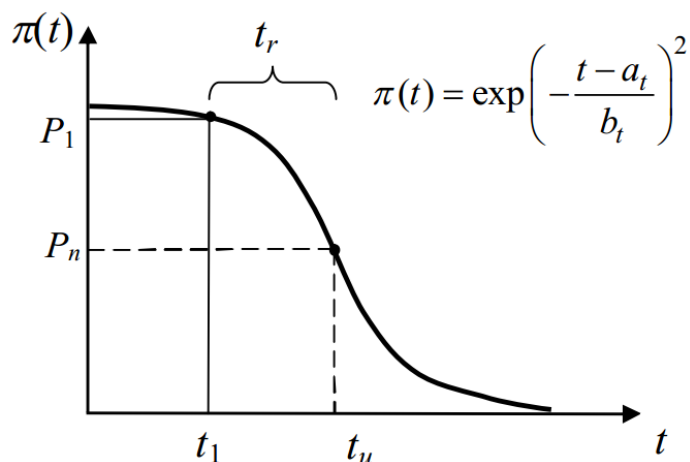


Рисунок 1.5 – Оценка остаточного ресурса с использованием теории нечетких множеств

Оценка остаточного ресурса является значительным фактором для обеспечения работоспособного состояния рассматриваемых объектов. Кроме приведенных выше в практической деятельности применяются другие методики, каждая из которых была разработана для определенного круга промышленных объектов, эксплуатируемых на производственных предприятиях. Для конкретных условий эксплуатации и природно-климатических условий необходимо подбирать соответствующую методику с учетом действующих нормативных ограничений.

1.3.2 Методы определения физико-механических характеристик трубопроводных сталей

Для определения характеристик стали, которые требуются для оценки технического состояния трубопроводных конструкций с последующим прогнозированием их срока работоспособности применяются механические испытания. Данные испытания проводятся с целью выяснения характера поведения металла в определенном напряженном состоянии и предназначены для

получения важной информации о состоянии прочности и пластичности исследуемой стали.

В настоящее время метод твердометрии широко используется для оценки технического состояния объекта контроля. Однако, рассчитываемая погрешность основных механических свойств металла (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и пр.) по известному значению твердости находится в диапазоне 10...30%, что не всегда обеспечивает объективность выводов по результатам технической диагностики [54].

Одним из методов неразрушающего контроля, применяемого для оценки работоспособности материалов эксплуатируемого нефтегазопровода, является разработка, предложенная А.С. Кузьбожевым [5]. При данном методе оценивается изменение свойств металла в динамике в процессе эксплуатации трубопровода, метод позволяет дать прогноз работоспособности. Метод достаточно глубоко проработан, но остается часть вопросов, связанных с его реализацией на практике. Так, к примеру, не выделена связь между параметрами распределения твердости с малой нагрузкой материала трубопровода с его остаточным ресурсом. Данный метод относится к так называемым технологическим пробам и позволяет установить количественные соотношения между результатами замеров микротвердости на поверхности трубы и некоторыми механическими характеристикам металла трубопровода [36].

Существующий стандарт [14] устанавливает два метода испытаний на микротвердость:

- по восстановленному отпечатку (основной метод);
- по невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

При определении микротвердости по восстановленному отпечатку в образец вдавливается алмазный наконечник под действием статической нагрузки в течение определенного времени. После снятия нагрузки производится замер параметров полученного отпечатка и определяется число микротвердости, по формулам, прописанным в [14] в зависимости от формы индентора.

Отличие определения микротвердости по невосстановленному отпечатку от метода замера по восстановленному отпечатку заключается в измерении глубины отпечатка вместо заданных в расчете параметров отпечатка. После снятия нагрузки также производится расчет величины микротвердости по формулам, прописанным в [14].

Алмазные наконечники, используемые при исследовании, могут быть четырех видов: бицилиндрический наконечник; трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника; четырехгранная пирамида с ромбическим основанием; четырехгранная пирамида с квадратным основанием.

Подготовка образцов для испытания на микротвердость является весьма сложным процессом, в частности необходимо избегать нагрева или наклепа поверхности, а также производить зачистку поверхности испытуемого изделия, чтобы шероховатость не превышала значения $R_a=0,32$ мкм.

К недостаткам данного метода можно отнести применение технически сложного оборудования, необходимость изготовления микрошлифа материала на поверхности трубопровода, что трудно осуществить в полевых условиях, а также высокая чувствительность метода к множеству внешних факторов, среди которых: величина нагрузки, время нагружения и выдержки, температура металла.

1.4 Альтернативные методы определения физико-механических характеристик при помощи метода микрообразцов (SPT)

При большинстве прикладных либо практических задач применение микрообразцов при проведении механических испытаний является незаменимым при анализе процессов эксплуатации, экспертизе дефектов либо разрушенных деталей конструкции, когда невозможно получить полноразмерные образцы в соответствии с действующим стандартом. Причинами могут быть небольшие размеры детали, сложная форма, особенные свойства (например, закаленная или упрочненная поверхность).

Другим случаем, когда применение микрообразцов является неизбежным, является ситуация при определении механических свойств таких материалов, которые испытывать на растяжение нецелесообразно из-за их большой хрупкости (например, спечённые твёрдые сплавы), либо из-за малого количества и дефицитности материала.

Использование микрообразцов является оправданным при варианте быстрого поиска области оптимума и небольшом объеме испытываемого материала при значительном начальном количестве вариантов химического состава или режимов термической обработки с последующей проверкой свойств материалов из найденной области на макрообразцах по действующему стандарту.

Необходимость оценки реальных механических свойств конструкционных компонентов путем их прямого измерения привело к разработке современных методов, основанных на испытаниях образцов малого размера. Среди них наиболее перспективным считается тест на вдавливание (Small Punch Test – SPT) [58, 118]. Он может быть использован для получения основных параметров характеристики материала: разрушения, растяжения, ползучести. Основными преимуществами этого метода являются:

- 1) применение в качестве метода неразрушающего контроля, поскольку изготовление образцов из металла эксплуатируемого оборудования не снижает его работоспособности в силу миниатюрности размеров (толщина менее 1 мм);

- 2) проведение испытаний не требует большого количества времени и материальных ресурсов;

- 3) наличие возможности изучать такие объекты, как элементы сварных соединений, детали малых размеров или сложной формы, детали из материалов, которые испытывать на растяжение нецелесообразно из-за их большой хрупкости, разрушенные детали, из которых нельзя вырезать полноразмерные макрообразцы в соответствии с ГОСТ и т.д.

В сравнении с неразрушающими методами контроля, такими как ультразвуковая, магнитная и рентгенографическая дефектоскопия, SPT является методом прямых измерений, что позволяет получать информацию

о непосредственно механических свойствах материала, в то время как другие методы основаны на оценке косвенных показателей.

Суть метода состоит во вдавливании индентора в образцы небольшого размера вплоть до их разрушения. В процессе идет контроль величин напряжения и перемещения индентора. В результате получают диаграмму, представленную на рисунке 1.6.

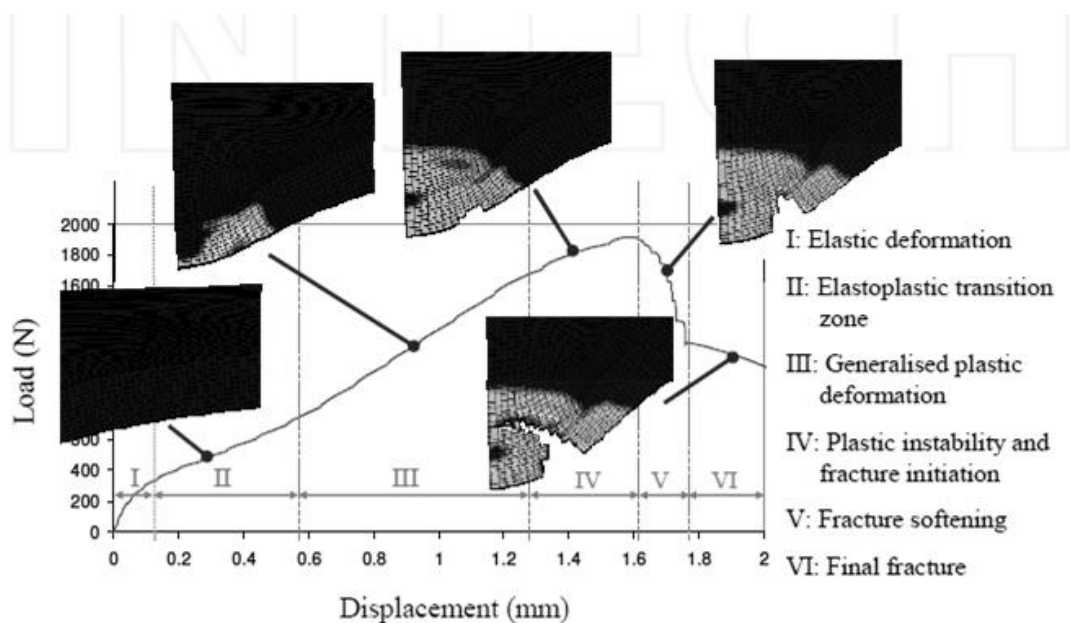


Рисунок 1.6 – Диаграмма «Усилие-перемещение» для SPT и конечно-элементное моделирование каждой зоны

Для малоуглеродистой стали на диаграмме можно выделить 6 характерных зон:

- I – упругая деформация,
- II – упругопластический переход,
- III – основная пластическая деформация,
- IV – пластическая нестабильность и начало разрушения,
- V – рост трещины,
- VI – полное разрушение.

Зоны I и II соответствуют состоянию деформации изгиба. Зона I соответствует упругому изгибу и включает линейную часть кривой, в то время как зона II соответствует пластической гибке. Эти зоны кривой определяются

упруго-пластическими свойствами материала (модуль упругости, предел текучести и коэффициента упрочнения материала). С определенного момента и далее изгиб переходит к мембранному режиму, который преобладает в большинстве кривой и соответствует зоне III. Этот этап заканчивается с началом разрушения образца. В кривой, представленной на рисунок 1.6, окончательный перелом происходит в результате формирования «шейки», механизм образования которой аналогичен механизму образования «шейки» в стандартных испытаниях на растяжения. Развитие напряжений в этой зоне приводит к образованию трещины.

Разрушению образца соответствуют зоны IV и V, которые включает в себя точка максимальной нагрузки. В дополнение к механическим свойствам материала, это точка зависит от коэффициента трения между индентором и образцом. Чем выше коэффициент трения, тем большую нагрузку необходимо приложить для разрушения образца.

Этот вид испытаний был впервые применен в начале восьмидесятых годов в США и Японии [90, 108] для исследования ползучести в высокотемпературных сплавах, используемых в ядерных энергетических установках.

В настоящее время исследование SPT проводится по двум направлениям: зависимое от времени, например, исследование ползучести при разных температурах, отличающихся от комнатной, и независимое от времени, в котором исследования проводятся при комнатной температуре для определения корреляции со стандартными характеристиками материала.

При исследовании стальных материалов SPT также используется для определения температуры полухрупкости [94].

Методика применима там, где есть необходимость изучения деталей, размер которых значительно меньше размеров образцов для стандартных испытаний. Тепловое покрытие барьера турбинных лопаток является хорошим примером, т.к. их толщина составляет 0,1 – 0,25 мм. В исследовании [112] используются образцы 3 мм в диаметре и 0,1 – 0,5 мм в толщину.

Существует мнение, что толщина диска не имеет значения, но в [122] было подробно рассмотрено влияние размера диска на результат эксперимента. Исследование показало, что величина прогиба остается такой же, но при этом с увеличением толщины образца, увеличивается вдавливающая сила. В [100] отмечается, что пропорция «диаметр диска/толщина» должна быть меньше 60. В других случаях у образцов были выявлены признаки локальной деформации, которые являются неприемлемыми. Также, при соотношении «диаметр диска/толщина» больше 60, результат был недостаточно повторяем из-за возникающей пластической нестабильности.

В других работах для исследования металлических материалов использовались диски диаметром 8 мм и толщиной 0,5 мм [91, 96], а для исследования ультра высокомолекулярного полиэтилена – диски диаметром 6,4 мм и толщиной 0,5 мм [89]. Небольшой размер образцов позволяет сравнивать результаты метода с другими методами неразрушающих испытаний.

Использование этого метода было ускорено разработкой пробоотборных устройств для получения и извлечения образцов материала для анализа. На базе технического консенсуса, в котором приняли участие 32 организации (без географических ограничений), в декабре 2007 года был разработан стандарт CWA 15627 «Small Punch Test Method for Metallic Materials».

Он состоит из двух частей, часть A: «A Code of Practice for Small Punch Creep Testing», и часть B: «A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour», а также из двух приложений (приложение B1: «Derivation of tensile and Fracture material properties» описывает методы оценки текучести и прочности, критической температуры хрупкости и трещиностойкости металлических материалов по данным, полученным в ходе SPT, приложение B2 «Guidance on Relevant Technological Issues: specimens sampling from components» описывает возможности применения SPT; рекомендации по пробоотбору и предварительное руководство по использованию данных SPT).

SPT служит тестом для оценки различных свойств материалов (предел текучести, предел прочности, изменение критической температуры хрупкости

и т.п.) с использованием известных корреляций между значениями свойств материалов, полученными при традиционных испытаниях и специфическими величинами SPT [63].

При применении метода SPT, важной задачей считается постепенное уточнение корреляций. К тому же, при помощи фрактографического анализа можно определить микромеханизмы разрушения материала. Кроме того, с помощью фрактографического анализа возможно определять микромеханизмы разрушения материала. Впоследствии, несколько авторов [95, 105, 115, 120] пытались получить параметры трещиноватости (K_{Ic} , энергия разрушения), используя тот же тип образцов. Однако, несмотря на некоторые многообещающие результаты, до сих пор нет экспериментальных процедур, способных методом SPT установить параметры трещиностойкости пластичных металлических материалов.

Есть два существенно различных подхода к оценке прочности и пластичности материала при помощи SPT [99]:

- 1) вывод эмпирических соотношений между результатами, полученными при стандартных испытаниях и результатами, полученными методом SPT;
- 2) аналитические разъяснения результатов SPT.

Эти два подхода являются современными методами определения величин предела вязкости разрушения, предела прочности и предела текучести. Широкий диапазон соотношения результатов SPT с определением вязкости разрушения был предложен в высокопрочной области [93, 97, 98, 121, 122, 110] и в хрупкой области [121]. Корреляции между SPT и испытаниями на растяжение предлагается, например, в работах [101, 102, 104, 106, 116].

Недостатком SPT является способ приложения нагрузки, который является не одноосным, как в случае испытаний на растяжение, что и обуславливает отсутствие прямой связи между испытаниями на растяжение и SPT. Поэтому соотношение данных испытаний SPT с данными, полученными в ходе испытаний на растяжение, обычно проводится на основе эмпирически установленных корреляционных соотношений [103].

1.5 Выводы по Главе 1

1. Проведен обзор состояния трубопроводной системы нефтегазовой отрасли и анализ условий эксплуатации трубопроводов, показано, что в результате воздействия технологических повреждающих факторов – механических нагрузок, внутреннего давления, вибрационных нагрузок и агрессивной среды происходит ухудшение эксплуатационных свойств трубопроводных сталей.

2. Рассмотрены новые методы проведения испытаний, которые позволяют оценить динамику изменений физико-механических характеристик сталей, используемых для оценки работоспособности нефтегазового оборудования и трубопроводов.

3. Показана необходимость развития альтернативных методов испытаний, которые позволят оперативно получать реальные характеристики трубных сталей в условиях эксплуатации.

Чаще всего, для того, чтобы оценить техническое состояние эксплуатируемых объектов, необходимы данные о механических свойствах материала. Получить данную информацию можно с использованием разрушающих методов, которые не всегда применимы на работающем объекте, так как метод требует получения образцов путем их вырезания и дальнейшего ремонта сварочным способом. Поэтому, методы экспресс-оценки механических свойств металла, проведенные безобразцовым методом, являются актуальными.

Для обеспечения безаварийной работы газонефтепроводов, учитывая значительный материальный и социальный ущерб при возможном возникновении техногенных аварий, целью данной работы является разработка метода оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов на основе испытаний микрообразцов.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) Выполнить аналитический обзор состояния нефтегазопроводов, существующих методов оценки их технического состояния и остаточного ресурса;
- 2) Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния микрообъектов для оценки динамики прочностных характеристик трубопроводных сталей;
- 3) Выполнить экспериментальные исследования по оценке физико-механических характеристик трубопроводных металла стенки трубопровода в соответствии с математической моделью, обосновать экспериментальный критерий, характеризующий остаточную прочность стенки трубопровода;
- 4) Разработать методику оценки остаточного ресурса трубопровода по критерию остаточной прочности (поврежденности).

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРООБРАЗЦОВ ПРИ ИХ ИСПЫТАНИЯХ

Для оценки физико-механических свойств путем испытания стальных образцов (в том числе и для трубопроводных сталей), как правило, применяется предварительное математическое моделирование конечно-элементными методами. Математическое моделирование позволяет виртуально реализовать условия проведения механических испытаний, установить уровень механических нагрузок, оценить напряженно-деформированное состояние металла и получить представление о параметрах оборудования, которое может быть применено для проведения реальных механических испытаний стальных образцов стандартными методами, так и альтернативными методами испытаний микрообразцов (SPT).

Моделирование напряженно-деформированного состояния микрообразцов при испытаниях методом SPT позволяет рассчитать и визуализировать основные процессы, происходящие в испытуемом металле и определить его основные предельные прочностные показатели. Наиболее целесообразно решение данной задачи осуществлять при помощи моделирования контактной деформации микрообразца (плоского металлического диска) специальным инструментом – «индентором» в программном комплексе SIMULIA Abaqus (студенческая версия 6.14) на основе справочных данных и результатов предварительно выполненных экспериментов.

2.1 Разработка математической модели проведения механических испытаний микрообразцов

Оценка физико-механических свойств стали проводилась с помощью конечно-элементной математической модели, которая после виртуального предварительного эксперимента позволила бы определить определенные прочностные показатели. После соответствующей обработки этих сведений,

можно было бы получить численные значения, которые будут характеристикой технического состояния трубопроводных элементов и конструкций в части обеспечения прочности и устойчивости при эксплуатации. На рисунке 2.1 приведена иллюстрация постановки эксперимента.

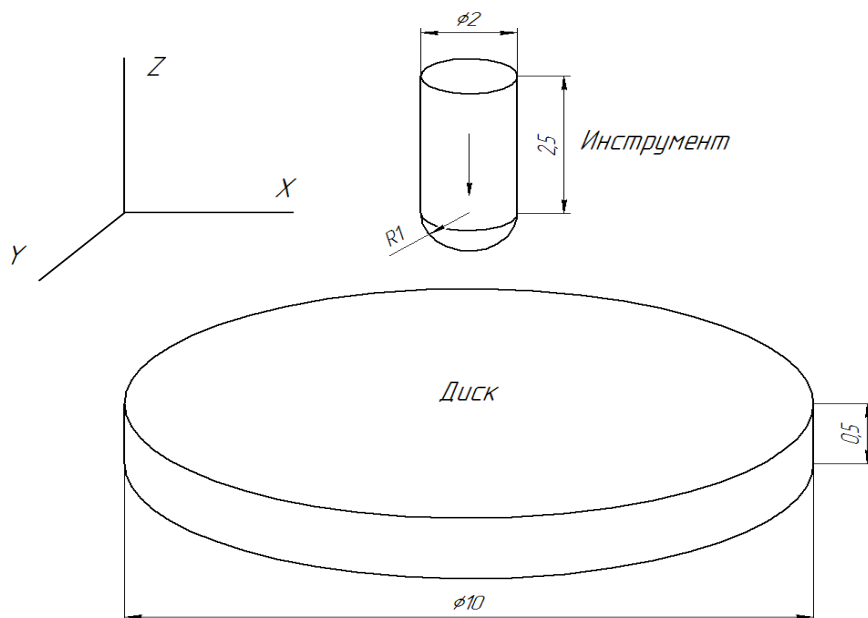


Рисунок 2.1 – Иллюстрация виртуального эксперимента и математического моделирования

Как модельный экспериментальный материал, была выбрана сталь марки СТЗ, поскольку основные механические свойства, химический состав и структура данной марки стали очень хорошо изучены и данная марка стали используется при строительстве нефтегазовых трубопроводов. Химический состав и основные свойства [103] стали СТЗ представлены в Приложении А таблица А.1.

Кроме того, в справочной литературе и научно-технических изданиях содержится большое количество информации, необходимой для оценки адекватности полученных результатов при моделировании и сравнении их с результатами других исследователей.

Сталь марки СТЗ представляет собой углеродистую сталь обыкновенного качества, предназначенную для изготовления горячекатаного сортового, фасонного, толстолистного, тонколистового и других видов проката, а также труб, поковок и штамповок и т.д. [103]

Математическая модель строится в декартовой (прямоугольной) системе координат с набором вводимых числовых параметров, соответствующих системе СИ. Построение геометрии индентора и микрообразца представлено на рисунке 2.2.

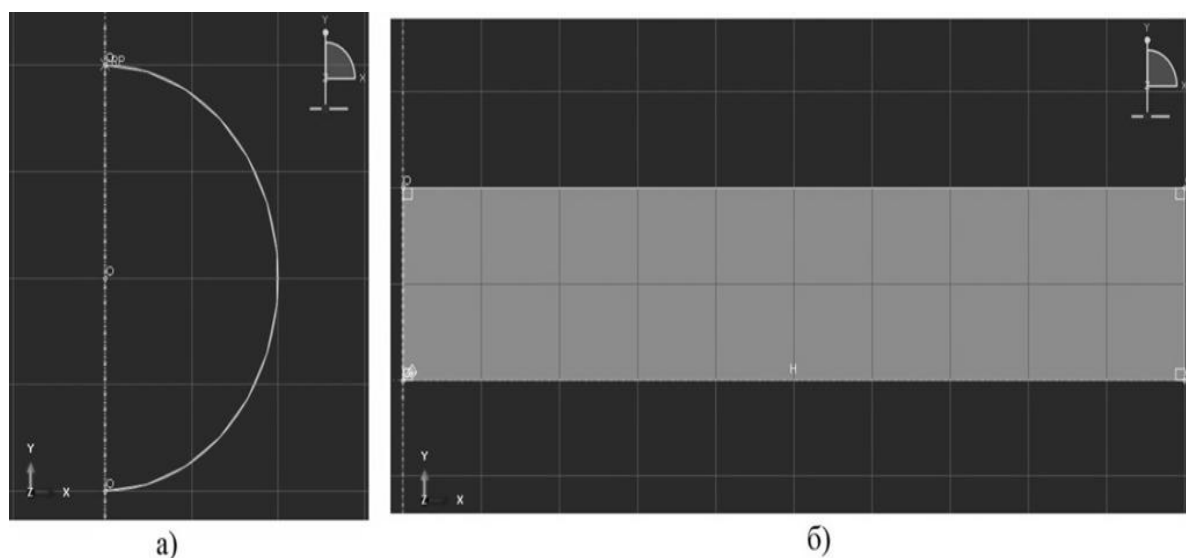


Рисунок 2.2 – Построение геометрической модели индентора (а) и микрообразца (б)

Для решения поставленной задачи, так как форма моделируемых объектов является цилиндрической, была выбрана осесимметричная постановка. Индентор смоделирован в виде абсолютно твердого тела, поскольку инструментальная углеродистая сталь У8, из которой он сделан, была подвергнута закалке и высокому отпуску, соответственно она по своим основным механическим характеристикам на порядок превышает показатели низкоуглеродистых сталей ($\sigma_{0,2} = 1230$ МПа; $\sigma_b = 1420$ МПа). Применяемая в построении модели осевая симметричность позволяет получить плотную сетку элементов, которая обеспечивает высокую степень достоверности решения.

Для создания математической модели необходимо задать свойства исследуемой стали СТЗ в виде координат точек диаграммы растяжения стали, полученной при стандартных испытаниях, соответствующих ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [11]. Эскиз стандартного образца представлен на рисунке 2.3.

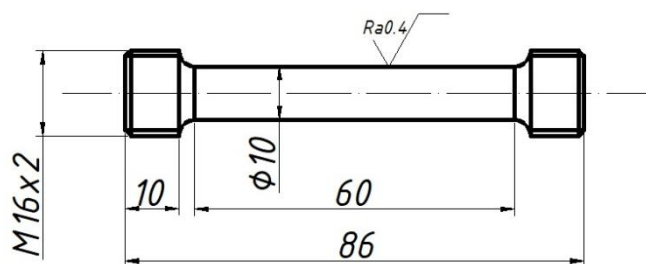


Рисунок 2.3 – Эскиз «стандартного образца из стали СТЗ для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84» [85].

Лабораторные испытания проводились в такой последовательности: образец закручивался в держатели испытательной машины, потом плавно и равномерно увеличивали растягивающую нагрузку до появления деформаций и последующего образования «шейки» в образце вплоть до момента последующего разрушения (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Разрушенные в ходе испытаний на растяжение образцы стали СТЗ

Для этого были проведены испытания на растяжение образцов стали СТЗ в машине Zwick/RoellZ100 (рисунок 2.5) [88]. Основные характеристики испытательной машины приведены в Приложении Б (таблица Б.1).

