НИЦ «Курчатовский институт»
ЦНИИ КМ «Прометей»
Вх. № 2625/01-в 22/54
«02» 11 2026
Оск. 6 л.
Прил. л.
№
подп.

ОТЗЫВ

официального оппонента

д-ра физ.-мат. наук, доцента Семенова Артема Семеновича
на диссертацию Лаврентьева Алексея Андреевича на тему:
«Прогнозирование трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали на основе структурных исследований и упрощенных методов испытаний»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Материал ответственных сварных конструкций корпусов глубоководной техники, корпусов ледоколов, арктических оффшорных конструкций для обеспечения их безопасной эксплуатации должен обладать высоким уровнем ряда эксплуатационных характеристик. К таким характеристикам относится статическая трещиностойкость, отвечающая за способность материала работать без разрушений при наличии в нем дефектов, в том числе трещиноподобных. Вероятность присутствия такого рода дефектов, в случае рассмотрения вышеперечисленных конструкций, может быть связана как с наличием исходных дефектов сварных соединений, так и с наличием таких повреждающих факторов как циклические нагрузки, коррозионная среда, предельно высокий уровень растягивающих остаточных сварочных напряжений (для конструкций, которые не подвергаются термической обработке при их изготовлении).

В работе в качестве объекта исследований рассмотрен листовой прокат высокопрочной стали удовлетворительной свариваемости с преимущественной структурой отпущенного мартенсита и пределом текучести более 800 МПа. Указанный материал широко используется в судостроении, а контроль уровня его трещиностойкости зачастую выполняется только при разработке промышленных технологий производства материала в рамках завершающего этапа сертификационных испытаний. При таком подходе существует риск появления нестабильности значений параметров статической трещиностойкости при серийном производстве листового проката новых сталей, постепенно приходящих на замену проверенным временем маркам стали.

Наличие представлений о связи структурных параметров материала с трещиностойкостью позволит обеспечить оптимальную структуру при выборе соответствующих параметров технологии производства. Что, в свою очередь, позволит получить уверенность в уровне серийно производимого листового проката высокопрочной мартенситной стали. Наличие же представлений о связи результатов простых видов испытаний маломасштабных образцов с результатами испытаний на трещиностойкость металла натурной толщины обеспечит дополнительный способ контроля этой характеристики.

Таким образом, тема диссертационной работы Лаврентьева А.А., несомненно, является актуальной.

Научная новизна диссертации

Наиболее значимые положения, обладающие научной новизной, заключаются в следующем.

Сформулирован локальный критерий хрупкого разрушения, позволяющий связать трещиностойкость высокопрочной низкоуглеродистой стали с критическим напряжением

микроскола, определяемым размерами структурных элементов и характеристиками субструктуры, а также с референсным объемом металла, учитывающим статистику кристаллических разориентировок относительно направления максимального главного напряжения. Установлена связь механической характеристики высокопрочной низкоуглеродистой стали в виде критического напряжения микроскола со структурно зависимыми параметрами. Установлены условия возникновения и дано объяснение эффекту более сильного, чем в известных зависимостях, влияния толщины образца на измеряемые значения трещиностойкости и инверсионного масштабного эффекта. Определена оптимальная геометрия цилиндрического образца с кольцевым надрезом, испытываемого на статическое растяжение, обеспечивающая корреляцию результатов испытаний таких образцов с результатами испытаний на трещиностойкость при температуре, которой соответствуют хрупкие разрушения при проведении этих видов испытаний. Получено соотношение, позволяющее выполнить прогнозную оценку критического значения J-интеграла на основе результатов испытаний на растяжение маломасштабных образцов с кольцевым надрезом.

Общая характеристика работы

Рассмотренная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературных источников (93 наименования). Работа изложена на 197 страницах. Представлен акт внедрения и сведения о разработанной методике проведения испытаний.

Объектом исследования является листовой прокат опытных плавок термически улучшенной низкоуглеродистой среднелегированной стали типа 10ХН4МДФ с пределом текучести при комнатной температуре от 850 до 1150 МПа с мартенситной и мартенситно-бейнитной структурой.

Предметом исследования является связь регистрируемых при механических испытаниях значений параметров трещиностойкости с характеристиками микроструктуры и результатами стандартных испытаний на статическое растяжение.

