



И.Ю. Бышминцев
2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Акционерное общество «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск, на диссертационную работу «Оценка сопротивления распространению разрушения низколегированных сталей при инструментированных испытаниях падающим грузом» соискателя ученой степени кандидата технических наук Ларионова Александра Викторовича по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность работы

В настоящее время испытания падающим грузом образцов натурной толщины с надрезом на вертикальных копрах (испытания ИПГ по ГОСТ 30456-21, или испытания DWTT по англоязычным нормативным документам, например, API5L3 или ASTM E436), являются обязательными сдаточными испытаниями металла листового проката и металла труб для магистральных трубопроводов. Основным способом контроля результатов испытаний является построение температурной зависимости вида излома образцов – процентного содержания кристаллической и волокнистой составляющей, с определением температуры, соответствующей нормируемому снижению содержания волокнистой составляющей. Данная температура рассматривается как критическая температура вязко-хрупкого перехода Типг, определяющая нижнюю температурную границу безопасной эксплуатации металла. Исходно эта проба рассматривалась как контроль условия предотвращения магистрального хрупкого разрушения; при этом при характерном для горячекатаных или нормализованных сталей в толщинах до 14..16 мм, применявшихся ранее для магистральных трубопроводов, определение результата этих испытаний по визуальной оценке не вызывало проблем. Как достаточно простой и воспроизводимый при контроле серийного производства метод контроля температуры торможения хрупкого разрушения, это испытание предусмотрено также для сертификации листового проката судостроительных сталей, предназначенных для строительства корпусов судов и морских технических сооружений, предназначенных для эксплуатации в условиях Арктики – сталей Arc-класса.

С повышением категории прочности применяемых сталей, возрастанием используемых толщин, широким внедрением при их производстве методов термомеханической обработки, возникли определенные сложности в интерпретации

ФЦНИИ «Кризовосный институт» ФЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 129/06-28/34	ДЕЛО
«16» 06 2025 г.	№ _____
Осн. 4 л.	подп. _____
Прил. — л.	

результатов ИПГ, а также в трактовке этих результатов для прогнозирования условий распространения трещин в магистральных газопроводах. Во «Введении» диссертации автор формулирует их достаточно обоснованно: это расширение температурного диапазона перехода от 100% вязкого к 100% хрупкому разрушению для сталей ТМО, что требует научного обоснования критерия определения Типг, появление для высокопрочных сталей современного производства изломов с морфологическими признаками спорной трактовки, и обнаруживаемый при анализе результатов пневматических полигонных испытаний факт существенного различия сопротивления разрушению металла труб даже при регистрации во всех случаях 100% вязкого излома. Данный подход делает актуальным переход от качественной оценки результата испытаний по виду излома к определению количественной характеристики: работы разрушения образца при этих испытаниях. В настоящее время переход к инструментированному варианту ИПГ становится возможным благодаря наличию инструментированных копров с тем или иным видом регистрации разрушения у ведущих металлургических предприятий РФ; возможность такого перехода предусмотрена и в современной редакции ГОСТ 30456. Однако накопленного опыта сопоставления инструментированных и визуальных оценок ИПГ явно недостаточно для того, чтобы переходить к формулировке требований к результатам инструментированных испытаний и вытеснению ими визуальных оценок.

В связи с этим не вызывает сомнения **важность и актуальность** диссертационной работы Ларионова А.В., направленной на разработку критериев оценки сопротивления разрушению при инструментированных испытаниях на вертикальном копре. Логично и выделение задач исследования – разработка методики испытаний с калибровкой измерительной системы, накопление сопоставительных экспериментальных данных по визуальной и инструментированной оценкам результатов испытаний в достаточно широком диапазоне изменения толщин и категорий прочности материала, теоретическое и экспериментальное обоснование зависимостей, связывающих измеряемую работу разрушения с толщиной образца и механическими свойствами материала при ее максимальной оценке – полностью вязком разрушении, и при наличии участков хрупкого разрушения, определение связи результатов ИПГ с условиями торможения хрупкого разрушения в конструктивном элементе.

