

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



"Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина"

ГНЦ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина"

105005 г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00
e-mail: chermet@chermet.net
www.chermet.net

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель Генерального
директора ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет
им. И.П. Бардина»

Г.Н. Еремин
2022



« 02 » 11 2022 год № 3529-4/16
на № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Танг Вьет Фыонг «Развитие методов оценки сопротивляемости разрушению конструкционных сталей с неоднородной структурой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Применение цифровизации открывает широкие перспективы для количественного описания различий в строении изображений технологически неизбежных неоднородных структур и изломов сталей и сплавов. Последующее сопоставление морфологии структур и изломов обеспечит получение всего спектра характеристик геометрии структур, определяющих механизмы деформации и разрушения металла, как среды со структурой. На этой основе возможно внесение в измерение структур и изломов количественной меры (при условии необходимого метрологического обеспечения процедур подготовки к измерениям и самих измерений), что при накоплении необходимой статистики результатов, позволит разработать новую линейку стандартов структур и разрушения, обеспечивающих всестороннюю оценку качества металла и более глубокое понимание причин его неоднородности, как основы для выработки обоснованных технологических решений, направленных на повышение качества металлопродукции. В этой связи **актуальность работы**, посвященной развитию методов оценки сопротивляемости разрушению конструкционных сталей с неоднородной структурой, не подлежит сомнению.

Структура и содержание диссертационной работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 3 главы, выводов и списка использованной литературы из 133 наименований, изложена на 118 страницах, содержит 54 рисунок, 22 таблиц.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, и поставлены задачи исследования, изложена научная новизна полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по исследуемой проблеме. Рассмотрены различные виды разрушения, их механизмы протекания и факторы (структурные и металлургические), контролирующие разрушение конструкционных сталей. В процессе разрушения сталей участвует весь диапазон масштабов структуры – это

дендритный рисунок, неметаллические включения (НВ) разного типа и микроструктура сталей. Разнообразное проявление технологической наследственности приводит к формированию неоднородности структуры стали, и, как результат, существенно влияет на степень неоднородности механических свойств металлопродукции. Для более точного изучения влияния неоднородности на разброс вязкости разрушения материала нужна разработка как методик измерения изображений неоднородных структур, так и выработка на их основе критериев неоднородности структуры (перечень требований к их морфологии), обеспечивающих достижение заданного уровня вязкости стали. В результате анализа литературы выявлено, что стандартные подходы для оценки вязкости разрушения в полной мере не учитывают кинетику развития трещины, геометрию ее раскрытия, вследствие этого физически недостаточно обоснованы. В этой связи получаемые оценки вязкости могут оказаться не вполне корректными. Отсюда вытекает необходимость дальнейшего совершенствования методики определения вязкости разрушения для повышения достоверности полученных результатов.

Во второй главе описаны материалы и методы их исследования. Материалами исследования послужили конструкционные стали следующих марок: среднеуглеродистая улучшаемая сталь для крупных изделий 38ХНЗМФА(-Ш), 40Х2Н2МА, сталь для корпусов атомных реакторов 15Х2НМФА и низколегированная листовая сталь 16Г2АФ, полученные по общепринятым технологиям. Цифровые изображения структур и изломов исследуемых сталей обрабатывались с помощью стандартного (ImageExpert Pro 3 и ImageJ, Excel) и разработанного на кафедре металловедения и физики прочности НИТУ «МИСиС» программного обеспечения. Параметры вязкости разрушения исследуемых сталей (K_{IC} , δ_C , J_C) оценивались при испытании на трёхточечный изгиб образцов плоской прямоугольной формы из сталей 38ХНЗМФА и 15Х2НМФА по ГОСТ 25.506–85 и усовершенствованным в рамках настоящей работы методикам определения критериев нелинейной механики разрушения: критического раскрытия трещины δ_C и интеграла Черепанова-Райса J_C . Изображения изломов были получены в сканирующем электронном микроскопе СЭМ НІТАСНІ S-800. Также поверхность излома исследовали методами лазерной профилометрии и реконструированных 3D-моделей изломов при помощи комплектующего модуля к оптическому микроскопу, позволяющего получить 3D-изображения рельефа изломов.

