

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.060.01,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук,
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24.06.2021 № 3/21

О присуждении Судьину Владиславу Витальевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование особенностей разрушения низколегированных сталей и их сварных соединений в интервале вязко-хрупкого перехода» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 22 апреля 2021 г., протокол № 2/21, диссертационным советом Д 002.060.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49, приказ Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Судьин Владислав Витальевич 1992 года рождения в 2013 году окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по специальности «Химия».

В 2017 г. окончил аспирантуру по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Работает младшим научным сотрудником в лаборатории «Новых технологий металлических и керамических материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории «Новых технологий металлических и керамических материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Солнцев Константин Александрович, академик РАН, доктор химических наук, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

Научный консультант – Кантор Матвей Матвеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Новых технологий металлических и керамических материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металловедение и физика прочности» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет» Московского института стали и сплавов (НИТУ «МИСиС»).

2. Колобов Юрий Романович, доктор физико-математических наук, профессор, Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией физико-химической инженерии композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химической физики Российской академии наук.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном главным научным сотрудником Центра сталей для труб и сварных конструкций, НЦКС, кандидатом технических наук Морозовым Ю.Д. и ученым секретарем кандидатом технических наук Москвиной Т.П., и утвержденном генеральным директором, кандидатом экономических наук Семеновым Виктором Владимировичем указала, что диссертация В.В. Судьина является завершенной научно-квалификационной работой, а полученные результаты полностью соответствуют поставленным целям и задачам и являются новыми, обоснованными и достоверными. Диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертационным работам Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. и паспорту специальности 01.04.07. Автор диссертации – Судьин Владислав Витальевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

В положительном отзыве ведущей организации имеются следующие замечания:

1. в автореферате отсутствуют показатели химического состава, механических свойств и микроструктуры исследуемых образцов сталей 09Г2С и 17Г1С. Кроме того, появляется на стр. 17 трубная сталь класса прочности К60. Что за сталь? На стр. 18 идет речь о исследовании, непонятно откуда и как получен «сварной шов №4» и далее еще сварные швы №1 и №3. Что за металл, и каким образом получены швы?

2. нельзя согласиться, что в случае сварных соединений высокая энергия «доллома» может приводить к недостоверной оценке надежности материала;

3. из литературы и из металлургической практики известно, что введение в сталь нитридов и оксидов титана способствует увеличению ударной вязкости

основного металла и особенно сварных соединений. Однако в исследовании отсутствуют данные о размере включений и стехиометрии нитрида и оксида титана;

4. отсутствуют выводы о том, каким образом титан попадает в сварной шов – из основного металла или из сварочных материалов.

От официального оппонента Кудри А.В. поступил положительный отзыв со следующими замечаниями:

1. достаточно схематично в обзоре литературы проанализированы возможности применения нейронных сетей. Они быстро строят решающий «черный ящик», который предсказывает результат. Но само решение нередко остается спрятанным («внутри программы»), а способность нейронной сети предсказывать правильно зависит от объема обучения. В этой связи был бы весьма полезен критический анализ практики применения нейронных сетей в рамках исследуемого класса задач;

2. для обучения нейронной сети было построено частотное распределение значений доли вязкого излома для всех образцов (рис. 3.2 диссертации). На его основе был сделан вывод о том, что приведенное распределение значений доли вязкого излома равномерно, с небольшим сдвигом в область низких значений, что позволило соискателю предположить достаточность данных для обучения нейронной сети. Однако наблюдается ли для найденного распределения наименьшее среднеквадратичное отклонение от истинного не ясно;

3. в работе на основе сопоставления изображений хрупкого и вязкого изломов (рис. 3.4. и 3. 5 диссертации) и Фурье-образов изображений вязкой и хрупкой составляющих излома (рис. 3.6, там же) делается вывод о том, что можно использовать значения яркости пикселей изображений последних, к привязке к их месту расположения в изломе, в качестве входных параметров для обучения нейронной сети, т.к. они сохраняют своё положение при переходе от одного изображения к другому. Однако при этом не вполне понятно, почему при достаточно однородном характере поля яркости изображений в оттенках

