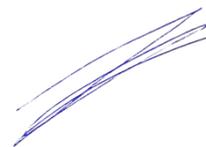


На правах рукописи



ХАСАНОВ РИМ НАИЛЕВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ
АВАРИЙ**

05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2021

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Кузеев Искандер Рустемович

Официальные оппоненты: **Самигуллин Гафур Халафович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС
МЧС России / кафедра пожарной безопасности
технологических процессов и производств, профессор

Пермяков Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» /
кафедра техносферной безопасности, профессор

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «01» октября 2021 года в 10.00 на заседании
диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В России большое внимание уделяется обеспечению безопасности опасных производственных объектов (ОПО). Совершенствуется научно-методическая база прогнозирования рисков эксплуатации таких объектов. Многочисленные исследования в этой области обобщены в трудах Н.А. Махутова, В.В. Москвичева, А.М. Козлитина, В.И. Ларионова, В.Н. Пермякова и др. Однако аварии случаются, причем самого различного уровня сложности. Все виды оборудования в процессе эксплуатации испытывают статические и динамические нагрузки, которые приводят к накоплению повреждений на различных масштабных уровнях. Этот процесс накопления повреждений приводит к изменению физико-механических характеристик конструкционных материалов и обозначается термином деградация свойств.

Последствия аварий высшей сложности, таких как атомная станция Фукусима, Саяно-Шушенская ГЭС, для населения катастрофичны, наносят трудно поправимый ущерб окружающей среде, приводят к человеческим жертвам. На фоне крупномасштабных аварий не так заметны небольшие аварии, которые локализуются в масштабе предприятий. Однако их число существенно больше, чем крупных, а суммарный ущерб значителен. Обращает внимание на себя факт, что многие аварии протекают по сходному сценарию, а как главную причину определяют человеческий фактор.

Многие аварии носят каскадный характер и реализуются с вовлечением множества объектов. Расследование причин таких аварий методически реализовать очень сложно, поскольку разрушения охватывают десятки связанных между собой объектов. Очень трудно эпицентр таких разрушений идентифицировать из-за того, что фрагменты оборудования в зоне аварии сильно искажены, отбор проб для анализа затруднен. При этом из отобранных проб затруднительно изготовить стандартные образцы. Отсутствие возможности изготовить стандартные образцы приводит к тому, что не всегда устанавливаются истинные причины разрушений и аварии повторяются.

В мировой практике для определения механических характеристик конструкционного материала при небольшом количестве проб и небольших фрагментах отобранного металла применяются компактные образцы в виде таблеток. Небольшие образцы с шевронными разрезами используются для определений коэффициента интенсивности напряжений. Эти исследования малочисленны для нефтегазовой отрасли и нет общего алгоритма проведения анализа с точки зрения оценки причин разрушения. В связи с этим разработка методики анализа металла с целью установления причин аварий с использованием компактных образцов является актуальной проблемой.

Степень разработанности проблемы

Последние пятнадцать лет проводится большой объем исследований по различным аспектам применения компактных образцов для оценки механических свойств различных металлов зарубежными (Zhao-Xi Wang, Hui-Ji Shi, Jian Lu, Pan Shi, Xian-Feng Ma, Hyde T.H., Sun W., Williams J.A., Blagoeva D.T., Hurst R.C., Khertsberg R.V., Gianola D.S., Eberl C., Chang Hee Suh, Yun-Chul Jung, Young Suk Kim и др.) и отечественными учеными (Самигуллин Г.Х., Наумкин Е.А., Рахимкулов Р.Р. и др.). Механические характеристики в основном определяют на SPT-образцах, представляющих собой диски различных диаметров и толщин, которые протыкаются индентором. При этом производится запись параметров разрушения, и определяются механические характеристики. Недостатком данного метода является то, что в зоне разрушения образца реализуется сложное напряженное состояние с различным соотношением деформаций среза, изгиба и растяжения. Это соотношение влияет на вид диаграммы разрушения и на значения, определяемых механических характеристик. В связи с этим для уточнения характера разрушения металла компактных образцов используют численные методы анализа напряженно-деформированного состояния. Физические и численные эксперименты в основном применяется для изучения характеристик медицинского инструмента. В области промышленной безопасности, описанные выше методы, используются значительно реже, что является еще одним

аргументом для более интенсивного изучения возможности использования компактных образцов для определения причин аварийного разрушения оборудования.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует пункту 9 паспорта специальности 05.26.03 «Исследование процессов протекания аварий, условий их каскадного и катастрофического развития, разработка методов оценки различных воздействий, проявляющихся в процессе развития аварий на нефтегазовых объектах».

Цель работы

Оценка уровня воздействия рабочих параметров и поражающих факторов на степень деградации конструкционного материала, отобранного из эпицентра аварии оборудования нефтегазовых технологий.

Задачи исследования:

- 1 Провести анализ существующих методов оценки степени деградации конструкционных материалов.
- 2 Разработать специальную оснастку и провести испытания компактных SPT- образцов с целью определения механических характеристик сталей.
- 3 Определить удельную работу разрушения (работу разрушения на единицу площади сечения) на тонких прямоугольных плоских стальных образцах.
- 4 Изучить особенности разрушения линзового компенсатора при реализации аварии на технологической установке.
- 5 Разработать алгоритм анализа образцов, отобранных с оборудования претерпевшего аварийное разрушение.

Научная новизна

1 Получена логарифмическая зависимость удельной работы разрушения от толщины тонких плоских испытуемых стальных образцов. Показано, что при толщине образцов выше 4 мм удельная работа разрушения слабо зависит от толщины. Получены переходные коэффициенты для перевода значений предела текучести и

предела прочности сталей, полученных на компактных образцах, к результатам стандартных испытаний.

2 Показано, что испытание конструкционного материала с различным уровнем накопления повреждений с использованием тонких прямоугольных и SPT образцов позволяет определить степень деградации материала. При этом выделено три области ресурса различающиеся по степени его исчерпания для образцов различной толщины: область проектного износа (А), область запроектного износа (Б) и область катастрофического исчерпания ресурса (В). В случае аварийного разрушения компенсатора непосредственно в зоне трещины работа разрушения составляет 200-500 Н/мм, что соответствует катастрофическому исчерпанию ресурса, а вне зоны разрушения 5500-6600 Н/мм, что соответствует области проектного износа. Полученные данные по измерению распределения химических элементов в металле в зоне разрушения, показали превышение содержания серы в металле на два порядка выше стандартных значений. Это указывает на то, что в нарушение проектного регламента на установке перерабатывалось сырье, содержание серы в которой было недопустимо высокое для используемого конструкционного материала. Это привело к интенсивному коррозионному износу, способствовавшему потере несущей способности конструкции при возникшей аварийной ситуации.

