

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»**

Пережогин Виталий Юрьевич

**ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СТРУКТУР В СТАЛЯХ И  
СПЛАВАХ**

Специальность – 05.16.01  
«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
профессор, д.т.н. А.В. Кудря

Москва, 2020

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Многообразие геометрии структур, часто номинально однотипных, определяет их различие в разрушении. Анализ структур носит преимущественно качественный или полуколичественный характер. Это затрудняет выработку объективных критериев неоднородности структур и оценку ресурса их работы в конструкции. В связи с этим решение задач, связанных с созданием и разработкой современных методов оценки и контроля структур, позволяющих диагностировать изменения, происходящие в стали и свойствах отдельных слоев или компонентов макро неоднородных изделий, является актуальным.

**Целью** данной работы является разработка подходов к метрологически обеспеченному измерению разнородных структур сталей и сплавов для определения закономерностей их строения. Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- Изучение геометрии строения эталонных структур шкал ряда ГОСТ.
- Изучение влияния методики металлографических исследований на воспроизводимость получаемых результатов.
- Обоснование принципов выбора оптимальной бинаризации изображений структур и изломов.
- Разработка оптимальных цифровых процедур обработки изображений неоднородных структур для объективного измерения их параметров и сопутствующих изломов с учетом особенностей природы исследуемых объектов.
- Накопление представительной статистики измерений элементов структур.
- Использование разработанных подходов для описания неоднородности строения различных структур сталей: поковки из улучшаемой стали 38ХН3МФА и лист из стали 09Г2С (включая измерение морфологии изломов) и твердых сплавов для наплавки рабочих органов сельхозтехники.

### **Научная новизна:**

- На основе анализа полей яркости (в 256 оттенках серого) некоторых типичных изображений структур (феррито-перлитных полосчатых, зеренных, дендритных, неметаллических включений и серного отпечатка и др.) определены факторы (время травления, величина оптического увеличения, алгоритм бинаризации и др.) и масштаб их влияния на воспроизводимость результатов измерения геометрических параметров элементов строения структур, в т.ч. с учетом статистической природы их строения.
- Из сопоставления подобия бинарных структур, соответствующих последовательному изменению уровня бинаризации их изображений (в оттенках серого от 1 до 256 с шагом 1) следует, что на кривой в системе координат «суммарные площадь объектов – и их периметр» может наблюдаться несколько перегибов, отвечающих оптимальному уровню бинаризации для отдельных однотипных элементов структур (мультиризация), что может быть использовано для их объективного выделения при количественном измерении параметров геометрии.
- Показано, что у изображений структур, соответствующих шкалам ГОСТ 5639, 3443, 5640 и 1778, могут отличаться характеристики распределений значений геометрических параметров, таких, как коэффициенты эксцесса и асимметрии. В частности, величина коэффициента асимметрии  $A_s$  для исследуемых изображений варьировалась в широких пределах:  $0,2 \leq A_s \leq 1,8$ ;  $-0,15 \leq A_s \leq 1,3$ ;  $0,1 \leq A_s \leq 6$ ,  $-0,7 \leq A_s \leq 1,2$  (для всех параметров структуры) соответственно. Это указывает на различие статистической природы строения изображений эталонных шкал.
- Предложенные процедуры получения и обработки изображений были использованы для сопоставления эффективности измерения карбидов в структуре и изломах твердого сплава на железной основе (по их площади и поперечнику); оценки неоднородности размеров неметаллических включений и их размещения в металле (на основе статистики полиэдров Вороного) крупных поковок из стали 38ХН3МФА, масштаб которой оказался

соизмерим с масштабом неоднородности трещиностойкости, экспериментально измеренной ранее; для выявления степени взаимосвязи параметров полосчатости в микроструктуре листов различной толщины из стали 09Г2С и сопутствующей ей морфологии изломов.

**Практическая ценность** состоит в использовании предложенных процедур обработки изображений структур и изломов для выявления неоднородности строения структур и соответствующих им изломов.

Основные **научные положения**, выносимые на защиту:

- статистические закономерности строения эталонных шкал ГОСТ 3443, ГОСТ 1778, ГОСТ 5639 и ГОСТ 5640;
- масштабы различий в результатах применения существующих алгоритмов бинаризации применимо к некоторым типовым структурам;
- закономерности формирования полей яркости изображений структур при вариации процедур их подготовки и обработки;
- научные основы процедур обработки изображений структур и изломов в зависимости от строения объекта;
- статистические закономерности строения некоторых типичных структур и их отражение в разрушении.

**Достоверность** результатов обеспечивается использованием современной техники, массовых цифровых измерений структур в сочетании с разнообразным программным обеспечением и статистическими методами обработки результатов.

**Личный вклад** соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, выражается в том, что он планировал, непосредственно участвовал в лабораторных экспериментах, исследовал методы обработки изображений структур и изломов и измерения объектов на них, создавал алгоритмы обработки изображений структур и изломов, проводил классификацию типов структур, выполнял статистический анализ полученных результатов. Основные положения диссертационной работы сформулированы автором.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на следующих научных конференциях: XXIII Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» в г. Тольятти, 2016 и 2017 г.; Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», Москва, «НИТУ МИСиС», 2016 и 2018 гг.; Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, Москва, НИТУ «МИСиС», 2016 г. «Перспективные материалы и технологии», Витебск, 2017 и 2018 г.; Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» Брест, 2019 г.; международная выставка «Металл-Экспо 2018». Диссертационная работа проводилась в рамках проекта ФЦП №14.578.21.0129 по теме «Разработка импортозамещающих твердых сплавов с повышенными износными и технологическими характеристиками для упрочнения быстроизнашиваемых деталей сельхозмашин, эксплуатирующихся в абразивной среде».

#### **Вклад соавторов**

Участие научного руководителя А.В. Кудри – постановка задач исследования и обсуждение результатов. Э.А. Соколовская – помощь в разработке алгоритмов обработки изображений. К.Б. Папина – получение изображений полосчатых структур исследуемых сталей. Чинь Хыу Чыонг – помощь в подготовке шлифов и ряда изображений для количественно обработки. Т.Ш. Ахмедова – помощь в подготовке изображений твердых сплавов и их изломов. Нго Нгок Ха – помощь в подготовке изображений структур стали.

**Публикации:** материалы диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, из них 5 – статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 4 из которых Scopus и Web Of Science, 10 – тезисы докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, аналитического обзора литературы, четырех глав с описанием методики и результатов исследований, выводов и списка использованных источников из 139 наименований. Работа изложена на 235 страницах, содержит 129 рисунков и 37 таблиц.

## Основное содержание работы

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе представлен обзор литературных источников по теме исследования. Сопоставлено влияние разнородных структур, неоднородности их строения на свойства сталей, что определяет необходимость измерения морфологии структур. Проведен анализ классических методов металлографии и границ эффективного их применения. Описаны существующие подходы к обработке изображений в материаловедении и других областях.

Во **второй** главе описаны материалы, и изложены методики исследований. В качестве объектов исследования были использованы изображения эталонов структур, соответствующих ГОСТ 5639 – Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна, ГОСТ 3443 – Отливки из чугуна с различной формой графита (Шкала 3. Г. «Количество включений графита»), ГОСТ 5640 – Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты (Шкала 3. «Полосчатость феррито-перлитной структуры»), ГОСТ 1778 – Металлографические методы определения неметаллических включений (Шкала «Нитриды точечные»).

В качестве объектов исследования использовали также типичные изображения реальных структур и изломов листовых сталей 09Г2С, 10-15ХСНД и СтЗсп, а также поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА, наплавов из твердых сплавов на основе железа и никеля типа ПГ-ФБХ-6-2 (№1), ПР-Х4ГСР (№2), ПГ-10Н-01 (№3) и ПС-14-60 (№4), отражающие разнообразие типов металлопродукции и технологий (принятых) их получения.

Пробоподготовка состояла из операций запрессовки, шлифования, полирования и травления. Запрессовку образцов производили на прессовальном аппарате SimpliMet 1000 (Buehler). Готовые образцы шлифовали и полировали на аппарате AlliedTwinPrep 5.

Изображения микроструктур были получены средствами световой микроскопии Axio Observer D1m Carl Zeiss и Axio Imager M2m в диапазоне увеличений 50 – 1000, тонкой структуры на субмикро- и нано уровнях, в т.ч. природы отдельных структурных составляющих – средствами сканирующей электронной (VEGA 3 SBH производства TESCAN с микроанализатором EasyEDX производства Bruker), изломов – сканирующей электронной микроскопии (VEGA 3 SBH и JSM-6480LV фирмы «JEOL»).

Обработку изображений проводили с использованием программ ImageJ, Mathcad, Matlab и Excel.

В **третьей** главе описаны способы применения автоматических процедур обработки изображений для измерения параметров структур и изломов. Выбор таких алгоритмов [1] должен учитывать механизм влияния строения структур на деформацию и разрушение материалов.

В этих целях получило широкое распространение, особенно в производственной практике, сравнение структур с эталоном (картинкой) на основе балльной оценки. Существует целый ряд нормативных документов, устанавливающих, определенную градацию различных структур: графитовых частиц чугунов разнообразных размеров, форм, размещения в поле зрения и т.п., неметаллических включений, зеренных структур и полосчатости в микроструктуре сталей. Однако для данного подхода характерна определенная субъективность, сложности с описанием существующего многообразия морфологии структур, в т.ч. номинально однотипных, документированием результатов измерений, высокая трудоемкость.

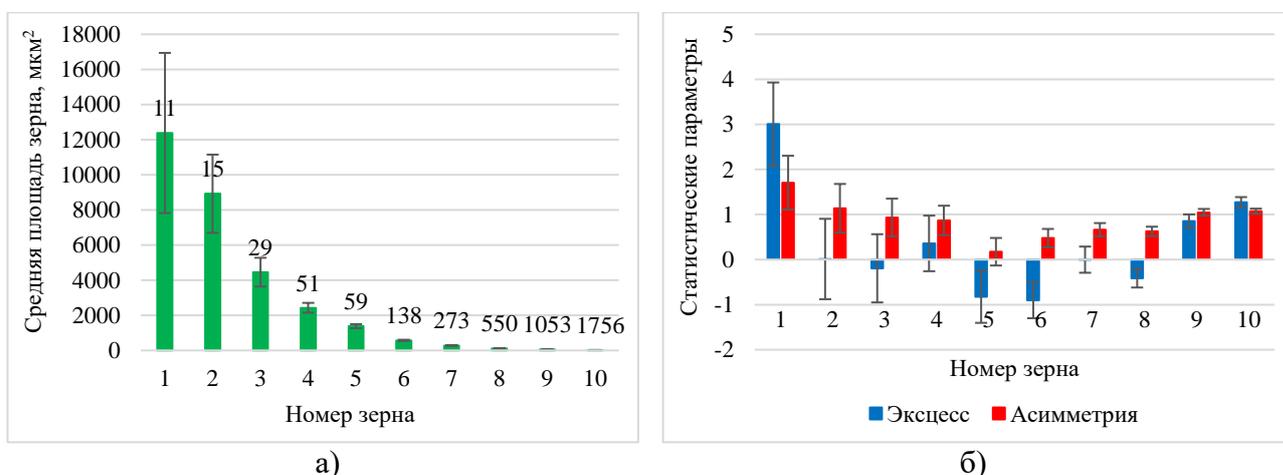
**Статистические характеристики изображений эталонов шкал ГОСТ.** Цифровизация делает возможным быстрые объективные, документированные измерения структур, что позволяет оценить статистику измерений, в т.ч. изображений эталонов шкал ГОСТ и сформулировать на этой основе адекватные алгоритмы обработки изображений реальных структур. При анализе структур исходили из статистической природы их строения,

что получает соответствующее отражение в процессах деформации и разрушения, где ключевую роль играют размеры, форма и особенности размещения элементов структуры.