серого хрупкого и вязкого изломов, например, для стали 17Г1С8, должны так отличаться их Фурье-образы;

4. в одном из выводов пятой главы утверждается, что («контроль раннего зарождения хрупкой трещины возможен путём измерения расстояния от надреза до области хрупких фасеток на изображении излома с применением показанной зависимости между прогибом образца до образования хрупкого участка излома и расстоянием от надреза до области хрупких фасеток»). При этом отмечается, что замена параметра глубины вязкой трещины на долю вязкого излома невозможна. В этой связи было бы полезно привести результаты фрактографического анализа для иллюстрации сделанного заключения;

5. в выводе 5 к шестой главе диссертации указывается на наличие четырёх механизмов образования деформации при транскристаллитном росте трещины скола. Не вполне понятно тогда, почему к таковым относится («третий механизм – межзёренное разрушение, которое протекает практически без деформации материала»;

6. при анализе микроструктурных факторов хладноломкости сварных соединений низколегированных малоуглеродистых сталей, определяющих зарождение скола (глава 8) отмечается, в частности, о возможности межзеренного разрушения в связи с наличием в микроструктуре крупных зерен зернограничного феррита. Однако, что приводит к вскрытию зернограничных фасеток требует более подробного объяснения.

От официального оппонента Колобова Ю.Р. поступил положительный отзыв со следующими замечаниями:

1. в диссертационной работе, по мнению автора отзыва, с излишней скромностью, выносимые на защиту положения и выводы отнесены только, следуя контексту диссертации, «в применении к низколегированным сталям». В то же время следовало бы рассмотреть возможности расширения на более широкий класс металлических материалов, сделанных в работе и всесторонне

обоснованных заключений по совокупности сравнительного анализа литературных данных и результатов оригинальных исследований;

2. диссертационная работа представляет серьезный рукописный труд, текст которого изложен на 189 страницах, в котором на удивление крайне редко, скорее, как исключение, но встречаются мелкие неточности. К ним относятся отсутствие замеченных оппонентом лишь в двух местах запятых (на стр.108 и 116), и на стр. 153 вместо наречия «вследствие» употреблено «в следствии».

На автореферат диссертации Судьина В.В. поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные.

1. Отзыв главного научного сотрудника Научного Центра «Рельсы, сварка, транспортное материаловедение» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», д.т.н., профессора Шура Е.А. содержит 3 замечания:

- имеется некоторое противоречие между современнейшими методами исследования, использованными в работе (нейронные сети, автоматизированные методы анализа фрактограмм и динамических кривых разрушения), и старым методом испытания односторонне надрезанных образцов на ударный изгиб, результаты которого не могут быть использованы при расчетах конструкций. Неоднородность напряженного состояния по ширине образца могла бы быть уменьшена при использовании для построения сериальных кривых ударной вязкости в области вязко-хрупкого перехода образцов с острыми надрезами с трех сторон образца;

- в работе недостаточно систематично исследована роль неметаллических включений (оксидов, сульфидов, силикатов, нитридов) на сопротивление сварных швов трубных сталей хрупкому разрушению. Не дифференцированы неметаллические включения, имеющиеся в металлической матрице еще на металлургическом заводе, и внесенные при сварке. На с. 19 имеется сомнительное утверждение о том, что «титаносодержащие включения... вводятся в металл для формирования структуры игольчатого феррита»;

- вызывает сожаление, что разработанные автором автоматизированные методы анализа фрактограмм и критерии стадийности разрушения не были применены к исследованиям эксплуатационных разрушений трубопроводов в результате коррозионного растрескивания под напряжением.