Теоретическая значимость работы

Значимость для теории проведенных исследований заключается в том, что применение компактных образцов для анализа металла с эпицентра разрушения оборудования на различном удалении от трещины, позволяет уточнить механизм и причины разрушения.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в использовании алгоритма оценки степени деградации конструкционных материалов с использованием компактных образцов для определения удельной работы разрушения, которая использована при разработке стандарта ФГБОУ ВО «УГНТУ» СТО «Оценка ресурса,

прочности и ранней диагностики трещин в квазимногослойных оболочках применительно к змеевикам печей пиролиза».

Основные результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при чтении лекций по дисциплине «Физические основы разрушения конструкционных материалов» для бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

Методология и методы исследований

Методология исследования базируется на использовании стандартных и оригинальных методов анализа уровня деградации конструкционных материалов в эпицентре аварийного разрушения оборудования.

В диссертационной работе использовано для достижения цели построение диаграмм распределения удельной работы разрушения на образцах в состоянии поставки и их сравнение с диаграммами, полученными на образцах с накопленным повреждением в условиях эксплуатации и аварийного разрушения.

Положения, выносимые на защиту:

1 Алгоритм определения механизма аварийного разрушения элементов оборудования с использованием компактных образцов для оценки локальных механических характеристик конструкционного материала из эпицентра разрушения.

2 Метод оценки уровня деградации конструкционного материала с использованием в качестве определяющего параметра удельной работы разрушения компактных образцов.

3 Рекомендации по введению в практику расследования причин аварии обязательного химического анализа металла из эпицентра разрушения.

Степень достоверности и апробация результатов

Обеспечивается комплексным использованием современных методов экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку, и согласованностью результатов лабораторных испытаний с современными представлениями о механизмах разрушения оборудования.

Основное содержание работы докладывалось и обсуждалось на 9-й Международной молодежной научной конференции (Уфа, 2019), 45-й Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Уфа, 2018), 69-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2018), Международной научно-технической конференции, посвященной дню Химика и 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала УГНТУ в г. Салавате «Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств» (Уфа, 2017).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных трудах, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 4 статьи в международных базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 104 наименований, содержит 177 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 33 таблицы.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук Гафаровой Виктории Александровне за помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов работы.

В **первой главе** представлен анализ и классификация аварий в нефтегазовой отрасли, а также нормативные и оригинальные методы определения причин возникновения отказов, переходящих в катастрофическое разрушение.

Показано, что в Российской Федерации существует отлаженная система обеспечения безопасности ОПО. В основу этой системы положен Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. От 29.07. 2018) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», который определяет правовые, социальные и экономические основы обеспечения условий эксплуатации ОПО. Закон носит предупредительный характер, что очень важно для экономики страны и требует от предприятий готовности к предварительной локализации и далее к ликвидации последствий аварий. Закон регламентирует понятие ОПО по четырем классам опасности: чрезвычайно высокой, высокой, средней опасности и низкой опасности (в соответствии с изменениями к ФЗ 116 от 29 июля 2018года). К области промышленной безопасности относятся все этапы жизненного цикла объектов: проектирование, монтаж, эксплуатация, реконструкция, ремонт, консервация и ликвидация. При этом техническое устройство подлежит экспертизе промышленной безопасности в течение всего производственного цикла. Соблюдение правил, регламентированных рассматриваемым законом, позволяет создать стройную систему управления безопасностью, в которую включается подготовка и аттестация работников в указанной области и производственный контроль за соблюдением требований, которые устанавливаются Правительством РФ. Однако аварии случаются, в том числе катастрофические. На Рисунках 1 и 2 показаны такие разрушения, которые отнесены к высшей категории опасности.

Человеческий фактор очень сложно устранить, поскольку внутреннее состояние человека и воздействие внешней среды трудно предсказать. Поэтому в Федеральном Законе предусмотрена статья 14 о техническом расследовании причин аварии, в которой прописаны общий алгоритм проведения расследования и документы, которые создаются при этом.

Порядок проведения технического расследования введен в действие приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.08.2011 № 480. В этом документе прописана возможность привлечения экспертных

организаций и отдельных экспертов к расследованию аварии. Кроме этих официальных документов утверждены и используются ведомственные документы. Так, например, компания ПАО «Русгидро» после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС разработала СТО РусГидро 07.01.66-2017 «Порядок расследования и учета аварий и инцидентов. Нормы и требования».



Рисунок 1 – Разрушения на Ачинском НПЗ



Рисунок 2 – Авария на платформе в Мексике

Нормативные документы указывают на приглашение для расследования причин аварий экспертные организации, которые определяют механические характеристики металла, взятого из эпицентра разрушения. Не всегда размеры отобранного металла позволяют изготовить для испытания стандартные образцы. Прежде всего это происходит вследствие утонения металла в результате пластических деформаций. В таких случаях механические характеристики можно определять с использованием небольших компактных образцов. В мировой практике используются мини-образцы SPT (Small Punch Test). Отмечается, что прямой корреляции между результатами стандартных испытаний на растяжение и испытаниями мини-образцов нет и при использовании таких испытаний необходимо такую корреляцию выстраивать.

Компактные образцы также применяются для определения коэффициента интенсивности напряжений при исследовании металлических образцов, из которых невозможно изготовить стандартные образцы для реализации плоской деформации в кончике трещины. Применяются компактные образцы с шевронным разрезом, которые описаны в работах Р.В. Херцберга, Е.А. Наумкина, Р.Р. Рахимкулова,

Л.Г. Самигуллиной. Обзор литературы по вопросу применения компактных образцов для оценки механических свойств показывает, что очень мало исследований, касающихся испытания сталей и четкий алгоритм таких испытаний относительно металла из эпицентра разрушений отсутствует. Этим определяются цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена объектам и методам исследования.

