На правах рукописи

2005.

Пхон Хтет Кьяв

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Специальность 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2022

Работа выполнена на кафедре «Авиастроение» в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель:	Сысоев Олег Евгеньевич, доктор				
	технических наук, доцент, заведующий				
	кафедрой «Строительство и архитектура»,				
	ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре				
	государственный университет»,				
	г. Комсомольск-на-Амуре.				

Официальные оппоненты:

Козлов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Ченцов Виктор Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. г. Хабаровск.

Ведущая организация:

Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск.

Защита состоится «<u>28</u>» <u>декабря</u> 2022 г., в <u>13</u> часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. проспект Ленина, 27, ауд.201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КнАГУ «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронному почту <u>diss@knastu.ru</u>.

Автореферат разослан «____» ____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Григорьева Анна Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Современная экономика требует всё более мощные машины и механизмы для управления которыми широко используются гидрогазовые системы (ГГС) высокого давления. Фасонные детали ГГС часто изготавливаются путем деформирования заготовок из конструкционных материалов. В процессе пластического трубных деформирования в конструкционном материале образуются дефекты, которые влияют на прочностные характеристики изготовляемых деталей. При выходе из строя в эксплуатации из-за неисправности деталей ГГС, системы управления самолётами, ракетами или тяжелыми машинами могут стать неработоспособными, что приводит к техносферным авариям и катастрофам. Например: в 2004 г. в Габоне возникла авария самолета из-за отказа гидравлических систем, погибли 19 человек; по тем же причинам в 2010 Рейс Эр Франс 447 упал в Атлантическом океане, погибли все 228 человек; в 2015 ракета Протон-М с мексиканским спутником MexSat-1 после запуска сгорела в атмосфере, причиной аварии явился конструктивный дефект вала ротора турбонасосного агрегата третьей ступени, который вывел из строя гидросистему управления; в 2021 г. двухмоторный самолет Л-410 разбился в Кемеровской области России, причиной крушения стал отказ ГГС системы управления двигателя, погибли 4 человека и еще 15 пострадали, и т.д.

Для предотвращения подобных аварий создаются сложные и дорогостоящие алгоритмы контроля деталей ГГС. Выбраковка негодных деталей происходит не в процессе их изготовления, а когда они уже полностью готовы и прошли все стадии обработки. В этом случае стоимость бракованных деталей ложится на себестоимость годных деталей и стоимость их увеличивается. Поэтому нужен новый подход и методы определения прочности деталей ГГС машин и механизмов при их изготовлении. Для исследования кинетики накопления дефектов структурой конструкционного материала деталей ГГС в процессе деформирования наиболее эффективным является метод акустической эмиссии (АЭ). Этот метод позволяет определять наличие дефектов в структуре конструкционного материала при его деформировании, при этом не изменения характеристик деталей.

Выше изложенное показывает необходимость проведении экспериментальных исследований, направленных на установление влияния дефектов полученных при изготовлении деталей ГГС на их прочность, а также нужна методика прогнозирования прочности деталей ГГС по параметрам акустической эмиссии на стадии изготовления.

Степень разработанности темы:

Проблемами прочности и долговечности при деформировании конструкционных материалов занимались известные российские исследователи Ильюшин А.А., Иванова В.С., Одинг, И. А., Копнов В.А., Шнейдерович Р.М., Писаренко Г. С., Павлов П. А., Марьин Б.Н. и др, а также зарубежные ученые Кеннеди А.Д., А. Надаи., В.Р.Р Almeida., M.L Alves., Белл Р.Л., TL. Anderson, Pfeiffer F., T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu и др.

Развитием методик исследования материалов методом акустической эмиссии занимались ученые Грешников В.А., Дробот Ю.Б., Болотин В. В., Иванов В.И., Ким В.А., Башков О.В., Буйло С.И и Семашко Н.А., и др, а также зарубежные исследователи: Radon I.C., Pollok A.A., Panin S.V., R. González, D.I. Martínez, J.A. González, J. Talamantes, S. Valtierra, R. Colás и др.

Решение проблемы прогнозирования прочности и долговечности деталей машин и механизмов и разработка новых технологических процессов деформирования в значительной степени предусматривает установление закономерности накопления дефектов

структуры конструкционного материала при деформировании и разработка методов оценки влияния различных факторов на остаточную прочность изготовляемого изделия.

Ранее проведенными исследованиями, установлено, что при изготовлении деталей в их микроструктуре накапливаются микро- и макродефекты, которые влияют на остаточную прочность конструкционных материалов. Многие работы посвящены изучению предельных состояний конструкционных материалов, но пока нет методик прогнозирования прочности конструкционных материалов во время их изготовления.

Поэтому существует необходимость в разработке новых неразрушающих методов контроля качества и усовершенствовании существующих методов оценки прочности ответственных элементов конструкций современной и перспективной техники при изготовлении деталей ГГС.

Цель и задачи исследований: Разработка нового подхода к прогнозированию прочности деталей ГГС при их изготовлении на основе метода АЭ.

В соответствии с поставленной целью необходимо осуществить решение следующих задач:

1. Создать испытательный стенд, позволяющий в процессе изготовления фасонных деталей регистрировать сигналы акустической эмиссии и разработать методику проведения экспериментальных исследований материалов при их изготовлении по параметрам сигналов АЭ.

2. Определить механизмы эволюции микроструктуры исследуемых материалов при изготовлении деталей ГГС с использованием метода акустической эмиссии.