В третьей главе приведены результаты исследования. Установлены масштабы неоднородности разномасштабных структур исследуемых сталей и развиты процедуры обработки цифровых изображений структур и изломов. Для обеспечения воспроизводимости получаемых результатов количественной оценки изображений, их необходимо было предварительно обработать, применив обоснованные алгоритмы бинаризации и фильтрации шумов. В основу выбора критериев бинаризации был положен анализ закономерностей формирования поля яркости изображений конкретных типов структур и учет особенностей их строения, поведения при деформации и разрушения. Для оценки неоднородности размещения неметаллических включений в поле зрения, а также темных пятен серного отпечатка использовалось разбиение 2D-изображения на полиэдры Вороного. Очевидно, что для массовых количественных измерений возрастает значение их метрологического обеспечения с целью надежного выделения информативных признаков (элементов) изображений структур. В противном случае масштабы неопределенности при оценке воспроизводимости получаемых результатов и их сопоставимости не дадут оснований утверждать о получении объективных характеристик исследуемых структур. В равной мере

это относится и к измерению морфологии изломов, поскольку именно сопоставление результатов совместного измерения строения структур и сопутствующих изломов позволило получить более глубокое представление о закономерностях разрушения в материале, как среде со структурой. В этой связи, для массового количественного описания различий в строении изображений структур и изломов сталей перспективно применение цифровизации. Полученные результаты показывают, что при накоплении необходимой статистики результатов измерений возможен переход к количественным мерам при их описании. Это в перспективе позволит перейти к новой линейке стандартов, обеспечивающих более тонкую ранжировку разрушения и понимание причин разброса свойств - основы для выработки обоснованных технологических решений, в связи с повышением качества металла.

Интерес к наименее изученному мезомасштабу строения изломов был обусловлен, в частности, тем, что на этом масштабном уровне получает свое отражение при разрушении структура слитка, а дальние её последствия наследуются часто сортом и листом. В мезорельефе излома обычно наблюдается макрокривизна «хрупкого квадрата» или низкочастотная составляющая рельефа, не связанные с механизмом разрушения. Их было предложено вычитать. С этой целью линию $z(x)$ пересечения рельефа с нормальной к излому плоскостью (траектория излома, обусловленная механизмом разрушения) аппроксимировали методом наименьших квадратов полиномами оптимальной степени n , когда понижение остаточной дисперсии регрессии $s^2(n)$ стало бы не значимым. Полученные после вычитания оптимального полинома профили обычно представляли собой последовательность чередующихся выступов и впадин различной геометрии, что отражает колебания растущей трещины относительно направления её распространения. Их аппроксимация методом наименьших квадратов (построение наилучшей ломаной) дала представление траектории $z(x)$ в виде ломаной лестницы (или пилообразного излома). Построенная ломаная лестница была дополнительно подвергнута фильтрации для удаления ступеней малого, не соответствующего мезоуровню наблюдения, размера: оценена возможность ограничений на минимальный размер ступени – 100 мкм. С целью оптимизации процедуры построения ломаных лестниц был разработан программный код, написанный на базе Mathcad Prime, позволяющий обработать множество профилей и получить сводную статистику значений геометрических параметров ломаных.

Для уточнения представлений о механизме образования шиферообразного излома в ударных поперечных образцах из листовой стали 16Г2АФ были использованы процедуры эрозии, дилатации и фильтрации бинарных изображений излома и соответствующего ему серного отпечатка по Бауману. Сопоставление результатов измерений 2D-изображений излома и серного отпечатка (в совпадающей по ориентировке плоскости шлифа) выявило статистическое сходство видов распределения значений шага между вытянутыми ямками в изломе и темными пятнами серного отпечатка (в одном и том же направлении), что подтверждает вклад ниток сульфидов в образовании шиферообразного излома.

