

ОТЗЫВ

официального оппонента

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 диссертационного исследования.

Обеспечение надежности и безопасной эксплуатации ответственных конструкций судостроения, нефтегазовой отрасли и энергетики неразрывно связано с проблемой своевременного выявления накопленной в материале поврежденности. Конструкционные стали в процессе эксплуатации подвергаются длительному циклическому нагружению, при котором структурные повреждения накапливаются постепенно и в течение большей части ресурса не проявляются в виде макроскопических дефектов, обнаруживаемых традиционными средствами неразрушающего контроля. Стандартные механические испытания дают лишь интегральную оценку состояния материала и не позволяют проследить кинетику накопления повреждений. В этих условиях особую значимость приобретает разработка физически обоснованных критериев степени деградации, опирающихся на методы, чувствительные к эволюции дефектной структуры на ранних стадиях, такие как акустическая эмиссия (АЭ) и корреляция цифровых изображений (КЦИ).

Несмотря на значительный объем исследований, выполненных отечественными и зарубежными научными школами, к началу работы соискателя отсутствовали систематические данные о закономерностях изменения параметров АЭ и КЦИ при деградации сталей с различным типом микроструктуры, полученных по различным технологиям, в единых условиях нагружения по схеме «циклика–статика». Не были установлены и общие количественные критерии, связывающие показания указанных методов со степенью истощения ресурса. Таким образом, тема диссертации, направленной на восполнение этого пробела, несомненно актуальна как в научном, так и в прикладном отношении.

Общая характеристика работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 234 наименований и приложения; общий объем работы составляет 209 страниц, включая 20 таблиц и 95 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обстоятельный аналитический обзор современного состояния проблемы деградации конструкционных материалов. Автором систематизированы экспериментальные и теоретические подходы к анализу деградации (термодинамический, кинетический, подходы механики разрушения и механики поврежденности, статистический), рассмотрены критерии и механизмы деградации при однократном, циклическом, длительном статическом и коррозионном воздействиях, а также детально проанализированы возможности методов АЭ, КЦИ и структурных исследований. Обзор отличается достаточно широким охватом литературы, включая новейшие зарубежные публикации, и завершается сформулированными выводами, из которых логично вытекает постановка задач исследования.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. В число исследованных материалов вошли бейнитные стали (арктическая судостроительная сталь F500W и сталь для нефтяных насосных штанг 15X2ГМФ), нестабильная аустенитная сталь 12X18H10T, закалённая на различный размер зерна, и аустенитная сталь 316L, полученная методом селективного лазерного сплавления, что позволило оценить влияние как типа микроструктуры, так и технологии изготовления. Экспериментальная база работы включает современное аттестованное оборудование (испытательные машины Instron 3382 и Instron 8801, АЭ-система Express-8 с широкополосными датчиками, регистрация полей деформации с обработкой в программной среде Ncorr, растровая электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ).

В третьей главе установлена стадийность процесса разрушения исследованных сталей при статическом растяжении с одновременной регистрацией

параметров АЭ и КЦИ. К числу наиболее интересных результатов главы следует отнести выделение по второй производной напряжения по деформации характерной точки σ_{D2} на диаграмме деформирования, соответствующей началу локализации деформации и формирования сильнодеформированной пластической зоны, а также установление связи периода «акустического затишья» в бейнитных сталях с началом образования слабдеформированной пластической зоны. Физическая обоснованность выделенных стадий убедительно подтверждена прямыми наблюдениями иерархии накопления микротрещин и фрактографическим анализом. Важным металловедческим результатом являются полученные для стали 12X18H10T зависимости параметров АЭ и размеров пластических зон от размера зерна, подобные соотношению Холла–Петча, а также выявленное влияние мартенсита деформации в стали 12X18H10T и технологических дефектов в аддитивной стали 316L на акустический отклик и характер локализации деформации.

Четвертая глава является центральной в работе. На основании усталостных испытаний с построением кривых усталости и последующего растяжения подвергнутых предварительному циклическому нагружению образцов автором выявлен комплекс механических и физических характеристик, чувствительных к степени циклической деградации, и установлены общие для сталей с различной структурой закономерности: с ростом относительной долговечности N/N_f (N_f - число циклов при разрушении) снижаются активность $\dot{N}_{АЭ}$ и суммарное число сигналов АЭ - $\Sigma N_{АЭ}$, $b_{АЭ}$ -параметр (отражающий долю высокоамплитудных сигналов), площади слабо- и сильнодеформированной пластических зон, тогда как отношение времени нарастания импульса к его амплитуде RA и максимальное значение главной деформации возрастают. Установленная количественная взаимосвязь параметров АЭ и КЦИ, а также анализ работы разрушения и её составляющих придают полученным критериям физическую значимость. Показано, что характер отклика материала на предварительное циклическое нагружение определяется его микроструктурой: для бейнитных сталей характерно чередование стадий упрочнения и разупрочнения, для аустенитных – упрочнение.

