

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСиС»

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Москва – 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Аналитический обзор литературы .....	9
1.1 Влияние строения структур на свойства сталей и сплавов .....	9
1.1.1 Определение связи химический состав – технология – структура – свойства .....	9
1.1.2 Влияние морфологии перлита на разрушение листовых сталей .....	14
1.1.3 Особенности строения структур твердых сплавов .....	18
1.2 Зачем нужны количественные методы металлографии? .....	19
1.2.1 Сложности развития металлографии .....	19
1.2.2 Методы количественной оценки параметров объектов .....	23
1.2.3 Использование компьютерных методов металлографии .....	30
1.3 Теоретические основы обработки изображений .....	36
1.3.1 Бинаризация изображений .....	38
1.3.2 Морфологическая обработка бинарных изображений .....	49
1.3.3 Измерение параметров объектов изображения .....	57
1.3.4 Диаграмма Вороного .....	62
1.3.5 Фурье-анализ .....	64
1.4 Применение методов в других областях .....	70
1.5 Новый подход в сравнении изображений .....	77
2 Материалы и методика исследования .....	80
2.1 Материалы исследования .....	80
2.2 Методика исследования .....	82
2.2.1 Шлифование и полировка образцов .....	82
2.2.2 Травление образцов .....	83
2.2.3 Световая микроскопия .....	84
3 Результаты исследования .....	86
3.1 Об учете статистической природы объектов при анализе структур в металловедении ..	86
3.2 Анализ полей яркости исследуемых структур .....	99
3.2.1 Факторы воспроизводимости результатов измерения геометрии элементов .....	99
3.2.2 Определение необходимого времени травления образцов .....	102
3.2.3 Оценка влияния увеличения на геометрию элементов структуры .....	112
3.2.4 Влияние формата изображения на величину параметров структуры .....	120
3.2.5 Поле зрения .....	121
3.2.6 Выравнивание изображений .....	126

3.2.7 Бинаризация изображений .....	128
3.2.8 Фильтрация шумов.....	150
3.2.9 Измерение объектов бинарных изображений .....	156
3.2.10 Влияние химического состава образцов на размер структурных элементов.....	157
3.2.11 Влияние исследователя на результат ручного измерения.....	160
3.2.12 Необходимые определения для изображений структур.....	163
3.3 Метрологическое обеспечение измерений неметаллических включений и серного отпечатка.....	165
3.4 Измерение структур и изломов твердых сплавов.....	174
3.5 Цифровые процедуры измерения полосчатости в микроструктуре листовых сталей и оценки её возможных последствий в изломах.....	184
Список использованной литературы .....	225

## **Введение**

Металлографические исследования очень часто бывают весьма трудоёмкими, особенно для неоднородных структур [1], и при этом неточными, так как выполняются вручную конкретным человеком. Ошибка ручных методов может составлять до 30% в зависимости от испытателя, его зрения и уровня понимания строения изображения. Такие методы занимают много времени, которое можно использовать более эффективно, и являются устаревшими, хотя до сих пор используются во многих российских работах. В настоящее время задачи металлографии требуют более точных, а в масштабах производства и более быстрых, подходов к обработке с использованием нынешних возможностей информационных технологий.

Несмотря на очевидную необходимость обновления и последующей оптимизации методов классической металлографии, многие исследователи до сих пор используют традиционные методы. Это может приводить к ошибкам, незаметным на первый взгляд. В методе секущих, например, направление, количество и расположение секущих может повлиять на результаты расчёта (часто одинаковая методика используется для массива изображений, несмотря на разницу в их строении) и их воспроизводимость результатов измерения и анализа. Этот пример показывает необходимость создания однообразной схемы измерения методом секущих. В работах, связанных с построением зависимостей свойств материала от размеров элементов (зёрен, частиц или других объектов изображений) или, наоборот, зависимостей этих размеров от параметров обработки (температуры, концентрации и др.), такие ошибки могут быть фатальными. Стандартные методы бинаризации не позволяют получать истинную (которую мы видим глазом) картину изображения, и поэтому не дают измерить необходимые параметры. При наличии на изображении более двух классов объектов померить только один из классов такими методами не представляется возможным. Для решения таких задач необходимо создание или привлечение новых методов бинаризации или разделения объектов по признаку их строения (форме, цвету, плоскостности, вытянутости, расположению). Различные методы сегментации и фильтрации могут существенно изменить и больше приблизить к истине результаты измерения. Для некоторых изображений, например, сфероидизированные частицы цементита на белом фоне, возможно применение стандартного метода по площадям, измерение всевозможных геометрических параметров объектов и определение их конфигурации. В большинстве же случаев объекты очень сложно отделить



друг от друга, например, два слившихся круглых объекта похожи на дендрит, что создаёт затруднение в классификации объектов. Фасеточное строение изломов и вовсе невозможно разделить, так как их границы могут быть не замкнуты по определению. Поэтому чаще всего правомерно использование именно метода секущих. Малое количество методов измерения параметров создаёт определённые трудности для задач металлографии.

Важным является точное математическое определение параметров всех этапов обработки изображений, их обоснованность и воспроизводимость, что необходимо для автоматизации алгоритма. Универсализм измерений параметров структуры может привести к отсутствию субъективности измерений разных исследователей. Так во многих работах не указываются входные данные и методики получения результатов, что вызывает вопросы к достоверности этих результатов.

Для большинства задач недостаточно методов классической статистики, т.е. определения корреляции или построения модели регрессии, хотя в ряде работ зависимости определяются по весьма малому количеству точек. Поэтому необходимо описать и объяснить значимость методов непараметрической статистики для широких масс.

**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 «суммарная 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 поволоков 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 металлостроителей-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.

## **1 Аналитический обзор литературы**

### **1.1 Влияние строения структур на свойства сталей и сплавов**

#### **1.1.1 Определение связи химический состав – технология – структура – свойства**

Для повышения конкурентоспособности металлургических и металлообрабатывающих предприятий необходимо обеспечить однородность уровня свойств и, как следствие, качества продукции. Однако во многих работах, например [2] показано, что в разных плавках и партиях одного и того же материала структура и механические свойства могут существенно различаться.

Для решения данной проблемы необходимо определить четкую количественную зависимость химический состав – технология – структура – свойства. Это может позволить в достаточной степени определенности прогнозировать свойства металлопродукции [3]. При этом необходимо учитывать предысторию формирования структуры: поведение легирующих элементов в расплаве и при кристаллизации; размер зерна, склонность к росту зерна при нагреве; устойчивость при охлаждении; дисперсность вторичной структуры; формирование, размер и стабильность частиц. Принимая во внимание вышесказанное, можно близко подойти к решению одной из задач металловедения – установлению количественной связи между структурой и свойствами.

На разрушение, в том числе листовых сталей, может влиять множество факторов: температура и степень деформации, исходная структура, размер структурных элементов, наличие включений, их форма, химический состав материала. И наоборот, по этим факторам можно предсказать механизм и параметры разрушения. Так для различных материалов используются разные параметры деформации, что говорит об определяющем влиянии химического состава материала на разрушение. Отсюда и подбираются соответствующие температура и степень деформации. Аналогичным образом по структуре материала можно предсказать механизмы разрушения и механические свойства.

Так, например, в работе [4] показано, что для возникновения расщеплений необходимо, чтобы в структуре существовала фаза, хрупко разрушающаяся путем скола: зернистый или игольчатый феррит, бейнит или мартенсит. Это происходит, когда структура состоит из продуктов распада наклепанного мелкозернистого аустенита, а зерна имеют удлиненную форму. Это говорит о том, что определение параметров структурных элементов, в том числе включений, может помочь в предсказании механизмов разрушения материалов.

Так определяющим свойства материалов, например, листовых сталей [5] является размер структурных элементов: чем меньше зерно, тем выше свойства материала. В этой связи большую популярность приобрели методы интенсивной пластической деформации (ИПД), обеспечивающие размер зерна от субмикроструктурного до наноразмера. Поэтому встает вопрос определения размера мелкого зерна после методов ИПД, например, равноканального углового прессования или радиально-сдвиговой прокатки [6]. При исследовании данных схем деформации очень важно точное определение размера зерна и последующее построение зависимости Холла-Петча для выявления механизма упрочнения материала. Однако очень трудоемкие ручные методы обработки не могут позволить безошибочно и системно получать такие данные. Для этой задачи могут быть применимы автоматизированные методы измерения, у которых в свою очередь тоже имеются границы применимости для оптических изображений.

В работе [7] говорится, что повышенный комплекс свойств можно достичь только измельчением зерна. Особенно сильно размер зерна влияет на напряжение хрупкого разрушения (в 4 раза сильнее, чем на предел текучести). Так как хрупкое разрушение не может быть реализовано для мелкозернистой стали, механизм разрушения стали вязкий при повышенной прочности.

Размер зерна и его неоднородность также влияют на температуру верхнего порога хладноломкости стали. Крупные зерна хрупко разрушаются при более высокой температуре, чем мелкие. Поэтому неоднородность или бимодальность распределения размера зерна может объяснять повышенную склонность стали к хладноломкости. Определение неоднородности возможно только при измерении всех зерен в структуре и невозможно при балльной оценке.

Однако автоматизированные методы могут быть применимы не только для мелкозернистых структур. На формирование структуры также может влиять выбор вида термической или термомеханической [8] обработки материала. Так, например, нормализация с ускоренным охлаждением может приводить к измельчению феррито-перлитного зерна и уменьшению полосчатости структуры [9], что позволяет получить повышенные показатели прочности, пластичности и хладостойкости.

Процессы рекристаллизации и роста аустенитного зерна анализируются многими исследователями. Морфология зерна аустенита в различных температурных состояниях, а также упрочняющих частиц (например, карбонитридных), определяют свойства исследуемых сталей. Определение критических температур для различных сталей является основной целью многих исследований. Данные исследования состоят в основном из термической обработки при изменяющейся температуре и последующего измерения параметров структур стали. Например, определение температуры огрубления IF-стали может помочь разработке

оптимального температурного цикла нагрева стали, позволяющего избежать огрубления и дефектов структуры [10]. Важно отметить, что ошибка в металлографии прямо определяет ошибку определяемой температуры.

Очевидно, что повышение степени деформации приводит к уменьшению размера структурных элементов независимо от метода деформации. При чем при равномерной деформации заготовки (например, РКУП) происходит измельчение всей структуры, а при деформации от очага у поверхности заготовки листа или прутка происходит измельчение от поверхности. В последнем случае более равномерную структуры по сечению заготовки возможно получить при повышении степени деформации [11].

При пластической деформации близость структуры к очагу деформации уменьшает размер структурных элементов в данной области. Это, например, объясняет неоднородность структуры по сечению листа. Так в работе [12] при удалении от кромки в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, микроструктура образцов заметно меняется.

В подповерхностной области образцов фиксируются сравнительно равноосные рекристаллизованные зерна, размеры которых увеличиваются по мере продвижения в глубь (по ширине) горячекатаной полосы. Также расширяется область, в которой фиксируются рекристаллизованные кристаллиты. Очевидно, что появление и расширение рекристаллизованной области соответствует изменению температуры по ширине полосы стали при горячей прокатке. Скорость охлаждения кромок полосы существенно отличается от скорости охлаждения середины, что практически исключает протекание рекристаллизационных процессов и, соответственно, сохраняет вытянутую деформированную (полигонизованную) зёрненную структуру.

Данные примеры говорят о необходимости и важности оценки неоднородности строения структуры, в частности после механической обработки, оказывающей большее влияние на структуру у поверхности листа, прутка и прочее, то есть у очага деформации, чем в центре.

Такие ситуации делают необходимой возможность панорамных исследований в масштабе образца и сопутствующих измерений структурных элементов. Такую задачу непросто решить ручными методами измерения. Как раз здесь могут помочь автоматизированные процедуры измерения параметров структур.

Существует целый ряд трудоемких экспериментов для определения связи параметров структуры и технологических параметров термической и механической обработки: температуры, степени, дробности и скорости деформации, температуры и времени изотермической выдержки [13], скорости охлаждения, температуры отпуска, времени старения и многое другое.

Аналогичный эксперимент возможен и при выявлении закономерности между конечной толщиной листа, т.е. степенью деформации, и конечной структурой [14]. С ростом степени деформации и одновременным уменьшением толщины проката площадь зерна феррита уменьшается по всему сечению листа. Одновременно уменьшается разница в площади зерен по сечению листа, полностью исчезающая в листах толщиной 10 мм, а случае стали СтЗкп – уже при толщине 40 мм. Исследование структуры перлита показали, что у сталей СтЗкп и СтЗсп при уменьшении толщины листа монотонно уменьшается межпластинчатое расстояние (от 1,0 – 0,7 мкм для листов толщиной 100 мм до 0,4 – 0,3 мкм для 10-мм листов). При уменьшении толщины листа также происходит существенное сокращение толщины перлитных полос.

Химический состав также может влиять на размер зерна. Например, выделение частиц нитридов и карбонитридов ванадия во время превращения служат центрами зарождения новых ферритных зерен, что повышает скорость зарождения зерен по сравнению со скоростью их роста [15]. Также считается, что определяющее влияние на размер аустенитного зерна в температурном интервале черновой стадии прокатки оказывают величина относительного обжатия за проход, температура деформации и химический состав стали, от которого зависит величина энергии активации рекристаллизации [16, 17]. Это говорит о необходимости проведения экспериментов для определения оптимального химического состава стали, например, с карбонитридным упрочнением (14Г2АФ, 16Г2АФ и 18Г2АФ) [18].

Данные эксперименты возможно ускорить с использованием методов автоматизированной обработки изображений. Такой подход применим не только к листовым сталям, но и к другим видам сталей и сплавов.

Связь технология – структура – свойства подчеркивается во многих работах. Так в работе [19] подчеркивается существенное влияние анизотропии размера ферритного зерна на величину ударной вязкости. Температуре конца прокатки  $t = 750 - 730$  °С, при которой достигнут максимальный уровень ударной вязкости на поперечных образцах, соответствует минимальный средний диаметр зерна в продольном направлении. Понижение температуры конца прокатки приводит к резкому увеличению вытянутости зерен и падению уровня ударной вязкости.

Дисперсные частицы также могут вносить существенный вклад в упрочнение низколегированных сталей, что описывается механизмом Орована. Согласно этой модели, дислокации при движении будут удерживаться на частицах до тех пор, пока прикладываемое напряжение не будет достаточным для того, чтобы линия дислокаций изогнулась и прошла между частицами, оставив около них дислокационную петлю [20].



На образование зерен аустенита зародышевое влияние могут оказывать карбонитридные фазы, которые тормозят рост зерен аустенита при дальнейшем нагреве. Эти же фазы, а также выделившиеся из аустенита перед началом  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, являются зародышевыми центрами образования новых зерен феррита. Такие механизмы приводят к заметному измельчению зерна феррита, следовательно, дисперсионное упрочнение косвенно обуславливает дополнительное зернограничное упрочнение.

В работе [21] показано, что дисперсионное упрочнение наряду с зернограничным являются основными факторами упрочнения низколегированной листовой стали. Как известно, упрочнение за счёт дисперсионных частиц зависит от расстояния между ними  $\lambda$ . Очевидно, что определение данного параметра очень трудоемко. Поэтому необходимо создание методики его автоматизированного измерения (полиэдры Вороного) и использования при расчетах упрочнения низколегированных сталей.

Также известно, что форма включений определяет механизмы разрушения сталей. Так, форма сульфидных включений в значительной степени определяет анизотропию ударной вязкости сталей [22]. Изменение формы сульфидных включений с вытянутой на глобулярную повышает пластичность стали и увеличивает работу зарождения и роста трещины. Это можно подтвердить качественным сопоставлением поверхности изломов сталей с и без вытянутых сульфидных включений: с повышением числа вытянутых сульфидов уменьшается количество равноосных ямок и растёт число плоскодонных ямок вязкого разрушения.

Для оценки склонности углеродистой стали к образованию кристаллизационных трещин принято [23] определять наличие между дендритами сульфидных включений. Чем выше температура выделения сульфидов, тем ближе к осям дендритов они расположены. Поэтому расположение сульфидных включений в межосном пространстве может служить критерием склонности стали к образованию кристаллизационных трещин.

Для получения количественной характеристики возможности образования горячих трещин необходимо точное определение доли сульфидов, попадающих в междендритное пространство. В действительности данные объекты легко отличить по размеру и параметру формы от дендритов, а сульфиды, попадающие на границу дендритов или касающиеся ее, не будут создавать дополнительных объектов. Это даёт возможность исключить субъективный фактор оценки и получить точное необходимое значение.

Часть включений может существенно отличаться по цвету от матрицы либо других структурных составляющих. Так, например, нитриды титана на шлифах имеют вид золотисторозовых кристаллов октаэдрической формы [24], обладают металлическим блеском и при деформации не меняют своей формы. Такие частицы создают вокруг себя области с

повышенной плотностью дефектов, что ведет к образованию при фазовой перекристаллизации в этих областях более мелкого зерна и формированию разнотерности в структуре.

Данное обстоятельство показывает, что выделение данных частиц, их измерение, а также определение их морфологии является актуальной задачей. Так как данные частицы влияют на процесс разрушения, то их контроль несомненно важен.

### **1.1.2 Влияние морфологии перлита на разрушение листовых сталей**

Важным вопросом остается влияние степени полосчатости на свойства листовых сталей и механизмы их разрушения. Для этого в первую очередь необходимо выявить причины ее появления и создать возможность ее количественного определения.

В реальных условиях металлургического производства в стальном слитке всегда в большей или меньшей степени имеется дендритная ликвация легирующих элементов и примесей, которая может наследоваться готовыми изделиями и оказывать негативное влияние на технологические и эксплуатационные свойства стали [25].

При горячей деформации слитка и последующей термической обработке дендритное строение стали изменяется. Оси дендритов располагаются вдоль направления деформации и по мере увеличения степени обжатия, температуры и длительности нагрева уменьшается различие химического состава осей и межосных участков. В результате горячей деформации стали дендритная неоднородность преобразуется в волокнистую, полосчатую неоднородность. При такой обработке узор дендритного строения существенно нарушается, и тем больше, чем больше деформация. Таким образом, волокнистая структура прокатанной стали формируется в результате ориентации вдоль направления прокатки первичных осей дендритов исходного слитка. Почти параллельная ориентация волокон достигается при 11 – 12-кратном обжатии, и эта ориентированность по сечению проката неоднородна: более строго ориентированное волокно раньше формируется в осевой зоне и позднее – в периферийных слоях.

Для качества металлоизделий важен не размер дендритов, а связанная с ним степень дендритной ликвации, хотя чем мельче дендриты, тем короче пути диффузионного перераспределения примеси, и тем меньше неоднородность состава.

Ликвация компонентов четвертичных включений (Mn, S, Al, Ti, Nb, V) создаёт полосы с разной скоростью их выделения и роста. Это полосы разнотерности (аустенита и феррита). Неоднородное размещение четвертичных включений в масштабах ячейки дендрита создает пятна разнотерности [26].

Углерод – элемент легкоподвижный, но диффузия выравнивает его термодинамическую активность (а не концентрации). Поэтому в равновесии углерод уходит из зоны избытка ферритообразователя (Si, Al) в объемы с избытком карбидообразователей (W, Mo, Cr, Mn). Чтобы устранить структурную полосчатость, надо выровнять распределение легирующих элементов.

Для феррито-перлитных структур листовых сталей весьма интересным является определение связи между параметрами структуры и механизмами ее разрушения. В частности, актуальным является вопрос о связи параметров полосчатости и соответствующего хрупкого излома стали.

Так, в работе [27] в недеформированных образцах размер колоний после завершения превращения был равен  $110 \pm 30$  мкм, а в деформированных  $30 \pm 10$  мкм. Размеры фасеток квазискола у недеформированных образцов оказались равными  $220 \pm 35$  мкм, у деформированных  $82 \pm 20$  мкм.

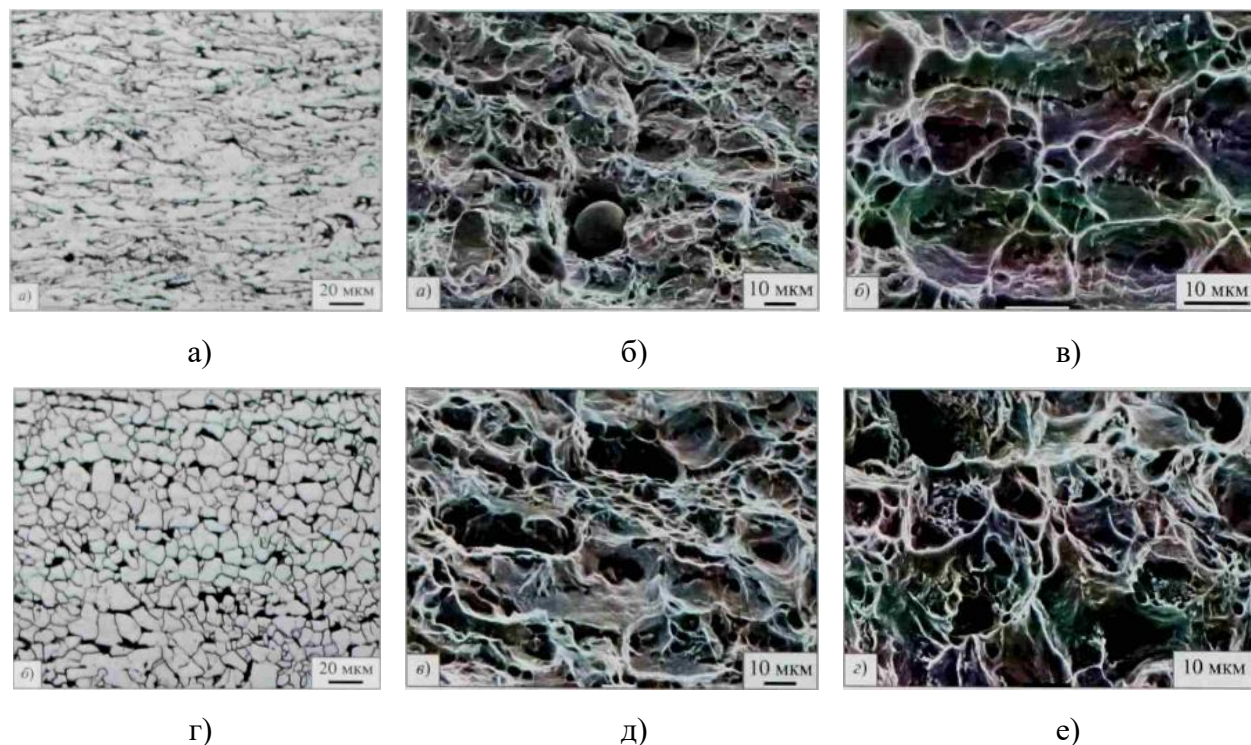
Таким образом, кинетика образования перлита из горячедеформированного аустенита отражается на характеристиках его структуры: происходит заметное уменьшение размеров колоний перлита. Это приводит к общему улучшению комплекса механических свойств стали и усложнению траектории движения трещины разрушения.

В полосчатых структурах количественная металлография представляет значительный интерес при оценке качества материала по наличию включений и измерению параметров полосчатых структур. При этом большой интерес могут представлять объемная доля перлита (П), размер зерна феррита, морфология сульфидных включений и количество вытянутых сульфидов [22].

С повышением доли перлита, зависящей от количества углерода, возрастают механические свойства стали. С уменьшением размера зерна феррита повышается сопротивление стали хрупкому разрушению, т.е. снижается критическая температура хрупкости. Все это говорит о важности прецизионного определения параметров структур сталей для оценки их влияния на механические свойства и построения разного рода зависимостей:

- влияние температуры конца деформации и степени деформации на размер зерна;
- влияние состава на размер структурных элементов;
- связь морфологии перлитной составляющей с механическими свойствами;
- влияние протяженности сульфидных включений на анизотропию ударной вязкости;
- связь размеров и формы сульфидных включений с размерами ямок на изломах и др.

Взаимосвязь структуры и механизма разрушения показана также в работе [28]. На исходном изображении (рисунок 1, а) в продольном сечении видны вытянутые вдоль направления прокатки зерна феррита с наличием перлитных колоний между ними. В поперечном сечении видны (рисунок 1, г) равноосные зерна полигонального феррита и вытянутые колонии перлита.



а, б, в – структура и излом вдоль направления прокатки;

г, д, е – структура и излом поперек направления прокатки

Рисунок 1 – Структура (а, г) и излом (б, в, д, е) вдоль и поперек направления прокатки

На рисунке 1 также показаны изображения изломов после испытаний на растяжение образцов. Морфология феррита напрямую влияет на особенности разрушения образцов стали. В продольном направлении наблюдается квазивязкое разрушение с включением внутри ямки (рисунок 1, б). При большем увеличении можно увидеть, что трещина развивается вдоль удлиненного зерна феррита (рисунок 1, в). Напротив, в поперечном образце излом типично вязкий (рисунок 1, д), а трещина распространяется вдоль полигонального феррита (рисунок 1, е). При этом морфология феррита в продольном направлении приводит к небольшому росту прочностных характеристик.

Помимо размера структурных элементов вклад в упрочнение может создавать перлитная фаза. Упрочнение за счёт перлита определяется содержанием перлитной составляющей в структуре стали и ее дисперсностью, т.е. зависит от состава стали (в основном

содержания углерода), устойчивости переохлажденного аустенита и скорости охлаждения из аустенитного состояния. Вклад перлитной составляющей в предел текучести стали с ферритной основой учитывают путем умножения эмпирических коэффициентов на процент перлита [20].

Как отмечается в работе [29] в перлитных сталях наиболее сильное охрупчивание достигается при максимальной доле перлита, что не приводит в свою очередь к значительному увеличению прочности. Этому способствует увеличение содержания карбидов в стали.

Во многих работах отмечается важность определения параметров феррито-перлитных структур, влияющих на механизмы разрушения сталей. Следует выделить следующие параметры:

- доли перлитной и ферритной составляющих;
- расстояние между полосами перлита или размер ферритных колоний;
- толщина полос перлита;
- межпластинчатое расстояние или эффективная длина линии скольжения в феррите.

В этой связи очень важным становится возможность измерения и построения распределений размера структурных элементов (феррита и перлита) для листовых сталей, особенно для панорамных исследований.

В другой работе [30] говорится, что с ростом степени структурной полосчатости хрупкая прочность стали 45ХН2МФАШ падает. Была выявлена зависимость между степенью структурной полосчатости (по разности микротвердости полос) и работой разрушения.

В работе по изучению влияния полосчатой структуры стали на характеристики прочности и сопротивления усталости [31] показано, что полосчатая структура способствует анизотропии сопротивления стали хрупкому разрушению, так как стадия роста трещины может составлять существенную долю усталостной долговечности. В работе [32] показано, что скорость роста трещины в направлении Z минимум в 5 раз больше, чем в других направлениях.

Показано, что ориентация полос феррита относительно фронта трещины в листах стали оказывает влияние на критическую температуру хрупкости. Феррито-перлитная полосчатость вызывает анизотропию сопротивления хрупкому разрушению, особенно при низких температурах эксплуатации стали. Поэтому для сталей, предназначенных для работы при таких температурах, целесообразно проводить систематическую оценку свойств во всех направлениях. Степень такой анизотропии тесно связана с количеством и расположением феррита, поэтому определение параметров феррито-перлитной полосчатости в этой ситуации актуально.

### 1.1.3 Особенности строения структур твердых сплавов

Качество наплавленного металла твердых сплавов определяется не только его составом и кристаллическим строением, но и в значительной степени зависит также от степени однородности структуры, морфологии и количества карбидов в наплавленном металле.

Обычно увеличение в твердых сплавах количества карбидной фазы связывают с их износостойкостью. Однако это обстоятельство не всегда оправданно. Чрезмерное количество карбидов меняет механизм изнашивания материала, так как в определенных случаях карбиды начинают выкрашиваться, а не истираться. В результате износостойкость понижается.

Вследствие особенностей кристаллизации наплавленного металла (высокая температура нагрева, неравномерное охлаждение слоя металла и т. д.) первичные и вторичные карбиды могут неравномерно располагаться в структуре и иметь различные размеры и форму.

Если наплавленный металл кристаллизуется с образованием заэвтектоидной структуры, то карбиды часто образуют сетку по границе зерен. По износостойкости эта структура выше структуры с карбидной эвтектикой по границам дендритообразных зерен твердого раствора, но ниже, чем при отдельных избыточных карбидах.

Самую высокую износостойкость имеют сплавы, в которых присутствуют карбиды типа  $M_6C + M_{23}C_6$ . Процентное соотношение карбидов в процентах к объему металла 10,8 – 13,5. Также немаловажную роль играет отношение количества карбидообразующего элемента к углероду. Например, для W это отношение 1,15 – 1,2% ат. Немаловажным фактором, влияющим на износостойкость, является и форма карбидов. Так, например, для хромистого наплавленного металла с кубическими карбидами  $M_{23}C_6$  износостойкость выше, чем с гексагональными карбидами хрома типа  $M_7C_3$  и ромбоэдрическими карбидами типа  $M_3C$ . Наиболее общим правилом для повышения износостойкости является получение карбидов наиболее богатых легирующими элементами [33].

Для сплавов, работающих в условиях ударных нагрузок и абразивном изнашивании, оптимальная структура – доэвтектическая (иногда эвтектическая) с количеством (объемной долей в структуре) карбидов 20 – 30% [33, 34].

Наблюдаемое в данном случае разнообразие структур (геометрии их строения) также не описывается количественными характеристиками, что затрудняет оценку их влияния на прочность, износостойкость и склонность наплавки к преждевременному разрушению. Отсюда подбор материалов (составов и технологий их получения) носит эмпирический характер, основанный на имеющейся практике и исследовательской интуиции.

Таким образом твердые сплавы, применяемые для наплавки, имеют комплексное строение, часто состоящее из дендритных зерен, эвтектики и карбидов различной формы.

Совместное влияние данных структурных элементов на износостойкость наплавов создает определенные трудности в предсказании свойств получаемых изделий. Здесь важным могут быть размер дендритов, их форма и анизотропия, количество, дисперсность и расположение эвтектики, а также размер, форма и расположение карбидной фазы.

Для этих целей могут помочь массовые количественные измерения данных параметров. Это позволит сформулировать объективные требования к геометрии структур твердых сплавов, допустимой степени их неоднородности (технологически неизбежной в условиях массового производства твердых сплавов и покрытий из них), обеспечивающих требуемый комплекс свойств. На этой основе возможно и корректировка состава твердых сплавов и технологического процесса получения покрытий из них. Это будет эффективным способом повышения долговечности и других эксплуатационных показателей деталей машин (в частности, сельскохозяйственных), эксплуатирующихся в высокоабразивных средах.

## **1.2 Зачем нужны количественные методы металлографии?**

### **1.2.1 Сложности развития металлографии**

Металлография – это металлургическая дисциплина о структурах различных металлов и сплавов и закономерностях структурообразования [35].

Количественная металлография (стереометрическая металлография, раздел стереологии) – система методов исследования, количественно оценивающих геометрические параметры пространственного микроскопического строения металлов и сплавов по измерениям на плоских сечениях. [36].