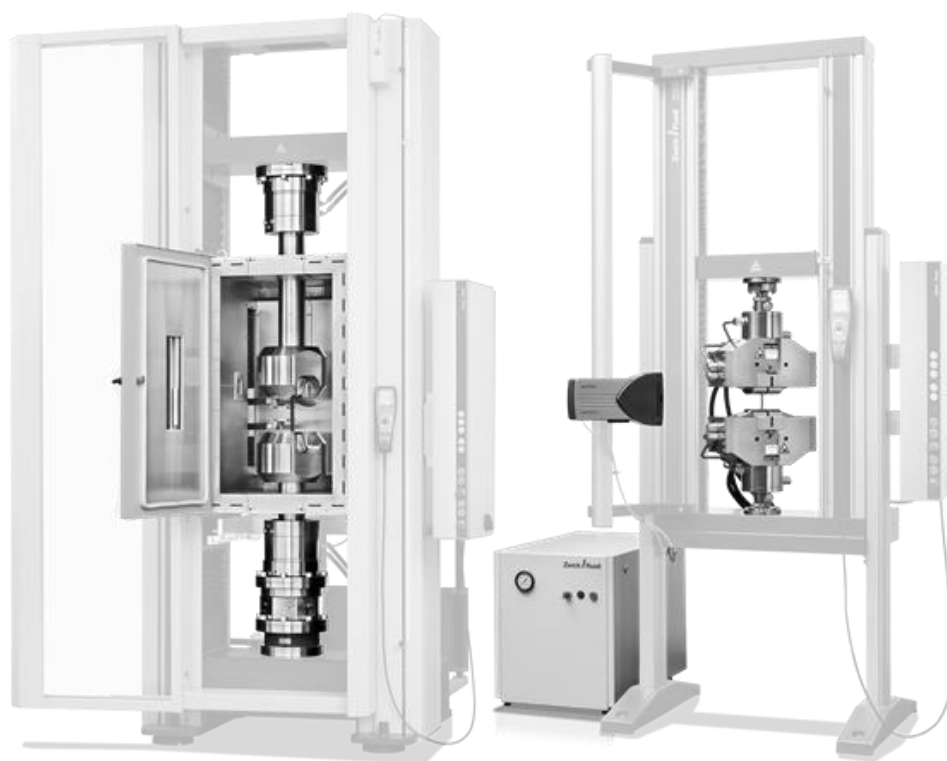


Рисунок 2.5 – Внешний вид машины Zwick/Roell Z100

При помощи программного обеспечения testXpert II (на платформе Windows) фиксируется диаграмма «Усилие – деформация», как показано на рисунке 2.6. Для того, чтобы минимизировать случайные ошибки лабораторных измерений в стандартных условиях, на растяжение были испытаны 3 образца. После получения численных значений испытания, по ним вычислялось среднее арифметическое значение с нанесением на график. Полученная таким образом усредненная диаграмма в координатах «Усилие-деформация» $\sigma(\varepsilon)$ после испытания трех образцов приведена на рисунке 2.7.

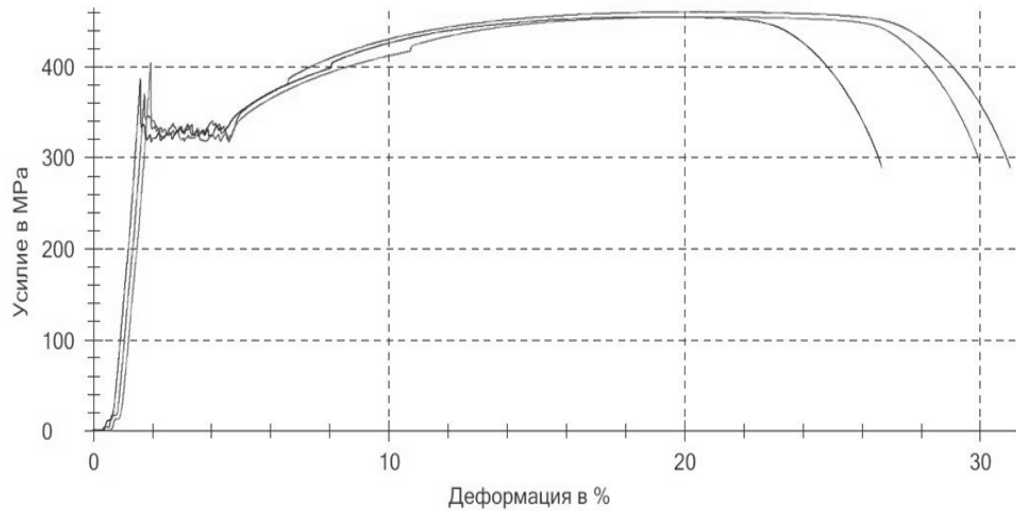


Рисунок 2.6 – Диаграмма «Усилие-деформация» для стали СТЗ

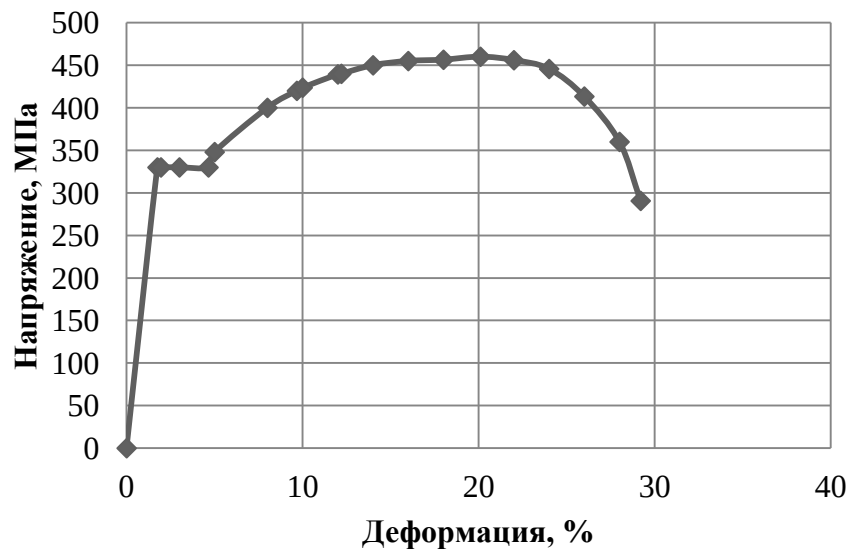


Рисунок 2.7 – Усредненная экспериментальная диаграмма растяжения стали СТЗ, полученная по испытаниям трех образцов.

Полученные расчетные характеристики стали марки СТЗ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики стали СТЗ, полученные в лабораторных условиях

E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
190	332,7	456,7	29,2

Полученные экспериментальным методом свойства материала – сталь марки СТЗ в программном комплексе задаются следующим образом: «...плотность стали = 7800 кг/м³; модуль Юнга = 34200 МПа, коэффициент Пуассона = 0,3» [76].

Представление пластических деформаций осуществлялось в соответствии разработанным в работе подходом [76] через номинальные значения напряжения и удлинения по формулам (2.1) – (2.3):

$$\varepsilon^t = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(\varepsilon_{nom} + 1), \quad (2.1)$$

$$\sigma^{true} = \sigma_{nom} \cdot \left(\frac{l}{l_0}\right) = \sigma_{nom} \cdot (\varepsilon_{nom} + 1), \quad (2.2)$$

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma^{true}}{E}. \quad (2.3)$$

Результаты расчетов в области нелинейности деформаций по приведенным выше формулам сведены в таблицу 2.2. Условные обозначения в формулах (2.1) – (2.3) и в таблице 2.2 являются полностью идентичными:

- 1) обозначение напряжений и деформаций соответственно – σ и ε ;
- 2) номинальные и истинные величины имеют индексные обозначения «nom» и «true»;
- 3) значения общих и пластических деформаций обозначены символами «t» и «pl».

Соответственно, символ «E» обозначает модуль упругости для углеродистой стали независимо от дифференциации по маркам, что является негрубым допущением.

Расчетная модель в программном комплексе SIMULIA Abaqus была реализована посредством введения следующих исходных данных и условий:

- расположение индентора на одной оси с микрообразцом с взаимозависимым перемещением в пространстве – «Instance type – depend»;
- тип контакта между индентором и микрообразцом – «Surface to surface»;

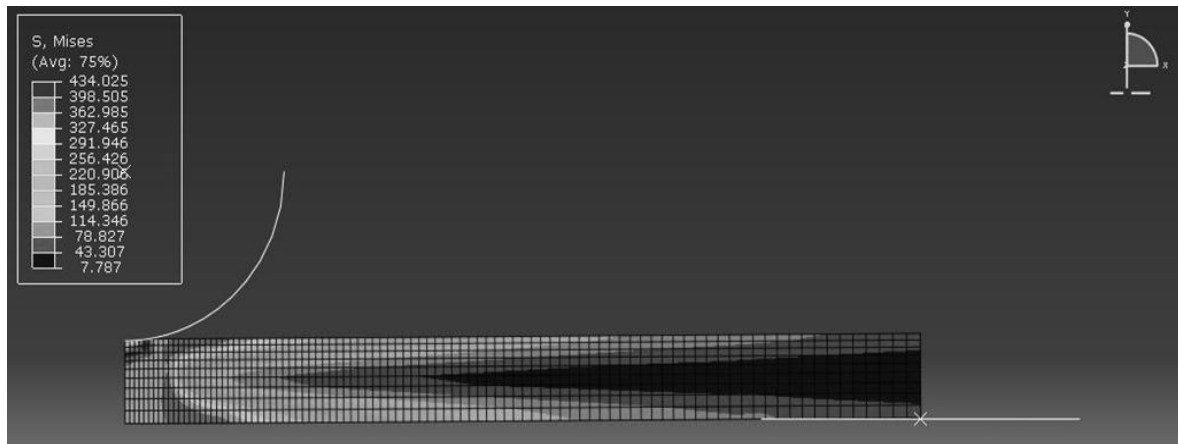
- коэффициент трения – 0,3;
- время действия индентора на микрообразец – 3 секунды.

Таблица 2.2 - Значения, используемые для моделирования нелинейности материала образца

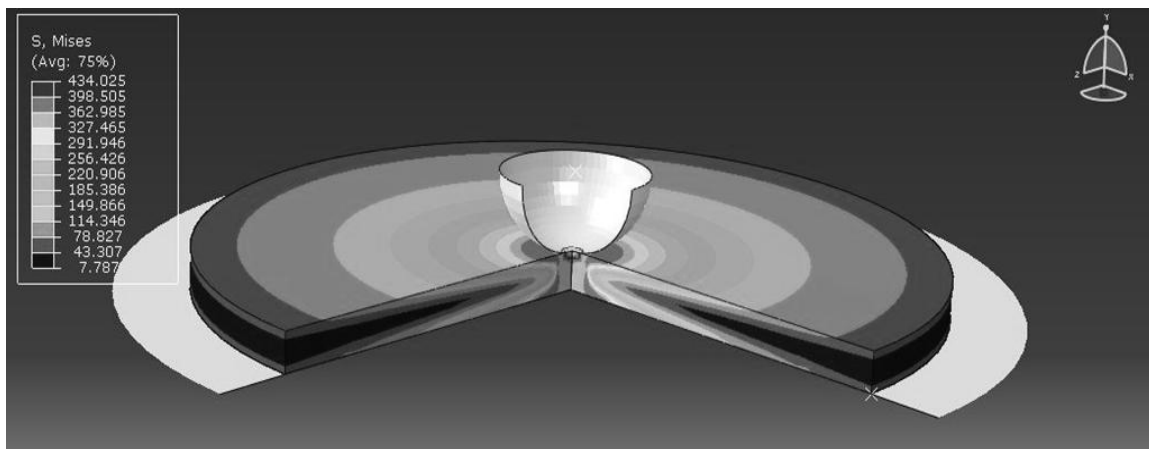
Номинальное напряжение σ_{nom}	Номинальное удлинение ε_{nom}	Истинное напряжение σ^{true}	Истинное общее удлинение ε^t	Истинное пластическое удлинение ε^{pl}
330	0,012	334	0,012	0
330	0,041	343	0,041	0,028
348	0,045	363	0,044	0,031
400	0,075	430	0,072	0,056
420	0,092	458	0,088	0,071
440	0,117	491	0,111	0,092
450	0,135	510	0,127	0,108
455	0,155	525	0,144	0,125
460	0,196	550	0,178	0,158
456	0,215	554	0,195	0,174
445	0,235	550	0,211	0,191
413	0,255	518	0,227	0,203
360	0,275	459	0,243	0,226
290	0,287	374	0,252	0,238

Реализация расчетной модели в ABAQUS показана на рисунке 2.8. При создании конечно элементной модели использовались элементы с сокращенной интеграцией CAX4R, чтобы предотвратить эффекты, часто возникающие из-за жесткого сдвига и кручения при моделировании контактной деформации. В качестве решателя выбран «Abaqus/Explicit».

Как видно из рисунка 2.8, при перемещении индентора на 0,2 мм максимальные напряжения в модели достигают 434 МПа.



а)

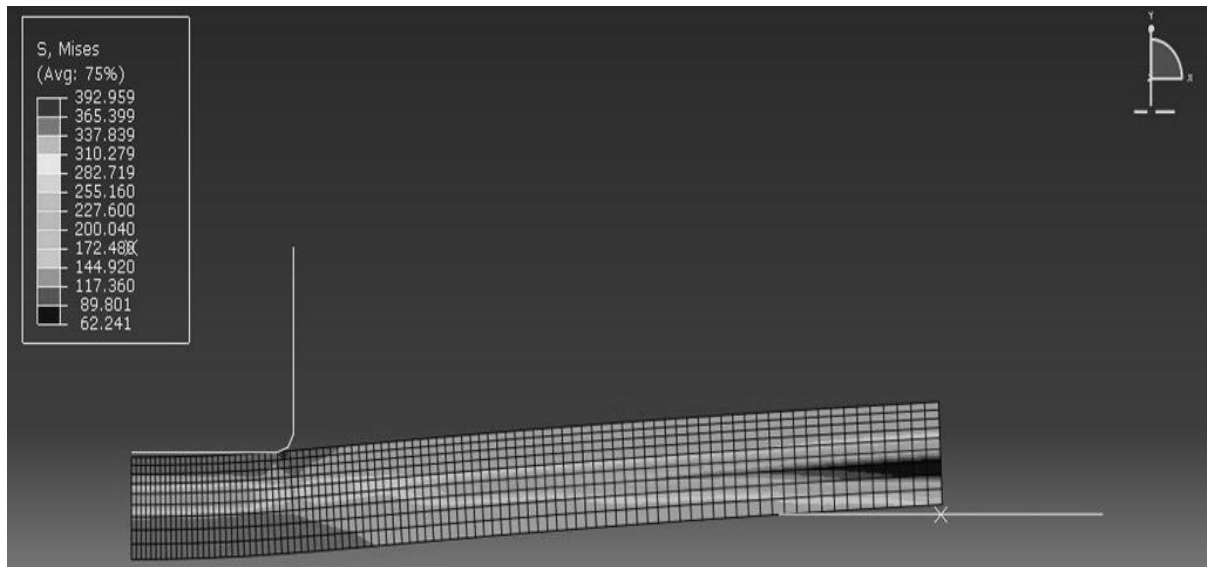


б)

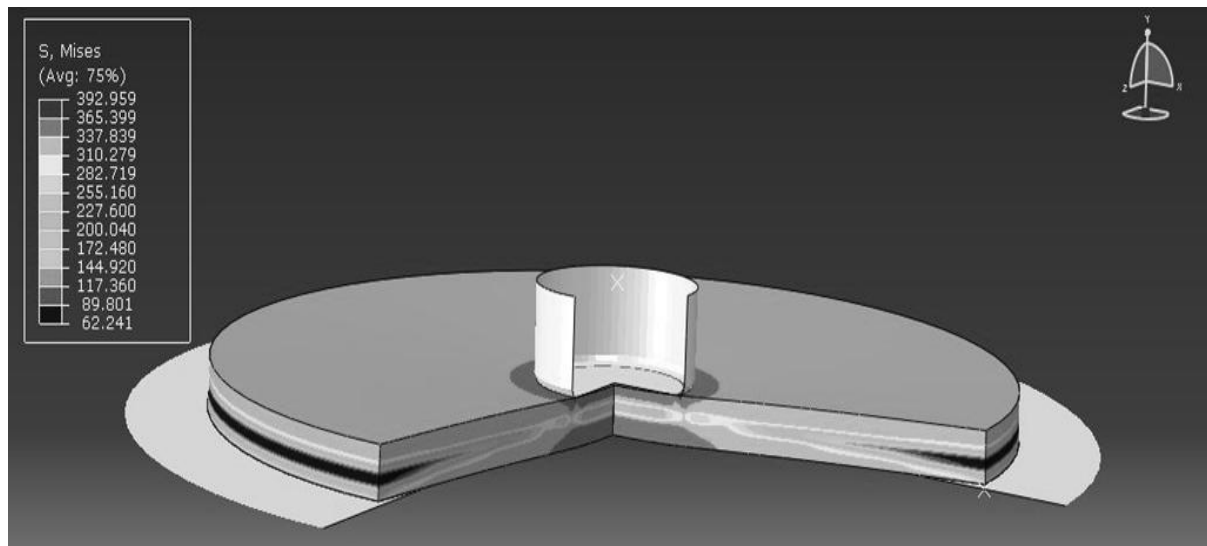
Рисунок 2.8 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при проведении испытаний микрообразцов методом SPT в осесимметричной постановке со сферическим индентором:

а) в осесимметричной постановке; б) в развертке

Также был смоделирован индентор с цилиндрическим наконечником (рисунок 2.9). В этом случае при перемещении индентора на 0,2 мм максимальное напряжение составило 390 МПа. В данной связи, поскольку расхождение в значениях напряжений по Мизесу незначительное (менее 10 %), при выполнении испытаний микрообразцов применялись инструменты как со сферическим, так и цилиндрическим наконечником. В данном случае результаты моделирования с цилиндрическим наконечником позволили получить результаты, наиболее близкие к экспериментальным значениям эквивалентных напряжений.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при проведении испытаний микрообразцов методом SPT в осесимметричной постановке с цилиндрическим индентором:
а) в осесимметричной постановке; б) в развертке

После введения полученных данных по упругопластическим свойствам, был построен график зависимости усилия на инденторе (R) от перемещения индентора (u). На рисунке 2.10 представлен график для стали СТЗ.

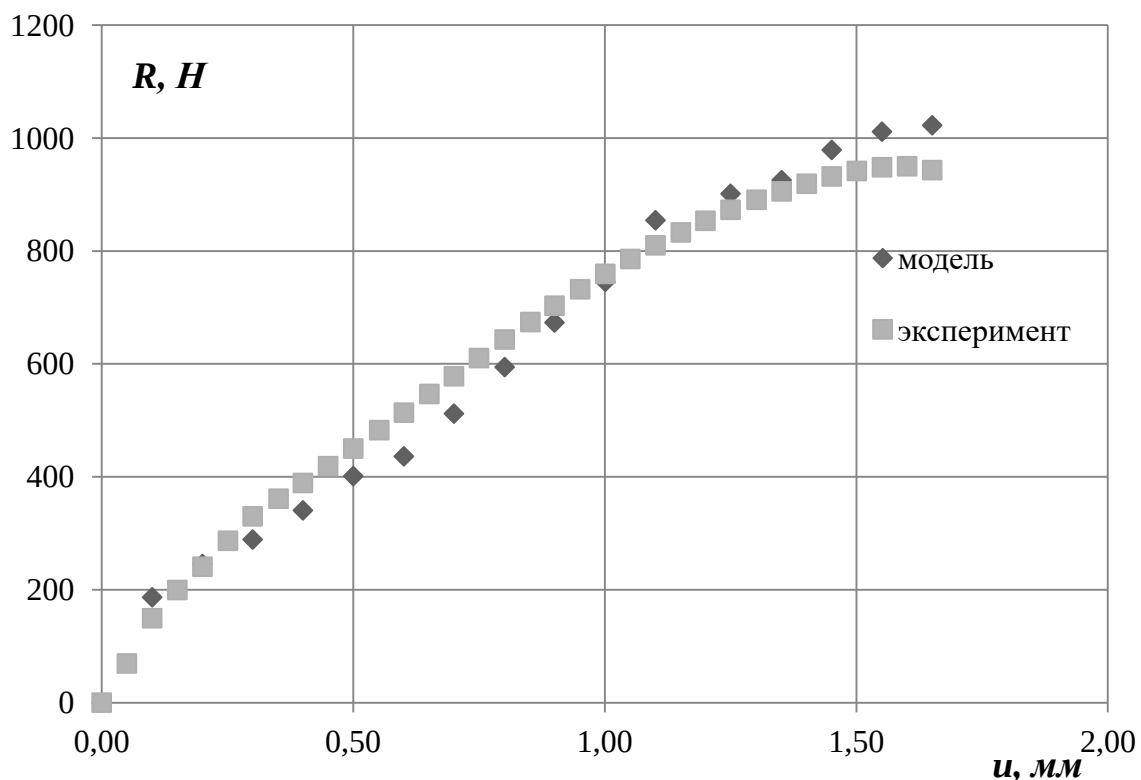


Рисунок 2.10 – Характеристика напряженно-деформированного состояния микрообразца из стали марки СТЗв координатах «Сила – перемещение»

Для оценки погрешности разработанной математической модели проводились экспериментальные испытания путем вдавливания индентора из стали У8 в микрообразцы из стали марки СТЗ (серия из трех образцов диаметром 5,0 мм и толщиной 0,5 мм) с усреднением результатов. Численные показатели измеряемых параметров приведены в таблице 2.3, графическая зависимость приведена на рисунке 2.10.

Как видно из рисунка 2.10, картина распределения усилий удовлетворительно согласуется с диаграммами, полученными при проведении теста на вдавливание микрообразца толщиной 0,5 мм и диаметром 5 мм.

Таблица 2.3 – Сравнение результатов моделирования и лабораторных испытаний микрообразцов

Перемещение, мм	Сила, Н		Относительная погрешность, %
	математическая модель	испытание микрообразцов	
0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	82.555	69.40	18.95
0.10	186.565	149.51	24.79
0.15	220.002	199.49	10.28
0.20	245.556	240.69	2.02
0.25	275.001	286.65	4.06
0.30	288.889	329.96	12.45
0.35	315.325	361.14	12.69
0.40	340.477	389.03	12.48
0.45	362.823	418.76	13.36
0.50	401.172	449.90	10.83
0.55	431.314	482.50	10.61
0.60	436.196	513.50	15.05
0.65	475.964	546.64	12.93
0.70	511.829	578.01	11.45
0.75	555.555	610.22	8.96
0.80	594.198	643.08	7.60
0.85	625.123	674.06	7.26
0.90	673.126	702.96	4.24
0.95	702.001	732.08	4.11
1.00	745.251	759.31	1.85
1.05	805.333	785.66	2.50
1.10	854.246	809.88	5.48
1.15	875.554	832.78	5.14
1.20	890.444	853.35	4.35
1.25	901.111	872.85	3.24
1.30	915.512	890.54	2.80
1.35	925.256	905.43	2.19
1.40	951.154	918.92	3.51
1.45	978.821	931.84	5.04
1.50	989.001	941.57	5.04
1.55	1011.123	948.15	6.64
1.60	1016.887	949.90	7.05
1.65	1022.456	943.03	8.42

Таким образом, математическая модель механических испытаний стального микрообразца с достаточной степенью точности соответствует диаграмме напряженно-деформированного состояния, полученного SPT методом.

2.2 Разработка методики проведения лабораторных механических испытаний микрообразцов

Для осуществления экспериментальных исследований была разработана соответствующая методика проведения механических испытаний микрообразцов.

Для реализации методики проводилось определение оптимальных параметров стальных плоских микрообразцов с применением элементов планирования эксперимента (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Варьируемые геометрические параметры микрообразцов, используемые при планировании эксперимента

Наименование показателя	Обозначение, единица измерения	Уровни варьирования, численные значения
Образец: диаметр	D , мм	5,0; 10,0; 20,0
толщина	h , мм	0,5; 1,0; 1,5
Подкладное кольцо: диаметр	a , мм	4,5; 9,0; 18,0

Для отработки условий проведения эксперимента проводились предварительные испытания микрообразцов. Результаты экспериментов приведены в Приложении В. Испытания проводились при комнатной температуре. В ходе испытаний было деформировано 27 образцов, по 3 каждого размера. После предварительных экспериментов проводился комплекс основных испытаний.

Алгоритм проведения испытаний состоял в следующем. Вначале устанавливалось подкладное кольцо в машину, затем индентор крепился при помощи резьбы, после чего испытуемый образец помещался на подкладное кольцо (данные элементы показаны на рисунок 2.11, а). Далее проводилось вдавливание образца индентором внутрь кольца со скоростью 0,2 мм/мин вплоть

до разрушения испытуемого образца. Изображения полученных таким образом образцов, после завершения теста, представлены на рисунке 2.11, б. Частота дискретизации данных в ходе эксперимента составила 20 измерений в секунду. Кроме того, тест завершался, когда нагрузка снижалась на 50% от максимальной нагрузки. Испытательная машина измеряла перемещение индентора в миллиметрах и приложенное усилие в ньютонах. По результатам измерений этих характеристик строилась кривая нагружения, которая соответственно представляет собой результат испытаний методом SPT.

Эксперимент проводился на универсальной машине Zwick/Roell Z100 на базе кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета. Внешний вид образцов до и после испытаний приведен на рисунке 2.11.

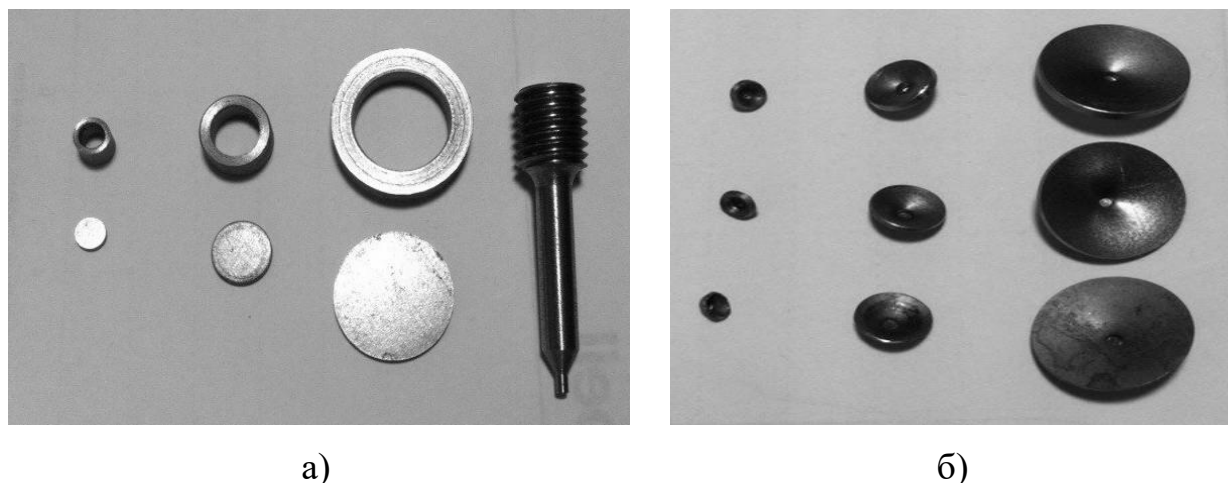


Рисунок 2.11 – Внешний вид образцов: а) исходное состояние;
б) после проведения механических испытаний

Материал подкладных колец и индентора – сталь У8.

Диаметр индентора 2,0 мм, радиус активной части $R_1=0,1$ мм. Материал микрообразцов – сталь СТЗ. Образцы свободно лежат без закрепления на подкладных кольцах. Результаты испытаний приведены в таблице 2.5.