3. Установить экспериментальные зависимости интенсивности деформации материала и параметров акустической эмиссии при плоско напряженно-деформированном состоянии.

4. Разработать методику прогнозирования прочности деталей гидрогазовых систем при их изготовлении;

5. Исследовать влияние свойств различных рабочих тел при деформировании конструкционных материалов на параметры АЭ.

6. Разработать программное обеспечение, позволяющее прогнозировать прочность ответственных деталей ГГС в процессе их изготовления.

Научная новизна:

1. Установлены зависимости между интенсивностью деформации деталей ГГС при их изготовлении и параметрами сигналов АЭ.

2. Предложено обобщенное уравнение поверхности предельного состояния конструкционных материалов, возникающее во время изготовления деталей ГГС, которое является критерием годности деталей к эксплуатации.

3. Установлено влияние свойств раздаточного тела на параметры сигналов АЭ при деформировании конструкционных материалов.

Теоретическая значимость результатов:

1. Показана возможность прогнозирования прочности деталей ГГС изготовленных путём деформирования конструкционного материала по параметрам сигналов АЭ в процессе изготовления с использованием различных рабочих тел.

2. Полученные в работе результаты расширяют знания о возможностях неразрушающего контроля деталей при их изготовлении.

Практическая значимость: Предложена методика прогнозирования прочности деталей ГГС при их изготовлении, которая позволяет повысить качество контроля и снизить их стоимость. Создана экспериментальная установка, на которой можно исследовать разрушение деталей ГГС с регистрацией параметров АЭ. Разработана программа для определения акустических сигналов при деформировании конструкционного материала.

Методология и методы исследования: В работе использовались известные методы исследования процессов деформирования трубных заготовок на основе теорий прочности, пластической деформации и надежности. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартного программного обеспечения, оборудования и методик определения механических характеристик материалов. Для регистрации сигналов акустических эмиссии использовался широкополосный датчик с полосой частот 50-500 кГц и программное обеспечение АЕ рго-2.0. Для обработки сигналов АЭ и расчета результатов экспериментальных исследований использовалось программное обеспечение Matlab, MS Excel, Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к прогнозированию прочности фасонных деталей ГГС во время изготовления по параметрам АЭ.

2. Полученные экспериментальные зависимости между интенсивностью деформации конструкционного материала и параметрами АЭ.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния свойств раздаточных тел на параметры сигналов АЭ при деформировании конструкционного материала.

4. Методика прогнозирования прочности фасонных деталей ГГС при их изготовлении.

Достоверность результатов работы определяется применением апробированного сертифицированного и лицензированного оборудования, использованием фундаментальных основ теории пластической деформации, обоснованностью принятых допущений, корректными математическими методами исследования решаемых задач, а также совпадением теоретических расчетов с полученными экспериментальными данными.

Апробация результатов работы:

Результаты работы докладывались на конференциях.

1. XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 21–25 мая 2018 года.

2. International Conference on Mechanical Engineering and Power Engineering (MEPE 2018), Beijing, China. 21-23 Dec 2018.

3. Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 8-12 апреля 2019 года.

4. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Sochi, Russia. Mar 2019.

5. Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 года.

6. Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития. Международной научно-практической конференции. Ижевск, 04 октября 2021 года.

Личный вклад: Заключается в личном участии в постановке задач исследования, формулировке положений, выводов, выносимых на защиту. Автор лично разработал методику прогнозирования прочности фасонных деталей ГГС при их изготовлении и провел эксперименты, проанализировал полученные результаты.

Публикации: Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 15 научных статьей, в том числе в 6-х статьях в российских журналах из перечня ВАК, в 3-х статьях в зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также в 4-х статьях РИНЦ. Получены один патент на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из – 128 источников. Общий объем работы составляется – 125 страницы и включает – 39 рисунков и – 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении: на основе анализа литературы, посвященной вопросам прочности конструкционных материалов, обоснована актуальность темы диссертации, оценена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи для ее достижения, дана краткая характеристика работы, включающая научную новизну, теоретическую и практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе: рассматриваются способы изготовления фасонных деталей ГГС и модели расчета процессов деформирования. Для расчета любой фасонной детали существует множество расчетных моделей, включая процесс раздачи с использованием деформационной теории пластичности и уравнения совместности истинных деформаций, например записанных в координатах Эйлера

$$\frac{de_{\varphi}}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_{\varphi} - e_{\rho})}{\rho} \tag{1}$$

Для металлов условие Мизеса является приемлемым и часто используемым критерием пластичности. Оно хорошо описывает поведение материалов, у которых предел текучести при растяжении и сжатии отличается незначительно. Предельная поверхность теории Мизеса имеет цилиндрическую форму в пространстве главных напряжений. Напряженные состояния внутри поверхности Мизеса находятся в зоне упругости.

В соответствии с критерием Мизеса пластические деформации возникают тогда, когда интенсивность напряжений σ_i достигает значения σ_T :

$$\sigma_{i} = \sigma_{T},$$

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2}},$$
(2)

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные нормальные напряжения.

Несмотря на многочисленные исследования не существует методов расчета и прогнозирования, которые смогли бы описать процессы деформирования конструкционного материал с высокой точностью. Это связано, прежде всего, с разной ориентацией кристаллических решеток зерен микрообъемов металлов, формирующихся при кристаллизации металлов после их выплавки. То есть одинаковые детали изготовленные по одной технологии из одной и той же партии материала в итоге могу обладать разной прочностью. Поэтому для обеспечения надежности деталей ГГС в эксплуатации, необходим дорогостоящий контроль с выбраковкой дефектных деталей из готовой партии.

