

ОТЗЫВ

официального оппонента

к.т.н., доцента Марченкова Артёма Юрьевича на диссертационную работу Болотникова Алексея Игоревича «Исследование закономерностей деградации конструкционных материалов в процессе нагружения методами механики и физики разрушения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы диссертации

Продление сроков безопасной эксплуатации оборудования нефтегазового комплекса, энергетики и судостроения относится к числу приоритетных задач современной технической диагностики. Значительная доля отказов ответственных элементов конструкций обусловлена усталостью — процессом скрытого накопления повреждений, которые выявляются традиционными средствами неразрушающего контроля лишь на завершающих стадиях, когда в материале уже сформировались макротрещины и возможности предупреждения разрушения существенно ограничены. В этих условиях разработка физически обоснованных методов и критериев, позволяющих оценивать степень циклической деградации материала до образования макродефектов, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решению которой посвящена диссертационная работа.

В диссертационной работе А.И. Болотникова указанная задача решается на основе совместного применения двух технологий диагностики — метода акустической эмиссии (АЭ), обеспечивающей регистрацию процессов зарождения и развития повреждений в объеме материала в режиме реального времени, и метода корреляции цифровых изображений (КЦИ), позволяющей выявлять распределения полей деформаций по поверхности образца. Использование схемы нагружения «циклика–статика» дает возможность контролируемо воспроизводить различные степени поврежденности материала и исследовать их влияние в рамках единого эксперимента. Применительно к широкому кругу конструкционных сталей с различным типом микроструктуры подобное исследование в систематической постановке выполнено впервые, что дополнительно подтверждает научную значимость диссертационной работы.

Структура и содержание работы

Диссертация изложена на 209 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 234 наименований и приложения, содержит 20 таблиц и 95 рисунков. Структура работы логична и подчинена решению поставленных задач.

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором рассмотрены экспериментальные и теоретические подходы к анализу деградации конструкционных материалов, критерии и механизмы деградации при различных видах нагружения, а также возможности применяемых в работе методов – акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и структурного анализа. Обзор опирается на большой массив отечественных и зарубежных источников, включая публикации последних лет, и свидетельствует о глубоком владении автором предметной областью. На его основе соискателем выявлен пробел в современном состоянии проблемы – отсутствие систематических исследований, выполненных с применением комплекса методов АЭ и КЦИ при схеме нагружения «циклика–статика» на материалах с различным типом микроструктуры.

Вторая глава содержит характеристику исследуемых материалов и описание применяемых методик. Исследованы стали с бейнитной структурой F500W и 15X2ГМФ, аустенитная сталь 12X18Н10Т после закалки с различных температур и аустенитная сталь 316L, изготовленная методом селективного лазерного сплавления. Для апробации критериев дополнительно исследована трубная сталь 15X13Н2 после коррозионных испытаний, а для демонстрации возможностей КЦИ при оценке трещиностойкости – компактные образцы из стали 20. Испытания проводились на поверенных испытательных машинах Instron по стандартизированным методикам, регистрация АЭ осуществлялась широкополосными датчиками, поля деформаций обрабатывались с использованием апробированного программного обеспечения; автором разработано собственное программное обеспечение для количественного анализа размеров пластических зон.

В третьей главе на основе анализа производных напряжения по деформации, параметров АЭ и КЦИ установлена стадийность процесса разрушения исследуемых сталей при статическом растяжении. Отдельного внимания заслуживают выделение новой характерной точки σ_{D2} на диаграмме деформирования, соответствующей началу формирования сильнодеформированной пластической зоны и подтвержденной независимыми наблюдениями накопления микротрещин и установленная связь периода акустического затишья с локализацией пластической деформации в бейнитных сталях.

Четвертая глава посвящена основному предмету исследования – влиянию предварительного циклического нагружения на механические свойства, параметры АЭ, кинетику пластических зон и рельеф изломов. Автором установлено, что с ростом относительной долговечности N/N_f

закономерно снижаются суммарное число и активность сигналов АЭ, а также $b_{\text{АЭ}}$ -параметр, площади пластических зон S_L и S_H при одновременном росте угла нарастания RA и максимального значения главной деформации $\varepsilon_{1\text{max}}$. Автором предложено использовать этот комплекс параметров в качестве диагностических критериев для оценки степени циклической деградации материала. Ценность результатов усиливается установленной количественной взаимосвязью параметров АЭ и КЦИ, фрактографическим подтверждением накопления многоочаговых усталостных повреждений, а также анализом работы разрушения и её составляющих.

В пятой главе предложенные критерии апробированы на стали 15X13H2, подвергнутой выдержке в сероводородсодержащей среде под нагрузкой по стандартизированной методике. Показано, что коррозионная деградация вызывает изменения параметров АЭ и КЦИ, качественно совпадающие с установленными при циклической деградации (снижение $\Sigma N_{\text{АЭ}}$ в 3–5 раз, снижение $b_{\text{АЭ}}$ -параметра и площадей пластических зон), при сохранении стадийности разрушения. Этот результат демонстрирует универсальность разработанного подхода по отношению к виду эксплуатационного воздействия.