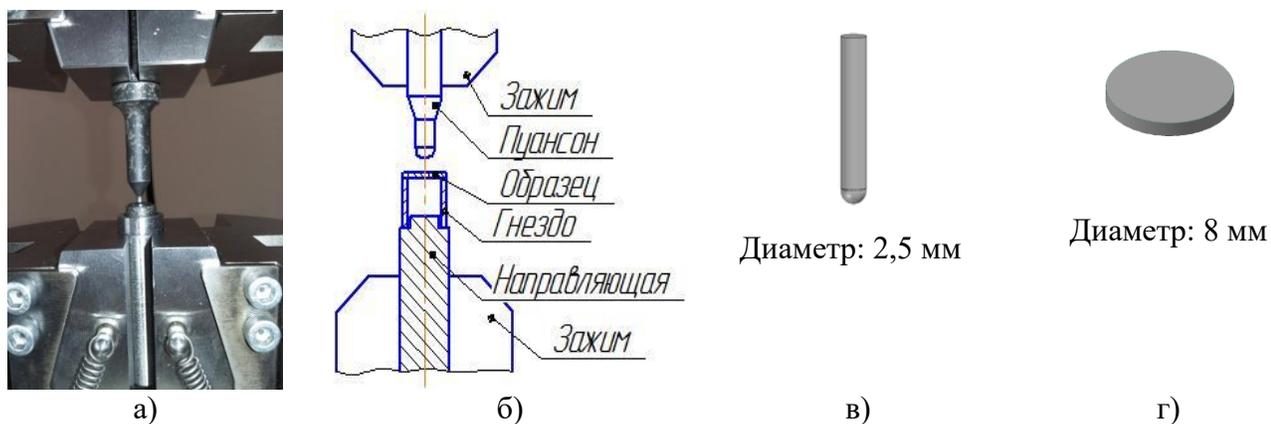
Установка, на которой произошла авария, была введена в эксплуатацию в 1985 году и предназначалась для выделения фракции дизельного топлива с пределами кипения 200-315 °С. В 1996 году установка была перепрофилирована на обезвоживание товарного дизельного топлива. В таком режиме установка работала до 1999 года, когда и произошла авария.

Начальным пунктом в цепи событий явилось распоряжение диспетчера завода по увеличению загрузки сырьем блока по обезвоживанию товарного дизельного топлива. Выполнение этого распоряжения повлекло за собой снижение температуры вспышки целевого продукта, что потребовало подъема температуры на выходе из нагревательной печи путём розжига дополнительных форсунок. Увеличение выхода продуктов в емкость Е-2 привело к ее переполнению и попаданию продуктов в эжектор вакуумной системы и далее по линии дожигания газов в камеру сгорания печи. Горение продукта вызвало подъем температуры в змеевике, а старший оператор, неправильно оценив причины попадания и загорания нефтепродукта, начал действовать в соответствии с «планом ликвидации аварийных ситуаций» (ПЛАС) по позиции «прогар труб в печи». Продукт из вакуумной системы продолжал поступать в печь и через горелки растекаться по территории установки и гореть. Пожарные, производившие тушение пожара, одновременно охлаждали водой колонный аппарат, температура в котором превышала 400 °С. Неравномерное охлаждение колонны привело к ее наклону и разрыву линзового компенсатора. Следует отметить, что при расследовании причин аварии не были определены причины разрушения компенсатора, не оценивались механические характеристики металла.

Достижение поставленной цели и решение задач потребовали проведение разнообразных исследований и использования современного оборудования. Для определения химического состава изучаемого конструкционного материала использовали рентгенофлуоресцентный анализатор химического состава Delta Premium, Innov-X Systems. Поскольку в объекте исследования было заметно утонение стенки, измерения толщины фрагментов и образцов проводили ультразвуковым измерителем толщины ТУЗ-1.

Механические характеристики по всем видам испытаний проводили на сервогидравлической испытательной системе INSTRON 8801, а измерения твердости на твердомере Роквелла серии 574.

Большое число экспериментов проводили с SPT-образцами с помощью машины для испытания на растяжение с малой скоростью. Оснастка состоит из наконечника и гнезда, в гнездо ставится компактный образец и фиксируется специальной крышкой (Рисунок 3, б). Затем производится деформирование образца до его разрушения с помощью небольшой полусферической головки пуансона диаметром 2,5 мм (Рисунок 3, в).



а) общий вид испытательной оснастки; б) схема испытания;
в) наконечник для испытания, г) мини-образец цилиндрической формы

Рисунок 3 – Элементы конструкции для испытания методом SPT

Испытание контролируется с помощью скорости пробивки $v = 0,2$ мм/мин. Таким образом, образец деформируется квазистатически внутри отверстия диаметром 8 мм (двухосное расширение) до отказа. Тест завершается, когда нагрузка уменьшается на 40% от максимальной нагрузки.

Методика использования плоских прямоугольных образцов отработывалась на стальных пластинах различной толщины от 0,01 до 1,00 мм (Рисунок 4).

Необходимо было провести серию испытаний на циклическую усталость цилиндрических образцов (Рисунок 5) на растяжение-сжатие. После испытания на определенное количество циклов из цилиндрического образца изготавливали мини-образцы (раскрой образцов представлен на Рисунке 5, на фрезерном станке отрезали диски, внешний вид которых показан на Рисунке 6.

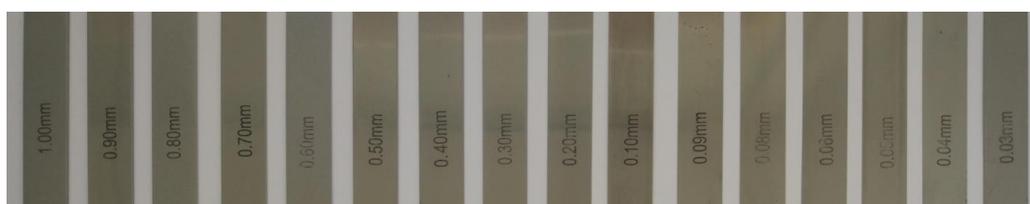


Рисунок 4 – Общий вид и размеры стальных образцов

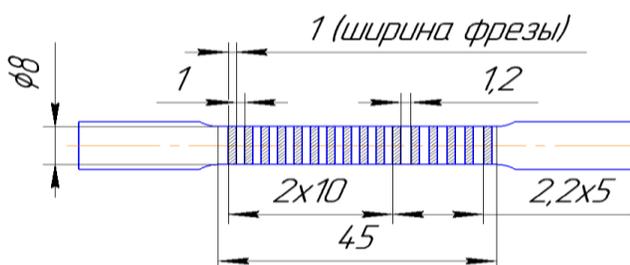


Рисунок 5 – Раскрой образцов



Рисунок 6 – Нарезанные на фрезерном станке мини-образцы

На заключительной стадии исследования делали раскрой образцов, вырезанных из разрушенного компенсатора, и из них изготавливали плоские образцы, мини-образцы и проводили испытания с целью определения работы разрушения.

