

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)

Актуальность избранной темы диссертационной работы

Для надежной эксплуатации судокорпусных конструкций и магистральных трубопроводов в условиях низких температур металл должен сопротивляться хрупкому разрушению и тормозить вязкое разрушение. При оценке хладостойкости металла важным моментом является определение температуры вязко-хрупкого перехода. В трубной отрасли и судостроении широко применяются испытания на ударный изгиб падающим грузом (ИПГ), при которых сопротивляемость металла разрушению оценивается по доле вязкой составляющей (ДВС). Однако при испытаниях трубных сталей и судосталей, изготавливаемых по технологии термомеханической обработки (ТМО) и имеющих высокую вязкость благодаря дисперсной структуре, в изломах образцов присутствуют специфические морфологии излома («обратный излом», «размерные стрелки»), а также расщепления, что затрудняет анализ. Кроме того, для металла труб высоких категорий прочности (Х80, К65 и выше) нарушается зависимость способности металла к торможению протяженного вязкого разрушения от минимальной ударной вязкости KCV (метод двух кривых Баттеля). Возникли предпосылки к оценке способности металла сопротивляться разрушению с использованием энергетических параметров при тесте ИПГ, что позволяют инструментированные копры. Поэтому тема диссертационной работы А.В. Ларионова, посвященной разработке методологии оценки сопротивляемости металла трубопроводов и судокорпусных конструкций разрушению с использованием теста ИПГ на основе анализа энергетических параметров разрушения, несомненно, является весьма актуальной.

Общая характеристика диссертационной работы

Рассмотренная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературных источников (124 наим.). Диссертация имеет большой объем – 229 страниц. Представлены два акта внедрения.

Объектом исследования послужили судостроительные стали, изготавливаемые как закалкой с отпуском (З+О), так и ТМО, а также трубные стали, получаемые ТМО, с разным уровнем прочности и типом структуры (ферритно-бейнитные и бейнитно-мартенситные).

Предметом исследования являлась взаимосвязь прочности, деформационного упрочнения и морфологии излома судостроительных и трубных сталей с энергетическими характеристиками разрушения при инструментированных испытаниях ИПГ.

Достоверность и обоснованность основных научных положений, результатов, выводов и рекомендаций работы обусловлена воспроизводимостью и согласованностью полученных данных, применением современных средств испытаний и исследований материалов, обработки информации, а также значительным объемом проведенных работ. Развиваемые в работе научные положения основываются на базовых принципах материаловедения низколегированных и легированных сталей, подходах механики

разрушения, не противоречат имеющимся современным представлениям. Выводы по работе соответствуют поставленным задачам исследования.

Оценка содержания автореферата, оформления и апробации диссертационной работы. Автореферат полностью соответствует диссертации, отражает все ее основные положения и результаты. Диссертация и автореферат хорошо оформлены, текст написан грамотным техническим языком и практически не содержит опечаток. Положения текста подкреплены богатым иллюстративным и табличным материалом (120 рисунков и 25 таблиц). Список литературных источников содержит монографии, статьи и стандарты, которые полностью соответствуют теме работы. Результаты работы весьма подробно изложены в печатных работах с участием диссертанта (14 работ, включая 7 публикаций в рекомендованных перечнем ВАК изданиях). Апробация работы проведена посредством докладов на 7 научных конференциях с 2010 по 2023 год (включая «Трубы» 2010 и 2023 г.).

Научная новизна работы и практическая значимость

Работа имеет несомненную научную новизну, наиболее значимые ее положения, по мнению оппонента, состоят в нижеследующем. Получено соотношение максимальной A_p при ИПГ при полностью вязком изломе с квадратом толщины образца, пределом текучести и характеристикой деформационного упрочнения, что соответствует объемной «зоне процесса». Предложен способ учета влияния расщеплений на A_p посредством определения «эффективной» толщины образца. Получена модель распространения хрупкого разрушения в образце ИПГ, основанная на связи температурной зависимости площади кристаллического участка излома с температурной зависимостью параметра трещиностойкости при торможении трещины в условиях плоской деформации (K_{Ia}). Обоснована оценка сопротивляемости металла разрушению по допустимому снижению измеряемой работы разрушения при температуре ИПГ, определенной исходя из минимальной температуры эксплуатации конструкции с учетом предлагаемых температурных сдвигов, зависящих от толщины и предела текучести металла.