По результатам выполненных исследований автором получены новые знания, **являющиеся значимыми** для развития методов испытаний материалов для конструкций ответственного назначения и обладающие **научной новизной**, в числе которых:

- Впервые получены температурные зависимости вида излома и работы разрушения для сталей повышенной и высокой прочности, в том числе для судостроительных сталей, изготавливаемых по полному циклу термообработки «закалка + отпуск».
- Впервые предложена формула для оценки максимально возможной для данного материала и его толщины работы, необходимой для зарождения трещины и ее распространения при полностью вязком разрушении.
- Проанализировано влияние расщеплений в изломе на снижение работы разрушения.
- Выполнено металлографическое исследование механизма образования «стрелок» с визуальным кристаллическим видом излома на участках среза.
- Выполнена оценка достоверности определения параметра СТОА при испытаниях ИПГ.
- Предложена расчетная модель, связывающая площадь кристаллического участка излома при ИПГ с параметром механики разрушения – коэффициентом интенсивности напряжений при торможении трещины в условиях плоской деформации K_{Ia} . Это позволяет прогнозировать условия распространения и торможения хрупкого разрушения в конструкции.
- Показано, что для связи критической температуры ИПГ с температурой торможения хрупкого разрушения в конструкции необходимо назначение определенных температурных сдвигов, зависящих не только от толщины металла, но и от его прочности.

Общая характеристика работы. Диссертационная работа изложена на 229 стр. текста, состоит из введения, шести глав, заключения и приложений с актами внедрения, списка литературы из 124 наименований.

В первой главе рассмотрены сложившиеся требования к хладостойким судостроительным сталям и сталям для магистральных трубопроводов, технологии производства сталей, существующие методики контроля температур вязко-хрупкого перехода, методики ИПГ и их возможные вариации. Обоснованы задачи исследования.

Вторая глава содержит результаты решения методических проблем проведения инструментированных ИПГ с определением работы разрушения бесконтактным методом: предложенный способ калибровки системы и способ отсечки работы, тратящейся на деформирование амортизатора.

В третьей главе представлены основные результаты измерения работы разрушения и анализ ее связи с такими факторами как толщина образца, вид излома, прочность и деформационная способность материала и наличие расщеплений в изломе. Представлены результаты испытаний нестандартных образцов с хрупкой наплавкой, примененных для разделения работы разрушения на работу образования трещины и ее распространение. Делается предположение о том, что первая составляющая пропорциональна толщине

образца, вторая – пропорциональна квадрату толщины, то есть объему зоны локализации пластических деформаций. Введен параметр $E_{\text{безр}}$, соответствующий средней деформации в объеме «зоны процесса», и получено, что он снижается с возрастанием отношения «предел текучести/предел прочности» стали, то есть ее способностью к деформационному упрочнению. Предложено учитывать эффект снижения работы разрушения при появлении расщеплений в изломе введением эффективной толщины образца, определяемой суммарной длиной расщеплений. Описаны результаты определения энергоемкости отдельных участков излома с применением предложенной автором калибровочной зависимости пластической деформации от изменения твердости металла, измеряемой в подповерхностных слоях участков излома различной морфологии.

В четвертой главе рассматривается возможность определения применяемого для описания вязкого роста трещины параметра механики разрушения СТОА на основе измерений работы распространения разрушения при ИПГ. Получено, что корреляция между этими параметрами принципиально отсутствует, поскольку СТОА определяется предельной деформационной способностью материала при разрушении срезом, а работа распространения разрушения образца ИПГ – средними деформациями в объеме зоны процесса.

В пятой главе рассматривается связь площади кристаллической составляющей в изломе ИПГ с параметром трещиностойкости K_{Ia} , определяемым при испытаниях по методам механики разрушения. В предшествующих работах было показано, что т.н. «температура торможения хрупкого разрушения» в конструкции определяется значением K_{Ia} при данной температуре, зависящей от толщины и предела текучести материала, а торможение трещины происходит благодаря увеличению вплоть до смыкания участков с плоским напряженным состоянием у поверхностей. Из энергетического баланса при распространении трещины со смешанным напряженным состоянием на ее фронте следуют соотношения, определяющие длину проскока хрупкого разрушения с безразмерной величиной относительной трещиностойкости. Эта модель была использована автором для прогнозирования величины K_{Ia} по величине % кристаллической составляющей в изломе или соответствующего ей снижения работы разрушения. Для обоснования возможности ее применения были выполнены численные расчеты МКЭ с определением зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины проскока трещины в упругопластической постановке задачи, при задаваемом варьируемом прогибе образца при старте трещины. Верификация модели проведена при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по влиянию толщины образца на температуру ИПГ, температурным интервалам вязко-хрупкого перехода при ИПГ, и результатов испытаний

ИПГ с результатами определения для того же материала температуры «нулевой пластичности» NDT.

В шестой главе представлены практические приложения результатов работы: описание введенного в действие стандарта предприятия СТО-07516250-283-2024 «Определение поглощенной энергии при проведении испытаний на ударный изгиб падающим грузом» и редакция внесения изменений в нормативные документы Российского морского регистра судоходства: в Часть XIII «Материалы» Правил классификации и постройки морских судов, и в Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов.

