

### **О Т З Ы В   официального оппонента**

**на диссертационную работу Евгения Дмитриевича Мерсона «Исследование механизма разрушения и природы акустической эмиссии при водородной хрупкости низкоуглеродистой стали», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

Диссертационная работа Е.Д. Мерсона посвящена исследованию двух важных вопросов физики разрушения - природы водородной хрупкости и связанной с ней акустической эмиссии, оба вопроса относятся к числу актуальных проблем, от решения которых зависит обеспечение надежности и безопасности эксплуатации многих конструкций, работающих в водородсодержащих средах в разных областях промышленности. Поэтому **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Исследование природы водородной хрупкости, как и природы сопровождающей ее акустической эмиссии, невозможно без использования тонких физических и механических методов исследования, выявляющих различные аспекты исследуемых явлений. Многочисленность и разнообразие методов, использованных в этой работе, выгодно отличает ее от большинства диссертационных исследований.

Так, в задачи исследования входили механические испытания образцов из двух конструкционных сталей (отожжённой низкоуглеродистой стали S235JR и высокопрочной стали 70 после закалки и отпуска) при двух видах нагружения (растяжении и трехточечном изгибе). Изучены поверхности изломов и микроструктура сталей методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) и методом анализа картин дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD). Выполнен газовый анализ методами плавления и экстракционного нагрева в потоке газа носителя, оценена концентрация водорода и параметры акустической эмиссии.

Использование междисциплинарных подходов и современного оборудования для решения задач исследования обеспечило возможность применения

тонких и разнообразных методов к анализу водородной хрупкости исследуемых материалов.

Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста, включает 80 рисунков и 7 таблиц, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, содержащего 224 наименования.

**В первой главе** приведен обстоятельный обзор литературных данных, представлены современные представления о механизмах водородной хрупкости и особенностях процесса наводороживания сталей, проанализированы работы по оценке водородной хрупкости методом акустической эмиссии. Обзор интересен тем, что отражает не только современное состояние исследований, проведенных как отечественными, так и зарубежными авторами, но и их историю.

Результаты обзора позволили автору обосновать задачи дальнейших исследований по теме диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию материалов и многочисленных методов исследования, приведена геометрия образцов и методика их наводороживания, а также методика газового анализа, методы механических испытаний и регистрации акустической эмиссии. Детально описаны методы микроскопии, позволяющие оценить площадь, занятую блистерами, и оценить размеры и углы разориентировки фасеток на поверхности изломов. Для получения и анализа картин дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) использовано оборудование, встроенное в СЭМ SIGMA, и программное обеспечение.

**В третьей главе** представлены результаты анализа повреждений микроструктуры и поверхности образцов, возникающих в результате наводороживания, а также экспериментальные данные, полученные методом газового анализа. Рассмотрено влияние плотности тока наводороживания на формирование блистеров и их площадь, обнаружена четкая корреляция площади блистеров и концентрации диффузионно-подвижного водорода. Изучено влияние плотности тока наводороживания на асимметрию экстракционных кривых, оценена энергия активации водорода, соответствующая экстракционным кривым для наводороженных образцов и предложена физическая модель, объясняющая экспериментально полученные зависимости.

**Четвертая глава** диссертации содержит данные исследования влияния концентрации диффузионно-подвижного водорода на механические свойства, особенности поверхностей разрушения и параметры акустической эмиссии, оценённые в процессе растяжения низкоуглеродистой стали. Показано, что наводороживание вызывает уменьшение площади под диаграммой деформирования, связанное с уменьшением площадки текучести, участков деформационного упрочнения и локализованной деформации, при этом площадь и



количество дефектов «рыбий глаз» увеличиваются, а относительное поперечное сужение образцов снижается. Рост трещин «рыбий глаз» не вызывал интенсивной акустической эмиссии, это позволило автору предположить, что их рост происходил по механизму образования и слияния микропор.

Проведенный в пятой главе диссертации детальный фрактографический анализ особенностей микрорельефа и механизма формирования поверхности разрушения в пределах дефектов «рыбий глаз», подтвердил это предположение. Важно, что для такого анализа авторы сравнили микрорельеф исследуемых дефектов с рельефом фасеток скола при хрупком разрушении образцов в жидком азоте. На основе полученных результатов предложена модель формирования рельефа дефектов «рыбий глаз».