При этом прогнозируемая прочность деталей по существующим методикам расчета отличается от фактической. В настоящее время при установлении расчетных зависимостей

для прогнозирования разрушения материалов и их прочности, применяется кинетический подход, описываемый кинетическими уравнениями повреждений, которые могут рассматриваться как модели накопления повреждений, где обычно вводиться параметр, ответственный за разрушение в этой локальной области, называемый критерием разрушения.

Накопление дефектов при деформировании конструкционного материала, как показали эксперименты Д.Ф. Белла, поставленные при высокой точности измерения деформаций (10^{-8}), происходит не линейно даже в упругой зоне деформаций, это трудно объяснить с точки зрения механики твердого тела, что возможно обусловлено реальной структурой материалов.

Процессы изменения микроструктуры, при деформировании конструкционных материалов, порождающие акустико-эмиссионное излучение описаны во многих научных исследованиях. А также имеется много исследований влияния дефектности микроструктуры деталей при деформировании на их прочность и влияния особенностей деформирования конструкционных материалов на сигналы АЭ.

На основе анализа литературных источников можно сделать вывод, что изучению закономерностей пластического деформирования и разрушения материалов при плоском напряженно-деформированном состоянии, из за сложности проведения экспериментальных исследований посвящены единичные исследования, причем для конкретных соотношений главных деформаций и изменения интенсивности деформаций, а методик, позволяющих прогнозировать прочность деталей ГГС при их изготовлении фактически нет. В результате анализа методов неразрушающего контроля было установлено, что наиболее эффективным и информативным методом для прогнозирование прочности деталей ГГС в процессе деформирования является метод акустической эмиссии, который позволяет неразрушающим методом найти корреляции между дефектностью структуры материала и прочностью.

Во второй главе: описывается экспериментальная установка и методика исследований прочности деталей при различных траекториях нагружения в двумерном пространстве деформация при плоском напряженно-деформированном состоянии с использованием метода АЭ. Выявлено влияние свойств рабочих тел на деформирование деталей ГГС при их изготовлении.

Для комплексного исследования в качестве исследуемого материала были выбраны материалы сталь 12X18H10T и алюминиевый сплав Д16, которые обладают высокой пластичностью и широко применяющиеся для изготовления деталей ГГС машин и механизмов.

Разработанная комплексная программа исследования предусматривала проведение исследований прочности конструкционных материалов при деформировании трубных заготовок по различным траекториям (рис.1) в условиях плоского напряженнодеформированного состояния (рис.2) с регистрацией параметров акустической эмиссии в режиме on-line. Процесс деформации в любой точке деформируемого тела происходил в плоскости двумерного вектора деформация. Уравнение такой траектории деформаций имеет вид:

$$\vartheta = \vartheta_2 \cdot \vec{\mathbf{i}}_2 + \vartheta_3 \cdot \vec{\mathbf{i}}_3 = \vartheta(t), \tag{3}$$

где Э2 и Э3 -компоненты вектора деформаций

Такое деформированное состояние, характеризуемое компонентами тензора деформаций $\mathcal{E}_{\theta}(t) = 0$ и $\mathcal{E}_{r}(t) = 0$ создавалось в тонкостенном образце, который подвергался внутреннему гидравлическому давлению P=P(t)). Данная программа исследования позволяла создавать плоское напряженно-деформированное состояние.

При этом радиальные и окружные деформации определяются по формулам:

 $\varepsilon_r = \frac{1-2\mu}{E} - \varepsilon_{\theta}; \varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta D}{D_{cp}};$ где μ = коэффициент деформации в продольной

направлении, Е = модуль упругости материала, D = диаметр трубы.



Рис. 1. Траектория деформирования экспериментальных образцов

Рис.2. Схема приложения деформации к рабочей части образца

Описан общий вид испытательной установки (рис.3) для исследования работы конструкционных материалов от воздействия нагрузок с регистрацией параметров АЭ. Далее в тексте диссертации описана программа проведения эксперименты.

Испытания проводились на испытательной машине с использованием оригинального программного обеспечения. Для получения заготовки фасонной части трубопровода использовался штамп соответствии с диаметром трубы с различными раздаточным телами.



Рис. 3. Общий вид испытательной установки





1 – жесткая матрица; 2 – основание; 3 – пуансон; 4 – трубчатая заготовка; 5 – раздаточное тело (эластичные стержни, лед в эластичной оболочке и лед с опилками в эластичной оболочке)



Рис.5. Блок схема регистрации сигналов акустической эмиссии. 1-пъезоэлектрическим датчиком; 2- исследуемый образец; 3-предваритльный усилитель акустических сигналов; 4-аналоговоцифровой преобразователь; 5- Программное обеспечение; 6-системный блок ЭВМ; 7 – АЦП для программного управления скоростью деформирования образца; 8 – рабочее тело для раздачи полых и трубчатых заготовок

Штамп состоит из разъемной матрицы, установленной в жестком корпусе, наружной обоймы, пуансона. В матрице размещалась трубчатая заготовка, внутри которой находится рабочее тело. На стенке трубчатой заготовки размещен датчик, с помощью которого регистрируются сигналы АЭ. В экспериментах были использованы раздаточные тела из резины, льда и льда с опилками.

