МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)

В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

НИЦ «Курчатовский институт»-
ЦНИИ КМ «Прометей»
ДОУ
Вх. № 2601/01-28/54
«29» 10 2026
№
Осн. 8 л.
Прил. — л.
подл.

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, д.т.н.

_____ Полянский В.А.

«28» октября 2026 г.

Отзыв ведущей организации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук
на диссертацию Лаврентьева Алексея Андреевича на тему
"Прогнозирование трещиностойкости высокопрочной низколегированной 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)

1. Актуальность работы. Диссертационная работа Лаврентьева А. А. посвящена прогнозированию трещиностойкости высокопрочной низколегированной стали с использованием структурных исследований и упрощенных испытаний. Изготовление металлических конструкций ответственного назначения требует анализа соответствия свойств используемых материалов требуемому уровню сопротивления возможным видам разрушения. Высокий уровень статической трещиностойкости материала должен быть обеспечен для всех ответственных конструкций. Это связано с необходимостью предотвращения распространения разрушения металла конструкции от дефектов, зарождающихся в процессе эксплуатации, а также от исходных дефектов сварных соединений (для сварных

конструкций). Высокопрочные низколегированные стали удовлетворительной свариваемости со структурой отпущенного мартенсита или мартенситно-бейнитной и пределом текучести более 800 МПа широко используются в судостроении и других отраслях промышленности. В связи с трудоемкостью испытаний листового проката в натурной толщине и их высокой стоимостью возможности дальнейшего контроля трещиностойкости при серийном производстве металла отсутствуют, поэтому необходимо контролировать стабильность всех параметров технологического процесса производства. Выполнение требований к параметру трещиностойкости CTOD при низких температурах обеспечено для сталей категорий прочности до 690 МПа с повышенной хладостойкостью, для них на качественном уровне сформировались представления о структурных параметрах материала, которые должны контролироваться при серийном производстве для обеспечения требуемой хладостойкости. Однако даже для этих сталей переход от структурных характеристик к получаемым результатам испытаний носит лишь качественный характер. Аналогичные зависимости для более прочных сталей с мартенситной или мартенситно-бейнитной структурой, практически отсутствуют, поэтому решение задачи установления связи «структура – свойство» для этих сталей особенно актуально также как возможность снизить стоимость сталей за счет снижения содержания легирующих элементов, а также снижения энергетических затрат на их производство заменой полного цикла термического улучшения закалкой с прокатного нагрева. Актуальным также является разработка упрощенных методик для замены дорогостоящих и трудоемких испытаний. Исходя из всего сказанного, тема диссертации, безусловно, актуальна.

2.Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, 80 рисунков, 22 таблиц, библиографии из 93 наименований и 2 приложений. Объем диссертации составляет 197 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность, практическая и теоретическая значимость и новизна выбранной темы диссертации; сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, и основные научные результаты диссертационной работы.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, посвящённых теме исследования. Приведены данные по высокопрочной низкоуглеродистой стали для сварных конструкций и структурные и механические параметры, которые необходимо учитывать для характеристики условий разрушения. Приведены характеристики механики разрушения K_{Ic}, J_c и δ_c, определяющие статическую трещиностойкость материала, а также их применение при оценке прочности конструкций. Проведена оценка механизмов вязкого и хрупкого разрушения стали и влияния масштабного эффекта на трещиностойкость, а также применимости существующих локальных критериев к рассмотренной в работе стали. Проанализирован обзор данных о связи трещиностойкости с механическими свойствами и структурными характеристиками материала. На основании литературного обзора поставлены задачи исследования.

В **главе 2** приведена информация об исследуемом материале. Изучался листовой прокат высокопрочной среднелегированной низкоуглеродистой стали типа 10ХН4МДФ в девяти различных структурных состояниях. Приводятся

сведения о химическом составе стали, режимах ее термообработки и механических свойствах при комнатной температуре для всех анализируемых состояний. Изложена информация о методиках структурных исследований и механических испытаний, о применяемом оборудовании и нормативных документах.