Также, как и изображения реальных структур, изображения эталонов представляют собой, как правило, поле яркости в оттенках серого (256 единиц  $z(x,y)$  – однозначной функции координат на плоскости кадра), где однотипные элементы характеризуются определенными диапазонами яркости и геометрией. В этой связи для выделения однотипных элементов проводили процедуры бинаризации. При объединении смежных пикселей в отдельный элемент изображения применялся принцип 4-х связности – рассматривалась возможность существования только четырех соседей (по горизонтали и вертикали). Процедуры, связанные с выравниванием яркости изображения в поле зрения и фильтрацией, не проводили, что было обусловлено их качеством (в соответствии с эталонным статусом).

Для изображений зерен и графитовых включений измеряли их площади, полосчатости в микроструктуре – ширину полос перлита, шаг полос, площадь перлитных фрагментов, размер зерна феррита. Их измеряли методом параллельных секущих, проведенных с равным (для каждого изображения) шагом в зависимости от количества структурных элементов (не допуская дублирования измерений одних и тех же элементов). Особенности размещения однотипных элементов оценивали на основе статистики полиэдров Вороного, определяли их площади и расстояния между центрами смежных полиэдров (центры тяжести элементов).

ГОСТ 5639, 3443, 5640, 1778 предусматривают необходимость просмотра минимальной площади шлифов: 1, 20 (для мелких деталей, например, индивидуальные поршневые кольца, допускается и меньше), 1200 и 400 мм<sup>2</sup> (для подтверждения состоятельности заключения о принадлежности структуры к тому или иному баллу) соответственно. В исследуемых вариантах воспроизводимость измерений зависела от их количества, которое в пределах поля измерений (базового при  $\times 100$ ) определялось, в частности, дисперсностью элементов структуры (рисунок 1).



а – средняя площадь зерен; б – статистические коэффициенты их распределений  
Рисунок 1 – Статистические характеристики распределения параметров геометрии изображений структур, соответствующих шкале по ГОСТ 5639

В работе показано, что размеры структурных составляющих и статистические характеристики их распределений нелинейно зависят от номера шкалы. Это – признак неоднородности микроструктуры, указывающий на необходимость более детального измерения геометрии отдельных структурных составляющих, их конфигурации в целом, а также получения соответствующих статистических оценок результатов измерений.

Показано, что при эмпирическом подборе структур, соответствующем тому или иному номеру шкалы, скорее всего соблюдался единый подход. Во всяком случае, в координатах «суммарная площадь – суммарный периметр» однотипной структурной составляющей, соответствующей различным баллам какой-то из шкал, например, шкале неметаллических включений – нитриды точечные (от 1 до 5 балла по ГОСТ 1778),

соответствовала линейная зависимость. Её наличие – признак подобия геометрии включений на изображениях, соответствующих различным номерам шкалы.

Очевидно, что для балльных оценок по умолчанию предполагается однородность структур в пределах фиксированного номера шкалы. В качестве меры такой однородности (с учетом статистической природы морфологии структур) можно принять значения коэффициентов асимметрии и эксцесса, характеризующие вид распределения значений параметров структур. Оказалось, что значения коэффициентов асимметрии и эксцесса, например, распределения значений площадей включений графита для изображений шкал (ШГ2, ..., ШГ12) варьируются в пределах от -0,1 и -1,5 до 1,3 и 1,3 соответственно. Однако известно [2], что распределение симметрично (как при нормальном распределении), когда коэффициент асимметрии равен нулю и, чем ближе по модулю его величина к единице в одновершинных распределениях, тем асимметрия существеннее. При уровне коэффициента асимметрии (по модулю) менее  $<0,25$ , асимметрия считается незначительной, в диапазоне значений от 0,25 до 0,5 – умеренной, более 0,5 – значительной. Положительный и отрицательный его знак указывает на смещение максимума распределения влево или вправо соответственно, а для коэффициента эксцесса характеризует плоско- или островершинность распределения. Это означает, что у распределений, описывающих параметры частиц на изображениях эталонов, отвечающих различным номерам шкалы, отличается их статистическая природа. Величина коэффициента асимметрии  $A_s$  для исследуемых изображений ГОСТ 5639, 3443, 5640 и 1778 варьировалась в широких пределах:  $0,2 \leq A_s \leq 1,8$ ;  $-0,15 \leq A_s \leq 1,3$ ;  $0,1 \leq A_s \leq 6$ ,  $-0,7 \leq A_s \leq 1,2$  (для всех параметров структуры) соответственно

Нельзя, безусловно, исключить, что такая статистика может быть связана с малой площадью поля зрения эталона ( $0,4 \text{ мм}^2$  в масштабе образца). ГОСТ предусматривает проведение балльной оценки на шлифе площадью не менее  $0,2\text{-}3,0 \text{ см}^2$ . Однако это предполагает оценку масштабов наблюдения данного номера шкалы, а не оценку однородности её строения в пределах каждого номера шкалы.

Их размещение в поле зрения эталонов было также неоднородно. Это характеризует статистика полиэдров Вороного: достаточно широкий разброс значений коэффициентов асимметрии их площадей и расстояний между центрами соседних полиэдров.

Поскольку для ряда параметров геометрии эталонных структур распределение их значений отличалось от нормального, это могло ограничить применение критериев классической статистики при сравнении результатов их измерений для разных номеров шкал. В этой связи полезным может оказаться применение критериев непараметрической статистики, например Колмогорова-Смирнова. Действительно в ряде случаев, например, при сравнении ширины полос перлита на изображении 0 и 3 балла полосчатых структур по эталонам, ряд Б, ГОСТ 5640, различие в рисках  $R$  при оценках по критерию Стьюдента и Колмогорова-Смирнова было существенно ( $R = 0,15$  и  $R > 0,5$  соответственно).

Аналогичные результаты были получены при сравнении значений площадей графитовых включений, в частности шкал ШГ10-ШГ12 (риск 0,3 и  $>0,5$  при использовании критериев Стьюдента и Колмогорова-Смирнова соответственно). Отсюда понятно, что неучет вида распределения при использовании количественных измерений может привести к получению значимо различающихся результатов при сопоставлении изображений, соответствующих различным номерам шкал стандартов, ранжирующих изображения структур. В этой связи также очевидно, что для выявления объективных связей реальных структур со свойствами необходимы массовые документированные измерения структур.

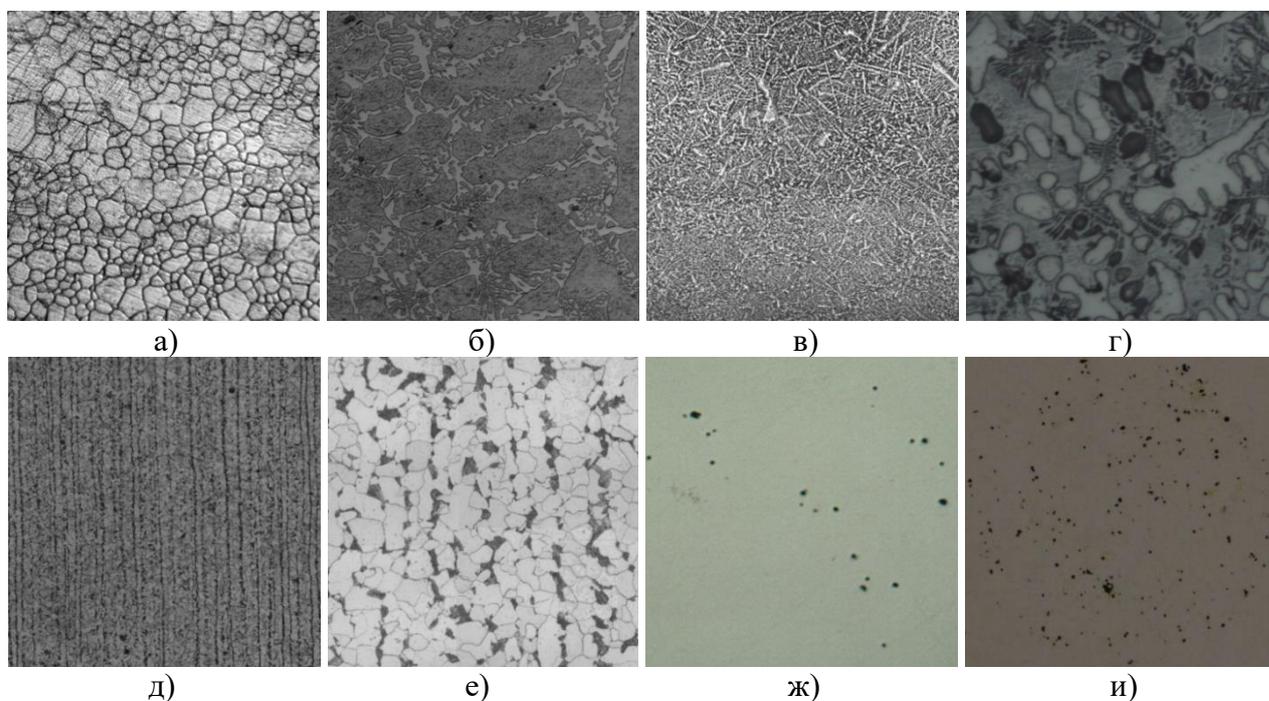
Таким образом, в работе показано, что изображениям эталонных структур в рамках анализируемых стандартов, отвечает достаточно развитая неоднородность их строения, что требует учета при их использовании в практическом металловедении.

**Факторы, определяющие воспроизводимость результатов измерений.** Современные вычислительные мощности и программные продукты могут обеспечить измерение гораздо больших объёмов информации, чем во время создания данных стандартов. В ряде работ [например, 3, 4, 5] показана перспективность использования

компьютеризированных процедур для обработки изображений в материаловедении, однако, есть все основания считать, что разрабатываемые решения не являются инвариантными к различным типам структур, отличающихся геометрией своего строения, например, феррито-перлитная полосчатость в листе из низколегированной стали и серный отпечаток в крупных поковках из улучшаемой среднелегированной стали. Это обстоятельство определяет научный и практический интерес к продолжению работ в данном направлении: развитии методов обработки изображений с учетом морфологии конкретной структуры.

В этой связи все исследуемые изображения: дендритные структуры сталей и твердых сплавов; зеренные структуры; смешанные структуры; полосчатые структуры при разном увеличении; структуры с мелкими точечными объектами - неметаллические включения (НВ) и серный отпечаток (СО) (рисунок 2) были ранжированы по нескольким морфологическим параметрам:

- по цвету: светлые на светлом фоне, тёмные на светлом фоне (светлых на тёмном фоне не было, но потенциально такие структуры могут быть), частицы определённого цвета;
- по форме и размеру: равноосные и вытянутые, квадратные и гексагональные, сложной формы («крокодильчики» дендритов) и другое;
- по расположению в пространстве: объединённые и разделённые, по степени кучности.



а – зёрненная структура; б – дендритная структура твёрдого сплава; в – дендритная структура стали; г – смешанная структура; д – полосчатая структура; е – полосчатая структура при большом увеличении; ж – неметаллические включения; и – серный отпечаток.

Рисунок 2 – Типы изображений в металлографии

В рамках исследований была оценено влияние различных факторов, определяющих качество подготовки изображений в материаловедении (таблица 1).

Одним из них является травление. Качественный анализ допускает возможность идентификации элементов структуры и их конфигурации даже в условиях, нечетко выраженных или перетравленных границ. Однако для цифровых процедур, такое допущение может быть привести к появлению различий в результатах обработки.

Таблица 1 – Факторы воспроизводимости результатов измерения геометрии элементов структур

Подготовка образцов			
Шлифование и полировка образцов	Травление шлифов		Съёмка шлифов
Обработка изображений			
Выбор размера поля зрения	Выравнивание изображений по освещению	Бинаризация изображений	Фильтрация шумов с учетом природы объектов
Измерение параметров объектов изображений			
Измерение геометрии объектов методами секущих и площадей	Определение анизотропии объектов	Построение полиэдров Вороного	
Статистический анализ данных			
Сравнение выборок по критериям параметрической и непараметрической статистики	Определение статистических параметров распределения	Оценка размещения однотипных объектов в поле зрения на основе статистики полиэдров Вороного	

В этой связи для четырех исследуемых твердых сплавов варьировали время выдержки при травлении с шагом в 2-3 секунды. Для каждого шага производилась съёмка на одном и том же поле зрения, измерялись параметры светлых объектов (дендритов или карбидов) и темных частиц (рисунок 3). Сравнение выборок результатов измерения размеров дендритов (по методу секущих) для соседних шагов проводили по критерию Колмогорова-Смирнова.