Работа штампа происходит следующим образом. С помощью ползуна пресса с усилием Р перемещается пуансон. От пуансона усилие Р передается через рабочее тело в зону деформирования трубчатой заготовки, в результате чего происходит раздача трубы. Затем пуансон возвращается в исходном положении, производят разборку матрицы и выемку готовой детали с рабочим телом (Рис 4).

Сигналы акустической эмиссии, преобразованные пьезоэлектрическим датчикам. Аналоговый сигнал, после соответствующего усиления параметров полученного сигнала в аналоговом блоке (согласующий усилитель и фильтр нижних частот) приходит на аналогоцифровой преобразователь (АЦП), где производится преобразование сигнала в цифровую форму с частотой дискретизации 5 МГц и записывается в реальном масштабе времени на ЭВМ.

Для регистрации сигналов АЭ использовалась 4-канальная система АЭ на основе высокочастотного аналогового цифрового преобразователя PCI-9812 с частотой дискретизации 5 МГц. Датчик был установлен непосредственно трубчатой заготовки и подключен систему регистрации АЭ через предусилитель с коэффициентом усиления 40 дБ. Для мониторинга накопления сигналов АЭ использовался осциллограф (рис 5).

Обработку результатов исследований проводили с использованием методов математической статистики с помощью программы Microsoft Excel 13.0. Для обработки данных сигналов АЭ был разработана специальная программа в Matlab 15, позволяющая обрабатывать АЭ информацию по 9 параметрам. А также для построения предельной поверхности и получения уравнений использовалась программа Mathcad 15.

В третьей главе: описаны стадии эволюции алюминиевых и стальных сплавов, в результате которых рождаются дефекты микроструктуры конструкционного материала, и как вследствие АЭ. Показаны методы для определения информативных параметров измерительной аппаратуры и исследованы зависимости параметров АЭ от интенсивности деформации материала заготовок. Рассмотрены механизмы разрушения материалов по структурно-энергетической теории разрушения.

По результатам проведенных исследований были выявлены закономерности деформирования исследуемых материалов. При обработки получаемых результатов исследований была установлена зависимость параметров сигналов АЭ от свойств раздаточных тел. При этом величина энергии сигналов АЭ нарастет, что показывает накопление дефектов в кристаллической решетке рис.(6,7).



Рис 6. Связь между энергией и интенсивностью деформации для материалов Д16 (а) и 12Х18Н10Т (б) в зависимости от различных раздаточных телах при F = 35 кН.



Рис 7. Связь между энергией и интенсивностью деформации для материалов Д16 (a) и 12X18H10T (б) в зависимости от различных раздаточных телах при F = 40 кH.

Учитывая, что величина накопленной пластической деформации и минимальная энергия являются основными характеристиками, определяющими дефектность материала в условиях воздействия раздаточного тела, то особый интерес представляет зависимость величины накопленной пластической деформации и сигналов АЭ с учётом свойств раздаточных тел.

В зависимости от раздаточных тел изменения энергии сигналов АЭ за весь период нагружения до разрушения можно выделить пять различных масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости, предложенных В.Е Паниным.

На первом уровне – сдвиг с нестесненным материальным поворотом и связанная с ним стадия легкого скольжения накопляется небольшого количества сигналов АЭ. С ростом количества сигналов АЭ материал переходит на второй масштабный уровень.

На втором уровне - сдвиг со стесненным материальным поворотом, обусловливающий множественное скольжение и стадию линейного упрочнения. При этом начало накопляться пластическая деформация и увеличивается количество сигналов. Затем материал переходит на третий масштабный уровень.

Для третьего уровня характеризуется сдвиг с кристаллографическим поворотом структурного элемента деформации.

Четвертая стадия деформационного упрочнения.

На пятом уровне происходит образование и рост микротрещин, количество сигналов АЭ возрастает за счет трения берегов трещины.

Анализируя частотные спектры сигналов АЭ можно отметить, что по частоте выбросы сигналов АЭ происходят хаотично, однако можно выделить несколько частотных участков, при этом диапазон 40-290 кГц наиболее стабилен и часто встречается. Это можно наблюдать на зависимостях в координатах частота – амплитуда акустического сигнала для алюминиевого сплава Д16 (рис. 8) и стали 12Х18Н10Т (рис. 9) соответственно.



Рис 8. Диаграмма частотных характеристик сигналов АЭ при деформировании образцов из алюминиевого сплава Д16. а) раздаточное тела – резина б) раздаточное тело – лед с опилками в) раздаточное тело – лед.



Рис 9. Диаграмма частотных характеристик сигналов АЭ при деформировании образцов из стали 12X18H10T. а) раздаточное тела – резина б) раздаточное тело – лед с опилками в) раздаточное тело – лед.

При обработке сигналов АЭ при помощи метода Фурье был выделен участков частотного спектра по каждому эксперименту мы можем увидеть частотный спектр сигналов АЭ, наиболее характерный для материала Д16 (рис 8), при этом выделяются участки спектра 40-290 кГц, 340-460 кГц, 510-670 кГц, 700-890 кГц. Соответственно для стали 12X18H10T также выделяются участки спектра 70-270 кГц, 370-470 кГц и 630-770 кГц (рис 9).

