НИЦ «Курчатовский институт»
ЦНИИ КМ «Прометей»
Вх. № 2624/01-в 28/54
«08» 11 2026
Осн. 6 л.
Прил. л.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лаврентьева Алексея Андреевича

«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 данной работы обусловлена необходимостью обеспечения высокого уровня статической трещиностойкости материалов для конструкций ответственного назначения, в частности, для корпусов глубоководной техники, ледоколов; арктических оффшорных конструкций, элементов их подъемно-транспортного оборудования, что позволит предотвратить распространение разрушения металла конструкции.

Исследуемый в работе листовой прокат высокопрочной стали удовлетворительной свариваемости (содержание C < 0,2 %) распространен в судостроении. Однако его трещиностойкость изучена недостаточно. Имеющиеся на сегодняшний день данные показывают, что результаты испытаний на трещиностойкость могут варьироваться в достаточно широком диапазоне даже при изменениях химического состава, режимов прокатки или термической обработки в пределах поля допуска технологии. Причина в том, что статическая трещиностойкость – структурно чувствительный параметр (определяется неоднородностью строения номинально однотипных структур), также существенное значение играет фактор металлургического качества.

Для сталей категории прочности до 690 МПа с повышенной хладостойкостью при выполнении требований по трещиностойкости (CTOD) при низких температурах (сталь «Arc») есть представления о контролируемых структурных параметрах. Более прочные марки сталей с мартенситной или мартенситно-бейнитной структурой, для которых данных по трещиностойкости существенно меньше, такие структурные параметры практически отсутствуют. Отсюда, решение традиционной задачи материаловедения установление связи «структура – свойство», применимо к трещиностойкости, особенно актуально.

Диссертационная работа состоит из 6 глав.

Первая глава – литературный обзор - посвящена особенностям высокопрочной низкоуглеродистой стали для сварных конструкций, а также факторам (в т.ч. структурным), требующим внимания при формулировках условий разрушения.

Рассмотрены основные параметры механики разрушения - K_{Ic}, J_c и δ_c, характеризующие статическую трещиностойкость материала, их взаимосвязь, методы определения и использования. Проанализированы механизмы разрушения сталей, оценен масштабный эффект образцов различных размеров при испытаниях на трещиностойкость. Приведен обзор существующих данных об уровне корреляции показателей трещиностойкости с механическими свойствами и структурными характеристиками материала. Выполненный анализ литературы позволил обосновать задачи исследования.

Вторая глава посвящена объекту исследования – описанию листового проката из высокопрочной среднелегированной низкоуглеродистой стали типа 10ХН4МДФ в девяти состояниях. Дана информация о методах исследования структур, механических испытаниях, оборудовании и нормативных документах.

В третьей главе изложены основные результаты эксперимента: исследований характеристик сопротивления деформированию и разрушению высокопрочной стали. Показано, что для рассмотренных материалов, в т.ч. с минимальной трещиностойкостью, отсутствие хрупкого разрушения наблюдается вплоть до самых низких температур испытаний стандартных цилиндрических образцов на статическое растяжение в диапазоне от +20 до -196 °С при отсутствии изменений относительных удлинения и сужении. Проанализированы температурные изменения характеристик деформационного упрочнения. Проведены фрактографические исследования образцов на трещиностойкость и исследованы поперечные (по отношению к плоскости трещины шлифов) образцы.

Сделано заключение об образовании устойчивых микротрещин, предшествующих нестабильному хрупкому разрушению образца при выполнении условия их распространения, что может рассматриваться как критическое событие.

Сопоставлены результаты испытаний материалов на трещиностойкость с результатами структурных исследований.

Четвертая глава посвящена анализу возможности прогнозирования трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали на основе результатов испытаний упрощенным методом, основанном на испытаниях на статическое растяжение цилиндрических образцов с концентраторами в виде кольцевых выточек различных геометрических параметров, и данных МКЭ по их напряженно-деформированному состоянию. Определены параметры концентратора, обеспечивающие наилучшее соответствие результатов этих испытаний значениям трещиностойкости материала, полученных при проведении испытаний стандартных образцов балочного типа на трехточечный изгиб.