На графиках были выделены 2 характерные точки: точка E , соответствующая состоянию перехода от линейности к распространению пластической зоны по толщине образца, и точка M , соответствующая максимальной нагрузке, зафиксированной во время теста (рисунок 2.12).

Таблица 2.5 - Значения контролируемых экспериментальных параметров

Размеры образцов		Координаты точки E		Координаты точки M	
d , мм	h , мм	F_e , Н	d_e , мм	F_m , Н	d_m , мм
5,0	0,5	200	0,15	950	1,60
5,0	1,0	585	0,30	1450	1,65
5,0	1,5	1545	0,45	2543	1,85
10,0	0,5	102	0,15	967	2,12
10,0	1,0	362	0,20	1296	2,20
10,0	1,5	917	0,25	2214	2,65
20,0	0,5	84	0,20	1140	2,60
20,0	1,0	255	0,20	1300	2,90
20,0	1,5	785	0,25	2050	3,10

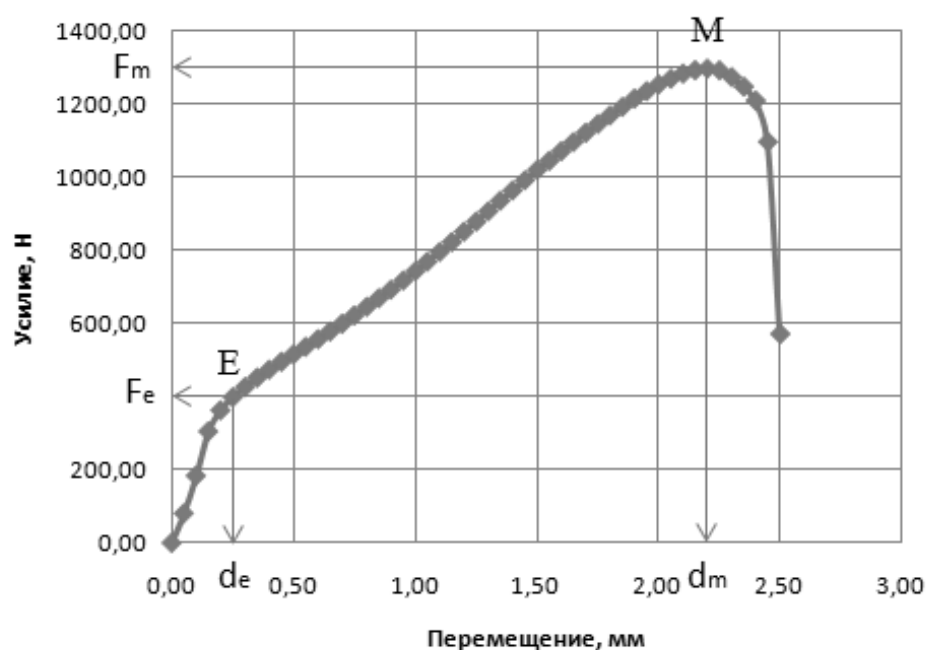


Рисунок 2.12 – Пример диаграммы испытания микрообразцов
«Усилие-перемещение»

Обработанные графики, полученные в ходе испытаний, представлены на рисунках 2.13 – 2.18. Разброс результатов удовлетворительный (погрешность менее 10%), минимальные значения погрешности наблюдались при толщине образца 1 мм.

Проецируя эти точки на оси усилий и перемещений, получим следующие

величины: F_e – нагрузка, характеризующая переход от линейности к состоянию распространения пластической зоны по толщине образца; d_e – перемещение индентора, соответствующее нагрузке F_e ; F_m – максимальная нагрузка, зафиксированная во время теста; d_m – перемещение индентора, соответствующее максимальной нагрузке F_m .

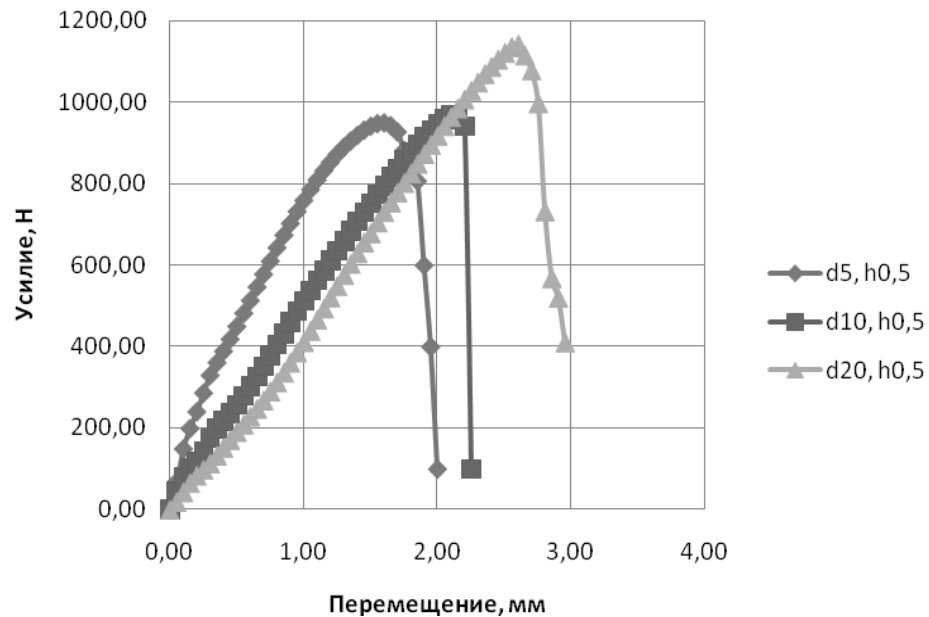


Рисунок 2.13 – Результаты испытаний для образцов различных диаметров толщиной 0,5 мм

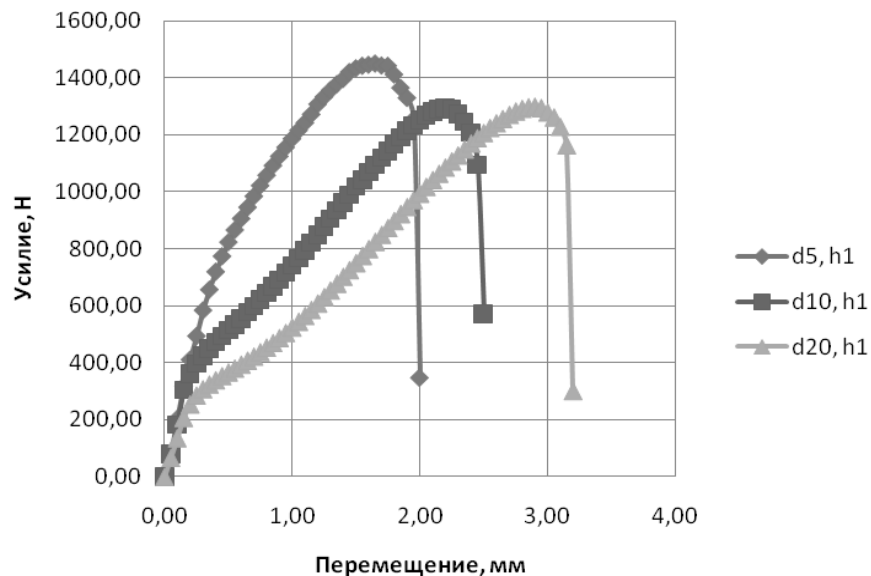


Рисунок 2.14 – Результаты испытаний для образцов различных диаметров толщиной 1 мм

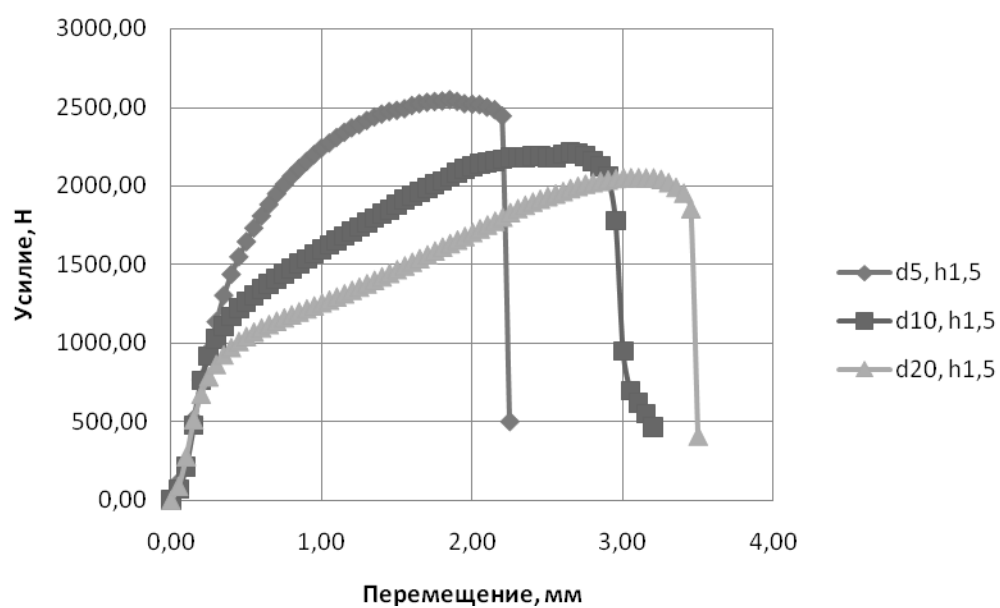


Рисунок 2.15 – Результаты испытаний для образцов различных диаметров
толщиной 1,5 мм

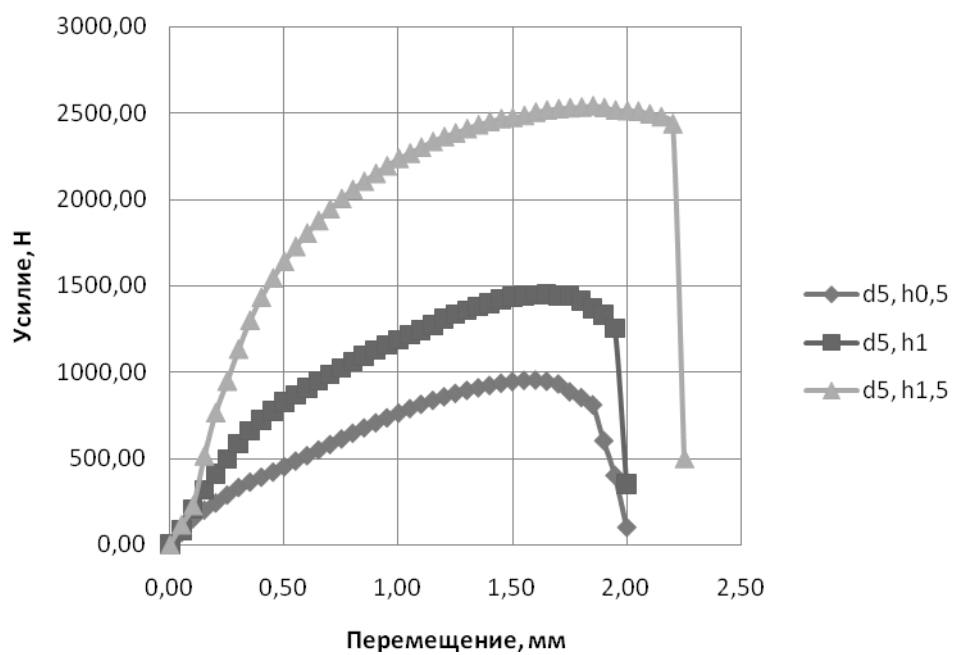


Рисунок 2.16 – Результаты испытаний для образцов различных толщин диаметром
5 мм

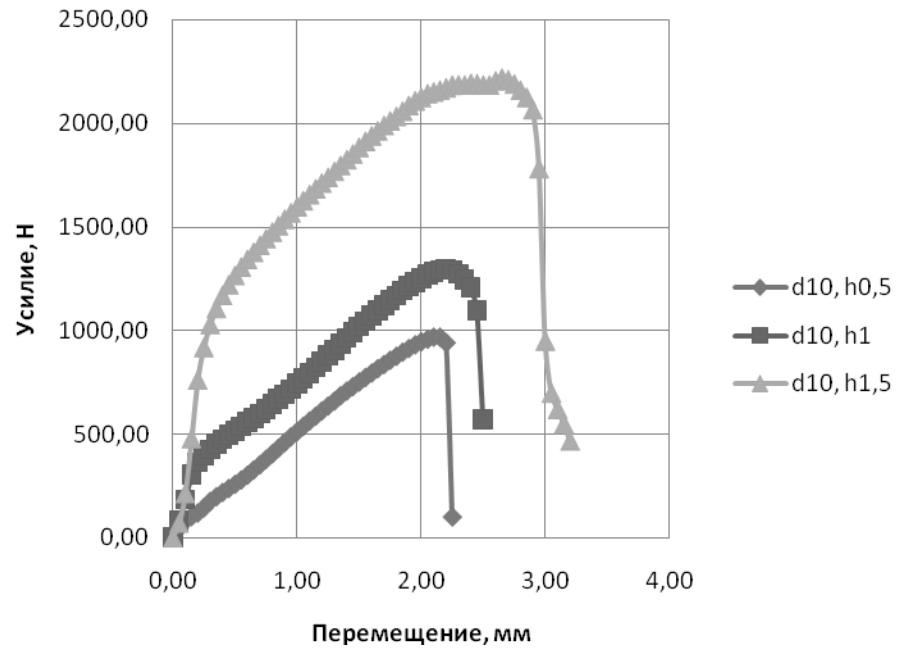


Рисунок 2.17 – Результаты испытаний для образцов различных толщин диаметром 10 мм

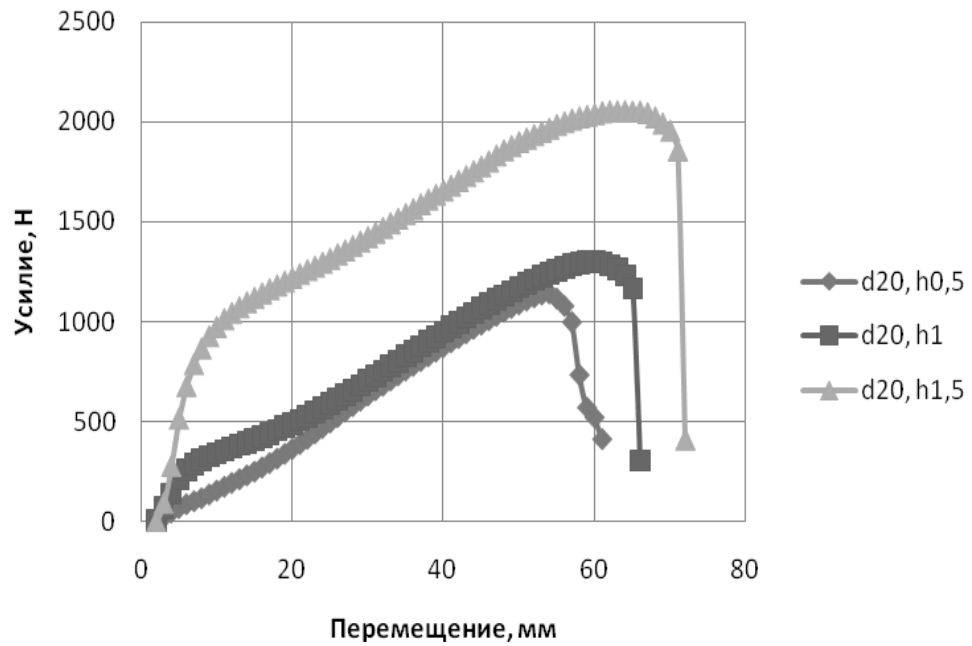


Рисунок 2.18 – Результаты испытаний для образцов диаметром 20 мм

По полученным данным, можно сделать вывод, что увеличение диаметра ведет к увеличению максимальной нагрузки, зафиксированной во время теста

(F_m), в то время как увеличение толщины – к увеличению перемещения индентора, соответствующего максимальной нагрузке (d_m) или величины прогиба.

2.3 Проверка адекватности математической модели и лабораторной методики с применением микрообразцов из стали марки 10

Для проверки адекватности математической модели она была проверена на материале, имеющем схожие механические характеристики – углеродистая сталь 10. Основные механические свойства и внутренняя структура данного материала в настоящее время подробно изучены, поэтому проведение оценки созданной модели по существующим справочным и экспериментальным данным на базе данной трубопроводной стали будет корректным. Моделирование проводилось аналогично стали марки СТЗ. Данные по пластичности представлены в таблице 2.6. Полученные значения соответствуют заявленным в ГОСТ 10705-80 «Трубы стальные электросварные. Технические условия» [10], поэтому испытываемую сталь можно отнести к категории трубопроводных сталей. Таблица 2.6 – Параметры пластичности стали 10, полученные при проведении стандартных испытаний на растяжение

Координаты точек участка пластической деформации		
Номер точки	σ , МПа;	δ , %
1	204,3	2,12
2	227,1	2,72
3	244,4	3,36
4	263,7	4,16
5	286,5	5,12
6	305,7	6,24
7	315,1	8,01
8	317,6	9,62
9	318,8	11,26
10	319,5	12,48

Количество испытанных идентичных стандартных образцов в серии в количестве 3 единицы выбрано для оценки возможной погрешности при

проведении испытаний на растяжение. В соответствии с полученной усредненной диаграммой растяжения, согласно [11] были определены основные механические параметры стали марки 10. Условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 204,3$ МПа; предел прочности (временное сопротивление разрыву) $\sigma_s = 319,5$ МПа; модуль упругости $E = 210$ ГПа; относительная деформация $\delta = 20,9$ %.

Принципиальная схема испытаний микрообразцов из стали марки 10 представлена на рисунке 2.19.

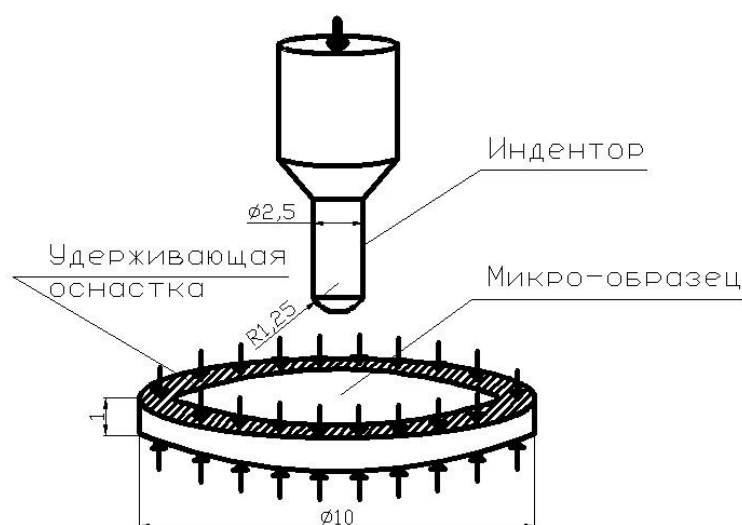
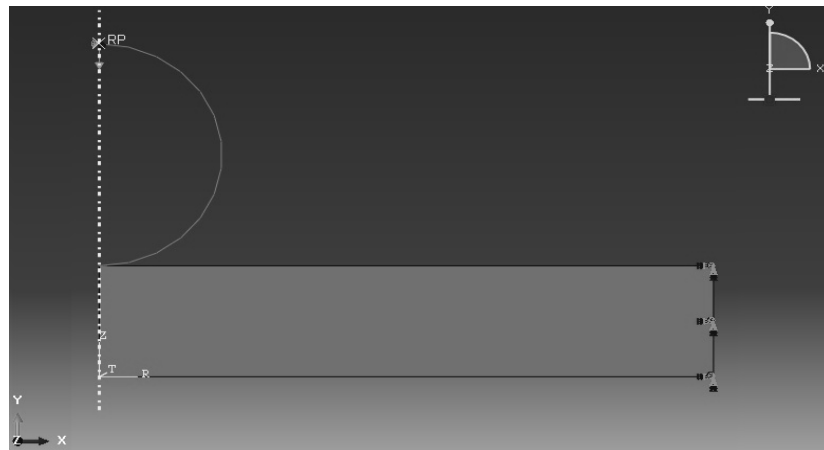
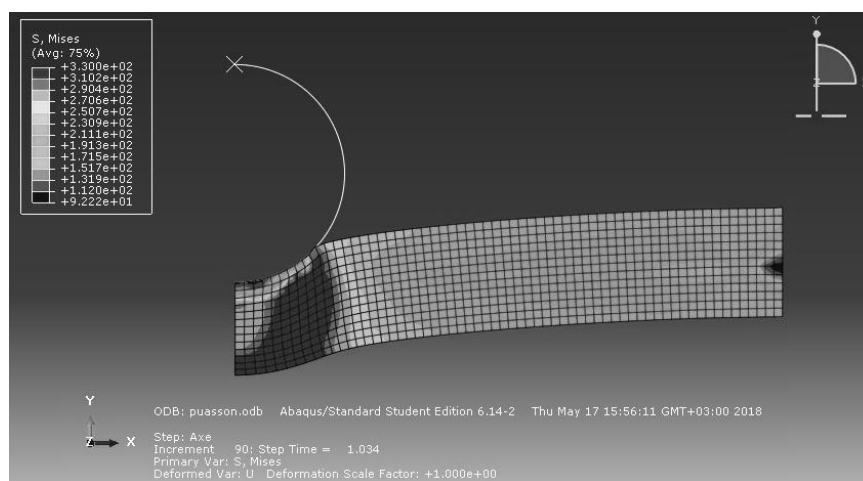


Рисунок 2.19 – Постановка задачи моделирования испытания микрообразцов из стали марки 10 методом SPT

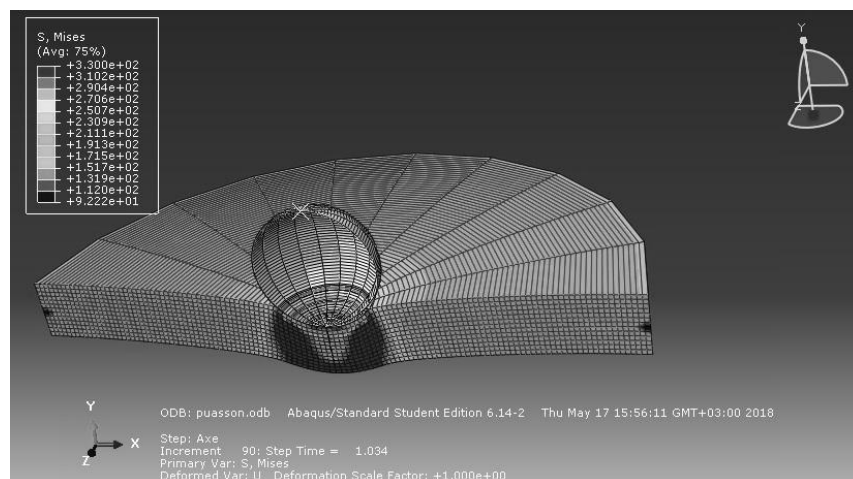
Расчетная модель в программном комплексе SIMULIA Abaqus была реализована посредством введения исходных данных аналогичных п. 2.1, дополнительно учитывались приведенные выше механические свойства стали марки 10 и жесткое закрепление в пространстве боковой грани микрообразца – «Boundary Condition». Визуализация полученной модели представлена на рисунке 2.20. В процессе вдавливания сферического индентора в испытуемый материал - сталь марки 10 максимальные эквивалентные напряжения (по Мизесу), рассчитанные в программном комплексе SIMULIA Abaqus, составляют 330 МПа.



а)



б)



в)

Рисунок 2.20 – Распределения эквивалентных напряжений (по Мизесу) при проведении испытаний микрообразцов методом SPT:

а) граничные условия «Boundary Condition» – жесткое закрепление микрообразца;

б) в осесимметричной постановке; в) в развертке

Полученный в модели характер распределения напряжений в микрообразце в полной мере соответствует картине происходящих в реальном металле при процессах разрушения, так как в областях с максимальными эквивалентными напряжениями, указанных на рисунке 2.20 происходит зарождение и последующее развитие трещин, которые приводят к полному разрушению материала.

По расчетной модели при помощи инструментов программного комплекса SIMULIA Abaqus была построена диаграмма в координатах «сила реакции (RF) – перемещение индентора (u)», что является эквивалентом графику зависимости «усилие – деформация», полученному экспериментальным путем. На рисунке 2.21 представлен график для материала сталь 10 в исходном, предварительно не деформированном, состоянии, полученный при помощи моделирования.

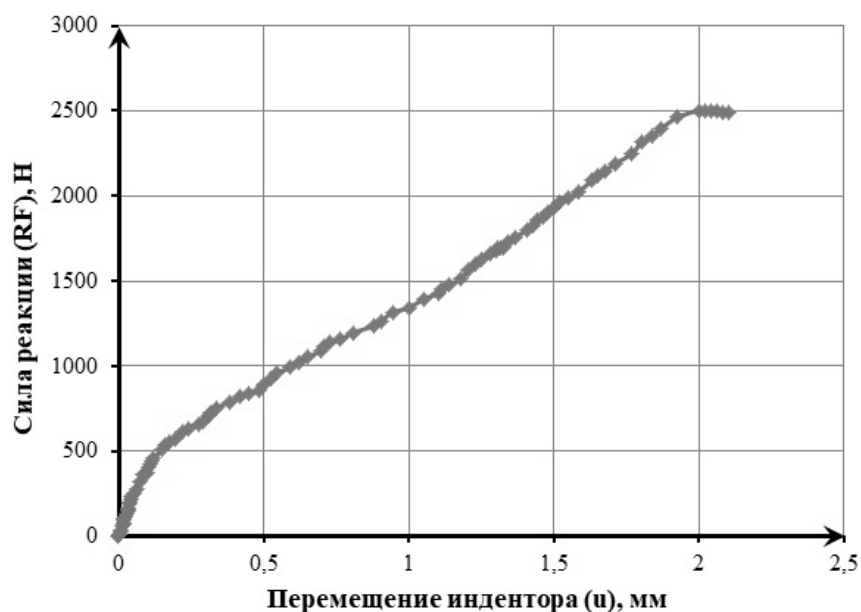


Рисунок 2.21 – Диаграмма в координатах «сила реакции (RF) – перемещение индентора (u)» для стали 10 в исходном состоянии, полученная по данным моделирования испытаний методом SPT

Для получения корректных данных с целью последующего моделирования в машине Zwick/Roell Z100 была дополнительно испытана серия из 16 микрообразцов, изготовленных из материала сталь 10 в исходном состоянии

заводской поставки.