Механизмы изменения микроструктуры материала под действием нагрузок срабатывают не одновременно во всем теле образца, а только в его слабых или перегруженных участках и срабатывают дискретно, т.е. на уровне монокристалла поликристаллического образца в одном кристалле происходят процессы мезо II, а в кристалле по соседству происходят еще процессы мезо I и т.д. Открытая система стремится к минимуму энергии, и что обеспечивает устойчивость системы.

Рассматривая изменения фрактальной размерности сигналов АЭ на определенных участках спектра для алюминиевого сплава Д16 40-290 кГц, 340-460 кГц, 510-670 кГц, 700-890 кГц а также для стали 12X18H10T 70-270 кГц, 370-470 кГц и 630-770 кГц за весь период нагружения образца, видно что, сигналы АЭ, возникающие при завершении фрагментации материала, образовании и поворотов мезообъёмов, появлении и развитии микро- и макротрещин, генерируются в диапазоне 40-290 кГц для алюминиевого сплава Д16, а для стали 12X18H10T в диапазоне 70-270 кГц. Были определены изменения параметров АЭ в зависимости от прочности деформированных деталей для материалов Д16 и стали 12X18H10T, путем деформирования.

Из параметров сигналов АЭ (N, ∑N, E), наиболее информативным и дающим наилучшие корреляционные зависимости с интенсивностью деформаций, приведенные в ниже, при изготовлении фасонных деталей ГС, является энергия сигналов АЭ, которая более отчетливо реагирует на изменение микроструктуры конструкционного материала (рис 10,а), образовывая скачкообразные выбросы энергии. В то время, как зависимость суммарного счета практически равномерно без больших перепадах. При смене механизмов деформации микро- мезо- макро идет процесс релаксация накопленной энергии, выражающаяся в большем приращении энергии за короткие промежутки времени.

Такой характер параметров сигналов АЭ обусловлен размножением дефектов и их увеличение связано с ограничением возможности движения дефектов этого типа. Когда исчерпаны возможности деформации по данному механизму, можно предположить некоторый пороговый уровень деформаций, характерный для данного материала.



Рис.10 Диаграммы изменения параметров акустической эмиссии при растяжении для материалов алюминиевого сплава Д16 (а) и стали 12Х18Н10Т (б).

Дальнейшее развитие деформации происходит при локальном сдвиге или смещении сопряженных объемов материала, которые можно рассматривать как части образовавшейся деформационной структуры. Можно увидеть, что переход от одной формы деформационной структуры к другой сопровождается высвобождением упругой энергии и акустической эмиссией с большим по величие уровнем энергии.

Для образцов из стали 12X18H10T на рис 10,6 также показано 5 стадий изменения микроструктуры и их связи с параметрами АЭ. На пятой стадии возникает потеря несущей способности материалов исследуемого образца в результате нарушения его сплошности в локальной области.

По результатам экспериментов были получены зависимости энергии сигналов АЭ и интенсивности деформации по аппроксимированным линиям тренда зависимости (рис 6,7) для каждого раздаточного тела, а также скорости счета и интенсивности деформации по аппроксимированным линиям тренда зависимости для каждого раздаточного тела. Затем на основе этих зависимости построены аппроксимирующие поверхности по координатам \dot{N} - ϵ_i - E_{pT} - скорости счета АЭ - интенсивности деформаций - свойств раздаточного тела, а также $E_{AЭ}$ - ϵ_i - E_{pT} - энергии сигналов АЭ - интенсивности деформаций - свойств раздаточного тела. Все обработанные данные сведены в таблице 2.

Таблица.1

Уравнение поверхности предельного состояния материалов в зависимости от параметров сигналов АЭ, интенсивности деформации и характеристик раздаточных тел.