Результаты исследования, приведенные в шестой главе диссертации, позволили сравнить особенности развития водородной хрупкости в низкоуглеродистой и высокопрочной стали. Показано, что в высокопрочной стали, в отличие от низкоуглеродистой стали, в пределах дефектов «рыбий глаз» формируется микрорельеф межзеренного разрушения. На основе данных акустической эмиссии и фрактографии предложена стадийность разрушения охрупченной водородом высокопрочной стали.

Диссертация хорошо написана, содержит детальное обсуждение полученных результатов, много качественных фрактограмм, графического материала и таблиц, и представляет интерес, как для науки, так и для практики. Все главы структурированы и завершаются частными выводами. Заключение содержит общие результаты и выводы по диссертации.

**Достоверность** исследования не вызывает сомнений, поскольку в работе использовано современное оборудование и современные методы анализа, дополняющие друг друга и позволяющие оценивать различные особенности процесса развития водородной хрупкости в сталях с различной прочностью и вязкостью.

**Новизна и научная значимость** диссертационной работы Е.Д. Мерсона состоит в установленном им вязком характере разрушения гладких образцов из наводороженной низкоуглеродистой стали в пределах дефектов типа «рыбий глаз»; в обнаруженной им сигмоидальной по форме зависимости концентрации диффузионно-подвижного водорода в этой стали от плотности тока электролитического наводороживания; в разработке методики определения углов разориентировки фасеток на поверхности разрушения при помощи конфокальной лазерной сканирующей микроскопии.

Работа представляет ценность и с **практической точки зрения**: диссертант изучил взаимосвязь параметров акустической эмиссии с особенностями раз-

вития водородной хрупкости в конструкционных сталях с разной прочностью и вязкостью, что представляет интерес для развития методов неразрушающего контроля. Зависимость концентрации диффузионно-подвижного водорода в низкоуглеродистой стали от плотности тока электролитического наводороживания может быть использована при выборе режимов электролиза для насыщения образцов водородом. Диссертантом получено **2 патента РФ**.

Результаты диссертации опубликованы в **30 работах, 8** из которых - в рецензируемых изданиях, входящих в систему цитирования WoS и Scopus и рекомендованных ВАК РФ.

**Автореферат соответствует диссертации** и достаточно полно отражает ее основное содержание, результаты и выводы.

### Замечания

1. Вывод о том, что рост трещин, приводящий к появлению в изломе наводороженной низкоуглеродистой стали дефектов «рыбий глаз», происходит по «вязкому» механизму, вряд ли можно распространять на все случаи проявления водородной хрупкости в подобных сталях, поскольку механизм разрушения определяется локальным напряженным состоянием в устье трещины, которое, в свою очередь, является функцией как структуры материала, так и геометрии образца, длины трещины, вида нагружения и других факторов.
2. Сравнение механизмов водородной хрупкости в исследуемых сталях следовало бы проводить при одном виде нагружения.
3. Несмотря на трудности оценки картин множественного разрушения, при описании рельефа изломов образцов обеих сталей было бы важным выполнить обычный фрактографический анализ с определением очага, или очагов разрушения, и области долома образцов.
4. Увеличение числа оцененных параметров акустической эмиссии позволило бы полнее охарактеризовать влияние наводороживания образцов на стадийность разрушения.

Замечания не снижают ценность работы, выполненной на современном научном уровне и продемонстрировавшей высокий научный потенциал диссертанта.

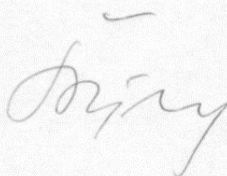
Диссертация Е.Д. Мерсона представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, соответствующую поставленным целям и задачам, ее результаты могут быть доступны и полезны для широкого круга научных и инженерных работников, и использованы для обеспечения безопас-



ности эксплуатации различных конструкций, работающих в сероводородсодержащих средах.

Рассмотрение диссертационной работы Е.Д. Мерсона показывает, что она соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

**Официальный оппонент**  
**Главный научный сотрудник**  
**ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН,**  
**проф., д. т. н.**



**Ботвина Л.Р.**

**Людмила Рафаиловна Ботвина** - главный научный сотрудник ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, профессор, доктор технических наук по специальностям 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела и 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры;  
 почтовый адрес: 115561, г. Москва, Каширское шоссе 128-1-15,  
 сл. тел. 8(499)135-96-83; e-mail: botvina@imet.ac.ru

**Ученый секретарь ИМЕТ РАН**  
**К.Т.Н.**




**О.Н. Фомина**