Схема проведения испытаний представлена на рисунке 2.22. Рабочий инструмент, с помощью которого производится внедрение в микрообразец, – сферический индентор, изготовленный из инструментальной стали У8, подвергнутой закалке и высокому отпуску. Оснастка из стали 45 состоит из подставки и втулки на резьбовом соединении, направляющей индентор и фиксирующей микрообразец, индентор перемещался с заданной равномерной скоростью. Программный комплекс с высокой точностью фиксировал перемещение индентора и действующую нагрузку, значения которых откладывались диаграммах в координатах «усилие - перемещение» и потом определялись характерные точки для стальных микрообразцов.

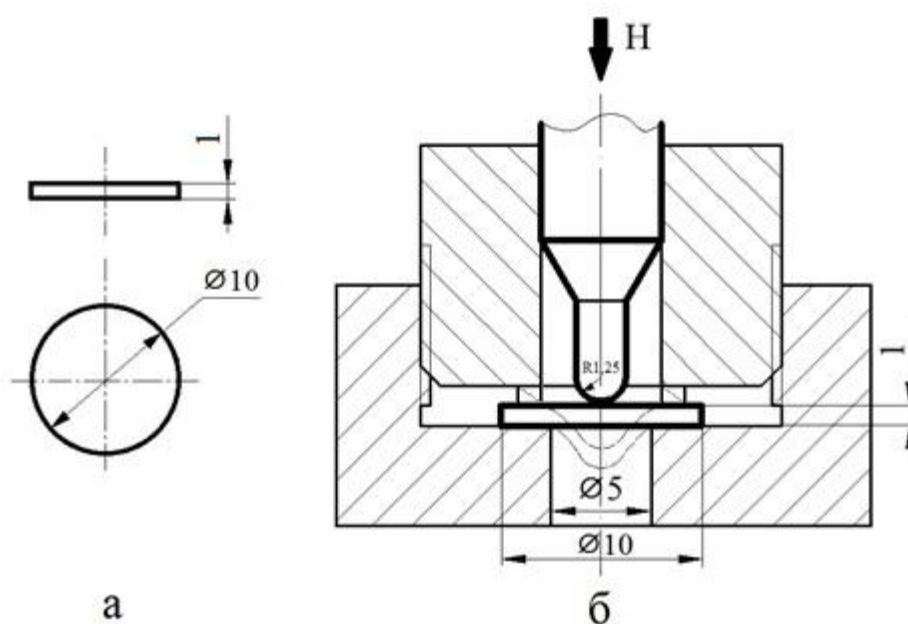


Рисунок 2.22 –Испытания SPT методом: а) параметры испытуемого микрообразца; б) схема испытаний

Для обработки полученного массива данных была использована методика обработки экспериментальных данных, представленная в ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [12].

Дополнительно была проведена проверка гипотезы о нормальности распределения результатов измерений при числе результатов измерений от 15 до 50. Для анализа брались значения характерных точек текучести и прочности (F_m и F_e – значения усилий в Н, d_m и d_e – значения деформаций в мм). На основании рассчитанных критериев 1 и 2 справочного Приложения Б ГОСТ Р 8.736-2011 [12] при выбранном уровне значимости 0,05 распределение результатов измерений можно считать нормальным.

В соответствии с выбранной методикой была осуществлена обработка экспериментальных данных с определением доверительных интервалов для каждого из параметров характерных точек. Для анализа использовались исходные значения: количество измерений $n = 16$ штук, доверительная вероятность $p = 0,95$, коэффициент Стьюдента $t = 2,1325$ (в соответствии со справочным Приложением Д ГОСТ Р 8.736-2011 [12]). Полученные результаты представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Числовые показатели характерных точек текучести и прочности для серии испытаний материала сталь 10

№ образца/параметр	$F_m, Н$	$d_m, мм$	$F_e, Н$	$d_e, мм$
1	2455	1,96	485	0,15
2	2543	1,98	503	0,13
3	2438	2,03	467	0,145
4	2575	1,98	504	0,15
5	2544	2,1	502	0,145
6	2375	1,93	484	0,13
7	2481	1,99	493	0,145
8	2551	1,95	486	0,15
9	2508	1,9	502	0,135
10	2489	1,92	482	0,15
11	2442	2	471	0,15
12	2358	2,04	465	0,13
13	2422	1,99	491	0,125
14	2461	1,91	445	0,13
15	2396	1,99	462	0,13
16	2441	2,02	456	0,125
Среднее арифметическое	2467,5	1,98	481	0,14
Дисперсия	4167,7	0,003	335	0,0001
Среднеквадратичное отклонение группы из 16 испытаний	64,5	0,054	18,3	0,008

Продолжение таблицы 2.8

№ образца/параметр	F _m , Н	d _m , мм	F _e , Н	d _e , мм
Коэффициент вариации	2,62%	2,66%	3,8%	4,91%
Среднеквадратичное отклонение среднего арифметического	16,2	0,013	4,6	0,003
Доверительные границы	±34,4	±0,028	±9,7	±0,006

Анализируя полученные результаты серии испытаний, можно отметить, что для значений ключевых точек текучести и прочности стали 10 имеется достаточная сходимость, о чем свидетельствуют значения коэффициента вариации (не более 5%). Поэтому полученную усредненную экспериментальную диаграмму можно считать исходной для последующего сравнения с ней построенной модели.

Совмещенные на одной диаграмме усредненный экспериментальный график и график модели представлены на рисунке 2.23.

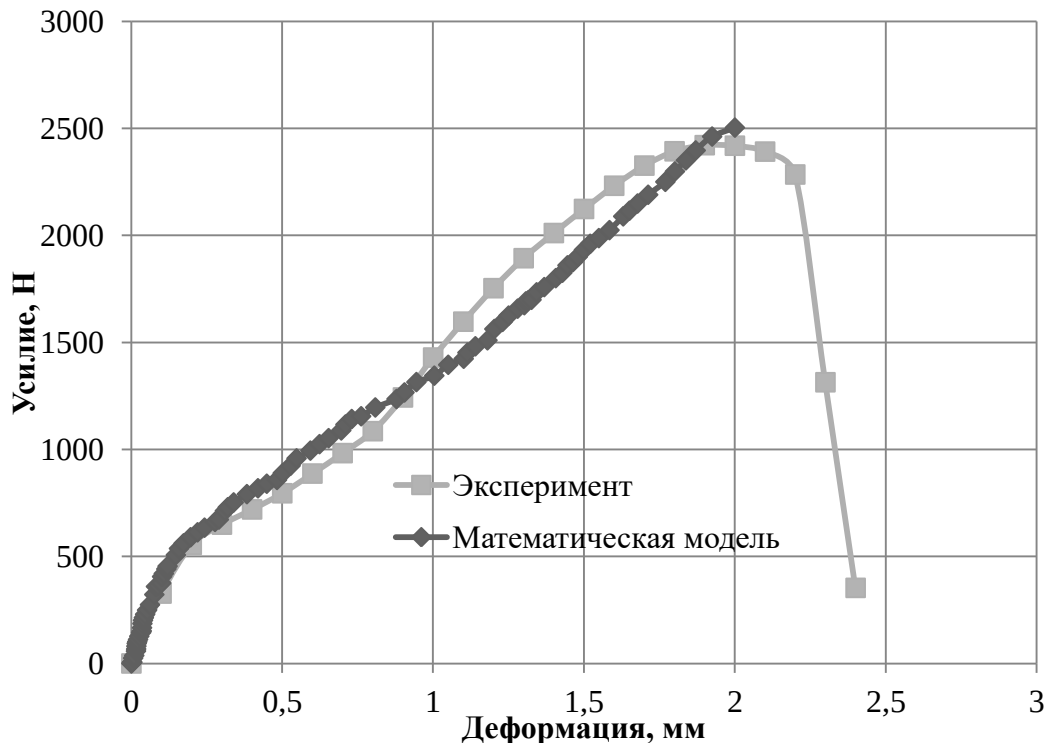


Рисунок 2.23 – Сравнение результатов математического моделирования и натурального эксперимента для стали марки 10

Характер распределения усилия, с которым индентор погружается в материал, в зависимости от деформации стального микрообразца в полученной модели хорошо согласуется с аналогичным графиком, полученным при проведении эксперимента. Коэффициент вариации каждой точки, взятой с шагом 0,1 мм, не превышает 8%, что является приемлемым показателем сходимости.

Числовые показатели характерных точек диаграммы «усилие-растяжение» (F_m и F_e – значения усилий в H , d_m и d_e – значения деформаций в $мм$) для усредненного экспериментального графика (с указанием вычисленного доверительного интервала из таблицы 2.8) и составленной модели представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Числовые показатели характерных точек текучести и прочности для усредненного экспериментального графика и составленной модели

Параметр	F_m, H	$d_m, мм$	F_e, H	$d_e, мм$
Эксперимент	2467,5	1,98	481	0,14
Доверительный интервал	$2467,5 \pm 34,4$	$1,98 \pm 0,028$	$481 \pm 9,7$	$0,14 \pm 0,006$
Модель	2501	2	490	0,135

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что числовые значения характерных точек, полученные с диаграммы составленной модели, входят в рассчитанные доверительные границы характерных точек с усредненной экспериментальной зависимости с уровнем значимости 0,05. На основании вышеизложенного построенную модель можно признать корректной.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная математическая модель в программном комплексе SIMULIA Abaqus адекватно отображает происходящие во время испытаний методом SPT в микрообразце внутренние процессы, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния, а также корректно определяет физико-механические свойства образцов из низкоуглеродистых трубопроводных сталей (на примере стали 10). Данная модель может быть использована при проведении дальнейших исследований.

2.4 Выводы по Главе 2

1. Разработана математическая модель, которая позволяет адекватно описать напряженно-деформированное состояние плоских микрообразцов, а также провести предварительную оценку возможности измерения физико-механических свойств образцов для низкоуглеродистой стали и может быть использована при проведении исследований.

2. Показана постановка проведения эксперимента с микрообразцами методом SPT. Предложена подготовка оснастки и микрообразцов для проведения испытаний. Освещен метод обработки получившихся экспериментальных данных с определением численных показателей усилия и деформации характерных точек прочности и текучести.

3. Численные значения параметров характерных точек диаграммы E и M , полученные в результате испытаний микрообразцов, дают информацию о работоспособности рассматриваемых элементов трубопроводов. В случае неизменного положения точек в зоне упругих деформаций у металла будет существовать запас работоспособности, а в случае изменения координат точек E и M до области пластических деформаций можно констатировать наступление неработоспособного состояния, обусловленного пластической деформацией металла.

4. Результаты сравнительных испытаний предлагаемого метода вдавливания с использованием микрообразцов позволяют получить сведения об изменении напряженно-деформированного состояния металла в исходном состоянии и после пластической деформации. Усредненный экспериментальный график построен из специальной серии микрообразцов из стали 10 в исходном состоянии. При выбранном уровне значимости 0,05 в соответствии с методикой ГОСТ Р 8.736-2011 [12] характерные точки данной серии испытаний подчиняются нормальному закону распределения с коэффициентом вариаций не более 5%.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СТАЛЕЙ МИКРООБРАЗЦОВЫМ МЕТОДОМ

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований трубопроводных сталей микрообразцовым методом

3.1.1 Основные положения методики проведения механических испытаний микрообразцов трубопроводных сталей методом SPT

Основной задачей при определении работоспособности стальных трубопроводов является оценка параметров, характеризующих их прочность и устойчивость. Наиболее целесообразным путем, в таком случае, является установление закономерностей изменения физико-механических свойств материалов, возникающих вследствие воздействия эксплуатационных повреждающих факторов. Выявление данных закономерностей позволяет проводить оценку технического состояния и возможность безопасной эксплуатации трубопроводов, опираясь на реальные характеристики трубопроводных сталей, а не их справочные данные.

В лабораторных условиях, в силу очевидных причин, практически невозможно полностью имитировать весь спектр нагрузок, воздействующих на эксплуатируемые нефтегазовые трубопроводы. Поэтому, при исследовании вопросов прочности и надежности имитируются только наиболее интенсивные (максимальные) нагрузки, которые вызывают дефекты и повреждения металла труб в производственных условиях. При этом предполагается, что уровень повреждений, возникающих в металле во время его нагружения, будет прямо пропорционален величине действующей статической нагрузки.

Таким образом, при осуществлении экспериментальных исследований процессов деградации физико-механических свойств трубопроводных сталей были приняты следующие допущения:

- нагрузки, которые не сказываются на работоспособности трубопровода, не вызывают повреждений и приводят к появлению внутренних напряжений, не превышающих условный предел пропорциональности углеродных сталей;

- при нагрузках, которые являются не критичными, в металле возникают напряжения, значения которых выше предела упругости (пропорциональности), но ниже допускаемых значений, что приводит к минимальным и незначительным повреждениям в металле;

- нагрузки, вызывающие возникновение внутренних напряжений в углеродистых сталях, превышающих допускаемые расчетные напряжения, вызывают повреждения, приводящие к неработоспособному состоянию трубопровода, но без его разрушения;

- при нагрузках, приводящих к внутренним напряжениям, превышающим предел пластичности углеродистой стали, возникает предельное состояние - потеря устойчивости трубопровода, значительные деформации и локальные повреждения без его разгерметизации;

- предельные нагрузки, формирующие максимальные внутренние напряжения, превышающие предел прочности углеродистой стали, приводят к предельному состоянию с потерей прочности и полным разрушением.

Для испытываемых материалов указанные прочностные характеристики, полученные в ходе испытаний на растяжение в лабораторных условиях, достаточно близки по своим значениям и приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики испытываемых марок углеродистых сталей

Марка стали	Допускаемые напряжения $[\sigma]_{20}$, МПа	Предел пластичности σ_{τ} , МПа	Предел прочности σ_b , МПа
СТ3	217	332	456
10	130	205	320
20	147	225	370

Идея экспериментальных исследований углеродистых сталей, применяемых в трубопроводном строительстве, состоит в следующем. Стандартные

цилиндрические образцы подвергались предварительному воздействию статической нагрузки различной интенсивности, которая формировала различную поврежденность. После этого изготавливались микрообразцы, которые испытывались путем вдавливания индентора до полного разрушения. В ходе испытаний фиксировались параметры «нагрузка (ньютон) – перемещение (миллиметр)».

Предварительное нагружение являлось одноосным, выполнялось в испытательной машине Zwick/Roell Z100, причем микрообразцы из стали марки СТЗ подвергались сжатию, а сталь марки 10 и марки 20 – растяжению. Таким образом, для каждой марки стали методом SPT испытывались образцы с различной степенью поврежденности и полученные результаты подвергались сравнительному анализу друг с другом и образцом в исходном неповрежденном состоянии.

3.1.2 Обработка экспериментальных данных, полученных при испытаниях микрообразцов методом SPT

После проведения всего массива испытаний строятся диаграммы в координатах «усилие – перемещение». При анализе полученных диаграмм определяются параметры характерных точек:

- первая характерная точка 1: усилие (F_m) и деформация (d_m) прочности;
- вторая характерная точка: усилие (F_e) и деформация (d_e) текучести.

Параметры первой характерной точки, которая является, в определенном смысле, эквивалентом пределу прочности (усилию, при котором происходит разрушение образца), определяются по диаграмме «усилие - перемещение» (рисунок 3.1).

Параметры второй характерной точки, условно эквивалентной пределу (усилию) текучести, как момента упруго-пластичного перехода, из-за последовательного проявления текучести в разных частях микрообразца,

достоверно определяются только при помощи билинейной аппроксимации. Руководствуясь рекомендациями Стандарта CWA (Small Punch Test Method for Metallic Materials, CEN Workshop Agreement) и других исследований в области проведения SPT испытаний, был выбран метод построения проекции точки пересечения двух касательных прямых (к упругому и пластичному участкам соответственно) на полученную графическую зависимость (рисунок 3.1) [92].

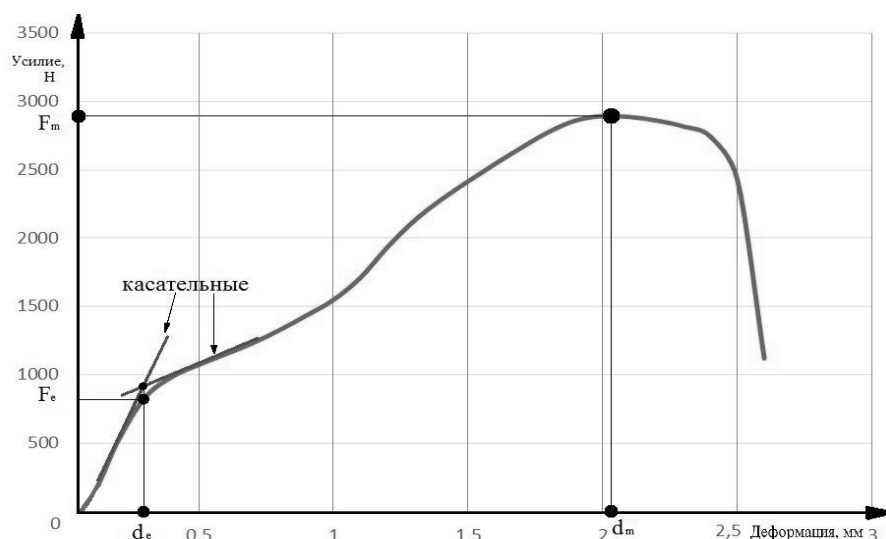


Рисунок 3.1 – Определение значений усилия текучести (F_e) и усилия прочности (F_m) на диаграмме «усилие – перемещение»

Для числового определения пределов прочности σ_b и упругости σ_r испытуемого материала необходимо пользоваться эмпирическими соотношениями, примеры которых приведены в [49, 59, 92, 107, 114], так как нагрузка при данном методе испытаний не является одноосной и это вносит искажения при оценке истинных прочностных характеристик материала.

3.2 Результаты испытаний микрообразцов из стали марки СТЗ

В соответствии с приведенными выше положениями производились экспериментальные исследования стали марки СТЗ – широко применяемой в нефтегазовой промышленности стали и в соответствии с СП 42-102-2004 «Проектирование и строительство газопроводов из металлических труб» [66] ее

можно отнести к трубопроводной стали по ГОСТ 10705-80 «Трубы стальные электросварные. Технические условия» [12].

Было испытано пять партий микрообразцов из стали марки СТЗ:

- в исходном состоянии;
- предварительно нагруженные сжимающей нагрузкой, величина которой ниже предела текучести (18 кН);
- предварительно нагруженные сжимающей нагрузкой, величина которой выше значения предела текучести (23 кН);
- предварительно нагруженные сжимающей нагрузкой, величина которой значительно выше значения предела текучести (28 кН);
- предварительно нагруженные сжимающей нагрузкой, величина которой была близка к пределу прочности (34 кН).

В рамках проведения эксперимента суммарно было испытано 52 микрообразца, по каждому из которых была проведена обработка результатов экспериментов с определением значений ключевых точек (F_m и F_e – значения усилий в Н, d_m и d_e – значения перемещений в мм).

По результатам каждой из серии испытаний было выполнено построение усредненных диаграмм «усилие– перемещение» с шагом 0,1 мм (рисунок 3.2), по которым методом касательных были определены числовые значения ключевых точек диаграмм (таблица 3.2).

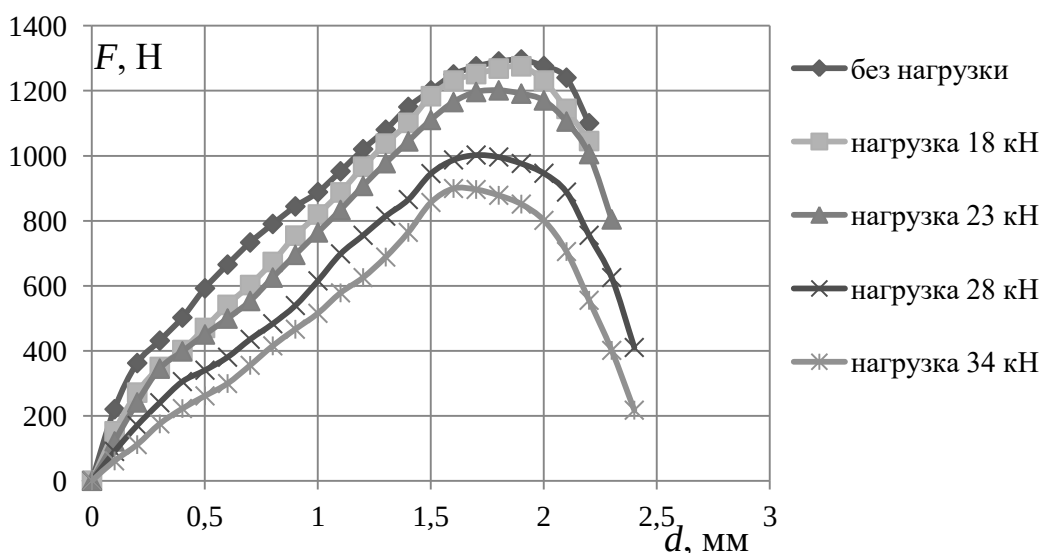


Рисунок 3.2 – Усредненные диаграммы нагружения по результатам испытаний микрообразцов в координатах «усилие – перемещение» из стали марки СТЗ

Таблица 3.2 – Параметры ключевых точек по результатам испытаний микрообразцов из стали марки СТЗ

Значения характерных точек диаграммы	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N, кН				
	0	18	23	28	34
F_m , Н	1296	1275	1201	1002	899
d_m , мм	1,96	1,91	1,85	1,72	1,51
F_e , Н	362	350	345	305	261
d_e , мм	0,22	0,26	0,31	0,36	0,51

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что результаты испытаний методом SPT микрообразцов, подверженных предварительному сжатию различной интенсивности, по сравнению с микрообразцами в исходном состоянии, свидетельствуют об изменении их механических свойств.

От образцов в исходном состоянии ($F_e=362$ Н и $d_e=0,22$ мм, $F_m=1296$ Н и $d_m=1,96$ мм) до образцов, нагруженных практически до усилия прочности ($F_e=261$ Н и $d_e=0,51$ мм, $F_m=899$ Н и $d_m=1,51$ мм), можно проследить постепенное снижение значений параметров ключевых точек (таблица 3.2). Это может быть объяснено тем, что в процессе накопления воздействия сжимающей нагрузки

произошло образование и накопление внутренних микродефектов, необратимые деформации сжатия, которые в совокупности привели к снижению прочности.

По полученным экспериментальным данным (таблица 3.2) методом наименьших квадратов была получена формула линейной зависимости (3.1) сжимающей нагрузки ($N, кН$), которой подверглась сталь марки СТЗ, от координаты характерной точки диаграммы (F_m, H), при которой произошло разрушение микрообразца в ходе испытаний методом SPT (рисунок 3.3):

$$N = -0,038 * F_m + 68,13. \quad (3.1)$$

По результатам испытаний микрообразцов и последующей математической обработки была проведена оценка погрешности и достоверности данных.

Величина достоверности аппроксимации уравнения (3.1) $R^2=0,97$, что говорит о высокой достоверности полученной зависимости. Сравнение расчетных значений нагрузки по формуле (3.1), которой подвергся металл ($N, кН$), с эмпирическими для точки F_m представлено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Оценка погрешности результатов, полученных по формуле (3.1) для микрообразцов из стали марки СТЗ

Оцениваемый параметр	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов $N, кН$			
	18	23	28	34
Расчетное значение $N, кН$	19,68	22,49	30,05	33,97
Относительная погрешность, %	9,33	2,21	7,34	0,09

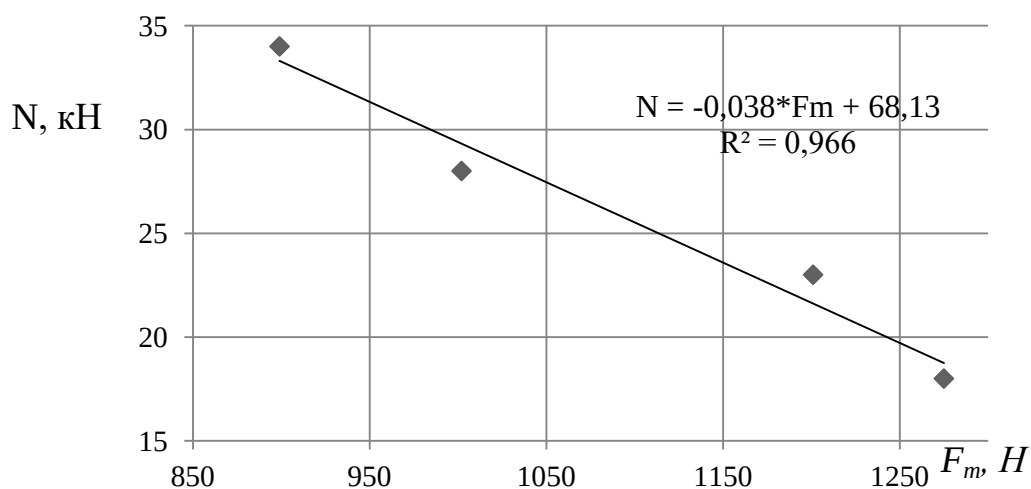


Рисунок 3.3 – Зависимость величины предварительного нагружения N (кН) от параметра F_m (Н) для микрообразца из стали марки СТЗ

Аналогичным образом была получена формула линейной зависимости (3.2) предварительной нагрузки (N , кН), которой подверглась сталь марки СТЗ, от характерной точки, соответствующей возникновению в образце текучести (F_e , Н), при котором произошел переход от упругого состояния металла микрообразца к пластическому при проведении испытаний методом SPT (рисунок 3.4):

$$N = -0,159 * F_e + 76,14. \quad (3.2)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения (3.2) $R^2=0,93$, что также говорит о высокой достоверности полученной формулы. Сравнение расчетных значений нагрузки по формуле (3.2), которой подвергся металл (N , кН), с эмпирическими для точки F_e представлено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Оценка погрешности результатов, полученных по формуле (3.2) для микрообразцов из стали марки СТЗ

Оцениваемый параметр	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N , кН			
	18	23	28	34
Расчетное значение N , кН	20,49	21,285	27,645	34,641
Относительная погрешность, %	13,83	7,46	1,27	1,88

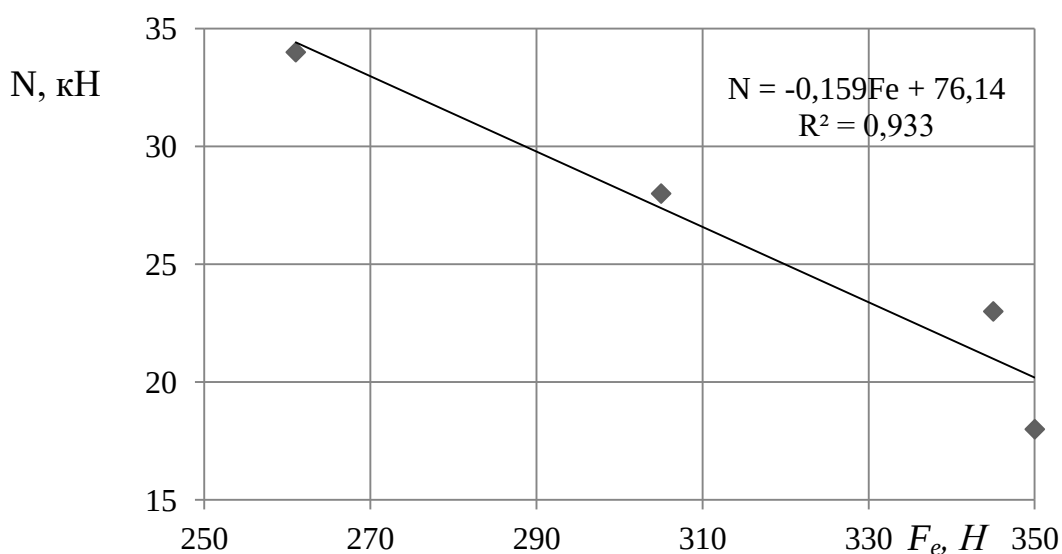


Рисунок 3.4 – Зависимость величины предварительного нагружения N (кН) от параметра F_e (Н) для микрообразца из стали марки СТЗ

Таким образом, по результатам испытаний микрообразцов, полученных SPT методом (значения F_e и F_m) на основании регрессионных зависимостей (3.1) и (3.2) можно определить значение нагрузки, которая ранее воздействовала на трубопровод, выполненный из стали марки СТЗ в процессе эксплуатации.