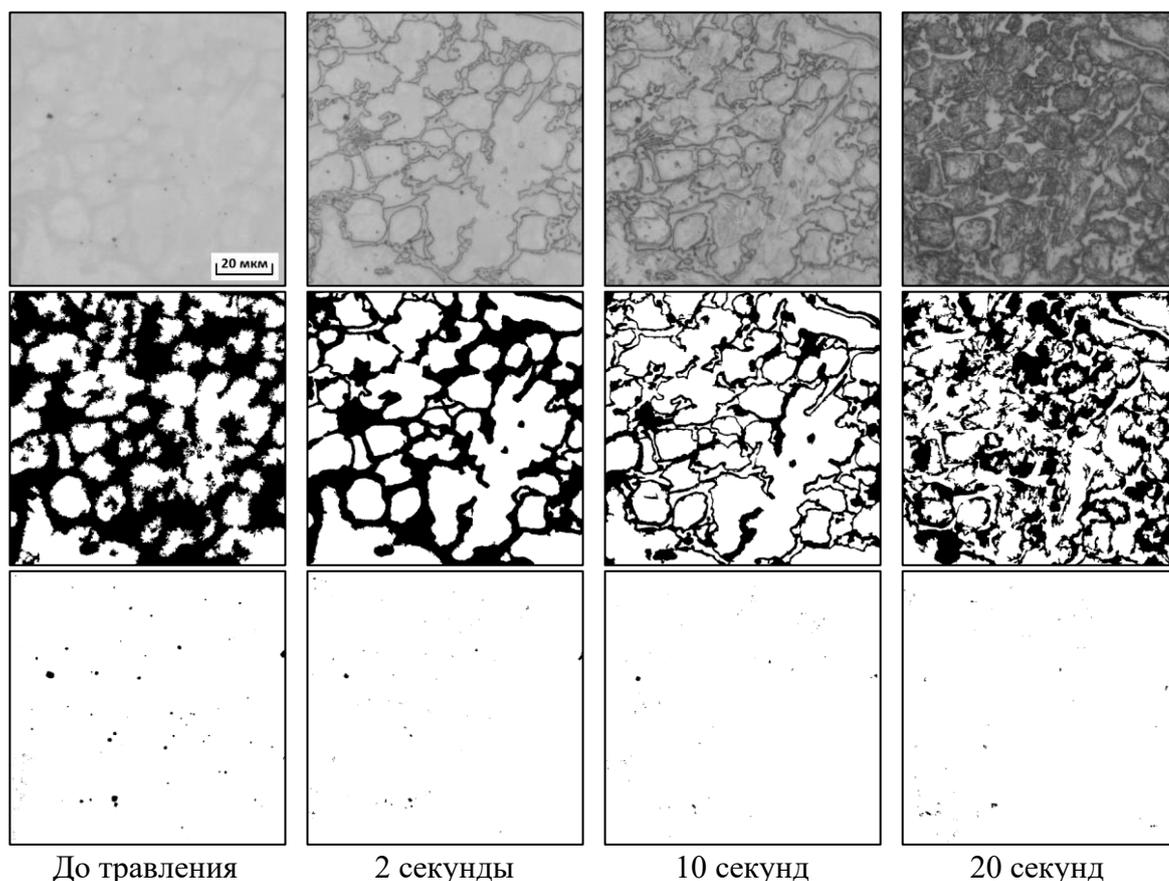


Рисунок 3 – Влияние времени травления на качество изображения твердого сплава 1,  $\times 500$

Показано, что увеличение времени травления может привести к изменению значений параметров геометрии объектов на изображении (рисунок 4). Значимость изменений подтверждается сравнением результатов с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Следует отметить, что такие изменения могут проявиться как в пределах одного шага травления (по его продолжительности), так и через несколько таких шагов. В этой связи очевидно, что неучет данного фактора может сказаться на конечных результатах количественной обработки изображений структур.

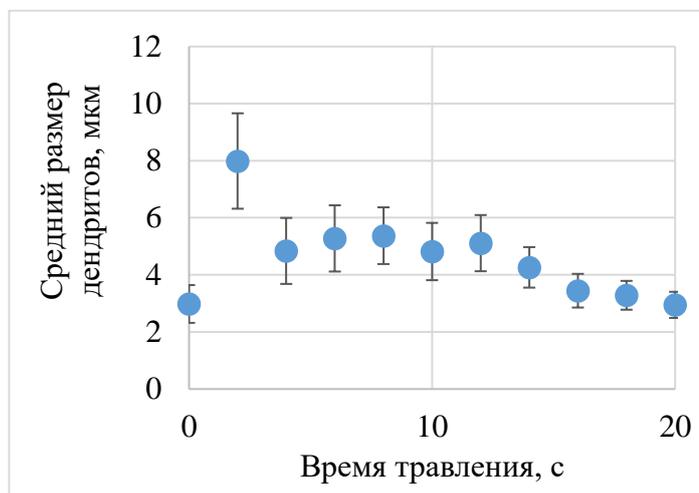


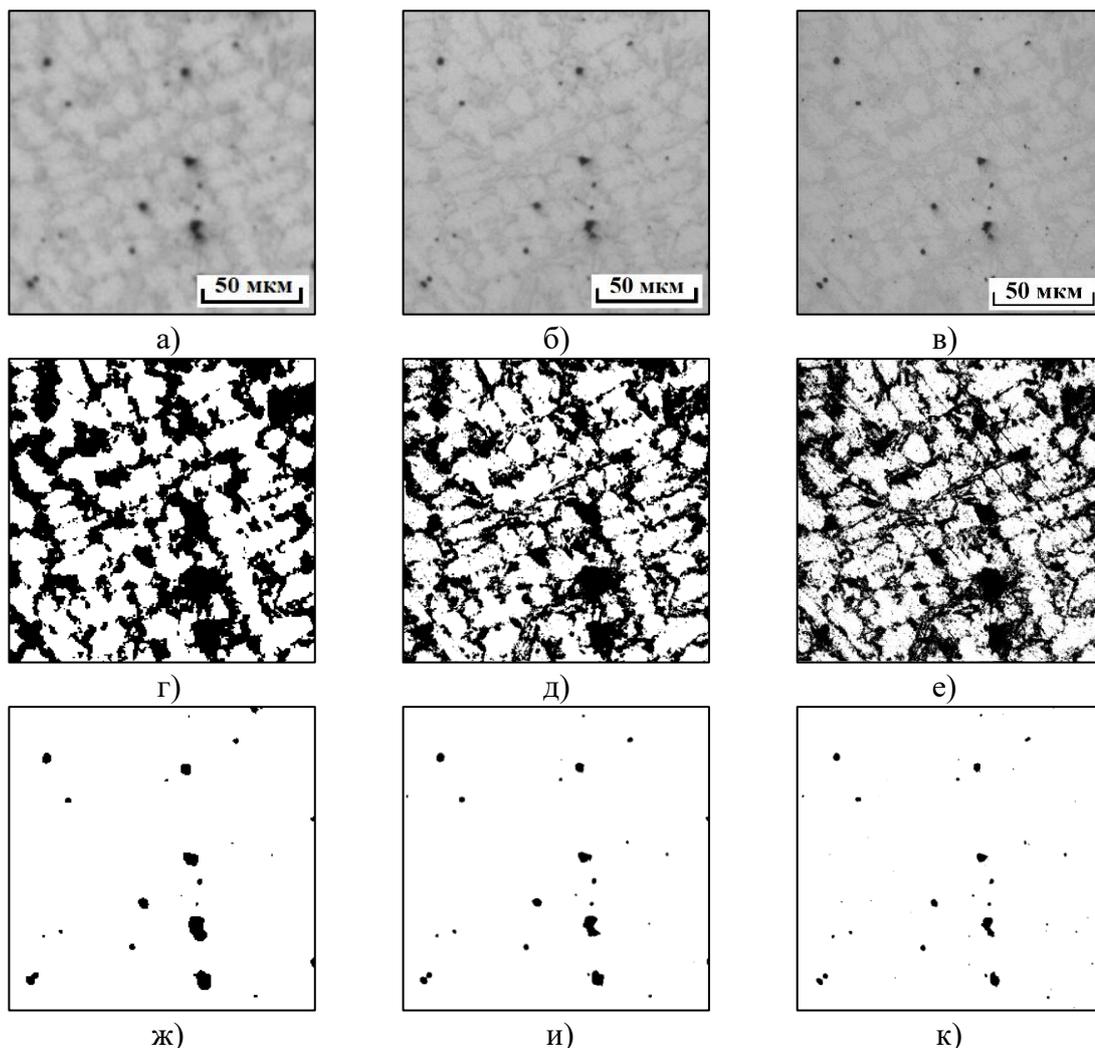
Рисунок 4 – Изменение размеров объектов твердого сплава со временем травления

Существенную роль в получении объективных результатов измерения структур играет выбор оптимального увеличения. Очевидно, что большее увеличение позволяет выявить более мелкие детали структуры. Однако нередко приходится сопоставлять строение однотипных структур, полученных при различных увеличениях. Связанные с этим риски были оценены на примере изображений микроструктуры твердого сплава на никелевой основе, полученных при увеличении 100, 200 и 500 крат на одних и тех же, сопоставимых по площади, полях зрения.

При этом, за базовую площадь принималось изображение в поле зрения микроскопа при увеличении 500 крат, для того чтобы исключить необходимость склейки кадров в панораму (в том случае, если за базовое увеличение было бы выбрано увеличение 100 крат) и связанной с этой необходимостью почти неизбежного удаления шумов на стыках кадров, сшиваемых в панораму.

Полученные изображения подвергались последовательной обработке: удаление градиента по освещению, бинаризация, фильтрация шумов, измерение размера объектов (рисунок 5).

Далее проводилась фильтрация шумов на изображении: удалялись темные шумы на светлых объектах и наоборот. Масштабы фильтрации определялись на основе нахождения порогового значения размеров, составляющих структуры («снизу») с учетом их разрешения и минимально возможных физических размеров. Известно, что минимальный распознаваемый глазом размер объектов на изображении 1 мм. При разном увеличении этот размер имеет разную абсолютную величину. При  $\times 100$  – 10, при  $\times 200$  – 5, при  $\times 500$  – 2 соответственно. Так как объекты удаляются по площадям, то при  $\times 100$  удалялись объекты меньше 100, при  $\times 200$  – 25, при  $\times 500$  – 4  $\text{мкм}^2$  соответственно. Для обеспечения единства измерений для изображений во всем диапазоне увеличений был использован единый уровень фильтрации – 100  $\text{мкм}^2$ , соответствующий увеличению 100 крат. Фильтрация темных включений при этом не проводилась.



а, г, ж – увеличение  $\times 100$ , б, д, и – увеличение  $\times 200$ , в, е, к – увеличение  $\times 500$   
 Рисунок 5 – Изображения образца твердого сплава 3 на никелевой основе в исходном состоянии (верхний ряд), после перевода в бинарную форму (средний ряд) – исходное изображение; средний

На результаты измерения элементов структуры также сказываются различия в степени изменения интенсивности яркости в переходной зоне («элемент – фон»). Этот интервал шире при меньших увеличениях (рисунок 6).