2. Отзыв начальника сектора НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» д.т.н. Филина В.Ю. и старшего научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» к.т.н. Мотовилиной Г.Д. содержит 8 замечаний:

- используемая автором терминология не всегда понятна. Термин «хладноломкость» в общепринятом понимании — это склонность металла разрушаться при холодной механической обработке. Данный термин не имеет отношения к склонности к хрупким разрушениям металла в составе конструкций при эксплуатационных нагрузках и низких климатических температурах. Термин («динамическая кривая» не является общепринятым. Испытания на ударный изгиб, где скорость взаимодействия не превышает 5 м/с, считать динамическими в отношении изменения свойств материала не следует. Термины («перекрытие поверхностей трещин», «околонейтральная среда» не ясны;

- в качестве одной из задач работы указано «изучение», которое само по себе задачей работы быть не может;

- использование («оценки надежности» по результатам испытаний на ударный изгиб для материалов хладостойких конструкций приемлемо только для тонкостенных конструкций, толщина которых сравнима с толщиной образца на ударный изгиб. Кроме того, рассеяние значений ударной вязкости и их «чувствительность» к характеристикам металла на порядок ниже, чем у известных параметров трещиностойкости (J-интеграл). Утверждение, что «высокая энергия долома может приводить к недостаточной оценке надёжности материала», требует дополнительных пояснений. Возможно, следует говорить о сопротивлении материала старту разрушения по хрупкому механизму;

- из текста автореферата не ясны методы изготовления исследуемых сварных соединений, температуры испытания;

- автором исследована только верхняя часть вязко-хрупкого перехода, где, действительно, есть шанс аппроксимировать кривую нагружения ударного образца таким образом, чтобы выделить максимальную нагрузку и различные участки, которые ставятся в соответствие проскоку трещин скола. Однако если речь идёт о низких температурах, где уровень работы удара составляет менее 30 Дж, кривые нагружения обычно представляют собой набор пиков. Применимость разработанной методики в таких случаях автором не исследована;

- в тексте автореферата не расшифрованы обозначения параметров, влияющих на вид излома ($W_{уд}$, X_B , T , F_B-F_B , X_A). Не ясно, чем их использование лучше общепринятой методики соотнесения кристаллической доли в изломе с отношением величины срыва (В-Г) к максимальной нагрузке (0-А), см. рисунок 1 автореферата;

- утверждение автора, что распространение трещин может не сопровождаться деформацией, весьма спорно. В классической теории, отсутствие деформации возможно только при некоторых видах коррозионного разрушения;

- в тексте автореферата имеются опечатки: «в следствие», «в следствии», («кристаллографических особенности», «в ...среде, характеризующейся транскристаллитным распространением трещин».

3. Отзыв научного руководителя инженерно-технологического центра АО «Выксунский металлургический завод» д.т.н. Эфрона Л.И. содержит 3 замечания:

- не ясно, какова область применения разработанного метода автоматического анализа изображений изломов, какие особенности изломов он учитывает, например «расщепления»?

- требуют пояснения параметры динамической кривой, приведенные на стр. 11 автореферата: $W_{уд}$, X_B , T , F_B-F_B , X_A , также не ясно каким образом доля вязкой составляющей в изломе связана с этими параметрами;

- на наш взгляд было бы полезным сопоставить микроструктуру всех исследованных образцов проката и сварных соединений, а также количественно

охарактеризовать включения на основе титана (в металле и в исследованных изломах).

4. Отзыв начальника лаборатории труб Корпоративного научно-технического центра развития трубной продукции ООО «Газпром ВНИИГАЗ» к.т.н. Есиева Т.С. содержит 2 замечания:

- в тексте автореферата не сказано, какие типы образцов использованы при проведении испытаний на ударный изгиб – образцы с надрезом Менаже (КСU) или с надрезом Шарпи (КСV). Соответственно этому не ясно, как выбор типа образца может повлиять на полученные в ходе исследования результаты?

