



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

25.04.2026 № 33.20-32/25
На № _____ ОТ _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина»
д.ф.-м.н.

А.В. Германенко

« _____ » _____ 2026г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Соколовской Элины Александровны

«**Развитие методов цифровизации в материаловедении и металлургии для повышения качества металлопродукции**», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации

Качество металлопродукции определяется совокупностью структурных и металлургических факторов, наблюдаемое разнообразие которых является следствием широкого спектра траекторий технологии в рамках поля её допуска. Различие траекторий технологического процесса приводит к многообразию сценариев протекания технологической наследственности, что находит свое отражение в неоднородности строения разномасштабных, номинально однотипных структур сталей и сплавов. Последующее различие в механизмах их разрушения определяет существенный разброс прочности, пластичности и вязкости металлопродукции и потере её конкурентоспособности. Для принятия необходимых управленческих и технологических решений в этой связи необходимо описание неоднородности строения структур, механизмов их разрушения (по строению изломов), объективная оценка сопротивления металла разрушению (с привязкой к структуре) с целью выявления критических факторов структуры, лимитирующих их свойства. Однако существующие нормы в основном предусматривают качественные оценки – сравнение с эталоном (картинкой), либо словесным описанием, что не обеспечивает полноценной оценки неоднородности строения структуры материалов и изломов. Оценки вязкости, как правило, носят интегральный характер и затрудняют сопоставление результатов с различиями в строении разнородных структур. Информацию о причинах разброса качества

металлопродукции могли бы дать раскопки данных производственного контроля процесса и продукта. Однако существующие подходы к ретроспективному анализу обычно не учитывают статистическую природу рассматриваемых объектов, что важно при выборе статистических инструментов, наличие явления технологической наследственности.

Современные вычислительные мощности, появление современных программных продуктов, цифровых средств измерения и сбора информации позволяют решить эти задачи в принципе. Для этого, в частности необходима разработка методов цифровизации в металлургии и материаловедения. Все это в целом определяет актуальность постановки диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и 7 приложений. Диссертация изложена на 337 страницах машинописного текста, содержит 104 рисунка, 35 таблиц и список использованной литературы из 220 наименований.

Оценка содержания диссертации

В *первой главе* определен масштаб неоднородности качества металлопродукции и факторы, его лимитирующие. При этом использованы не только литературные данные, но и собственная обширная база данных производственного контроля различных сортамента и сталей, коллекция изображений структур.

Вторая глава посвящена описанию разработке научного обоснования цифровых процедур измерения структур и изломов, что в частности необходимо для их метрологического обоснования. При их рассмотрении систематически, была учтена статистическая природа объектов, сопоставлены возможности классической и непараметрической статистики для сравнения выборок результатов измерения. Особое внимание было уделено анализу статистики распределения значений геометрических параметров эталонных изображений.

В *третьей главе* исследованы возможности оценки сопротивления разрушению (склонности к хрупкому разрушению и трещиностойкости) материалов, как среды с неоднородной структурой. Для построения сериальных кривых ударной вязкости даны оценки эффективности применения принципа максимума правдоподобия, при определении трещиностойкости сопоставлены возможности деформационного и энергетического критериев нелинейной механики разрушения для определения трещиностойкости среды с неоднородной структурой.

В *четвертой главе* разработанные подходы к цифровизации структур и разрушения были использованы для расширения представлений о природе вязкого разрушения, его связи с ударной вязкостью. Оценены масштабы трещиностойкости в пределах образцов для испытания вязкости разрушения. Измерены масштабы неоднородности различных структур. Для твердосплавных наплавов рабочих органов почвообрабатывающих машин выявлены критические параметры структуры, определяющие различие в уровне износостойкости и масштабах риска преждевременного разрушения. Это было необходимо для создания твердых сплавов со структурой под заданные свойства, обоснованной коррекции действующих технологий.