Существуют три способа оценки микроструктуры: качественно-описательная, полуколичественная (балльная оценка) и строго количественное измерение геометрическими параметрами микроскопического строения. Первые два способа оценки имеют субъективный характер и результаты оценки разных наблюдателей часто очень расходятся [37].

Современные методы количественной металлографии должны быть основаны на понимании физики процессов деформации и разрушения разнообразных структур (и понимание отсутствия необходимых знаний этого). Исходя из этого возникает необходимость измерять конкретные параметры структур, определяющие условия протекания данных процессов применимо к практике работы конкретной конструкции. Возможности процедур исходя из этого должны обеспечивать широту поиска [38, 39].

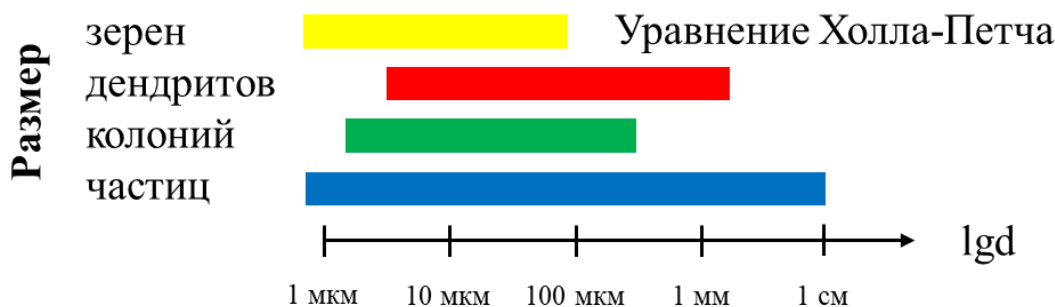
Количественные методы металлографии позволяют сравнивать параметры структур с составом используемых материалов и механизмами их обработки и эксплуатации. Используя

данные методы, можно определить оптимальный состав материала, наилучшую технологию получения и обработки, обеспечивающую создание нужной структуры и требуемых свойств.

Несмотря на то, что 3D металлография интересует в настоящий момент многих исследователей, наиболее используемым до сих пор является исследование поверхности шлифов. Таким образом классическая металлография основана на анализе плоской двумерной структуры. Так как параметры такой мнимой структуры не могут оценивать всю структуру целиком, то обычно рекомендуется анализировать несколько полей зрения для получения более объективных значений измеряемых параметров. Однако получить полностью точную картину нельзя по нескольким причинам:

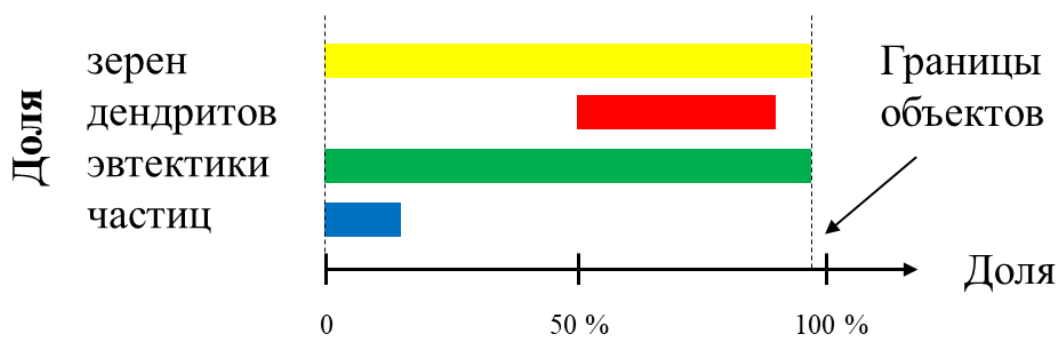
- плоскость шлифа пересекает структурные элементы не в наибольшем диаметре, что говорит о заниженных значениях параметров структурных элементов, получаемых классической металлографией;
- чем крупнее структурный элемент, тем более вероятно его пересечение плоскостью шлифа, поэтому количество крупных зерен относительно больше, чем в реальной трехмерной структуре;
- для неравноосных объектов форма в плоскости шлифа не описывает объект в целом. Например, представление о мартенсите, как об игольчатой структуре ошибочно – мартенсит имеет пластинчатое строение. Это ясно видно, когда плоскость мартенситной пластинки случайно совпадет с плоскостью шлифа, что бывает очень редко из-за весьма малой толщины пластинок мартенсита.

Приведенные причины показывают, что важнейшим принципом оценки микроструктуры должен быть выбор геометрических параметров пространственного микроскопического строения в качестве критериев оценки. При этом параметры объектов имеют широкий диапазон значений (рисунок 2). Это подтверждает неспособность средних размеров структурных элементов описывать их строение.

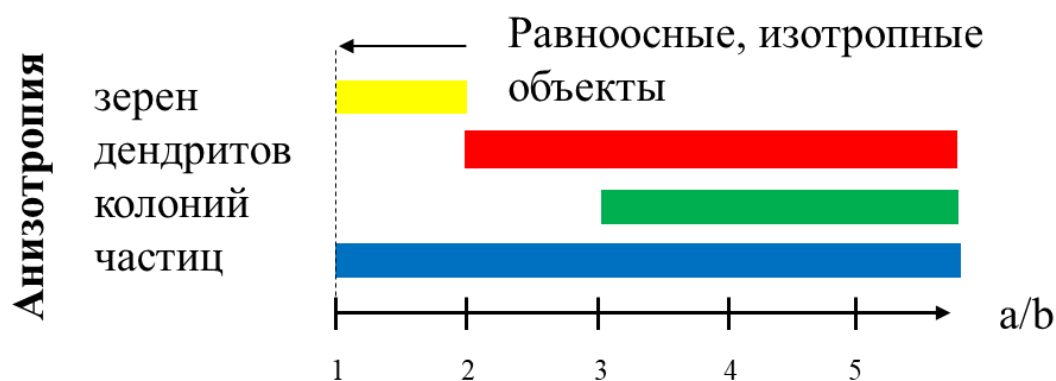


а)

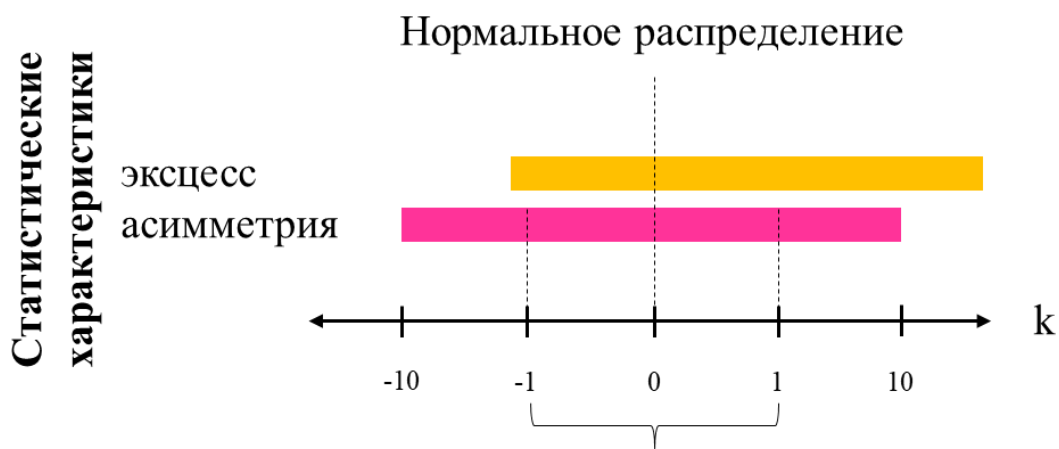




б)



в)



Одновершинные распределения

г)

а – размер объектов; б – доля объектов; в – анизотропия объектов;

г – статистические характеристики объектов

Рисунок 2 – Диапазоны параметров объектов изображений

Такое видение металлографии появилось 60 лет назад и до сих пор является актуальным. Однако современные технологии могут существенно усовершенствовать

описанные методы: исключить субъективность исследователя, ускорить процесс измерения и обработки полученных данных, существенно увеличить точность измерений.

Широко используемый до сих пор метод балльной оценки, описанный, например, в ГОСТ 5639, не всегда позволяет получать воспроизводимые результаты измерения. Ранее преимуществом этого метода считалось отсутствие больших затрат времени, однако компьютерный анализ изображений обладает тем же преимуществом. Поэтому у метода балльной оценки есть определенные ограничения в его применении.

На данный момент появился целый ряд оборудования на всех этапах металлографии: прецизионные станки для резки образцов, станки горячей запрессовки для фиксации плоскости шлифа, автоматические шлифовально-полировальные станки с прижимным механизмом, высококачественные микроскопы с разным увеличением и многое другое. Казалось бы, существовавшие 60 лет назад препятствия для распространения и повсеместного использования количественной металлографии устранены. Однако окончательного перехода к количественным методам до сих пор не произошло. Факторы, тормозящие переход лабораторий на компьютерную металлографию, перечислены в работах [40-45].

Среди них авторы также отмечают:

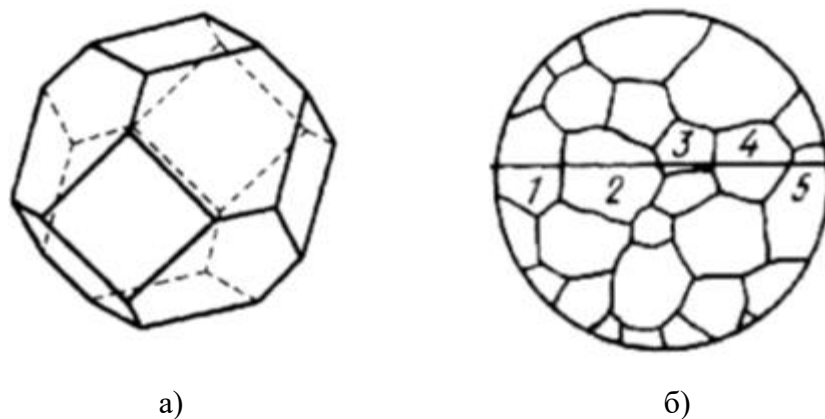
- различный уровень технической оснащённости металлографических лабораторий;
- отсутствие перехода знаний от образовательных учреждений (ВУЗов) к научно-исследовательским институтам (НИИ) и центральным заводским лабораториям (ЦЗЛ) в системе подготовки специалистов, в том числе по металлографии;
- отсутствие межлабораторных экспериментов по сравнительной оценке различных программных продуктов для анализа изображений;
- отсутствие в действующих национальных стандартах методик, предусматривающих использование систем анализа изображений;
- нежелание компаний и институтов вкладываться в развитие действующих лабораторий.

Причиной споров остается сложность анализа с помощью компьютерной металлографии некоторых типов изображений. Однако с каждым годом таких изображений остаётся всё меньше.

Современный подход заставляет многих исследователей разбираться в современных возможностях компьютерного анализа. Для получения результата измерений необходимо пройти целый ряд этапов, каждый из которых влияет на конечный количественный результат. При этом совершенствование всех этапов сопровождается определенными трудностями.

### 1.2.2 Методы количественной оценки параметров объектов

Для подробного описания методов измерения используем зеренную структуру с зернами типичной формы (рисунок 3, а). Современные методы анализа изображений позволяют не разделять объекты зёрненной структуры (зерна) и объекты других элементов структуры (включений). Поэтому описание проводится для структурной составляющей в целом.



а – типичная объемная форма зерна; б – сечение структуры случайной плоскостью

Рисунок 3 – Зёрненная структура

Случайная секущая, пересекающая изображение микроструктуры, пересекает также и границы структурной составляющей [37]. Если длина секущей  $L$  известна и подсчитано  $p$  – число пересечений секущей элементами, то средняя длина случайной хорды  $L_P$  (мкм или мм) на единицу длины секущей

$$L_P = \frac{L}{p} \quad (1)$$

Для получения объективных значений необходимо проведение нескольких секущих, а также исследование нескольких полей зрения на шлифе. В таком случае ручной метод подсчёта количества пересечений весьма трудоемкий и неточный.

Компьютерная металлография позволяет в автоматическом режиме проводить секущие любого количества и определять средний размер попавших на них объектов  $d$  (мкм или мм) на бинарном изображении в пикселях с последующим переводом размера в микроны. Данный подход позволяет получать фактические значения размеров объектов, а не только средние. Такие автоматизированные процедуры не чувствительны к размеру изображений, количеству и размеру объектов на них.

По среднему числу зерен на изображении  $n$  можно определить **среднюю площадь** одного зерна  $A$

$$\bar{A} = \frac{F}{N^2 n} \quad (2)$$

где  $F$  – площадь кадра,  $N$  – увеличение микроскопа.

Компьютерная металлография позволяет методом площадей выделять объекты на изображении и определять площадь выделенных объектов  $S$  (мкм<sup>2</sup> или мм<sup>2</sup>) на бинарном изображении в квадратных пикселях с последующим переводом значений площади в квадратные микроны.

В **методе Джеффриса** число зерен  $n$  на изображении подсчитывают по формуле

$$n = p + \frac{1}{2} g + 1, \quad (3)$$

где  $p$  – число зерен, целиком попадающих на изображение;

$g$  – число зерен, пересекаемых стороной изображения (в среднем можно считать, что половина зерна находится в квадрате);

единица учитывает четыре зерна, находящихся в углах изображения и в среднем на 1/4 принадлежащих ему (рисунок 4).

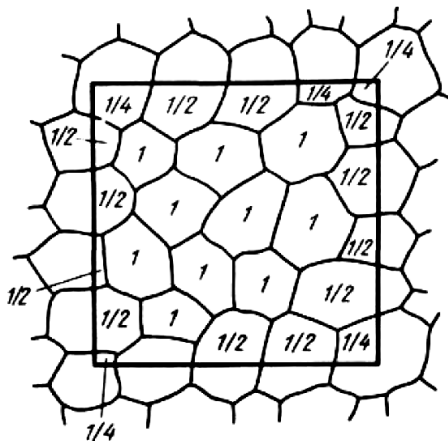


Рисунок 4 – Схема определения числа зерен, попавших на изображение (методы Джеффриса и Салтыкова)

По **методу Салтыкова** подсчитывают число  $N$  стыков трех границ зерен. Количество объектов  $n$  рассчитывается по формуле

$$n = \frac{1}{2} N_y \quad (4)$$

Компьютерная металлография позволяет напрямую посчитать количество выделенных объектов из их массива  $n$  (шт). При использовании метода площадей граничные объекты чаще всего удаляются, в измерении участвуют только целиков вошедшие в изображение объекты. Такие процедуры нечувствительны к типу строения структурных составляющих (зерна или включения). Помимо этого, возможно определение анизотропии объектов (доли) путем деления наибольшего (а) диаметра объектов на наименьший (b). Это также позволяет определить и ориентировку структурной составляющей (град).

**Объемная доля** структурной составляющей  $v = V/V_0$ , (где  $V$  – объем структурной составляющей;  $V_0$  – объем образца).

Для экспериментального определения объемной доли используют принцип Кавальери. В соответствии с ним относительный объем структурной составляющей ( $v$ ) пропорционален площади, занимаемой ею на плоскости шлифа ( $A$ ), или, в свою очередь, длине, занимаемой ею на случайно проведенной секущей ( $L$ ), или же доле случайных точек ( $n$ ), попавших на соответствующую структурную составляющую, т.е.

$$v = \frac{V}{V_0} = \frac{A}{A_0} = \frac{L}{L_0} = \frac{n}{n_0}. \quad (5)$$

Поскольку прямое определение объема, как правило, невозможно, то определение  $v$  проводят или путем измерения площадей  $A$  (планиметрирование), или путем измерения длин  $L$  (линейный метод Розиваля), или подсчетом точек  $n$  (точечный метод Глаголева).

**Точечный метод Глаголева** основан на том, что точки, случайно спроектированные на изображение структуры, попадают на структурную составляющую с вероятностью, пропорциональной площади, занимаемой ею на шлифе (рисунок 5). Поэтому если общее число точек равно  $n$ , причем на  $i$ -тую структурную составляющую попало  $n_i$ , то объемная доля  $V_{Vi}$  равна

$$V_{Vi} = A_{Ai} = \frac{n_i}{n} \quad (6)$$

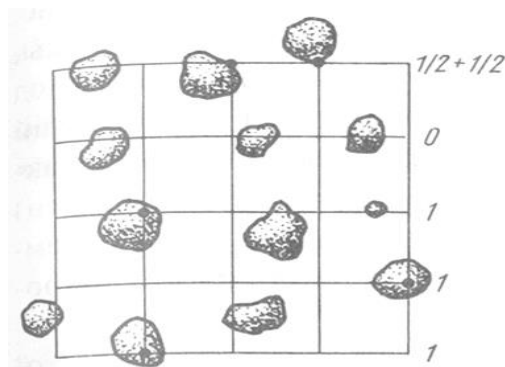


Рисунок 5 – Схема определения объемной доли структурной составляющей по методу Глаголева

В том случае, когда точка попадает на границу между структурными составляющими, ее считают за 1/2 (рисунок 5). В качестве случайных точек удобно брать перекрестия квадратной сетки, вставленной в окуляр. На рисунке всего 25 перекрестий (точек); из них 4 попали на темную составляющую.

В **линейном методе Розиваля** определяют суммарную длину хорд  $L_i$ , попавших на интересующую структурную составляющую (рисунок 6). Тогда

$$V_{vi} = \frac{L_i}{L}, \quad (7)$$

где  $L$  – общая длина случайно проведенной секущей.

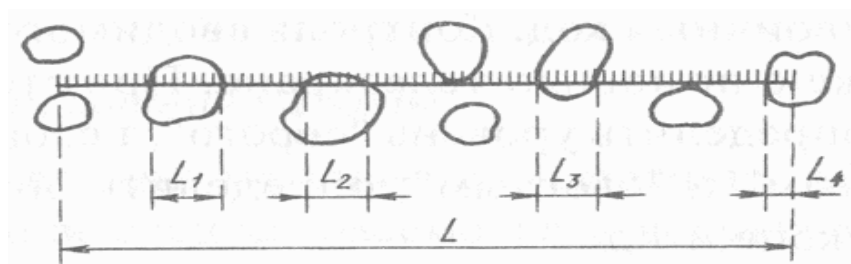


Рисунок 6 – Схема определения объемной доли структурной составляющей по методу Розиваля

По рисунку из общей длины секущей  $L$  на включения приходится длина  $L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ .

Компьютерная металлография позволяет измерять объемную долю объектов по доли занимаемой ими площади. Это возможно путем суммирования площади всех элементов полученного массива и деления на общую площадь изображения. Плотность структурной составляющей определяется путем деления количества элементов массива на общую площадь изображения.

Для оценки **критериев полосчатости** структуры сталей и сплавов в большинстве российских стандартов используются визуальные методы сравнения с помощью эталонных шкал. Аналогичные зарубежные стандарты, наряду с качественным описанием структуры, в том числе с помощью эталонов, часто содержат количественное описание параметров структуры (рисунок 7), полученное с помощью стереологических измерений [46]. Компьютерная металлография позволяет использовать автоматизированные процедуры для определения параметров полосчатых структур.

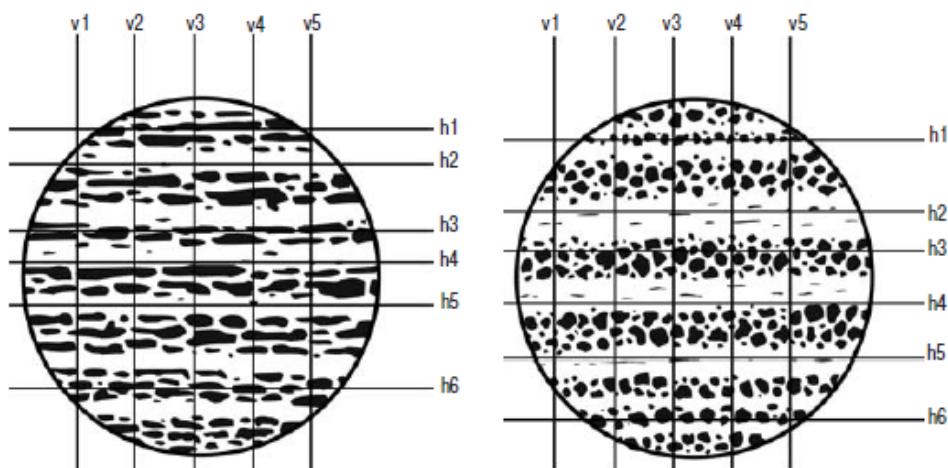


Рисунок 7 – Направленные секущие вдоль и поперек полос перлита

Для оценки полосчатости структур используются предложенные С. А. Салтыковым стереологические коэффициенты [37], вычисление которых основано на методе направленных секущих (рисунок 7) с использованием возможностей компьютерной металлографии:

1.  $NL_{\perp} / NL_{\parallel}$ , где  $NL_{\parallel}$  – среднее количество частиц второй фазы, пересеченных секущими, параллельными оси деформации на единицу длины секущей;  $NL_{\perp}$  – среднее количество частиц второй фазы, пересеченных секущими, перпендикулярными оси деформации на единицу длины секущей.

2.  $\sigma NL_{\parallel} / \sigma NL_{\perp}$ , где  $\sigma NL_{\parallel}$  – среднее квадратичное отклонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими, параллельными оси деформации;  $\sigma NL_{\perp}$  – среднее квадратичное отклонение количества частиц второй фазы, пересеченных секущими, перпендикулярными оси деформации.

3.  $\sigma VL_{\parallel} / \sigma VL_{\perp}$ , где  $\sigma VL_{\parallel}$  – среднее квадратичное отклонение доли второй фазы на секущих, параллельных оси деформации;  $\sigma VL_{\perp}$  – среднее квадратичное отклонение доли второй фазы на секущих, перпендикулярных оси деформации.

Для удобства сравнения сведем все указанные методы в одну таблицу 1:

Таблица 1 – Сравнение существующих и предлагаемых методов металлографии

Параметр	Методы измерения параметров			
	Существующие методы (измерение на исходных изображениях вручную)	Ошибка измерения	Предлагаемые методы (измерение на бинарных изображениях)	Точность измерения
Линейный размер объектов (анизотропия)	Подсчет числа пересечений секущими	—	Измерение объектов секущими	1 пкс
Площадь объектов	Подсчёт числа стыков N по методу Салтыкова	—	Выделение объектов и определение их площади	
	Подсчёт числа объектов n по методу Джеффриса	—		
	Планиметрирование	0,2%		
Объемная доля объектов	Подсчёт числа узлов сетки по методу Глаголева	—	Определение доли площади выделенных объектов от площади всего кадра	
	Подсчёт суммарной длины хорд по метод Розиваля	30%		
	Квантимет	неоднородность металла, распознавание границ		
Плотность объектов	Подсчёт числа объектов n по методу Джеффриса и определение их плотности	—	Выделение объектов и определение их плотности	
Размещение объектов	Визуально	—	Полиэдры Вороного	



Таким образом, для количественной оценки структур в настоящее время используют следующие параметры (рисунок 8):

- количество элементов структурной составляющей на изображении  $n$  (шт);
- средний размер структурной составляющей на изображении  $d$  (мкм или мм);
- общая и средняя площадь структурной составляющей на изображении  $S$  (мкм<sup>2</sup> или мм<sup>2</sup>);
- периметр структурной составляющей  $P$  (мкм или мм), из которого можно получить его среднее значение, а также суммарную протяженность границ;
- объемная доля  $V$  структурной составляющей (%);
- плотность расположения структурной составляющей (шт./мкм<sup>2</sup> или шт./мм<sup>2</sup>);
- анизотропию элементов ( $a/b$ ) структурной составляющей (доли), по которой можно оценить ее равноосность;
- ориентировку структурных составляющих (градусы);
- неравномерность размещения (полиэдры Вороного).

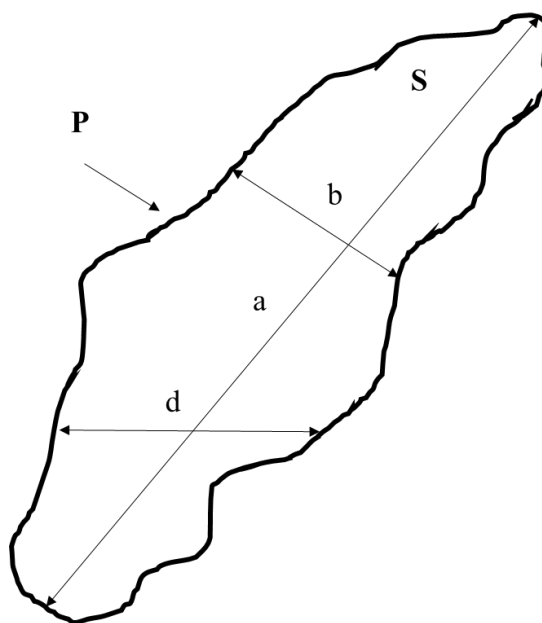


Рисунок 8 – Параметры измеряемых объектов

При необходимости возможно определить и другие параметры измеряемых объектов. Важно отметить, что используя ныне существующие методы, описанные выше, невозможно получить реальные значения определяемых параметров, а также гистограммы их распределения. Эти методы позволяют определять средние значения размеров объектов, которые не могут описать всю морфологию исследуемой структуры в целом.

### 1.2.3 Использование компьютерных методов металлографии

Замена качественной и полуколичественной оценки параметров структур металлов методами количественных измерений до сих пор произведена лишь частично. Все **исследовательские группы** в материаловедении на данный момент по используемым методам металлографии можно разделить на следующие:

- балльная оценка, то есть сравнение изображения в окуляре микроскопа с типичными изображениями по баллам;
- качественная оценка в диапазоне размеров значений параметров структур по масштабной линейке;
- ручное измерение методом секущих;
- автоматическое измерение методами секущих и площадей.

Самой малочисленной является последняя часть. Понятно, что внедрение новых методов информационных технологий в материаловедении затруднено по целому ряду причин. Поэтому во многих работах до сих пор используются качественные методы анализа изображений.

Актуальность создания автоматизированных процедур для металлографии подчеркивается во многих работах. Например, в работе [47, 48] описана необходимость совершенствования и автоматизации методов металлографии, которая стала актуальной в последние годы в связи с ужесточением требований к качеству шлифов с использованием современного оборудования и непрерывным увеличением объема металлографического контроля.

Большинство программных продуктов предлагает ручное измерение методом секущих с дальнейшим автоматическим построением гистограмм и определением статистических параметров объектов структур. Однако пока [49] полная автоматизация измерения возможна только на самых простых объектах (например, графитовые включения в чугунах). В этой связи весьма актуальным является создание целого блока металлографических исследований – обработка изображений. Данный блок позволяет подготовить полученные изображения к измерениям.

Ранее [50] была попытка реализовать аналогичные идеи на старых программных продуктах (анализатор изображений ИБАС-2). Повышение возможностей программных продуктов позволяет реализовать ранее невозможные процедуры и определять все необходимые параметры. Однако полной автоматизации пока не удалось достичь, что объясняет актуальность данной работы.

Современные мощности могут позволить измерение гораздо больших объёмов информации, чем во время создания стандартов. При этом с развитием автоматизированных процедур необходимость в бальной оценке может отпасть, а структура будет описываться исходя из получаемых количественных данных (полосчатых структур сталей, зеренных структур, неметаллических включений, а также цветных металлов и сплавов (алюминия, магния, меди, титана и др.)). В этой связи весьма актуальной является попытка количественного автоматизированного измерения параметров структур с определением их влияния на механические свойства и параметры разрушения.

Неоднородность структур очень часто не может позволить провести четкую классификацию структур и их принадлежность к конкретному классу [51]. Это не дает в спорной ситуации разрешать споры обоснованно. Поэтому основными задачами могут стать:

- автоматическое разделение изображений по измеряемым характеристикам и кластеризация измеряемых изображений;
- измерение необходимых характеристик входящих изображений и их описание без сравнения с эталонными.

В большинстве случаев [например, 52] все металлографические исследования состоят из целого ряда этапов, каждый из которых вносит определенный вклад в конечный количественный результат измерений:

- пробоотбор:
  1. постановка задач исследования;
  2. выбор методов исследования;
  3. выбор образцов для металлографии.
- пробоподготовка:
  1. выбор плоскости шлифа, вырезание и запрессовка образцов;
  2. шлифование образцов бумагой с повышением дисперсности;
  3. полировка образцов на сукне с использованием суспензии (не рекомендуется использование «зеленки» для получения качественных изображений);
  4. травление полученных шлифов при необходимости выделения границ объектов определенного класса.
- подготовка изображений для анализа:
  1. съёмка шлифов (выбор увеличения, области съёмки и поля зрения, использование возможности панорамной съёмки, создание качественных изображений, избежание расфокусировки изображений);
  2. выбор изображений для адекватной характеристики исследуемых образцов;

3. выравнивание неоднородности оптических изображений по освещенности.

- обработка изображений:
  1. бинаризация изображений (выбор метода бинаризации (глобальная, локальная, мультиризация), ее оптимальная реализация);
  2. использование морфологических операций (эрозия, дилатация, замыкание, использование масок, сегментация);
  3. фильтрация цифровых шумов бинарных изображений.
- измерение полученных бинарных изображений:
  1. определение измеряемых параметров;
  2. выбор метода измерения (методы произвольных и направленных секущих, метод площадей);
  3. автоматизация измерений.
- анализ полученных количественных результатов:
  1. определение значений параметров (количество и размер (поперечник, периметр или площадь) объектов, объёмная доля, плотность, анизотропия, ориентировка, статистические коэффициенты эксцесса и асимметрии);
  2. сравнение выборок методами параметрической и непараметрической статистики;
  3. построение графиков распределений;
  4. выявление закономерностей;
  5. написание выводов и заключений металлографических исследований.

Проблемы, возникающие в металлографическом анализе:

- исключение субъективности измерений;
- повышение точности измерений;
- переход от качественной и полуколичественной оценки по всем ГОСТ (размер зерна – ГОСТ 5639, размер и форма графитовых включений – ГОСТ 3443, тип, размер и форма неметаллических включений – ГОСТ 1778, параметры полосчатости – ГОСТ 5640 и др.) к количественным автоматическим измерениям;
- необходимость панорамных исследований для получения достоверных характеристик структур;
- модернизация программных продуктов.

Одним из самых важных этапов металлографических исследований является травление. Существующие методы травления направлены на создание четких границ между объектами, что является в свою очередь новой отдельной группой объектов. Такой подход, во-

первых, усложняет автоматизацию обработки изображений, а во-вторых, уменьшает размер основных объектов изображений.

Избирательное химическое воздействие травителей на различные структурные составляющие усложняет процедуры травления и обработки изображений [53]. Компьютерный анализ изображений может упростить данные процедуры. Избирательность травления следует учитывать при создании процедур обработки изображений.

Травление сильно влияет на размер измеряемых объектов, например, дендритного рисунка. Большая дисперсность дендритов делает короче пути диффузионного перераспределения примеси, что повышает однородность состава и измельчает сульфиды (из-за меньшей ликвации серы).

