

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Ларионова Александра Викторовича

«ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЮ РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИНСТРУМЕНТИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 112/019-88/54	№
«11» 06 2015	л.
Прил. —	подп.

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью освоения Арктики с целью разработки ресурсов морского арктического шельфа, развития и эксплуатации Северного морского пути.

Традиционные материалы для Арктических конструкций – низколегированные конструкционные стали с достаточной прочностью, пластичностью, свариваемостью, в которых существует опасность хрупких разрушений конструкций, работающих при низких климатических температурах, что и определяет необходимость развития подходов к определению температур вязко-хрупкого перехода при аттестации и серийном контроле производства сталей.

Проблема снижения риска хрупких разрушений решалась многими отечественными и зарубежными учеными. Полученные результаты, в т.ч., легли в основу норм Российского морского регистра судоходства (РМРС), требованиям к дополнительным видам испытаний, контролирующим предотвращение старта трещины от технологических дефектов и эксплуатационных повреждений, как для основного металла, так и металла сварных швов, а также обеспечение торможения магистрального хрупкого разрушения – для основного металла.

Для исследуемых в работе конструкционных сталей температуры вязко-хрупкого перехода сегодня определяют несколькими способами: по величине работы ударного изгиба KV; температуре нулевой пластичности NDT; температуре, соответствующей определенному содержанию волокнистой составляющей в изломах полнотолщинных образцов T_{KB} и образцов, испытываемых падающим грузом (ИПГ). Однако насколько полно все они отражают поведение материала в эксплуатации не

вполне ясно. Это обстоятельство определяет актуальность проведения работ в данном направлении, настоящей в т.ч.

Её цель: выработка критериев оценки сопротивления разрушению металлопроката судостроительных и трубных сталей при динамическом нагружении на основе испытаний падающим грузом и обоснование требований к энергоемкости разрушения образцов, обеспечивающих эксплуатационную надежность конструкций.

Диссертационная работа состоит из 6 глав. **Первая глава**, по сути, являющаяся литературным обзором, посвящена принципам и методам оценки хладостойкости низколегированных конструкционных сталей, прогнозирования возможности торможения хрупкого разрушения в конструктивных элементах с дефектами на основе механики разрушения. Рассмотрены требования к Агс-сталям РМРС и методики определения температур вязко-хрупкого перехода NDT и T_{KB} ; применение испытания падающим грузом - как метода оценки температуры вязко-хрупкого перехода. Сделан обзор актуальных технологий производства судостроительных сталей и сталей для магистральных трубопроводов.

Во второй главе рассмотрены методические проблемы определения поглощённой образцом энергии, при инструментированных испытаниях на вертикальных копрах бесконтактным способом с использованием лазерной системы контроля скорости перемещения груза. Апробирована разработанная методика калибровки исследуемых измерительных систем путем сопоставления поглощённой энергии неразрушенного образца. При испытаниях образца без разрушения запасенная потенциальная энергия поглощается образцом и рассчитывается как произведение массы груза P на высоту его сброса h : $A_{\Pi} = P \cdot h$, [Дж]. Сравнение ее с работой, регистрируемой измерительной системой, показало, что относительная погрешность бесконтактной измерительной системы не превышает 1,5 %.

Тепловое окрашивание с последующим доломом этих образцов позволило экспериментально установить связь длины трещины с прогибом образца и обосновать выбор значения прогиба в 70 мм как достаточного для признания образца разрушенным, даже при вязком разрушении.

Третья глава описывает характеристики исследуемых материалов, результаты определения поглощенной энергии и анализ связи энергоемкости разрушения с

прочностными характеристиками стали, видом излома, наличием в нем расслоений (расщеплений).

Объектом исследования явились низко- и среднелегированные судостроительных и трубных сталях с низким содержанием углерода, изготовленные методами термомеханической обработки (ТМО) и улучшения. Получены температурные зависимости работы разрушения. На одной серии образцов во всем температурном диапазоне от вязких до хрупких разрушений между работой разрушения и волокнистой составляющей выявлена корреляция. Показано различие значений работы разрушения (A_p) для материалов различных толщин. С целью выявления данной зависимости работа разрушения представлялась как сумма работы, затрачиваемой на зарождение A_z и распространение трещины A_p : $A_{\Pi} = A_z + A_p$, каждая из которых имела свою зависимость от толщины.

По результатам сопоставления диаграмм деформирования образцов KV и ИПГ при статическом и ударном нагружении, опираясь на литературные данные, автор выявил, что $\sigma_{\text{тд}} = 1,33\sigma_y$.