Анализ таблиц 3.2 – 3.4 показывает, что применение данных регрессионных зависимостей позволяет определить величину предварительного нагружения, которое может вызвать изменение прочностных характеристик стали марки СТЗ с относительной погрешностью, не превышающей 14 %.

3.3 Результаты испытаний микрообразцов из стали марки 10

Испытуемым материалом является сталь марки 10 – трубопроводная сталь в соответствии с СП 42-102-2004 «Проектирование и строительство газопроводов из металлических труб» [66] относится к классу прочности К34. В соответствии с ГОСТ 10705-80 «Трубы стальные электросварные. Технические условия» [10] имеет предел текучести 205 МПа, предел прочности 320 МПа.

Испытания были проведены для шести партий микрообразцов из стали 10 до следующих значений предварительных нагрузок:

- в исходном состоянии, не подвергшиеся внешней нагрузке;
- нагрузки, приводящие к внутренним напряжениям ниже допускаемых расчетных величин (13 кН);
- ниже предела текучести (17 кН);
- соответствующих пределу текучести (20 кН);
- выше значения предела текучести (23 кН);
- нагруженные до предела прочности (25 кН).

В рамках проведения эксперимента суммарно было испытано 64 микрообразца в шести сериях (10-12 единиц, полученных из каждого стандартного образца), по каждому из которых была проведена обработка результатов экспериментов с определением значений ключевых точек (F_m и F_e – значения усилий в Н, d_m и d_e – значения перемещений в мм).

По результатам испытаний шести серий необходимо оценить некоторые статистические параметры – погрешность, достоверность, сходимость, коэффициент вариации и др.

По результатам каждой из серии испытаний было выполнено построение усредненных диаграмм «усилие – перемещение» с шагом 0,1 мм (рисунок 3.5), по которым методом касательных были определены числовые значения ключевых точек диаграмм (таблица 3.5).

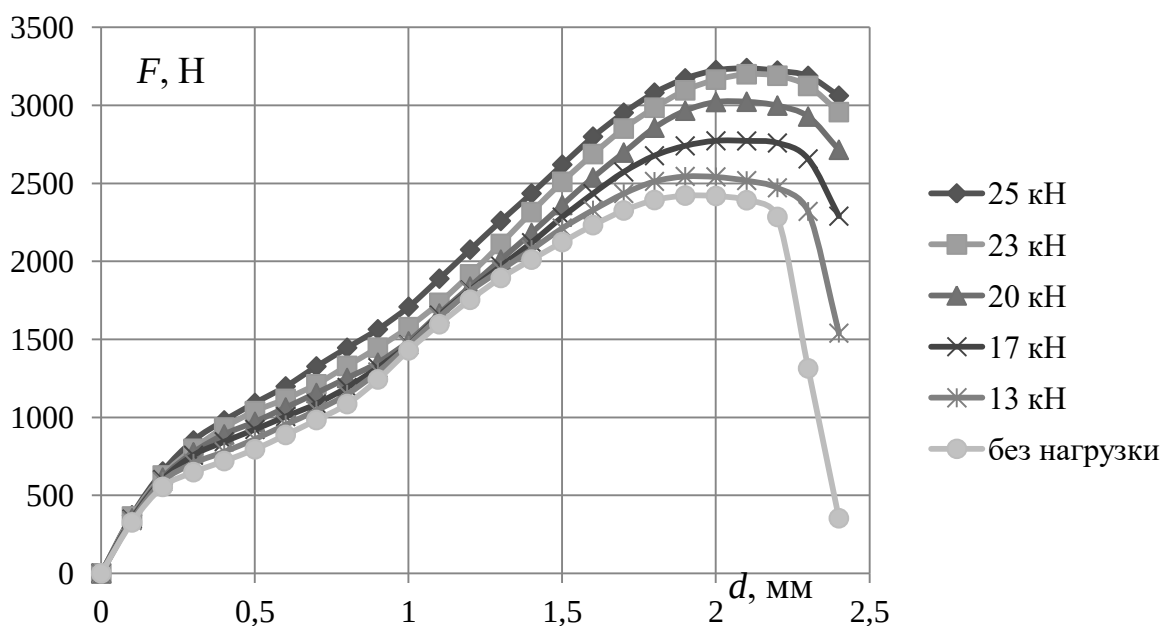


Рисунок 3.5 – Усредненные диаграммы в координатах «усилие – перемещение» по результатам испытаний микрообразцов из стали марки 10

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что результаты испытаний методом SPT микрообразцов, подверженных предварительному нагружению различной интенсивности, по сравнению с микрообразцами в исходном состоянии, свидетельствуют об изменении их механических свойств.

Таблица 3.5 – Параметры ключевых точек по результатам испытаний микрообразцов из стали марки 10

Значения характерных точек диаграммы	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N, кН					
	0	13	17	20	23	25
F_m , Н	2467	2546	2778	3035	3201	3241
d_m , мм	1,98	1,99	2,02	2,05	2,09	2,11
F_e , Н	481	505	655	693	735	755
d_e , мм	0,14	0,17	0,21	0,24	0,26	0,28

От образцов в исходном состоянии ($F_e=481$ Н и $d_e=0,14$ мм, $F_m=2467$ Н и $d_m=1,98$ мм) до образцов, нагруженных практически до предела прочности ($F_e=755$ Н и $d_e=0,28$ мм, $F_m=3241$ Н и $d_m=2,11$ мм), можно проследить постепенное увеличение значений параметров ключевых точек (таблица 3.5). Это может быть

объяснено тем, что в процессе накопления внутренних напряжений и необратимых деформаций трубопроводные стали склонны к упрочнению и охрупчиванию.

По полученным данным (таблица 3.5) методом наименьших квадратов была получена формула линейной зависимости (3.3) растягивающей нагрузки (N , кН), которой подверглась сталь марки 10, от координаты характерной точки диаграммы (F_m , Н), при которой произошло разрушение микрообразца в ходе испытаний методом SPT (рисунок 3.6):

$$N = 0,0145 * F_m - 23,863. \quad (3.3)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения (3.3) $R^2=0,98$, что говорит о высокой достоверности полученной зависимости. Сравнение расчетных значений нагрузки по формуле (3.3), которой подвергся металл (N , кН), с эмпирическими для точки F_m представлено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Оценка погрешности результатов, полученных по формуле (3.3) для микрообразцов из стали марки 10

Оцениваемый параметр	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N , кН				
	13,0	17,0	20,0	23,0	25,0
Расчетное значение N , кН	13,17	16,56	20,29	22,71	23,28
Относительная погрешность, %	1,29	2,66	1,43	1,28	7,39

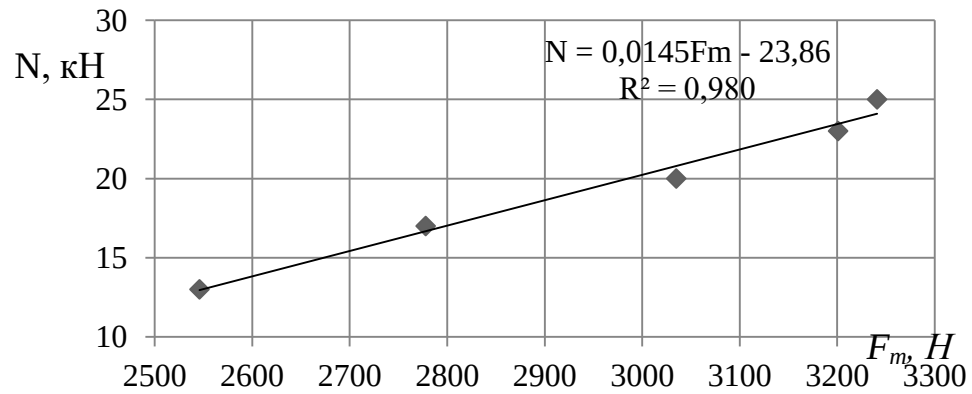


Рисунок 3.6 – Зависимость величины предварительного нагружения N (кН) от параметра F_m (H) для микрообразца из стали марки 10

Аналогичным образом была получена формула линейной зависимости (3.4) предварительной нагрузки (N , кН), которой подверглась сталь марки 10, от характерной точки, соответствующей возникновению в образце текучести (F_e , H), при котором произошел переход от упругих сил, действующих в металле микрообразца, к пластическим при проведении испытаний методом SPT (рисунок 3.7):

$$N = 0,0422 * F_e - 9,03. \quad (3.4)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения (3.4) $R^2 \approx 0,94$, что также говорит о высокой достоверности полученной формулы. Сравнение расчетных значений нагрузки по формуле (3.4), которой подвергся металл (N , кН), с эмпирическими для точки F_e представлено в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Оценка погрешности результатов, полученных по формуле (3.4) для микрообразцов из стали марки 10

Оцениваемый параметр	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N, кН				
	13,0	17,0	20,0	23,0	25,0
Расчетное значение N , кН	12,29	18,63	20,23	22,00	22,85
Относительная погрешность, %	5,46	9,59	1,15	4,35	8,60

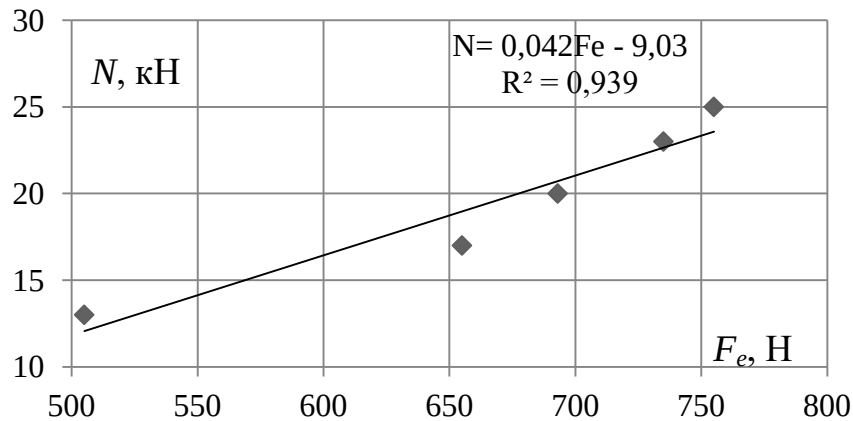


Рисунок 3.7 – Зависимость величины предварительного нагружения N (кН) от параметра F_e (Н) для микрообразца из стали марки 10

Таким образом, по результатам испытаний микрообразцов, полученных SPT-методом (значения F_e и F_m) на основании регрессионных зависимостей (3.3) и (3.4) можно определить значение нагрузки, которая ранее воздействовала на трубопровод, выполненный из стали марки 10 в процессе эксплуатации. Анализ таблиц 3.6 и 3.7 показывает, что применение данных регрессионных зависимостей позволяет определить величину предварительного нагружения, которое может вызвать изменение прочностных характеристик стали марки 10 с относительной погрешностью, не превышающей 10 %.

3.4 Результаты испытания микрообразцов из стали марки 20

Следующим материалом, который был подвергнут испытаниям SPT-методом, является сталь марки 20 – трубопроводная сталь в соответствии с СП 42-102-2004 «Проектирование и строительство газопроводов из металлических труб» [66]. Относится к классу прочности K42. В соответствии с ГОСТ 10705-80 «Трубы стальные электросварные. Технические условия» [10] имеет предел текучести 225 МПа, предел прочности 370 МПа. Испытания были проведены для пяти партий микрообразцов из стали марки 20 с предварительным растягивающим нагружением:

- в исходном состоянии, без предварительного нагружения;
- меньше значения предела текучести (17 кН);
- соответствующим значению предела текучести (20 кН);
- выше значения предела текучести (25 кН);
- соответствующим значению предела прочности (30 кН).

В рамках проведения эксперимента суммарно было испытано более 52 микрообразцов в пяти сериях (не менее 10 микрообразцов, полученных из каждого стандартного цилиндрического образца), по каждому из которых была проведена обработка результатов экспериментов с определением значений ключевых точек (F_m и F_e – значения усилий в Н, d_m и d_e – значения перемещений в мм).

По результатам каждой из серии испытаний строятся усредненные диаграммы «усилие – перемещение» с шагом 0,1 мм (рисунок 3.8), по которым определяются параметры ключевых точек диаграммы нагружения (таблица 3.8).

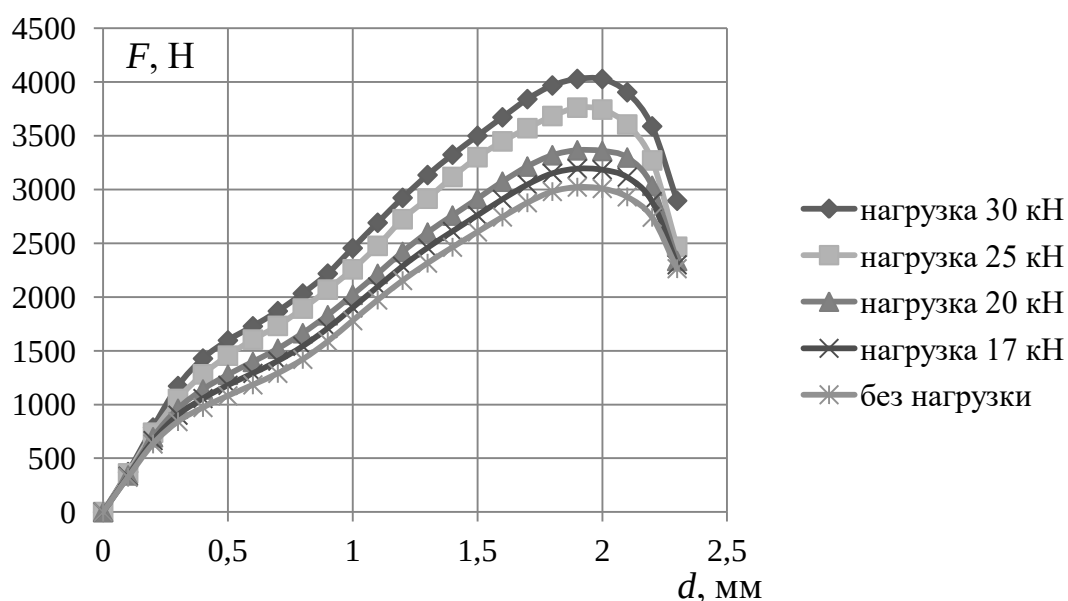


Рисунок 3.8 – Усредненные диаграммы в координатах «усилие – перемещение» для пяти серий испытаний микрообразцов (сталь марки 20)

Таблица 3.8 – Параметры ключевых точек для пяти серий испытаний (сталь марки 20)

Значения	Нагрузка предварительного нагружения
----------	--------------------------------------

характерных точек диаграммы	микрообразцов N, кН				
	0	17	20	25	30
F_m , Н	3025	3104	3458	3769	4032
d_m , мм	1,89	1,90	1,92	1,97	2,01
F_e , Н	774	802	970	1130	1280
d_e , мм	0,25	0,26	0,29	0,33	0,35

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что на микрообразцах, подверженных предварительным нагрузкам, по сравнению с микрообразцами в исходном состоянии, при помощи метода SPT удалось зафиксировать изменение механических свойств, аналогичных рассмотренной ранее стали марки 10.

Для образцов в исходном состоянии, параметры ключевых точек составили: $F_e=774$ Н и $d_e=0,25$ мм, $F_m=3025$ Н и $d_m=1,89$ мм, соответственно для образцов, нагруженных практически до предела прочности, можно проследить постепенное увеличение значений параметров ключевых точек. Согласно приведенным данным в таблице 3.8, значения координат: $F_e=1280$ Н и $d_e=0,35$ мм, $F_m=4032$ Н и $d_m=2,01$ мм.

По полученным данным, приведенным в таблице 3.8, методом наименьших квадратов была установлена линейная функциональная зависимость (3.5) предварительной растягивающей нагрузки (N , кН), действию которой подверглась сталь марки 20, от ключевой точки, характеризующей предельное усилие воздействия индентора (F_m , Н), при котором произошло разрушение микрообразца при проведении испытаний методом SPT (рисунок 3.9):

$$N = 0,0137 * F_m - 25,903. \quad (3.5)$$

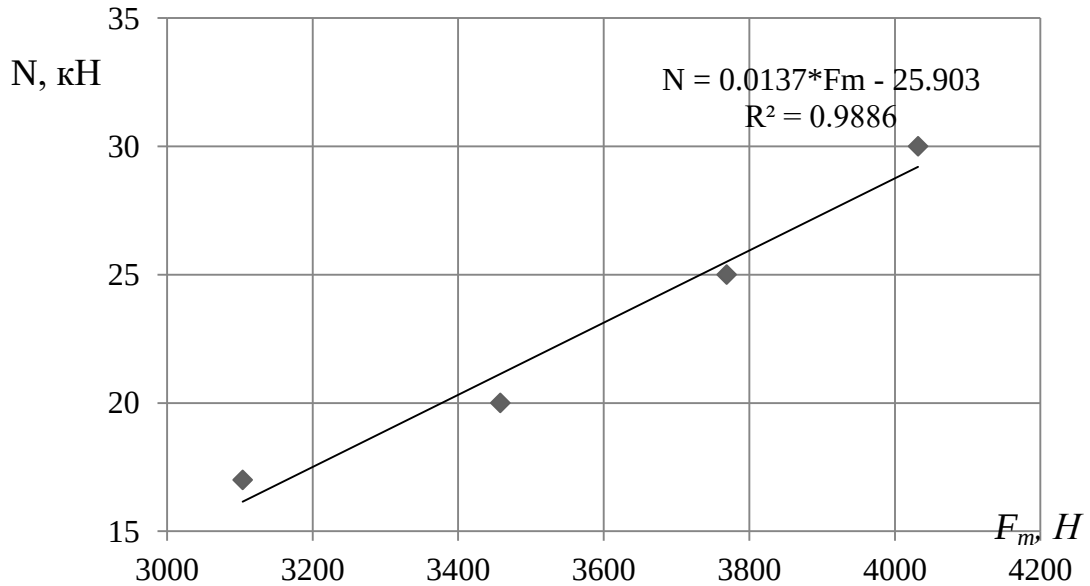


Рисунок 3.9 – Зависимость величины предварительного нагружения N (кН) от параметра F_m (H) для микрообразца из стали марки 20

Величина достоверности аппроксимации уравнения (3.5) $R^2=0,99$, что говорит об очень высокой достоверности полученной формулы. Оценка погрешности расчетных значений, вычисленных по формуле (3.5), с эмпирическими значениями, представлена в таблице 3.9.

Аналогичным образом была получена формула линейной зависимости (3.6) нагрузки (N , кН), которой подверглась сталь 20, от усилия на инденторе, для точки диаграммы F_e (H), при котором произошел переход от упругого состояния микрообразца к пластическому при проведении испытаний методом SPT (рисунок 3.10).

$$N = 0,0275 * F_e - 5,769. \quad (3.6)$$

Оценка погрешности расчетных значений, вычисленных по формуле (3.6), с эмпирическими значениями, представлена в таблице 3.10.

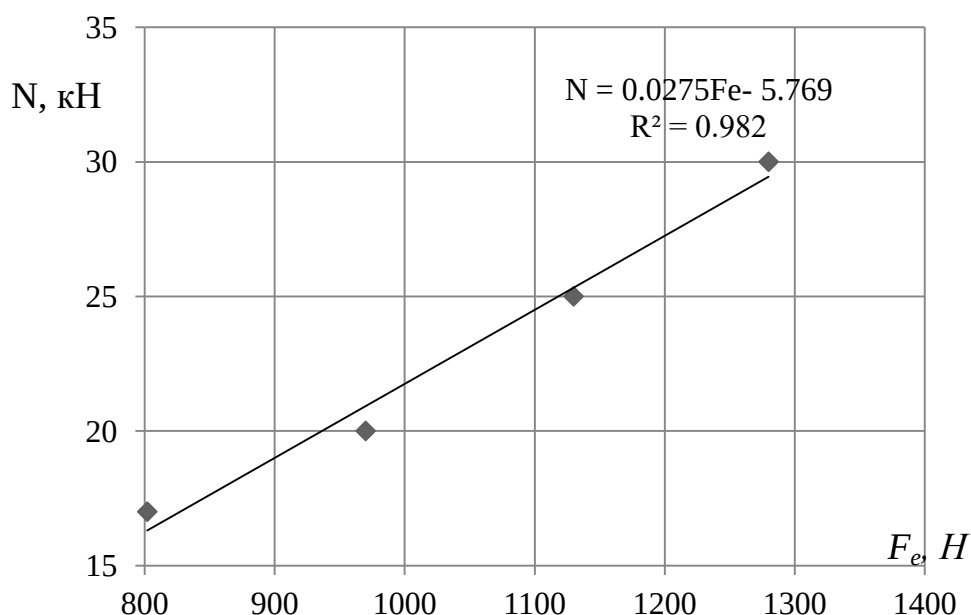


Рисунок 3.10 – Линейная зависимость приложенной нагрузки (N , кН) от усилия текучести микрообразца (F_e , Н) (сталь 20)

Таким образом, при помощи полученных данных микрообразцовым методом (значения F_e и F_m) на основании установленных зависимостей (3.5) и (3.6) можно определить значение нагрузки, которой подверглась трубопроводная сталь 20 в процессе эксплуатации.

Таблица 3.10 – Оценка погрешности регрессионных уравнений для микрообразцов из стали марки 20

Оцениваемый параметр	Нагрузка предварительного нагружения микрообразцов N , кН			
	17,0	20,0	25,0	30,0
Для регрессионного уравнения (5)				
Расчетное значение N , кН	16,67	20,15	25,79	29,39
Относительная погрешность, %	1,94	0,75	3,16	2,03
Для регрессионного уравнения (6)				
Расчетное значение N , кН	16,30	20,92	25,33	29,45
Относительная погрешность, %	4,12	4,60	1,32	1,83

Данные таблицы 3.10 показывают, что данные регрессионные зависимости (3.5) и (3.6) могут быть использованы для определения величин предварительного нагружения, при оценке изменения прочностных характеристик стали марки 20 с относительной погрешностью, не превышающей 5 %.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Проведены эксперименты на образцах модельных трубопроводных материалов: стали марки СТЗ, марки 10 и марки 20 в разных предварительно нагруженных состояниях. Показана возможность применения микрообразцового метода SPT для определения технического состояния стали трубопроводов систем по показателям характерных точек, т.н. точек прочности и текучести.

2. Анализ экспериментальных данных по сталям марок 10 и 20 (рисунки 3.5 и 3.8, таблицы 3.5 и 3.8) показал, что испытываемые трубопроводные стали при накоплении внутренних напряжений и деформаций растяжения, соответственно при протекании внутренних структурных изменений (аналогично при эксплуатации) имеют склонность к постепенному упрочнению, и соответственно охрупчиванию. Сжимающие нагрузки на трубопроводные стали, изученные на примере стали марки СТЗ, приводят к снижению прочностных показателей, определяемых методом SPT.

3. Было выявлено, что полученные значения контролируемых параметров (характерных точек текучести и прочности) при испытаниях микрообразцов, в зависимости от роста уровня предварительного нагружения исходных стандартных образцов, возрастали по линейной зависимости (формулы (3.3), (3.4), (3.5), (3.6)).

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕГАЗОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Эксплуатация нефтегазовых трубопроводов, как потенциально опасных объектов, сопряжена с необходимостью обеспечения их безопасности и надежности. Для этого используется широкий спектр методов, позволяющих оценить техническое состояние опасного объекта и определить ресурс дальнейшей безопасной эксплуатации [13, 74].

В соответствии с принятой терминологией – «остаточный ресурс (как расчетный показатель) - это наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние» [9]. Соответственно, для определения остаточного ресурса нефтегазопроводов необходимо:

- 1) выявить параметры, периодические измерения которых позволяют судить об изменении работоспособности трубопровода;
- 2) определить такие их численные значения, которые смогли бы идентифицировать переход нефтегазового трубопровода в состояние, которое можно классифицировать как «неработоспособное или предельное состояние» [9].

Наилучшие результаты при разработке методик определения остаточного ресурса показал подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию» [55]. В данном подходе определение текущего технического состояния нефтепровода или газопровода проходит по определенным ранее параметрам технического состояния, что дает возможность проводить эксплуатацию объектов в рамках нормативных требований. Параметры текущего состояния нефтегазовых объектов устанавливаются при осуществлении периодического освидетельствования и технического диагностирования.

Данная концепция подразумевает проведение оценки технического состояния рассматриваемого объекта по параметрам технического состояния, которые обеспечат его надежную и безопасную эксплуатацию в соответствии

с требованиями нормативно-технической документации, а остаточный ресурс ограничивается предельными величинами эксплуатационных параметров. В таком качестве могут быть использованы показатели состояния, определяемые при техническом диагностировании.