В *пятой главе* обсуждаются перспективы извлечения полезной информации при ретроспективном анализе баз данных производственного контроля (Big Data) для прогноза и управления качеством металлопродукции. В этой связи исследована статистическая природа объектов исследования (распределения значений управляющих и выходных параметров

процесса и продукта соответственно). Исходя из этого установлены ограничения классической статистики при анализе баз данных производственного контроля – для сужения размерности пространства параметров. Определены риски потери информации, связанные с уменьшением количества образцов на единицу испытуемой продукции, их статистическая природа. Уровень прогноза регрессии подтвержден её прямыми оценками. Сложные приемы когнитивной графики использованы для обоснования двухпараметрического критерия хладостойкости и факторов, определяющих её различие в крупных поковках из стали 38ХНЗМФА-Ш.

Все главы завершаются выводами, включающими также информацию о внедрении результатов.

В заключении приведены общие выводы по диссертации. В целом, структура диссертации логично построена, результаты нашли свое отражение в графическом и ином иллюстративном материалах.

Научная новизна результатов исследования. Метрологическая составляющая цифровых измерений структур и изломов базируется на обнаруженных перегибах на прямых скейлинга (на сводной зависимости в координатах «суммарные площадь объектов – и их периметр», построенной по 255 бинарным изображениям, полученным пошаговым изменением порога бинаризации). Экстремумы перегибов, точки кроссовера – критерии для выбора уровня бинаризации при выделении отдельных типичных элементов изображения;

- из выявленного многообразия статистической природы рассматриваемых объектов (распределение значений геометрии структурных составляющих структур и элементарных площадок изломов, параметров производственного контроля процесса и продукта) и отклонения от гауссовского вида вытекают риски оценок статистических гипотез на основе критерия Стьюдента и необходимость применения непараметрического критерия Смирнова, а для оценки вида распределений - величин коэффициентов асимметрии и эксцесса;

- впервые выявлены и оценены масштабы неоднородности вида распределения значений геометрических параметров объектов на изображениях эталонных структур (ГОСТ 3443, ГОСТ 1778, ГОСТ 5639 и ГОСТ 5640) в пределах отдельных размерных рядов – диапазон размахов величин коэффициентов асимметрии $A_s \in [1,22; 2,9]$ и эксцесса $E_x \in [2,95; 4,02]$. Это существенный фактор корректности ранжировки структур с использованием эталонных изображений на практике;

- для измерения различий в размещении случайных множеств точек на плоскости (неметаллические включения на металлографическом шлифе, темные пятна на серном отпечатке и т. п., включая центры ямок в вязких изломах) показана эффективность разбиения плоскости изображения на полиэдры Вороного с последующей оценкой значений коэффициентов асимметрии и эксцесса распределений площадей полиэдров, расстояний между ними и количества их соседей. При оценке преимущественной ориентации на плоскости темных пятен на серном отпечатке по Бауману и выделения возможных кластеров полезной также оказалась процедура дилатации: равномерное расширение объекта во все стороны;

- прямыми массовыми цифровыми измерениями вязких изломов средствами различной размерности: на основе синтеза 3D-картины из нескольких 2D-кадров (стереофотограмметрия) и экспресс-оценки 3D-рельефа по «плоским» снимкам (2D-кадрам) показано, что для всех исследуемых уточнена единая природа ямок вязкого излома: в

простейшем приближении - параболоид вращения $y = c(x^2 + z^2)$, обрезанный «сверху» плоскостью мезоступени излома, или фасеткой зернограничного излома, наклонёнными под некоторым углом к макроплоскости излома. С увеличением масштабов ямок наблюдается их вырождение (дно ямок становится более плоским);

- выявлены особенности механизма вязкого разрушения и взаимосвязь статистической природы строения составляющих вязкого излома, определяющие различия ударной вязкости, единые для сталей различного сортамента и способа получения: величина коэффициента асимметрии A_s в эмпирических распределениях числа соседей ямок; неизвестные ранее механизмы разрушения перемычек между порами-соседями: отрывом (в мезомасштабе) с вторичными микроямками и без них срезом и изменение соотношения глубин и диаметров ямок;