Последовательность проведения раскроя элементов разрушенной конструкции показана на Рисунке 7.



Рисунок 7 – Разметка и разделка фрагментов на образцы для проведения испытания

Третья глава посвящена установлению корреляции механических характеристик металла, определенных стандартным методом и методом SPT. По диаграммам, которые формируются в процессе испытания (Рисунок 8), можно оценить механические характеристики конструкционного материала. SPT образцы протыкаются индентором, образуют сквозное отверстие. Характер отверстий (Рисунок 9) показывает сложный характер деформирования и наличие сдвиговых и ротационных мод.

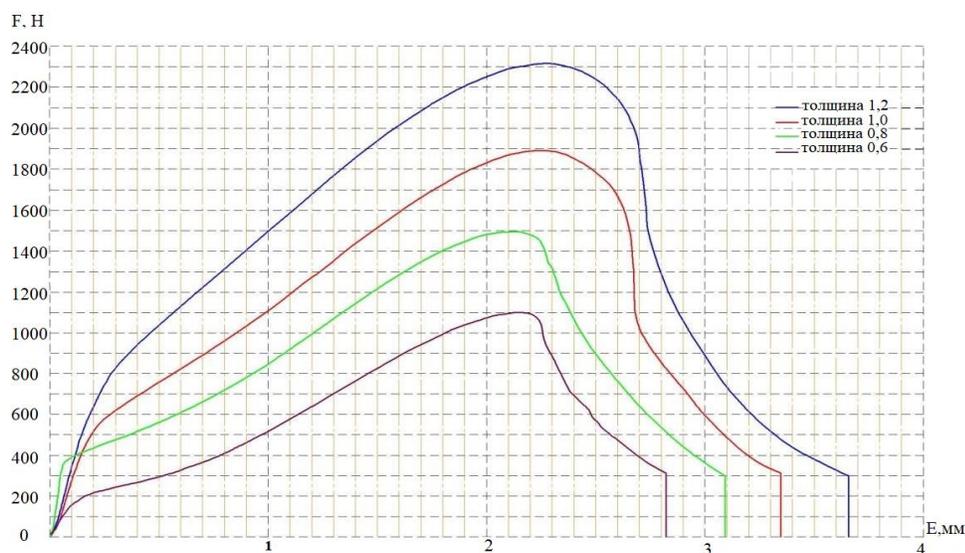


Рисунок 8 – Сравнительная диаграмма для метода малого удара SPT, при различных толщинах компактных образцов



Рисунок 9 –
Образцы после
испытания методом
SPT

Эксперименты показали, что компактные образцы из одной партии металла, могут иметь разброс значений механических характеристик. Поэтому для получения справочных данных нужно иметь большую статистику результатов.

Наши эксперименты позволили получить поправочные коэффициенты, с помощью которых можно рассчитывать стандартные значения механических характеристик. Коэффициенты нелинейно зависят от толщины испытуемых образцов, как это показано на Рисунке 10.

Трудность использования диаграмм, полученных в процессе пенетрации, заключается в том, что необходимо интерпретировать полученные результаты с общепринятой точки зрения трактовки значений для всех характерных зон. Наши эксперименты показывают, что более точный результат в определении предела текучести, получается при использовании зоны пластического течения.

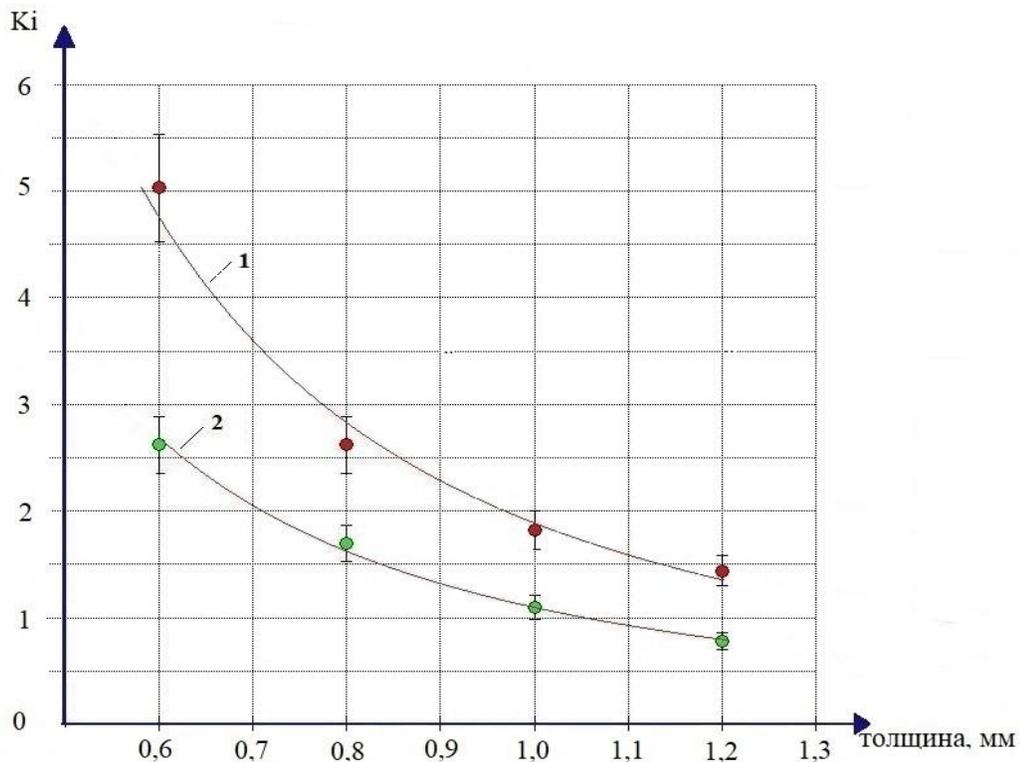


Рисунок 10 – Зависимости переходных коэффициентов для определения предела текучести в зависимости от толщины испытуемых образцов: для зоны упругих деформаций (1) и для зоны эластопластического перехода (2)