На работу вязкого разрушения существенное влияние оказывает наличие расслоений в изломе. Автор предполагает, что их появление в современных сталях не связано с металлургическим качеством проката и не сопровождается снижением характеристик пластичности в Z-направлении. А связано с наличием структурной анизотропии, характерной для сталей ТМО: цепочки ферритных зерен по границам бывших зерен аустенита, вытянутых вдоль направления проката и, как следствие, сниженным критическим напряжением отрыва в направлении толщины. Однако в этом и есть проявление металлургического качества в широком смысле (и не только проката). Образованию расслоений сопутствует расширение диапазона вязко-хрупкого перехода при ИПГ. По результатам исследований выявлена взаимосвязь работы разрушения от суммарной длины расслоений L_p .

Проведен анализ вклада в энергоемкость разрушения отдельных его составляющих с различной морфологией, выполнены исследования распределения пластической деформации под поверхностью излома.

Четвертая глава анализирует возможность определения угла раскрытия вершины трещины, характеризующего способность материала совершать работу пластического деформирования при распространении трещины и используемого в ряде

исследований для прогнозирования возможности остановки трещины в трубопроводе по результатам испытаний ИПГ.

Автор в своем исследовании связал угол раскрытия вершины трещины с работой разрушения, допустив, что прогиб образца связан с величиной угла раскрытия вершины трещины и текущей длиной трещины. Работу же при продвижении трещины на величину на единицу толщины автор связал с работой распространения трещины в образце ИПГ.

Показано отсутствие корреляции значений угла раскрытия вершины трещины, получаемых при различных схемах испытаний.

Пятая глава описывает условия торможения хрупкого разрушения в конструктивных элементах и при испытаниях ИПГ с позиции механики разрушения и устанавливается связь температурной зависимости площади кристаллического участка излома с температурной зависимостью параметра трещиностойкости при торможении трещины в условиях плоской деформации – величиной K_{Ia} .

Показано, что для сталей разных категорий прочности и толщин условие торможения будет характеризоваться различным процентом кристаллической составляющей. Полученные теоретические оценки сопоставлены с экспериментальными результатами.

В шестой главе описывается разработанный и введенный в действие стандарт организации СТО-07516250-283-2024 «Определение поглощенной энергии при проведении испытаний на ударный изгиб падающим грузом. Методика испытаний».

Предложен критерий регламентации допустимого снижения фактически определенной работы разрушения по отношению к максимально возможному ее значению при 100 % вязком разрушении рассчитанному или определенному экспериментально.

Представлены предложения по внесению изменений в нормативные документы Российского морского регистра судоходства: Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII «Материалы» и Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов.

Научная новизна исследований заключается, в частности, в следующих положениях:

- показано различие в величине диапазонов вязко-хрупкого перехода судостроительных и трубных сталей, изготовленных методами ТМО (60-100 °С при ИПГ) и термоулучшения (20 до 30 °С), обусловленное более изотропной структурой последних;

- для вязкого механизма разрушения, при испытаниях падающим грузом, предложено соотношение для оценки максимально возможного уровня работы разрушения, связывающее её с квадратом толщины образца, пределом текучести и характеристикой деформационного упрочения материала – отношением предела текучести к временному сопротивлению; предложено учитывать влияние расслоений в изломе на работу разрушения как изменение «эффективной» толщины образца;

- экспериментально показано отсутствие корреляции энергоемкости разрушения образцов ИПГ с рекомендуемым для оценки эксплуатационной надежности металла магистральных трубопроводов параметром «угол раскрытия вершины трещины»;

- предложена модель распространения хрупкого разрушения в образце ИПГ, позволяющая устанавливать влияние толщины и прочности испытываемого материала на сдвиг температуры вязко-хрупкого перехода, сформулировать требования к определению критической температуры ИПГ как температуры допустимого снижения энергоемкости разрушения образца по отношению к теоретическим оценкам, полученным для полностью вязкого разрушения;

- обоснована процедура аттестации судостроительных сталей по результатам инструментированных испытаний ИПГ; для вязкого разрушения показана целесообразность определения поглощенной энергии как дополнение к 100 % волокнистой составляющей в изломе, в связи с различной энергоемкостью вязкого разрушения. Это должно учитываться при выборе материала газопроводов.