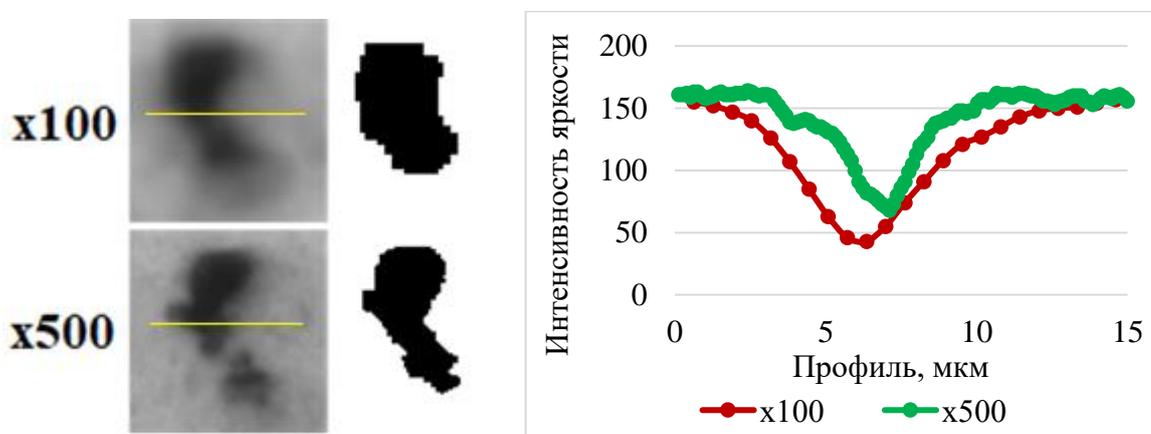


Рисунок 6 – Выделение объектов частиц на бинарных изображениях при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$

Отсюда один и тот же объект при разных увеличениях может иметь разные размер, или форму. Не исключено, что некоторые мелкие объекты или их фрагменты могут при этом удалиться. Эти факторы и обеспечивают наблюдаемое различие в геометрии элементов изображения (рисунок 7).

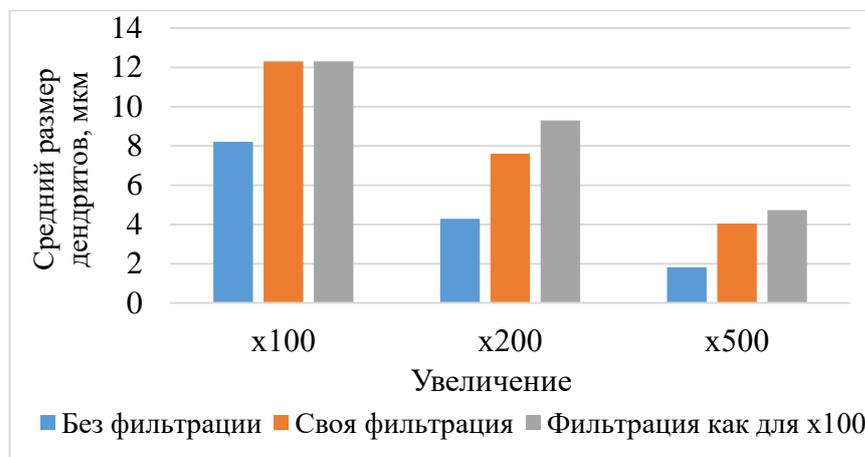


Рисунок 7 – Сравнение значений среднего размера дендритов твердого сплава на никелевой основе по измерениям методом секущих на одном и том же поле зрения при разных увеличениях и уровнях фильтрации (едином для всех – база  $\times 100$  и индивидуальном для каждого увеличения)

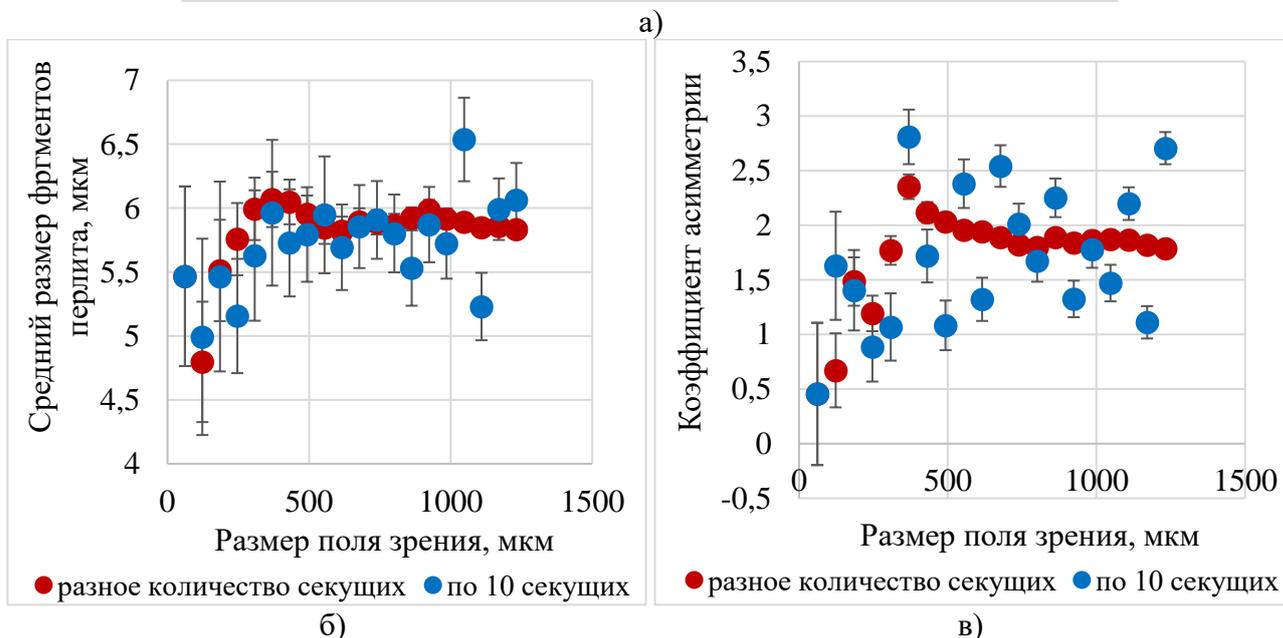
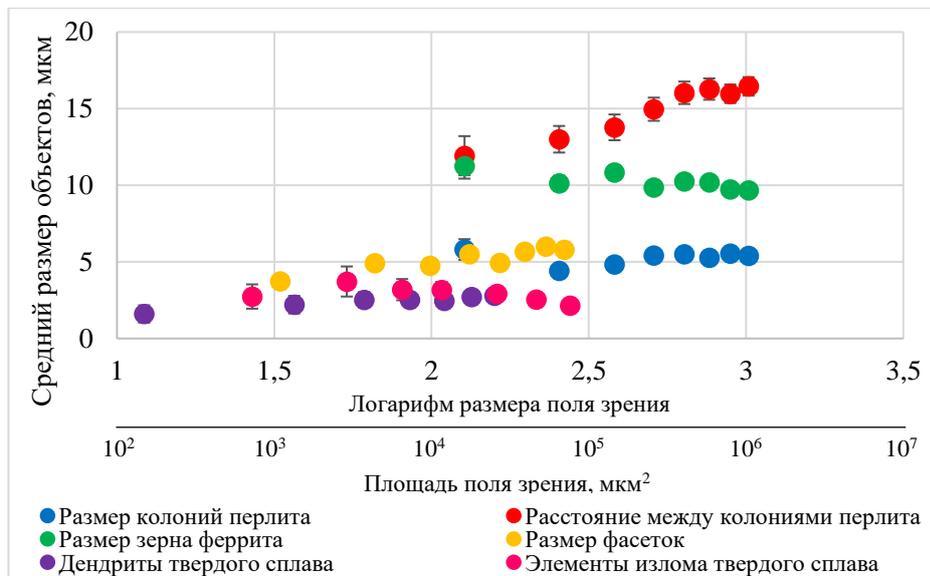
Таким образом, выбор оптимального увеличения при цифровых измерениях структур – существенный фактор, определяющий получение искомой информации об изображении, и его выбор в значительной мере должен учитывать морфологию исследуемой структуры, решаемые при этом задачи.

Для получения статистически воспроизводимых результатов при анализе изображений в материаловедении необходимо найти минимальное поле зрения, описывающее строение всего изображения в целом. Не случайно вышеописанные стандарты по оценке баллов той или иной структуры предусматривают просмотр значительной площади шлифа. Очевидно, что такое требование становится еще более актуальным при количественных измерениях геометрии структур.

С этой целью были проанализированы изображения структур и изломов твердого сплава и низколегированной стали с феррито-перлитной полосчатостью. Минимальное поле зрения, достаточное для описания геометрии элементов той или иной зоны в целом, было определено путём постепенного увеличения размера кадра и измерения среднего значения размера объектов на этом кадре методом секущих. В качестве минимального кадра была выбрана площадь, начиная с которой средний размер объектов изображения не изменялся.

Масштабы такой площади определяются морфологией структуры, например, для твердого сплава воспроизводимость результатов измерения среднего размера объекта (дендритов) – по методу секущих обеспечивается, начиная с кадра стороной 150 мкм, для полосчатой феррито-перлитной структуры – с кадром стороной не менее 600 мкм, аналогичные зависимости наблюдаются и для изображений изломов (рисунок 8).

При невозможности допущения нормального распределения размеров элементов структуры процедуру определения оптимального размера кадра (или сшитой из них панорамы) целесообразно дополнить оценкой закономерностями выхода на насыщение статистических характеристик соответствующих распределений. Это существенно, т.к. например, для изображения микроструктуры листовой стали СтЗсп (балл полосчатости Б2) при измерении поперечника колонии перлита наблюдалось различие в выходе на насыщение значений среднего поперечника и статистических характеристик их распределения (коэффициенты асимметрии и эксцесса) (рисунок 8, б, в).



а – средний размер объектов; б – средний размер фрагментов перлита;  
 в – коэффициент асимметрии среднего размера фрагментов перлита

Рисунок 8 – Изменение среднего размера и статистических коэффициентов распределений объектов от размера кадра

Очевидно, что величина такой минимальной площади характеризует масштаб неоднородности изображения структуры, определяющей разброс пластичности и вязкости металла. В таком случае использование образцов для механических испытаний меньших габаритов по сравнению с масштабом структурной неоднородности может привести к значительным колебаниям значений статистических характеристик однородной продукции.

На изображениях структур в цифровой форме (поля яркости в 256 оттенках серого) не всегда исходное распределение яркости по плоскости равномерное, оно может быть неравномерным, например, в связи с падением освещенности к периферии поля зрения микроскопа или отсутствием горизонтальности поверхности шлифа. Они могут вносить существенный вклад в результаты измерения параметров элементов из-за потери информации при бинаризации и невозможности измерения части объектов (элементов) изображения. Неоднородность устраняли вычитанием линейного или нелинейного фона. Самым оптимальным методом является вычитание поверхности 2-й степени из 3D

распределения интенсивностей яркости изображения [6, 7]. Для изображений изломов такой необходимости не было, в силу другого принципа работы сканирующего микроскопа.

По-видимому, одним из наиболее важных факторов подготовки изображения к его обработке, является обоснование критерия перевода исходного изображения (в 256 оттенках серого) в бинарное. В работе были сопоставлены возможности существующих методов бинаризации для обработки изображения структур и изломов (таблица 2).