- в шестой главе говорится, что включения нитрида титана инициируют образование трещин скола в локально хрупких участках основного металла. В седьмой главе указывается на то, что нитриды титана вызывают хрупкое разрушение с образованием очагов скола в околошовной зоне сварных соединений. В восьмой главе титаносодержащие включения ответственны за возникновение большого количества очагов скола в металле сварного шва. Таким образом, не складывается однозначного понимания, для какого из участков сварного соединения – основного металла, сварного шва, околошовной зоны – титаносодержащие неметаллические включения оказывают более негативную роль в микромеханизме разрушения?

5. Отзыв ведущего научного сотрудника лаборатории труб и соединительных деталей ООО «НИИ Транснефть», к.т.н. Скородумова С.В. содержит 2 замечания:

- в качестве пожеланий к оформлению автореферата работы хотелось бы видеть расшифровку параметров геометрии в модели нейронной сети для вязкого излома, а также нумерации режимов изготовления сварных соединений;

- также хотелось бы соискателю задать вопрос: получилось ли сформировать прогнозные уравнения, отражающие взаимосвязь параметров строения динамической кривой разрушения и долей вязкой и хрупкой составляющих в изломе ударных образцов? И если да, то насколько они отличаются между собой для различных марок сталей.

6. Отзыв заведующего лабораторией материаловедения и сварки ООО «ТМК НТЦ», к.т.н. Арсенкина А.М. содержит 8 замечаний:

- чем объясняется «зуб» на динамической диаграмме «нагрузка — перемещение» на рис. 1.2 автореферата? Не связано ли это с ошибкой аппроксимации?

- учитывался рельеф излома при оценке доли вязкой и хрупкой составляющей?

- на стр. 11 в 3 абзаце указаны параметры динамической кривой. Было бы желательно дать расшифровку данных параметров;

- необходимо расшифровать номера методов сварки, указанных на стр. 12. Как структурно различались образцы, сваренные по различным методам?

- из автореферата непонятно какой применялся вид надреза на образце для испытаний на ударный изгиб. Может ли влиять вид надреза на полученные результаты и как?

- каким методом было определено, что распространение трещин скола в колонии перлита и при росте хрупкой трещины в пределах одного зерна не сопровождается пластической деформацией;

- вызывает сомнение тезис о том, что «..локально вязкими участками становятся колонии перлита..» с учетом того что перлит - хрупкая структурная составляющая. (см. стр. 14). При какой температуре проводилось испытание и каков был размер ферритного зерна?

- оценивалось ли в работе влияние субструктуры на механизм разрушения исследованных сталей при испытаниях на ударный изгиб и при исследованиях КРН?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетенцией, наличием публикаций и достижений в области физики конденсированного состояния, квалификацией, способностью определить актуальность, научную и практическую ценность представленной диссертационной работы.

Соискатель имеет 14 работ, опубликованных по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях – 5, опубликованных в трудах конференций – 7. Общий объем работ по теме диссертации составляет 4 печатных листа (авторский вклад 90 %).

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Кантор М.М., Судьин В.В., Боженков В.А. Применение метода дифракции отраженных электронов для изучения коррозионного растрескивания под напряжением магистральных трубопроводов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2016. № 3 (27). С. 30-36.

2. Kantor M.M., Sudin V.V., Solntsev K.A. Effect of the type and morphology of grain boundaries on stress corrosion cracking in low-alloy, low-carbon steel // Inorganic Materials. 2019. Т. 55. № 4. С. 409-416

3. Кантор М. М., Судьин В. В., Солнцев К. А. Влияние типа и морфологии границ зерен на коррозионное растрескивание под напряжением в низколегированной малоуглеродистой стали // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55. – №. 4. – С. 442-450.

4. Kantor M. M., Sudin V. V., Solntsev K. A. Analysis of the Relationship between the Load-Displacement Curve and Characteristics of Fracture of Low-Alloy Steel by Neural Networks // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 893-902.