В заключении представлены основные выводы по диссертационной работе.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы и достоверны. Достоверность результатов обеспечивается применением современного аттестованного испытательного и регистрирующего оборудования, использованием стандартизированных методик испытаний, взаимной согласованностью данных, полученных независимыми методами (механические испытания, АЭ, КЦИ, оптическая и электронная микроскопия, фрактография), воспроизводимостью установленных закономерностей на сталях различных структурных классов и их непротиворечивостью результатам других исследователей. Основные результаты прошли широкую апробацию: они представлены на шести российских и международных научных конференциях и опубликованы в 10 статьях, из которых 8 – в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 – в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ № 19-19-00674 и № 23-19-00784.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов

Научная новизна работы заключается в следующем: впервые в единой экспериментальной постановке для сталей с бейнитной и аустенитной структурой, включая сталь, полученную методом аддитивного

формообразования, установлены общие закономерности изменения параметров АЭ и КЦИ при их циклической деградации; предложен и обоснован комплекс диагностических критериев степени деградации ($\dot{N}_{АЭ}$, $\Sigma N_{АЭ}$, $b_{АЭ}$, RA , S_L , S_H , ε_{lmax}); впервые выделена характерная точка σ_{D2} на диаграмме деформирования, отвечающая началу локализации деформации; установлено влияние размера зерна, деформационного фазового превращения и технологических дефектов аддитивного производства на акустический отклик и локализацию деформации; показана применимость критериев деградации материала вследствие коррозионного воздействия.

Практическая значимость полученных результатов не вызывает сомнений. Предложенный комплекс диагностических критериев степени усталостной поврежденности, основанный на параметрах акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений, может быть непосредственно использован при разработке и совершенствовании методик неразрушающего контроля и прогнозирования остаточного ресурса ответственного оборудования судостроения, нефтегазовой отрасли и энергетики, включая конструкции из арктической судостроительной стали F500W и стали нефтяных насосных штанг 15X2ГМФ. Продемонстрированная в работе в главе 5 применимость разработанных критериев к коррозионной деградации трубной стали 15X13H2 подтверждает универсальность предложенного подхода по отношению к виду эксплуатационного воздействия. Разработанное автором программное обеспечение для количественного анализа полей деформации и размеров пластических зон по данным КЦИ обеспечивает получение количественных характеристик локализации деформации и может найти самостоятельное применение в исследовательской и диагностической практике. Практическая реализация результатов подтверждена их внедрением на профильном предприятии – ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций».

Замечания по работе

Наряду с отмеченными достоинствами, по работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. Из текста автореферата и диссертации не всегда ясно, какое количество образцов испытывалось для каждого режима предварительного циклирования; статистическая обработка разброса параметров АЭ, которым свойственна значительная вариативность, представлена ограниченно, что затрудняет суждение о доверительных интервалах критериальных значений.

2. Положение характерной точки σ_{D2} определяется по второй производной напряжения по деформации, чувствительной к шуму исходных данных; целесообразно было бы привести сведения о применявшейся процедуре сглаживания и оценить её влияние на устойчивость определения σ_{D2} .

3. В автореферате и диссертации говорится о явлении акустического затишья в начале стадии III, которое автор связывает с формированием слабдеформированной зоны и локализацией процесса разрушения. Однако анализ представленных в работе кривых деформирования с наложенными на них данными АЭ показывает, что для части из них упомянутое акустическое затишье нехарактерно либо неочевидно.

4. Различия в положениях характерных точек, в том числе точки σ_{D2} , на кривых растяжения исследуемых бейнитных и аустенитных сталей, а также ряд других полученных результатов на стали 12X18H10T объясняется протеканием мартенситного превращения при деформации. При этом в работе недостаточно внимания уделено исследованию этого превращения. Целесообразно было бы использовать методы электронной микроскопии (сканирующей или просвечивающей) либо магнитные методы неразрушающего контроля для исследования кинетики этого явления. Это позволило бы перевести часть рассуждений из гипотетических в экспериментально подтвержденные.

Перечисленные замечания частично носят характер пожеланий к дальнейшему развитию исследования, не ставят под сомнение обоснованность научных положений и выводов диссертации и не влияют на её общую положительную оценку.

Заключение

Диссертационная работа Болотникова Алексея Игоревича «Исследование закономерностей деградации конструкционных материалов в процессе нагружения методами механики и физики разрушения» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача установления диагностических критериев циклической деградации конструкционных сталей по параметрам акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений, имеющая существенное значение для металловедения, неразрушающего контроля и оценки остаточного ресурса ответственных конструкций.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а также паспорту научной специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». Автореферат и опубликованные работы полно отражают содержание диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертация Болотникова А.И. является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени

кандидата технических наук, а её автор, Болотников Алексей Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук (05.16.09 - Материаловедение (по отраслям)), доцент, доцент кафедры технологии металлов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

 /Марченков Артём Юрьевич/

«20» июля 2026 г.

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Болотникова А.И.

Контактные данные:

Адрес: 111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Тел.: +7 (495) 362-75-68

e-mail: MarchenkovAY@mpei.ru

Подпись А.Ю. Марченкова удостоверяю:



Зам. начальника управления
по работе с персоналом ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Л.И. Полевая