Целью работы является установление связи статической трещиностойкости металла листового проката высокопрочной низкоуглеродистой стали с результатами микроструктурных исследований и результатами испытаний по упрощенным методам.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются большим объемом выполненных исследований и отсутствием противоречий в полученных результатах; применением современного оборудования и методов экспериментальных исследований по процедурам, регламентированным нормативной документацией; применением взаимодополняющих методов исследования структуры, в том числе с использованием современного программного обеспечения; применением современных методов конечно-элементного расчетов для исследования напряженно-деформированного состояния.

Оценка содержания автореферата и оформления диссертационной работы. Диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, ее основные положения и результаты. Замечания к оформлению диссертации и автореферата отсутствуют. Текст изложен грамотным техническим языком, подкреплен достаточным количеством рисунков

и таблиц, а также содержит незначительное количество опечаток. Список литературных источников полностью соответствует теме работы.

Научные результаты диссертационной работы подробно изложены в 12 печатных работах с участием соискателя, из них 6 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

Апробация работы выполнена путем представления основных ее результатов на 5 научных конференциях, в том числе международных, в период с 2014 по 2025 год.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы состоит в разработке методического документа на проведение испытаний маломасштабных образцов при их статическом растяжении с целью оценки параметров статической трещиностойкости высокопрочной стали: стандарт организации СТО-07516250-293-2026. Кроме того, внедрение результатов подтверждено Актом ФГУП «Крыловский государственный научный центр» об использовании результатов диссертационной работы при разработке требований к трещиностойкости высокопрочных сталей как материала корпусных конструкций, оценке результатов испытаний на трещиностойкость и прогнозировании возможных диапазонов изменения трещиностойкости при мониторинге их структурного состояния.

Анализ работы по разделам

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, приведена информация о научной новизне и положениях, выносимых на защиту, практической значимости работы, личном вкладе соискателя, приведены сведения о достоверности и апробации полученных результатов.

В первой главе рассмотрены особенности стали, являющейся объектом исследования, представлена информация о параметрах механики разрушения, механизмах вязкого и хрупкого разрушения. Отдельное внимание уделено анализу применимости существующих локальных критериев разрушения при достижении поставленной в работе цели.

Во второй главе приведена информация о материале, рассмотренном в работе (сталь типа 10ХН4МДФ): сведения о химическом составе, режимах термообработки и механических свойствах при комнатной температуре. Также приведена информация о методах, которыми исследовалось структурное состояние материала и его механические характеристики, сведения об использованных оборудовании и нормативных документах.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик сопротивления деформированию и разрушению рассмотренной в работе высокопрочной стали. Определены температурные зависимости прочностных характеристик и трещиностойкости ($K_{Ic}(T)$, $J_c(T)$ и $\delta_c(T)$). Проанализирована применимость стандартных подходов к описанию температурных зависимостей трещиностойкости и влияния размера образцов на регистрируемые значения при испытаниях на трещиностойкость. Приведены результаты фрактографического анализа изломов образцов, испытанных в рамках проведения работы, а также результаты исследования структурного состояния методами оптической металлографии, дифракции обратно рассеянных электронов, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа.

Сделан вывод о том, что что к повышению уровня статической трещиностойкости приводят: уменьшение размера структурных элементов, снижение плотности дислокаций или коррелированного с ней параметра микроискажения кристаллической решетки, повышение способности материала к деформационному упрочнению.

В четвертой главе анализируется возможность прогнозирования трещиностойкости рассмотренной в работе стали на базе результатов испытаний на статическое растяжение цилиндрических образцов, рабочая часть которых содержит концентратор в виде кольцевой выточки. Получены соотношения для такого прогнозирования, приведено описание методики испытаний, необходимых для применения этих соотношений. Выполнено сопоставление прогнозных и фактических значений параметра трещиностойкости J_c, сделан вывод об удовлетворительных результатах такого сопоставления.

В пятой главе приведены основные положения и описание разработанного варианта локального критерия хрупкого разрушения, устанавливающего связь параметров трещиностойкости с характеристиками структурного состояния рассмотренного в работе типа стали.

Отмечено, что применение предложенного в работе локального критерия хрупкого разрушения в сочетании с проведенными автором структурными исследованиями и механическими испытаниями позволило получить:

- зависимость, связывающую критические значения J-интеграла J_c с критическими напряжениями микроскола σ_{cr};

- способ определения механической характеристики материала σ_{cr} на базе данных, полученных по результатам структурных исследований и серии испытаний стандартных образцов на статическое растяжение при различных температурах.