Практическая значимость работы состоит в разработке НТД на методику проведения инструментированного теста ИПГ для оценки сопротивляемости металла разрушению: стандарт организации СТО-07516250-283-2024, предложения в редакции «Правил...» Российского морского регистра судоходства (РМРС). Результаты внедрения подтверждены Актами внедрения (ФАУ «РМРС», НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»), которые представлены как Приложения к диссертации.

Анализ работы по разделам

Во введении к работе даны общие сведения об оценке сопротивляемости металла разрушению, на основании чего обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования (также повторены в конце главы 1), приведены иные обязательные данные по диссертационной работе.

В главе 1 рассмотрены методы оценки сопротивляемости хрупким и вязким разрушениям металла судовых конструкций и металла труб большого диаметра (ТБД). Показаны различия в определении температуры вязко-хрупкого перехода по результатам испытаний на ударный изгиб KCV, теста ИПГ, температуры NDT и T_{KB} . Рассмотрено применение показателя угла раскрытия вершины трещины СТОА как характеристики энергоемкости вязкого разрушения. Обоснована необходимость использования энергетического критерия при оценке результатов теста ИПГ. Для сталей для судовых

конструкций и ТБД описаны особенности химического состава (но данные по составу сталей отсутствуют), технологии производства (ТМО, 3+О) и получаемого структурного состояния. На основании выполненного анализа обоснованы задачи исследования.

Глава 2 посвящена разработке методики определения поглощенной энергии при тесте ИПГ с использованием лазерной системы контроля перемещения бойка копра. Достоинством методики является возможность определения энергии как с использованием программного обеспечения оборудования, так и расчета по формулам. Экспериментально установлена связь длины трещины с прогибом образца. Интересен подход к постановке эксперимента, когда испытания проведены без полного разрушения образца, поэтому вся потенциальная энергия груза тратилась на работу разрушения образца. Но следовало бы упомянуть, что результаты ИПГ действительны при полном разрушении образца.

Также отметим, что обычно глава 2 в диссертациях такого плана посвящена описанию материалов и методов исследования. В рассматриваемой работе эти элементы представляются далее по главам, например, материалы (стали) – в главе 3. Представляется, что исследования главы 2 более относятся к главе 3, но она имеет большой объем (64 стр.).

В главе 3 весьма последовательно и методично представлены результаты экспериментов по определению поглощенной энергии образца A_n и ее составляющих.

В начале главы представлены материалы исследования: судокорпусные стали, изготавливаемые по технологиям ТМО и 3+О, а также трубные стали, производимые ТМО. Выбранные материалы отражают современное состояние производства металлопроката для конструкций ответственного назначения. Стали имеют различную структуру, прочность и деформационную способность, что было важно при выявлении закономерностей.

При оценке A_n получены существенные различия по ДВС для металла разной толщины и прочности. Оценка работы зарождения A_z разрушения проведена с использованием образцов с хрупкой наплавкой. Получена связь A_z с толщиной и пределом текучести, что закономерно объяснено различиями в деформационном упрочнении сталей. Для работы распространения разрушения A_p при полностью вязком изломе выявлена связь с объемом металла, вовлеченного в процесс разрушения пропорционально квадрату толщины (t), а не с площадью излома, что позволило ввести понятие «зоны процесса» для зоны больших пластических деформаций. Учитывая неравномерность деформаций по мере продвижения разрушения также введена безразмерная величина $E^P_{\text{безр}}$, соответствующая средней деформации в «зоне процесса», что характеризует энергоемкость разрушения материала при ИПГ. Установлено, что $E^P_{\text{безр}}$ снижается с повышением прочности, то есть, с уменьшением способности стали к деформационному упрочнению. Наиболее важным моментом является формула (3.4.9, в автореферате – 4), связывающая поглощенную энергию A_n с размерами «зоны процесса» и способностью материала к деформационному упрочнению, выраженному через отношение σ_T/σ_B или равномерное удлинение.

