

ОТЗЫВ

официального оппонента Астафуровой Елены Геннадьевны на диссертацию Мерсона Евгения Дмитриевича «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

Проблема водородной хрупкости промышленных конструкционных сталей стоит достаточно остро, поскольку разрушение элементов конструкций, контактирующих с водородосодержащими средами, влечет за собой отказ оборудования. Несмотря на колоссальный объем знаний о физических процессах, происходящих при наводороживании сталей, природа водородной хрупкости до сих пор описана не полностью. В связи с этим, тема диссертационной работы, посвященная исследованию механизмов разрушения и природы акустической эмиссии (АЭ) при водородной хрупкости низкоуглеродистой стали, безусловно, обладает **новизной и актуальностью**.

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, выводов и списка цитируемой литературы из 224 наименований. Общий объем работы составляет 161 страницу машинописного текста, включает 80 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, публикациях автора и его личном вкладе в диссертационную работу.

В первом разделе диссертации представлен обзор литературы об основных процессах, происходящих при наводороживании сталей, о лабораторных методах насыщения металлических материалов водородом, об основных механизмах и особенностях проявления эффекта водородной хрупкости в сталях. В разделе также приведен обзор экспериментальных работ о применении метода АЭ для исследования водородной хрупкости и сделано заключение о том, что существующих к настоящему времени экспериментальных данных не достаточно для однозначного описания процессов охрупчивания сталей в среде водорода с помощью метода АЭ.

Во втором разделе описаны материалы исследования и подробно рассмотрены методы термической обработки материала, методы и режимы наводороживания образцов, исследования их структуры и механических свойств, методы регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии.

В третьем разделе представлены оригинальные результаты экспериментальных исследований по изучению характера повреждения поверхности образцов и концентрации водорода в низкоуглеродистой стали при электролитическом наводороживании при разных плотностях тока. В разделе приведены данные об исходной структуре и механических свойствах образцов исследуемой стали S235JR и выполнен анализ характера повреждения структуры и поверхности образцов при наводороживании.

Детальный анализ структуры поверхности образцов, состояния и энергии связи водорода при разных плотностях тока насыщения стали водородом позволил автору установить, что зависимость концентрации диффузионно-подвижного водорода от плотности тока наводороживания имеет сложный, нелинейный характер и может быть разделена на три стадии. При этом каждая из стадий определяется объемной долей, количеством и типом ловушек. В разделе предложена физическая модель, позволяющая описать обнаруженные эффекты.

В четвертом разделе представлены результаты исследования по влиянию наводороживания на механические свойства, характер излома и параметры акустической эмиссии при одноосном растяжении стали S235JR в отожженном состоянии. Выявлены основные закономерности изменения механизма разрушения стали в зависимости от режима наводороживания и описаны особенности проявления в наводороженных образцах квазихрупкого разрушения – дефектов «рыбий глаз». В разделе показано, что зарождение индуцируемых водородом квазихрупких фасеток происходит на стадии деформационного упрочнения, а образование дефектов «рыбий глаз» не вызывает высокочрезвычайно энергетической АЭ.

Пятый раздел посвящен изучению морфологии и рельефа поверхностей разрушения отожженной стали S235JR после электролитического насыщения водородом. Приведены данные о характере излома сколом и его особенностях при разрушении исследуемой стали в жидком азоте, которые свидетельствуют о том, что морфология дефектов «рыбий глаз» схожа с поверхностями скола и квазискола, но имеет существенные отличия. В разделе разработан механизм формирования фасеток при образовании дефекта «рыбий глаз», который позволяет адекватно описать экспериментально наблюдаемое разнообразие морфологических особенностей речного узора на такого рода дефектах.

В шестом разделе изучены особенности проявления эффекта водородной хрупкости и его влияния на параметры АЭ при трехточечном изгибе высокоуглеродистой стали 70 со структурой троостита. В разделе установлены основные источники АЭ в образцах исследуемой стали и проанализированы основные различия в параметрах АЭ, возникающие в результате насыщения образцов водородом. Описано изменение механизма разрушения стали при наводороживании и определены основные стадии разрушения наводороженной стали, которые надежно идентифицируются методом АЭ.

В последних двух разделах представлены заключение и общие **выводы** по диссертационной работе. Все выводы обоснованы и вытекают из приведенных в диссертации результатов исследований и их анализа.

Диссертация написана и оформлена в соответствии с установленными требованиями. Основное содержание диссертации отражено в 30 публикациях. Автореферат диссертации отражает основные положения и выводы диссертации.

Для достижения сформулированной в работе цели был поставлен ряд экспериментальных задач, которые были успешно решены Евгением Дмитриевичем с

привлечением современных методов экспериментальных исследований. К **наиболее важным научным и практически значимым результатам работы, определяющим ее новизну**, следует отнести:

- экспериментально установленную стадийность зависимости концентрации диффузионно-подвижного водорода в стали S235JR от плотности тока при электролитическом наводороживании и ее связь с исходной микроструктурой и механическими свойствами стали и с процессами образования блистеров на поверхности образцов;

- выявленные морфологические особенности поверхности индуцируемых водородом дефектов «рыбий глаз», подтверждающие их специфический механизм роста, отличный от механизма транскристаллитного скола или квазискола, образующегося при разрушении низкоуглеродистой стали при криогенных температурах;

- экспериментально установленную взаимосвязь параметров акустической эмиссии и стадийности пластического течения низкоуглеродистой стали, насыщенной водородом, которая показывает, что индуцируемые водородом трещины сложно поддаются идентификации методом АЭ.