Достоверность основных результатов, выводов и рекомендаций подтверждена:

Большим объемом и разнообразием методов эксперимента. Проведением испытаний и исследований в аккредитованных лабораториях на современном оборудовании, имеющем необходимые сертификаты калибровки/свидетельства о поверке в соответствии с установленным государственным реестром средств измерений РФ порядке. Использованием современных методов расчета с применением современных программных продуктов.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке стандарта организации СТО-07516250-283-2024 «Определение поглощенной энергии при проведении испытаний на ударный изгиб падающим грузом. Методика испытаний».

Предложена корректировка методики испытаний ИПГ судостроительных и трубных сталей, в т.ч. показана возможность проведения инструментированных испытаний и критериев применимости материалов по их результатам. Есть акт внедрения.

Автореферат диссертации и публикации автора (в т.ч. 7 из перечня ВАК) соответствуют содержанию и достаточно полно ее отражают. Результаты работы прошли широкое обсуждение на научно-технических конференциях.

По работе имеются следующие замечания:

- Осталось непонятным из текста диссертации – отсутствие явно выраженного вязко-хрупкого перехода по результатам ударных испытаний Шарпи в исследуемых сталях «при минимально возможных отрицательных климатических температурах (вплоть до минус 60 °C)» (стр. 94 диссертации) является их достоинством или недостатком, и как данный факт отразился на результатах исследований.

- В тексте наблюдаются нестрогие формулировки, так, например: «Показано, что величина A_z **приблизительно пропорциональна** толщине образца с коэффициентом, уменьшающимся с ростом предела текучести...» (стр. 10 автореферата). Текст диссертации и автореферата изобилует предложениями сложной конструкции, из которых не всегда можно понять заложенный в них смысл (например, стр. 20 автореферата: «Такой разброс может быть следствием влияния анизотропии свойств материала по сопротивлению распространения трещины в различных направлениях...»; стр. 166 диссертации: «Действительно, вторая особенность заключается в том, что аргументация при обосновании формулы (3.4.8), основанная на предположении, что $AP \sim t^2 (W-a)$, и формулы (4.1.15), различна в корне».

- При определении степени взаимосвязи значений некоторых параметров, исследуемых в работе, было бы целесообразно, например, рис. 3.4.1 и 5.5.2 диссертации, указать соответствующие значения коэффициентов корреляции. Это бы внесло в их оценку количественную меру.

- В работе утверждается (стр. 10 автореферата, стр. 117 диссертации), что «Работа распространения разрушения A_p при полностью вязком его механизме пропорциональна объёму локальной зоны утяжки образца под надрезом (зона больших пластических деформаций – «зона процесса»), то есть квадрату толщины (рисунок 3.4.3)». Однако удельная работа распространения трещины складывается из неоднородных слагаемых - общей работы во всем поле утяжки и локализованной в полосе среза, их соотношение определяется длиной языка трещины (эффект туннелирования), протяженность которого в свою очередь будет определяться различиями в микромеханизмах разрушения, в т.ч. микровязкого. Как учитывать это обстоятельство, применимо к интерпретации результатов измерения утяжки, непонятно.

- На стр. 96 диссертации автор утверждает, что стали, имеющие разные методы производства, обладают разной морфологией поверхностей разрушения в изломах. Однако это не однозначно тождественно. Да и само выражение «поверхность разрушения изломов» является тавтологией. Было бы также полезно предложить более строгую, по сравнению с визуальной, количественную оценку изломов, в т.ч. с учетом его морфологии.

- На рисунке 3.1.4 диссертации представлена микроструктура стали F690 после 3+O, обозначенная автором как «бейнит, имеющий гранулярную морфологию», тогда как на данном изображении идентифицировать данную структуру не представляется возможным.

Заключение.

Диссертационная работа Ларионова Александра Викторовича является законченной научно-исследовательской работой. Выполнена на хорошем научно-техническом уровне, логично построена, написана доступным языком и аккуратно оформлена. Структура и содержание диссертационной работы полностью соответствуют цели и поставленным задачам исследования.

В целом, диссертационная работа Ларионова Александра Викторовича по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему выполненных исследований, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов соответствует действующим требованиям п. 9 Положения ВАК РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых

степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Кандидат технических наук,

доцент кафедры металловедения и физики прочности

Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский технологический

университет «МИСИС», доцент

Элина Александровна Соколовская

Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», www.misis.ru

Тел.: 8 (495) 638-4686

E-mail: sokolovskaya@misis.ru

ПОДПИСЬ

Проректор по

и общим вопросам

НИТУ МИС

ПОДПИСЬ ЗАВЕДУЮЩЕГО

Федеральной государственной автономной образовательной организации высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

М. Исаев

оформлено

11.06.2025