Основным параметром разделения объектов является их размер. Выделение объектов также зависит от морфологии измеряемых объектов. Возможно ранжировать элементы структуры по их геометрии на равноосные (полигональный феррит) и вытянутые (бейнит), а также по форме (полигональный и квазиполигональный феррит с неправильной формой границ), что может быть реализовано по параметру формы.

Последний критерий является весьма важным при анализе разделенных объектов неправильной формы, например, графитовых включений в чугунах, структура которых является основным фактором, определяющим их свойства. Механические и эксплуатационные свойства чугуна зависят от характеристик металлической основы, а также от формы, размеров, числа и расположения графитовых включений [54].

Длина, толщина и форма границ графита отличает вермикулярный графит от пластинчатого, а размер и морфология – шаровидный (высокопрочный) от ковкого. Разнообразие всех параметров графитовых включений в чугунах усложняют их классификацию (рисунок 9) и делает субъективной оценку качества чугунов.

Интересной является также задача 3D-металлографии, которая позволяет получить однозначное трехмерное описание структуры. Такой подход возможен только с помощью изучения последовательных сечений, что является очень трудоемкой задачей. Возможным вариантов реализации такой задачи может быть использование компьютерной металлографии в сочетании с автоматическими методами полирования и выявления структуры для получения последовательных микрошлифов. Интересным является применение такого подхода для структур, строение которых можно распознать микроскопом без применения процедуры травления. Реализация такого подхода может помочь в анализе влияния строения структуры на механизмы ее разрушения.

Использование автоматизированных процедур в металлографии с целью обеспечения единства измерений со временем необходимо регламентировать в государственном или

международном (возможно ISO) стандарте. В данных документах необходимо прописать требования к оборудованию по подготовке и съемке шлифов, пробоотбору и пробоподготовке, методам обработки изображений, методам анализа бинарных изображений и измерения объектов на них, а также способах анализа полученных результатов. Данные стандарты должны заменить существующие, в которых описано использование эталонных изображений для балльной оценки структур. Это заставит предприятия и университеты отказаться от эксплуатации морально и физически устаревшей приборной базы. Применение нового оборудования пробоподготовки и систем анализа изображений уберёт необходимость выполнять рутинные операции, освобождая время специалистов для интерпретации и осмысления результатов исследований [41]. Регламентированная информация таких стандартов может позволить получать более воспроизводимые результаты металлографических исследований, а также избежать разногласий в контроле качества металлургических и металлообрабатывающих компаний.

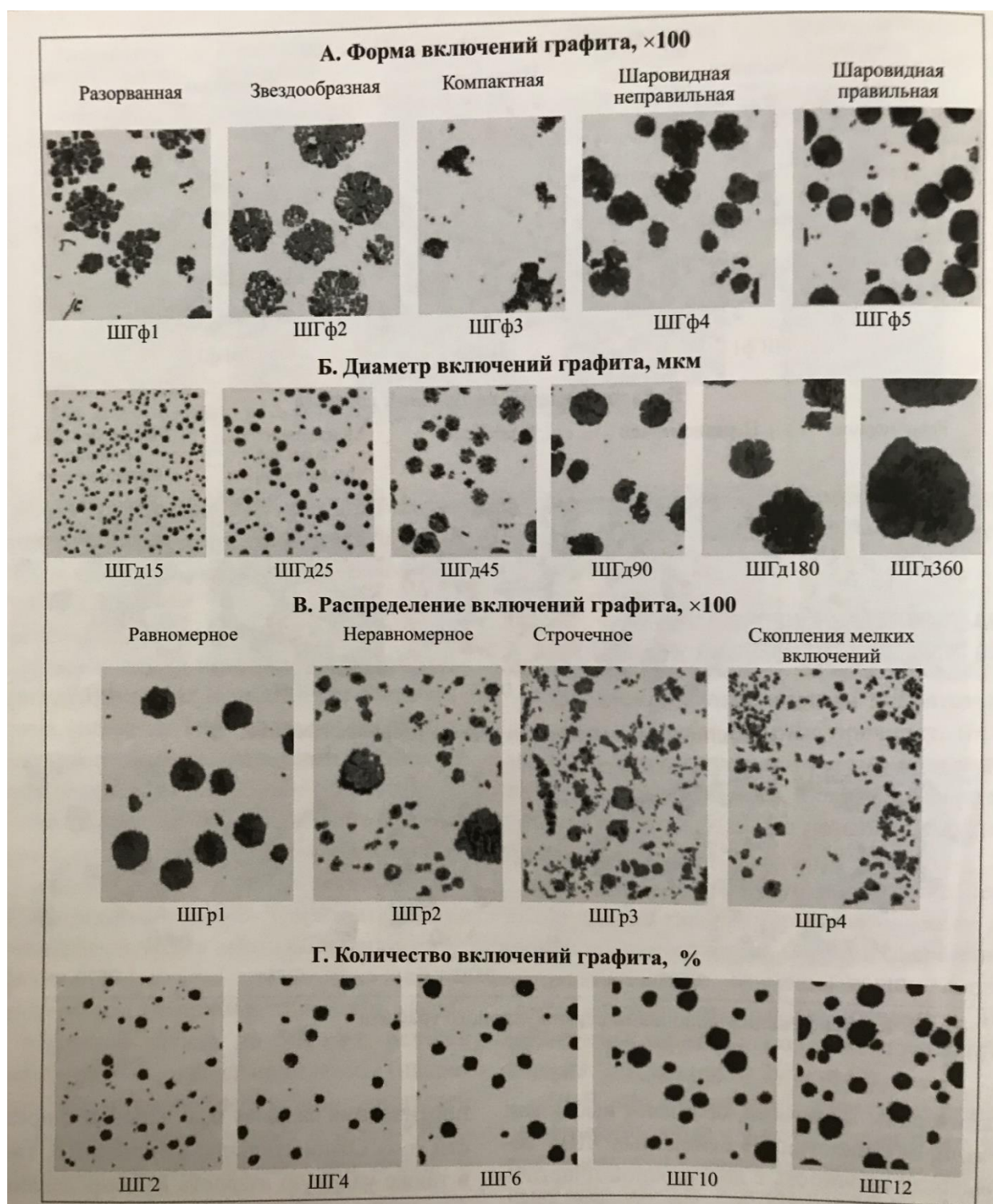


Рисунок 9 – Классификация включений шаровидного графита

Представители зарубежных и отечественных инженерных школ испытывают затруднения в профессиональном общении из-за различий национальных стандартов, различий в маркировке сплавов и особенностях оценки структур (например, графитизированных чугунов), а также многих других материалов. Точные автоматизированные воспроизводимые методы анализа изображений могут помочь избежать данных проблем.

### 1.3 Теоретические основы обработки изображений

В обработке изображений удобно работать с понятиями аналогового и цифрового изображения. Функция интенсивности – это математическая модель, часто используемая при анализе задач, в которых плодотворные результаты может принести рассмотрение изображения как функции двух переменных. Тогда для анализа изображений оказывается доступен весь аппарат математического анализа [55].

*Цифровое изображение* – это просто двумерный прямоугольный массив дискретных значений. Пространственная область изображения и диапазон значений интенсивности квантуются на дискретный набор значений, так что изображение может быть сохранено в компьютерной памяти с двумерной структурой. Обычно для представления интенсивности выбирают 8-битные (однобайтные) числа, допускающие хранение значений от 0 до 255. Точность датчика часто не превосходит 256 градаций интенсивности, и для большинства задач этого достаточно [55].

*Аналоговое изображение* – это двумерное изображение  $F(x, y)$ , характеризующееся бесконечной точностью представления по пространственным параметрам  $x$  и  $y$  и бесконечной точностью представления значений интенсивности в каждой пространственной точке  $(x, y)$ .

Математическая модель изображения как функции двух действительных пространственных переменных оказывается чрезвычайно полезной для описания изображений и для определения операций над ними.

*Функция интенсивности* – это математическое представление изображения как функции  $f(x, y)$ , зависящей от двух пространственных переменных  $x$  и  $y$ . Переменные  $x$  и  $y$  принимают действительные значения, которые задают положение точки на изображении. Значения  $f(x, y)$  обычно также являются действительными и определяют интенсивность изображения в точке  $(x, y)$ .

*Полутоновое изображение* – это монохромное (черно-белое) цифровое изображение  $I[r, c]$ , у которого каждому пикселу соответствует одно значение интенсивности (рисунок 10).



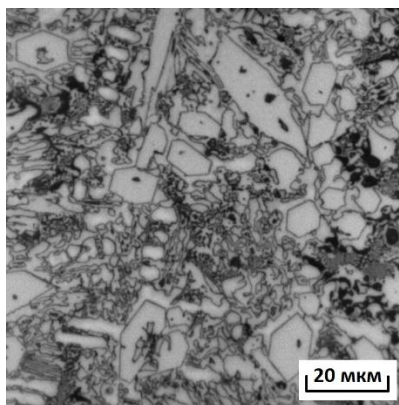


Рисунок 10 – Полутоновое изображение

*Бинарное изображение* – это цифровое изображение, пикселы которого имеют значения 0 или 1 (рисунок 11).



Рисунок 11 – Бинарное изображение

*Система координат* требуется для указания отдельных пикселов изображения, для работы с ними в компьютерной программе, для ссылки на них из математических формул или для указания пикселов относительно системы координат устройства.

Каждый пиксел цифрового изображения представляет собой результат измерения интенсивности (выборку) некоторой элементарной площадки аналогового изображения.

Поле зрения датчика изображений является характеристикой пространственного объема сцены, которую можно наблюдать с помощью данного датчика. Разрешение датчика характеризует его точность при выполнении пространственных измерений или при обнаружении характерных признаков.

Цифровое изображение состоит из фиксированного количества строк и столбцов пикселов, этот термин является сокращением от слов «элемент изображения» (picture element). Пикселы напоминают маленькие плитки, в которых хранятся дискретные значения – небольшие числа, часто от 0 до 255, представляющие яркость точек изображения. В

зависимости от схемы кодирования 0 может соответствовать самой малой (темной), а 255 – самой большой (светлой) яркости, или наоборот [55].

Цифровое изображение формируется путем выборки значений этого аналогового изображения в дискретных положениях и представления интенсивности в этих положениях в виде дискретных значений. При формировании всех реальных изображений существуют пределы точности координат и интенсивности, обусловленные физическими процессами.

Неоднородности изображения могут вносить существенный вклад в результаты измерения параметров элементов. При использовании широкоугольного объектива («рыбий глаз») получается большая неоднородность по освещению изображения, что приводит к наличию затемнённых и засветлённых полей, то есть разброс интенсивностей на изображении становится больше. Это приводит к существенной потере информации при бинаризации и невозможности измерять большей части объектов (элементов) изображения. Также здесь существенную роль играет структурная неоднородность и тени на изображениях изломов.

Такого рода неоднородности можно удалять путём вычитания полинома из профиля (от 2 степени и выше) с оценкой оптимальной степени полинома по остаточной дисперсии или 3D распределения интенсивностей яркости (2-й степени) с построением карты градиента (рисунок 12).

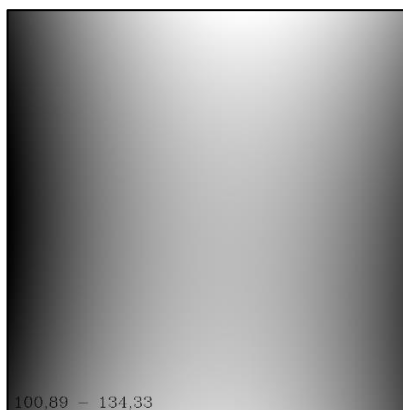


Рисунок 12 – Карта градиента

Опишем основные процедуры алгоритма, используемые в ходе работы.

### 1.3.1 Бинаризация изображений

*Бинаризация* изображений – это перевод полноцветного или в градациях серого изображения в монохромное, где присутствуют только два типа пикселей (тёмные и светлые). Чаще всего используется процедура бинаризации «на глаз» [56].

Перед бинаризацией изображение необходимо монохромизировать или перевести в оттенки серого. Любое монохромное изображение является матрицей интенсивностей по уровням серого цвета от 0 («абсолютно» чёрного) до 256 (белого).

При бинаризации нужно учитывать, что разные программные пакеты могут использовать разные методы монохромизации, что после этого приводит к разным результатам бинаризации.

В настоящее время системы компьютерного зрения достаточно широко и успешно используются в различных областях для таких операций, как контроль и отслеживание различных объектов, их классификации по внешнему виду, распознавание составных объектов и в множестве других систем. Одним из основных методов обработки изображений в системах компьютерного зрения является бинаризация. Как правило, под бинаризацией подразумевают выделение границы объекта, содержащей исчерпывающую информацию о его форме, для последующего ее анализа и решения задачи кластеризации. Существует много разновидностей представления границы объекта, и выбор того или иного варианта зачастую зависит от решаемой задачи. Выбор алгоритма бинаризации влияет на алгоритмы, применяемые далее для анализа изображения. Правильный выбор алгоритма бинаризации позволит использовать более простые и эффективные топологии и классификации, более быстрые методы кластеризации и существенно повлияет на точность результата анализа изображения [56].

Выделяют следующие виды алгоритмов бинаризации изображения:

1. адаптивная бинаризация;
2. глобальная – обработка с постоянным порогом;
3. на основе нейронных сетей.

В методах глобальной обработки пороговая поверхность является плоскостью с постоянным порогом яркости, т.е. значение порога рассчитывается исходя из анализа гистограммы всего изображения и является одинаковым для всех пикселей исходного изображения. Глобальная пороговая обработка имеет существенный недостаток: если исходное изображение имеет неоднородное освещение, области, которые освещены хуже, целиком классифицируются как передний план. В локальных же методах пороговой обработки пороговое значение меняется для каждой точки исходя из некоторых признаков области, принадлежащей некоторой окрестности данной точки. Недостатком такого рода преобразований является низкая скорость работы алгоритмов, связанная с пересчётом пороговых значений для каждой точки изображения.

При работе необходимо учитывать морфологию изображения, качество этапов подготовки шлифа, травления и съёмки, тип микроскопа (рисунок 13).

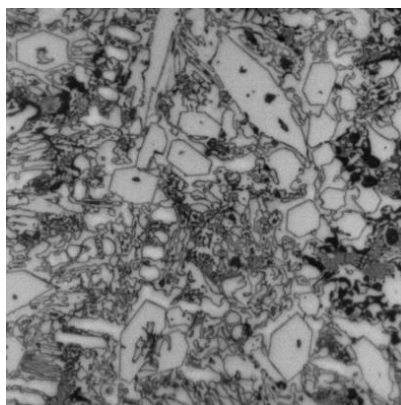


Рисунок 13 – Монохромное изображение с подготовкой

Самым простым методом бинаризации является метод *среднего*, который основан на среднем значении яркости пикселей всего изображения (рисунок 14). Если значение интенсивности пикселя больше среднего, то пиксель становится белым, если меньше – то чёрным.

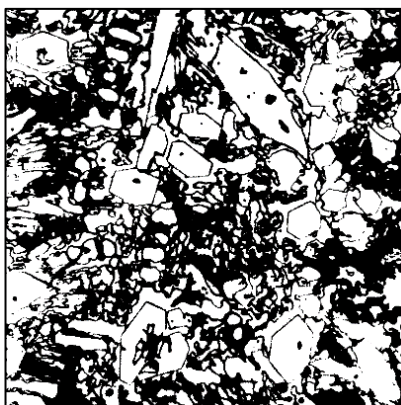
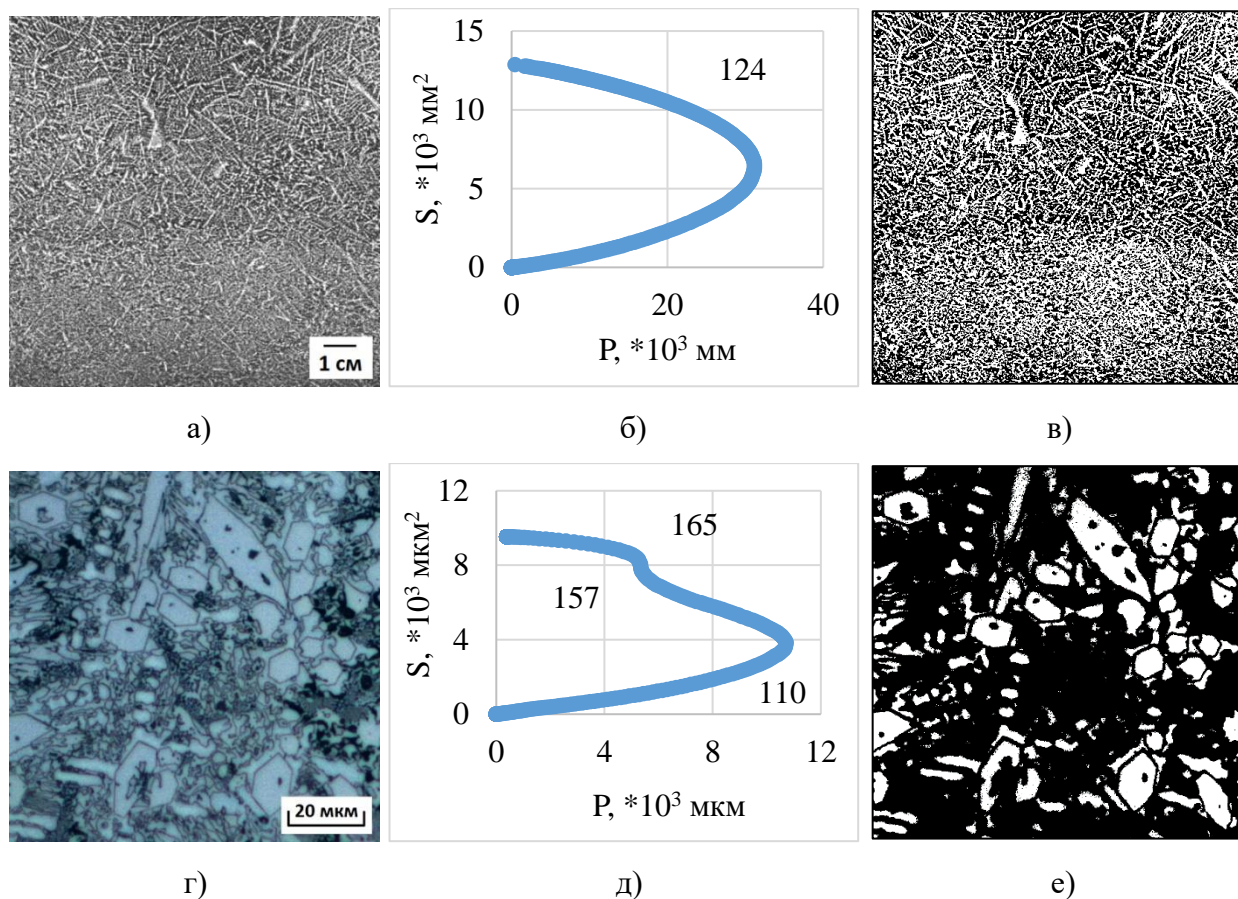


Рисунок 14 – Бинаризация методом среднего

*Метод С-образной кривой* – построение зависимости площади объектов  $S$  от их периметра  $P$  (рисунок 15), полученной при последовательном варьировании порога бинаризации с определённым шагом  $k$  через весь диапазон серого [57]. Критическое уровень бинаризации определяется по максимуму на кривой.



а, г – исходные изображения; б, д – С-образные кривые;  
 в, е – бинаризация методом С-образной кривой  
 Рисунок 15 – Бинаризация методом С-образной кривой

*Метод Оцу* – это алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонного изображения, используемый в области компьютерного распознавания образов и обработки изображений (рисунок 16). Алгоритм позволяет разделить пиксели двух классов («полезные» и «фоновые»), рассчитывая такой порог, чтобы внутриклассовая дисперсия была минимальной [58].

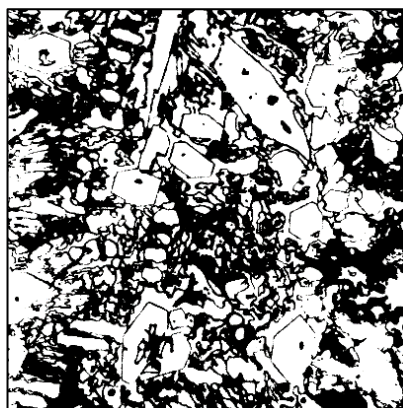


Рисунок 16 – Бинаризация методом Оцу

В различных русскоязычных источниках можно встретить различные способы написания фамилии автора, так, например, можно встретить *Метод Отса* и *Метод Отсу*.

Метод Оцу ищет порог, уменьшающий дисперсию внутри класса, которая определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (8)$$

где веса  $\omega_i$  – это вероятности двух классов, разделённых порогом  $t$

$\sigma_i^2$  – дисперсия этих классов.

$$\omega_1(t) + \omega_2(t) = 1, \quad (9)$$

$$\mu_1(t)\omega_1(t) + \mu_2(t)\omega_2(t) = \mu_T \quad (10)$$

Оцу показал, что минимизация дисперсии внутри класса равносильна максимизации дисперсии между классами [58]:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma^2 - \sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2, \quad (11)$$

которая выражается в терминах вероятности  $\omega_i$  и среднего арифметического класса  $\mu_i$ , которое, в свою очередь, может обновляться итеративно.

Эта идея привела к эффективному методу.

Пусть дано монохромное изображение  $G$ . Необходимо:

1. Вычислить гистограмму  $p(l)$  изображения и частоту  $N(l)$  для каждого уровня интенсивности изображения.

$$N_T = \sum_{i=0}^{\max(G)} p(i) \quad (12)$$

2. Вычислить начальные значения  $\omega_1(0)$ ,  $\omega_2(0)$ ,  $\mu_1(0)$ ,  $\mu_2(0)$ .
3. Для каждого значения  $t$  – полутона – горизонтальная ось гистограммы:
4. обновляем  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$

$$\omega_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} p(i)}{N_T} = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} N(i)}{N_T} \quad (13)$$

$$\omega_2(t) = 1 - \omega_1(t) \quad (14)$$

$$\mu_T = \frac{\sum_{i=0}^{\max(G)} i \cdot p(i)}{N_T} = \frac{\sum_{i=0}^{\max(G)} i \cdot N(i)}{N_T} \quad (15)$$

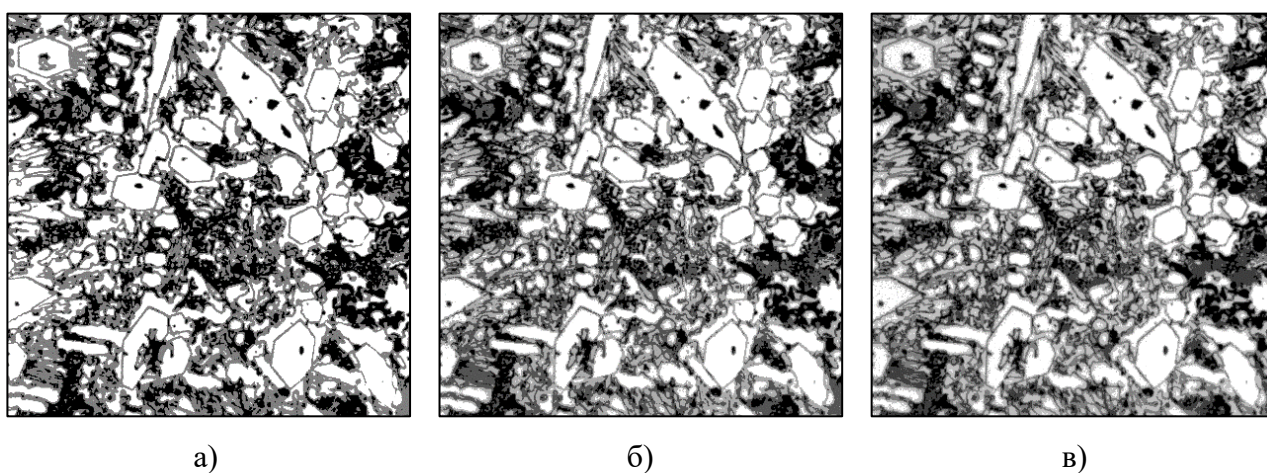
$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} i \cdot p(i)}{N_T \cdot \omega_1(t)} = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} i \cdot N(i)}{N_T \cdot \omega_1(t)} \quad (16)$$



$$\mu_2(t) = \frac{\mu_T - \mu_1(t) * \omega_1(t)}{\omega_2(t)} \quad (17)$$

5. вычисляем  $\sigma_b^2(t)$ , если больше, чем имеющееся, то запоминаем его и значение порога  $t$ . Искомый порог соответствует максимуму дисперсии между классами.

Метод Оцу также имеет улучшенную версию для поддержки нескольких уровней изображения, который получил название *метод мульти-Оцу* [59]. Для разделения изображения на  $M$  классов определяется  $M - 1$  порог  $\{t_1, t_2, \dots, t_{M-1}\}$ :  $C_1 [1, \dots, t_1]$ ,  $C_2 [t_1+1, \dots, t_2]$ , ... ,  $C_i [t_{i-1}+1, \dots, t_i]$ , ..., и  $C_M [t_{M-1}+1, \dots, L]$ , оптимальные пороги  $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_{M-1}^*\}$  выбираются путём максимизации  $\sigma_b^2$  по той же схеме (рисунок 17).



а – 3 класса; б – 4 класса; в – 5 классов

Рисунок 17 – Бинаризация методом мульти-Оцу

Адаптивную бинаризацию (рисунок 18) можно рекомендовать для обработки полутоновых изображений невысокого качества (сканированных снимок), на которых из-за неравномерности фона обычная бинаризация дает плохие результаты. В отличие от обычной бинаризации, когда все области изображения бинарируются с использованием единого установленного пользователем порога, при выполнении адаптивной бинаризации программа анализирует различные области изображения. Функция сглаживания результирующего растра при адаптивной бинаризации позволяет получить удовлетворительный результат без использования дополнительных фильтров.

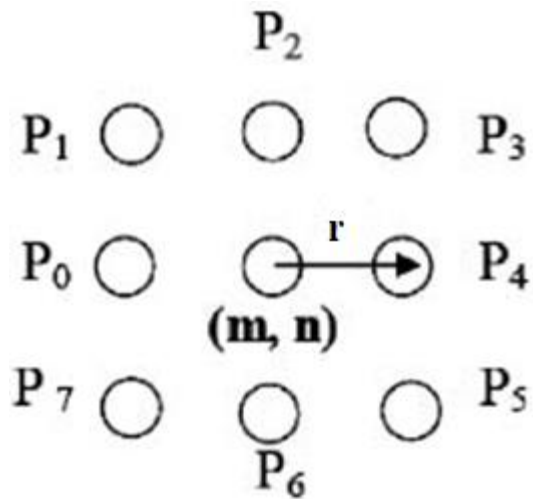


Рисунок 18 – Описание локальной бинаризации

Для каждого пикселя изображения  $I(x, y)$ :

1. В окрестности пикселя радиуса  $r$  высчитывается индивидуальный для данного пикселя порог  $T$ ;
2. Если  $I(x, y) > T + C$ , результат 1, иначе 0.

Самым простым для понимания является локальный *метод среднего* (рисунок 19). Определяется как среднее значение яркости пикселей из квадратной окрестности пикселя  $(x; y)$  с заданным радиусом  $r$  (на примерах для локальных методов взят стандартный радиус 15).



Рисунок 19 – Бинаризация локальным методом среднего

*Метод медиан* похож на метод среднего, только для той же окрестности пикселя  $(x; y)$  с заданным радиусом  $r$  определяется медианное значение, по которому в дальнейшем происходит бинаризация (рисунок 20).



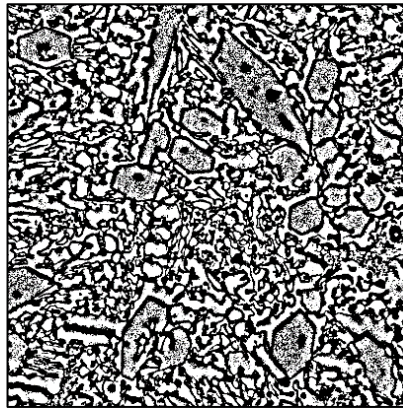


Рисунок 20 – Бинаризация локальным методом медиан

Основной проблемой для методов, использующих скользящий порог, является выбор размера окрестности, для которой строится гистограмма. Например, на результате бинаризации со скользящим порогом хорошо видны ложные объекты, возникающие при бинаризации пикселей фона, в окрестность которых не попадают пиксели объектов. Избавиться от этих ложных объектов можно на этапе сегментации, так как их форма и размеры носят во многом случайный характер. Очевидно, изменяя размер окрестности, для которой строится гистограмма яркости, можно не допустить появления ложных объектов, но подобрать оптимальный, с точки зрения результата бинаризации, размер окрестности можно только экспериментально по набору тестовых изображений, отражающих особенности реальных сцен.

Для таких задач также существуют специальные методы бинаризации, позволяющие избавиться, хоть иногда и частично, от дальнейшей фильтрации шума и других ложных объектов изображения. Эти методы отличаются от основных добавлением дополнительных членов в уравнение с определёнными коэффициентами в зависимости от метода бинаризации. Эти отличия и дают данным методам преимущества перед основными.

Алгоритм *Niblack* является одним из самых известных локальных методов бинаризации [60]. Идея данного метода состоит в варьировании порога яркости от точки к точке на основании локального значения стандартного отклонения (рисунок 21). Порог яркости в точке  $(x, y)$  рассчитывается так:

$$B(x,y) = \mu(x,y) + k*s(x,y), \quad (18)$$

где  $\mu(x, y)$  – среднее, а  $s(x, y)$  – среднеквадратичное отклонение выборки для некоторой окрестности точки.



Рисунок 21 – Бинаризация локальным методом Niblack

Простота метода *Niblack* локальной адаптивной бинаризации позволяет достичь высокую скорость обработки изображений. Метод используется на практике для быстрой фильтрации контрастных изображений, на которых отсутствуют сильно зашумленные области с плавными переходами яркости.

Размер апертуры должен быть выбран так, чтобы сохранить локальные детали изображения и в то же время должен быть достаточно большим, чтобы снизить влияние шума. Значение  $k$  определяет, какую часть границы объекта взять в качестве самого объекта. Значение  $k = -0,2$  задаёт достаточно хорошее разделение объектов, если они представлены черным цветом, а значение  $k = +0,2$ , – если белым цветом.

В местах плавного перехода яркости метод дает ложные объекты с небольшим шумом. Метод получил свое распространение на практике благодаря его интеграции с этапом постпроцессинга. При этом скорость обработки падает в 3 раза, и количество ошибок сокращается на 20% [61].