Таблица 2 – Изменение параметров объектов в зависимости от выбора метода бинаризации в сталях с различным типом структуры

Тип структуры	Метод измерения	Параметры объектов	Метод бинаризации			
			С-образной кривой	Оцу	Среднего	Локального среднего
Дендритная	Метод секущих	dcp дендритов, мкм	9,40 ± 1,14	6,07 ± 0,84	7,61 ± 1,02	1,47 ± 0,10
	Метод площадей	Объемная доля, %	53,34	66,59	59,58	63,90
		Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	140,36 ± 14,91	31,81 ± 6,36	30,48 ± 3,78	11,92 ± 2,08
		Количество объектов, шт	167	920	859	2355
		Анизотропия, a/b	2,15 ± 0,13	1,96 ± 0,03	1,73 ± 0,03	1,78 ± 0,02
		Средний периметр, мкм	47,93	14,27	11,69	9,65
		Ориентировка, град	10,07	3,96	6,22	7,03
		Плотность, 10 <sup>9</sup> шт./мм <sup>2</sup>	3,8	20,9	19,5	53,6
Полосчатая	Метод секущих	Толщина полос перлита, мкм	3,07 ± 0,51	3,06 ± 0,52	3,04 ± 0,49	1,15 ± 0,07
		Расстояние между полосами перлита, мкм	11,80 ± 1,57	12,26 ± 1,65	7,60 ± 0,83	1,72 ± 0,10
Неметаллические включения	Метод площадей	Объемная доля, %	2,41	1,51	57,07	44,91
		Средняя площадь, мм <sup>2</sup>	0,022 ± 0,002	0,025 ± 0,002	0,0055 ± 0,0004	0,019 ± 0,002
		Количество объектов, шт	470	260	11180	10242
		Анизотропия, a/b	1,40 ± 0,02	1,39 ± 0,02	1,77 ± 0,01	1,73 ± 0,01
		Средний периметр, мм	0,41 ± 0,02	0,48 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,65 ± 0,05
		Плотность, шт./мм <sup>2</sup>	1,1	0,6	103,1	23,6

Проведенный анализ одного и того же изображения структур показал, что различие между результатами измерения геометрии структуры при использовании различных алгоритмов бинаризации может отличаться на порядок. Программная реализация существующих методов бинаризации носит в большинстве случаев характер «черного ящика», что предполагает проведение тест-измерений для учета всех особенностей

реализации алгоритма. В этой связи в работе было предложено развить принципы бинаризации изображений структур и изломов различной морфологии на основе анализа их полей яркости.

При этом исходили из существующего разделения алгоритмов бинаризации на две группы: глобальные, производящие бинаризацию всего изображения (кадра) в целом, например, метод С-образной кривой [3] и локальные – фрагментарно [6].

В основе метода С-образной кривой – построение зависимости площади объектов  $S$  на изображении от их периметра  $P$ , полученной при последовательном варьировании порога бинаризации с определённым шагом  $k$  через весь диапазон оттенков серого. Точка перегиба на кривой соответствует оптимальному уровню бинаризации – смене «механизма» формирования изображения (рисунок 9). Для локального метода бинаризации существует радиус его эффективного действия. Его определяли, используя принцип построения С-образной кривой, отличие заключалось в том, что соотношение периметра объектов  $P$  и их площади  $S$  определялось последовательно при изменении радиуса бинаризации от 1 до 50 пкс (с шагом 1 пкс). Оптимальный радиус также соответствовал «носу» С-образной кривой.

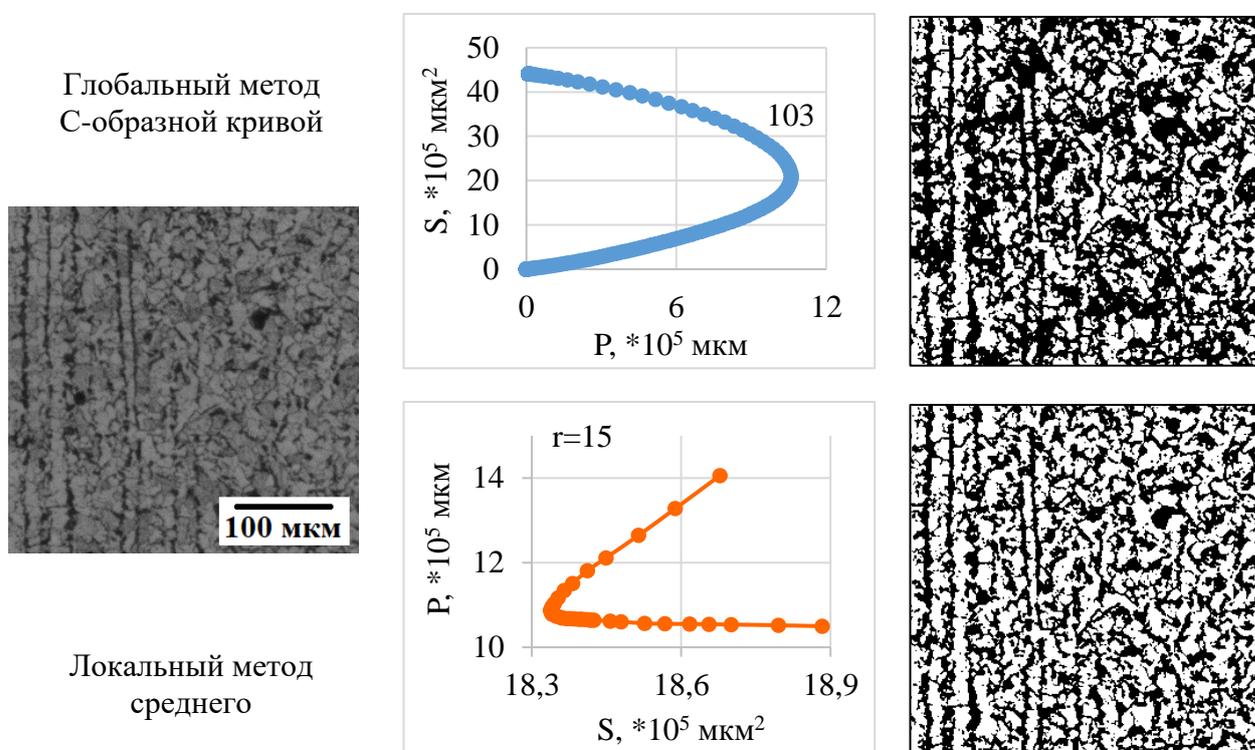
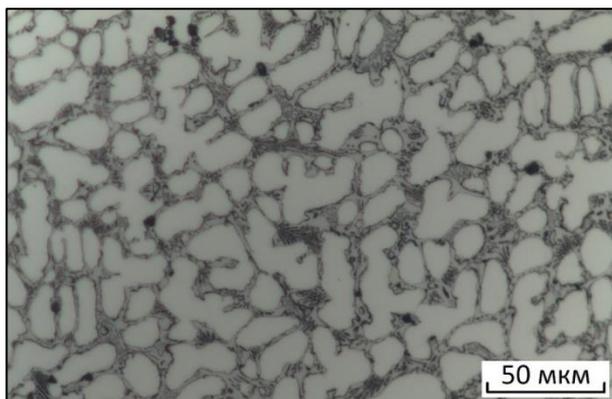
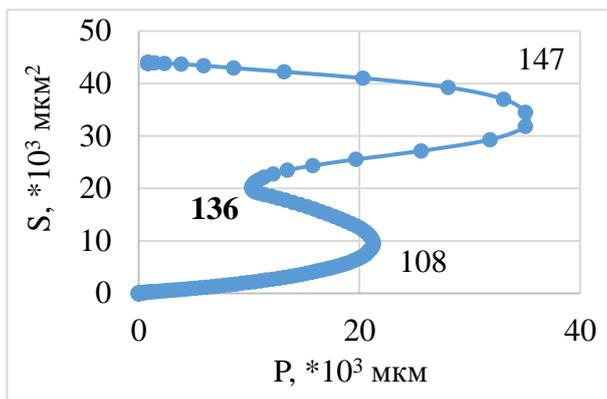


Рисунок 9 – Использование глобальных и локальных методов бинаризации для изображения полосчатой структуры листовой стали 09Г2С при увеличении  $\times 50$

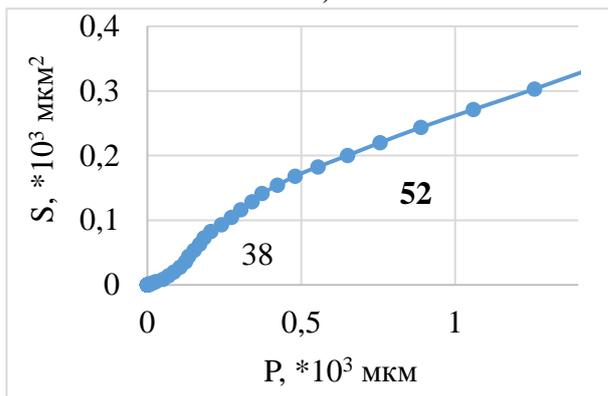
Для структур с разнотипными объектами (по их уровню интенсивности яркости) на С-образной кривой может появиться несколько перегибов, что определяет оптимальные условия контраста для каждого из видов структурных составляющих. На этой физической основе был предложен метод мультиризации (рисунок 10), применение которого, в частности, заметно упрощает процедуры дальнейшей фильтрации [3]. Были исследованы различные виды С-образных кривых, в частности, применимо к изображению микроструктуры твердого сплава 2 (рисунок 10, б, в). Показано, что перегибам на С-образной кривой соответствуют пики на гистограмме распределения интенсивности яркости изображения. Количество перегибов соответствует видам однотипных структурных составляющих, а их масштабы – их размерам.



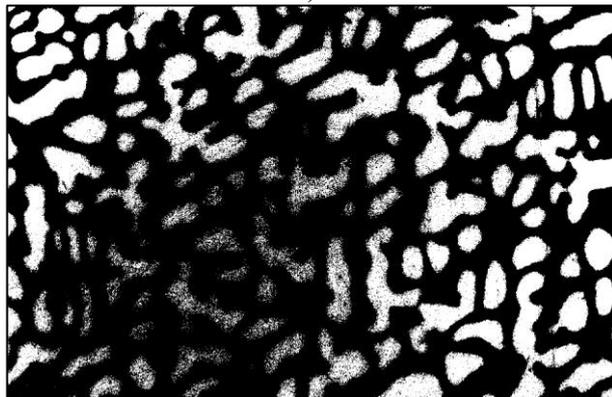
а)



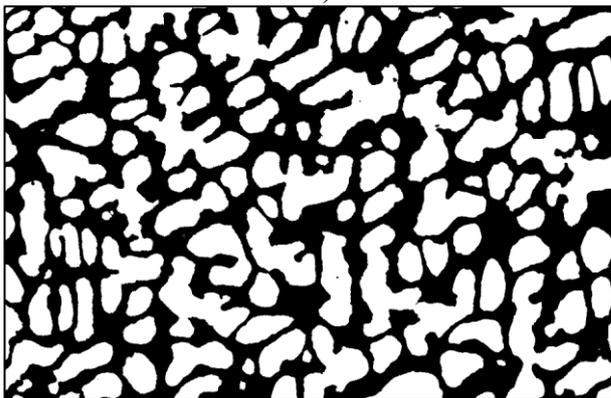
б)



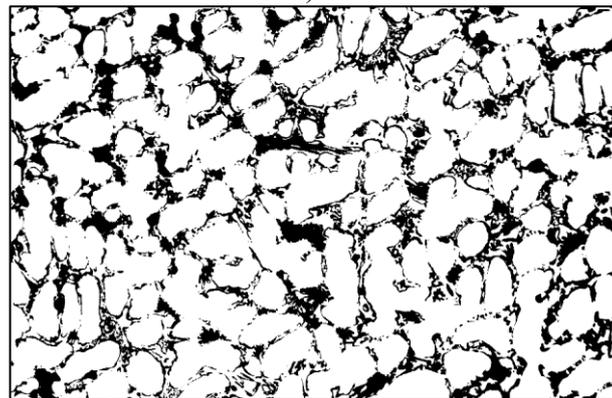
в)



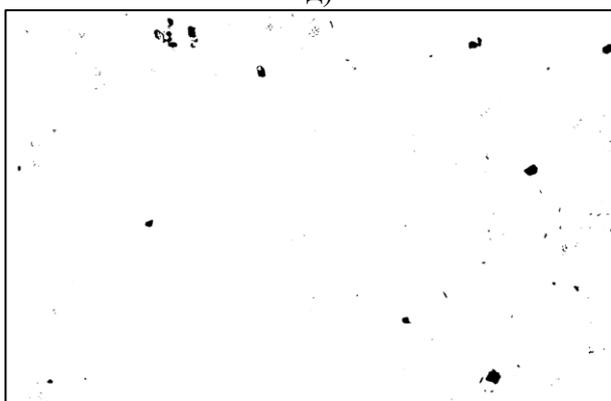
г)



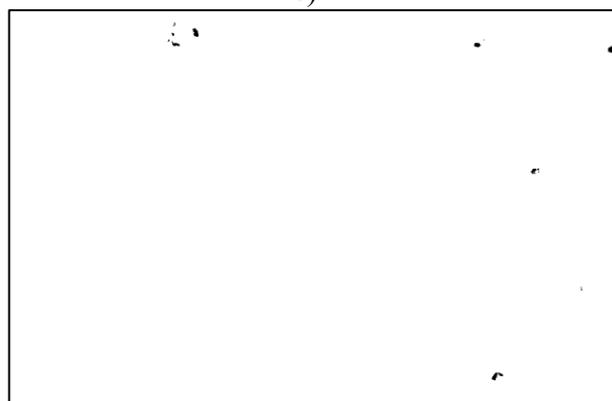
д)



е)



ж)



и)

а – исходное изображение; б – S-образная кривая; в – нижняя часть S-образной кривой;  
 г – верхний пик; д – верхняя впадина; е – средний пик; ж – нижняя впадина; и – нижний пик  
 Рисунок 10 – Алгоритм мультиризации изображения структуры твердого сплава 2

Фактически С-образные кривые с перегибами – это результат объединения нескольких С-образных кривых, отвечающих отдельным структурным составляющим. При этом может быть упрощена процедура фильтрации шумов: темных шумов на светлых объектах (дендритов), интенсивность яркости которых была выше, чем интенсивность яркости темного фона – матрицы, и наоборот. Поэтому при уровне бинаризации, равном 136, когда были удалены эти шумы, наиболее рельефно проявился скелет дендритной структуры. Это обстоятельство еще раз подтверждает важность выбора критерия бинаризации с учетом морфологии конкретного изображения структуры.