Следующая серия экспериментов была выполнена по определению работы разрушения образцов, в которых накапливались усталостные повреждения в малоциклового области при испытании круглых образцов на растяжение-сжатие при реализации от нулевого цикла. Макрообразцы, которые нагружались в течение определенного числа циклов, разрезались и изготавливались SPT-образцы. При пенетрации индентора определяли работу разрушения. Результаты эксперимента представлены на Рисунке 11.

На уровне 70% от разрушающего количества циклов работа разрушения начинает устойчиво уменьшаться. На диаграмме (Рисунок 11) выделена зона неопределенности двумя красными линиями. Верхняя линия проводится по значению работы разрушения образца без циклических повреждений, вторая с использованием понижающего коэффициента 1,3. Вторая линия обеспечивает требуемую точность определения степени деградации структуры при усталостных деформациях.

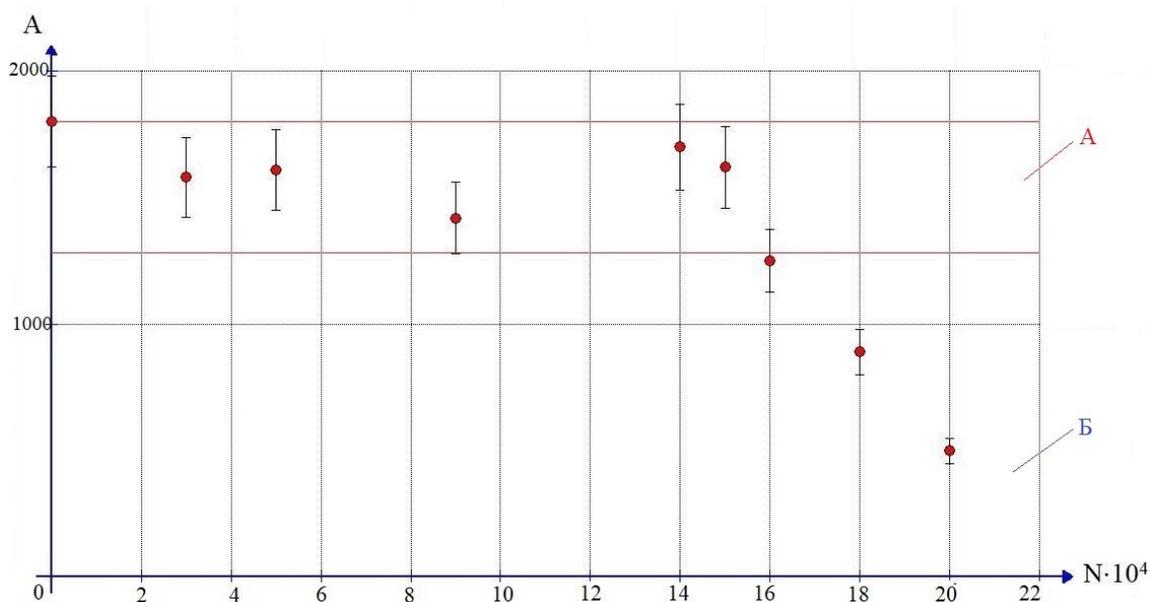


Рисунок 11 – Работа разрушения SPT-образцов испытывавшие циклическую нагрузки (зоны А, Б)

В четвертой главе приводятся результаты исследования алгоритма определения механические характеристик на компактных тонких прямоугольных образцах. Поскольку исследователи отмечают сложный характер деформирования образцов SPT,

что подтверждается и нашими исследованиями, и отсутствие прямого соответствия между механическими характеристиками, определенными стандартным методом и на компактных образцах, требуется разработка альтернативных методов испытания. Вследствие этого нами проведены исследования возможности применения для этих целей тонких прямоугольных образцов.

Для определения механических характеристик, как правило, изготавливают стандартные цилиндрические и плоские образцы. Диаметр рабочей части цилиндрического образца от 3 мм до 25 мм. Размеры плоского образца: ширина рабочей части от 20 мм до 30 мм, толщина от 3 мм до 25 мм. Образцы, размеры которых в поперечном сечении меньше трех миллиметров согласно ГОСТ 1497-84 не изготавливаются. Испытания тонких образцов показывает, что механические характеристики действительно отличаются от стандартных величин. Исследователи отмечают, что на результат оказывает влияние «масштабный эффект».

С целью изучения закономерностей разрушения тонких образцов была подготовлена серия стальных образцов толщиной от 0,02 до 1 мм, размеры и общий вид которых показаны на Рисунке 4. Ширина образца составляет 12,8 мм, длина равняется 75 мм.

Наши исследования показывают, что существует влияние толщины образца на результаты определения удельной работы разрушения.

Степенной характер зависимости удельной работы разрушения (А) от толщины компактных образцов (h) в области толщин до 1 мм, при добавлении результатов испытания образцов с большими толщинами изменился (Рисунок 12).