Техническое диагностическое обследование газонефтепроводов при решении задач оценки их фактического состояния, определения остаточного (предельного) срока эксплуатации для дальнейшей безопасной эксплуатации включает в себя [68]:

- проверку герметичности трубопроводов и сварных соединений;
- определение состояния изоляции (внешнего защитного покрытия);
- проверку коррозионной активности окружающего грунта и возможности образования электрокоррозионных процессов;
- контроль геометрических размеров трубы;
- проверку состояния основного материала труб и вспомогательного оборудования посредством определения его физико-механических свойств.

Из указанных результатов диагностирования для оценки остаточного ресурса наиболее целесообразно применение показателей физико-механических свойств металлов, поскольку они могут быть получены прямыми измерениями, выражены в числовой форме с последующей оценкой точности и достоверности измеренных значений [68].

Определение технического состояния трубопроводов, в данном случае, должно быть выполнено сопоставлением измеренных либо вычисленных на их основе прочностных (или деформационных) критериев состояния стальных труб с предельными величинами. После этого, при удовлетворительном состоянии рассматриваемого участка трубопровода, проводится оценка его остаточного ресурса путем экстраполяции критериев технического состояния для определения времени достижения равенства между измеренными и предельными величинами прочностных (либо деформационных) параметров.

4.1 Обоснование критериев оценки технического состояния стальных трубопроводов

В настоящее время [32] сформировался научно-методологический подход, свидетельствующий о том, что результаты механических испытаний, в частности диаграммы растяжения, широко используются в решении прикладных задач при решении вопросов оценки ресурса нефтегазовых объектов, основанных на анализе изменений физико-механических свойств сталей [44].

В частности, по диаграмме растяжения можно оценить работу, затраченную на разрыв образца. Она выражается площадью диаграммы, заключенной между кривой деформирования (рисунок 3.1) и осью абсцисс. Чем больше работа, затраченная на разрыв образца, тем больше энергии может поглотить образец без разрушения. Проведение сравнительных испытаний исходного образца и образца, подвергнутого предварительному нагружению, в ходе которого происходит накопление повреждений, дает возможность определить потенциальную энергию, накопленную поврежденным образцом как разность площадей под соответствующими кривыми нагружения.

Аналогичный подход может быть применен и для анализа результатов, полученных при механических испытаниях микрообразцов.

По диаграммам нагружения исследуемых стальных микрообразцов, приведенным в третьей главе (рисунки 3.2, 3.5, 3.8) методом трапеций [25] приближенно были определены площади криволинейных фигур по формуле 4.1. Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

$$S = \frac{F_e \cdot d_e + (F_m + F_e) \cdot (d_m - d_e)}{2}, \quad (4.1)$$

где F_m , d_m , F_e , d_e - характерные точки диаграммы нагружения микрообразцов.

Полученные в предыдущих разделах аналитические зависимости характерных точек диаграммы от уровня предварительного нагружения дают возможность установить изменение работы разрушения образцов от уровня поврежденности испытываемых образцов.

Таблица 4.1 – Результаты расчета площадей криволинейных фигур

Марка стали	Статическая нагрузка (N, кН)	Параметры диаграммы				Площадь фигуры, (S)
		F _m	d _m	F _e	d _e	
Растяжение						
Сталь 10	0	2467	1,98	481	0,14	2745,83
	14	2546	1,99	505	0,17	2819,33
	17	2778	2,02	655	0,21	3175,64
	20	3035	2,05	693	0,24	3457,03
	25	3241	2,11	755	0,28	3762,04
Сталь 20	0	3025	1,89	774	0,25	3211,93
	17	3104	1,9	802	0,26	3307,18
	20	3458	1,92	970	0,29	3749,47
	25	3769	1,97	1130	0,33	4203,63
	30	4032	2,01	1280	0,35	4632,96
Сжатие						
Сталь СТЗ	0	1296	2,20	362	0,22	1482,28
	18	1275	1,91	350	0,26	1386,12
	23	1201	1,85	345	0,31	1243,89
	28	1002	1,72	305	0,36	943,66
	34	899	1,51	261	0,51	646,55

При этом уровень поврежденности принимается равным отношению действующей величины нагрузки на образец к пределу прочности металла. Соотношение нагрузок и соответствующих им степеней повреждения приведено в таблице 4.2. При этом для каждой ступени нагружения микрообразцов расчетным методом, с использованием конечно-элементной модели представленной во второй главе работы, определялись эквивалентные напряжения по Мизесу. Результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные значения уровней поврежденности предварительно нагруженных стальных микрообразцов

Усилие статического нагружения, N, кН		Степень поврежденности, $i=N/N_{max}$		Расчетные эквивалентные напряжения, МПа
		расчетная	принятая	
Растяжение				
Сталь 10 ($N_{max} = 25$ кН)	10	0,41	0,4	128,1
	14	0,56	0,6	178,3
	17	0,68	0,7	216,5
	20	0,80	0,8	254,7
	25	1,00	0,1	318,4
Сталь 20 ($N_{max} = 30$ кН)	11	0,38	0,4	145,2
	17	0,57	0,6	216,5
	20	0,67	0,7	254,7
	25	0,83	0,8	318,8
	30	1,00	1,0	382,1
Сжатие				
Сталь СТ3 ($N_{max} = 34$ кН)	15	0,44	0,4	191,1
	18	0,56	0,6	224,8
	23	0,74	0,7	287,2
	28	0,82	0,8	349,7
	34	1,00	1,0	416,3

Оценка изменения площадей криволинейных фигур ΔS , полученных в результате экспериментальных испытаний микрообразцов сталей марок СТ3, 10 и 20 проводилась по формуле (4.2):

$$\Delta S = \frac{S_{м.ст i} - S_{м.ст 0}}{S_{м.ст 0}}, \quad (4.2)$$

где $S_{м.ст 0}$ — площадь диаграммы нагружения неповрежденного образца для соответствующей марки стали; $S_{м.ст i}$ — площадь диаграммы нагружения образца со степенью поврежденности i (где $i=0 \dots 1$) для соответствующей марки стали.

Результаты расчетов по формуле (4.2) приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.1.

Таблица 4.3 – Зависимость изменения площади ΔS диаграммы нагружения и степени поврежденности для различных марок сталей

Степень поврежденности i	Изменение площади фигуры на диаграмме нагружения для исследуемых сталей ΔS		
	СТ3	10	20
1	2	3	4
0,4	0,000	0,000	0,000
0,6	-0,065	0,027	0,029
0,7	-0,161	0,156	0,167
0,8	-0,363	0,259	0,308
1,0	-0,564	0,370	0,442

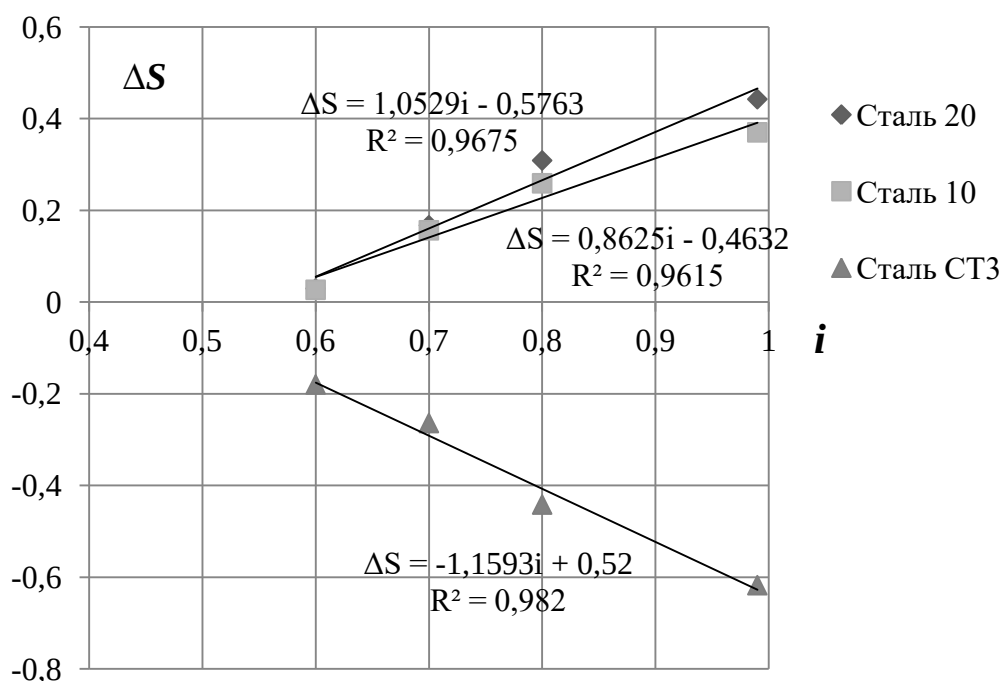


Рисунок 4.1 – Графические зависимости изменения площади диаграммы нагружения и степени поврежденности для сталей марок 10, 20 и СТ3

Анализ приведенных в таблице 4.3 и на рисунке 4.1 значений показывает, что существует явно выраженная линейная зависимость между степенью поврежденности, вызванной предварительным нагружением стальных микрообразцов и работой разрушения.

В общем случае предельное состояние материала наступает при уровне нагрузок, вызывающих в объеме внутренние напряжения, соответствующие

пределу прочности, при расчете на прочность по первой группе предельных состояний и пределу текучести - при расчете по второй группе предельных состояний для обеспечения устойчивости.

Для установления такого соответствия было проведено сопоставление интегрального критерия ΔS с уровнем эквивалентных напряжений по Мизесу при различных значениях нагрузки предварительного нагружения микрообразцов. Результаты приведены в таблице 4.4.

Анализ приведенных выше результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. В результате предварительного нагружения образцов в широком диапазоне нагрузок происходит накопление повреждений, которое приводит к изменению деформационных и прочностных показателей, которые могут быть выявлены при испытаниях микрообразцов.

2. Вид предварительной нагрузки приводит к различию в детерминированности процессов накопления энергии в стальных образцах – при растяжении, вследствие самоупрочнения материала, происходит накопление потенциальной энергии, при сжатии – происходит обратный процесс – снижение потенциальной энергии и снижение прочности углеродистой стали.

3. Установлена функциональная зависимость между изменением площади диаграммы нагружения и степени поврежденности для сталей марок 10, 20 и СТЗ. Данная зависимость может быть использована для оценки степени поврежденности металла стенки трубопроводов, работающих в условиях статического нагружения.

4. Показано, что экспериментально определяемая величина площади криволинейных фигур на диаграммах нагружения, как энергетический критерий, может быть использована для оценки скорости деградации прочностных и деформационных свойств трубопроводных сталей с определением остаточного ресурса элементов трубопроводов.

Таблица 4.4 – Соответствие расчетные значения эквивалентных напряжений интегральному критерию технического состояния при различных уровнях предварительного нагружения

Марка стали	Степень поврежденности, $i = N/N_{max}$	Интегральный критерий технического состояния, ΔS	Оценка состояния
Сталь 10	0,4	0,000	работоспособное $\sigma_{экв} < [\sigma]$ 128,1 МПа < 130,0 МПа
	0,6	0,027	неработоспособное $\sigma_{экв} > [\sigma]$ 178,3 МПа > 130,0 МПа
	0,8	0,259	предельное потеря устойчивости $\sigma_{экв} > \sigma_t$ 254,7 МПа > 205,0 МПа
	1,0	0,370	предельное потеря прочности $\sigma_{экв} \approx \sigma_b$ 318,4 МПа $\approx$ 320,0 МПа
Сталь 20	0,4	0,000	работоспособное $\sigma_{экв} < [\sigma]$ 145,2 МПа < 147,0 МПа
	0,6	0,029	неработоспособное $\sigma_{экв} > [\sigma]$ 216,5 МПа > 147,0 МПа
	0,8	0,308	предельное потеря устойчивости $\sigma_{экв} > \sigma_t$ 318,8 МПа > 225,0 МПа
	1,0	0,442	предельное потеря прочности $\sigma_{экв} > \sigma_b$ 382,1 МПа > 370,0 МПа
Сталь СТЗ	0,4	0,000	работоспособное $\sigma_{экв} < [\sigma]$ 191,1 МПа < 217,0 МПа
	0,6	-0,065	неработоспособное $\sigma_{экв} > [\sigma]$ 224,8 МПа > 217,0 МПа
	0,8	-0,363	предельное потеря устойчивости $\sigma_{экв} > \sigma_t$ 349,7 МПа > 332,0 МПа
	1,0	-0,564	предельное потеря прочности $\sigma_{экв} \approx \sigma_b$ 446,3 МПа $\approx$ 456,0 МПа

4.2 Определение остаточного ресурса газонефтепроводов с применением критериев технического состояния, основанных на результатах испытаний микрообразцов

Многочисленные результаты исследований в области оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазового оборудования и трубопроводов свидетельствуют о том, что состояние основного металла трубопроводов является одним из ключевых показателей, обеспечивающих их устойчивую эксплуатацию [26, 28, 81, 82, 113].

Во время длительной эксплуатации имеют место активные деградационные изменения, такие как деформационное старение, в структуре стали, что приводит к ухудшению первоначальных механических свойств. Деградация обуславливается первоначальной термодинамической неравновесностью состояния металла с последующим приближением его внутренней атомной структуры к равновесному состоянию при помощи диффузионных процессов [15, 27, 30, 83, 84]. С другой стороны, негативные процессы могут быть вызваны скачкообразными и частыми изменениями эксплуатационных режимов, механическим внешним воздействием, активизацией процессов коррозионного растрескивания под напряжением и другими факторами.

Изменения механических свойств трубопроводных сталей, определенных при техническом диагностическом обследовании, необходимо оценивать и учитывать в общей картине при прогнозировании предельного срока службы.

К критериям, применяемым при решении вопросов обеспечения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, применяются следующие требования [85]:

- 1) наличие технических (либо технологических) процедур, периодическое выполнение которых позволяет провести контрольное измерение (определение) эксплуатационного показателя; в качестве критерия может использоваться как сам измеряемый показатель, так и производные от него величины;

2) измеренный показатель (либо производный от него критерий), должен быть информативным, позволяющим проводить его обработку в формализованном виде и иметь физический смысл, позволяющий трактовать отклонения параметров от установленных нормативами значений;

3) должен быть установлен интервал приемлемых значений критериев, выход за которые означает переход трубопровода в предельное (аварийное) состояние.

Предложенный критерий – площадь криволинейной фигуры диаграммы нагружения микрообразцов отвечает указанным выше требованиям, поскольку:

- периодический отбор микрообразцов возможно проводить в течение регламентных работ по техническому обслуживанию и ремонту нефтегазовых трубопроводов;

- по результатам испытаний микрообразцов производится вычисление значения площадей криволинейных фигур по диаграммам нагружения для металла трубопровода в исходном и текущих состояниях;

- по изменению значений площади криволинейной фигуры ΔS , которые связаны со степенью поврежденности стали i , оценивается техническое состояние трубопровода и устанавливаются предельные значения, соответствующие пределу текучести или пределу прочности материала трубопровода.

Приведенный подход применим для объектам технической природы [50, 57, 60-62, 64, 78, 86, 119], в том числе для нефтегазовых объектов, если в качестве интегрального критерия технического состояния трубопровода принять экспериментально определяемые площади криволинейных фигур диаграмм нагружения микрообразцов, которые являются функционально связанными со степенью поврежденности стенок трубопроводов i . Реализация указанных выше условий, при периодическом их выполнении, позволяют применить интегральный критерий ΔS для оценки интенсивности деградации физико-механических свойств сталей времени и экстраполировать полученные значения до получения предельных значений. Время, по истечении которого наступит предельное

значение поврежденности и будет соответствовать остаточному ресурсу трубопровода.

При этом необходимо проводить дифференциацию нефтегазопроводов по степени их опасности, которую можно ассоциировать с тяжестью последствий вследствие возможного возникновения аварийных ситуаций. Данное разделение целесообразно проводить на основе существующей классификации магистральных, распределительных и технологических трубопроводов. Для трубопроводов, относимых к наиболее ответственным категориям и классам необходимо устанавливать более широкий доверительный интервал при определении остаточного ресурса, и соответственно, для низкокатегорийных трубопроводов можно применить более низкие требования с точки зрения доверительности расчетных значений ресурса.

При расчетном определении ΔS , как основного критерия, участвующего в определении остаточного ресурса, должны учитываться объективные погрешности, возникающие при выборочном характере отбора микрообразцов для проведения испытаний с получением $\Delta S(i)$, по формуле (4.3):

$$\Delta S_p = \Delta S(i) \pm s_m, \quad (4.3)$$

где $\Delta S(i)$ – изменение площади криволинейной фигуры, определяемой по диаграмме нагружения микрообразцов в исходном и текущем состоянии; s_m – значение, ограничивающее верхний и нижний диапазон доверительного интервала изменений ΔS . Степень опасности газонефтепровода вычисляется по формуле (4.4) с использованием общепринятых показателей - среднего квадратичного отклонения σ и степени достоверности прогноза, который характеризуется специальным коэффициентом k .

$$s_m = k * \sigma. \quad (4.4)$$

Данный коэффициент k определяется в зависимости от достоверности прогноза γ , который соответствует предполагаемой степени опасности рассматриваемого объекта.

Степень опасности нефтегазовых трубопроводов, в значительной мере, зависит от конструкции и реальных условий их эксплуатации, природно-климатической характеристик, технологических особенностей процесса транспортирования углеводородов. При этом наиболее ответственным участкам трубопроводов с высокой характеристикой или категорией должен быть установлен более широкий доверительный интервал (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Показатели доверительной вероятности

Степень опасности	Нормативная классификация трубопровода				Доверительная вероятность q
	Магистральный		Распределительный газопровод	Технологический трубопровод	
	газопровод	нефтепровод			
Очень высокая	I класс	I класс	высокого давления категорияIa	категорияI	0,99
Высокая	II класс	II класс	высокого давления категорияI	категорияII	0,95
Средняя	-	III класс	высокого давления категорияII	категорияIII	0,90
Низкая	-	IV класс	среднего и низкого давления	категории IV-V	0,8

Основная идея расчета остаточного ресурса состоит в периодическом мониторинге прочностных показателей металла трубопровода по результатам испытаний микрообразцов. При этом диаграммы нагружения микрообразцов дают возможность определить изменение интегрального критерия технического состояния - от момента сооружения трубопровода до времени последнего отбора металла для испытаний микрообразцовым методом.

Соответственно, динамика указанного интегрального критерия как параметра технического состояния ΔS с течением времени t с помощью методов регрессионного анализа может быть представлено в виде элементарных функций (4.5) - линейной, степенной, показательной, гиперболической, экспоненциальной, логарифмической и др.:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S(t) &= A * t + B; \\ \Delta S(t) &= A * t^B; \\ \Delta S(t) &= A * e^t + B; \\ \Delta S(t) &= A * \ln(t + B) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Результаты регрессионного анализа могут быть оценены по коэффициенту, характеризующему тесноту корреляции - чем меньше и ближе к нулю – тем хуже, соответственно, чем близость к единице, тем точнее функция описывает изменение параметров технического состояния.

Если рассматриваемый интегральный критерий технического состояния достигнет в некоторый момент своего предельного состояния, что и будет моментом исчерпания, или «обнуления» остаточного ресурса. Наступление такого обнуления ресурса показано на рисунке 4.2.

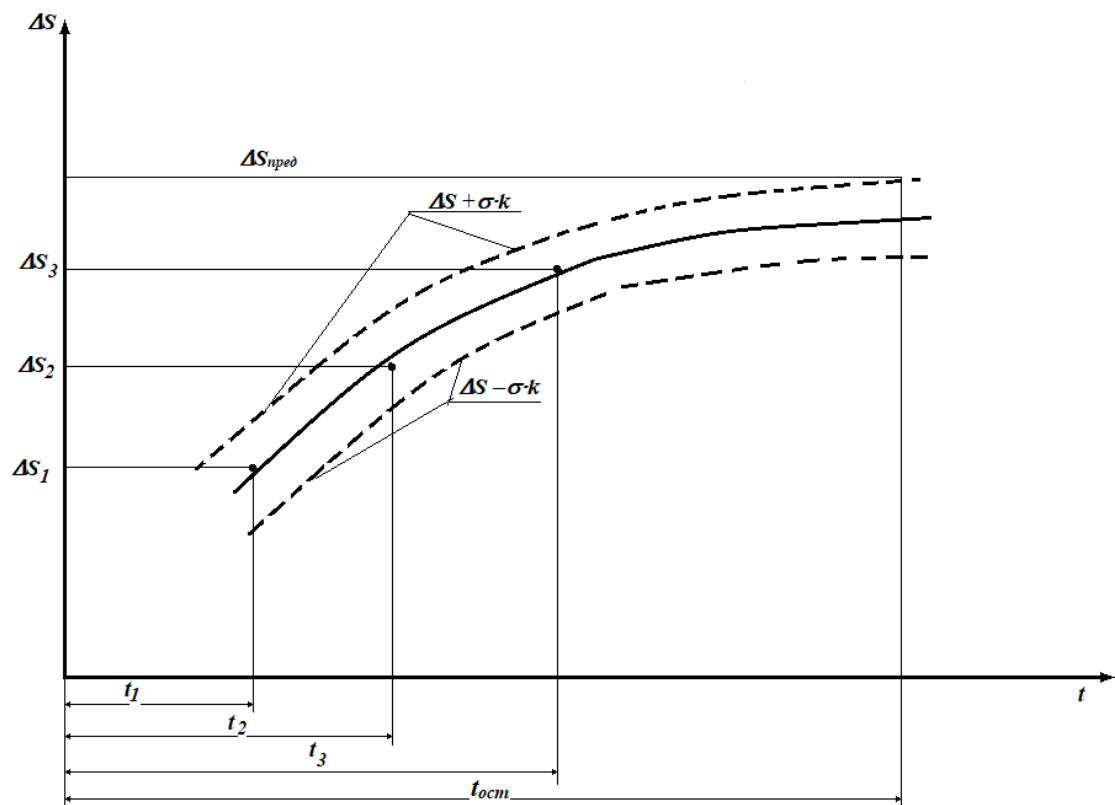


Рисунок 4.2 - Определение остаточного ресурса по значениям интегрального критерия технического состояния

Максимальное (или минимальное) в пределе значение параметра соответствует нормативно обоснованной допустимой величине, при которой еще

сохраняется работоспособность углеродистых трубопроводных сталей при эксплуатации.

В результате расчетов по формулам (4.1-4.2) определяются значения критерия $\Delta S(t)$ для всех моментов t_n (где $n = 1, 2, 3, \dots, m$) проведенных отборов микрообразцов. При этом по значениям $\Delta S(t)$, методом наименьших квадратов, подбираются вид закономерности и коэффициенты A и B .

4.3 Методика определения остаточного ресурса нефтегазовых трубопроводов с использованием микрообразцового метода

По результатам проведенных аналитических исследований и поставленных экспериментов предлагается следующий порядок определения остаточного ресурса стальных нефтегазопроводов с помощью испытаний микрообразцов:

1) провести анализ технической документации на контролируемый трубопровод, оценить его степень опасности, исходя из нормативно установленной классификации, после чего определить ширину доверительного интервала по таблице 4.5 и интервальный коэффициент k ;

2) установить марку стали исследуемого трубопровода документально либо с помощью дополнительных исследований (механические испытания, химический анализ и т.д.);

3) изготовить не менее трех микрообразцов диаметром 10 мм и толщиной 1 мм из аналогичной марки стали заводского качества и аналогично не менее трех микрообразцов из вырезки исследуемого металла трубопровода;

4) провести испытания микрообразцов на испытательной машине (например, аналогично представленному эксперименту, в разрывной машине Zwick/Roell Z100 (рисунок 2.5)) с построением усредненных диаграмм нагружения в координатах «усилие – перемещение» для стали в исходном состоянии (т.н. «состояние поставки») и для стали контролируемого трубопровода;

5) определить числовые значения характерных точек прочности (F_{m1}, d_{m1}) и текучести (F_{e1}, d_{e1}) для усредненных диаграмм нагружения микрообразцов стали в исходном состоянии и значения (F_{m2}, d_{m2}) и (F_{e2}, d_{e2}) для образцов диагностируемого трубопровода;

6) определить площади криволинейных фигур по диаграммам нагружения микрообразцов стали контролируемого трубопровода $S_{труб.}$ и микрообразцов исходного заводского качества $S_{исх.}$, после чего определить значение разности площадей ΔS по формулам (4.6) – (4.9):

$$\Delta S = S_{труб.} - S_{исх.}, \quad (4.6)$$

$$S_{исх.} = \frac{F_{e1} \cdot d_{e1} + (F_{m1} + F_{e1}) \cdot (d_{m1} - d_{e1})}{2}, \quad (4.7)$$

$$S_{труб.} = \frac{F_{e2} \cdot d_{e2} + (F_{m2} + F_{e2}) \cdot (d_{m2} - d_{e2})}{2}, \quad (4.8)$$

$$\Delta S = \frac{(S_{труб.} - S_{исх.})}{S_{исх.}}. \quad (4.9)$$

7) оценить техническое состояние трубопровода по условиям сохранения работоспособности, приведенным в таблице 4.4. Если трубопровод в данный момент находится в работоспособном состоянии, методом наименьших квадратов определяется функциональная зависимость изменения критерия ΔS по времени t ;

8) по функции изменения интегрального критерия технического состояния ΔS , а также по информации о количестве времени и условиях, в которых трубопровод находился в эксплуатации, провести расчет остаточного ресурса с учетом ширины доверительного интервала ($s_m = k * \sigma$) и с учетом требований нормативных документов установить прогнозируемый срок безопасной эксплуатации трубопровода.

Например, при наличии результатов испытаний микрообразцов в исходном (т.н. заводской поставки) состоянии и в моменты времени t_1, t_2 соответственно $\Delta S_{труб1}, \Delta S_{труб2}$, что позволяет провести прогнозирование остаточного ресурса по линейному закону (4.10):

$$t_{ост} = t_2 + \frac{\Delta S_{пред} - \Delta S_2}{\Delta S_2 - \Delta S_1} \cdot (t_2 - t_1) + k * \sigma. \quad (4.10)$$

Таким образом, можно заключить, что результаты испытаний микрообразцов позволяют получить сведения об изменении механических характеристик металла нефтегазопроводов в процессе эксплуатации. Для получения точных результатов экспериментов необходимо применять микрообразцы диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. По полученным результатам испытаний стальных микрообразцов, отобранных из эксплуатируемых трубопроводов, в сравнении с данными металла в исходном состоянии, дается оценка технического состояния и проводится прогноз работоспособности нефтегазопровода.