Затем автор уделит должное внимание такой важной проблеме ИПГ трубных сталей после ТМО как образование расщеплений. Проблема интерпретации результатов ИПГ решена посредством введения эффективной толщины металла t_{eff} , определяемой с учетом суммарной протяженности расщеплений. Отметим, что оценивались только нераскрывшиеся расщепления. Следовало бы упомянуть важность учета того, раскрыты ли расщепления (cleavage) или не раскрыты (separations), а также оценить морфологию разрушения на стенках расщеплений.

Для оценки энергоемкости разрушения металла с разной морфологией излома включая такие спорные аспекты как «размерная стрелка» и «обратный излом», диссертант провел измерения твердости HV_5 металла на шлифах из сечений образцов ИПГ и сравнил результаты с зависимостью твердости от величины осевой деформации при сжатии. Отметим сложность и трудоемкость таких исследований, а также высокое качество металлографических исследований. В результате получения характерных уровней деформации металла в зонах излома образцов ИПГ с разной морфологией убедительно показано, что «размерная стрелка» и «обратный излом» образуются при достаточно больших деформациях и не могут относиться к полностью хрупкому разрушению. Однако следовало бы учесть возможные различия значений твердости по толщине металла вследствие особенностей структурообразования в толстых листах при ТМО.

Глава 4 посвящена ответу на вопрос, может ли параметр угла раскрытия вершины трещины СТОА быть использован для оценки энергоемкости разрушения образцов ИПГ. В работе использовали связь СТОА с A_p , основанную на допущении, что прогиб образца (по данным гл. 2) связан с величиной СТОА и текущей длиной трещины, а A_p выделялась на основе испытаний образцов с наплавкой. Величину СТОА определили при квазистатическом нагружении с использованием пропорциональных образцов, в то же время, A_p зависит от квадрата толщины образца в полную толщину металла. В результате анализа закономерно показано, что корреляция между энергоемкостью разрушения образцов ИПГ и параметром СТОА отсутствует, поскольку A_p определяется равномерной деформацией металла, а СТОА – предельной деформационной способностью в условиях плоского напряженного состояния. Но для металла с малой толщиной до 15-17 мм некоторая связь этих параметров при статических и динамических испытаниях имеется.

С другой стороны, имеются литературные данные (статьи G. Wilkowski), что СТОА при тесте ИПГ имеет зависимость от скорости разрушения при установившемся режиме на участке распространения трещины. Однако этот момент в главе не рассматривался, что, вероятно связано с тем для размер (высота) стандартного образца ИПГ мал для режима стабильного распространения трещины как показано в работе.

В главе 5 проведен анализ нагружения образца ИПГ и развития разрушения с позиций механики разрушения. Автор в исследованиях опирался на ранее выполненные исследования А.В. Ильина и В.Ю. Филина и использовал понятие температуры торможения хрупкого разрушения T_a при наличии на фронте трещины смешанного напряженного состояния. Для условия абсолютного торможения трещины использован параметр относительной трещиностойкости β , который связан с характеристикой трещиностойкости K_{Ia} и пределом текучести материала. Представлены выкладки, показывающие «туннелирование» хрупкого разрушения в центре излома в виде треугольного клина («языка»). С другой стороны, старт трещины в приповерхностных слоях образца ИПГ происходит при критической деформации среза ε_{cr} . В результате получено, что за температуру торможения трещины принимается та, когда достигается значение K_{Ia} , соответствующее параметру β . Для определения величины β от проскока трещины Δa и отношения $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_Y$ построена номограмма. Посредством моделирования МКЭ нагружения образца ИПГ из металла с различной истинной диаграммой деформирования получено, что запас упругой энергии в образце при старте разрушения не ограничивает возможность распространения хрупкого разрушения.

В практическом плане полезно, что получены номограммы, связывающие процент хрупкой составляющей (С) в изломе с величиной K_{Ia} для разных толщин и пределов текучести металла. Здесь важно, что при пересечении кривых $K_{Ia}=f(\%C)$ и горизонтальных линий K_{Ia} для заданной толщины и прочности (σ_Y) происходит возникновение определенного процента кристаллической составляющей излома ($\%C$) и торможение трещины в конструкции. Технически грамотно отмечено, что из-за разного хода зависимостей K_{Ia} при различной толщине и прочности металла с целью унификации оценки по $\%C$ целесообразно ввести температурный сдвиг ΔT . И такие значения ΔT представлены.