#### *Метод Sauvola*

Улучшенный метод *Niblack*, предотвращающий наложение шума на объект и дающий более точное отделение объекта от фона (рисунок 22). Согласно данному методу, изображение обрабатывается с помощью концентрического окна с радиусом  $R$ . Обычно форма окна принимается квадратной. Оно последовательно слева направо сверху вниз накладываются на изображение с шагом равным диаметру. Для окна рассчитывается порог по формуле:

$$T = m * (1 - k * (1 - (s/R))), \quad (19)$$

где  $k$  определяет, что есть объект. Является константой и принимает часто значение 0.5.  $R$  – динамическое значение, радиус обработки изображения. Обычно равен 128. Значения  $s$  и  $m$  описаны выше.

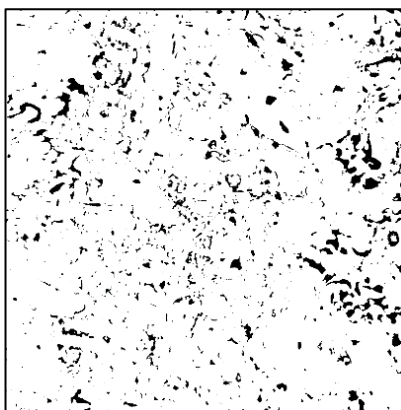


Рисунок 22 – Бинаризация локальным методом Sauvola

Метод Sauvola может превзойти по быстродействию Niblack применяя только для обработки четких и контрастных изображений, но есть трудности с изображениями, у которых зафиксировано недостаточно освещения, особенно когда значения пикселей объекта находятся близко друг к другу. При обработке тонких пересекающихся линий могут возникать разрывы, поэтому метод хорош для толстых линий и крупных объектов [62].

#### *Метод Christian*

Чтобы преодолеть вышеуказанную проблему, есть метод Christian. Тут предлагается определить местное пороговое значение, нормализуя контраст и шум изображения следующим образом:

$$T = (1 - k) * m + k * M + k * (s/R) * (m - M), \quad (20)$$

где  $k = 0,5$ ,  $M$  минимальное серое значение всего изображения и  $R$  максимальное среднеквадратичное отклонение серого значения из локального окна, которые вычисляются из гистограммы.

Этот подход достигает лучших результатов бинаризации среди трех методов локального порогового значения, описанные выше. Однако, производительность метода Christian значительно ухудшается, когда есть заметные изменения серого фоновых значений по всему изображению [63].

#### *Метод Bernsen*

Часто используется метод *Bernsen* для схематических и картографических изображений (рисунок 23).

Для каждого пикселя  $(x; y)$  выбирается порог яркости:

$$T = (T_{\text{макс}} + T_{\text{мин}}) / 2, \quad (21)$$

где  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – соответственно, самый низкий и самый высокий уровень яркости пикселей из квадратной окрестности пикселя  $(x; y)$ . Метод является наиболее быстрым среди остальных.



Рисунок 23 – Бинаризация локальным методом Bernsen

Имеет ряд недостатков: после обработки монотонных областей яркости формируются сильные паразитные помехи, в некоторых случаях приводит к появлению ложных черных пятен. Недостатки могут быть компенсированы с помощью дополнительной обработки – постпроцессинга. Метод является наиболее быстрым среди остальных, даже в совокупности с этапом постпроцессинга [64].

### 1.3.2 Морфологическая обработка бинарных изображений

#### Логические операции над бинарными изображениями

Термином «морфология» обычно обозначают области, изучающие формы и структуры объектов: например, в контексте биологии морфология изучает внутреннее строение растений и животных, а в контексте грамматики морфология изучает части речи. Мы же будем рассматривать т.н. математическую морфологию, предназначенную для анализа изображений и извлечения из них некоторых существенных признаков, например, границ или областей связности [65, 66].

Особенностью бинарных изображений является возможность применения к ним операций классической логики:

- логическое И;
- логическое ИЛИ;
- отрицание;
- другие операции логики и их комбинации.

Все логические операции (за исключением операции отрицания) выполняются над двумя изображениями, одно из которых является исходным, а второе в большинстве случаев – или специально сгенерированной маской, или обработанным исходным изображением. Плюсом логических операций является возможность их параллельного (в т.ч. аппаратного) выполнения.

Применение логических операций к изображению позволяет упростить его обработку. Например, используя операцию логического И, можно выделить часть изображения, предназначенную для дальнейшего анализа. Одной из наиболее интересных областей применения логических операций является задача обнаружения движения. Используя операцию исключающего ИЛИ, можно получить итоговое изображение, на котором будут отмечены только те пиксели, которые не совпадают на первых двух изображениях.

#### Смежность, связность, области и границы

Пусть  $V$  – множество значений яркости, используемое при определении понятия смежности [65, 66]. В бинарном изображении  $V = \{1\}$ , если смежными считаются соседние пиксели с единичным значением яркости. Для полутоновых изображений идея та же, но множество  $V$  обычно состоит из большего числа элементов. Например, при определении понятия смежности для пикселей с диапазоном возможных значений яркости от 0 до 255

множество  $V$  может быть любым подмножеством этих 256 значений. Мы будем рассматривать три вида смежности:

1) 4-смежность. Два пикселя  $p$  и  $q$  со значениями из множества  $V$  являются 4-смежными, если  $q$  входит в множество  $N_4(p)$ ;

2) 8-смежность. Два пикселя  $p$  и  $q$  со значениями из множества  $V$  являются 8-смежными, если  $q$  входит в множество  $N_8(p)$ ;

3)  $m$ -смежность (смешанная). Два пикселя  $p$  и  $q$  со значениями из множества  $V$  являются  $m$ -смежными, если:

а) элемент  $q$  входит в множество  $N_4(p)$  или

б) элемент  $q$  входит в множество  $N_D(p)$  и множество  $N_4(p) \cap N_4(q)$  не содержит элементов изображения со значением яркости из множества  $V$ .

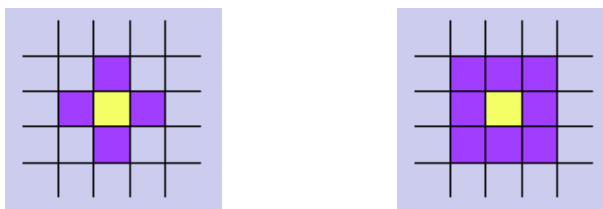
Смешанная смежность представляет собой модификацию 8-смежности с целью исключения неоднозначности, часто возникающей при использовании 8-смежности в чистом виде.

*Дискретным путем* (или кривой) от пикселя  $p$  с координатами  $(x, y)$  до пикселя  $q$  с координатами  $(s, t)$  называется неповторяющаяся последовательность пикселей с координатами  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ , где  $(x_0, y_0) = (x, y)$ ,  $(x_n, y_n) = (s, t)$  и пиксели  $(x_i, y_i)$  и  $(x_{i-1}, y_{i-1})$  являются смежными при  $1 \leq i \leq n$ . В этом случае  $n$  называется длиной пути. Если  $(x_0, y_0) = (x_n, y_n)$ , то путь называется замкнутым. Можно определить 4-, 8- или  $m$ -путь в соответствии с заданным типом смежности.

Пусть  $S$  – некоторое подмножество элементов изображения. Два его элемента  $p$  и  $q$  называются связными в  $S$ , если между ними существует путь, целиком состоящий из элементов подмножества  $S$ . Для любого пикселя  $p$  из  $S$  множество всех пикселей, связных с ним в  $S$ , называется связной компонентой (или компонентой связности)  $S$ . Если множество  $S$  содержит только одну компоненту связности, оно называется связным множеством.

У элемента изображения  $p$  с координатами  $(x, y)$  имеются четыре соседа по вертикали и горизонтали, координаты которых даются выражениями  $(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)$ .

Это множество пикселей называется четверкой соседей  $p$  и обозначается  $N_4(p)$ . Каждый его элемент находится на единичном расстоянии от  $(x, y)$ ; если же точка  $(x, y)$  лежит на краю изображения, то некоторые из соседей оказываются за пределами изображения (см. рисунок 24).



а)

б)

а – 4-связность; б – 8-связность

Рисунок 24 – Виды связности

Четыре соседа  $p$  по диагонали имеют координаты  $(x+1, y+1)$ ,  $(x+1, y-1)$ ,  $(x-1, y+1)$ ,  $(x-1, y-1)$  и обозначаются  $ND(p)$ . Вместе с четверкой соседей эти точки образуют так называемую восьмерку соседей, обозначаемую  $N8(p)$ . Как и выше, некоторые точки множеств  $ND(p)$  и  $N8(p)$  могут оказаться за пределами изображения, если точка  $(x, y)$  лежит на его краю.

Пусть  $R$  – подмножество элементов изображения. Будем называть его областью, если  $R$  – связное множество. Две области  $R_i$  и  $R_j$  называются смежными, если их объединение является связным множеством. Области, не являющиеся смежными, называются раздельными (несмежными). При рассмотрении областей подразумевают либо 4-, либо 8-смежность. Чтобы такие определения были содержательными, необходимо указать используемый тип смежности.

Понятия смежности и связности могут использоваться не только при непосредственной работе с пикселями, но и при выделении объектов, при этом результаты могут существенно различаться.

Если подмножество  $R$  есть все изображение (которое, напомним, является прямоугольной матрицей элементов), то его граница по определению состоит из элементов первого столбца и первой строки, а также элементов последнего столбца и последней строки. Такое доопределение необходимо, поскольку у этих элементов нет соседей за пределами изображения. Обычно, говоря об области, имеют в виду подмножество всего изображения, а элементы на границе области, которые совпадают с краем изображения, безусловно включаются в состав границы этой области.

При обсуждении областей и границ часто возникает понятие *контура*. Между контуром (в общем случае незамкнутым) и границей существует принципиальная разница. Граница конечной области всегда образует замкнутый путь и поэтому является «глобальным» понятием. Контур же состоит из пикселей, на которых значения производной яркости превышают заранее заданный порог. Поэтому по самой своей идее контур является «локальным» понятием, основанным на мере непрерывности уровня яркости в некоторой точке. Контурные точки могут соединяться, образуя сегменты контуров, и эти сегменты

иногда соединяются подобно границам, но такой случай имеет место не всегда. Единственным исключением, когда контуры и границы соответствуют друг другу, являются бинарные изображения. В зависимости от используемых вида связности и оператора выделения контуров, выделение контуров в бинарной области дает результаты, совпадающие с границей этой области. Будем понимать контуры как разрывы яркости, а границы – как замкнутые пути.

### Базовые операции теории множеств

Рассмотрим подмножество  $A$  двумерного целочисленного пространства  $Z^2$ . Если какой-то элемент  $a=(a_1, a_2)$  является элементом множества  $A$ , то это записывается так:  $a \in A$ , в противном случае так:  $a \notin A$ . Если в множество не содержится ни одного элемента, оно называется пустым и обозначается  $\emptyset$  [65, 66].

Один из способов задания множества – перечисление элементов, входящих в него. Например, запись  $A=\{1,2,3\}$  задаёт множество из трёх элементов 1,2,3, а запись  $B=\{b|b=\pm a, a \in A\}$  задаёт множество, состоящее из шести элементов:  $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ . Иногда такую запись называют конструктором множества. Также заметим, что все элементы  $A$  входят в  $B$ , поэтому множество  $A$  называется подмножеством множества  $B$  и обозначается  $A \subseteq B$ .

Объединением множеств  $A$  и  $B$  называется множество  $C=A \cup B$ , содержащие элементы, принадлежащие либо множеству  $A$ , либо множеству  $B$ , либо обоим множествам одновременно.

Пересечением множеств  $A$  и  $B$  называется множество  $C=A \cap B$ , содержащие только элементы, принадлежащие обоим множествам одновременно. Если в результате пересечения двух множеств получается пустое множество ( $A \cap B = \emptyset$ ), то такие множества называются непересекающимися или взаимоисключающими.

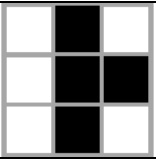
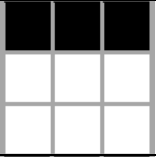
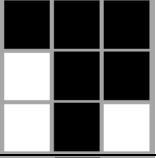
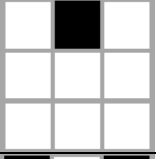
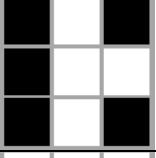
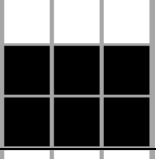
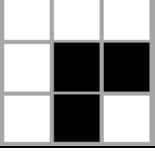
Дополнением множества называют элементы, не входящие в множество:  $A^c = \{e | e \notin A\}$ .

Разностью множеств  $A$  и  $B$  называется множество, содержащие элементы  $A$ , которых нет в  $B$ :  $A \setminus B = \{e | e \in A, e \notin B\}$ . Используя операцию дополнения множества, разность можно записать следующим образом  $A \setminus B = A \cap B^c$ .

В задачах обработки изображений довольно часто используется операция параллельного переноса:  $(A)t = \{e | e = a + t, a \in A\}$ . Вектор переноса  $t$  чаще всего задаётся в виде пары чисел  $(\Delta r, \Delta c)$ , где  $\Delta r$  – перенос в направлении строк, а  $\Delta c$  – перенос в направлении столбцов изображения. В таблице 2 дано графическое пояснение описанных операций:



Таблица 2 – Графическая интерпретация операций над множествами

Операция	Обозначение	Результат
Множество $A$	$A$	
Множество $B$	$B$	
Объединение	$A \cup B$	
Пересечение	$A \cap B$	
Дополнение $A$	$A^c$	
Дополнение $B$	$B^c$	
Разность	$A \setminus B$	

### Основные морфологические операции

Некоторые операции выполняют однородную обработку целого изображения. Изображение может быть слишком темным, например, максимальная яркость равна 120, так что все значения яркости можно увеличить в два раза для улучшения вида изображения при выводе на экран. Возможно, изображение было получено с помощью широкоугольного объектива («рыбий глаз») и требуется получить выходное изображение без искажений объектива: в данном случае можно «переместить» значения пикселей в другие положения на изображении [65, 66].

Изображение можно сформировать путем сложения или вычитания двух исходных изображений. Вычитание изображений часто применяется для обнаружения изменений в течение некоторого промежутка времени.

*Дилатация* (морфологическое расширение) – свёртка изображения или выделенной области изображения с некоторым ядром. Ядро может иметь произвольную форму и размер. При этом в ядре выделяется единственная *ведущая позиция*, которая совмещается с текущим пикселем при вычислении свёртки. Во многих случаях в качестве ядра выбирается квадрат или круг с ведущей позицией в центре. Ядро можно рассматривать как шаблон или маску. Применение дилатации сводится к проходу шаблоном по всему изображению и применению оператора поиска локального максимума к интенсивностям пикселей изображения, которые накрываются шаблоном. Такая операция вызывает рост тёмных в нашем случае областей на изображении. *Эрозия* (морфологическое сужение) – обратная операция. Действие эрозии подобно дилатации, разница лишь в том, что используется оператор поиска локального минимума (см. рисунок 25).

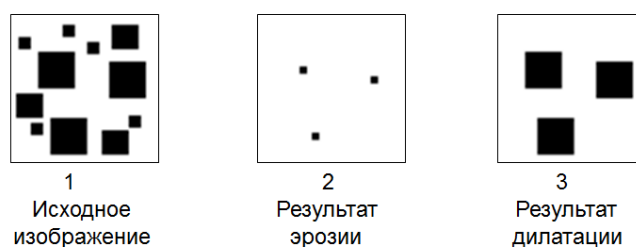


Рисунок 25 – Принцип работы операций дилатации и эрозии

Дилатация не позволяет полностью восстанавливать объекты после эрозии. В ходе работы была создана процедура «умной» эрозии, результатом которой являются тонкие однопиксельные границы зёрен.

*Размыкание* сглаживает контуры объекта, обрывает узкие перешейки и ликвидирует выступы небольшой ширины. *Замыкание* также проявляет тенденцию к сглаживанию участков контуров, но, в отличие от размыкания, «заливает» узкие разрывы и длинные углубления малой ширины, а также ликвидирует небольшие отверстия и заполняет промежутки контура.

Для улучшения [55] изображений часто применяется операция *выравнивания гистограммы*. При этом к изображению применяется оператор, на который накладываются два условия: (а) в выходном изображении должны использоваться все допустимые значения интенсивности и (б) выходное изображение должно содержать примерно равное количество пикселей для каждого значения интенсивности. Условие (а) обеспечивает хорошее восприятие изображения, а условие (б) является дополнительным и его эффективность должна оцениваться из экспериментов.

Для определения плоскостности и выделения участков изломов существует *метод второго градиента*, показывающий частоту изменения интенсивности объектов изображения. В данном методе используются типовые участки исследуемых объектов для определения критического значения второго градиента (рисунок 26).

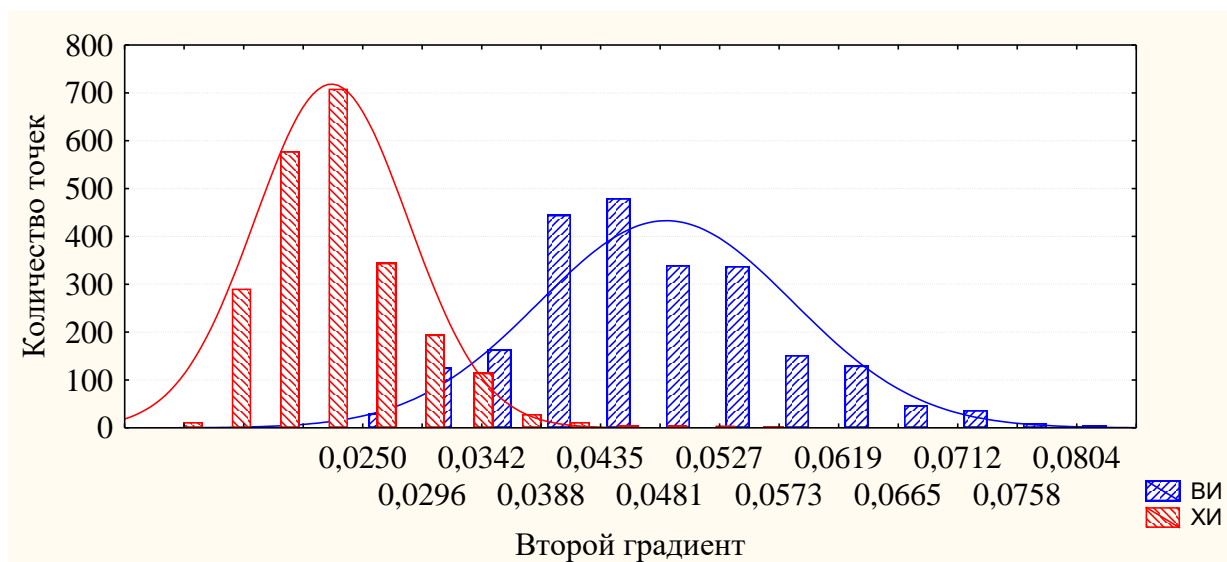


Рисунок 26 – Принцип определения критического значения 2-го градиента

Так фасетки и карбиды имеют равномерное распределение интенсивности на своей поверхности, что позволяет их отделить от матрицы, имеющей большую частоту изменения интенсивности яркости, или от ямок и эвтектики [67].

*Сегментация* – это процесс разбиения изображения на группы с учетом подобия характеристик пикселей. Основная идея этого процесса состоит в следующем: каждый пиксель изображения может быть связан с некоторыми визуальными свойствами, такими как яркость, цвет и текстура. В пределах одного объекта или одной части объекта эти атрибуты изменяются относительно мало, тогда как при переходе через границу от одного объекта к другому обычно происходит существенное изменение одного или другого из этих атрибутов. Необходимо найти вариант разбиения изображения на такие множества пикселей, что указанные ограничения удовлетворяются в максимально возможной степени.

Методы сегментации можно разделить на два класса: автоматические – не требующие взаимодействия с пользователем и интерактивные – использующие пользовательский ввод непосредственно в процессе работы. В данной работе рассматриваются только автоматические методы.

Задачи автоматической сегментации делятся на два класса:

- выделение областей изображения с известными свойствами;
- разбиение изображения на однородные области.

Между этими двумя постановками задачи есть принципиальная разница. В первом случае задача сегментации состоит в поиске определенных областей, о которых имеется априорная информация (например, мы знаем цвет, форму областей, или интересующие нас области представляют собой изображения известного объекта). Методы этой группы узко специализированы для каждой конкретной задачи. Сегментация в такой постановке используется в основном в задачах машинного зрения (анализ сцен, поиск объектов на изображении).

Во втором случае никакая априорная информация о свойствах областей не используется, зато на само разбиение изображения накладываются некоторые условия (например, все области должны быть однородны по цвету и текстуре). Так как при такой постановке задачи сегментации не используется априорная информация об изображенных объектах, то методы этой группы универсальны и применимы к любым изображениям. В основном сегментация в этой постановке применяется на начальном этапе решения задачи для того, чтобы получить представление изображения в более удобном виде для дальнейшей работы.

Получив бинарное изображение (например, путем пороговой фильтрации), выделение связных компонент пикселей изображения дает набор областей, часть из которых, как ожидается, является объектом. Определением связной компоненты является множество пикселей, в окрестности каждого из которых присутствует как минимум один пиксель, также принадлежащий данной области.

Выделение связных компонент производится методом последовательного сканирования. Метод заключается в сканировании изображения слева направо и сверху вниз, и выполнения для каждого пикселя (x,y) определенных действий.

После проведения сканирования производится разрешение эквивалентностей областей и переразметка изображения с учетом этих эквивалентностей. После того, как на изображении обнаружены связные области пикселей, предположительно являющиеся объектами, производится проверка формы этих областей на удовлетворение определенным ограничениям: пропорции, соотношение периметра и площади, эксцентриситет и другие.

Существует 2 известных метода разметки: рекурсивный и итеративный.

Для выделения областей с пониженной яркостью нерегулярной формы со случайными координатами проявления используется рекурсивный алгоритм. Недостатком рекурсивного метода является медленная работа и большой расход памяти.

Существует и итеративный метод, который в литературе часто встречается под названием "алгоритм последовательного сканирования". После того как мы обошли всю картинку, нам нужно совершить ещё один обход и произвести переразметку с учётом

эквивалентности областей, так как бывают конфликты в присвоение пикселя той или иной области.

Важными свойствами перечисленных методов выделения областей объекта является простота реализации и малая вычислительная сложность. Основным недостатком этих методов является то, что они способны обнаружить и сегментировать от окружения лишь хорошо локализованные, четко отделенные области.

### **1.3.3 Измерение параметров объектов изображения**

Полученный таким образом скелет структуры может быть подвергнут поэлементному измерению. Для сопоставления различных вариантов структур полезна, в частности, оценка таких параметров, как средние площадь и периметр объектов, объемная доля, занимаемая однотипными элементами структуры (например, карбидами), количество, их плотность (на единицу площади), средний размер структурных составляющих (либо их площадь), их ориентировка и анизотропность. Последний параметр структуры, в частности, важен для определения возможности допущения об однородной деформации фазы, в связи с прогнозом износостойкости и риска преждевременного разрушения при оценке роли неоднородности структур [68].

Для измерения объектов обычно используется 2 стандартные методики в зависимости от цели и типа объектов измерения: методы секущих и площадей. Очевидно, что метод секущих гораздо менее информативен, однако для некоторых изображений его использование необходимо из-за слияния большого количества объектов, что характерно для изображений низкого качества съёмки или протравленности.

При сопоставлении выборок результатов измерений строения структур твердых сплавов следует иметь в виду, что распределение значений параметров их геометрии нередко имеет ярко выраженный асимметричный характер, например, как в случае результатов измерения анизотропии белой составляющей на бинарном изображении. Отсюда требуется известная осторожность при использовании средних значений для сравнения различных выборок.

Классическим параметрическим методом, позволяющим сравнить средние значения изучаемого признака, рассчитанные на основе двух выборок, является t-тест Стьюдента (или просто «t-тест»).

Критерий Стьюдента применяется, если нужно сравнить только две группы количественных признаков с нормальным распределением (частный случай дисперсионного анализа). Но применение его является оправданным лишь примерно в 20% случаев. Этим

критерием нельзя пользоваться, сравнивая попарно несколько групп, в этом случае необходимо применять дисперсионный анализ. Ошибочное использование критерия Стьюдента увеличивает вероятность «выявить» несуществующие различия.

Применение «t-теста» допустимо при наличии следующих условий:

- соответствие частотного распределения данных в каждой из сравниваемых групп закону нормального распределения;
- отсутствие статистически значимой разницы между дисперсиями сравниваемых групп (однородность дисперсий);
- наличие достаточно большого числа наблюдений в обеих сравниваемых группах (не меньше 20).

Если данные условия не соблюдать, то применение теста Стьюдента приведет к ошибочным результатам. Наиболее «опасным» является несоблюдение требования о нормальности распределения значений признака в каждой из сравниваемых групп. Существует достаточно большое число способов проверить, соответствуют ли анализируемые данные нормальному распределению.

Проверка гипотезы о том, что выборка  $x_1, x_2, \dots, x_n$  взята из распределения с плотностью вероятности  $w(x)$  или функцией распределения  $W(x)$  осуществляется с помощью критериев согласия [69]. Самый распространенный из них – критерий  $\chi^2$  (критерий Пирсона). Для проверки гипотезы по этому критерию диапазон изменения выборки разбивают на  $m$  интервалов и рассчитывают количество попаданий данных в каждый интервал  $n_1, n_2, \dots, n_m$ , т.е. строят гистограмму распределения выборки. По выборке рассчитывают параметры проверяемого распределения  $w(x)$ , затем по нему вычисляют вероятность попадания величины  $x$  в каждый интервал

$$p_i = \int_{l_{i-1}}^{l_i} w(x) dx, \quad (22)$$

где  $l_{i-1}, l_i$  – левая и правая границы  $i$ -го интервала.

Проверочная статистика гипотезы – взвешенная сумма квадратов разностей наблюдаемого и рассчитанного по распределению  $w(x)$  числа попаданий в интервалы (разряды гистограммы):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (23)$$

Для эффективного применения критерия Пирсона необходимо, чтобы в каждом интервале было не менее пяти наблюдений, а число интервалов было не менее восьми. В идеале в каждом разряде гистограммы должно быть одинаковое количество данных, при этом сами интервалы получатся разного размера. Выполнить это условие довольно сложно, проще объединять интервалы, в которых менее пяти данных. В любом случае значение критерия  $\chi^2$ , а вместе с ним и величина  $\alpha$  ( $\chi^2$ ) зависят от числа разрядов гистограммы и от того, как выбраны их границы. Другой недостаток объединения в гистограмму в том, что внутри каждого интервала данные обезличиваются, при этом часть информации теряется.

Следует отметить, что мощность теста хи-квадрат при проверке нормальности распределения относительно невысока. Поэтому лучше воспользоваться другими тестами.

Критерии, не связанные с группировкой данных в гистограмму, сравнивают функции распределения, а не плотности вероятности. Для этого выборка  $x_1, x_2, \dots, x_n$  выстраивается в вариационный ряд по возрастанию (упорядочивается по возрастанию), и по ней строится эмпирическая функция распределения  $F(x)$ .

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < x_1 \\ i/n & x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad i = 1, \dots, n-1 \\ 1 & x > x_n \end{cases} \quad (24)$$

$F(x)$  – ступенчатая функция с высотой ступеньки  $1/n$ .

Критериями служат различные меры близости эмпирической  $F(x)$  и проверяемой  $W(x)$  функций распределения. В частности, для критерия Колмогорова-Смирнова (К-С критерия) это максимальная разность функций распределения  $K_n = \max (|F(x) - W(x)|)$ . Проверочной статистикой является величина

$$\sqrt{n}K_n = \sqrt{n} \max(|F(x) - W(x)|) \quad (25)$$

Гипотеза о виде проверяемого распределения не отвергается с уровнем значимости  $\alpha$ , если значения критериев меньше критических для выбранного  $\alpha$ . Основные критические значения К-С критерия приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Критические значения К-С критерия

Критерий	Уровень значимости $\alpha$								
	0,001	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
$\sqrt{n}K_n$	1,95	1,63	1,36	1,22	1,14	1,07	0,97	0,90	0,83

Это есть алгоритм полного извлечения информации, который универсален к виду распределения [70]. Нормировав все значения параметра геометрии структуры  $\xi$  так, чтобы в интервале  $\{\xi_{\min}; \xi_{\max}\}$  они менялись в пределах  $0 \leq x \leq 1$ , результатам их измерения параметра геометрии структуры для одной выборки (образца) присваивали номера  $1 \leq r \leq N$  в порядке  $x_{r+1} \geq x_r$  и строили на отрезке  $[0; 1]$  эмпирическое кумулятивное распределение

$$\Phi(x) = r(x)/N. \quad (26)$$

Разность распределений  $\Phi_1(x)$  и  $\Phi_2(x)$  для двух выборок

$$D(x) = \Phi_2(x) - \Phi_1(x) \quad (27)$$

в некоторой точке  $x^*$  наибольшая:

$$|D^*(x^*)| = \max |D(x)|; \quad (28)$$

Если два эмпирических распределения совпадают, то величина  $|D^*|$  может с вероятностью  $\alpha$  превышать уровень критерия Колмогорова-Смирнова

$$D_\alpha = \lambda \sqrt{[N_1^{-1} + N_2^{-1}]}. \quad (29)$$

Для малых объемов выборок ( $N \leq 20$ ) точные значения  $D_\alpha$  ( $\alpha$ ;  $N_1$ ;  $N_2$ ) приведены в таблицах [71], для больших объемов существует приближенная формула [72].

$$\lambda \approx \sqrt{[-\ln \alpha]/2}. \quad (30)$$

При  $\alpha = 0,05$  она дает для  $\lambda$  ошибку менее 2%, и при этом фактическая надежность результата будет лучше [73]. Расстояние  $D^*$  инвариантно относительно любых нелинейных преобразований, монотонно (с сохранением порядка) отображающих  $x$  на некоторые другие переменные [74].

Измерение различий между случайными множествами точек на плоскости (или центров частиц, малых в сравнении с расстоянием  $r$  между ними) – широкораспространенная задача распознавания образов [75]. В качестве меры порядка во множестве случайных точек используют одно число (энтропию распределения, корреляционную размерность [76]), набор чисел (например, некоторые средние от расстояний  $r_s$  до  $s$ -го соседа данной точки) или же



непрерывную функцию:  $K$ -функцию Рипли [77] (среднюю плотность точек внутри сферы с центром в данной точке), ее нормированную производную – радиальную плотность распределения центров, парную корреляционную функцию [78]. Ряд алгоритмов использует разбиение плоскости на ячейки Вороного [79, 80]: все точки внутри такой ячейки лежат ближе к его центру, чем к центрам всех других. Размещение точек описывают тогда моментами распределения площадей ячеек. «Кучность» пятен оценивают по уменьшению их числа или периметра из-за слияний при дилатации – пошаговом смещении их контуров снаружи.

Базой для сравнения во всех этих случаях служит «наиболее беспорядочное» пуассоново (некоррелированное) распределение точек [81], а оценки значимости различий так или иначе исходят из принципа максимума правдоподобия [82]. Множество же употребляемых алгоритмов обусловлено большим разнообразием объектов и задач.