Таким образом, применение мультиризации на практике позволит эффективно разделять структурные составляющие изображения разной природы, для последующей их количественной оценки.

Предложенные в работе подходы были реализованы для измерения ряда типичных структур и изломов.

**Измерение точечных объектов.** Важной частью количественных металлографических исследований является измерение мелких точечных объектов, примерами которых являются неметаллические включения (нитриды, сульфиды и прочее), пятна серного отпечатка по Бауману (далее НВ и СО) и другие. Их роль в разрушении очевидна, что указывает на актуальность их измерения.

Показано, что разработанный алгоритм мультиризации применим для изображений мелких объектов на нетравленном шлифе, где также можно отделить фон от объектов в т.ч. при наличии существенного градиента освещенности, а также исключить риски от шлифования.

Фильтрацию для металлографических изображений НВ проводили с учетом возможности их идентификации (для конкретного увеличения и степени чистоты стали по НВ). Для серных отпечатков данная процедура не проводилась, так как нельзя было исключить того обстоятельства, что даже самые мелкие объекты (до 1 пкс включительно) были результатом соответствующих реакций при пробе по Бауману.

Если для серного отпечатка фиксируется его изображение в масштабе образца, то для металлографического анализа НВ необходима сшивка отдельных кадров в панораму. При этом остается актуальной необходимость выбора минимальной площади поля зрения, обеспечивающей воспроизводимость получаемых результатов. Так, например, при исследовании загрязненности трех крупных поковок кубической формы из улучшаемой стали 38ХНЗМФА неметаллическими включениями (при увеличении 100 крат) была оценена вариация средних значений площадей НВ, измеренных на четырех панорамах (четыре сектора шлифа диаметром 20 мм), площадью каждого, равной 80 мм<sup>2</sup> (эквивалент живого сечения ударного образца) на суммарной площади каждого шлифа ~ 320 мм<sup>2</sup> (рисунок 11).

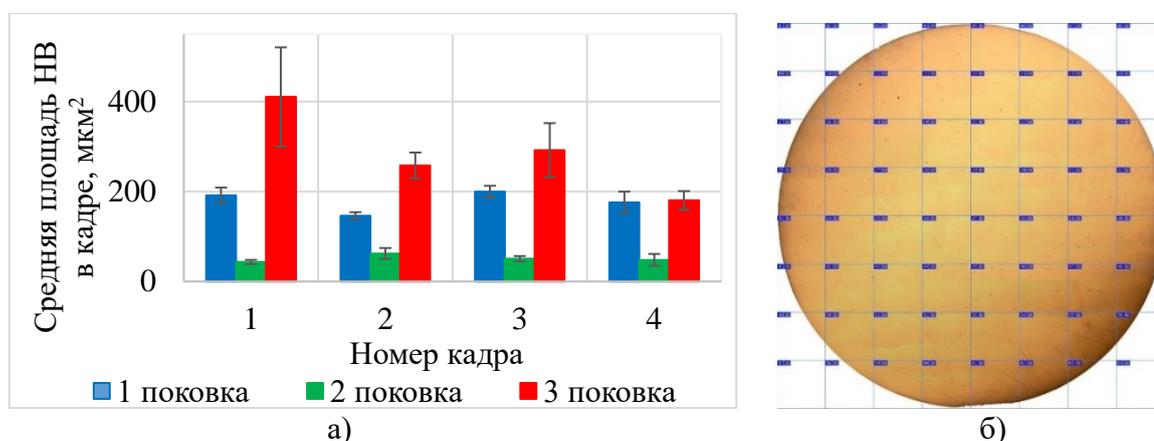


Рисунок 11 – Вариация средних значений площадей неметаллических включений (а), измеренных на панорамах (б) площадью 80 мм<sup>2</sup> (сшитых из отдельных кадров), на образцах (площадью ~320 мм<sup>2</sup> каждый), отобранных от трех крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА

Очевидно, что при таком масштабе неоднородности (сопоставимых с габаритами образца) балльные оценки должны быть дополнены массовыми прямыми измерениями геометрии строения НВ и соответствующих им изломов, выявлением их взаимосвязей.

Для оценки размещения неметаллических включений по сечению тех же образцов были построены полиэдры Вороного для четырех разных областей их сечения (рисунок 12).

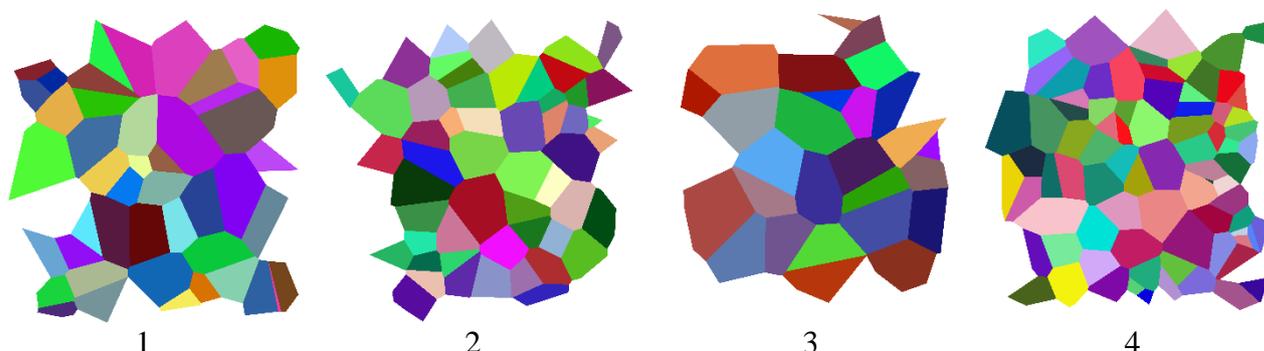


Рисунок 12 – Полиэдры Вороного объектов изображений НВ в четырех областях круглого образца, поковка №1 из улучшаемой стали 38ХНЗМФА

Статистика полиэдров Вороного выявила (таблица 3) различия между областями по средней площади, количеству полиэдров и по среднему расстоянию между их центрами.

Таблица 3 – Статистика полиэдров Вороного неметаллических включений на шлифе (четыре кадра, площадью 80 мм<sup>2</sup> каждый), поковки №1 из улучшаемой стали 38ХНЗМФА

Объекты	Номер области	1	2	3	4
Полиэдры	Количество полиэдров, шт.	46	53	27	80
	Средняя площадь полиэдров, мм <sup>2</sup>	3,61 ± 0,03	2,79 ± 0,02	5,20 ± 0,05	2,05 ± 0,01
	Коэффициент эксцесса	0,18	0,86	-0,37	0,31
	Коэффициент асимметрии	0,82	0,95	0,11	0,86
Расстояния между центрами	Количество расстояний между центрами, шт.	98	124	58	201
	Среднее расстояние между центрами, мм	0,68 ± 0,04	0,60 ± 0,03	0,80 ± 0,06	0,49 ± 0,02
	Коэффициент эксцесса	-0,09	0,32	-0,19	-0,54
	Коэффициент асимметрии	0,73	0,45	0,54	0,33

С помощью попарного сравнения значений среднего расстояния между НВ с использованием критерия Колмогорова-Смирнова показано, что большинство из них значимо отличается с риском  $\leq 0,05$ .

Такое различие в загрязненности неметаллическими включениями и их размещения в металле – одна из возможных причин вариации трещиностойкости – критического раскрытия трещины (до 30%) по сечению образца [8]. Наряду с этим возможно совместное влияние неоднородности микроструктуры, такого же результата дальних последствий ликвации в крупных поковках из стали 38ХНЗМФА. В таком случае локальное измерение трещиностойкости по уточненной методике ее определения (разработанной на кафедре МиФП) позволяет оценить ее значение с привязкой к неоднородности структуры. Отсюда очевидна необходимость количественной оценки геометрии разнородных структур в поковке, с одной стороны для прогноза уровня трещиностойкости в целом, с другой – для

выделения критических элементов структуры, определяющих разброс трещиностойкости, и выработки на этой основе объективных принципов управления качеством металла.

**Морфология структур твердых сплавов** (на основе никеля и железа, легированных вольфрамом) для изготовления наплавов рабочих органов сельскохозяйственных машин основывается, как правило, на результатах измерения твердости и испытаний на износостойкость. Однако не всегда оценивается риск преждевременного разрушения наплавов в эксплуатации и влияние неизбежной неоднородности геометрии структур на свойства твердых сплавов.

Фактически для объективной аттестации качества наплавов необходимо определение закономерностей разрушения и износостойкости твердых сплавов как среды со структурой. Однако принятые в материаловедческой практике преимущественно качественные оценки структур, основанные на их сравнении с эталонными образцами (картинками), затрудняют решение такого рода задач.

В этой связи при выработке содержательных гипотез о взаимосвязи структур и свойств исследуемых твердых сплавов, используемых в наплавках рабочих органов сельскохозяйственных машин, существенным оказалось сопоставление строения структур и изломов. Их внешнее сходство, например, для сплавов на железной основе, требовало количественного подтверждения, основанного на представительной статистике измерений. Это было необходимо с учетом неоднородности структур твердого сплава.

Для выделения дендритов, карбидов и частиц на изображениях структур твердых сплавов использовали разработанный алгоритм мультиризации. Для изломов весьма эффективным способом выделения объектов на их изображениях явился расчёт второго градиента в точке и последующее разделение изображения на группы по критическому значению, определённом из характерных участков [9]. Этот метод позволил выделить плоские участки. Бинаризация проводилась переводом точек, принадлежащих выделенным объектам, в белый цвет, а матрицы в чёрный.

Полученные результаты измерения размеров упрочняющей фазы - карбидов (по методу секущих и площадей) и соответствующих им элементов излома подтвердили, что и в разрушении данных твердых сплавов определяющую роль играет структура (рисунок 13).