Глава 6 посвящена разработке НТД на методику оценки сопротивляемости металла разрушению по результатам инструментированного теста ИПГ. Важным моментом является то, что предложен критерий определений допустимого снижения фактической работы разрушения по отношению к ее максимальному значению при получении полностью вязкого разрушения, определяемому по отмеченной выше формуле 3.4.9 ($A_p = a(t_2, (1 - \sigma_Y/\sigma_B))$) или экспериментально. За температуру Типг принимается минимальная температура, соответствующая пониженной работе A_p на 20...30% в зависимости от материала (судосталь, трубная сталь). В результате работ главы 6 разработан и введен в действие стандарт организации СТО-07516250-283-2024, а также представлены предложения в редакции Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС).

В заключении содержится краткое обобщение и основные выводы по работе из 8 пунктов и двух практических результатов. Выводы отражают основные результаты проведенных исследований и соответствуют поставленным цели и задачам работы.

Замечания по рассмотренной диссертационной работе

1) При определении зависимости ДВС ($\%B$) от поглощенной энергии A_p (например, рис. 3.4.1) следовало оценить влияние запаса энергии бойка (груза) на определяемое значение ДВС, и установить, имеется ли оптимальная энергия копра, при которой достигается максимальная ДВС в изломе образца для металла с определенными толщиной и прочностью. Тогда дальнейшие испытания проводить при оптимальной энергии копра.

2) При анализе возможности использования показателя СТОА применительно к интерпретации результатов ИПГ в главе 4 не рассмотрена известная по литературе (статьи G. Wilkowski, отмечено в главе 1) зависимость СТОА от скорости разрушения в образце ИПГ на участке распространения трещины при установившемся режиме, поскольку для стандартного образца ИПГ такой участок, хотя и небольшой, имеется.

3) Следовало при измерениях твердости по сечению изломов полнотолщинных образцов ИПГ учесть возможные различия значений HV_5 по толщине металла вследствие особенностей структурообразования в толстых листах при ТМО.

4) При оценке влияния расщеплений на энергоемкость разрушения оценивались, фактически, только нераскрывшиеся расщепления. Было бы полезно рассматривать как нераскрывшиеся ("separations"), так и раскрывшиеся расщепления ("cleavage"), а также оценить морфологию разрушения на стенках расщеплений.

5) Научная новизна 6 сформулирована как «обоснование процедуры аттестации ...», но для положения научной новизны более корректно представить именно положение о чем-либо («обоснована оценка сопротивляемости металла разрушению с использованием допустимого снижения измеряемой работы разрушения, определяемой ...»).

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы, так как не затрагивают ее основные положения, научную новизну и выводы.

Заключение

Диссертационная работа Ларионова Александра Викторовича является законченной научно-квалификационной работой в области материаловедения, в которой решена задача оценки сопротивляемости разрушению современных сталей с повышенной вязкостью при динамическом нагружении в процессе инструментированного теста ИПГ и обоснования требований энергоемкости разрушения образцов для обеспечения эксплуатационной надежности конструкций. Результаты научных изысканий являются новыми и обоснованными, они имеют существенное научное и практическое значение.

Представленная диссертационная работа по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, а также объему соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор данной работы Ларионов Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник лаборатории исследования материалов Корпоративного научно-технического центра развития трубной продукции ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»),
доктор технических наук (специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)

Я, Настич Сергей Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Настич Сергей Юрьевич

03.06.2025 г.

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий Газпром ВНИИГАЗ».

E-mail: vniigaz@vniigaz.gazprom.ru.

Подразделение ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в Московской области: 142717, Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1.

Тел.: (498) 657-40-85, доб. 31-81. E-mail: S_Nastich@vniigaz.gazprom.ru

Подпись Настича Сергея Юрьевича заверяю
заместитель начальника
отдела кадров и трудовых отношений



Е.П. Вологина

оформлен



10.06.2025