В **главе 3** представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления деформированию и разрушению высокопрочной среднелегированной низкоуглеродистой стали. Определены температурные зависимости стандартных механических свойств при растяжении и критические параметры трещиностойкости при различных температурах и размерах образцов. Выявлен масштабный эффект при хрупких разрушениях исследованных сталей, определены характеристики трещиностойкости при вязком разрушении этих сталей. Осуществлен выбор материалов для исследований связи структуры и трещиностойкости и определены количественные характеристики структурного состояния выбранных материалов - размеры структурных составляющих, разделенных большеугловыми границами, субструктура, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, а также корреляция микроискажений с трещиностойкостью и плотностью дислокаций на основе рентгеноструктурного анализа.

Установлено:

- разрушение остается полностью вязким с понижением температуры испытаний вплоть до минус 196°С, что требует для определения критических напряжений отрыва проводить испытания образцов с концентраторами напряжений;

- повышение прочностных характеристик со снижением температуры сопровождается понижением способности к деформационному упрочнению всех исследованных структурных состояний стали кроме закаленного состояния

- обнаружено возникновение увеличенного масштабного эффекта при хрупком разрушении (возрастание трещиностойкости до максимальных значений при сопоставлении результатов испытаний образцов различной толщины) и «инверсионного» масштабного эффекта при вязком разрушении: возрастание измеряемой характеристики (максимума нагрузки) с увеличением толщины образца, при этом условие старта вязкого разрушения слабо зависит от толщины и структурного состояния материала.

- отсутствуют признаки зарождения разрушения от неметаллических включений, наблюдаемых для менее прочных сталей, но оно возникает в районе скоплений наиболее крупных зерен металла, а также перед фронтом исходной усталостной трещины и в зоне предразрушения;

- предложена аппроксимация размеров структурных элементов, разделенных большеугловыми границами, двухпараметрической функцией распределений Вейбулла и получено, что параметр формы этих распределений (характеризующий разнозернистость) может быть принят равным 2.0, а параметр масштаба (близкий к среднему размеру зерна) существенно различен;

- повышение уровня трещиностойкости вызвано: 1) уменьшением среднего размера структурных элементов, разделенных большеугловыми границами, с 12.0 мкм до 7.0 мкм; 2) снижением плотности дислокаций с $8.6 \cdot 10^{14}$ м$^{-2}$ до $2.8 \cdot 10^{14}$ м$^{-2}$ и параметра микроискажения кристаллической решетки с 0.36% до 0.17%;

- отсутствует связь плотности, размеров и расположения карбидов с трещиностойкостью, так как они оказались близкими для всех рассмотренных структурных состояний стали

В **главе 4** разрабатывается методика испытаний образцов с концентраторами для прогнозирования трещиностойкости, приведены результаты испытаний образцов с различной геометрией надреза и осуществляется их анализ.

Показано:

- существует взаимосвязь испытаний на растяжение с трещиностойкостью для образцов с концентраторами в виде кольцевых и достаточно глубоких надрезов;

- величина пластического удлинения образца с надрезом при разрушении - результат испытаний, согласованных с величиной критического J-интеграла при хрупких разрушениях *Jc*,;

- количественная связь между величиной пластического удлинения и *Jc* должна учитывать способность материала к деформационному упрочнению, измеряемому отношением σ_Y / σ_B;

- связь трещиностойкости с результатами испытаний образцов с надрезом привела к созданию методики прогнозирования трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали при проведении испытаний в виде стандарта организации СТО-07516250-293-2026 «Оценка параметров статической трещиностойкости по результатам проведения испытаний маломасштабных образцов на статическое растяжение при пониженной температуре. Методика испытаний».

В **главе 5** проводится разработка локального критерия хрупкого разрушения для связи параметра трещиностойкости *Jc* с характеристиками структурного состояния сталей – формулируются основные исходные положения модели, определяются характеристики материала, используемые в локальном критерии разрушения, и их связи с величиной *Jc,* а также зависимость критических напряжений микроскола от характеристик структурного состояния.

Предложен локальный критерий хрупкого разрушения в статистической постановке как условие распространения микротрещин через большеугловые границы зерен, введены две характеристики материала: критическое напряжение распространения микроскола σ_{cr} и референсный объем металла V_0, который может быть принят постоянным для всех рассматриваемых материалов.