4.4 Рекомендации по отбору проб для микрообразцового метода SPT при определении остаточного ресурса

Стандартный метод статических испытаний в соответствии с ГОСТ 1497-84 [11] имеет значительный недостаток в виде долгосрочного процесса изготовления образцов в лаборатории из отобранных проб. Микрообразцовый метод (SPT) в отличие от стандартного обладает оперативностью и мобильностью.

Для быстрого отбора проб (микрообразцов) трубопроводной стали в трассовых условиях, либо на технологических площадках возможно применение специально разработанных для этих целей типа аппаратов. Одним из существующих вариантов, как пример, является использование разработки чешского научно-исследовательского института в области машиностроения «Vítkovice Research & Development»[111]. Инструмент для отбора проб стали имеет название «SSam2TM Surface Sampling Systems», внешний вид которого представлен на рисунке 4.3. Геометрически данный аппарат представляет собой устройство цилиндрической формы с диаметром 70 мм и длиной 400 мм.



Рисунок 4.3 – Внешний вид инструмента для отбора проб стали «SSam2™ Surface Sampling Systems»

Данный инструмент относится к категории систем квази-неразрушающего отбора проб, так как способен отбирать образцы стали из технологического оборудования без его вывода из эксплуатации и, что наиболее важно, без значительного повреждения целостности материала данного оборудования. Это преимущество можно использовать при определении состояния стали вспомогательного трубопроводного оборудования: футляров, кожухов, трубопроводных опор и т.д.

Необходимо отметить, что для оборудования, работающего под давлением внутренней среды (нефть, природный газ, газоконденсат), к которому непосредственно относятся трубопроводы, нормативной документацией и правилами безопасной эксплуатации запрещается вырезка образцов без вывода указанного оборудования из эксплуатации. Поэтому, с точки зрения отбора проб трубопроводных сталей, возможность получения микрообразцов из вырезанных катушек нефтегазопроводов для проведения испытаний, как дополнительного метода определения состояния физико-механических свойств металла, существует при проведении одного из видов ремонта с остановкой эксплуатации исследуемого участка.

Примеры отбора микрообразцов стали из вырезанных во время ремонта катушек трубопроводов и футляров при помощи специального инструмента «SSam2™ Surface Sampling Systems» приведены на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Отбор проб стали при помощи аппарата «SSam2™ Surface Sampling Systems» с вырезанных катушек и футляров трубопроводов

Резец в данном аппарате имеет полусферическую (чашеобразную) форму с режущей кромкой по краю (рисунок 4.5) Такая конструкция позволяет без термического воздействия вырезать готовые для дальнейших испытаний микрообразцы с сохранением первоначальных механических свойств исследуемой стали. Скорость вращения полусферического резца в данном аппарате может достигать 10000 оборотов в минуту. Для резки применяется масляная система смазки.

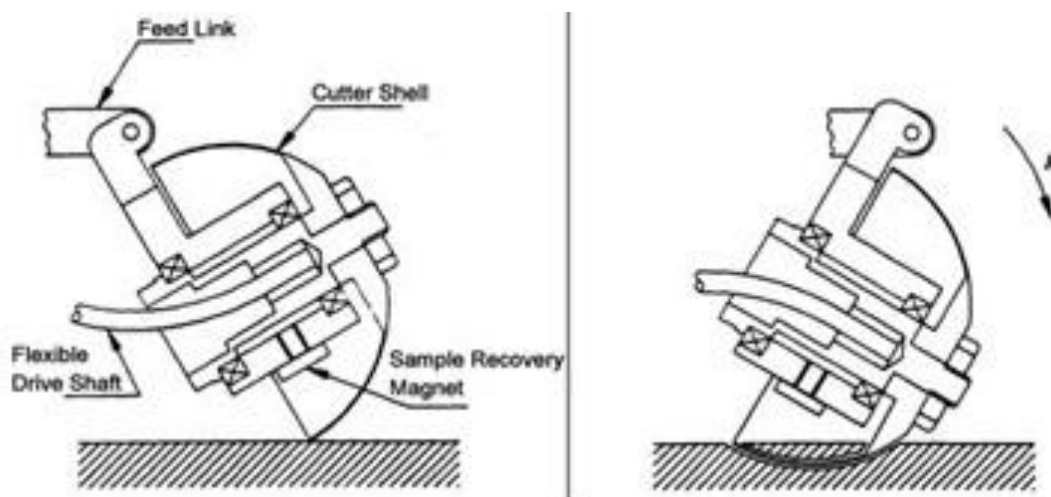


Рисунок 4.5 – Отбор проб стали полусферическим резцом в аппарате «SSam2™ Surface Sampling Systems»

Толщина отбора проб стали может варьироваться от 0,5 мм до 2,5 мм и более в зависимости от геометрических параметров применяемого резца. Аналогично может изменяться и диаметр нарезки – от 5 мм до 25 мм [62].

Получаемые микрообразцы представлены на рисунке 4.5. Геометрические параметры отобранных проб стали, которые может обеспечить аппарат «SSam2™ Surface Sampling Systems», подходят под рекомендации, указанные в экспериментальной части данной работы: диаметр 10 мм, толщина 1 мм (рисунок 4.6).

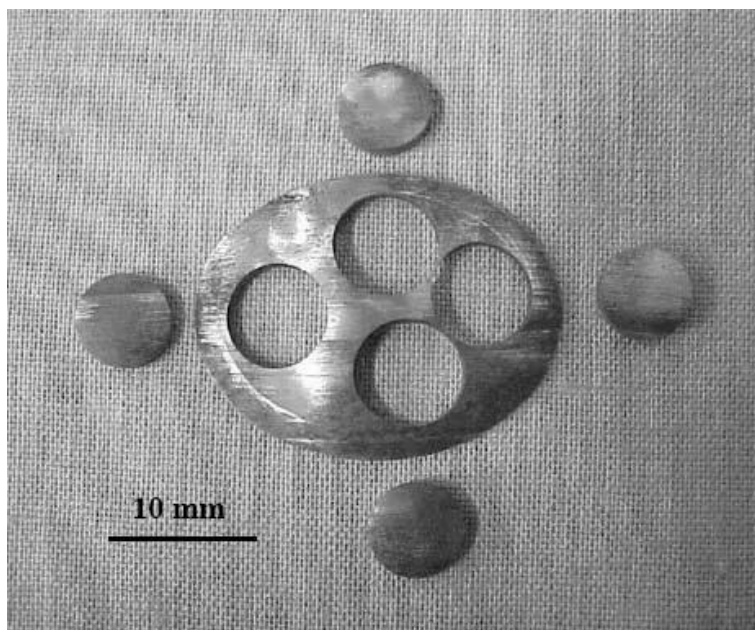


Рисунок 4.6 – Полученные микрообразцы при резке аппаратом «SSam2™ SurfaceSamplingSystems»

Основные преимущества данного типа устройств для отбора проб стали на примере аппарата «SSam2™ SurfaceSamplingSystems»:

- небольшие геометрические размеры, что позволяет использовать его для оперативного отбора проб стали в трассовых условиях или на технологических площадках;
- относится к категории систем квазинеразрушающего отбора проб, что позволяет отбирать микрообразцы без значительного повреждения целостности материала;
- специальная конструкция резца позволяет без термического воздействия вырезать микрообразцы с сохранением первоначальных механических свойств исследуемой стали;

- получаемые микрообразцы не требуют доработки и подгонки под необходимые геометрические параметры для проведения испытаний методом SPT и сразу готовы к исследованиям.

Использование аппаратов подобного типа делает микрообразцовый метод SPT более универсальным, мобильным и технологически оперативным.

4.5 Выводы по Главе 4

1. Выполнено обоснование применения интегрального критерия, вычисляемого по диаграмме нагружения микрообразцов, для оценки технического состояния стальных трубопроводов. Показано, что значения интегрального критерия соответствуют уровню эквивалентных напряжений, возникающих при эксплуатации трубопровода.

2. Разработан алгоритм определения остаточного ресурса нефтегазопроводов, основанный на периодической оценке интегрального критерия, принятого в качестве показателя, зависящего от степени повреждения трубопровода и характеризующего его техническое состояние.

3. Предложена методика оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов по результатам испытаний микрообразцов методом SPT с дифференциацией степени опасности стальных трубопроводов.

4. Даны рекомендации по подбору оборудования, позволяющего проводить отбор микрообразцов из стальных трубопроводов для проведения механических испытаний методом SPT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит теоретические и экспериментальные исследования, направленные на решение научной задачи по совершенствованию процедуры оценки технического состояния нефтегазопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса по изменению прочностных характеристик материалов в процессе эксплуатации.

В ходе работы был проведен обзор существующих методов испытаний металлических образцов для диагностики состояния металла конструкций нефтегазового оборудования, рассмотрены основные и альтернативные методы оценки их физико-механических характеристик. Рассмотрены новые методы проведения испытаний, которые позволяют оценить динамику изменений физико-механических характеристик сталей, используемых для оценки работоспособности нефтегазового оборудования и трубопроводов. Установлено, что существует необходимость развития альтернативных методов испытаний, которые позволят оперативно получать реальные характеристики трубных сталей в условиях эксплуатации.

Обоснована математическая конечно-элементная модель в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Результаты моделирования показали, что модель адекватно описывает уровень напряженно-деформированного состояния образцов, позволяет провести предварительную оценку возможности измерения физико-механических свойств образцов для низкоуглеродистой стали, и может быть использована в исследованиях для предварительного планирования лабораторных исследований и оценки свойств углеродистых сталей. Приведена постановка эксперимента с микрообразцами методом SPT, предложена подготовка оснастки и микрообразцов для проведения испытаний, дан метод обработки получившихся экспериментальных данных с определением численных показателей усилия и деформации характерных точек прочности и текучести.

Разработана экспериментальная методика проведения механических испытаний микрообразцов (SPT – Small Punch Test). Экспериментально было

установлено, что предварительные механические нагрузки приводят изменению поврежденности материалов. Было выявлено, что полученные значения контролируемых параметров (характерных точек текучести и прочности) при испытаниях микрообразцов, в зависимости от роста уровня предварительного нагружения исходных стандартных образцов, возрастали по линейной зависимости. Для определения степени поврежденности исследуемых трубопроводных сталей предложен интегральный критерий, определяемый по характерным точкам экспериментальной диаграммы нагружения микрообразцов.

Обоснована и разработана методика определения технического состояния и оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов с применением интегрального критерия поврежденности, основанного на оценке напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов. Представлены рекомендации по применению технических средств для отбора микрообразцов для проведения испытаний. Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к внедрению при эксплуатации нефтегазовых трубопроводов, выполненных из углеродистых сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдулин, И.Г.** Анализ стадий зарождения и развития малоцикловой коррозионной усталости металла магистральных нефтепроводов / И.Г. Абдулин, А.Г. Гареев, М.А. Худяков // Трубопроводный транспорт нефти. – 1999. – № 6. – С. 31-34.
2. **Большаков, А.М.** Анализ разрушений и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера // Газовая промышленность. – 2010. – №5. – С. 52-53.
3. **Большаков, А.М.** Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности / А.М. Большаков, Н.И. Голиков, А.С. Сыромятникова, А.А. Алексеев и др. // Газовая промышленность. – 2007. – №7. – С. 89-91.
4. **Ботвинкин, Е.Б.** Актуальные аспекты прокурорского надзора за соблюдением требований промышленной и экологической безопасности при эксплуатации трубопроводного транспорта в ХМАО / Е.Б. Ботвинкин, М.Ю. Альшевский // Прокурор. - 2016. - № 3. - С. 36-40.
5. **Воронин, В.Н.** Определение характеристик металла газопроводов на основе статистики твердости с малой нагрузкой / В.Н. Воронин, О.В. Смирнов, А.С. Кузьбожев, Р.В. Агинея // Обзорная информация. Серия «Транспорт и подземное хранение газа». – Москва: ИРЦ Газпром, 2008. – 99 с.
6. **ВСН 53-86(р)** Правила оценки физического износа жилых зданий. – Москва: Госгражданстрой, 2013. – 98 с.
7. **Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году** // Ростехнадзор: [сайт]. - URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 18.01.2019) – Текст: электронный.
8. **Горицкий, В.М.** Диагностика металлов / В.М. Горицкий. – Москва: Металлургиздат, 2004. – 408 с.

9. **ГОСТ 27.002-2015** «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения». – Москва: Стандартинформ, 2016. – 42 с.
10. **ГОСТ 10705-80**. Трубы стальные электросварные. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 23 с.
11. **ГОСТ 1497-84**. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 26 с.
12. **ГОСТ Р 8.736-2011**. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2011 – 21 с.
13. **ГОСТ Р 53006-2008**. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 35 с.
14. **ГОСТ 9450-76** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. - Москва: Издательство стандартов, 1993. – 91 с.
15. **Грызунов, В.И.** Механика материалов (методы механических испытаний материалов): учебное пособие / В.И. Грызунов, Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев. – Орск, 2012. – 396 с.
16. **Гумеров, А.Г.** Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков. – Москва: Недра, 1995. – 218 с.
17. **Драгунов, Ю.Г.** Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – Москва, 2014. – 1216 с.
18. **Диньмухаметова, Л.С.** Оценка остаточного ресурса сварных конструкций с несплошностями / Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев // Прочность и разрушение материалов и конструкций: материалы VI Международной научной конференции. – 2010. – С. 577-582.
19. **Долгий, А.А.** Опыт оценки ресурса магистральных трубопроводов, претерпевших длительные эксплуатационные воздействия / А.А. Долгий, А.Я. Красовский, И.А. Маковецкая, В.М. Тороп // Материалы международной

научно-технической конференции «Прочность и надежность магистральных трубопроводов» (МТ-2008). – Киев: Институт проблем прочности НАНУ, 2008. – С. 128-135.

20. **Иванова, В.С.** Дислокационная структура и деформационное старение в процессе усталости ОЦК-металлов / В.С. Иванова, В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев // Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей и свойства металлов. – Тула: Издательство Тульского политехнического института, 1974. – С. 181-187.

21. **Иванова, В.С.** К вопросу о деформационном старении в процессе циклического нагружения / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев, В.М. Горицкий // Проблемы прочности. – 1973. – №3. – С. 25–29.

22. **Идрисов, Р.Х.** Анализ аварийности магистральных трубопроводов России / К.Р. Идрисова, Д.С. Кормакова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 2. – С. 44-46.

23. **Ильин, С.И.** Изменение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой / С.И. Ильин, М.А. Смирнов, Ю.И. Пашков, Ю.И. Анисимов и др. // Изв. ЧНЦ. Физическая химия и технология неорганических материалов. – 2002. – Т. 17, вып. 4. – С. 42-46.

24. Информационное сообщение Минприроды России от 22 июля 2015 года // Минприроды России: [сайт]. – URL: <https://www.mnr.gov.ru/news/detail.php?ID=141640> (дата обращения 06.01.2017) – Текст: электронный.

25. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы: в 2 кн. Кн. 1 Численный анализ/ Н.Н. Калиткин, Е.А. Альшина Е.А. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 304 с.

26. **Ковшова, Ю.С.** Оценка поврежденности и ресурса оболочковых конструкций, работающих в режиме квазистатического нагружения / Ю.С. Ковшова. Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Сервисные услуги в добыче нефти. Материалы II научно-технической конференции УГНТУ. – Уфа, 2015. – С. 362-367.

27. **Кудашев, Р.Р.** Определение предельного состояния материала оболочковых конструкций по результатам измерения электрических свойств / Р.Р. Кудашев, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Н.М. Фахрутдинов // Сборник материалов научно-практической конференции «Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов». – Уфа, 2015. – С. 149-152.

28. **Кузеев, И.Р.** Методика определения напряженно-деформированного состояния стального цилиндрического резервуара / И.Р. Кузеев, Р.Р. Тляшева, С.М. Мансурова, А.В. Ивакин // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 4. — С. 339-347.

29. **Кузеев, И.Р.** Оценка ресурса рамных металлических конструкций / И.Р. Кузеев, А.А. Миннихметова // Остаточный ресурс нефтезаводского оборудования. Материалы Международной научно-технической конференции. – Уфа, 2014. – С. 174-175.

30. **Кузеев, И.Р.** Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред / И.Р. Кузеев, Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова // Нефтегазовое дело. – 2011. – №6. – С. 254-262.

31. **Кузеев, И.Р.** Совершенствование методов оценки остаточного ресурса нефтезаводского оборудования / И.Р.Кузеев, Н.А. Махутов, М.И. Кузеев и др. // Остаточный ресурс нефтегазового оборудования: сб. науч. трудов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. – С. 48-64.

32. **Кузеев, И.Р.** Оценка предельного состояния конструкционных материалов феррозондовым методом контроля / И.Р. Кузеев, О.Г. Кондрашова, А.Т. Шарипкулова, Е.А. Наумкин // Нефтегазовое дело. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – С. 293-297.

33. **Кузьминов, А.Л.** Методика расчета остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных кранов на основе теории возможностей / А.Л. Кузьминов, В.С. Уткин, А.В. Кожевников, Н.Г. Канев // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб.науч.трудов. – Москва: МДП, 2008. – С. 225-231.

34. **Ланчаков, Г.А.** Работоспособность трубопроводов. Сопротивляемость

разрушению / Г.А. Ланчаков, Е.Е. Зорин, Ю.И. Пашков, А.И. Степаненко. – Москва: Недра, 2001. – 350 с.

35. **Лякишев, Н.П.** Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Н.П. Лякишев, М.М. Кантор, В.Н. Воронин, В.Н. Тимофеев и др. // Металлы. – 2005. – №1. – С. 13-16.

36. **Макарова, Н.Г.** Оценка состояния металла труб нефтегазопроводов в процессе эксплуатации методом измерения микротвердости: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.19 / Макарова Наталья Георгиевна. – Москва, 2001. – 133 с.

37. **Махутов, Н.А.** Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации / Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков, Ю.А. Кравцова, Л.Р. Ботвина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73. – №2. – С. 35-43.

38. **Мельчаков, А.П.** Прогноз, оценка и регулирование риска аварии зданий и сооружений. Теория, методология и инженерные приложения / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 111 с.

39. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. – Москва: Росавтодор, 2002. – 146 с.

40. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов (РД 03-421-01). Утв. пост. Госгортехнадзора России от 06.09.01 № 39. – Москва, 2001. – 88 с.

41. **Микрюков, В.Р.** Физическая природа деградации свойств, фазового состава и дефектной субструктуры арматурной стали при длительной эксплуатации / Микрюков В.Р., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. – Новокузнецк: Изд. СибГИУ, 2007. – 170 с.

42. **Михалев, А.Ю.** Разработка метода оценки остаточного ресурса основного металла труб нефтегазопроводов на основе измерения твердости с малой нагрузкой: автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук: 25.00.19 / Михалев Андрей Юрьевич. – Ухта, 2012. – 23 с.

43. **Мочернюк, Н.П.** Влияние времени эксплуатации магистрального газопровода и рабочего давления газа на физико-механические характеристики трубной стали 19Г / Н.П. Мочернюк, С.М. Красневский, Г.И. Лазаревич, Ц.Д. Сорохан и др. // Газовая промышленность. – 1991. – №3. – С. 34-36.

44. **Наумкин, Е.А.** Локальное изменение свойств конструкционных сталей при усталостном накоплении повреждений / Е.А. Наумкин, М.И. Кузеев // НТЖ «Нефтегазовое дело». – Уфа, 2007.- Т.1,- №5.- С. 193-196.

45. **Одесский П.Д.** О деградации свойств сталей для металлических конструкций / П.Д.Одесский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69. – №10. – С.86-92.

46. Отчет руководства ПАО «Газпром» за 2018 г. // ПАО Газпром: [сайт]. – URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/65/760043/2018-mgt-report-ru.pdf> (дата обращения 25.02.2019) – Текст: электронный.

47. **Паламарчук, А.В.** Прокурорский надзор за исполнением законов в Арктической зоне (доклад начальника Главного управления по надзору за исполнением федерального законодательства Генеральной прокуратуры Российской Федерации А.В. Паламарчука). // Прокурор. - 2016. - № 2. - С. 38-47.

48. **Пенкин, А.Г.** Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, Л.Г. Маслов. – Москва: Интерконтакт наука, 2004. – 70 с.

49. **Петраков, Д.Г.** Последние достижения в области испытаний на изгиб малых образцов / Д.Г. Петраков, Д.С. Петров, Л.Г. Самигуллина // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник статей XXXIV Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ЦРНИ, 2017. – С. 87-93.

50. **Петров, Д.С.** Применение метода испытаний микрообразцов для мониторинга состояния металла нефтегазовых объектов / Д.С. Петров,

Л.Г. Самигуллина // XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)»: сборник тезисов. – Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2017. – С. 455–170.

51. **Пирогов, А.Г.** Динамика изменения свойств металла труб при эксплуатации трубопроводов / А.Г. Пирогов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья: 4-й Конгресс нефтепромышленников России. – Уфа, 2004. – С. 41-49.

52. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 №1 (ред. от 28.04.2018) «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы». – Москва: 2002. – 54 с.

53. Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Москва: Недра, 1995. – 218 с.

54. **РД ЭО 0027-2005.** Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости.

55. **РД 26.260.004-91.** «Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации». – Москва: Изд-во НИИхиммаш, 1996. - 69 с.

56. **СА-03-006-06.** Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений предприятий, эксплуатирующих взрывопожароопасные и химически опасные объекты. – Москва, 2008. – 236 с.

57. **Самигуллин, Г.Х.** Обеспечение безопасности и ресурса нефтегазовых трубопроводов на основе результатов испытаний микрообразцов: монография / Г.Х. Самигуллин, А.М. Щипачев, А.В. Клейменов, Л.Г. Самигуллина. – СПб: ЛЕМА. - 2020 – 101 с.

58. **Самигуллин, Г.Х.** Оценка поврежденности металлических элементов нефтегазовых объектов микрообразцовым методом / Г.Х. Самигуллин,

М.Н. Назарова, Л.Г. Самигуллина, Г.А. Юсупов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. – 2016. – №6. – С. 311-320.

59. **Самигуллин, Г.Х.** Оценка структурных параметров углеродистых сталей ультразвуковым методом / Г.Х. Самигуллин, Л.Г. Самигуллина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. - №10-4 (41). – С. 28-32.

60. **Самигуллин, Г.Х.** Оценка применения метода испытаний микрообразцов для определения остаточного ресурса технических объектов / Г.Х. Самигуллин, Д.С. Петров, Л.Г. Самигуллина // Приоритеты и научное обеспечение технологического прогресса: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 124-127.

61. **Самигуллин, Г.Х.** Применение микрообразцового метода для оценки поврежденности металлических элементов / Г.Х. Самигуллин, М.Н. Назарова, Л.Г. Самигуллина // Физика. Технологии. Инновации: ФТИ-2016: материалы конференции. -2016. - С. 490-492.

62. **Самигуллина, Л.Г.** Оценка применения метода испытаний микрообразцов для определения состояния трубопроводных сталей / Л.Г. Самигуллина, Д.С. Петров // Трубопроводный транспорт - 2017: Материалы XII Международной учебно-научно-практической конференции. – Уфа: УГНТУ, 2017. - С. 309-311.

63. **Сиегл, Я.** Оценка механических свойств материалов компонент АЭС использованием современных методов и их сравнение с традиционными механическими испытаниями / Я. Сиегл, Я. Штефан, Р. Коприва, И. Елиашова // Сборник трудов 17-й международной научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2015. – С. 10-17.

64. **Смыслов, А.М.** Прогнозирование усталостной долговечности титанового сплава BT18У при повышенных температурах с учетом технологии обработки поверхности / А.М. Смыслов, А.М. Щипачев // Изв. вузов.

Авиационная техника. – 1999. – №2. – С. 62-65.

65. **СНиП 2.05.06-85.** Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы. – Москва: Изд. Гос. Комитета СССР по делам строительства, 1985. – 53 с.

66. **СП 42-102-2004.** «Проектирование и строительство газопроводов из металлических труб». – Москва: Изд-во Стандартиформ, 2009. - 47 с.

67. **Стеклов, О.И.** Надежность магистральных газопроводов в условиях интенсификации процессов коррозии и старения // Сварочное производство. – 2010. – №5. – С. 40-43.

68. **СТО Газпром 2-2.3-253-2009.** «Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов». – Москва: Изд-во ООО «Газпром экспо», 2009. – 79 с.

69. **Сущев, С.П.** Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки/ С.П. Сущев, Н.А. Самолинов, И.А. Адаменко // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. трудов. Вып. 8. – Москва: МДП, 2009. – С. 320–327.

70. **Соколов, В.А.** Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания / В.А. Соколов // Предотвращение аварий зданий и сооружений, 2015. – URL: <http://pamag.ru/prensa/oktssk-zis>. (дата обращения 25.03.2017) – Текст: электронный.

71. **Терентьев, В.Ф.** О пределе выносливости металлических материалов / В.Ф.Терентьев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – №7. –С. 15-19.

72. **Терентьев, В.Ф.** Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. – Москва: Наука, 2003. – 254 с.

73. **Трощенко, В.Т.** Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие / В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский и др. – Киев: Наук. думка, 1993. – 990 с.

74. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности

«Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления».

75. **Филиппов, Г.А.** Деградация свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов / Г.А. Филиппов, О.В. Ливанова, В.Ф. Дмитриев // Сталь. – 2003. – №2. – С. 84-87.

76. **Фунтусов, Е.А.** Верификация масштабной модели обсадной колонны в системе Abaqus при испытании на растяжение / Е.А. Фунтусов // Нефтегазовое дело. – 2014. – №2. С. 278–293.

77. **Чухарева, Н.В.** Анализ причин аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера в период с 2000 по 2010 гг. / Н.В. Чухарева, Т.В. Тихонова, С.А. Миронов // Нефтегазовое дело. – 2011. – №3. – С. 231-243.

78. **Шаммазов, А.М.** Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов и др. – Москва: Изд-во «Недра», 2005. – Т.1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. – 705 с.

79. **Шахматов, М.В.** Оценка допустимой дефектности нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев, К.М. Гумеров // Строительство трубопроводов. – 1991. – № 12. – С. 37-41.

80. **Шматков, С.Б.** Определение остаточного ресурса промышленных дымовых труб / С.Б. Шматков // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов. – Москва: МДП, 2008. – С. 44–51.