По-видимому, впервые, выявлено соответствие между изменением размера зерна аустенита стали 40Х2Н2МА от $17,1 \pm 0,2$ до $91,2 \pm 1,4$ и $109,3 \pm 1,5$ мкм и значениями параметров ломаной лестницы (в терминах ГОСТ 27964 «Измерение параметров шероховатости») мезорельефа соответствующих изломов, испытанных при комнатной температуре: среднеарифметического отклонения профиля Ra , наибольшей и полной его высот Rz и $Rmax$ соответственно, на представительных выборках результатов измерения.

При наличии неоднородных разномасштабных структур важно оценить их влияние на механические свойства, в том числе трещиностойкость. На основе измерения геометрии раскрытия трещины и кинетики её раскрытия – по совместным измерениям цифровых моделей изломов и регистрации АЭ при испытании в работе были уточнены методы определения критического раскрытия трещины δ_c и J -интеграла (с учетом кинетики вязкого подраста трещины и формы её переднего фронта). С использованием уточненных методик оценки трещиностойкости установлено, что в пределах каждого образца из стали 38ХНЗМФА-Ш разброс значений δ_c (J_c) варьировался в пределах от 25 до 37 (29 - 72)%, для образцов из стали 15Х2НМФА – от 16 до 50 (55 – 75)% соответственно. Такой разброс значений трещиностойкости может быть связан с неоднородностью строения разнородных структур металла. При этом различие значений δ_c (J_c) определенных в соответствии с ГОСТ 25.506, и величин δ_c (J_c), характерных для первого скачка статической трещины (по измерениям АЭ) находилось в диапазоне: от 3 до 34 (16 – 44)% для стали 38ХНЗМФА-Ш и от 8 до 33 (13 – 39)% для стали 15Х2НМФА соответственно.

Не вызывает сомнения **научная новизна** работы, которая заключается в следующем:

- С использованием метрологически обоснованных цифровых процедур измерения изображений разнородных структур выявлена существенная вариация статистических характеристик (коэффициенты асимметрии и эксцесса) распределения размеров зерна аустенита и расстояний между ближайшими неметаллическими включениями в улучшаемых сталях 40Х2Н2МА и 38ХНЗМФА (для различных температур аустенитизации и зон поковки соответственно), что определяет неоднородные условия образования вязкого излома и разброс вязкости сталей соответственно.

- В представлении мезопрофиля изломов (в направлении распространения трещины) ударных образцов из улучшаемой стали 40Х2Н2МА (после нагрева под закалку при температурах 850, 1100 и 1200 °С), как ломаной лестницы, показана возможность ранжировки мезорельефа изломов на основе параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789: R_a – среднеарифметическое отклонение профиля; R_z – наибольшая высота профиля и R_{max} – полная высота профиля.

- Для листовой стали 16Г2АФ сопоставление результатов прямых измерений геометрии строения бинарных изображений серного отпечатка по Бауману и соответствующего ему шиферообразного излома (после совместных преобразований их изображений на основе разработанной последовательности процедур дилатации, эрозии и фильтрации) показало возможность прогноза его появления по морфологии темных пятен серного отпечатка.

- На основе определения критериев нелинейной механики разрушения: критического раскрытия трещины δ_c и J -интеграла по уточненной методике (с учетом измерения геометрии раскрытия трещины и кинетики её распространения – по совместным измерениям цифровых моделей изломов и акустической эмиссии при разрушении) сопоставлены возможности их применения для оценки трещиностойкости улучшаемых сталей 38ХНЗМФА и 15Х2НМФА с привязкой к неоднородности морфологии их структуры. Показана перспективность применения в этой связи параметра δ_c .

Практическая значимость состоит в возможности использования развитых методик цифрового измерения геометрии изображений структур и изломов, уточненной методики определения критического раскрытия трещины δ_c и J -интеграла (и границ эффективного

применения) для выявления масштабов и причин неоднородности вязкости в конструкционных сталях с неоднородной структурой, прогноза разрушения по структуре.