Практическая значимость выполненной работы и возможность использования ее результатов и выводов состоит в следующем:

- Разработанная методика инструментированных испытаний падающим грузом, оформленная в виде стандарта предприятия, может быть использована при проведении таких испытаний для продукции металлургических заводов РФ, в частности, как арбитражный метод подтверждения качества металла для магистральных трубопроводов.

- Предложенные автором и включенные в «Правила классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства критерии применимости хладостойких судостроительных сталей для арктических конструкций будут использованы в «Программах испытаний» при получении одобрения Регистром производителей металлургического проката сталей Arc-класса.

Работа прошла апробацию на семи научных конференциях, включая и международные научно-технические конференции «Трубы» в 2010 и 2023 гг, проводимых АО «РусНИТИ». Основное содержание работы опубликовано в 14 печатных работах, в том числе 7 публикаций в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

Автореферат полностью и корректно отражает основное содержание диссертации в кратком изложении.

Личный вклад автора четко выделен в диссертации и автореферате, он заключается в разработке методики инструментированных испытаний с использованием бесконтактной системы измерения, проведении большого объема испытаний стандартных и модифицированных образцов ИПГ, проведении металлографических исследований, анализе получаемых результатов и обосновании предложенных в работе соотношений для прогнозирования поглощенной работы разрушения при вязком механизме, разрушениях с образованием расщеплений, разрушений в переходной области от полностью вязкого к полностью хрупкому типу, подготовке и публикации научных статей и докладов на конференциях.

Диссертационная работа написана в достаточно высоком научном стиле, в ней полностью отсутствуют ошибки и опечатки, выводы по каждой главе и по работе в целом логичны и обоснованы. Содержание диссертации полностью соответствует заявленной специальности. Необходимо отметить высокий уровень проработки предшествующей литературы по рассматриваемым вопросам, обширную библиографию, включающую большое количество ссылок на современные зарубежные и отечественные публикации.

Вместе с тем по диссертационной работе могут быть **сделаны следующие замечания:**

1. В первой главе, посвященной литературному обзору, недостаточно полно раскрыт иностранный опыт по теме диссертации, который мог бы содержаться в патентах на способы применения ИПГ для оценки сопротивляемости разрушениям.

2. При установлении зависимостей регистрируемой работы разрушения с толщиной испытываемого образца и механическими свойствами испытываемого материала автор не учитывает затраты работы разрушения на трение образца на опорах. По известным данным они могут быть значительными и достигать 20% от полной работы, совершаемой грузом. Это, скорее всего, не должно отразиться на виде функциональных связей в предложенных соотношениях, но может существенно изменить значения подобранных в них по экспериментальным данным коэффициентов.

3. Вывод о снижении работы разрушения при полностью вязком его механизме при повышении прочности стали, связанном со снижением способности более прочной стали к деформационному упрочнению, действительно, подтверждается опытом пневматических полигонных испытаний. Однако утверждение о корреляции вводимого автором параметра $E_{безр}$ с погонной работой пластического деформирования, определяемой по результатам определения распределений деформации по периметру разрушенной трубы, является преждевременным и требует накопления доказательной базы.

4. Отсутствует расчёт экономического эффекта применения усовершенствованной научно-обоснованной методики, лежащей в основе процедуры аттестации судостроительных сталей по результатам инструментированных ИПГ, и имеющей бесспорную практическую значимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Ларионова Александра Викторовича «Оценка сопротивления распространению разрушения низколегированных сталей при инструментированных испытаниях падающим грузом» представляет собой целостную и

законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Она способствует получению новых знаний для решения актуальной проблемы безопасной эксплуатации крупномасштабных сварных конструкций из низколегированных сталей и проблемы предотвращения разрушений при низких климатических температурах на основе повышения информативности испытаний материала при их сертификации и серийном производстве.

Высказанные выше замечания не снижают научной и практической ценности выполненной работы, а также ее высокой оценки. По актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) и п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства РФ, а ее автор Ларионов Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация была заслушана, обсуждена и получила положительную оценку на заседании объединенного научно-технического совета АО «РусНИТИ», ООО «ИЦ ТМК» и ООО «ТМК НТЦ» 10.06.2025 г., Протокол заседания № 6.

Ведущий научный сотрудник испытательной лаборатории АО «РусНИТИ»,
к.т.н., старший научный сотрудник
(05.04.05 Технологии и машины сварочного производства)



Пыхов Сергей Иннокентьевич

Ученый секретарь АО «РусНИТИ»

Лифанов Виктор Яковлевич

Акционерное общество «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Новороссийская ул., д. 30, г. Челябинск, 454139, тел.: +7 (351) 225-02-22, доб. 18802. e-mail: secretariat@rosniti.ru

ознакомлен



16.06.2025