Материалы	Падающая сила при деформировании Т3	Полез ные Сигна лы АЭ	Материал раздаточного тела	Уравнение линии тренда	Достоверность	Уравнение поверхности предельного состояния	Погрешность, %
тав, Д16	F=35 Pa	Скоро сть счета, Ň	Резина	$\dot{N} = 1.33e^{0.202\varepsilon_i}$	R ² =0.98	$\dot{N} = 0.045\epsilon_i^2 + (0.08E_{PT} + 0.85)\epsilon_i + 5.12$	1.227
			Лед	$\dot{N} = e^{0.27\varepsilon_i}$	R ² =0.71		2.32
			Лед/опилки	$\dot{N}=1.06e^{0.28\varepsilon_i}$	R ² =0.62		2.059
		Энерг ия, Е _{АЭ}	Резина	$E = 0.55e^{0.25\varepsilon_i}$	R ² =0.63	$\begin{split} & E_{A\Im} \\ &= 0.027 \epsilon_i^2 \\ &+ (0.06 E_{PT} \\ &+ 0.36) \epsilon_i + 2 \end{split}$	0.87
			Лед	$E = 0.21e^{0.412\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.96$		1.116
й сп.			Лед/опилки	$E = 0.22e^{0.44\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.92$		1.01
lebbl	F=40 Pa	Скоро сть счета, Ň	Резина	$\dot{N} = 0.39e^{0.33\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.90$	$ \begin{split} \dot{N} &= 0.07 \varepsilon_i^2 \\ + & (0.064 E_{PT} \\ + & 0.75) \varepsilon_i \\ + & 8.32 \end{split} $	4.77
Алюмини			Лед	$\dot{N} = 0.78e^{0.37\varepsilon_i}$	R ² =0.69		4.795
			Лед/опилки	$\dot{N} = 0.33e^{0.49\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.88$		4.556
		Энерг ия, Е _{АЭ}	Резина	$E = 0.23e^{0.27\varepsilon_i}$	R ² =0.96	$\begin{array}{l} E_{A\Im} \\ = 0.04\epsilon_{i}^{2} \\ + (0.13E_{PT} \\ + 0.35)\epsilon_{i} \\ + 2.12 \end{array}$	1.428
			Лед	$E = 0.24e^{0.36\varepsilon_i}$	R ² =0.98		1.367
			Лед/опилки	$E = 0.28e^{0.41\varepsilon_i}$	R ² =0.92		1.344
	F=35 Pa	Скоро сть счета, Ň	Резина	$\dot{N} = 5.08e^{0.23\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.72$	$\dot{N} = 0.017 \epsilon_i^2 + (0.05 E_{PT})$	10.765
			Лед	$\dot{N}=2.57e^{0.36\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.89$		16.532
Cranb, 12X18H10T			Лед/опилки	$\dot{N} = 2.24 e^{0.37\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.93$	+ 0,68)ε _i + 15.58	15.914
		Энерг ия, Е _{АЭ}	Резина	$E = 0.27e^{0.26\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.81$	$E_{A\Im}$ = 0.044 ε_i^2 + (0.06E _{PT}	1.097
			Лед	$E = 0.42e^{0.31\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.70$		1.464
			Лед/опилки	$E = 0.66e^{0.27\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.73$	+ 0,36)ε _i + 3.47	1.265
	F=40 Pa	Скор ость счета , Ņ	Резина	$\dot{N} = 2.49e^{0.27\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.84$	\dot{N} = 0.028 ϵ_{i}^{2} + (0.038 E_{PT}	14.924
			Лед	$\dot{N} = 2.55e^{0.28\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.89$		12.442
			Лед/опилки	$\dot{N} = 3.82e^{0.26\varepsilon_i}$	R ² =0.79	+ 0,56)ε _i + 7.26	12.685

	Энер	Резина	$E = 0.21e^{0.27\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.82$	$E_{A\partial}$ = 0.057 ϵ^2	1.274
	E _{AЭ}	Лед	$E = 0.48e^{0.21\varepsilon_i}$	$R^2=0.85$	$+ (0.048E_{PT})$	1.202
		Лед/опилки	$E=0.59e^{0.20\varepsilon_i}$	$R^2 = 0.84$	$(+ 0.62)\varepsilon_i$ + 10.33	1.184

Уравнение поверхности предельного состояния дает возможность определить достижение предельного состояния конструкционного материала при изготовлении, при известной связи между параметрам сигналов АЭ, интенсивностей деформации и свойствами рабочих тел. Аналогично получены уравнения поверхностей предельного состояния для алюминиевого сплава Д16 и стали 12Х18Н10Т (табл. 1).

Отклонения экспериментальных данных (R) от поверхности предельного состояния материала определяем по методу наименьших квадратичных отклонений. Достоверность линий тренера и их уравнений получены с применением стандартного программного обеспечения.

В исходном состоянии материал находится в начале координат, с сходней дефектностью микроструктуры полученной при кристаллизации металла и изготовлении трубной заготовки при достижении состояния структуры материала поверхности он разрушится, т.е. превышения значений параметров АЭ (E_{AЭ} и N) выше поверхности – нарушение сплошности твердого тела.



Рис. 11. Поверхность предельного состояния для алюминиевого сплава Д16 при F= 40 кH, в зависимости от характеристик различных раздаточных тел, энергии сигналов АЭ (a), скорости счета (б) и интенсивности деформаций \mathcal{E}_i

Анализируя полученные уравнения поверхности материалов видно, что погрешность результатов поверхности по скорости счета N составляет 16 %, а по энергии АЭ 1.5 %, Следовательно более эффективным параметром определяющим состояние конструкционного материала, для прогнозирования предельного состояния фасонных деталей ГГС с учетом рабочего тела, будет энергия АЭ.

В результате анализа поверхностей предельного состояния получено обобщенное уравнение поверхности прогнозирования годности деталей к эксплуатации $E_{A\Im} = a\epsilon_i^2 + (bE_{PT} + c)\epsilon_i + d$, где предельное состояние определяется $E_{A\Im}$ - энергией сигналов АЭ, ϵ_i – интенсивность деформация и E_{pa} свойств раздаточного тела, a, b, c, d – экспериментальные коэффициенты.

В дальнейшем по поверхности предельного состояния можно определить долю поврежденности конструкционного материала полученную при изготовлении деталей ГГС по соотношению:

$$\Pi = \frac{E_{A\Im \, \text{der}}}{E_{A\Im \, \Pi\Pi C}} < 1 \tag{4}$$

где: П – доля повреждения микро структуры конструкционного материала при конкретной интенсивности деформации ε_i и характеристик раздаточного тела, $E_{A\Im}_{\text{дет}}$ – энергия АЭ материала деталей ГГС при изготовлении, $E_{A\Im}_{\Pi\Pi C}$ – энергия сигналов АЭ, взятая с поверхности предельного состояния при той же интенсивности деформации ε_i и соответствующих характеристик рабочего тела.