81. **Щипачев, А.М.** К вопросу о создании методики для прогнозирования усталостной долговечности / А.М. Щипачев, А.М. Смыслов // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: межвуз. науч. сб. – Уфа: УАИ., 1983. – С. 15-20.

82. **Щипачев, А.М.** Термодинамическая теория прочности: прогнозирование многоциклового усталости металлов / А.М. Щипачев. – Уфа: УТИС, 1998. – 107 с.

83. **Щипачев, А.М.** Термодинамическая теория прочности: прогнозирование усталости металлов / А.М. Щипачев. – LAPLAMBERT Academic Publishing, 2018. – 108 с.

84. **Щипачев, А.М.** Энергетические представления о прочности и разрушении. Проблема оценки повреждаемости металла / А.М. Щипачев // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2015. – №5. – С. 120-124.

85. **Щипачев, А.М.** Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла / А.М. Щипачев, Е.В. Пояркова // Вестник УГАТУ, 2007. – т.9, № 6 (24). – С. 152-157.

86. **Щипачев, А.М.** Модифицированная термодинамическая теория прочности / А.М. Щипачев // Вестник АН РБ, 2005. – т. 10, № 1. – С. 21-24.

87. **Ямалеев, К.М.** Старение металла труб в процессе эксплуатации трубопроводов / К.М. Ямалеев. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1990. – 64 с.

88. Allround Line Z100 TEW, 100 kN, Retro Linetest Control II. – URL:https://www.zwickroell.com/ru-ru/pre-owned-testing-machines/1063376_zwickroell_z100_tew_100kn (дата обращения 16.01.2017) - Режим доступа для авториз. пользователей – Текст электронный.

89. **ASTM F2183:** Standard test method for small punch testing of ultra-high molecular weight polyethylene used in surgical implants. – 2008.

90. **Baik, Jai-Man.** Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel / Jai-Man Baik, J. Kameda, O. Buck // Scripta Metallurgica. – 2013. – Vol. 17, issue 12. – PP. 1443-1447.

91. **Blagoeva, D.T.** Application of the CEN (european committee for standardization) small punch creep testing code of practice to a representative repair welded p91 pipe / D.T. Blagoeva, R.C. Hurst // Materials Science and Engineering A, 510-511(C). – 2009. – PP. 219-223.

92. **Bruchhausen, M.** Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT / M. Bruchhausen, S. Holmström, I. Simonovski, T. Austin, J.-

M. Lapetite, S. Ripplinger, F. de Haan // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2016. – Vol. 86. – PP. 2-10.

93. **Bulloch, J.H.** A study concerning material fracture toughness and some small punch tests data for low alloy steels /J.H. Bulloch // Engineering failure analysis. – 2004. – Vol. 11. – PP. 635-653.

94. **Contreras, M.A.** Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels /M.A. Contreras, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Betegón //Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2008. – Vol. 31, issue 9. – PP. 727-737.

95. **Cuesta, I.I.** Determination of the Gurson-Tvergaard damage model parameters for simulating small punch tests /I.I. Cuesta, J.M. Alegre, R. Lacalle // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2010. – Vol. 33. – PP. 703-713.

96. **CWA 15627:** Small Punch Test method for metallic materials, Part B: A code of practice for small punch testing for tensile and fracture behaviour. – 2007.

97. **Džugan, J.** Evaluation of fracture toughness properties for low carbon steel in the brittle state by small punch test technique / J. Džugan, P. Konopík // Hutnické listy. – 2010. – Vol. LXIII. – PP. 119-122.

98. **Ha, J.S.** Small Punch Tests to Estimate the Mechanical Properties of Steels for Steam Power Plant: II. Fracture Toughness / J.S. Ha, E. Fleury // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1998. – Vol. 75. – PP. 707-713.

99. **Hurst, R.** The European Code of Practice for Small Punch Testing – where do we go from here? / R. Hurst, K. Matocha //Proc. of 1st International Conference SSTT «Determination of Mechanical properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testing Techniques» – Metallurgical Journal. – 2010. – Vol. LXIII. – PP. 5-11.

100. **Hyde, T.H.** Requirements for and use of miniature test specimens to provide mechanical and creep properties of materials: a review / T.H. Hyde, W. Sun, J.A. Williams // International Materials Review. – 2007. – Vol. 52, issue 43. – PP. 213-255.

101. **Klevtso, V.I.** Experience in Tensile Properties Determination by Small Punch Test / V. I. Klevtso, A. Dedov // *Hutnické listy*. – 2010. – Vol. LXIII. – PP. 128-132.
102. **Konopík, P.** Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CrNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test / P. Konopík, J. Džugan // *Conference proceeding: 2nd International conference*. – 2012. – PP. 319-328.
103. **Konopík, P.** Determination of fracture toughness and tensile properties of structural steels by small punch test and micro-tensile test / P. Konopík, J. Džugan, R. Procházka // *Metal*. – 2013. – Vol. 5. – PP. 15-17.
104. **Konopík, P.** Small punch test application to fracture toughness determination in the upper shelf region / P. Konopík, J. Džugan // *Hutnické listy*. – 2010. – Vol. LXIII. – PP. 123-127.
105. **Lacalle, R.** Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results / R. Lacalle, J.A. Alvarez, F. Gutierrez-Solana // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2008. – Vol. 31. – PP. 841-849.
106. **Lacalle, R.** From Archaeology to Precious Metals: Four Applications of Small Punch Test / R. Lacalle, J.A. Alvarez, S. Cicero // *Hutnické listy*. – 2010. – Vol. LXIII. – PP. 59-68.
107. **Liu, Miao** Small punch test simulation of laminated magnesium alloy composite with aluminum/silicon carbide pattern-reinforcement / Miao Liu // *Iowa State University*, 2016. – 53 p.
108. **Lucas, G.E.** The development of small specimen mechanical test techniques / G.E. Lucas // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – Vol. 117, issue 7. – PP. 327-339.
109. **Maruschak, P.** Effect of long – term operation on steels of main gas pipeline: Structural and mechanical degradation / P. Maruschak, S. Panin, M. Chausov, R. Bishchak, U. Polyvana // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2018. - №30. - PP. 363-367.
110. **Matocha, K.** The Evaluation of Materials Properties of in-Service

components by Small Punch Tests / K. Matocha, J. Purmenschky // Journal of KONES Powertrain and transport. – 2009. – Vol. 16, no 4. – P. 315.

111. **Matocha, K.** The evaluation of actual mechanical properties of materials by small punch tests / K. Matocha, P. Čížek, L. Kander // Material and metallurgical research. – Ostrava, Czech Rep, 2007 – PP. 145-151.

112. **Misawa, T.** Small punch tests for evaluating ductile-brittle transition behavior of irradiated ferritic steels / T. Misawa, T. Adachi, M. Saito, Y. Hamaguchi // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 150, issue 2. – PP. 194-202.

113. **Nikolaev A.K.** Non-stationary operation of gas pipeline based on selection of travel / A.K. Nikolaev, G. H. Samigullin, V.G. Fetisov, L.G. Samigullina // IOP conference series: Materials Science and Engineering / - 2018. -Vol. 327. – 022074.

114. **Ottosson, Jan Benjamin** Development and Evaluation of a Small. Punch Testing Device / Jan Benjamin Ottosson // Linköpings universitet. 2010. – PP. 1-53.

115. **Penuelas, I.** Inverse determination of the elastoplastic and damage parameters on small punch tests / I. Penuelas, I.I. Cuesta, C. Betegon, C. Rodriguez, F.J. Belzunce // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2009. – Vol. 32. – PP. 872-885.

116. **Ruan, Y.** Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests / Y. Ruan, P. Spatig, M. Victoria // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – PP. 307-311.

117. **Sarja, A.** Durability desing of concrete structures. Report of RILEM Technical Committee 130-csl. / Edited by A. Sarja and E. Vesicary // – E&SPON, 2014. – 165 p.

118. **Samigullin, G.H.** Control of physical and mechanical characteristics of steel by small punch test method / G.H. Samigullin, A.M. Schipachev, L.G. Samigullina // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 1118, Complex Equipment of Quality Control Laboratories. – 2018. – 012038

119. **Samigullin, G.H.** Assessment of damage of metallic elements in oil and gas facilities using small punch test / G. H. Samigullin, A.M. Schipachev, L.G. Samigullina, V.G. Fetisov// International Journal of Applied Engineering

Research. – 2017. –Vol. 12, Number 21. - PP. 11583-11587

120. **Shekhter, A.** Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr–1Mo–0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K_{Ic} fracture toughness and small punch test / A. Shekhter, S. Kim, D.G. Carr, A.B.L. Croker, S.P. Ringer // Int. J. Press. Vessels Piping. – 2002. –Vol. 79. – PP. 611-615.

121. **Shindo, Z.** Small punch testing for determining the cryogenic fracture properties of 304 and 316 austenitic stainless steels in a high magnetic field / Z. Shindo, Z. Zamaguchi, K. Horiguchi // Cryogenics. – 2004. – Vol. 44, issue 11. – PP. 789-792.

122. **Wang, Z.-X.** Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses / Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Vol. 238, issue 12. – PP. 3186-3193.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свойства стали Ст3

Химический состав, механические свойства и ударная вязкость проката из стали Ст3 представлены ниже в таблицах А1.1 - 1.3. Для проведения стандартных и микрообразцовых испытаний использовались образцы, изготовленные из стали Ст3 полуспокойным способом раскисления.

Таблица А.1 – Химический состав в % материала стали Ст3

Марка стали	Массовая доля элементов, %		
	углерода	марганца	кремния
Ст3кп	0,14-0,22	0,30-0,60	до 0,05
Ст3пс		0,40-0,65	0,05-0,15
Ст3сп			0,15-0,30
Ст3Гпс		0,80-1,10	до 0,15
Ст3Гсп	0,14-0,20		0,15-0,30

Таблица А.2 – Механические свойства материала стали Ст3

	Механические свойства*		
Марка стали	Временное сопротивление σ_s , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Ст3кп	360-460	235	27
Ст3пс	370-480	245	26
Ст3сп	380-490	245	26
Ст3Гпс	370-490	245	26
Ст3Гсп	390-570	245	24

* при толщине до 20 мм

Таблица А.3 – Ударная вязкость проката из стали Ст3

Марка стали*	Толщина проката	Ударная вязкость, Дж/см ² , не менее				
		КСУ			КСV	
		+20°C	–20°C	после механического старения	+20°C	–20°C
Ст3пс	3,0-5,0	-	49	49	-	9,8
Ст3сп	5,1-10,0	108	49	49	34	-
Ст3Гпс	10,1-26,0	98	29	29	34	-
Ст3Гсп	26,1-40,0	88	-	-	-	-

* для стали Ст3кп ударная вязкость не нормируется

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сведения о машине Zwick/Roell Z100

Универсальная машина для испытания материалов Zwick/Roell Z100 напольного исполнения предназначена для определения механических свойств материалов в диапазоне температур от -80°C до $+1200^{\circ}\text{C}$ при растяжении, сжатии и изгибе, изучения гистерезиса, поведения материалов при малоцикловом нагружении. Нагружение осуществляется при помощи электромеханического привода высокой точности. Машина оснащена гидравлическими захватами, максимальное давление зажима 500 бар. Она позволяет испытывать на разрыв цилиндрические и плоские образцы. Датчик продольной деформации позволяет с высокой точностью измерять удлинение образца при испытаниях на растяжение. В комплект дополнительного оборудования входит шиберная система, позволяющая испытывать на разрыв круглые образцы с резьбой M10, M12, M14 и M16. Характеристики машины представлены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Нагружающие рамы и приводы для испытательной машины серии Z100

Исполнение	Напольное
Максимальное усилие, кН	100
Рабочая зона	
Высотаукороченная, мм	-
нормальная, мм	1824
увеличенная, мм	-
выше и шире, мм	1765
Ширина нормальная, мм	630
шире, мм	1030
Глубина, мм	Неограниченная

Продолжение таблицы Б.1

Скорость перемещения траверсы (максимальная), мм/мин.	200/1000
Разрешение хода траверсы, мкм	0,0136
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5

В состав системы входит персональный компьютер с управляющим программным обеспечением testXpert II. TestXpert II – это разработанное фирмой Zwick универсальное программное обеспечение на актуальной платформе Microsoft Windows для испытаний материалов, деталей и для проведения функциональных испытаний. Основной спектр задач testXpert II:

- подготовка испытания или серии испытаний;
- проведение испытаний;
- вычисление и сохранение данных;
- обработка данных;
- контроль качества;
- перенос данных в другие программы (Word, Excel и проч.).

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Экспериментальные диаграммы

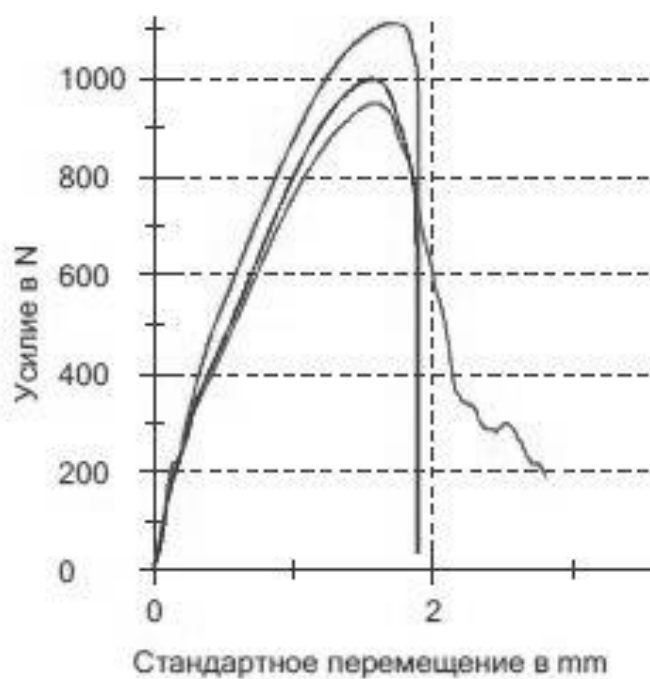


Рисунок В.1 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов $D=5\text{mm}$; $h=0.5$

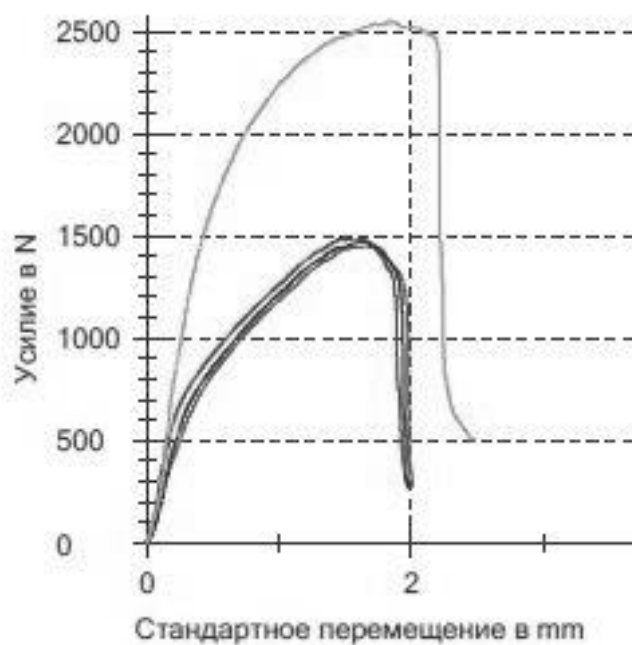


Рисунок В.2 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов $D=5$; $h=1$ и $h=1.5$

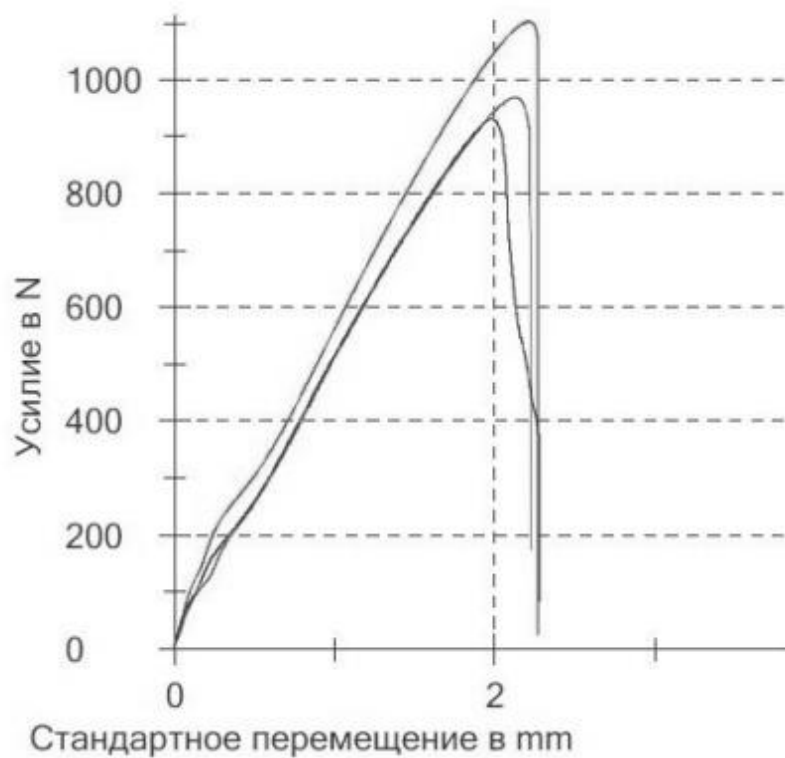


Рисунок В.3 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов D=10 мм; h=0,5 мм

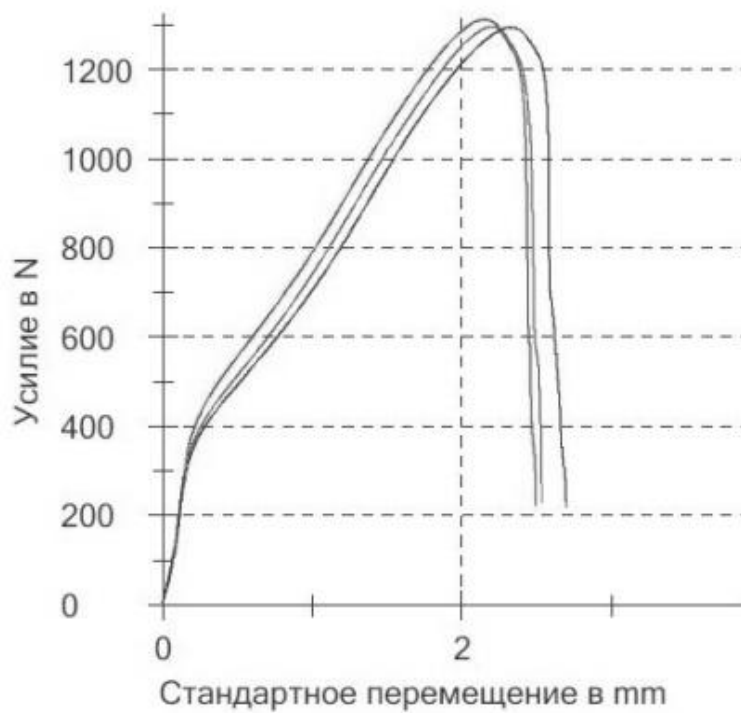


Рисунок В.4 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов D=10 мм h=1 мм

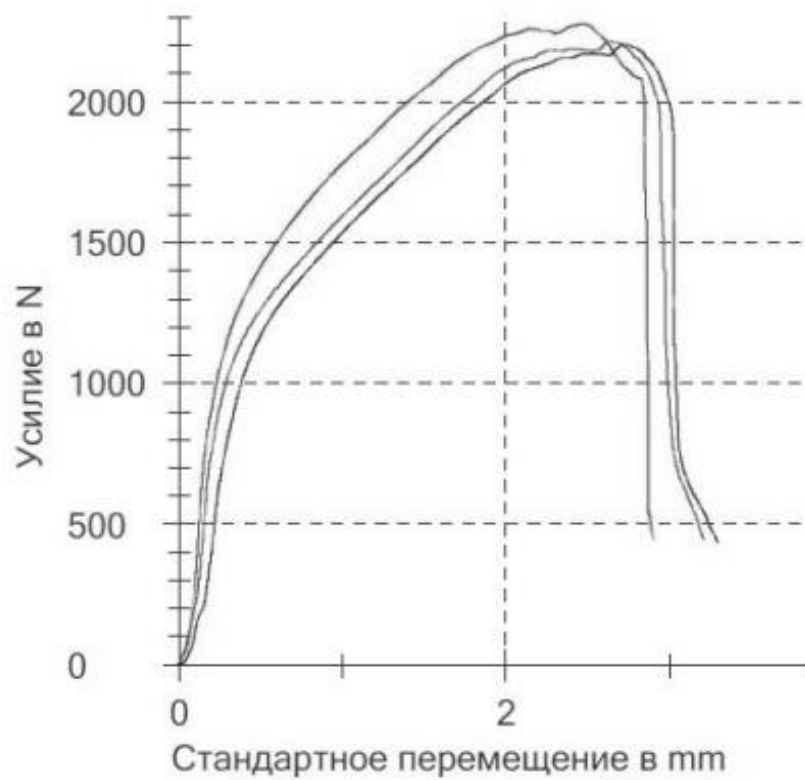


Рисунок В.5 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов D=10 мм, h=1,5 мм

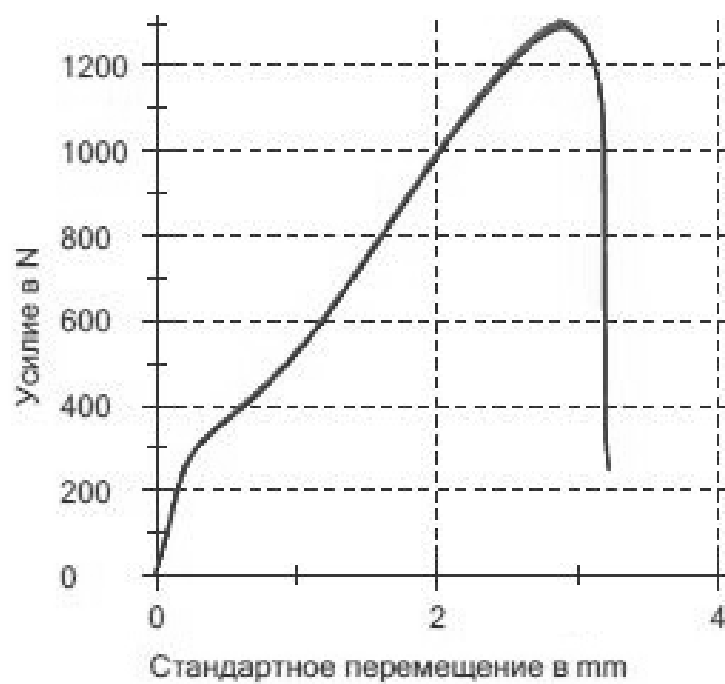


Рисунок В.6 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов D=20мм, h=1,0 мм

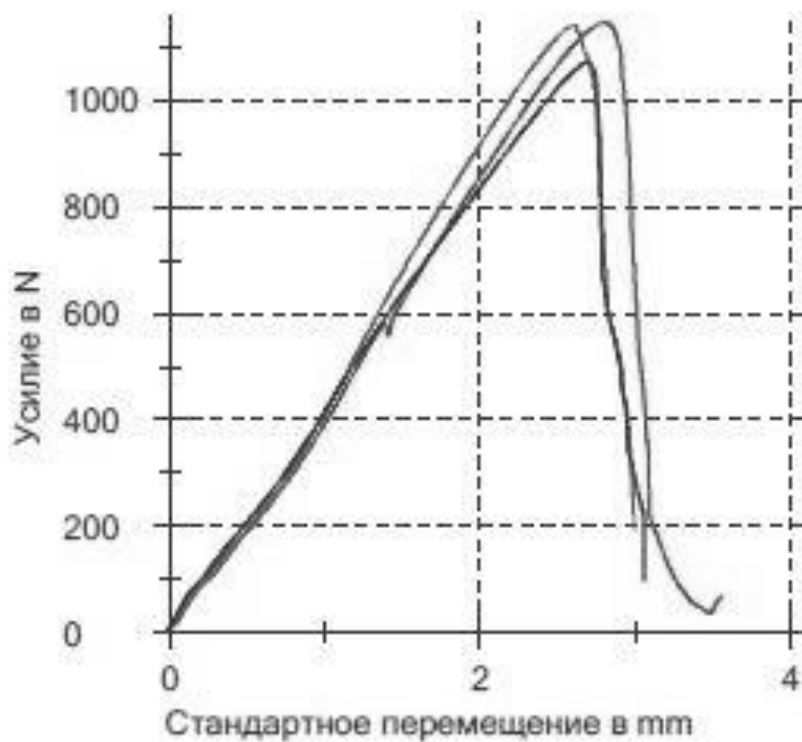


Рисунок В.7 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов $D=20$ мм; $h=0.5$ мм

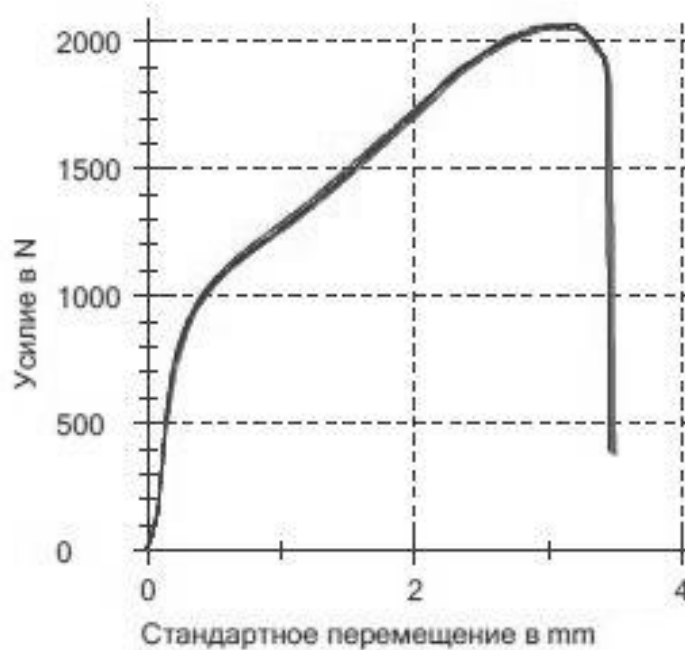


Рисунок В.8 – Диаграмма «Усилие-перемещение»
для образцов $D=20$ мм; $h=1.5$ мм