Меру на шкале регулярность-скупенность дает статистика расстояний  $L_y$  между центрами ближайших частиц. Ближайшие выделяют, разбив пространство на полиэдры Вороного: если центры всех частиц соединить отрезками и через середину каждого провести перпендикулярно к нему плоскость, то около каждой частицы ими очерчен многогранник, в котором все точки ближе к центру "своей" частицы, чем "чужой". Отрезки  $L_y$  соединяют центры смежных полиэдров Вороного  $i$  и  $j$ . Двойственное к этому разбиение пространства – на полиэдры Дирихле – четырехгранные пирамиды с ребрами  $L_{xy}$ .

Два "хвоста" распределения  $L_y$  описывают "пустыри" (где течение легче) и "гнезда" (где легче вязкое разрушение). Размер и кучность этих слабых мест определяют сопротивление малым пластическим деформациям и разрушению.

### 1.3.4 Диаграмма Вороного

Диаграмма Вороного заданного конечного множества  $M$  точек плоскости (пространства) представляет такое ее разбиение, при котором каждая область данного разбиения образует множество точек, расположенных ближе к одному из элементов множества  $M$ , чем к любому другому элементу этого множества.

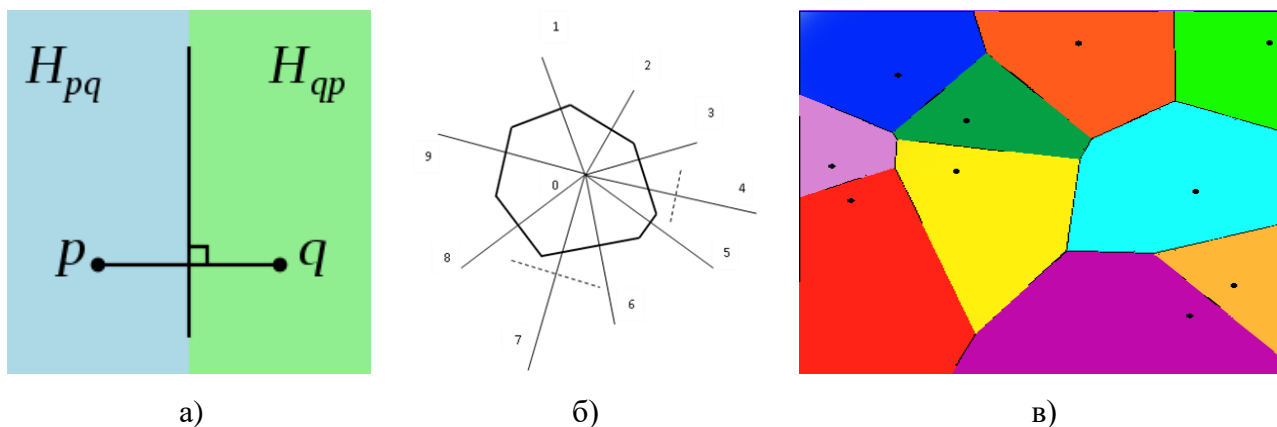
Даны  $n$  точек  $P_i(x_i, y_i)$  на плоскости. Рассмотрим разбиение плоскости на  $n$  областей  $V_i$  (называемых многоугольниками Вороного или ячейками Вороного, иногда – многоугольниками близости, ячейками Дирихле, разбиением Тиссена), где  $V_i$  – множество всех точек плоскости, которые находятся ближе к точке  $P_i$ , чем ко всем остальным точкам  $P_k$ :

$$V_i = \{(x, y) : \rho((x, y), P_i) = \min_{k=1 \dots N} \rho((x, y), P_k)\} \quad (31)$$

Само разбиение плоскости называется диаграммой Вороного данного набора точек  $P_k$ . Диаграмма состоит из так называемых **локусов** – областей, в которых присутствуют все точки, которые находятся ближе к данной точке, чем ко всем остальным. В диаграмме Вороного локусы являются выпуклыми многоугольниками [79]. Сформулируем определение диаграммы Вороного  $n$  точек на плоскости ( $n$  – натуральное) – это разбиение плоскости, состоящее из  $n$  локусов (для каждой точки по локусу).

Как строить локус? По определению он будет строиться так: пусть дано множество из  $n$  точек, для которого мы строим диаграмму (рисунок 27). Возьмём конкретную точку  $p$ , для которой строим локус, и ещё одну точку из данного нам множества –  $q$  (не равную  $p$ ). Проведём отрезок, соединяющий эти две точки, и проведём прямую, которая будет являться серединным перпендикуляром данного отрезка. Эта прямая делит плоскость на две полуплоскости – в одной лежит точка  $p$ , в другой лежит точка  $q$ . В данном случае локусами этих двух точек являются полученные полуплоскости. То есть для того, чтобы построить локус точки  $p$ , нужно получить пересечение всех таких полуплоскостей (то есть на месте  $q$  побывают все точки данного множества, кроме  $p$ ).

Точку, для которой строится локус, называют **сайтом**. На рисунке 27, в локусы помечены разными цветами.



а, б – схема построения; в – локусы разного цвета

Рисунок 27 – Построение локуса

Алгоритмы построения диаграммы как раз и есть не что иное, как алгоритмы построения этих самых локусов для всех точек из заданного набора. Здесь идея в том, чтобы пересекать не полуплоскости, а именно серединные перпендикуляры отрезков, соединяющих данную точку со всеми другими точками. То есть мы, следуя определению ячейки Вороного, будем строить локус для точки  $p$  так:

1. Получаем  $n-1$  прямую (серединные перпендикуляры), так как мы провели серединные перпендикуляры всех отрезков, соединяющих данную точку  $p$  с остальными;
2. Пересекаем попарно все прямые, получаем  $O(n^2)$  точек пересечения (потому что каждая прямая может пересечь все другие, в «худшем случае»);
3. Проверяем все эти  $O(n^2)$  точек на принадлежность каждой из  $n-1$  полуплоскостей, то есть получаем уже асимптотику  $O(n^3)$ . Соответственно те точки, которые принадлежат всем полуплоскостям, и будут вершинами ячейки Вороного точки  $p$ ;
4. Проделываем первые три шага для всех  $n$  точек, получаем итоговую асимптотику  $O(n^4)$ .

Учет формы и размеров объектов значительно усложняет алгоритм и затраты компьютерного времени для их построения.

### 1.3.5 Фурье-анализ

#### Одномерный Фурье-анализ

Для анализа периодических сигналов в инженерной практике широко используют мощный математический аппарат, именуемый в общем «Фурье-анализ». Даже функции, не являющиеся периодическими (но имеющие конечную площадь под графиком), могут быть выражены в виде интеграла от синусов и/или косинусов, умноженных на некоторую весовую функцию (рисунок 28). Нижняя функция является суммой четырех расположенных над ней функций. В таком случае мы имеем дело с преобразованием Фурье, польза которого во многих теоретических и прикладных задачах оказывается даже большей, чем ряда Фурье. Оба представления обладают важной характерной особенностью. Функция, заданная как рядом, так и преобразованием Фурье, может быть полностью, без потери информации, восстановлена (реконструирована) при помощи некоторой процедуры обращения. Это свойство является одним из наиболее важных свойств рассматриваемых представлений, поскольку оно позволяет работать в «Фурье-области», а затем вернуться в исходную область определения функции без потери какой-либо информации. В конечном счете именно эффективность применения аппарата рядов и преобразования Фурье для решения практических задач превратила его в широко используемый и изучаемый фундаментальный инструмент [65].

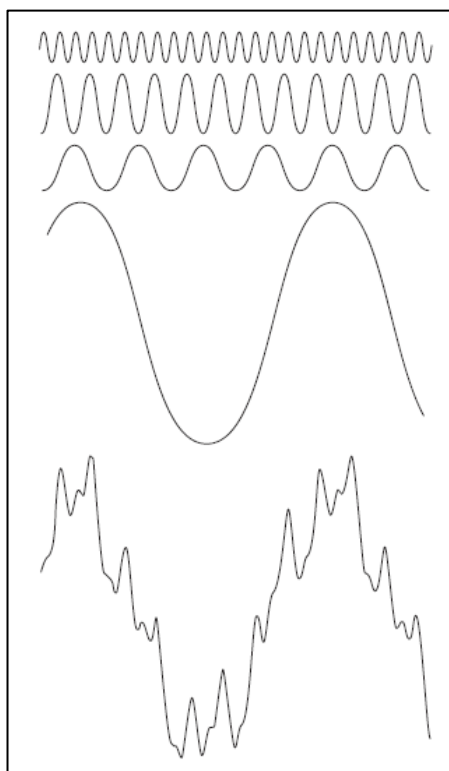


Рисунок 28 – Разложение функции по периодическим составляющим

Не так давно, в 19 веке, французский математик Жан Батист Жозеф Фурье показал, что любую функцию, удовлетворяющую некоторым условиям (непрерывность во времени, периодичность, удовлетворение условиям Дирихле) можно разложить в ряд, который в дальнейшем получил его имя – **ряд Фурье** [83].

Пусть есть  $n$  значений последовательности  $x_i = x(t_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1$ , заданной в равноотстоящих точках  $t_i = i$  [69]. Построим функцию – конечный ряд Фурье:

$$P_m(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{k=1}^m \left( A_k \cos \frac{2\pi kt}{n} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{n} \right), \quad (32)$$

коэффициенты  $A_k$  и  $B_k$  которого:

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cos \frac{2\pi ki}{n}, \quad B_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \sin \frac{2\pi ki}{n} \quad \left( 0 \leq k \leq \frac{n}{2} \right), \quad (33)$$

Функция  $P(t)$ , определяемая как

$$P(t) = \begin{cases} P_m(t) & m = \frac{n-1}{2}, n - \text{нечетное} \\ P_m(t) + \frac{1}{2}A_{n/2} \cos \pi t, m = \frac{n}{2} - 1, n - \text{четное} \end{cases} \quad (34)$$

совпадает со значениями последовательности  $x_i$  при всех  $t_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n-1$ .

Функция  $P(t)$  представляет разложение последовательности  $x_i$  по периодическим (гармоническим) составляющим. Длина волны с номером  $k$   $\lambda_k = \frac{n}{k}$ , а соответствующая ей частота  $f_k = \frac{k}{n}$ . Минимальная частота  $f_{\min} = \frac{1}{n}$ , максимальная (при четном  $n$ )  $f_{\max} = \frac{1}{2}$ . В выражениях (25) – (27)  $k$  – число волн длиной  $\lambda_k$ , укладывающихся в интервале  $t \in (0; n)$ .

Представим волну с номером  $k$ , включающую косинусную и синусную составляющие, как

$$A_k \cos \frac{2\pi kt}{n} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{n} = C_k \cos \left( \frac{2\pi kt}{n} + \varphi_k \right), \quad (35)$$

где  $C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$  – амплитуда  $k$ -й волны, а  $\varphi_k = -\arctg(B_k/A_k)$  – ее фаза.

Последовательность  $C_k(f_k)$  или  $C_k(k)$  – образ последовательности  $x_i$  в пространстве периодических функций. Она называется **спектром последовательности**  $x_i$ . Величину  $C_k$  можно рассматривать как вклад  $k$ -й гармоники в разложение последовательности  $x_i$  по периодическим составляющим. По виду зависимости  $C_k(f_k)$  можно получить информацию о таких особенностях последовательности  $x_i$ , которые трудно или неудобно изучать по самой последовательности, в первую очередь, о наличии характерных периодических составляющих.

Используя формулы 26, 28 можно рассчитать спектр любой последовательности, независимо от того, является она случайной или нет. Если последовательность  $x_i$  случайна, то и амплитуда  $C_k$  – случайные числа. Когда анализируются случайные последовательности, вместо зависимостей  $C_k(f_k)$  обычно строятся зависимости  $C_K^2(f_k)$  или  $C_K^2(k)$ , называемые периодограммами (периодограммами также называются зависимости  $(\frac{n}{2})C_K^2(f_k)$  или  $(\frac{n}{2})C_K^2(k)$ ). Величину  $C_K^2$  можно интерпретировать как долю общей дисперсии случайной последовательности  $x_i$ , приходящуюся на ее периодическую составляющую с частотой  $f_k$ . Если конечная последовательность  $x_i$   $i = 0, 1, \dots, n-1$  стационарная, то ее периодограмму  $C_K^2$  можно было бы рассматривать как оценку некоторой истинной периодограммы, которая получалась бы при  $n \rightarrow \infty$ . Для получения состоятельных оценок выборочную периодограмму  $C_K^2(f_k)$  сглаживают по узкому интервалу частот  $\Delta f$ , такому, внутри которого сама периодограмма меняется незначительно:

$$G_k = \sum_{l=-q}^q C_{k+l}^2(f_{k+l}) w_l, \quad (36)$$

где  $f_{k-q} \dots f_{k+q} - 2q + 1$  частот в интервале  $\Delta f$ ,  $w_l$  – значения весовой функции.

Дискретное преобразование Фурье призвано решить проблему необходимости непрерывности и бесконечности во времени сигнала. По сути, мы полагаем, что вырезали какую-то часть бесконечного сигнала, а всю остальную временную область считаем этот сигнал нулевым. Математически это означает, что, имея исследуемую бесконечную во времени функцию  $f(t)$ , мы умножаем ее на некоторую оконную функцию  $w(t)$ , которая обращается в ноль везде, кроме интересующего нас интервала времени. На практике в спектре мы увидим что-то вроде этого:

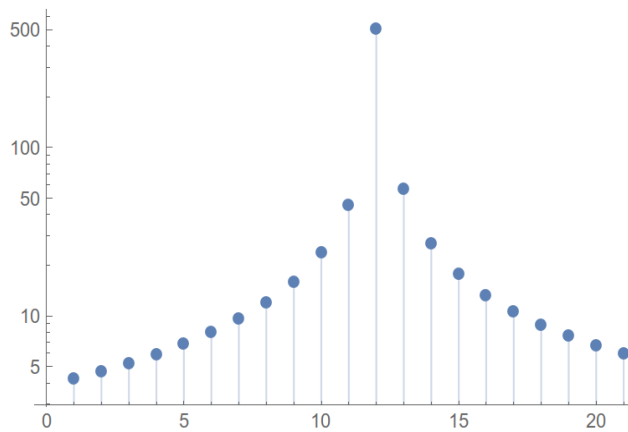


Рисунок 29 – Эффект растекания спектра

Этот эффект именуют также **растеканием спектра**. А шумы, появляющиеся вследствие растекания спектра, соответственно, **боковыми лепестками**. Для борьбы с боковыми лепестками применяют другие, непрямоугольные оконные функции. Основной характеристикой «эффективности» оконной функции является **уровень боковых лепестков**.

Весовые функции – функции с максимумом на частоте  $f_k$  и быстро убывающие на краях интервала частот  $\Delta f$ ;  $\sum_{l=-q}^q w_l = 1$ . В практике спектрального анализа используется несколько разных весовых функций, называемых иначе спектральными окнами, отличающихся подробностями поведения на краях интервала  $\Delta f$ . Например, **окно Хэмминга**:

$$w_l = 0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi l}{q}, 0 \leq l \leq q \quad (37)$$

и  $w_{-l} = w_l$ .

Зависимости  $G_k(f_k)$  или  $G_k(k)$  называются спектральными плотностями; они сходятся к своим истинным значениям при увеличении длины последовательности  $x_i$ . Спектральные плотности позволяют лучше, чем периодограммы выделять интервалы частот, внутри которых наблюдаются максимумы спектральной плотности, т.е. группы близких гармоник с относительно большими амплитудами.

Перед проведением спектрального анализа последовательность  $x_i$  центрируется, иначе на периодограммах коэффициент  $C_0^2$  (равный квадрату удвоенного среднего последовательности  $x_i$ ) может значительно превышать все остальные. Если последовательность  $x_i$  имеет заметный макронаклон, то из нее также вычитают линейный тренд. Линейный тренд не содержит периодических составляющих, но, будучи большим, может исказить весь спектр.

## Двумерный Фурье-анализ

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для двумерного массива чисел размера  $M \times N$  определяется следующим образом:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}, \quad (38)$$

где  $f(x, y)$  – цифровое изображение размерами  $M \times N$ .

Как и в одномерном случае, выражение (31) должно быть вычислено для всех значений дискретных переменных  $u$  и  $v$  в диапазонах  $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$  и  $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$  [65].

Иногда постоянный множитель  $1/MN$  вместо формулы обратного преобразования ставят в формулу прямого преобразования Фурье; иногда эту константу выражают как  $1/\sqrt{MN}$  и включают в формулы как прямого, так и обратного преобразований, что создает более симметричный вид дискретной пары преобразований Фурье. Любая из указанных формулировок корректна при условии, что все выкладки единообразны по стилю.

Если имеется преобразование  $F(u, v)$ , можно получить  $f(x, y)$  при помощи обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ)

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{-i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}, \quad (39)$$

для  $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$  и  $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

Выражения (31, 32) составляют дискретную пару двумерных ДПФ. В случае обработки изображений компоненты двумерного ДПФ называют пространственными частотами.

Важным свойством двумерного преобразования Фурье является возможность его вычисления с использованием процедуры одномерного ДПФ:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} e^{-i2\pi ux/M} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi vy/N} = \sum_{x=0}^{M-1} F(x, v) e^{-i2\pi ux/M} \quad (40)$$

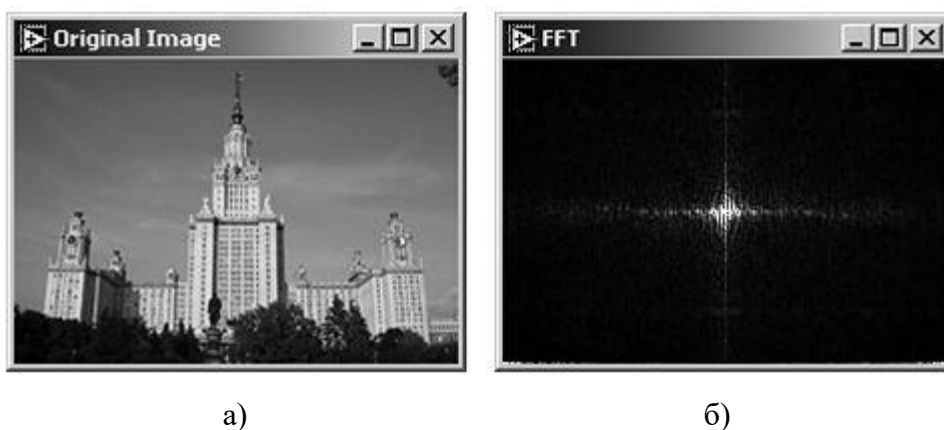
где

$$F(x, v) = \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi vy/N} \quad (41)$$



Видно, что для каждого значения  $x$  функция  $F(x, v)$  ( $v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ) является просто одномерным ДПФ соответствующей строки двумерной функции  $f(x, y)$ , ( $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ). Варьируя в (34)  $x$  от 0 до  $M - 1$ , мы получаем набор ДПФ для всех строк  $f(x, y)$ . Вычисления согласно (33) аналогично представляются одномерными ДПФ столбцов  $F(x, v)$ .

При вычислении двумерного преобразования Фурье низкие частоты будут сосредоточены в углах матрицы, что не очень удобно для дальнейшей обработки полученной информации. Для перевода получения представления двумерного преобразования Фурье, в котором низкие частоты сосредоточены в центре матрицы, можно выполнить простую процедуру, заключающуюся в умножении исходных данных на  $-1^{m+n}$ . На рисунке 30 показаны исходное изображение и его Фурье-образ [65].



а – полутоновое изображение; б – его Фурье-образ

Рисунок 30 – Двумерное преобразование Фурье

Таким образом, можно сделать вывод, что двумерное ДПФ от  $f(x, y)$  может быть получено вычислением одномерных преобразований по каждой строке  $f(x, y)$ , а затем вычислением одномерных преобразований по каждому столбцу полученного промежуточного результата. Это является важным упрощением, поскольку в каждый момент времени нам нужно иметь дело всего только с одной переменной. Аналогичный подход применим и к вычислению двумерного обратного ДПФ при помощи одномерного обратного ДПФ.

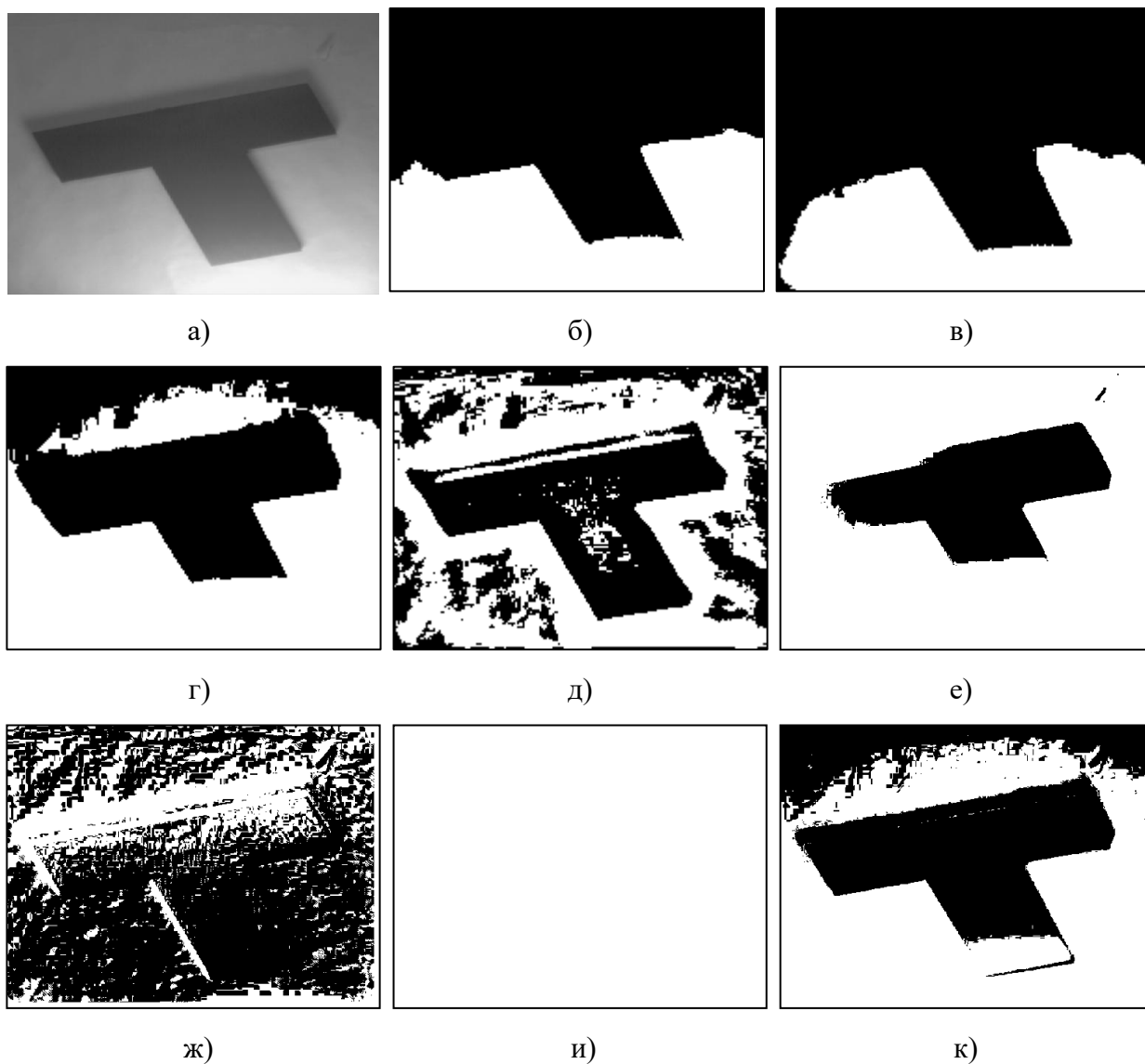
Можно также выразить (33) и (34) в виде одномерного преобразования по столбцам, за которым следует преобразование по строкам. Конечный результат будет тем же самым.

Для исследования периодичности структур вместо двумерного ДПФ всей матрицы изображения рекомендуется использование одномерного ДПФ в разных направлениях. Это связано с отсутствием физического смысла у получаемых при помощи двумерного ДПФ результатов. Одномерный ДПФ может определить периодичность в разных направлениях.

## 1.4 Применение методов в других областях

Покажем примеры использования всех вариантов бинаризации (методы среднего, Оцу, С-образной, локального среднего, Bernsen, Niblack, Sauvola, Christian) в различных областях науки.

На рисунке 31 объектом является буква Т с неровным освещением. Фон меняется от белого к черному снизу вверх, что усложняет обработку [84, 85, 86].



а – исходное изображение; б – метод среднего; в – метод Оцу; г – метод С-образной кривой; д – локальный метод среднего; е – метод *Bernsen*; ж – метод *Niblack*; и – метод *Sauvola*; к – метод *Christian*

Рисунок 31 – Бинаризация изображения с неровным освещением

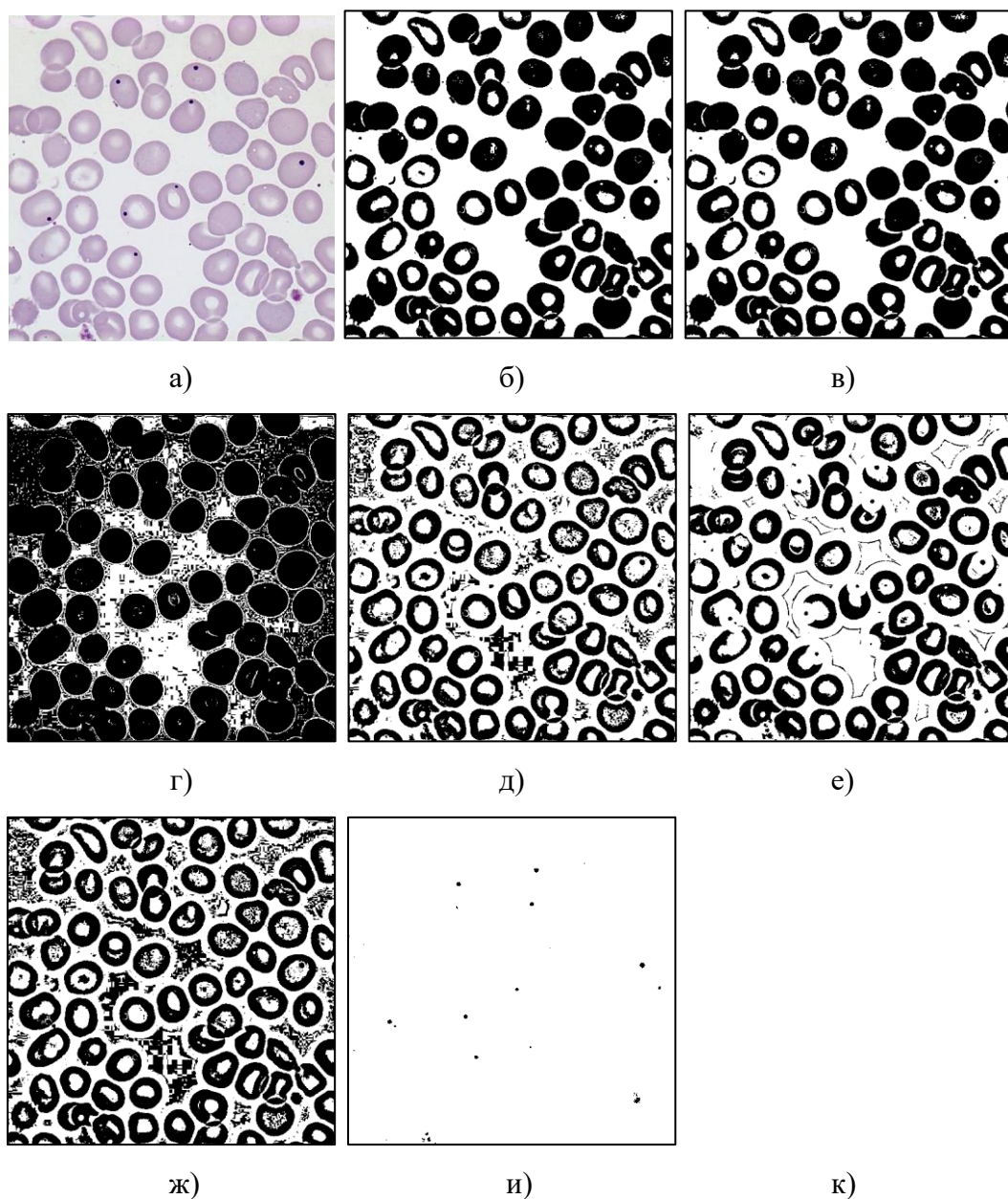
Обработка разного шрифта с различным фоном можно рассмотреть на рисунке 32. На изображении можно определить три серых уровня цвета, ближе к белому – это фон, средний – это солнце и ближе к черному – это текст. Имеется некая сложность в определении объекта [87].



а – исходное изображение; б – метод среднего; в – метод Оцу; г – метод С-образной кривой; д – локальный метод среднего; е – метод *Bernsen*; ж – метод *Niblack*; и – метод *Sauvola*; к – метод *Christian*

Рисунок 32 – Бинаризация изображения шрифта с различным фоном

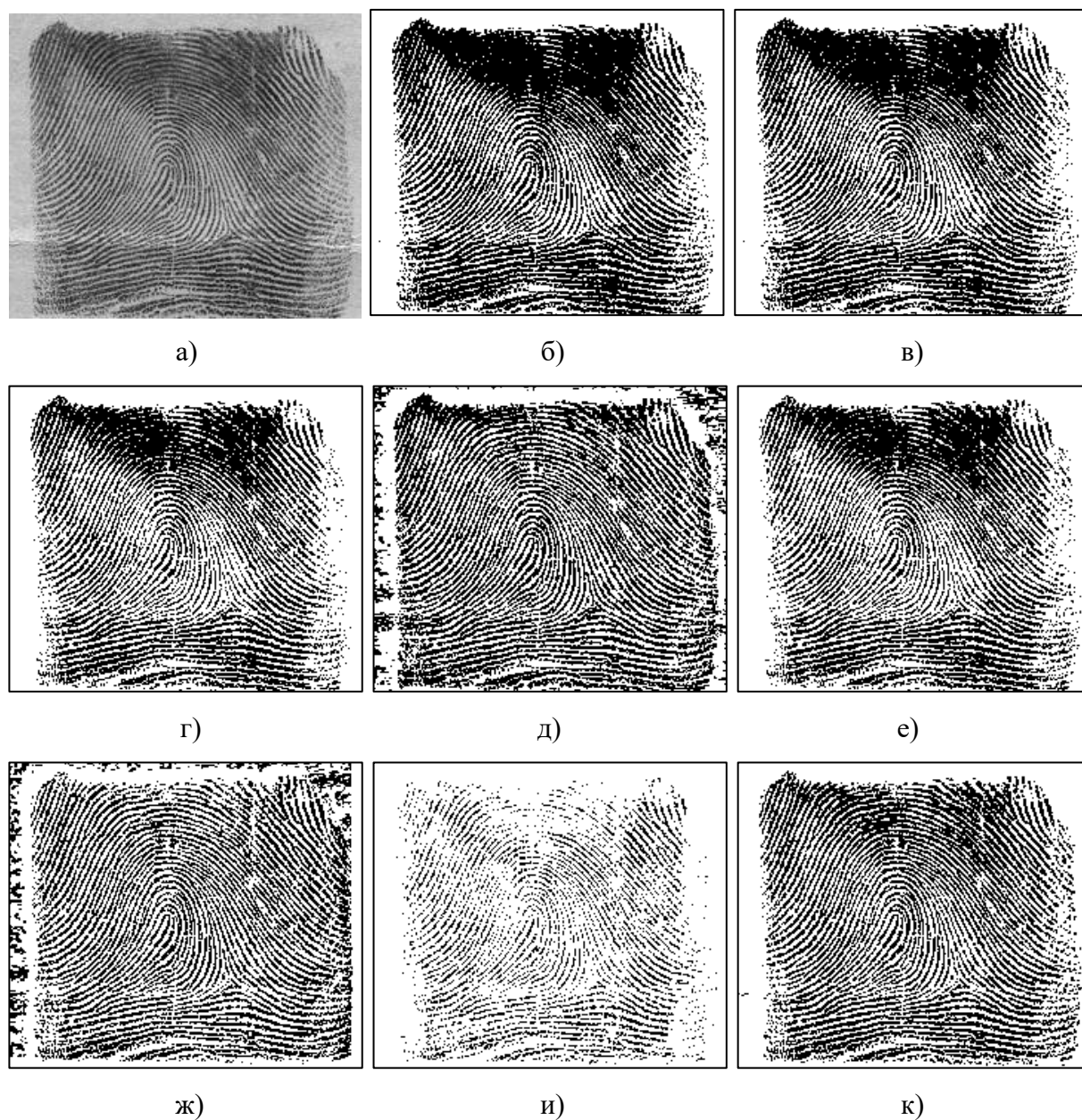
Обработка эритроцитов для задач анатомии можно рассмотреть на рисунке 33. На изображении помимо эритроцитов есть мелкие чёрные объекты непонятной природы, которые явно выявляются с помощью метода Sauvola. Это как раз пример объектов изображения, для которых целесообразнее применение глобальной бинаризации [55, 88].