Получено соотношение связи критической величины J-интеграла с параметрами модели σ_{cr} и V_0 и параметром формы распределения Вейбулла размеров структурных элементов с большеугловыми границами, характеризующим «разнозернистость» металла.

Дана оценка величины V_0, равная для рассматриваемых материалов примерно $1{,}9 \cdot 10^{-3}$ мм^3, это значение соответствует мезообъему металла, содержащему приблизительно 12x12x12 зерен, где с равной вероятностью находятся как микротрещины, так и плоскости микроскола соседних с ними зерен с благоприятной ориентацией по отношению к приложенным максимальным напряжениям.

Определены значения критических напряжений микроскола, меняющиеся от 3700 до 5500 МПа. Предложен обобщенный параметр, учитывающий структурное состояние материала, и определена его корреляция с критическим напряжением микроскола.

В **главе 6** приведены результаты анализа масштабного эффекта, проявляющегося при проведении испытаний на статическую трещиностойкость (для случаев хрупких и вязких разрушений), определен сдвиг температурных зависимостей этого показателя при хрупких разрушениях стали разных толщин, а также сформулирована методология прогнозирования трещиностойкости по результатам структурных исследований с учетом влияния разнозернистости и деформационного упрочнения.

Предложены соотношения для связи сопротивления стали хрупкому разрушению, включающие параметры:

1. определяющие критическое напряжение распространения микроскола σ_{cr}:
- размер структурных элементов, разделенных большеугловыми границами;
- часть предела текучести, учитывающая распределение частиц второй фазы;
- деформационное упрочнение при пластическом деформировании материала;
- уровень микронапряжений в стали после ее термической обработки;
2. входящие в зависимость напряжений микроскола с величиной J- интеграла:
- предел текучести;
- характеристика способности к деформационному упрочнению;
- параметр формы распределения Вейбулла для размеров зерен;
- толщина проката;
3. учет температурного изменения деформационного упрочнения материала.

В **заключении** приведены выводы, полученные в диссертационной работе.

3. Научная новизна результатов исследования

Научная новизна работы определяется полученными результатами.

Установлено более сильное влияние толщины образца на значения трещиностойкости высокопрочной низкоуглеродистой стали при реализации вязкого подроста трещины перед хрупким разрушением, чем это следует из известных зависимостей, описывающих масштабный эффект.

Обнаружен «инверсионный» масштабный эффект: увеличение измеряемого показателя трещиностойкости с увеличением толщины образцов одного и того же типа при полностью вязких разрушениях и оценке этого показателя исследуемой стали по моменту достижения предельной несущей способности образца.

Выявлена связь механической характеристики изучаемой стали в виде критического напряжения микроскола со структурными параметрами:
- размером элементов, разделенных большеугловыми границами с углом разориентировки более 15°;
- распределением частиц второй фазы и размерами субструктурных составляющих;
- деформационным упрочнением, связанным с ростом плотности дислокаций при пластическом деформировании материала;
- уровнем микронапряжений, характеризующемся плотностью дислокаций в мартенситной структуре стали после ее термической обработки.

Определена оптимальная геометрия цилиндрического образца на растяжение с кольцевым надрезом для корреляции с результатами испытаний на трещиностойкость при температуре, соответствующей хрупкому разрушению исследуемой стали.

Сформулирован локальный критерий хрупкого разрушения, связывающий трещиностойкость высокопрочной низкоуглеродистой стали с критическим напряжением микроскола на основе размеров структурных элементов, разделенных большеугловыми границами с углом разориентировки более 15°, и характеристик субструктуры, а также с референсным объемом металла, учитывающим статистику кристаллических разориентировок относительно направления максимального главного напряжения.

Разработана расчетная модель описания дополнительного масштабного эффекта при хрупких разрушениях исследуемой стали при формировании у боковых поверхностей образца зон реализации разрушения срезом, размер которых сопоставим с длиной фронта трещины.