- для листовой стали 16Г2АФ обнаружен неизвестный ранее механизм разрушения – шиферообразный излом, представляющий собой в мезомасштабе наблюдения, последовательно чередующиеся выступы и впадины, ориентированные вдоль направления прокатки, на их поверхности - вытянутые первичные ямки поперечником порядка 1 мкм и длиной до 500 - 1000 мкм, на дне которых наблюдаются нитки сульфидов марганца. Причина образования - в протяженном отслое по границе раздела ниток сульфидов марганца и примыкающим к ним полоскам перлита (образовавшихся при охлаждении после нагрева под прокатку, вследствие предшествующей сегрегации углерода в области металла, прилегающих к сульфидам марганца) и последующего разрушения перемычек между вытянутыми ямками срезом, что привело, в итоге, к снижению ударной вязкости;

- для оценки трещиностойкости материалов с неоднородной структурой развит метод определения деформационного критерия механики разрушения - критического раскрытия трещины (CTOD) δ_c (на основе модели, предполагающей, что раскрытие, происходит при вращении берегов трещины относительно некоторого центра): предложена цифровая процедура экспериментального определения центра вращения её берегов, выделения критических стадий в развитии трещины (по измерениям акустической эмиссии) с их привязкой к результатам реконструкции траектории трещины отрыва (по измерениям цифровых 3D-изображений изломов в микро- и мезомасштабах наблюдения) и измерения последовательности пластической деформации и разрушения (боковых перемычек). Полученные результаты также были использованы для определения значений J -интеграла при подрасте трещины;

- на примере улучшаемых сталей 38ХНЗМФА-Ш и 15Х2НМФА с различной степенью неоднородности разномасштабных структур показана возможность определения дискретных значений CTOD по контуру переднего фронта трещины в пределах зоны разрушения макроотрывом (для каждого из её скачков). Выявлен масштаб неоднородности значений δ_c в пределах отдельного образца - до 30 и 15 % для сталей 38ХНЗМФА-Ш и 15Х2НМФА соответственно и риски определения корректных значений J -интеграла, из-за сложно учитываемого вклада макропластической деформации в разрушение.

- систематический анализ представительных массивов данных производственного контроля процессов получения широкого спектра металлопродукции (крупные поковки листовые стали, в т.ч. трубные - категории прочности К60 и К65) выявил существенный масштаб неоднородности процесса и продукта. Ограничение полем допуска технологии хвостов распределения и отсутствие единого пространства параметров технологии может

осложнить применение алгоритмов Big Data, основанных на допущении о нормальном (симметричном) виде распределения величин, а также процедур и критериев классической статистики. В этой связи необходимо использование критериев непараметрической статистики, определение областей с доминирующим типом зависимости (средствами когнитивной графики):

- прямо показана малая эффективность принципа управления «по возмущению» в металлургии: при последовательном уменьшении объема массивов значений ударной вязкости - результатов производственного контроля листа и поковок из сталей 09Г2С, 10ХСНД, 38ХНЗМФА-Ш – путем исключения из выборки значений вязкости, соответствующих высокому содержанию S и P (последовательно с шагом 0,001 % масс для каждой примеси отдельно) вплоть до 0,004 и 0,004 – 0,006 % масс. соответственно, вид распределения и диапазон изменения ударной вязкости остались при этом практически неизменными. Это признак отсутствия единого пространства параметров технологии, фактор низкой эффективности регрессии;

- показана возможность оценки хладостойкости крупных поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш по результатам штатных испытаний на ударную вязкость при +20 °С $\{X_{pi}\}$ и - 50 °С $\{X_{nj}\}$ температурах испытания, по «крутизне» её снижения $\Delta_{ij} = (X_{pi} - X_{nj})$ с учетом ее среднего значения $\bar{X}_{ij} = (KCU_{\max i}^{+20} + KCU_{\min j}^{-50})/2$ – двухпараметрический критерий хладостойкости и выявления факторов технологии, определяющих разброс хладостойкости от поковки к поковке;

- для твердых сплавов (наплавки на рабочие органы почвообрабатывающих машин) установлено, что их сопротивление разрушению, можно оценить по величине предельной степени деформации ϵ квазивязких прослоек, обволакивающих упрочняющие частицы. Максимальную толщину прослойки h , соответствующую доле предельно деформированных прослоек $p = 0,16 - 0,34$, при которой они образуют сплошной каркас в наплавке и начинается разрушение, определяется на основе результатов измерения толщин прослоек в структуре и исходя из значений коэффициента асимметрии их распределения и доли деформированных прослоек p .