а – исходное изображение; б – метод среднего; в – метод Оцу; г – метод С-образной кривой;  
 д – локальный метод среднего; е – метод *Bernsen*;  
 ж – метод Niblack; и – метод Sauvola; к – ~~метод~~ *Christian*

Рисунок 33 – Бинаризация изображения эритроцитов

Пример, показанный на рисунке 34, содержит отпечатки пальцев с многочисленным числом линий, находящихся близко друг другу, и некоторые сливаются, образуя пятна [89].



а – исходное изображение; б – метод среднего; в – метод Оцу; г – метод С-образной кривой;

д – локальный метод среднего; е – метод *Bernsen*;

ж – метод *Niblack*; и – метод *Sauvola*; к – метод *Christian*

Рисунок 34 – Бинаризация изображения отпечатков пальцев

Помимо вышеприведённого случая часто бывает необходимо разделять объекты на несколько (от 2 до 5) классов объектов с определёнными свойствами, чтобы иметь возможность анализировать отдельно каждый из этих классов. Для таких целей зарекомендовал себя метод мульти-Оцу.

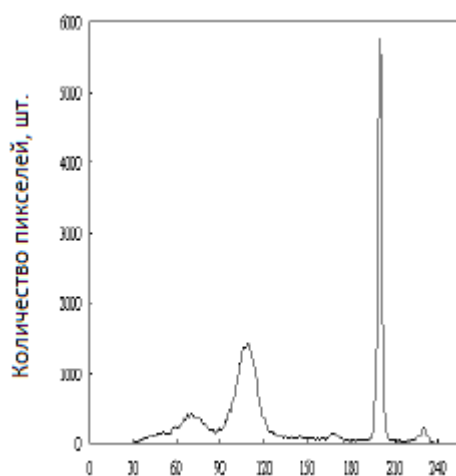
Для оценки эффективности предложенного метода по сравнению с традиционным методом Оцу для ряда изображений (см. рисунок 35) размером  $256 \times 256$  пикселей с 256 интенсивности уровня серого показаны [58, 59] случаи с разным количеством классов разбиения.



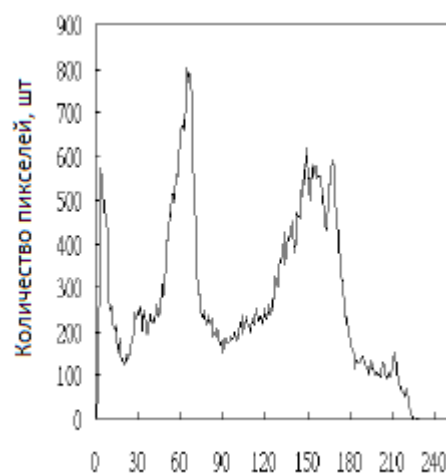
а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)



и)



к)



л)



м)



н)

а, б – исходные изображения; в, г – распределения интенсивностей изображений;

д, е – бинарные изображения (простой метод Оцу);

ж, и – метода мульти-Оцу, 3 класса; к, л – метода мульти-Оцу, 4 класса;

м, н – метода мульти-Оцу, 5 классов

Рисунок 35 – Использование метода мульти-Оцу

На рисунках очень наглядно показана возможность при использовании данного метода выделять объекты и, соответственно, измерять только объекты одного класса.



## 1.5 Новый подход в сравнении изображений

Достаточно сложно сравнивать непосредственно результат работы алгоритмов бинаризации по данным анализа изображения. Оценка, выполняемая человеком [90, 91], не только субъективна, но и отнимает много времени. Более того, такому методу не хватает устойчивости, так как было замечено, что в неоднозначных ситуациях, тот же наблюдатель может сделать разный выбор для того же набора данных в различных сессиях. DIBCO 2009 является первым международным документом, конкурс «Бинаризация изображений» организован в контексте конференции ICDAR. Данный конкурс проводится каждые 2 года: 2009 [92], 2011 [93], 2013 [94]. Было предложено сравнивать бинаризованные изображения с предварительно подготовленными эталонами. Такие методы сравнения были успешно применены в ряде работ [95, 96, 97, 98].

Описание критериев сравнения и методика создания эталонов представлены в работе [99].

Для более чёткого понимания морфологии структур и сравнения методов бинаризации были подготовлены эталоны изображений структур ручными методами закрашивания, дорисовки и стирания объектов (для этого использовался Paint). Были исключены дефекты и шумы, а объекты были идеализированы.

При создании эталонов замечено:

1. Глобальная бинаризация позволяет точнее выделять тёмные объекты.
2. Метод мультиризации позволяет более точно выделить объекты по цвету.
3. Локальная бинаризация лучшим образом повторяет границы объектов, что даёт более точный размер зерна.
4. Данные ручные методы являются весьма трудоёмкими и не позволяют выделить объекты более двух классов.
5. Для больших объёмов изображений данные методы не подходят, так как занимают много времени. Поэтому необходимо создание автоматизированных процедур дальнейшей сегментации.

Один из подходов, используемых при сравнении результата работы алгоритмов, основывается на сравнении работы метода с эталонным результатом с помощью сбалансированной F-меры [100, 101] как определенный аналог расстояния Левенштейна [102], применяемого при анализе печатного текста:

$$F \text{ мера} = \frac{2 * Recall * Precision}{Recall + Precision} \quad (42)$$

где  $Recall$  (отзыв) =  $\frac{TP}{TP+FN}$ ,  $Precision$  (точность) =  $\frac{TP}{TP+FP}$ ;

TP, FP, FN, TN обозначают истинное положительное, ложноположительное, ложноотрицательное значения и истинное отрицательное, соответственно.

Также существует критерий псевдо F-мера [99], для которого отзыв и точность считаются из скелетизованного эталонного изображения:

$$\text{псевдо } F \text{ мера} = \frac{2 * Recall_{\text{скел}} * Precision_{\text{скел}}}{Recall_{\text{скел}} + Precision_{\text{скел}}} \quad (43)$$

Критерий PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое отношение сигнала к шуму) показывает, на сколько близко бинарное изображение к эталону:

$$PSNR = 10 \log \left( \frac{C^2}{MSE} \right) \quad (44)$$

$$MSE = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x,y) - I'(x,y))^2}{MN} \quad (45)$$

Чем ближе бинарное изображение к эталону, тем больше вышеуказанные критерии. Существуют также и обратные критерии, которые меньше для более качественной бинаризации [92, 103]. Критерий NRM (Negative Rate Metric – обратный коэффициент) состоит в несогласованности эталона и анализируемого изображения:

$$NRM = \frac{NR_{FN} + NR_{FP}}{2} \quad (46)$$

где  $NR_{FN} = \frac{FN}{FN+TP}$ ,  $NR_{FP} = \frac{FP}{FP+TN}$ .

Использование метода эталона весьма затруднительно, особенно для комплексных структур, где его создание трудоёмко и субъективно. Поэтому предложено использовать данные критерии для попарного сравнения изображений после различных методов бинаризации.

### **Выводы по литературному обзору:**

- Существующие результаты исследований указывают на влияние геометрических параметров структур (зерна, неметаллических включений, полосчатости и т.д.) на прочность, пластичность и вязкость сталей и сплавов. Это определяет практический интерес к измерению параметров геометрии структур для оценки их влияния на свойства, в том числе на механизмы их разрушения. Отсюда, в частности, вытекает интерес и к измерению геометрии строения изломов – для прямого сопоставления неоднородности строения структур и сопутствующих им изломов.
- Принятые на практике методы оценки структур преимущественно представляют собой сопоставление с картинкой или с их словесным описанием. Это делает практически невозможным описание неоднородных структур, отличающихся не только размером объектов, но и их морфологией, особенностей разрушения разнородных структур.
- Отсутствуют принципы выбора алгоритмов количественной обработки структур и соответствующее метрологическое обеспечение, позволяющие получить воспроизводимые и сопоставимые результаты, исключая влияние на них субъективного фактора.
- Современные программные продукты и компьютерные мощности в принципе позволяют реализовать количественные измерения структур и изломов. Однако есть все основания считать, что разработка цифровых методов должна учитывать особенности строения той или иной структуры и излома.

### **Постановка задач исследования:**

- 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 компьютеризированных процедур программной обработки изображений для объективного измерения параметров неоднородных структур и сопутствующих изломов с учетом особенностей природы исследуемых объектов.
- Накопление представительной статистики измерений элементов геометрии структур.
- Использование разработанных подходов для описания неоднородности строения различных структур исследуемых сталей и твердых сплавов и соответствующих им изломов.

## 2 Материалы и методика исследования

### 2.1 Материалы исследования

В качестве объектов исследования были использованы изображения эталонов структур, соответствующих ГОСТ 5639 – Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [104], ГОСТ 3443 – Отливки из чугуна с различной формой графита (Шкала 3. Г. «Количество включений графита») [105], ГОСТ 5640 – Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты (Шкала 3. «Полосчатость феррито-перлитной структуры») [106], ГОСТ 1778 – Металлографические методы определения неметаллических включений (Шкала «Нитриды точечные») [107]. В качестве базового увеличения, в соответствии с вышеперечисленными нормативными документами, было выбрано увеличение  $\times 100$ , при котором эталоны приведены в виде круга диаметром 79,8 мм, что соответствует натуральной площади на шлифе  $0,5 \text{ мм}^2$ . Из эталонных полей зрения были вырезаны для последующей количественной обработки поля зрения в форме квадрата (вписанного в исходный круг). Их площадь для базового увеличения составила  $0,318 \text{ мм}^2$  (в масштабе образца).

В качестве объектов исследования использовали типичные изображения реальных структур и изломов листовых сталей 09Г2С и Ст3сп, а также конструкционных сталей 10-15ХСНД, как модельные объекты для отработки методов измерения полосчатости в структуре и сопутствующей неоднородности строения излома. В настоящей работе были исследованы структуры 4 партий стали 09Г2С и изломы, полученные на ударных образцах после нормализации при  $930^\circ\text{C}$  в течении 1,5 – 2 минут.

В качестве объекта исследования также были выбраны изображения трех поковок кубической и цилиндрической формы из стали 38ХНЗМФА. Содержание элементов в пределах ГОСТ 4543. Для оценки взаимосвязи разномасштабных структур были получены изображения дендритной структуры, неметаллических включений (НВ), серного отпечатка (СО) и микроструктуры (в одной плоскости шлифа) в масштабах головки образцов на растяжение в плоскости, параллельной плоскости изломов. Химические составы всех сталей приведены в таблице 4.

В качестве объектов исследования также были использованы изображения распространенных твердых сплавов на основе железа и никеля типа ПГ-ФБХ-6-2, ПР-Х4ГСР, ПГ-10Н-01 и ПС-14-60 (далее твердые сплавы 1, 2, 3 и 4 соответственно), полученные методом плазменной наплавки в соответствии с общепринятой технологией. Химические составы твердых сплавов приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Химические составы исследуемых сталей

Сталь	Партия	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N <sub>2</sub>	As	Mo	V
09Г2С	1	0,1	0,65	1,56	0,013	0,004	0,04	0,05	0,08	0,06	0,006	0,004		
	2	0,1	0,65	1,56	0,013	0,004	0,04	0,05	0,08	0,06	0,006	0,004		
	3	0,1	0,66	1,57	0,013	0,004	0,05	0,05	0,05	0,05	0,005	0,003		
	4	0,1	0,66	1,57	0,013	0,004	0,05	0,05	0,05	0,05	0,005	0,003		
СтЗсп	1	0,16	0,25	0,54	0,01	0,006	0,08	0,08	0,22	0,11	0,011	0,006		
	2	0,18	0,25	0,6	0,007	0,006	0,04	0,08	0,17	0,07	0,007	0,003		
38ХНЗМФА	1	0,41	0,22	0,22	0,020	0,02	0,87	3,32	0,03	—	—	—	0,58	0,14
38ХНЗМФА-Ш	1	0,41	0,23	0,29	0,010	0,006	0,98	3,12	0,11	—	—	—	0,60	0,12
10ХСНД	1	0,1	0,88	0,64	0,011	0,006	0,72	0,59	0,44	0,07	0,007	—		
15ХСНД	1	0,18	0,67	0,63	0,012	0,003	0,87	0,5	0,32	0,07	0,07	0,004		

Таблица 5 – Химические составы исследуемых твердых сплавов

Твердый сплав	№	Fe	C	Cr	Si	Mn	Ni	B	V	Al	Cu	S	P
ПГ-ФБХ-6-2	1	осн	4,5	36,7	2,3	1,7	—	1,4	—	—	—	0,017	0,05
ПР-Х4ГСП	2	осн	1,22	3,95	2,0	2,17	—	3,66	0,88	0,05	0,08	0,013	0,03
ПГ-10Н-01	3	5,4	0,9	16,9	4,2	—	осн	3,3	—	—	0,05	0,006	0,03
ПС-14-60	4	осн	5,1	35,7	—	0,7	—	—	—	—	0,82	—	—

В % массовых долей

## 2.2 Методика исследования

### 2.2.1 Шлифование и полировка образцов

Автоматические процедуры анализа изображений и измерения объектов требуют высокого уровня подготовки образцов перед съёмкой с учётом всех возможных ошибок и вариантов влияния этапов на конечный результат.

Подготовка образца начинается с его отрезания, правильность которого создает основу для хорошего дальнейшего результата. Отрезанные образцы в дальнейшем, как правило, запрессовывают в полимерный материал. Запрессовку образца производили на прессовальном аппарате SimpliMet 1000 (Buehler). Запрессовка обеспечивает следующие преимущества:

- удобные средства для крепления образцов;
- поддерживает стандартные средства для крепления нескольких образцов;
- предотвращает завал краев образца;
- обеспечивает необходимую ориентацию образца;
- обеспечивает удобную маркировку и хранение образцов.

Важным этапом, оказывающим влияние на изображения, является шлифование с использованием дисков с растущей зернистостью абразива. Это позволяет избежать наличия рисок на изображениях, которые создают новые объекты при бинаризации. Готовый к шлифованию образец шлифовали и полировали на аппарате AlliedTwinPrep 5.

Полирование проводилось механическим способом: на вращающийся круг, покрытый фетром или сукном, наносили суспензию и полировали шлиф до "зеркального" блеска (рисунок 36, б).



а)

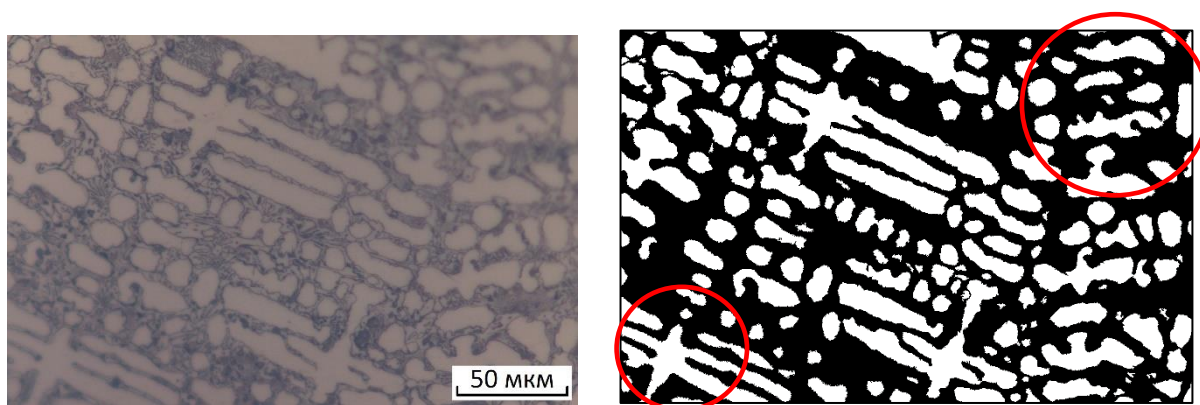


б)

а – шлифовально-полировальный станок; б – травление шлифов

Рисунок 36 – Подготовка образцов

При ручном варианте шлифования и полировки всегда возникают неровности шлифа, вследствие чего появляются расфокусированные области на изображениях оптической микроскопии, особенно при больших увеличениях ( $\times 500$  и выше). Данный вид неровности существенно сказывается на этапе бинаризации и измерения объектов: при отсутствии фокуса в области крупные объекты уменьшаются, а мелкие и вовсе исчезают (рисунок 37).



а)

б)

а – исходное изображение; б – бинарное изображение с указанием области без фокуса

Рисунок 37 – Влияние фокуса на размер объектов

Такая проблема легко решается с помощью автоматического станка, который рекомендуется использовать в условиях современных технологий (рисунок 36, а).

### 2.2.2 Травление образцов

На полированном микрошлифе в большинстве случаев структура не видна. В микроскопе виден светлый круг, так как все падающие на поверхность шлифа лучи отражаются, если же шлиф имеет риски, то часть лучей, падающих на поверхность, рассеивается и видны темные полосы.

Для выявления микроструктуры полированную поверхность шлифа подвергают травлению различными химическими реактивами (травителями). Универсальным травителем для железоуглеродистых сплавов является 2 – 5%-й раствор азотной кислоты в спирте. Для выявления феррито-перлитной структуры проводили травление в 3% растворе  $\text{HNO}_3$  и этилового спирта. Для выявления микроструктуры термически упрочненной стали со структурой бейнита и сорбита использовали реактив 4 г пикриновой кислоты и 100  $\text{см}^3$  спирта. Для идентификации структуры твердого сплава слой наплавки был протравлен раствором, состав которого 1 часть  $\text{HNO}_3$  к 5 частям  $\text{HCL}$ .

Проводится травление следующим образом:

- отполированный шлиф загружается на несколько секунд полированной поверхностью в раствор;
- вынимается, промывается водой и сушится фильтрованной бумагой.

Если выдержка большая и шлиф сильно потемнел (перетравился), процесс повторяется после предварительной полировки.

### 2.2.3 Световая микроскопия

Полученные изображения анализировали на оптическом микроскопе Axio Observer D1m Carl Zeiss (рисунок 38) в диапазоне увеличений 50 – 1000 крат и Axio Imager M2m соответственно с использованием программного обеспечения Tixomet. Исследование строения структур на субмикро- и нано уровнях, в т.ч. природы отдельных структурных составляющих, например, идентификация типа карбидов, проводилось средствами сканирующей электронной (VEGA 3 SBH производства TESCAN с микроанализатором EasyEDX производства Bruker). Для целей фрактографии использовали стереоскан VEGA 3 SBH, а также низковакуумный растровый электронный микроскоп JSM-6480LV фирмы «JEOL».



Рисунок 38 – Оптический микроскоп Axio Observer D1m Carl Zeiss

Для уменьшения неоднородности по свету рекомендуется использование микроскопа, на котором образец ставится сверху. Это уменьшает влияние внешнего освещения. Освещение самого микроскопа, а также фокус, рекомендуется корректировать для каждого нового изображения. Но это невозможно сделать для съемки панорамных изображений.

Съемка изображений является очень важным этапом металлографических исследований, который вносит существенный вклад в конечный количественный результат.



Рекомендуется доводить шлиф до чистого состояния с отсутствием объектов неясной природы. При необходимости изменить суспензию для полирования (раствор «зеленки» загрязняет шлиф и создает много шумов на изображении).

Также необходим тщательный выбор поля зрения для получения объективной картины по размеру объектов. При сильной неоднородности исследуемой структуры необходима съемка нескольких кадров с последующей обработкой и измерением с указанием места съемки данного изображения.

Для анализа изображений в работе использовались программы ImageJ [108; 109], Mathcad [110], Matlab [111] и Statistica [112].

### **3 Результаты исследования**

#### **3.1 Об учете статистической природы объектов при анализе структур в металловедении**

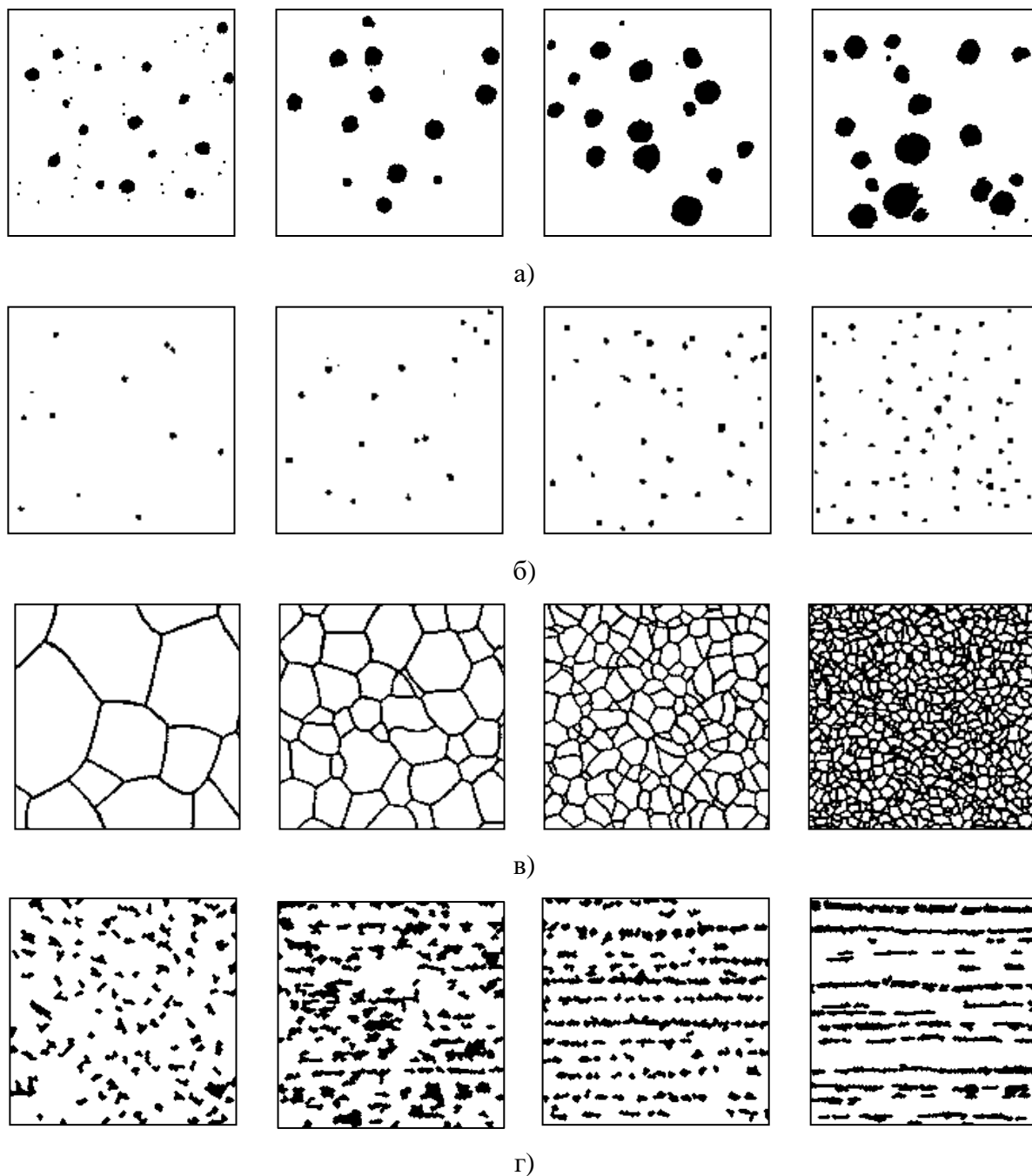
Остается неизменным интерес и, собственно, к самим процедурам обработки изображений, степень оптимальности выбора которой в существенной мере определяет полноту извлечения информации о морфологии структур или изломов, её объективность. Выбор таких алгоритмов должен учитывать механизм влияния строения структур на деформацию и разрушение материалов. Традиционные балльные оценки достаточно неплохо ранжируют структуры, однако при этом остается открытым вопрос, в какой мере выявляемые ими различия в структуре (от балла к баллу), находят свое отражение в разрушении металла. Это важно для выявления критических параметров структуры, определяющих разброс вязкости металла.

Методы компьютерной металлографии могут усовершенствовать методы оценки параметров структур на производстве и заменить используемую в настоящее время балльную оценку различных структур.

Сравнение структур с эталоном (картинкой) на основе некоторой балльной оценки получило широкое распространение, особенно в производственной практике. Существует целый ряд нормативных документов, устанавливающих, определенную градацию различных структур (рисунок 39): 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 и предполагается (по умолчанию) однородность структур в пределах фиксированного номера шкалы. В связи с отсутствием массовых документированных измерений не вполне понятен и масштаб информации, получаемой с использованием данного подхода к ранжировке структур.

В работе проанализированы изображения стандартов для проверки наличия трендов определяемых параметров геометрии элементов структур (и их статистических характеристик) с изменением номера данной шкалы. Геометрию отдельных структурных составляющих оценивали с использованием метода площадей, эффективно реализуемого только при использовании компьютеризированных процедур при работе с цифровыми изображениями структур. Важно отметить, что анализ изображений в рамках четырех стандартов (в каждом по одной шкале) также занимает несколько десятков часов, что

дополнительно характеризует преимущество их обработки с использованием компьютеризированных процедур.



а – шаровидный графит в чугунах (ГОСТ 3443);

б – точечные неметаллические включения (ГОСТ 1778);

в – зёрненные структуры (ГОСТ 5639);

г – полосчатые феррито-перлитные структуры (ГОСТ 5640)

Рисунок 39 – Примеры шкал различных структур

Традиционные подходы к ранжировке структур основаны на их сравнении с эталонными шкалами (картинками). У эталонных шкал “баллов” ГОСТ эмпирическая природа, как правило, это трудно формализуемый комплексный показатель. Например, для неметаллических включений, помимо характеристик их площадей важны особенности их размещения на шлифе (“кучность”, вытянутость и строчечность), для зерна – наличие анизотропии и география разнотерности. Не всегда принимается во внимание статистическая природа изображений «балльных» структур. Отсюда, в частности, известные трудности в определении однозначного соответствия между баллами ГОСТ и количественными характеристиками элементов геометрии их изображений [26, 113, 114]. Цифровизация делает возможным быстрые 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. Неоднородность же их строения, характерна даже для хорошо отлаженных технологий, в связи с разнообразием сценариев проявления технологической наследственности в рамках широкого поля допуска технологии. Отсюда существующее разнообразие видов распределения значений параметров геометрии (сорбит отпуска, феррито-перлитная полосчатость, остатки дендритной структуры): симметричное, асимметричное, бимодальное (с широкими диапазонами вариации величин коэффициентов асимметрии и эксцесса), наблюдаемых на практике для разнообразного сортамента металлопродукции [115]. Однако все это многообразие структур нормируется существующими эталонными шкалами. В этой связи было важно оценить масштаб их однородности, что существенно при последующем их использовании, применимо к аттестации реальных структур, в т.ч. в связи с существующими и разрабатываемыми программными решениями, направленными на автоматизацию измерений структур в рамках требований соответствующих стандартов.

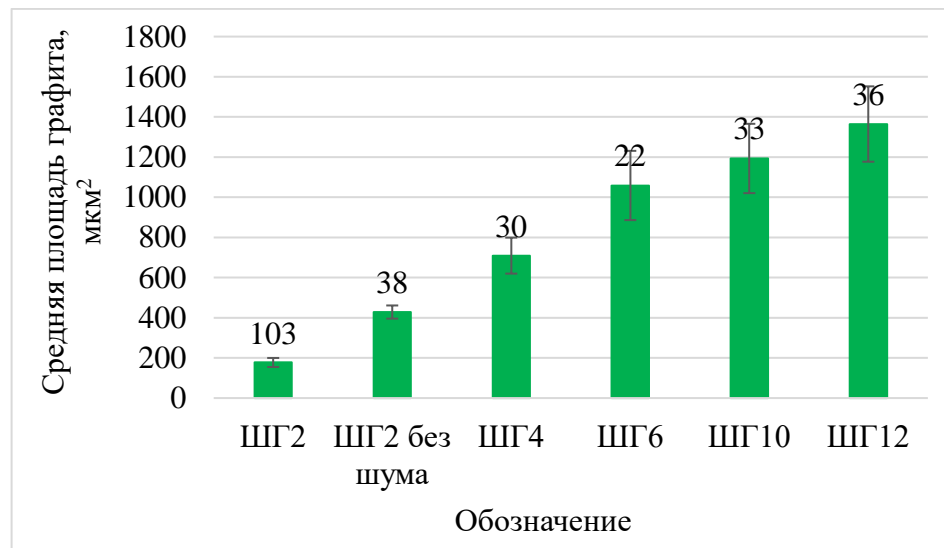
Также, как и изображения реальных структур, изображения эталонов представляют собой, как правило, поле яркости в оттенках серого (256 единиц), где однотипные элементы характеризуются определенными диапазонами яркости и геометрией. В этой связи для выделения однотипных элементов проводили процедуры бинаризации или мультиризации (если в структуре наблюдаются несколько типов однотипных элементов) [57, 116]. 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).