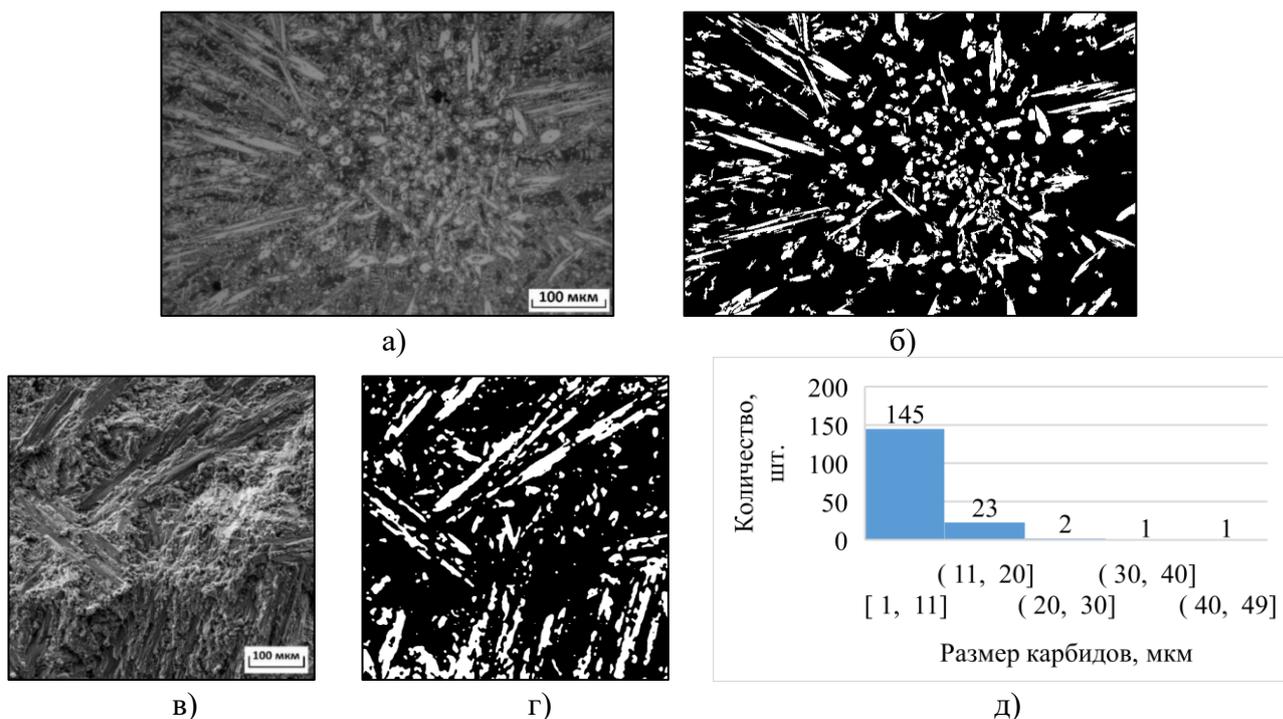


Рисунок 13 – Пример изображений структуры сплава на железной основе до (а) и после (б) бинаризации, его излома (в, г) и распределения размеров упрочняющей составляющей (д)

Отдельно следует отметить асимметричный характер распределения значений элементов. Отсюда необходимость дополнительного применения критериев непараметрической статистики для сопоставления различных выборок результатов измерений, в т.ч. при оценке неоднородности размещения частиц в изломах на основе статистики полиэдров Вороного.

Полученные в работе результаты показывают перспективность применения компьютеризированных процедур для описания закономерностей строения разнородных структур в твердых сплавах, выявления её критических элементов.

**Феррито-перлитная микроструктура с полосчатостью.** При оценке остаточного ресурса листовых сталей с феррито-перлитной структурой, в частности, представляет интерес определение критических параметров феррито-перлитной полосчатости, лимитирующей неоднородность вязкости металла.

С помощью разработанных компьютеризированных процедур обработки изображений структур были определены такие параметры её составляющих (феррит и перлит) как средняя площадь и периметр, объемная доля, плотность, степень вытянутости и направление ориентировки. Использовали метод площадей и метод секущих, там, где наблюдалось слияние большого числа объектов (перлит).

Для оценки периодичности полосчатости применили Фурье-анализ кривых распределения интенсивности яркости по секущим, расположенным поперек и вдоль (по полосе и вне её) направления прокатки листовой стали 09Г2С.

На кривых распределения яркости, расположенных вне полосы перлита, был небольшой пик на зависимости спектральной плотности от периода  $\sim 11$  мкм, на перлитной полосе этот пик вырос более, чем в 3 раза. При обработке кривой распределения интенсивности яркости, расположенной в поперечном направлении, данный пик остаётся, но при этом появляется больший пик  $\sim 19$  мкм, соответствующий периоду перлитных полос (подтверждено измерениями шага полос по методу секущих). Таким образом Фурье анализ может быть использован в качестве экспресс-метода оценки периодичности полосчатости в феррито-перлитной микроструктуре.

При измерении феррито-перлитной структуры с полосчатостью также необходимо было оценить минимальный размер изображения. Так, например, для типичных изображений структур образцов (при увеличении 200 крат), отобранных от двух партий стали 09Г2С, отличающихся масштабом полосчатости последовательно увеличивали (с шагом 30 мкм по каждой координате) размеры поля зрения первичного 2D-кадра.

Для каждого, из полученных таким образом полей зрения, по результатам измерения на них поперечника зерна феррита, шага полос перлита строили гистограммы распределения их значений и определяли соответствующие значения коэффициентов эксцесса и асимметрии, средних значений параметров. Показано, что значения коэффициентов эксцесса и асимметрии в большинстве случаев изменяются с увеличением размера кадров.

Практически для всех исследуемых изображений распределение значений параметров геометрии структуры (во всем диапазоне вариации площадей наблюдаемых полей зрения) имело асимметричный характер. Значения коэффициента асимметрии изменялись от 1,0 до 2,6, эксцесса – от 4,7 до 10,4, и стабилизировались, начиная с полей зрения стороной 0,38 – 0,45 и 0,32 – 0,43 мм соответственно. Таким образом, минимальная площадь наблюдения оказалась достаточно велика – поле зрения со стороной 0,4 мм и выше. Очевидно, что ее размеры определяются масштабом неоднородности феррито-перлитной структуры с полосчатостью, которая может изменяться как по толщине листа, так и от листа к листу, от партии к партии.

Из этого вытекает, что использование средних значений и критерия Стьюдента для сопоставления различных выборок результатов измерения геометрических параметров полосчатости также содержит в себе известные риски, связанные с отклонением вида экспериментальных распределений от нормального, и предполагает дополнительное использование критериев непараметрической статистики.

Таким образом, при определении геометрических характеристик полосчатости листовых сталей с использованием цифровых процедур существенную роль играет определение минимальной площади поля зрения, обеспечивающей воспроизводимость получаемых характеристик изображения. Для корректного сопоставления полосчатости необходимо учитывать вид распределения измеренных значений параметров геометрии изображения.

Предложенный подход, в частности, позволил описать различия в строении феррито-перлитной микроструктуры с полосчатостью для четырех партий листовой стали, отобранных поровну от двух плавов 09Г2С, отличающихся толщиной листа: 40 и 14 (1-я плавка); 30 и 20 мм (2-я плавка), 1-4 партии соответственно. Качественный анализ при увеличении 50 крат выявил различие в строении их микроструктур (рисунок 14): от слабо выраженной полосчатости в металле партии 1 до разброса полосчатости (в листе партии 2 в пределах двух баллов по ГОСТ 5640) с уменьшением толщины листа более чем в 2,5 раза. Во второй плавке толщина листов, отобранных от партий 3 и 4 отличалась менее существенно – в 1,5 раза (при большей толщине тонкого листа, по сравнению с тонким листом первой плавки). Это привело к меньшему отличию в строении их микроструктур в металле партий 3 и 4, которое, однако сложно описать в рамках качественной оценки.

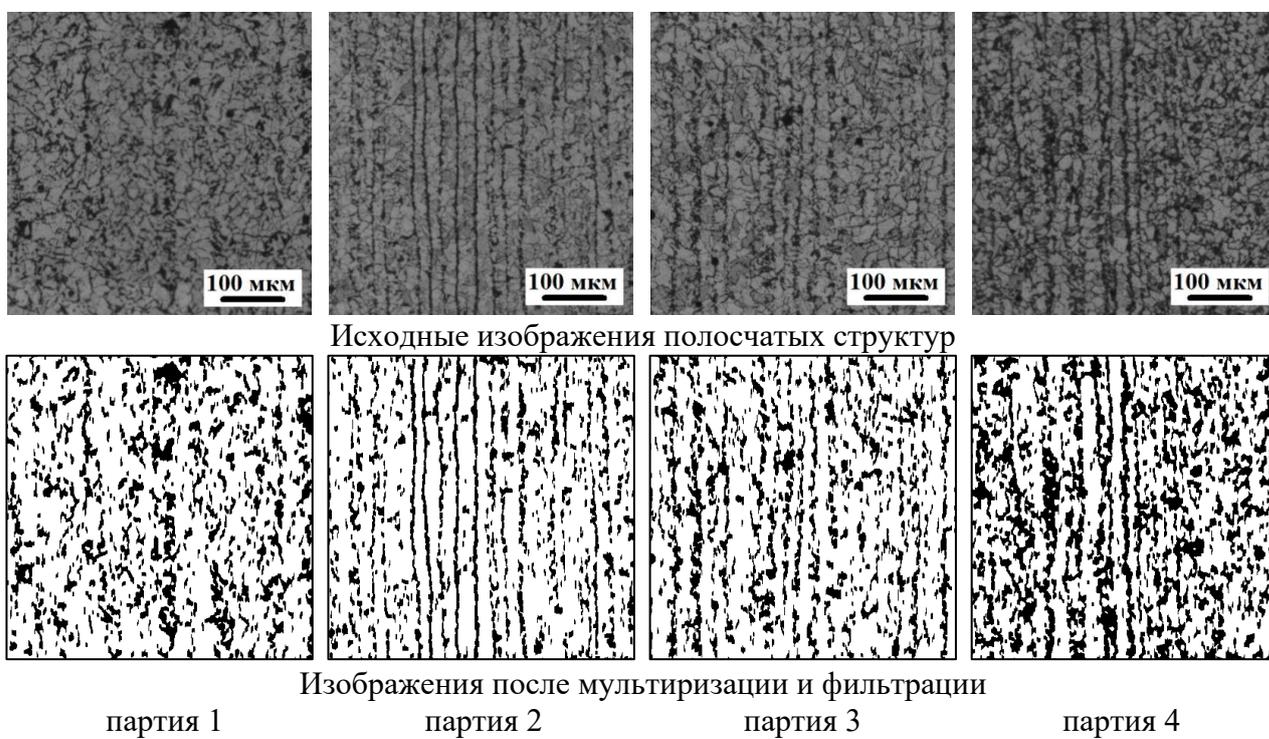


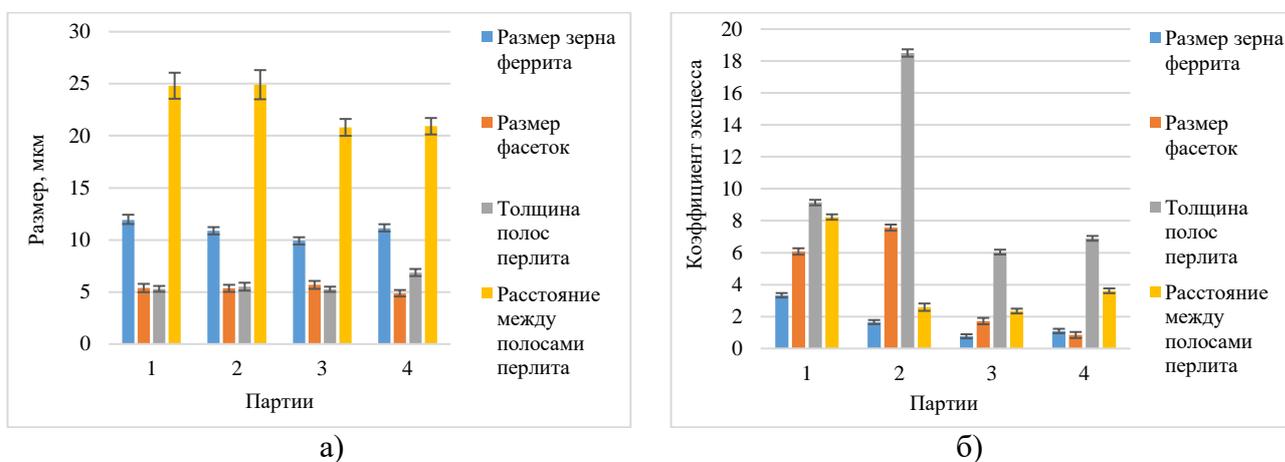
Рисунок 14 – Обработка изображений полосчатых феррито-перлитных структур четырех партий листовой стали 09Г2С

Очевидно, что такое различие в строении полосчатой микроструктуры является следствием различных сценариев протекания технологической наследственности в рамках номинально однотипной технологии. И для понимания их природы с целью выработки, при необходимости, обоснованных управленческих решений, в частности полезно количественное описание различий морфологии микроструктур.