5. Кантор М. М., Судьин В. В., Солнцев К. А. Анализ связи между динамической кривой разрушения и характеристиками излома низколегированной стали с помощью нейронных сетей // Материаловедение. – 2019. – №. 12. – С. 11-20.

6. Kantor M.M., Sudin V.V., Solntsev K.A. Materials science aspects of stress corrosion cracking of Russian pipelines // E3S Web of Conferences 2019. С. 04014.

7. Sudin V. V., Kantor M. M., Solntsev K. A. Features of weld metal brittle fracture in charpy tests // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Т. 28. – С. 1637-1643.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Получены экспериментальные данные, описывающие микроструктурные механизмы диссипации энергии при росте трещины скола в ферритной микроструктуре
- Показано влияние предварительной пластической деформации на очаги скола в околошовной зоне и рассеяние значений ударной вязкости
- Изучены микроструктурные факторы, влияющие на распределение энергии между этапами разрушения
- Разработаны подходы к анализу механизма разрушения и строения излома по параметрам динамических кривых разрушения основанные на использовании нейронных сетей
- Выявлены кристаллографические и геометрические параметры границ зёрен, определяющие сопротивляемость их к КРН в околонеutralной среде и описание перехода от межзёренного к транскристаллитному росту трещины

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- установлено соотношение между параметрами динамической кривой и механизмом разрушения образца в испытаниях на ударный изгиб
- показаны пути диссипации энергии при образовании трещины скола в ферритной микроструктуре
- показано влияние микроструктурных факторов, становящихся очагами зарождения скола на распределение энергии между стадиями разрушения
- исследовано влияние предварительной пластической деформации на способность к зарождению скола на хрупких неметаллических включениях в ферритной матрице и рассеяние значений ударной вязкости
- изучены особенности перехода от межзёренного к транскристаллитному пути роста трещины КРН и показано влияние характера границ зёрен на этот процесс

Значение полученных соискателем результатов исследования для **практики** подтверждается тем, что

- Показано различие в механизмах разрушения основного металла и металла сварных швов, влияющее на оценку надежности в испытаниях на ударный изгиб и предложены подходы к оценке надёжности с учётом показанных различий. Полученные в работе результаты о влиянии микроструктуры на механизм разрушения металла сварных швов могут быть использованы при разработке новых сварочных материалов и методов сварки.
- В ходе работы были разработаны автоматизированные методы анализа изображений изломов и динамических кривых разрушения, позволяющие использовать новые подходы к определению надежности металла низколегированных сталей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- автором выполнен большой объем экспериментов с использованием современных материаловедческих методов и методик;
- для экспериментальных работ использовано сертифицированное оборудование, показана воспроизводимость результатов исследований;
- теория согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации и отвечает представлениям о микромеханизмах разрушения низколегированных сталей;
- использованы современные методики сбора и обработки информации.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследования, проведении основных экспериментов, получении исходных данных, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке основных публикаций по выполненной работе, а также участии в апробации результатов исследования.

Диссертационная работа соответствует требованиям паспорта специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

На заседании 24 июня 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Судьину Владиславу Витальевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет. Решение диссертационного совета принималось открытым голосованием в соответствии с Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Об особенностях порядка организации работы советов по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» №734 от 22 июня 2020 г., направленным на предотвращение распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19), ввиду удаленного участия 9 членов диссертационного совета из 18 участвовавших в заседании.

Председатель

Диссертационного совета
Д 002.060.01, д.т.н., проф.

Поварова К.Б.

Ученый секретарь

Диссертационного совета
Д 002.060.01, д.т.н., доц.

Костина М.В.

«28» июня 2021 г.

Подписи К.Б. Поваровой и М.В. Костиной удостоверены

Ученый секретарь
ИМЕТ РАН, к.т.н.



Фомина О.Н.