При достижении энергии, в любой точке пространства $E_{A\Im}$ - ε_i - E_{pT} при деформировании образца, величины равной энергии поверхности предельного состояния при определенных условиях деформирования доля поврежденности детали будет равна единице – это граница после которой деталь не допускается к эксплуатации.

В четвертой главе: Рассмотрены существующие методы неразрушающего контроля и испытания деталей ГГС на прочность и разработана методика прогнозирования прочности фасонных деталей ГГС по параметрам сигналов акустической эмиссии(АЭ).

Методика прогнозирования прочности фасонных частей трубопроводов высокого давления с применением метода АЭ при изготовлении заключается в нахождении корреляции между дефектностью структуры и остаточной прочностью материала. В процессе деформирования при формообразовании деталей ГГС, возникающие напряжения в конструкционном материале нет возможности измерить. Измерение деформаций возможно определить только после окончания деформирования заготовки и формообразования деталей ГГС. Поэтому при деформировании трубных заготовок с целью изготовления деталей ГГС (назовем этот процесс первичным деформированием) ведется регистрация АЭ непосредственно с трубной заготовкой в процессе изготовления деталей. Количество полученных дефектов учитывается по параметрам АЭ. Для определения остаточной прочности деталей ГГС вырезаются испытательные образцы из готовой детали после ее формообразования рис 12. Затем на испытательном прессе производится их растяжение до полного разрушения и определяется остаточная прочность. Анализируя полученные результаты устанавливаются корреляции между дефектностью структуры (энергией АЭ) после первичного деформирования, определяемую по параметрам АЭ, когда деталь формировалась и остаточной прочностью. На основании полученных зависимостей можно сделать прогноз прочности остальной партии деталей, дефектность структуры которых известна на этапе формообразования деталей ГГС, но не известна их истинная остаточная прочность.

Для определения предельного напряжения деформированных деталей при повторном нагружении, вырезанных образцов использовалась испытательная машина Instron 3382 с максимальной мощностью 100 кН, с скоростью деформирования 0,05-500 мм/мин и с точностью измерения напряжений и деформаций 0,5%.



(б)

Рис.12. Схема исследуемых образцов до испытаний (а), их вид после (б)

Это методика позволяет установить зависимость остаточной прочности без разрушения остальной части партии деталей, по сигналам АЭ зарегистрированными при их изготовлении. Детали ГГС, формообразованные в результате деформирования, при изготовлении получают повреждения и дефекты, при этом фиксируются сигналы АЭ и значения первичной интенсивности деформации ε_i , а на вырезанном образце при повторном нагружении определяется остаточная прочность. Сравнивая величины интенсивности деформаций с учетом параметров АЭ, мы можем получить прогноз прочности остальной партии деталей ГГС. При обработке результатов нужно учитывать, что вырезанные образцы имеют начальный изгиб в деформированной части (рис 12).

На диаграмме (13) представлены зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ для алюминиевого сплава Д16 при повторном нагружении которые изначально деформировались под действием силы F=35(a) и 40 кH(б). Как видно, что испытываемые образцы для алюминиевого сплава Д16 при повторном нагружении изначально имеющие более дефектную структуру материала из которого они изготовлены, или получившие больше повреждений на микроуровне в процессе изготовления деталей ГГС показывают меньшую прочность, материал разрушается.



Рис.13. Связь между напряжениями и остаточной деформацией для образцов из алюминиевого сплава Д16 при повторном нагружении которые изначально деформировались под действием силы F=35 kH (а) и F=40 kH (б).



Рис.14. Связь между напряжениями и остаточной деформацией для образцов из стали 12X18H10T при повторном нагружении которые изначально деформировались под действием силы F=35 kH (a) и F=40 kH (б).

Затем получаем зависимость между остаточной прочностью конструкционного материала деталей ГГС и максимальной энергией АЭ в единицу времени Е_{АЭ}, записанными при формообразовании детали (первое деформирование) (Рис. 15).







Рис.15. Зависимость между энергией сигналов АЭ, зарегистрированных при деформировании деталей и остаточной прочностью деформируемых деталей при повторном нагружении для алюминиевого сплава Д16 (а) и стали 12X18H10T(б).

Энергия сигналов АЭ, которая регистрировалась в процессе изготовлении деталей лежит в диапазоне для алюминиевого сплава Д16 от 4 до 8 мВ².с и для стали 12Х18Н10Т от 4 до 8 мВ².с. Также на рис 15 видно влияние свойств раздаточных тел на остаточную прочность. Так Например детали деформированные раздаточным телом из льда имеют остаточную прочность выше, так как изначально получили меньшую деформацию. Таким образом, можно прийти к выводу, что остаточная прочность σ_{oc} коррелируется с энергией сигналов АЭ.

Полученные зависимости между энергией АЭ, выделяемых при изготовлении фасонных деталей и остаточной прочностью показывает, что более дефектные детали имеют меньшую прочность и большую энергию АЭ, при этом величина остаточной деформации у дефектных деталей обратно пропорционально величине энергии сигналов АЭ.

Основные выводы по диссертации:

1. Выявлена зависимость между интенсивностью деформацией и параметрами АЭ в зависимости от характеристики рабочего тела при изготовлении деталей ГГС.

2. На основе взаимозависимости интенсивности деформации и параметров АЭ с учетом характеристик раздаточных тел, установлено предельное состояние конструкционного материала, которое определяет годность деталей ГГС к эксплуатации.

3. Предложено обобщенное уравнение поверхности предельного состояния конструкционного материала, возникающее во время изготовления деталей ГГС, которое является критерием годности деталей к эксплуатации.