В шестой главе приведены результаты анализа масштабного эффекта, проявляющегося при проведении испытаний на статическую трещиностойкость, а также сформулирована методология прогнозирования трещиностойкости по результатам структурных исследований. Проведено сопоставление прогнозных и фактических значений параметра трещиностойкости J_c, результаты сопоставления признаны удовлетворительными.

В заключении приведено краткое обобщение и основные выводы по работе из 7 пунктов и двух практических результатов. Выводы отражают основные результаты проведенных исследований и соответствуют поставленным цели и задачам работы.

Замечания и вопросы по работе

1. В рамках диссертационной работы сформулирована методология численной оценки статической трещиностойкости низкоуглеродистой стали с преимущественной структурой мартенсита и пределом текучести более 800 МПа. Анализировалась ли автором применимость сформулированной методологии и полученных в работе соотношений к стали с меньшей прочностью и отличной от рассмотренной в работе морфологией структуры?
2. Одним из основных достижений диссертационной работы является определение температурных зависимостей трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали в области отрицательных (а не повышенных) температур. Однако, это не нашло отражение в названии работы. Требуется комментарий об

универсальности предлагаемых методов во всем диапазоне температур. Существует ли верхняя граница области применения предложенного подхода?

3. В работе отсутствует строгое описание краевых задач, решаемых численными методами (см., например, стр. 116, 136, 154). Нет описания граничных условий, условий симметрии, указания вида определяющих уравнений (наличие геометрической и физической нелинейности, виды используемых тензоров деформаций и напряжений в неинфинитезимальном случае), типа используемых конечных элементов и их количества.
4. Уравнение (4.2.1а) не удовлетворяет требованиям теории размерности. При $\eta_1 = 2$ в левой части равенства единица измерения [Н/мм], а в правой [Н].
5. Представленные на Рис. 5.1.3 и 5.2.1 результаты требуют указания конкретного значения длины трещины. При изменении ее значения характер пространственного распределения в абсолютном выражении расстояния от вершины изменится.
6. Использование в формулах (5.2.2)-(5.2.7) величины $\Delta\sigma_{\varepsilon=0.03}$, чувствительной к характеристикам упрочнения материала C, n и не обладающей ярким физическим смыслом, имеет дискуссионный характер. Возникают вопросы выбора уровня пластической деформации 3%, а, например, не 3.2%. Вероятно, предпочтительнее использование масштабируемой разности $\sigma_B - \sigma_Y$.
7. В диссертации на стр. 148 и 152 указано, что в объеме V_0 «содержится приблизительно **12×12×12 зерен**», а в автореферате на стр. 17 утверждается, что «референсный объем металла включает ~**15×15×15 зерен**». При этом абсолютное значение рассматриваемого мезообъема V_0 в обоих случаях приводится одинаковым и равным 1.910^{-3}мм^3. Требуется комментарий о том какой из вариантов является правильным, а главное какой физический смысл у введенной автором величины V_0?
8. Рис. 1.2.9 на стр. 36, цитируемый в главе 1 «Литературный обзор», повторяется без изменений на стр. 97 как Рис. 3.3.3а с подписью, что он «получен в рамках настоящей работы».
9. На Рис. 3.3.3б для трех кривых не указаны соответствующие им номера материалов (в отличии от Рис. 3.1.1), что затрудняет его понимание.
10. В работе присутствуют опечатки и несовершенства оформления
    - В уравнении (1.2.24б) в при записи чисел качестве разделителя используется как точка, так и запятая «0,9a+0.1W».
    - Для указания единиц измерения температуры автор систематически использует обозначение «°K» (см., например, стр. 85) вместо «K», что является ошибочным.
    - Используются различные обозначения для предела текучести, как σ_{02} (например, на стр. 73 и 84), так и $\sigma_{0,2}$ (например, на стр. 75 и 77).
    - На стр. 156 вместо «η = 0.05 мм» следует писать «δ = 0.05 мм».

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы, ценности полученных автором диссертации результатов, их достоверности и практической значимости.

Заключение по диссертации

Диссертация «Прогнозирование трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали на основе структурных исследований и упрощенных методов испытаний», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) полностью отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Лаврентьев Алексей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент:
профессор Высшей школы механики и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого», доктор физико-математических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела», доцент

Семенов Артем Семенович

Подпись
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист по кадрам
«02» 11 2026 г.

Сведения об официальном оппоненте:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.
Телефон: +7 (905) 272-11-88
Эл. адрес: semenov_as@spbstu.ru

Ознакомлен:
02.11.2026