В исследованном интервале толщин образцов показано, что для стали 60Г (1) и стали 20 (2) работа разрушения с высокой точностью описывается логарифмической зависимостью:

$$A = 1179 \ln(h) + 5928 \quad (R^2 = 0,955), \quad (1)$$

$$A = 1937 \ln(h) + 2538 \quad (R^2 = 0,996). \quad (2)$$

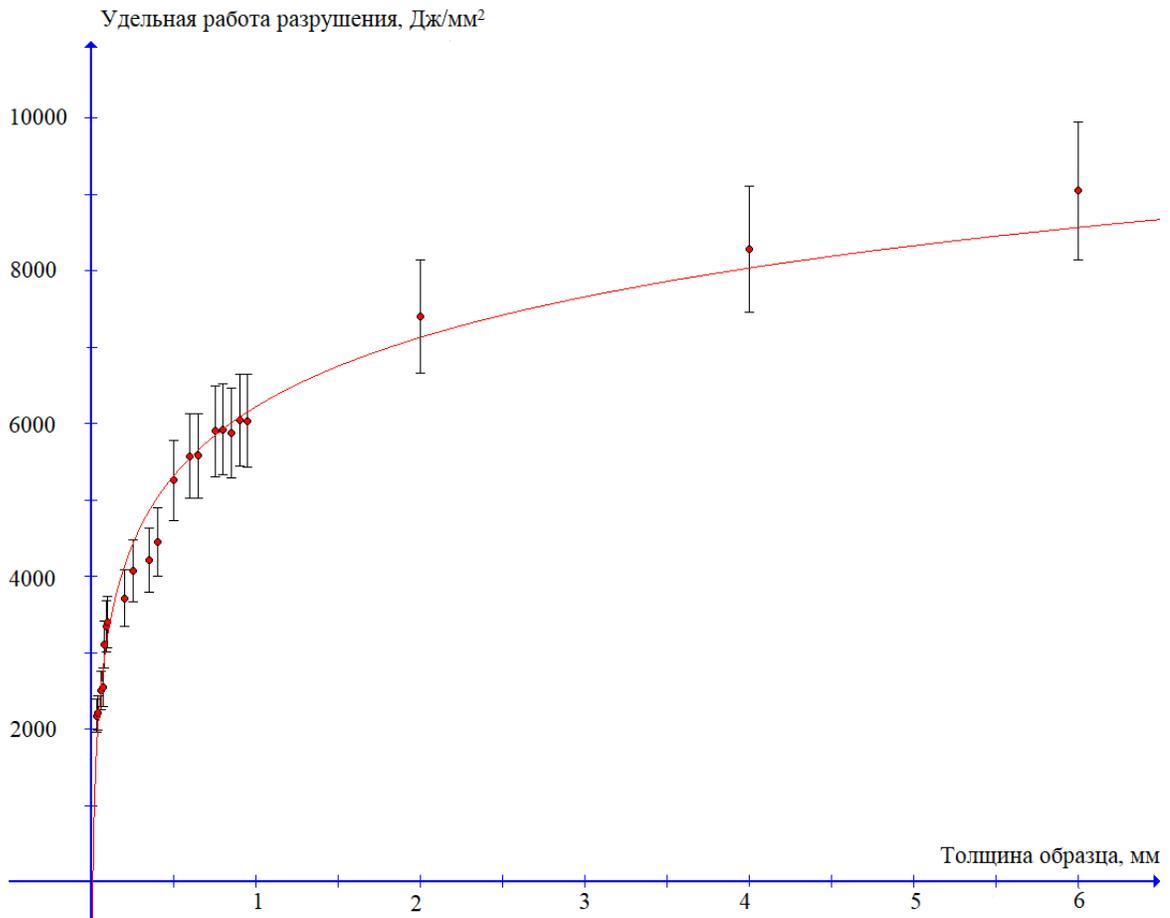


Рисунок 12 – Зависимость удельной работы разрушения от толщины образцов из стали 60Г

В этом случае для объективного сравнения результатов испытаний необходимо обеспечивать одинаковый объем образцов. Для установления такой зависимости провели серию экспериментов, в которых испытывали образцы одинаковой толщины, но с различным объемом за счет изменения их ширины и длины. В качестве реперного объема использовали стандартный плоский образец толщиной также 4 мм. Результаты испытаний показаны на Рисунке 13. Как и ожидалось, с увеличением объема образца удельная работа разрушения увеличивалась, стремясь к некоторому пределу, который был задан значением удельной работы разрушения стандартного образца.

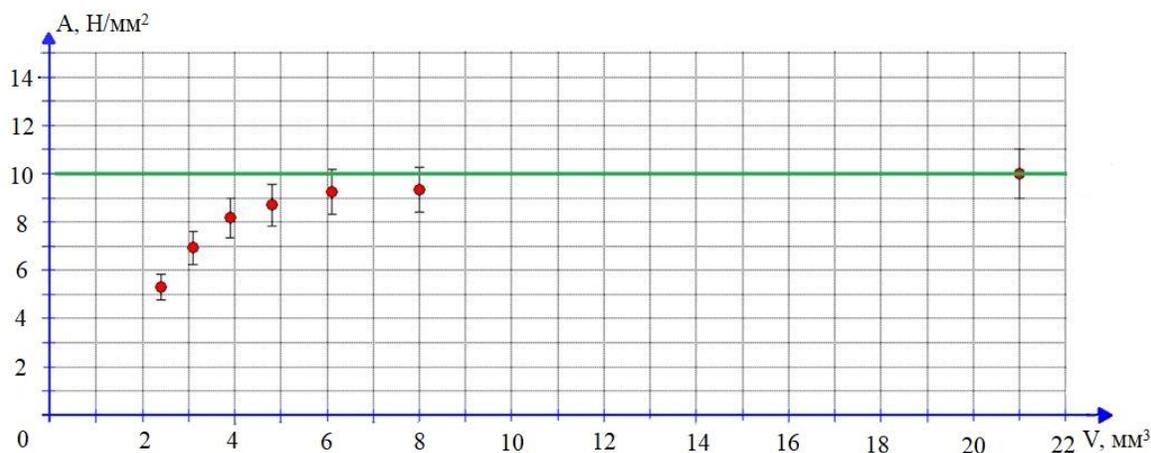


Рисунок 13 – Зависимость удельной работы разрушения от объема испытываемых образцов

Пятая глава посвящена разработке алгоритма исследования металла из зоны разрушения на примере разрушенного линзового компенсатора. На первом этапе испытаний определялась степень деградации материала компенсатора, поэтому фрагмент для исследований был выбран не из зоны разрушения, а из зоны приварки компенсатора к трубе. Эта зона не подверглась в процессе разрушения существенному деформированию. Фрагменты компенсатора были отделены и подвергнуты исследованию. Исследования проводились с использованием прямоугольных тонких образцов. Измеренные значения работы разрушения нанесены на расчетную диаграмму (формула 2) (Рисунок 14). Все точки расположились ниже расчетной кривой в интервале 5500-6600 Н/мм, что указывает на определенную деградацию свойств металла в процессе эксплуатации. Некоторые точки оказались ниже установленного нами запаса 1,3. Непосредственно в зоне разрушения металл подвергся сильному деформированию. Вырезать прямоугольные образцы с равномерным распределением толщины не удалось, поэтому работа разрушения определялась с применением компактных SPT - образцов (Рисунок 7).