Достоверность научных результатов, обоснованность выводов и выносимых на защиту научных положений не вызывает сомнения, так как они обеспечены корректной постановкой задачи, использованием современных методов исследования: акустической эмиссии, сканирующей электронной микроскопии, дифракции обратнорассеянных электронов и конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Описание особенностей деформации и разрушения исследуемых сталей автор диссертации сопровождает подробными иллюстрациями и схемами, проводит критический анализ результатов при сопоставлении собственных данных с исследованиями других авторов, что подтверждает достоверность основных положений, выносимых на защиту.

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для специалистов, работающих в области физики конденсированного состояния, физического материаловедения и могут быть использованы в различных отраслевых, вузовских и академических учреждениях России. **Значимость диссертационной работы для науки и практики** подтверждена новыми данными о механизмах водородного охрупчивания углеродистых сталей, которые могут быть использованы при разработке методик контроля материалов, работающих в водородсодержащих средах.

В качестве **замечаний** к диссертации можно отметить следующее:

1. В разделе 2 автор диссертации приводит детали подготовки образцов для механических испытаний и указывает, что «все грани ... образцов были отшлифованы ... при помощи шлифовальной бумаги №600. Затем одна большая грань всех образцов была отшлифована последовательно при помощи наждачной бумаги №800, 1200, 2000, 2500». Автор верно указывает в литературном обзоре и во введении к разделу 3, что шероховатость поверхности является одним из факторов, определяющих концентрацию

водорода, адсорбированного образцом. Поскольку продолжительность насыщения не велика (60 мин.), разные грани образцов на растяжение, очевидно, были наводорожены по-разному. Кроме того, более «грубое» шлифование подразумевает, что поверхность образца будет наклепана, то есть будет содержать деформационные дефекты, которые являются коллекторами для водорода. В этой связи возникает несколько вопросов, которые не нашли отражения в диссертационной работе, но требуют пояснения. Насколько, по мнению автора, значимы различия в степени насыщения водородом разных граней образцов для растяжения? Были ли соответствующим образом подготовлены поверхности «маленьких» образцов для анализа концентрации водорода и корректна ли в этом случае корреляция данных по концентрации водорода между ними и образцами на растяжение, подвергнутыми насыщению при одинаковых условиях?

2. Автор работы в разделе 3 упоминает о различиях в фазовом составе и морфологии феррито-перлитной структуры стали S235JR в состоянии поставки и после отжига. При этом он, к сожалению, в обсуждении результатов не уделяет внимание тому факту, что сталь имеет гетерофазную структуру и большое количество межфазных границ.

3. В диссертации не нашел отражения важный вопрос об объемном распределении водорода после насыщения. Сложно ожидать, что после часового насыщения стали водородом его распределение будет равномерным по сечению образца. Пластическая деформация, в конечном итоге, способствует более равномерному распределению водорода по сечению образца, и после разрыва поверхность разрушения выглядит достаточно однородной (рис. 4.8). При этом в экспериментах по пластической деформации наводороженных образцов до 1-15% (когда его содержание не «размазано» по образцу за счет пластической деформации), дегазации и последующему их разрушению в отсутствие водорода, образование вторичных трещин, хрупких фасеток скола или квазискола (дефектов «рыбий глаз») происходит преимущественно у поверхности образцов – в областях с максимальной концентрацией водорода после насыщения, а центральная часть разрушается вязко. При описании и анализе процессов формирования блистеров в разделе 3 и при описании процессов зарождения дефектов «рыбий глаз» в разделе 4 автору, вероятно, следовало бы принять во внимание существование градиента концентрации водорода по сечению образцов, и связанных с этим эффектом внутренних напряжений.

4. Автору работы не удалось избежать неточностей и опечаток при подготовке рукописи. В ряде случаев экспериментальные данные приведены без точного указания обработки, которой были подвергнуты образцы. Так, например, при анализе влияния плотности тока наводороживания в разделе 3.2 на рисунках 3.2 и 3.3 не указана плотность тока, при которой проводили насыщение; на рисунке 4.1. не приведены данные об исходном состоянии стали, подвергнутой наводороживанию, для ориентационных EBSD карт не приведены цветные схемы ориентаций (стереографические треугольники) и др.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку работы и не подвергают сомнению достоверность и обоснованность выводов и положений, выносимых на защиту. Диссертационная работа Мерсона Е.Д. представляет собой законченное научное исследование, которое соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. В соответствии с пунктом II.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» диссертация может рассматриваться как научно-квалификационная работа, в которой изложены результаты исследований, направленных на расширение представлений о механизмах водородной хрупкости и методах ее контроля в конструкционных углеродистых сталях.

По уровню решаемых задач, научной новизне, практической значимости, объему полученных результатов диссертационная работа «Исследование механизма разрушения и природы акустической эмиссии при водородной хрупкости низкоуглеродистой стали» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Мерсон Евгений Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

доктор физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
Института физики прочности и
материаловедения СО РАН
(ИФПМ СО РАН)

Е.Г. Астафурова

Подпись Е.Г. Астафуровой подтверждаю:
ученый секретарь ИФПМ СО РАН,
доктор технических наук

В.С. Плешанов

Астафурова Елена Геннадьевна,
ведущий научный сотрудник, лаборатория физического материаловедения,
ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФПМ СО РАН),
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4
тел.: +7-903-913-2339 (моб.), (3822)286961 (раб.),
e-mail: elena.g.astafurova@gmail.com