В пятой главе выполнена апробация установленных критериев для иного вида деградации – коррозии под напряжением трубной стали 15X13H2 в сероводородсодержащей среде. Показано, что установленные ранее закономерности

изменения параметров АЭ и КЦИ выполняются и в этом случае, что указывает на достаточную общность предложенного подхода и существенно повышает ценность полученных результатов.

В заключении представлены основные выводы диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации не вызывает сомнений. Она обеспечивается: значительным объемом экспериментальных данных, полученных на шести марках сталей с использованием современного аттестованного испытательного и аналитического оборудования; применением стандартизированных методик механических испытаний; комплексным характером исследования, при котором результаты, полученные независимыми методами (механические испытания, АЭ, КЦИ, оптическая и электронная микроскопия, фрактография), взаимно согласуются и подтверждают друг друга; соответствием полученных закономерностей современным представлениям физики прочности и механики разрушения, а также данным других авторов. Результаты работы прошли апробацию на шести российских и международных конференциях, опубликованы в 10 научных статьях, в том числе 8 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 – в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Исследования выполнялись в рамках проектов Российского научного фонда (№ 19-19-00674, № 23-19-00784), что предполагает независимую экспертизу их результатов.

Научная новизна результатов исследования.

К наиболее значимым новым научным результатам работы следует отнести:

- установление общих закономерностей изменения параметров акустической эмиссии и характеристик полей локальных деформаций в результате циклической деградации бейнитных (F500W, 15X2ГМФ) и аустенитных (12X18H10T, 316L селективного лазерного сплавления) сталей;
- обоснование эффективности диагностических критериев циклической деградации, включающих параметры АЭ ($N_{АЭ}$, $\Sigma N_{АЭ}$, $b_{АЭ}$, RA) и КЦИ (S_L , S_H , ε_{lmax}), для описания коррозионной деградации стали 15X13H2;

- выделение по второй производной «напряжения по деформации» характерной точки σ_{D2} на диаграмме деформирования, отвечающей началу формирования сильнодеформированной пластической зоны, с подтверждением её физического смысла независимыми методами;
- оценка влияния микроструктуры и технологии изготовления, включая образование мартенсита деформации в стали 12X18H10T и технологические дефекты в аддитивной стали 316L, на закономерности деградации механических и физических свойств;
- взаимосвязь параметров АЭ; КЦИ и размера зерна $d^{1/2}$ аустенитной стали.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о стадийности накопления поврежденности в сталях с различным типом структуры и о связи параметров АЭ и полей локальных деформаций с процессами микро- и макротрещинообразования. Результаты работы получили практическое применение - «внедрены в деятельность» ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» (акт прилагается).

Замечания по диссертационной работе.

При общей высокой оценке работы необходимо отметить следующие замечания:

1. В главе 2 исходная микроструктура исследуемых сталей охарактеризована недостаточно полно: не приведены количественные данные о загрязненности неметаллическими включениями, масштабах полосчатости и анизотропии проката, что важно, в частности, с учетом потенциального влияния этих факторов на АЭ.

2. Взаимосвязь параметров АЭ, размеров пластических зон и размера зерна $d^{1/2}$ стали 12X18H10T была оценена по трем значениям размера зерна; для более состоятельных оценок необходимо расширение диапазона размеров структурных состояний и соответствующая статистическая обработка полученных закономерностей.

3. Предварительное циклирование разных сталей проводилось при различных относительных уровнях максимального напряжения (например, $\sim 1,05 \cdot \sigma_{0,2}$ для стали

F500W и $\sim 0,9 \cdot \sigma_{0,2}$ для стали 15X2ГМФ), что усложняет прямое количественное сопоставление чувствительности критериев деградации для разных материалов; целесообразно было бы обсудить влияние уровня напряжения цикла на установленные закономерности.

4. В работе не в полной мере обсужден вопрос о переносимости установленных на лабораторных корсетных образцах количественных значений критериев (S_L , S_H , $\Sigma N_{AЭ}$ и др.) на образцы иной геометрии и натурные элементы конструкций с учетом влияния масштабного фактора и условий регистрации АЭ.

5. В работе использован широкий спектр разнородных характеристик АЭ, было бы целесообразно в итоге, на основе накопленного опыта, ранжировать их по степени эффективности и дать рекомендации по выбору информативных параметров АЭ применимо к решаемым задачам в физике разрушения и металловедении.

Указанные замечания носят частный, либо рекомендательный характер, не затрагивают основных научных положений и выводов диссертации и не снижают общей положительной оценки выполненного исследования.

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.

Диссертация Болотникова А.И. соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а также паспорту научной специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и

сплавов». Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

По содержанию и объёму исследований, новизне, научной и практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п. II. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней»), а её автор, Болотников Алексей Игоревич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент:

доктор технических наук по специальности 05.16.01 - Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов (2.6.1), профессор, профессор кафедры metallovedeniya i fizikiпрочности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

 /Кудря Александр Викторович/
«32» сентября 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: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1

Тел.: +7 (495) 955-00-13; e-mail: AVKudrya@misis.ru

ПОДПИСАНО:  ЗАВЕРЯЮ
Профессор
и об
НИ

И.М. Исаев