Достоверность полученных результатов обеспечивается при помощи обоснованных статистических процедур и программного обеспечения, представительным объемом анализируемых данных, учетом закономерностей протекания технологической наследственности в рамках исследуемых технологий, строения структур, изломов, геометрии раскрытия и продвижения трещины при испытаниях на трещиностойкость. Следует отметить, что применение цифровых процедур существенно увеличивает объем получаемых экспериментальных результатов (с учетом результатов измерений структур, изломов и необходимости получения статистически представительных выборок, в т.ч. в рамках развернутых полномасштабных методических разработок; обработки баз данных производственного контроля), а с другой – вырастают масштабы их анализа - «Data Mining» (и не только производственных баз данных) и сопутствуют неизбежные сложности в компактном представлении работы. Предложенные цифровые процедуры измерения структур и изломов базируются на учете существующих представлений об их строении, роли строения структур в процессах деформации и разрушения, механизмах разрушения, необходимом, научно обоснованном, метрологическом обеспечении. В работе использован широкий спектр

современного исследовательского оборудования, в частности, световой, сканирующей (HITACHI S-800, JEOL JSM-6610LV и VEGA 3 SBH производства TESCAN с микроанализатором EasyEDX производства Bruker), атомно-силовой (NTEGRA) микроскопии, испытательной техники: твердомер BUEHLER OMNIMET MHT, маятниковый копер Roell Amsler RKP-450, универсальная испытательная машина Instron 150LX и согласием полученных результатов с данными, имеющимися в научно-технической литературе.

Значимость работы подтверждается выполнением её в рамках следующих проектов: ОАО «ИЛ» (2004-2005 г.г.), НИЦ «Курчатовский институт» (2007-2009 г.г.), ОАО «Беларомаш – Сервис» (2007 г.), НИОКР по программе Департамента науки и промышленной политики г. Москвы (2008 г.), ОАО «Северсталь» (2011г.), РФФИ (2009-2011 г.г.), АВЦП - Федеральное агентство по образованию (2009-2011 г.г.), ФЦП (2015-2017 г.г.), с АО НПО «ЦНИИТМАШ» (2019-2021 г.г.), АО «ВМЗ» (2023-2025 г.г.).

В 2018 г. в составе творческого коллектива соискатель удостоен Диплома лауреата, а в 2020 г. - серебряной медали лауреата Международной промышленной выставки «Металл-Экспо» за разработку «Импортозамещающих твердых сплавов с повышенной износостойкостью и сопротивляемостью преждевременному разрушению для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих сельхозмашин, эксплуатирующихся в абразивной среде».

Практическая значимость результатов диссертации

Полученные в работе результаты использованы в производственных условиях АО «ВМЗ» Объединенная металлургическая компания (г. Выкса), АО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти), ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (Москва), ООО ИТ-Сервис (г. Самара) (акты о внедрении и практическом использовании результатов работы в приложениях к диссертации А, В, Г, Д). С АО «РТП «Петровское» г. Светлоград, в соответствии с Лицензионным договором между НИТУ МИСиС и АО «РТП «Петровское» (№ ЛД 03.031-2019 от 25.04.2019), на производственных площадях АО «РТП «Петровское», за период его действия (по 2024 г. включительно) произведено продукции по лицензии – рабочие органы сельскохозяйственных машин (сортамента «АО РТП «Петровское») на общую сумму 68704215,74 руб. (Акт о внедрении – Приложение Б).