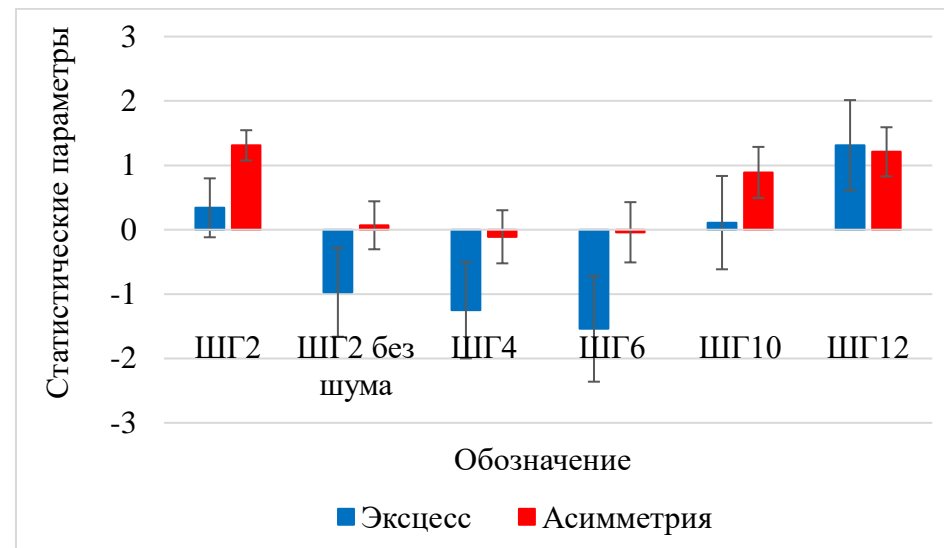
Для изображений зерен и графитовых включений измеряли их площади, полосчатости в микроструктуре – ширину полос перлита, шаг полос, площадь перлитных фрагментов, размер зерна феррита. Их измеряли методом параллельных секущих, проведенных с равным (для каждого изображения) шагом в зависимости от количества 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) [117].

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 40).

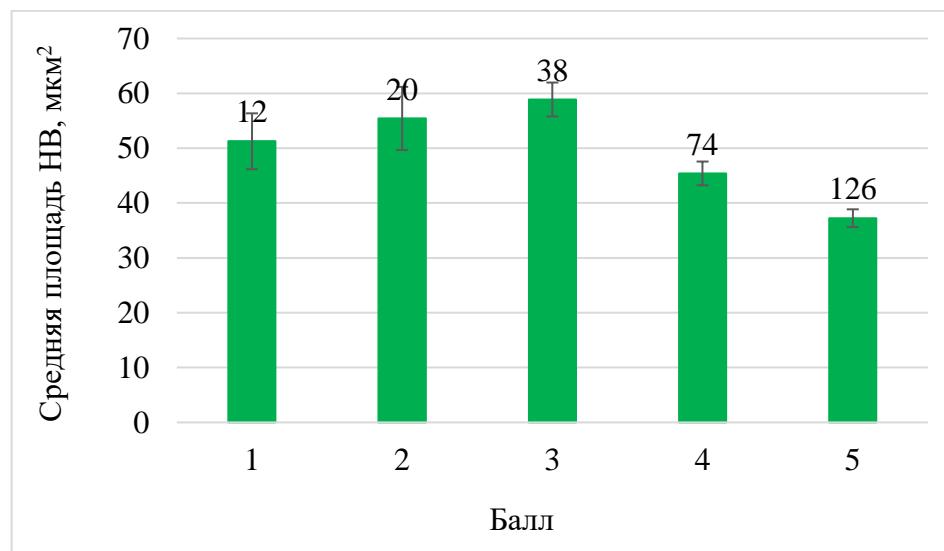
В работе показано, что размеры структурных составляющих и статистические характеристики их распределений нелинейно зависят от номера шкалы. Это – признак неоднородности микроструктуры, указывающий на необходимость более детального измерения геометрии отдельных структурных составляющих, их конфигурации в целом, а также статистических характеристик результатов измерений, позволит более объективно ранжировать различные однотипные структуры, в т.ч. с учетом технологически неизбежной неоднородности их строения.



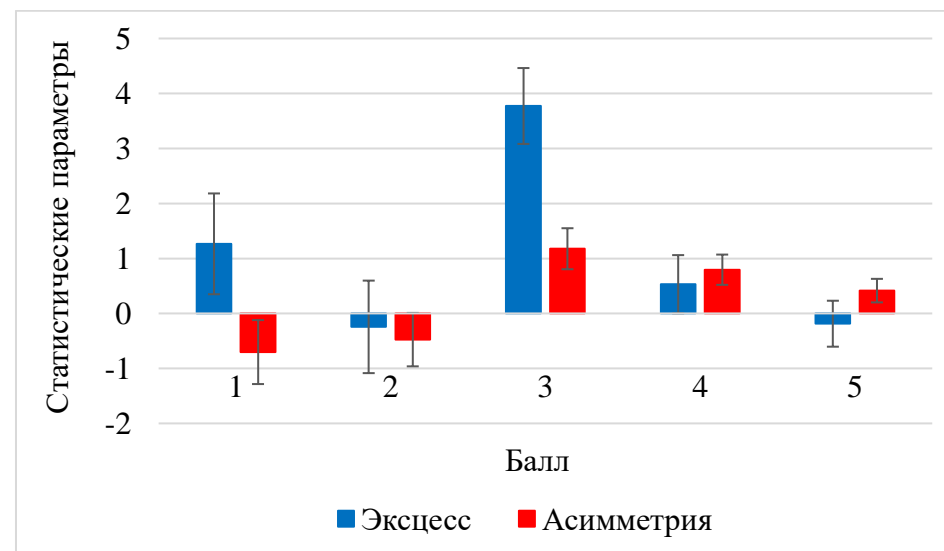
а)



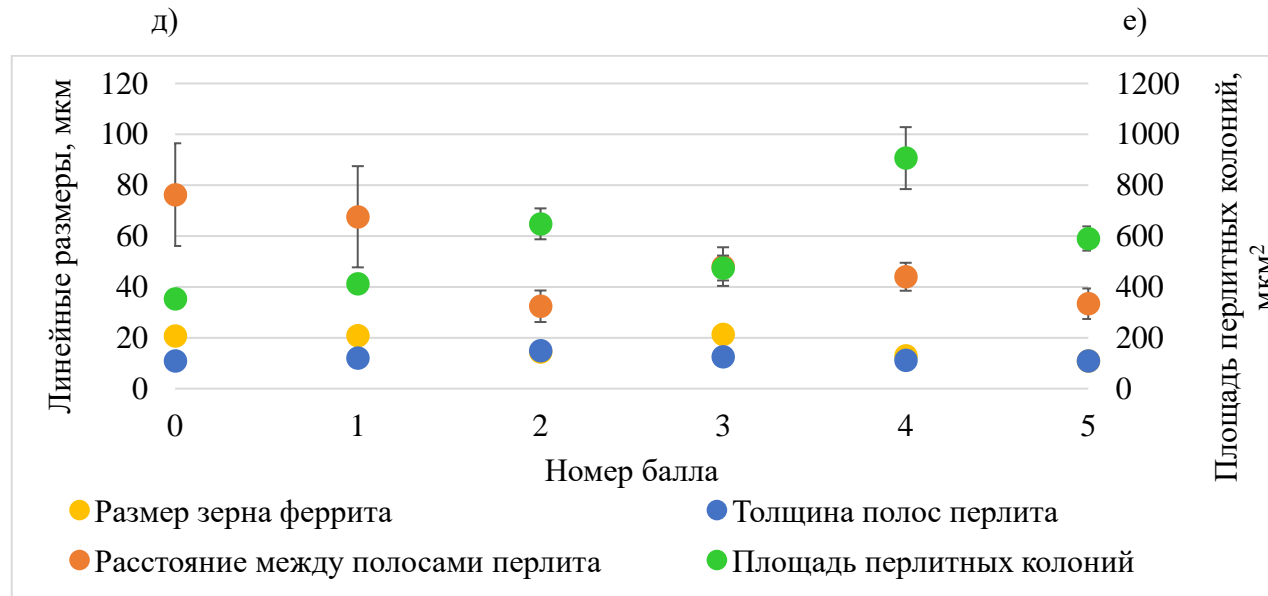
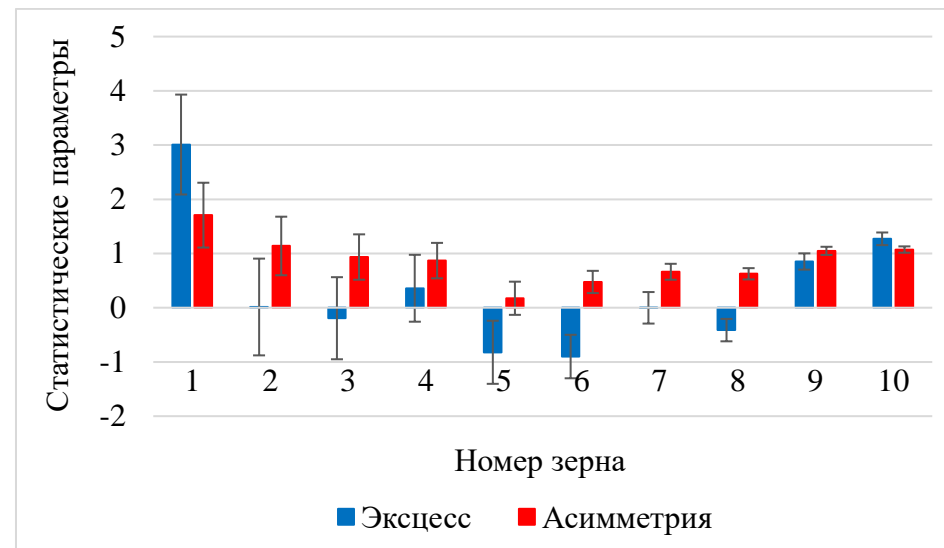
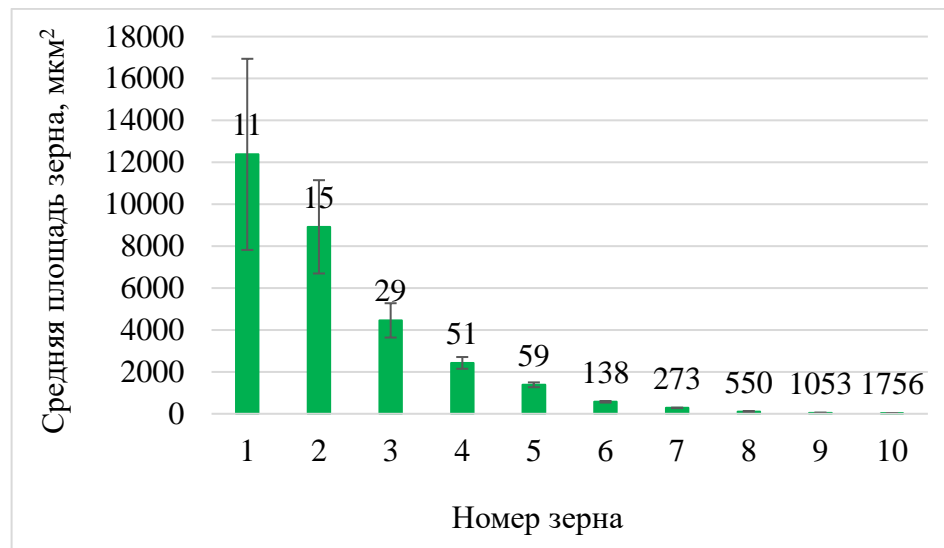
б)

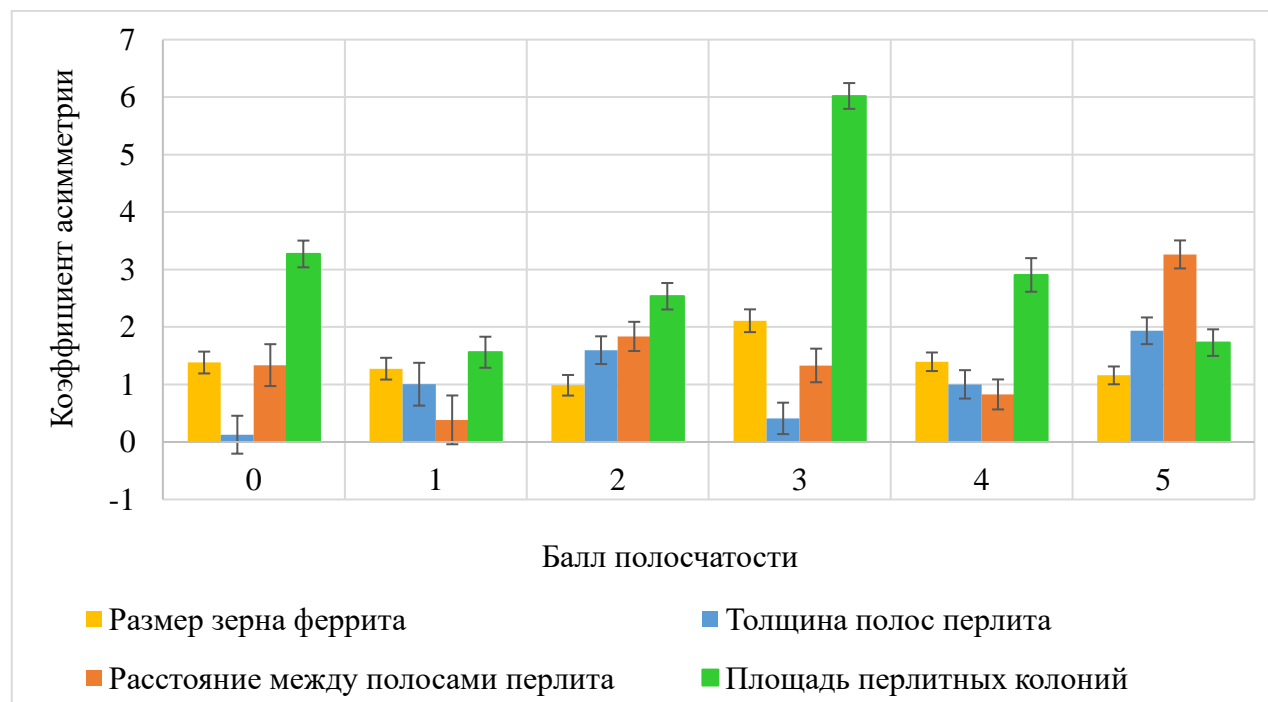


в)



г)





и)

а, в, д, ж – площадь и линейные размеры объектов; б, г, е, и – статистические коэффициенты их распределений.

Рисунок 40 – Статистические характеристики распределения параметров геометрии изображений структур, соответствующих шкалам по ГОСТ 3443, ГОСТ 1778, ГОСТ 5639 и ГОСТ 5640 соответственно



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 (рисунок 41). Её наличие – признак подобия геометрии включений на изображениях, соответствующих различным номерам шкалы.

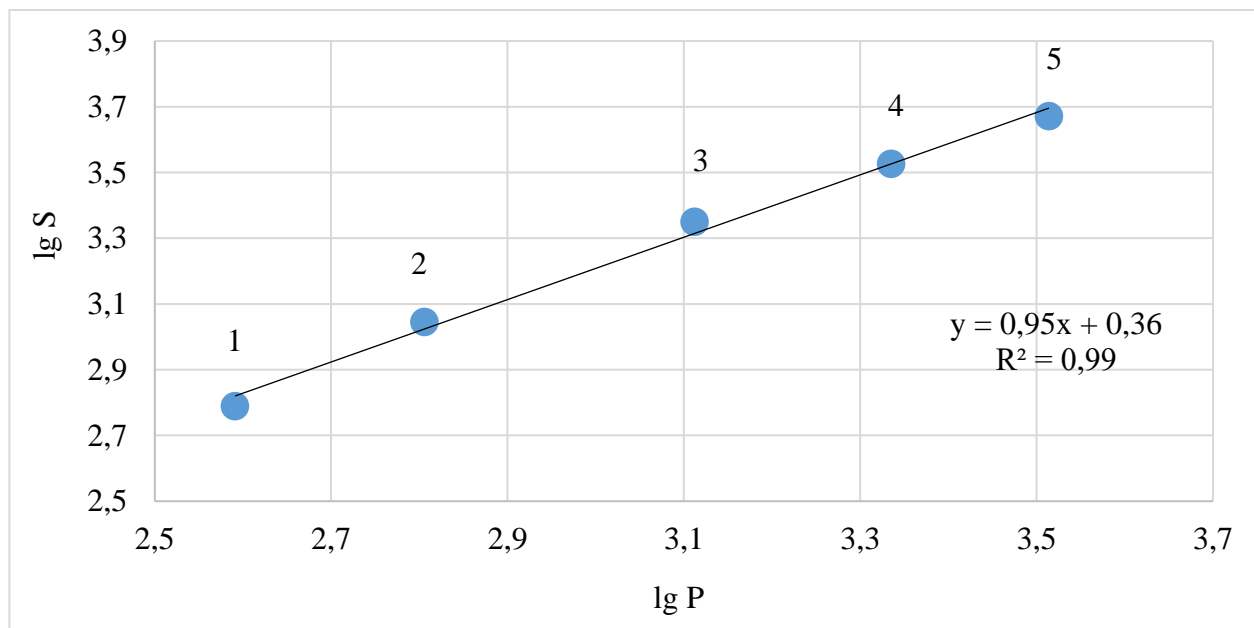


Рисунок 41 – Соотношение суммарной площади и суммарного периметра неметаллических включений, шкала нитриды точечные, ГОСТ 1778;

Для оценки статистики распределения значений параметров структуры изображений шкал оценивали величины коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  [69] (рисунок 40).

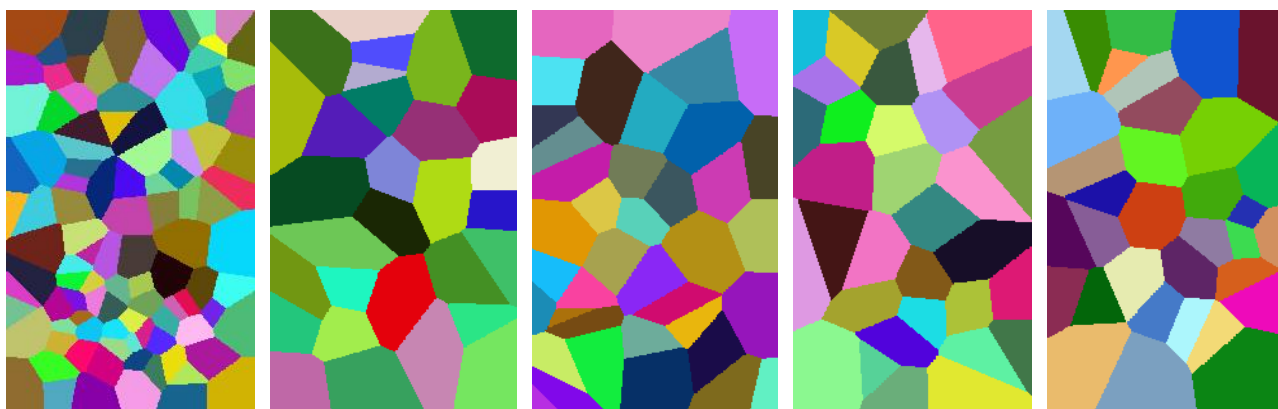
Для балльных оценок характерна определенная субъективность и предполагается (по умолчанию) однородность структур в пределах фиксированного номера шкалы. В качестве меры такой однородности (с учетом статистической природы морфологии структур) можно принять значения коэффициентов асимметрии и эксцесса, характеризующие вид распределения [113]. Оказалось, что значения коэффициентов асимметрии и эксцесса 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, 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. 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  $0,2 - 3,0 \text{ см}^2$ . Однако это предполагает оценку масштабов наблюдения данного номера шкалы, а не оценку однородности её строения в пределах каждого номера шкалы.

Масштаб диапазона изменений коэффициентов был достаточно велик, например, величина коэффициента асимметрии во многих случаях превышала единичные значения, а коэффициент эксцесса мог быть как отрицательным, так и положительным. Это с одной стороны указывает на различие статистической природы изображений, отвечающих отдельным номерам шкалы, а с другой – на их отличие от нормального. Такие особенности распределения значений параметров изображений были характерны для всех типов проанализированных эталонных шкал.

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 (рисунок 42).

Поскольку для ряда параметров геометрии эталонных структур распределение их значений отличалось от нормального (в предположении номинально однородных структур в пределах каждого номера шкалы), 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 [70]. 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, таблица 6).



ШГ2

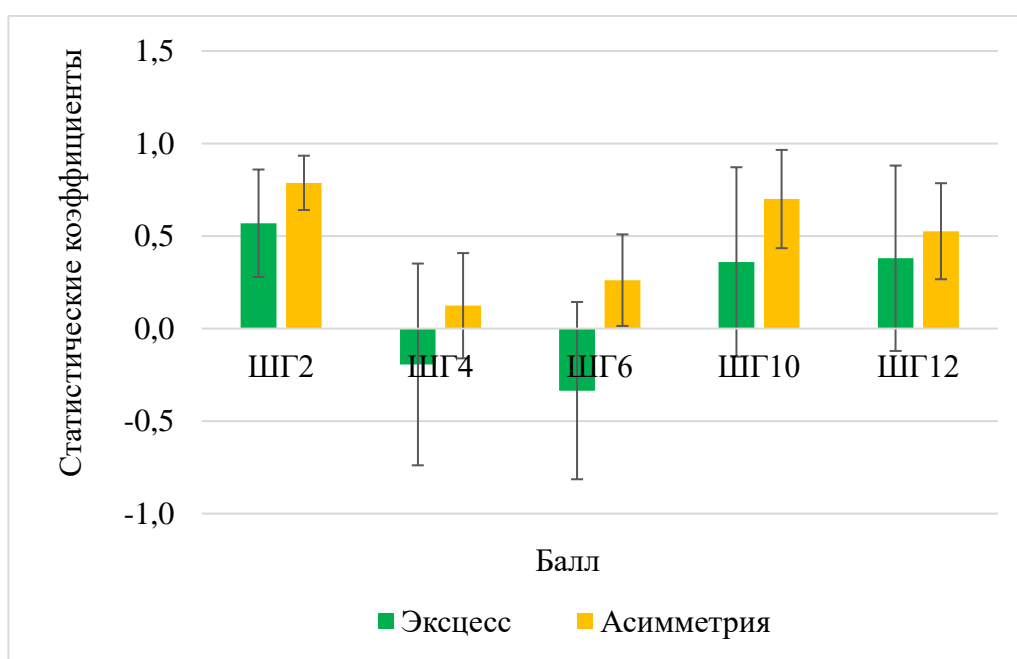
ШГ4

ШГ6

ШГ10

ШГ12

а)



б)



1

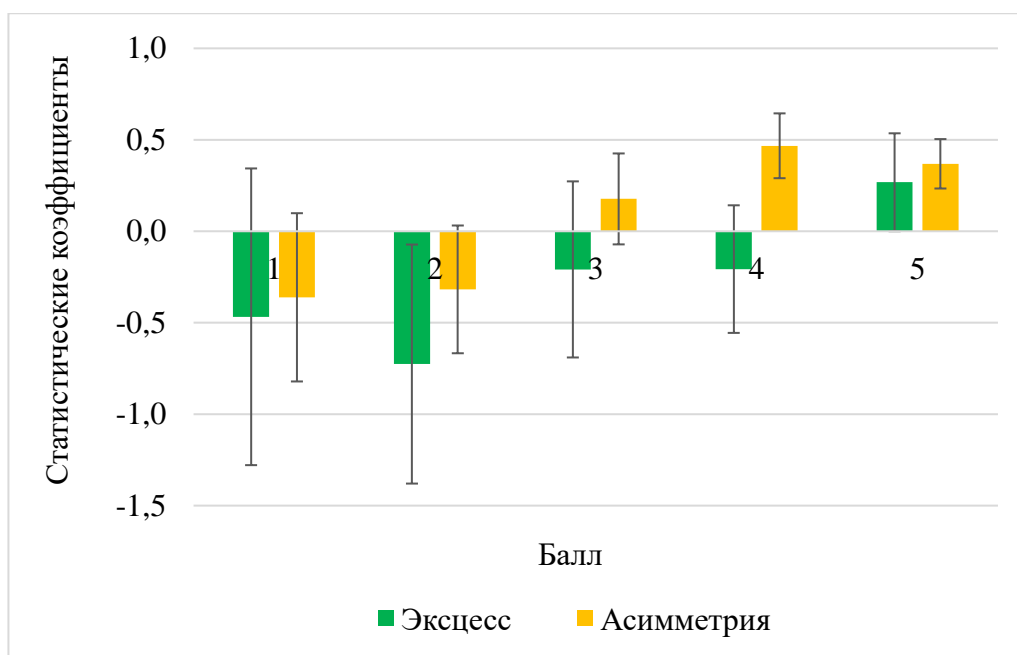
2

3

4

5

в)



г)

а – полиэдры Вороного графитовых включений;

б – статистические коэффициенты распределений расстояний между центрами полиэдров Вороного графитовых включений;

в – полиэдры Вороного неметаллических включений;

г – статистические коэффициенты распределений расстояний между центрами полиэдров Вороного неметаллических включений

Рисунок 42 – Статистика полиэдров Вороного изображений эталонов

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 геометрии 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.

Таблица 6 – Сопоставление выборок параметров полосчатых структур по эталонам, ряд Б, ГОСТ 5640

Сравниваемые баллы	Экспериментальные значения критериев различия выборок: Стьюдента (t) и Колмогорова-Смирнова ( $K_\alpha$ )							
	Размер зерна феррита		Толщина полос перлита		Расстояние между		Площадь перлитных	
	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$
0-1	0,06	0,54	1,02	0,52	0,30	0,57	1,747	1,138
0-2	4,91	2,01	2,79	1,42	5,37	2,11	4,56	2,213
0-3	0,37	0,25	<b>1,65 (0,15)</b>	<b>0,73 (&gt; 0,5)</b>	3,06	1,47	2,23	1,185
0-4	6,50	2,67	0,34	0,39	4,03	1,69	5,60	2,674
0-5	8,82	3,56	0,002	0,69	5,40	2,19	4,54	1,965
1-2	4,88	1,85	1,77	1,15	5,71	2,11	3,10	1,484
1-3	0,31	0,40	0,42	0,51	<b>3,45 (&lt; 0,001)</b>	<b>1,49 (0,05)</b>	<b>0,96 (0,4)</b>	<b>0,855 (0,5)</b>
1-4	6,45	2,30	0,93	0,73	3,20	1,38	4,26	2,082
1-5	8,73	3,29	<b>1,00 (0,4)</b>	<b>1,21 (0,15)</b>	4,49	1,93	<b>2,91 (0,01)</b>	<b>1,26 (0,1)</b>
2-3	4,39	1,87	<b>2,00 (0,05)</b>	<b>1,00 (0,3)</b>	3,18	2,31	2,24	1,644
2-4	1,62	1,07	3,45	1,80	2,76	2,19	2,11	1,184
2-5	4,32	1,96	<b>3,64 (&lt; 0,001)</b>	<b>1,35 (0,1)</b>	0,22	0,79	0,75	0,578
3-4	6,31	2,60	<b>1,71 (0,1)</b>	<b>1,03 (0,3)</b>	<b>0,86 (0,4)</b>	<b>0,41 (&gt; 0,5)</b>	3,85	2,24
3-5	8,40	3,55	1,80	1,48	3,03	1,79	1,70	1,415
4-5	2,68	1,62	0,35	0,81	2,57	1,76	<b>2,80 (0,01)</b>	<b>1,183 (0,15)</b>

### Выводы по разделу:

1. На примере изображений структур, приведенных в ГОСТ 5639 – Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна, ГОСТ 3443 – Отливки из чугуна с различной формой графита и изломов (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) оценена статистика морфологии эталонных структур.

2. Полученные результаты показывают, что у изображений рассмотренных эталонных структур различная статистическая природа: от номера к номеру возможно различие в значениях коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения размеров отдельных структурных составляющих. Величина коэффициента асимметрии  $A_s$  для исследуемых изображений ГОСТ 5639, 3443, 5640 и 1778 варьировалась в 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) соответственно. Также существенен был и диапазон изменений величин коэффициента эксцесса  $E_x$ , включая смену его знака, что в целом указывает на отклонение распределения значений параметров геометрии ряда эталонных структур от нормального. В этой связи возможны значимые различия при сопоставлении значений параметров геометрии эталонных структур методами классической (критерий Стьюдента) и непараметрической (критерий Колмогорова-Смирнова) статистик. Из статистики полиэдров Вороного также следует, что для разных номеров одних и тех же шкал возможны различия в размещении однотипных элементов структуры в поле зрения эталона.

Это обстоятельство необходимо учитывать при их сопоставлении с изображениями реальных структур и при моделировании строения структур, в частности, при разработке программных продуктов для количественного измерения структур в материаловедении.

## **3.2 Анализ полей яркости исследуемых структур**

### **3.2.1 Факторы воспроизводимости результатов измерения геометрии элементов**

Давно очевидны недостатки субъективных полуколичественных оценок параметров структур [114], однако такой метод до сих пор используется на большом количестве предприятий, а также в целом ряде научных исследований. При оценке роли их неоднородности в разрушении (в масштабах образца или изделия) и для снижения субъективности получаемых результатов необходимы массовые, документированные и быстродействующие измерения структур. В ряде работ [например, 55, 57, 59] показана перспективность использования компьютеризированных процедур для обработки изображений в материаловедении. Пока не совсем ясно, в какой мере разрабатываемые решения 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 [119].

В 256 оттенках серого (как основной форме цифрового представления структур и изломов) всё многообразие исследуемых изображений отличается по степени яркости отдельных объектов и их геометрии (размерам, форме, конфигурации элементов структуры). Это определяет порядок проведения фильтрации (удаление шумов), выбор процедуры бинаризации (локальная и глобальная – в масштабах отдельных элементов изображения и всего изображения в целом, соответственно), применения процедур дилатации и эрозии, в т.ч. совместного, для выделения отдельных групп однородных объектов на изображении.