Предложенный метод испытания использован при оформлении стандарта организации СТО-07516250-293-2026 «Оценка параметров статической трещиностойкости по результатам проведения испытаний маломасштабных образцов на статическое растяжение при пониженной температуре. Методика испытаний» и имеет перспективы для предварительной оценки трещиностойкости при разработке новых марок высокопрочной стали.

В пятой главе описан предложенный автором локальный критерий хрупкого разрушения, связывающий параметры трещиностойкости с характеристиками структурного состояния исследуемой стали, основанный на использовании принципа «слабого звена» для перехода от вероятности разрушения в микромасштабе к вероятности разрушения образца или конструкции.

Такая интерпретация локального критерия хрупкого разрушения с проведенными структурными исследованиями и механическими испытаниями позволила выявить зависимость между критическими значениями J-интеграла J_c с критическими напряжениями микроскола σ_{cr}; предложить процедуру определения σ_{cr} на основе полученной базы данных результатов структурных исследований и серии испытаний стандартных образцов на статическое растяжение при различных температурах.

Результатам анализа масштабного эффекта, проявляющегося при проведении испытаний на статическую трещиностойкость посвящена шестая глава. Здесь же предложены подходы к прогнозированию трещиностойкости, основанные на результатах структурных исследований.

Проанализированы причины проявления «инверсионного» масштабного эффекта, рисунок 3.3.1, проявляющегося при вязких разрушениях образцов и определении параметров трещиностойкости по максимуму нагрузки. Показано (на примере анализа регистрируемого параметра раскрытия трещины δ (CTOD), что его возрастание с увеличением толщины образца, определяемое по максимуму нагрузки, объясняется меньшими значениями пластической деформации, соответствующими этому для стандартных соотношений геометрических размеров образца. Отсюда сделан вывод о том, что «инверсионный» масштабный эффект не связан с изменением сопротивления материала распространению вязкого разрушения, и характерен для рассматриваемых сталей с низким деформационным упрочнением.

Показано, что необходимость получения более полной информации об изменении структурного состояния материала по толщине должна учитываться при проведении дальнейших исследований и оценок трещиностойкости.

Уровень научной новизны исследований и разработок существенен. Её, в частности, составляют: развитие представлений о локальных критериях хрупкого

разрушения; привязка характеристик трещиностойкости к структуре; оценка влияния масштабного фактора при испытании на трещиностойкость.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Все сформулированные автором научные положения и выводы основываются на представительном объеме теоретических и экспериментальных данных. Следует отметить использование в работе современного исследовательского оборудования, в частности, оптической (Axio Observer (Zeiss) сканирующей (Philips SEM-535) микроскопии. Исследования методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ) проводились с использованием СЭМ QUANTA 200 3D FEG и Tescan серии LYRA, с применением анализатора картин дифракции обратно рассеянных электронов Hikary, и программного обеспечения TSL. Механические испытания проводились на сервогидравлических испытательных машинах Schenk с широким диапазоном нагрузок.

Применение современного оборудования, методик испытаний и исследований, программных продуктов в значительной мере определило ценность полученных результатов, сделанных на их основе выводов.

Практическую значимость результатов работы отражают разработанный стандарт организации НИЦ Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» СТО-07516250-293-2026 «Оценка параметров статической трещиностойкости по результатам проведения испытаний маломасштабных образцов на статическое растяжение при пониженной температуре. Методика испытаний» и Акт ФГУП «Крыловский государственный научный центр» об использовании результатов кандидатской диссертации Лаврентьева А.А.

Автореферат диссертации и публикации автора (из них 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК) соответствуют содержанию диссертации и достаточно полно ее отражают. Результаты работы прошли широкое обсуждение на международных и отечественных научно-технических конференциях, форумах и семинарах.

По работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. Положения научной новизны изложены излишне развернуто, более компактное её изложение позволило бы более точно расставить основные акценты.

2. Достаточно полно состояние проблемы отражает аналитический обзор литературы. Однако не вся литература оказалась в поле зрения соискателя, в связи с чем некоторые аспекты проблемы могли быть обсуждены более полно. Например, на с. 33 отмечается, что «Пластическая составляющая CTOD определяется с помощью зависимостей, связывающих раскрытие в вершине трещины с пластической составляющей раскрытия *Vpl*, определенной на поверхности образца по датчику 1

(рисунки 1.2.5 б и г). Эта связь базируется на предположении о том, что деформирование образцов происходит при наличии центра поворота берегов трещины, расположенного в районе середины ширины нетто сечения образца, равной $W - a$». Однако имеющиеся в литературе результаты прямых измерений положения центра вращения берегов трещины показывают, что его значения могут варьироваться от образца к образцу и при этом существенно отличаться от уровня значений, определяемых выражением $(W - a)/2$. Данное обстоятельство может сказаться на результатах определения CTOD.

3. При сопоставлении критериев нелинейной механики разрушения CTOD и J_c соискатель отмечает (с. 70), что возможности применения критического раскрытия трещины ограничены методическими трудностями в его определении. Однако с учетом большей локальности критерия δ_c, возможности привязки его значений к структуре и её технологически неизбежной неоднородности строения, представляется, что его применение было бы более предпочтительно для оценки неоднородности трещиностойкости в пределах образца и от образца к образцу.

4. Из текста диссертации не вполне ясно учитывался ли при оценке критериев трещиностойкости CTOD и J_c в соответствии с BS 7448-1-1991 (при максимальных значениях нагрузки), возможный подрост трещины (в первую очередь вязкой) на основе её прямых измерений.

5. Некоторые промежуточные выводы в работе, представляются достаточно очевидными, в частности, о том, что «увеличение трещиностойкости с повышением температуры отпуска коррелирует со снижением плотности дислокаций» (с.13 автореферата). Не всегда даются необходимые статистические оценки полученных результатов, например, для рис. 6 автореферата «Корреляция размера зерна с трещиностойкостью…» целесообразно было привести и соответствующее значение коэффициента детерминации, полученной зависимости.

Однако сделанные замечания не снижают положительное впечатление от работы.

Заключение.

Диссертационная работа Лаврентьева Алексея Андреевича является законченной научно-исследовательской работой, в которой изложены научно обоснованные технологические разработки, имеющие существенное значение для экономической и геополитической безопасности нашей страны. Это позволит решить важную народнохозяйственную задачу по обеспечению высоконадежными судостроительными сталями строительства ледокольного флота, другой конкурентоспособной специализированной морской техники, обеспечивающей эффективное и экологически

безопасное освоение углеводородных ресурсов шельфовых месторождений, интенсивную круглогодичную эксплуатацию СМП и технологический суверенитет РФ.

Результаты работы целесообразно использовать для повышения объективности оценки качества отечественных судостроительных материалов, эксплуатирующихся в широком диапазоне температур, что позволит обосновать срок службы сложных сварных конструкций, они также будут полезны при совершенствовании технологии получения материалов для повышения однородности их качества.

Диссертация выполнена на требуемом 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 Лаврентьева Алексея Андреевича 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» (в ред. Постановления Правительства РФ от 26.01.2023 г.), 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).

Официальный оппонент, доктор технических наук по специальности 05.16.01 (2.6.1) – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, профессор кафедры металловедения и физики прочности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1), профессор

29.10.26

Кудря Александр Викторович

Электронная почта: AVKudrya@misis.ru

Тел.: 8-495-638-46-86

ПОДПИСЬ [illegible]

Проректор по безопасности и общим вопросам

НИТУ МИСИС [illegible] И.А. Зуев

Ознакомлен!

02.11.2026