Результаты работы будут полезны при использовании в исследовательских организациях материаловедческого и машиностроительного профилей, ВУЗах и организациях РАН РФ, в практической деятельности металлургических и машиностроительных предприятий.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, международных школах «Физическое материаловедение», «Актуальные проблемы прочности», всех Евразийских научно-практических конференциях «Прочность неоднородных структур»; Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2018); 60-й международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» и симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Беларусь, 2018; 2019).

Публикации: основные результаты диссертации опубликованы в 92 печатных работах, из них 45 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из которых 34 в изданиях,

входящих в систему цитирования WoS, Scopus; 1 монография, 2 учебных пособия, 46 тезисов докладов на международных конференциях. Получено 2 патента.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в автореферате.

Замечания по работе:

1. В работе убедительно, на большом фактическом материале (базы данных производственного контроля технологий производства разнородных видов металлургической продукции), показаны границы эффективного применения инструментов классической статистики, возможности непараметрической статистики, перспективы применения сложных эвристических приемов когнитивной графики. В настоящее время широкое распространение получили такие алгоритмы Big Data, как машинное обучение, нейроинформатики. Было бы полезно более подробно обсудить, в какой мере полученные в работе результаты и подходы могут использоваться в рамках получивших распространение алгоритмов, применимо к металлургии и материаловедению.

2. Разработанные в работе цифровые процедуры измерения изломов получили развитие применимо к вязкому механизму разрушения, это позволило получить важные результаты о строении вязких изломов и о его связи с уровнем ударной вязкости. Однако из текста диссертации непонятно, можно ли распространить применение данных подходов на хрупкие изломы или необходимы иные подходы.

3. Из результатов сопоставления в работе эффективности применения двух критериев нелинейной механики разрушения: деформационного и энергетического, для оценки сопротивления разрушению структурно неоднородных материалов вытекает предпочтительность использования в этой связи величины критического раскрытия трещины δ_c . Нет сомнений, что «точечность» в определении величины δ_c , обеспечивает возможность оценки трещиностойкости отдельных структурных составляющих, фрагментов структуры, степени опасности имеющихся аномалий структур. Однако, при оценке значений трещиностойкости отдельных образцов, в целом, может быть более информативной окажется величина интеграла Черепанова-Райса (естественно при отработке всех спорных моментов в существующей методике его определения)?

4. В работе достаточно убедительно показана роль отличий в виде распределения значений параметров структуры, изломов для выявления различий в сопротивлении материалов разрушению металлопродукции широкого сортамента. В этой связи имело смысл более подробно обсудить в работе предложения по развитию нормативной базы для контроля структур и изломов.

5. Исследуемые в работе структуры твердосплавных наплавки на рабочие органы почвообрабатывающих машин отличаются существенным разнообразием своего строения. Это же относится и к морфологии изломов. Нет возражений относительно выявленного в работе влияния состава на формировании развитой неоднородности структур (и последующих рекомендаций в этой связи), но есть и вклад технологии получения наплавки, однако это отражено в работе недостаточно полно.

Заключение

Сделанные замечания не снижают положительной оценки исследования и не ставят под сомнение научную и практическую значимость, достоверность полученных результатов и корректность выводов диссертации Соколовской Элины Александровны, выполненной на

высоком экспериментальном, методическом и теоретическом уровне. Цель работы достигнута, задачи решены, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором исследований изложены развитые и научно обоснованные методы цифровизации в материаловедении и металлургии для повышения качества металлопродукции». Внедрение предложенных решений вносит значительный вклад в повышение конкурентоспособности отечественной металлопродукции, в развитие страны в целом. Диссертационная работа «Развитие методов цифровизации в материаловедении и металлургии для повышения качества металлопродукции» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», а её автор, Соколовская Элина Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Отзыв утвержден на заседании кафедры термообработки и физики металлов, протокол № 2 от 25.02.2026 г.

Заведующий кафедрой Термообработки и
физики металлов УрФУ им. Первого Президента
России Б.Н.Ельцина доктор техн.наук,
профессор



Попов Артемий Александрович