4. Установлена возможность определения доли повреждения конструкционного материала вовремя изготовления деталей ГГС по уравнению поверхности предельных состояний, что позволит прогнозировать остаточный ресурс деталей.

5. Установлена устойчивая зависимость между остаточной прочностью деформируемого материала и энергией сигналов АЭ, полученных при первичном деформировании.

6. Предложена методика прогнозирования остаточной прочности фасонных деталей ГГС при их изготовлении по параметрам сигналов АЭ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах, уровнях цитирования web of science и Scopus:

1. Phone Htet Kyaw. Regularities of Changes in the Fractal Dimension of Acoustic Emission Signals in the Stages Close to the Destruction of Structural Materials When Exposed to Low-Cycle Loaded/ Phone Htet Kyaw., Sysoyev O.E., Kuznetsov E.A., Marin B.N. International Conference on Mechanical Engineering and Power Engineering (MEPE 2018), Beijing, China. Pp 213-217.

2. Phone Htet Kyaw. Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System// Min Ko Hlaing., Phone Htet Kyaw., Maryn B.N// Proceedings of the 5th international conference on industrial engineering (ICIE 2019). Vol 2. 25-29 march 2019. Sochi, Russia.

3. Phone Htet Kyaw. The method of estimating the durability of structure materials from the effect of cyclic loads// Kuznetsov E.A., Sysoyev O.E., Phone Htet Kyaw// Materials Science Forum, 2020, 992 MSF, pp 178-183.

-рекомендованных ВАК для публикации научных результатов кандидатских диссертаций:

4. Пхон Хтет Кьяв. Обеспечение точности и надежности работы штампосварных элементов трубопроводных систем летательных аппаратов/ Марьин Б. Н., Иванов И. Н., Старцев Е. А., Бахматов П. В., Пхон Хтет Кьяв//КШП ОМД «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» №7, 2019г. С 13-19.

5. Пхон Хтет Кьяв. Обеспечение точности и надежности работы штампосварных элементов трубопроводных систем летательных аппаратов/ Марьин Б. Н., Иванов И. Н., Старцев Е. А., Бахматов П. В., Пхон Хтет Кьяв// КШП ОМД «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» №8, 2019г. С 26-36.

6. Пхон Хтет Кьяв. Прогнозирование длительной прочности фасонных деталей гидрогазовых систем по параметрам акустической эмиссии (АЭ)/ Сысоев Е.О., Кузнецов Е.А., Сысоев О.Е., Пхон Хтет Кьяв// Труды МАИ. Выпуск № 110, 2020г. С 4.

7. Пхон Хтет Кьяв. Прогнозирование долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок/ Сысоев Е.О., Кузнецов Е.А., Пхон Хтет Кьяв., Мин Ко Хлайнг// Труды МАИ. Выпуск № 108, 2020г. С 2.

8. Пхон Хтет Кьяв. Анализ дефектов эксплуатируемых гидрогазовых систем трубопроводов/ Марьин.Б.Н., Ким.В.А., Сысоев.О.Е., Куриный.В.В., Пхон Хтет Кьяв., Мин Ко Хлайнг. Ученые записки –КнАГУ,2017, № 1 (29), с 79-89.

9. Пхон Хтет Кьяв. Определение групп точности для изготовления монтажных заготовок трубопроводов с разъемными и неразъемными соединениями/ Марьин.Б.Н., Куриный.В.В., Пхон Хтет Кьяв., Мин Ко Хлайнг. Ученые записки-КнАГУ,2017, № 4 (32), С. 88-99.

-свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. - № 2021615874 «Прогнозирование длительной прочности фасонных деталей гидрогазовых систем по параметрам сигналов акустической эмиссии при изготовлении (ПДПФД-2021)», Сысоев О.Е., Пхон Хтет Кьяв; Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ, заявка № 2021614968; опубл. 18.04.2021.

-в 1-м патенте на изобретение:

11. Патент на изобретение № 2696913 (РОСПАТЕНТ)/ Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Иванов И.Н., Пхон Хтет Кьяв. Способ гибки тонкостенных труб. 07.08.2019 Бюл №22.

-а также в других изданиях:

12. Пхон Хтет Кьяв. Моделирование раздачи концов тонкостенных заготовок для трубопроводов/ Марьин Б.Н., Потянихин Д.А., Пхон Хтет Кьяв. XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург.2018, с3.

13. Пхон Хтет Кьяв. Моделирование раздачи концов тонкостенных труб по жесткому пуансону седловидной формы/ Марьин Б.Н., Пхон Хтет Кьяв., Мин Ко Хлайнг// В сборнике: Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре 2019г. С 119-122.

14. Пхон Хтет Кьяв. Влияние возможности деформирования алюминиевого сплава Д16 на параметры фрактальной размерности акустических сигналов/ Пхон Хтет Кьяв., Сысоев Олег Евгеньевич., Кузнецов Егор Александрович// В сборнике: Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х частях. Редколлегия: Э.А. Дмитриев(отв.ред.)[и др.]. 2020. С 158-160.

15. Пхон Хтет Кьяв. Прогнозирование долговечности фасонных деталей трубопроводов высокого давления/Пхон Х.К., Сысоев О.Е., Кузнецов Е.А// В сборнике: ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. г.Ижевск, 04 октября 2021 года. С. 48-53.