4. Оценка практической значимости результатов

Результаты работы целесообразно использовать в промышленности при изготовлении изделий ответственного назначения для работы материалов в условиях Арктики. Диссертация нацелена на решение крупной научной проблемы "Принципы создания конструкционных материалов и управления процессами трещиностойкости в условиях работы при низких температурах", имеющей существенное значение для развития арктического материаловедения и важное народнохозяйственное значение.

Результаты работы - предложенную сталь и пути повышения работоспособности конструкционных материалов в арктических условиях - целесообразно использовать в промышленности при изготовлении изделий ответственного назначения. Материалы диссертации могут найти применение в ЦНИИ КМ “Прометей” (г.С.Петербург), НИКИЭТ (г.Москва), ВНИИНМ (г.Москва), РНЦ Курчатовский институт (г.Москва), а также в научно-исследовательской деятельности таких научных учреждений, как Институт проблем машиноведения РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также в научно-образовательной деятельности таких вузов, как Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный университет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Южный федеральный университет и других.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов обоснована применением современного оборудования для экспериментальных исследований, использованием апробированных методик, соответствием полученных результатов представлениям, имеющимся в данной области научных исследований.

6. Замечания и вопросы по диссертации и автореферату

1. В чем смысл критерия микроскола? Как определялся момент разрушениия? Не указано, сколько образцов испытывалось для каждого материала, и была ли одинаковой скорость деформации для всех испытаний.

2. Что является характеристикой масштаба и что понимается под температурно-масштабным соответствием, как понимается инверсионный масштабный эффект?

3. За счет чего при повышении температуры наблюдается рост пластичности и небольшое падение сужения?

4. Трудно понять, почему при уменьшении плотности дислокаций уменьшается трещиностойкость. Хотелось бы знать, в каком виде присутствуют дислокации – в виде сеток, клубков и т.д.? Какая энергия дефекта упаковки у исследованных сталей?

5. Трудно понять из таблицы 4.2.1, где приведены результаты испытаний образцов с концентратором, а где с трещиной.

6. Автореферат соответствует содержанию диссертации, но хотелось бы отметить, что присутствуют моменты, которые стоило бы расшифровать - такие, как «события типов «C» и «U»», в диссертации есть объяснение, что это за понятия, следовало бы и в автореферате пояснить их.

Приведенные замечания носят уточняющий характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Лаврентьева А. А.

6.Заключение по диссертации.

Следует отметить высокое качество постановки экспериментов, большой объем полученных результатов и ориентированность на практические приложения. Представленная к защите диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Лаврентьев Алексей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Материалы кандидатской диссертации Лаврентьева Алексея Андреевича на тему "Прогнозирование трещиностойкости высокопрочной низколегированной стали на основе структурных исследований и упрощенных методов испытаний", заслушаны и получили одобрение на семинаре по механике ИПМаш РАН, основанном член-корреспондентом РАН Д.А. Индейцевым, 19.10.2026г., протокол № 19-10-26, на семинаре присутствовало 25 человек.

Отзыв на диссертацию Лаврентьева Алексея Андреевича заслушан, обсужден и одобрен на заседании лаборатории физики разрушения ИПМаш РАН, протокол № 15 от 22 октября 2026 года.

Ведущий научный сотрудник лаборатории физики разрушения
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения» Российской Академии наук
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 механика деформируемого твердого тела), профессор

Атрошенко Светлана Алексеевна

Заведующий лабораторией Математических методов механики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт

проблем машиноведения» Российской Академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 механика деформируемого твердого тела), старший научный сотрудник

Фрейдин Александр Борисович

Сведения о ведущей организации:

Институт проблем машиноведения Российской Академии наук — федеральное государственное бюджетное учреждение науки Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в Санкт-Петербурге
Почтовый адрес: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., д.61
Официальный сайт в сети Интернет: https://ipme.ru/
эл. почта: ipmash@ipme.ru ; телефон: +7 (812) 321-47-78

Подпись Фрейдина А.Б. и Атроненко С.Ф.
УДОСТОВЕРЯЮ: ПОМОЩНИК ДИРЕКТОРА
Андреева С.Н.
28 октября 2026 г.

Ознакомлен:
29.10.2026