Достоверность обеспечена использованием современной исследовательской техники, массовых цифровых измерений структур и разрушения в сочетании с разнообразным программным обеспечением и статистическими методами обработки результатов, согласием с результатами, имеющимися в научно-технической литературе по данной проблеме.

Ценность научной работы заключается в применении цифровых процедур в металлургии и материаловедении для контроля структур и изломов. Выделены критические факторы подготовки и обработки их цифровых изображений, обеспечивающие воспроизводимость результатов измерения отдельных элементов и их конфигурации в целом. Показана необходимость учета статистической природы геометрического строения изображений структур и изломов при обработке полученных результатов. Установлено, что цифровизация измерений обеспечивает получение более глубокой информации о конфигурации технологически неизбежных неоднородных структур и изломов, что существенно для внесения в их измерение количественной меры. При накоплении достаточной статистики измерений, это позволит стандартизировать требования к ним.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные этапы работы, выводы и результаты в достаточном объеме представлены в автореферате. Публикации (из них четыре в журналах из списка ВАК, из них три уже вышли в переводной версии, индексируемой в базах цитирования Scopus и WoS) в полной мере отражают содержание работы. Результаты работы апробированы на двух международных конференциях.

Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методов исследования и программных продуктов, их согласованностью с литературными данными.

По содержанию диссертации и автореферата следует отметить **следующие замечания:**

- в разделе 2.2 Методы металлографического исследования отсутствует описание метода оценки зерна бывшего аустенита;

- при оценке различий в трещиностойкости сталей 38ХНЗМФА и 15Х2НМФА было бы целесообразно привести результаты оценки загрязненности металла НВ;

- из текста диссертации не вполне понятно, какие именно методы бинаризации автор использовал для количественного анализа пространственного расположения пятен серного отпечатки;

- в таблице 2 раздела “Материалы исследования” была указана термическая обработка стали 16Г2АФ – закалка и высокий отпуск. А на рисунке 14 представлена микроструктура стали 16Г2АФ была феррит + перлит (характерная, например для нормализации). Корректно ли это?

- есть отдельные недочеты при оформлении рисунков, например, на рисунке 12 и 21 диссертации не указано увеличение, при котором были получены изображения неметаллических включений; и микростроения изломов соответственно;

- есть неполное соответствие в диссертации и в автореферате при указании информативных параметров мезогеометрии излома, в диссертации это высота, ширина, длина ступени; угол наклона ступени к макроплоскости излома и генеральная дисперсия ступени; а в автореферате отсутствует упоминание о генеральной дисперсии ступени.

- из текста диссертации не вполне понятно, каким образом из 3D моделей изломов были извлечены профили?

Заключение

Отмеченные замечания не снижают общей ценности диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение методов оценки сопротивляемости разрушению конструкционных сталей с неоднородной структурой, измерений морфологии структур и изломов, имеющих существенное значение разработке или совершенствовании технологии получения высокопрочных конструкционных сталей для инновационных отраслей промышленности.

В целом, представляемая диссертационная работа по своему теоретическому и экспериментальному уровню, объему работы, актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Танг Вьет Фыонг, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв обсужден и принят на заседании Научно-технического совета Научного центра качественных сталей ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», протокол №15 от 20 октября 2022 г.

Председатель Научно-технического совета НЦКС,
Директор Научного центра качественных сталей
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», д.т.н., проф.



Г.А. Филиппов

Секретарь Научно-технического совета НЦКС,
Начальник лаборатории КС-4
Научного центра качественных сталей
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т.н.



О.В. Ливанова

Подписи Филиппова Г.А. и Ливановой О.В. заверяю:

Ученый секретарь
ГНЦ «ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т. н.



Т.П. Москвина

Филиппов Георгий Анатольевич, специальность 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Ливанова Ольга Викторовна специальность 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Данные об организации:

Государственный научный центр. «Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ «ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина») 105005, г. Москва, ул. Радио, д.23/9, стр. 2., тел.:+7 (495)777-93-01, e-mail: chermet@chermet.net