Работа разрушения металла из зоны образовавшейся трещины изменялась в пределах 200-500 Н/мм (Рисунок 14), что указывает на практически полное исчерпание ресурса металла. Обращает на себя внимание сильный коррозионный износ металла в зоне разрушения, что не соотносится с отсутствием коррозионной активности

перерабатываемого продукта. Поэтому определили химический состав отложений на поверхности металла с внутренней стороны компенсатора в трех точках. При визуальном изучении образцов фрагмента компенсатора были обнаружены отложения с внутренней стороны, которая соприкасалась со средой. Отложения черного цвета толщиной от 0,05 до 0,1 мм, которые растрескивались при растяжении образцов и отслаивались фрагментарно.

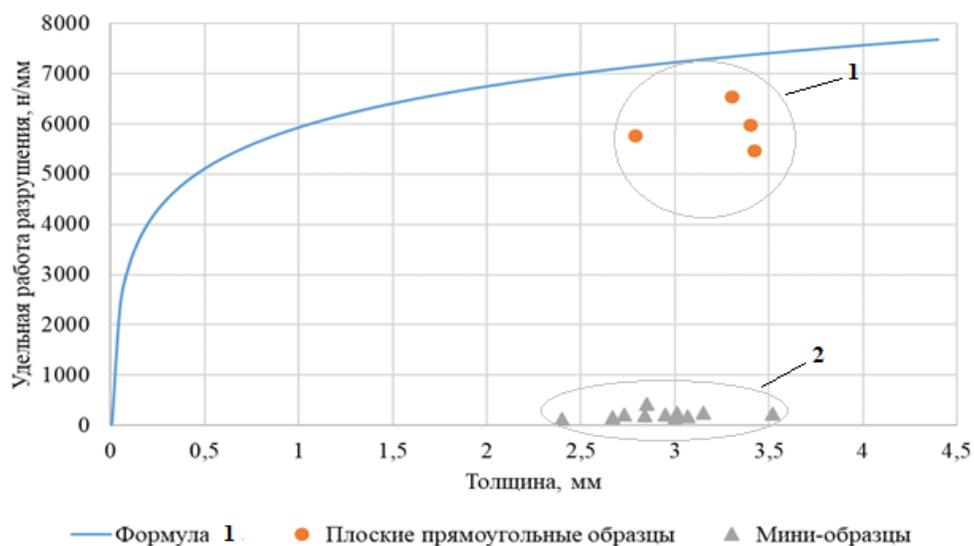
При определении содержания серы без удаления отложений, наблюдается превышение содержания этого элемента на два порядка величины по сравнению со стандартной величиной: среднее значение 2,72 % при максимальном значении 3,6 %. Можно однозначно констатировать, что соединения серы (сульфиды железа) отложилась на поверхности из перерабатываемого продукта. Изучаемая сталь не предназначена для изготовления оборудования, работающего при переработке нефти с повышенным содержанием серы.

Повышенное содержание серы неизбежно приводит к увеличению скорости коррозии металла. Это подтверждается измерениями толщины стенки объекта исследования.

Комплекс проведенных исследований позволяет сформулировать алгоритм по определению причин разрушения металла при расследовании аварий на нефтегазовом оборудовании, который заключается в следующей последовательности: визуально определяется зона эпицентра разрушения, отмечаются зоны с минимальной деформацией, проводятся измерения толщины стенки и распределения твердости, затем осуществляется отбор проб из этих двух зон. Далее из отобранных проб изготавливаются тонкие прямоугольные или SPT образцы. Строится расчетная диаграмма зависимости работы разрушения от толщины образца. Далее полученные результаты определения работы разрушения наносятся на эту диаграмму. Совокупность всех измерений позволяет определить основной механизм разрушения.

Наличие стандартной зависимости удельной работы разрушения от толщины испытуемых образцов позволяет предложить алгоритм оценки степени износа

конструкционного материала и нанести на диаграмму области степени его износа (Рисунок 15).



1 – образцы, взятые от эпицентра разрушения; 2 – образцы из эпицентра

Рисунок 14 – Зависимость удельной работы разрушения от толщины образцов с нанесенными экспериментальными значениями

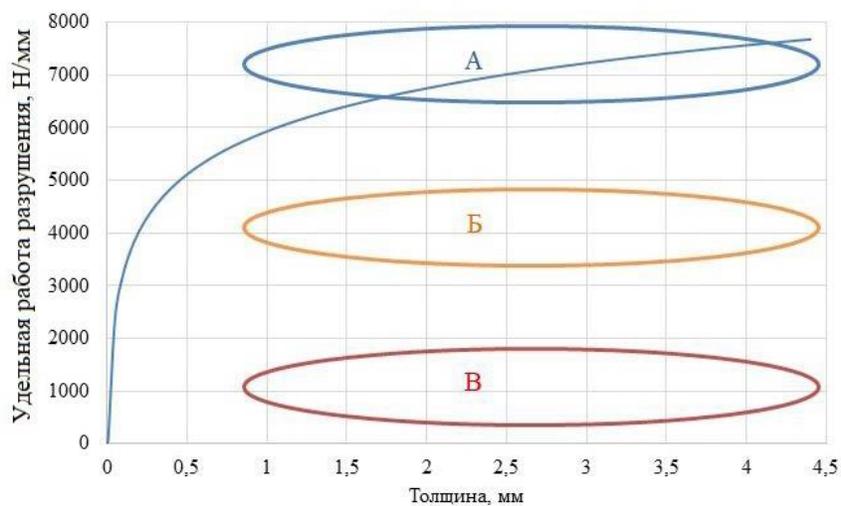


Рисунок 15 – Зависимость удельной работы разрушения от толщины образцов с разрушенного объекта с нанесенными зонами степени износа

На Рисунке 15 обозначены характерные зоны: А – область проектного износа; Б – область запроектного износа; В – область катастрофического истощения ресурса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработан алгоритм оценки воздействия рабочих параметров и поражающих факторов на степень деградации конструкционного материала, отобранного из эпицентра аварии оборудования нефтегазовых технологий. Получена логарифмическая зависимость удельной работы разрушения от толщины испытуемых образцов. Показано, что при толщине образцов выше 4 мм удельная работа разрушения слабо зависит от толщины. Получены переходные коэффициенты для перевода значений предела текучести и предела прочности сталей, полученных на компактных образцах, к результатам стандартных испытаний. Методика определения степени деградации металла аварийного оборудования использована при разработке стандарта УГНТУ.