Для определения параметров полосчатости были выбраны изображения площадью 3,24 мм<sup>2</sup> каждое (в масштабах образца), что больше минимального поля зрения, обеспечивающего воспроизводимость результатов. После применения отработанных процедур мультиризации и фильтрации (по схеме «эрозия + дилатация») по 10 секущим (поперек направления прокатки) были измерены толщина полос перлита, шаг между ними, а после локальной бинаризации и фильтрации – поперечник зерна феррита.

Для понимания механизма разрушения наблюдаемых структур были получены изображения изломов ударных образцов с U-образным надрезом (от стандартных сдаточных испытаний при температуре – 40 °С), на половинках которых и исследовали микроструктуру. После локальной бинаризации и фильтрации на бинарных изображениях изломов методом секущих измеряли поперечник фасеток транскристаллитного разрушения (на панораме площадью 0,15 мм<sup>2</sup>, в масштабе образца).

По результатам измерения были построены соответствующие гистограммы распределения значений параметров. Для них был характерен преимущественно асимметричный вид. Также были определены статистические характеристики распределений (коэффициент асимметрии и эксцесса). Показано (рисунок 15), что средние значения параметров геометрии структур и изломов не выявили различий между исследуемыми вариантами. Однако статистические характеристики распределений показали, что вторая партия существенно отличается от остальных партий металла, как для изображений микроструктур, так и изломов.



а) – средние значения параметров геометрии; б) – коэффициенты эксцесса распределений  
 Рисунок 15 – Сопоставление параметров геометрии феррито-перлитной микроструктуры с полосчатостью в четырех партиях листовой стали 09Г2С, размеров фасеток сопутствующих изломов и статистических характеристик их распределений (коэффициент эксцесса)

Таким образом, показано, что для микроструктур низколегированных сталей принципиально важны массовые измерения геометрии их строения для выявления значимых различий не только средних их значений, как это принято на практике, но и статистических характеристик с учетом разномасштабной неоднородности их морфологии. В этой связи перспективность цифровых измерений не вызывает сомнений.

## Основные выводы

1. Показано, что для изображений эталонных структур, приведенных в ГОСТ 5639, 3443, 5640, 1778, характерна различная статистическая природа их строения, что необходимо учитывать при их сопоставлении с изображениями реальных структур.

2. Оценено влияние основных этапов металлографических исследований, определяющих воспроизводимость конечного количественного результата – значений параметров геометрии элементов изображения и их конфигурации в целом.

3. Сопоставлены результаты распространенных методов бинаризации применимо к измерению изломов и структур, показано, что результаты, полученные с их использованием, могут отличаться более чем на порядок. На основе рассмотрения изображений структур и изломов, как поля яркости в 256 оттенках яркости предложена и обоснована процедура мультиризации, для выявления однотипных групп объектов на изображении.

4. Разработан единый алгоритм металлографических исследований изображений, позволяющий получать воспроизводимые характеристики составляющих структуры и исключая субъективный фактор оценки. Практически реализована идея количественного описания ряда типичных структур: дендритной, микроструктур с равноосными зёрнами, феррито-перлитной микроструктуры с полосчатостью, мелких точечных объектов типа неметаллических включений или серного отпечатка, смешанный тип. На основе накопленной представительной статистики измерений элементов геометрии структур оценен вид их распределения по размерам и показана целесообразность дополнительного использования критериев непараметрической статистики для сопоставления результатов их измерений.

5. Для листовых сталей с полосчатостью в феррито-перлитной микроструктуре показано, что статистические характеристики распределения значений параметров её геометрии могут быть эффективно использованы для выявления различий в её строении (по сравнению с их средними значениями) при сопоставлении микроструктур листов различной толщины. Эти отличия нашли свое подтверждение и в строении изломов. Также показана возможность применения Фурье анализа для экспресс-оценок периодичности строения такого рода структур.

6. Применение предложенных алгоритмов обработки изображений структур позволило оценить в пределах четырех областей (в масштабах стандартного ударного образца каждая) неоднородность загрязненности неметаллическими включениями и их размещения (исходя из статистики полиэдров Вороного) металла четырех крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА. Показано, что средние значения их площадей варьировались от образца к образцу в интервале от 25 до 50 % (в пределах поковки), а среднее расстояние между ними в пределах от  $0,49 \pm 0,02$  до 0,80 при вариации коэффициентов асимметрии и эксцесса их распределений от 0,33 до 0,73 и от -0,54 до 0,32 соответственно. Это одна из причин локальной неоднородности трещиностойкости при комнатной температуре в пределах одного образца (тип 4, толщина 10 мм, ГОСТ 25.506) от 13 до 31% – по измерениям критического раскрытия трещины  $\delta_c$ , полученным ранее (Нго Х.Н.).

## Список основных публикаций по теме диссертации

1. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Васильев С.Г. Использование компьютеризированных процедур для оценки неоднородности структур твёрдых сплавов // *Металлург*, 2016, №12, с. 77-80. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, V.Yu. Perezhugin, T.Sh. Akhmedova, and S.G. Vasil'ev Use of computerized procedures for evaluating hard alloy structure inhomogeneity // *Metallurgist*, 2017, Vol. 60, No. 12, pp. 1285-1289 (WoS, Scopus, BAK).

2. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., **Пережогин В.Ю.** Неоднородность структур и разрушение твёрдых сплавов на основе железа и их измерение // Электрометаллургия, 2017, №6, с. 32-40. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, T.Sh. Akhmedova, and **V.Yu. Perezhogin** Heterogeneous Structure and Fracture of Iron-Based Alloys and Their Measurement // Russian Metallurgy (Metally), 2017, Vol. 2017, No. 6, pp. 520-526 (WoS, Scopus, BAK).
3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., **Пережогин В.Ю.** Информативность морфологии структур твёрдых сплавов для прогноза качества наплавов // Москва: Цветные металлы, 2017, №12, с. 78-83. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, T.Sh. Akhmedova, and **V.Yu. Perezhogin** Information content of hard alloy structures morphology for the forecast of facings quality // Tsvetnye Metally, 2017, No. 12, pp. 78–83 (WoS, Scopus, BAK).
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А., **Пережогин В.Ю.**, Смагулов Д.У., Ахметова Г.Е. Измерение характеристик микроструктур с полосчатостью в листовых сталях // Metallurg, 2018, №12, с. 28-32. A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, **V.Yu. Perezhogin**, D.U. Smagulov, and G.E. Akhmetova Measurement of banded microstructure characteristics in sheet steels // Metallurgist, 2019, Vol. 62, No. 12, pp. 1225-1231 (WoS, Scopus, BAK).
5. Кудря А.В., Соколовская Э.А., **Пережогин В.Ю.**, Нго Нгок Ха Некоторые практические соображения, связанные с компьютерными процедурами обработки изображений в материаловедении // Вектор науки ТГУ, 2019, №4 (50), с. 35-44 (BAK).

#### Список основных тезисов конференций

1. Пережогин В.Ю., Новицкий Е., Чыонг Чинь Хыу, Папина К.Б., Соколовская Э.А., Кудря А.В. Цифровые технологии измерения полосчатости в микроструктуре листовых сталей и оценки ее возможных последствий в изломах // «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов»: XXIII Уральская школа металлостроителей посвященная 100-летию со дня рождения профессора А.А. Попова (Тольятти, 2-6 февраля 2016 года); «Физическое материаловедение»: VII Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 31 января – 5 февраля 2016 года): сборник материалов / отв. ред. А.А. Викарчук, Д.Л. Мерсон. – Изд-во ТГУ, 2016.–С. 233-235.
2. В.Ю. Пережогин, Е.С. Новицкий, Чинь Хыу Чыонг, А.К. Вяткина, К.Б. Папина, В.А. Траченко, Э.А. Соколовская, А.В. Кудря. Измерение морфологии структур и изломов листовых сталей // Сб. трудов VIII-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2016. 19-21 апреля 2016 года. – Москва, НИТУ «МИСиС».– С. 223.
3. В.Ю. Пережогин, Е.С. Новицкий, Ч.Х. Чинь, А.К. Вяткина, К.Б. Папина, В.А. Траченко, Э.А. Соколовская, А.В. Кудря. О механизмах разрушения листовых сталей с феррито-перлитной полосчатостью в микроструктуре // Сб. трудов VIII-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2016. 19-21 апреля 2016 года. – Москва, НИТУ «МИСиС».– С. 230.
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Васильев С.Г. Сопоставление морфологии структур твердых сплавов // Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов». Москва. 25-28 октября 2016 г. Сборник тезисов. – М: НИТУ «МИСиС», 2016.–С. 78
5. Ахмедова Т.Ш., Пережогин В.Ю., Соколовская Э.А., Кудря А.В. Неоднородные структуры в износостойких покрытиях на основе твердых сплавов и их разрушение // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч. 2 / под ред. В.В. Рубаника.– Витебск : УО "ВГТУ", 2017.–С. 63-65.
6. Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Нго Нгок Ха, Соколовская Э.А., Кудря А.В. Об учете природы объекта при выборе алгоритмов обработки изображений в

материаловедении // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч. 2 / под ред. В.В. Рубаника.– Витебск : УО "ВГТУ", 2017.–С. 84-86.

7. Пережогин В.Ю., Кудря А.В. Использование цифровых технологий обработки изображений в материаловедении // Физическое материаловедение : VIII Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 3-12 сентября 2017 года); «Актуальные проблемы прочности» : LIX Международная конференция (Тольятти, 5-8 сентября 2017 года) : сборник материалов и конкурсных докладов / отв. ред. А.Ю. Виноградов, Д.Л. Мерсон. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017.–С. 270-274.

8. В.Ю. Пережогин, Т.Ш. Ахмедова, Э.А. Соколовская, А.В. Кудря. Физические основы компьютеризированных процедур обработки изображений в материаловедении // Сб. трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2018. 24-26 апреля 2018 года, г. Москва, НИТУ "МИСиС". – М.: ООО «Студио-Принт», 2018.–С. 145.

9. В.Ю. Пережогин, Т.Ш. Ахмедова, Э.А. Соколовская, А.В. Кудря. Алгоритм мультиризации изображений в материаловедении // Сб. трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2018. 24-26 апреля 2018 года, г. Москва, НИТУ "МИСиС". – М.: ООО «Студио-Принт», 2018.–С. 150.

10. Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Кудря А.В., Соколовская Э.А. Воспроизводимость результатов при компьютеризированных измерениях структур разнородных материалов // 60 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», 14–18 мая 2018 года, Витебск, Беларусь: материалы конференции / Витебск: УО «ВГТУ», 2018.–С. 417-420.

#### Список цитируемых источников

1. С.А. Салтыков. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
2. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов/В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
3. Соколовская Э.А. // Вопросы материаловедения. – 2013, № 4. – с. 143-153.
4. Ping-Sung Liao and Tse-Sheng Chen and Pau-Choo Chung A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding – 2001, J. Inf. Sci. Eng., №17 – pp. 713-727.
5. Казаков А.А., Киселев Д.В., Андреева С.В, Чигинцев Л.С., Головин С.В., Егоров В.А., Марков С.И. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений // Черные металлы. Июль-август 2007. С. 31-37.
6. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.
7. Цифровая обработка изображений Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. Нго Нгок Ха Оценка неоднородности разномасштабных структур в крупных поковках из улучшаемой стали 38ХНЗМФА и её влияния на разрушение: диссертация канд. техн. наук: 05.16.01/ НИТУ «МИСиС». – Москва, 2019. – 129 с.
9. А.С. Мельниченко. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. Учебник. – М.: Издательский дом МИСиС, 2009. – 268 с.