2 Анализ отечественных и зарубежных исследований, патентов и нормативных документов в области промышленной безопасности показал, что на данный момент времени проблема оценки механических характеристик металла из эпицентра разрушения при ограниченном объеме проб не решена. В тоже время использование компактных образцов для определения характеристик конструкционного материала расширяется в смежных областях техники.

3 Разработана оснастка для испытания SPT-образцов, и разработана методика их изготовления и испытания. Определена степень соответствия механических характеристик, определенных стандартным методом и с помощью SPT-образцов, при этом получены коэффициенты соответствия в диапазоне толщин 0,6 – 1,2 мм.

4 Впервые с помощью SPT-образцов оценена динамика накопления усталостных повреждений в стандартных образцах, подвергнутых действию циклических нагрузок в «отнулевом» режиме в упруго пластическом диапазоне

деформирования. Впервые с применением компактных образцов получена диаграмма изменения удельной работы разрушения от количества циклов нагружения металла. Необратимая деградация материала начинается при достижении 0,7 от разрушающего числа циклов. Предложен коэффициент $K_u = 1,3$, позволяющий определить зону безопасного усталостного нагружения при использовании компактных образцов.

5 Экспериментально получена зависимость удельной работы разрушения от толщины тонких прямоугольных компактных образцов, которая выражается логарифмической функцией для всех испытанных сталей. Показано, что при достижении толщины испытуемых образцов 4 мм и более, влияние толщины становится незначительным. Выявлено влияние объема испытуемого образца на результат определения удельной работы разрушения, особенно при их небольшом формате.

6 Изучены особенности аварийного разрушения компенсатора. При этом использовали для определения степени деградации стали параметр удельной работы разрушения, который оценивался с использованием SPT-образцов и тонких прямоугольных образцов. Показано, что непосредственно в зоне образовавшейся трещины работа разрушения изменяется в пределах 200-500 Н/мм, а в зоне приварки компенсатора к трубе 5500-6600 Н/мм, что на порядок величины превышает значения в эпицентре разрушения, что подтверждает формирование зоны разрушения в наиболее изношенной части компенсатора. Химический анализ образцов с эпицентра разрушения показал, что содержание серы на внутренней поверхности металла компенсатора на 2 порядка превышает нормативные значения. Это позволяет сделать вывод о том, что переработке подвергнулся высокосернистый продукт, что не соответствует характеристикам, стали. Отложение серы интенсифицировало коррозионные процессы, что, в свою очередь, привело к утонению стенки компенсатора и разрушению его элементов, что в свою очередь стало причиной каскадного развития аварии. Определенную часть ответственности при этом должны нести специалисты, принявшие решение о переработке высокосернистого продукта.

Основные результаты работы опубликованы в 12 научных трудах:

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, входящие в перечень ВАК

1 Хасанов, Р.Н. Использование компактных образцов при анализе причин разрушения компенсатора / Р.Н. Хасанов, В.А. Гафарова, Г.Б. Гафаров, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело (сетевое издательство). – 2019. – № 3. – С. 31-45.

2 Хасанов, Р.Н. Особенности разрушения тонких стальных образцов при растяжении / Р.Н. Хасанов, В.А. Гафарова, В.Ю. Пивоваров, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело (сетевое издательство). – 2019. – № 2. – С. 94-111.

3 Хасанов, Р.Н. Определение работы разрушения на компактных стальных образцах / Р.Н. Хасанов, А.А. Рябов, И.Р. Кузеев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – №1. – С. 116-123.

Журналы, входящие в международную базу цитирования

1 Abdulganiev, M.R. Determination of specific failure work on compact steel samples / M.R. Abdulganiev, R.N. Khasanov, V.A. Gafarova // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 945. – pp 569-573.

2 Khasanov, R.N. Development of the Algorithm for Determination of mechanical properties of steel 20 with different levels of cumulative fatigue damage with the application of compact samples / R.N. Khasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – pp 581-586.

3 Khasanov, R.N. Assessment of steel mechanical characteristics of non-standard compact specimens under statistical tests / R.N. Khasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev // MATEC Web of Conferences. – 224,03010. – 2018.

4 Khasanov, R.N. Assessment of mechanical characteristics of steel subject to cyclic loads effect on non-standard compact specimens / R.N. Khasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev // MATEC Web of Conferences. – 224, 04025. – 2018.

Материалы, опубликованные в прочих изданиях

1 Хасанов Р.Н. Оценка накопления усталостных повреждений с помощью испытания компактных образцов / Р.Н. Хасанов, В.А. Гафарова // 9-я Международная молодежная научная конференция. – Уфа: БашГУ. – 2019. – С. 141-142.

2 Нисковских, И.Е. Алгоритм расследования аварий на опасных производственных объектах / И.Е. Нисковских, Р.Н. Хасанов // 45-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов. – Уфа: УГНТУ. – 2018. – Т.2. – С. 29-30

3 Абдулганиев, М.Р. Оценка механических свойств стали с использованием компактных образцов / М.Р. Абдулганиев, И.Р. Кузеев, В.А. Гафарова, Р.Н. Хасанов // 69-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: УГНТУ. – 2018. – Т.1. – С.306.

4 Хасанов, Р.Н. Применение компактных образцов для оценки механических свойств стали / Р.Н. Хасанов, М.Р. Абдулганиев // Наука. Технология. Производство-2017 «Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств»: Международная научно-техническая конференция, посвященная дню Химика и 40-летию химико-технологических процессов филиала УГНТУ в г. Салавате. – Уфа: УГНТУ. – 2017. – С. 209-210.

5 Хасанов, Р.Н. Использование компактных образцов для определения механических свойств конструкционных материалов / Р.Н. Хасанов // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2016. – № 1. – С. 5-11.