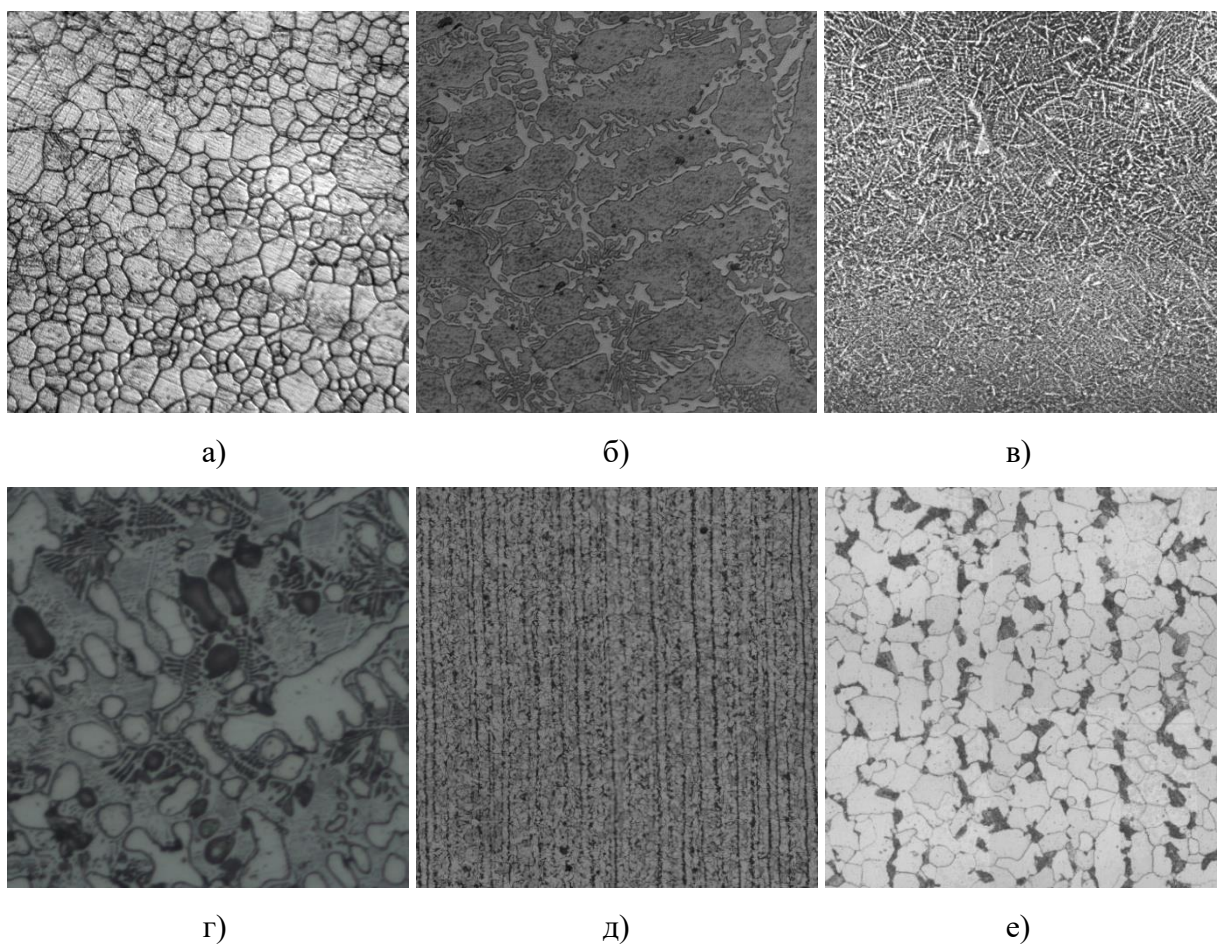
Различные виды бинаризации (метод Оцу, С-образной кривой и локальные методы среднего, Niblack, Bernsen, а также мультиризация) дают визуально отличающиеся результаты при обработке одних и тех же структур, в т.ч. с учётом различий в последовательности их применения, например, до и после предварительной фильтрации с целью удаления точечных шумов.

Показано, в частности, что процедура фильтрации может отличаться для объектов замкнутого типа (например, зерно феррита) и точечных (частицы включений). Выбор фильтра определяется также задачей исследования, он может различаться для одной и той же структуры, например, для микроструктуры с феррито-перлитной полосчатостью при измерении размера зерна феррита и оценке шага полосчатости. Масштабы фильтрации – на основе нахождения порогового значения размеров составляющих структуры («снизу») с учетом их разрешения и минимально возможных физических размеров.

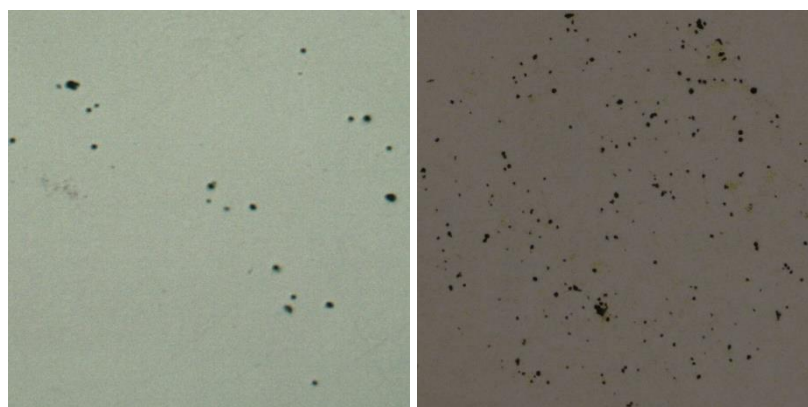
В ходе работы было показано, что разные типы изображений требуют разные алгоритмы обработки. Поэтому стало необходимо классифицировать все исследуемые изображения (рисунок 43):

- дендритные структуры сталей и твердых сплавов;
- зеренные структуры;
- смешанные структуры;
- полосчатые структуры при разном увеличении;
- структуры с мелкими точеными объектами (неметаллические включения (НВ) и серный отпечаток (СО)).

В ходе исследований было подготовлено и обработано большое количество изображений. Замечено, что даже небольшие изменения в методике подготовки шлифов, их съемке, обработке изображений и анализе результатов измерений могут сильно влиять на конечный результат исследования.







ж)

и)

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

Рисунок 43 – Исследуемые типы изображений структур

В рамках исследований было оценено влияние данных факторов (таблица 7) в конечный количественный результат.

Таблица 7 – Факторы воспроизводимости результатов измерения геометрии элементов

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 критериями параметрической и непараметрической статистики	Определение статистических параметров распределения		Оценка размещения однотипных объектов в поле зрения на основе статистики полиэдров Вороного

Также были учтены сопутствующие факторы, такие как формат сохраняемых изображений, выбор увеличения при съемке, изменения в химическом составе образцов и другие. Важным фактором оказался субъективизм ручных металлографических исследований.

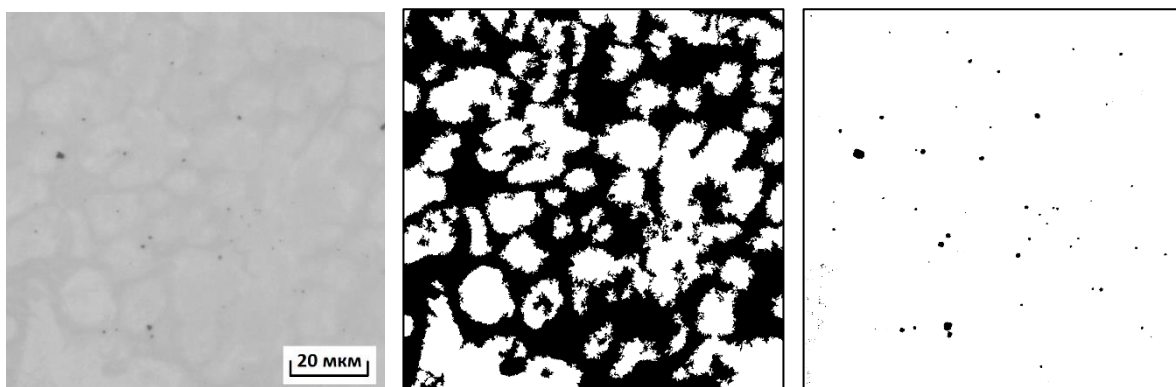
### 3.2.2 Определение необходимого времени травления образцов

Одним из самых важных этапов металлографических исследований является травление (рисунки 44 – 47). Стандартные методы металлографии, заключающиеся в визуальном осмотре объектов на изображении, предполагают четкое вытравливание границ, которое в дальнейшем можно было распознать невооруженным глазом [46]. В современных компьютеризированных методах нужно лишь создать условия для определения тех или иных параметров объектов [116, 120].

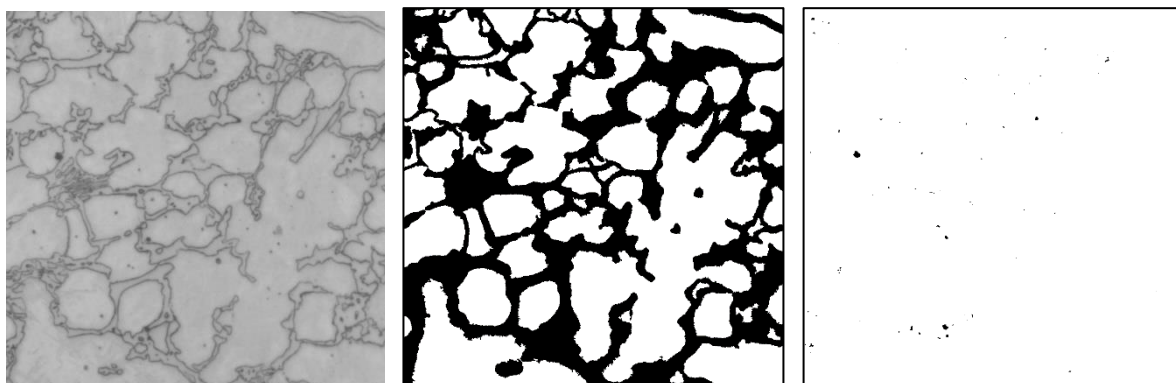
Одним из факторов, определяющих сопоставимость результатов измерения геометрии структур является травление. В работе было оценено влияние времени травления на геометрию структуры твердого сплава на основе железа и вольфрама, где наблюдались светлые объекты (дендриты или карбиды) и россыпь темной составляющей точечной формы (рисунки 44 – 47). Последовательное увеличение времени травления (с шагом в 2-3 секунды от 3 до 30 сек) позволило зафиксировать изменения на изображении структуры (на одних и тех же полях зрения площадью 0,01 мм<sup>2</sup> в масштабе образца), измерить площади светлых и темных объектов, рассчитать их средние значения для фиксированных времен выдержки.

Стандартные базы данных времени травления сплавов, полученные эмпирическим путем, в этом случае не подходят. Для некоторых образцов необходимость в травлении полностью отсутствует. При наличии нескольких групп объектов может случиться так, что для каждой из них будет свое время травления.

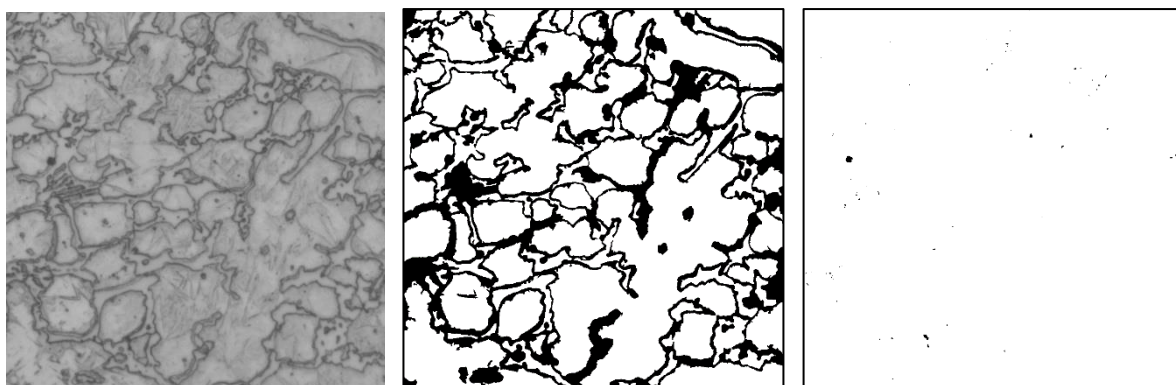
Для 4 сплавов была опробована методика поэтапного травления с шагом в 2-3 секунды. Для каждого шага производилось съёмка на одном и том же поле зрения, измерялись параметры объектов (пункт 2.2) светлых дендритов или карбидов и темных частиц (рисунки 44 – 47). В конце строились графики параметров от времени травления и делались выводы.



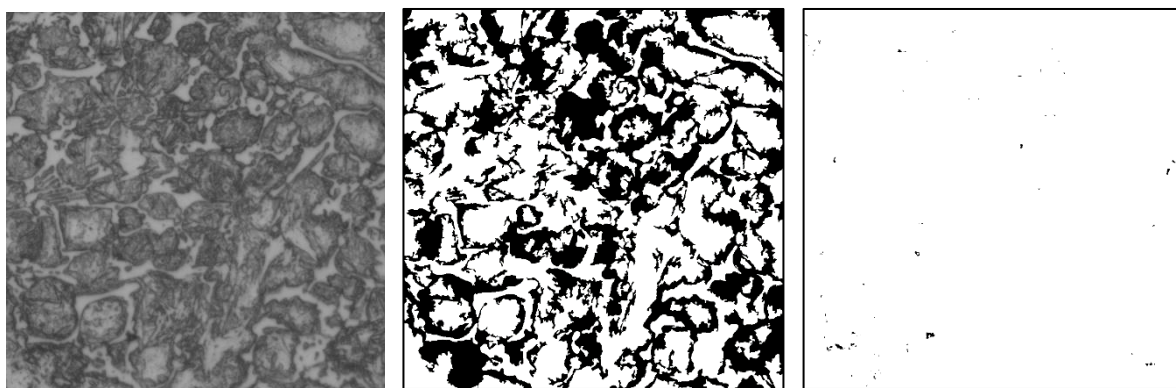
До травления



2 секунды травления

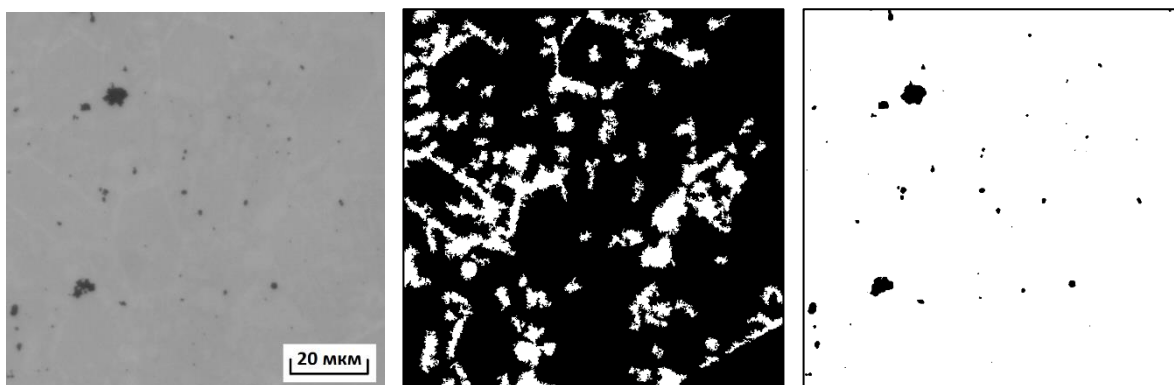


10 секунд травления

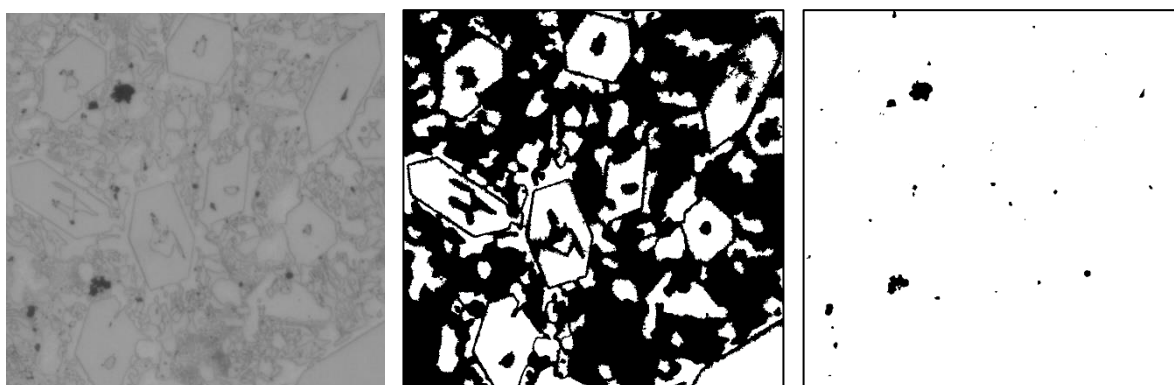


20 секунд травления

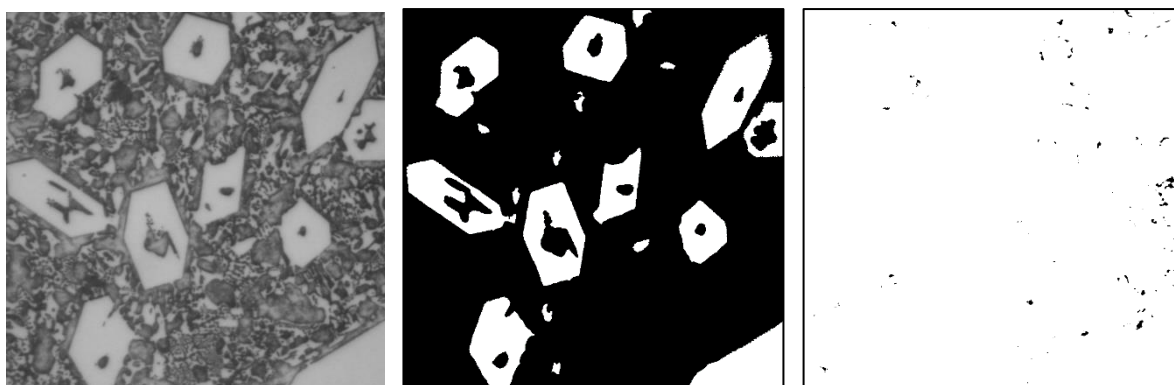
Рисунок 44 – Влияние времени травления на качество изображения  
твердого сплава 1,  $\times 500$



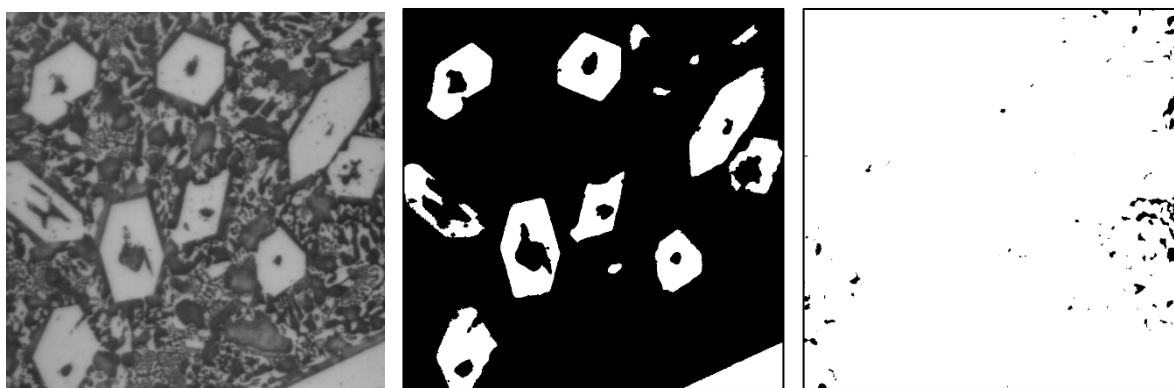
До травления



3 секунды травления

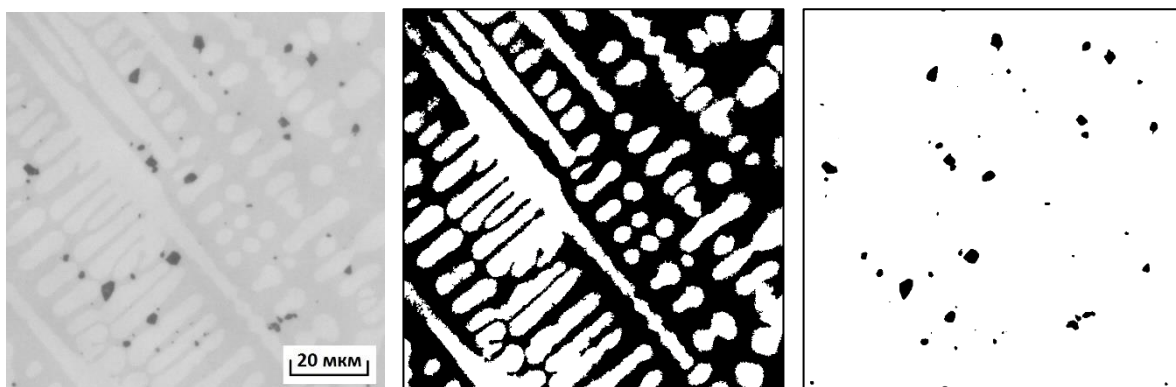


30 секунд травления



60 секунд травления

Рисунок 45 – Влияние времени травления на качество изображения  
твердого сплава 4,  $\times 500$



До травления



3 секунды травления



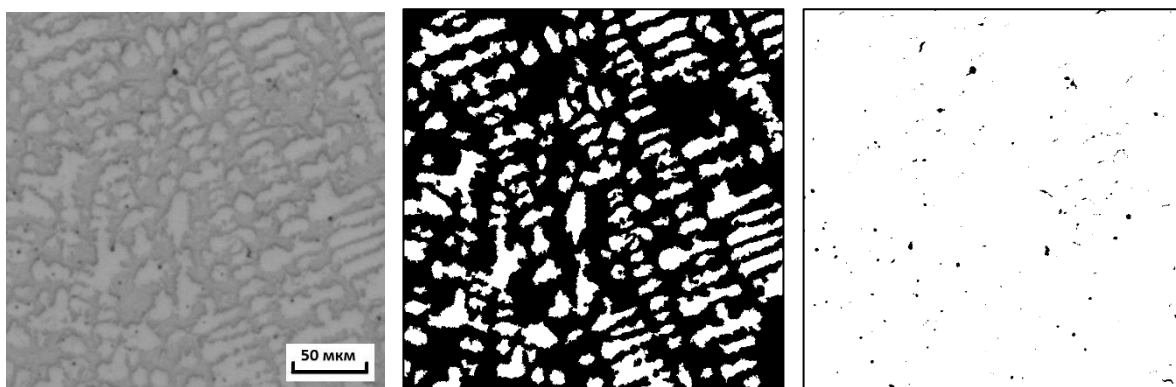
15 секунд травления



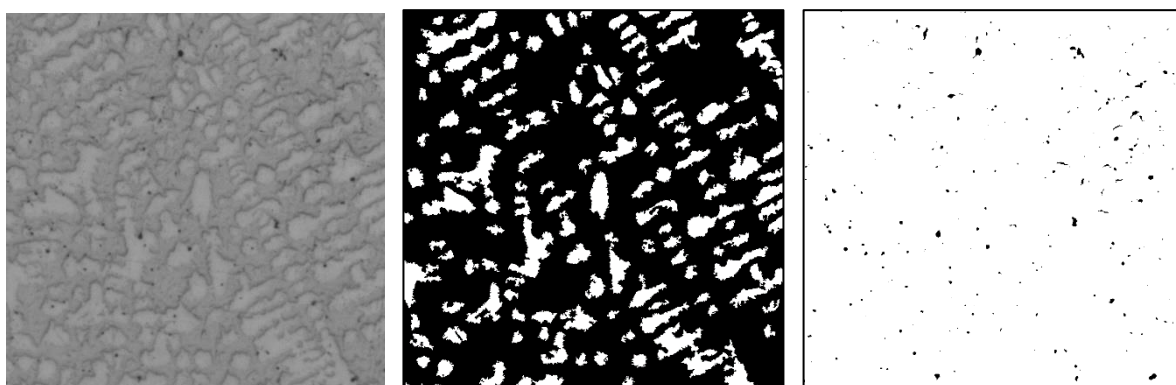
30 секунд травления

Рисунок 46 – Влияние времени травления на качество изображения  
твердого сплава 2,  $\times 500$

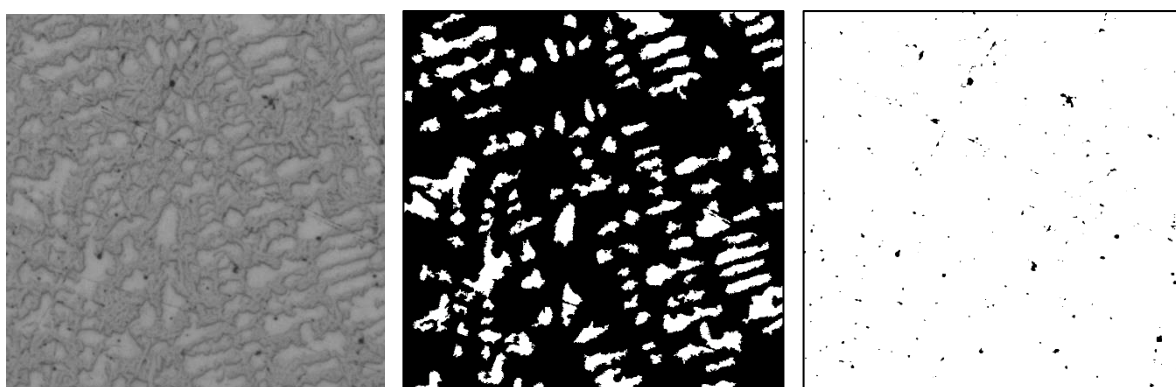




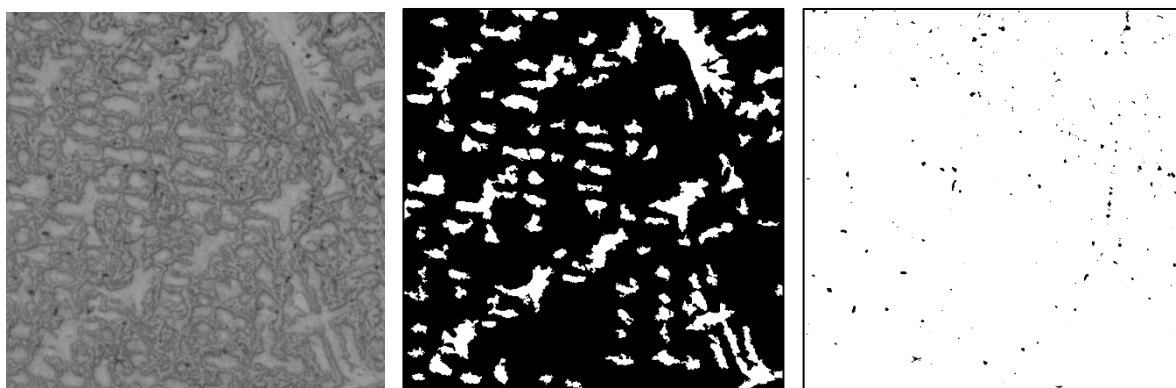
До травления



3 секунды травления



15 секунд травления

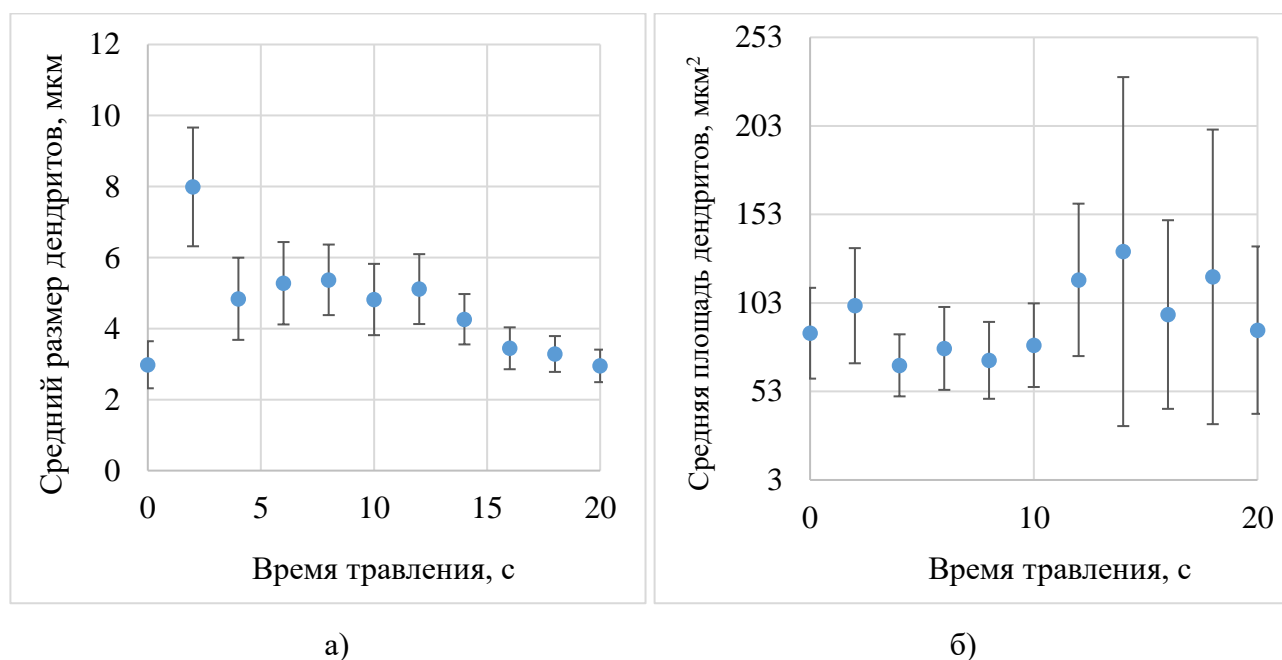


30 секунд травления

Рисунок 47 – Влияние времени травления на качество изображения  
твердого никелевого сплава 3,  $\times 200$

Для всех 4-х исследуемых сплавов заметно, что тёмные частицы лучше видны до травления или на первых его этапах. Неметаллические частицы в технических сплавах видны и без травления, так как металл отражает свет, а включения его поглощают и выглядят более темными. Это говорит о том, что для некоторых сплавов, где светлые объекты невидны до травления (образцы сплавов 1 и 4) необходима съемка и до травления, и после. Для каждого сплава проводилось сравнение выборок средних размеров дендритов по методу секущих для соседних шагов по критерию Колмогорова-Смирнова.

Образец сплава 1 травится очень активно, поэтому его нужно травить возле воды и промывать сразу после травления (рисунок 48).



а – средний размер дендритов; б – средняя площадь дендритов

Рисунок 48 – Параметры дендритов твердого сплава 1,  $\times 500$

До травления плохо заметны дендриты, включения слегка увеличиваются. Поэтому оптимальное время травления 2 секунды для обеих групп объектов, перетрав наступает после 14 секунды. Это хорошо заметно по пику на графике среднего размера дендритов и по увеличению разброса на графике средней площади дендритов (рисунок 48). Критерий Колмогорова-Смирнова выявляет те же критические точки (таблица 8).

Таблица 8 – Критерии Колмогорова-Смирнова твердого сплава 1

Время	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Критерий	2,709	1,862	1,067	0,653	1,077	0,669	0,893	1,407	0,561	0,605

Средняя площадь карбидов, мкм<sup>2</sup>

Время травления, с

Средняя площадь частиц, мкм<sup>2</sup>

Время травления, с

Рисунок 49 – Параметры объектов твердого 4,  $\times 500$

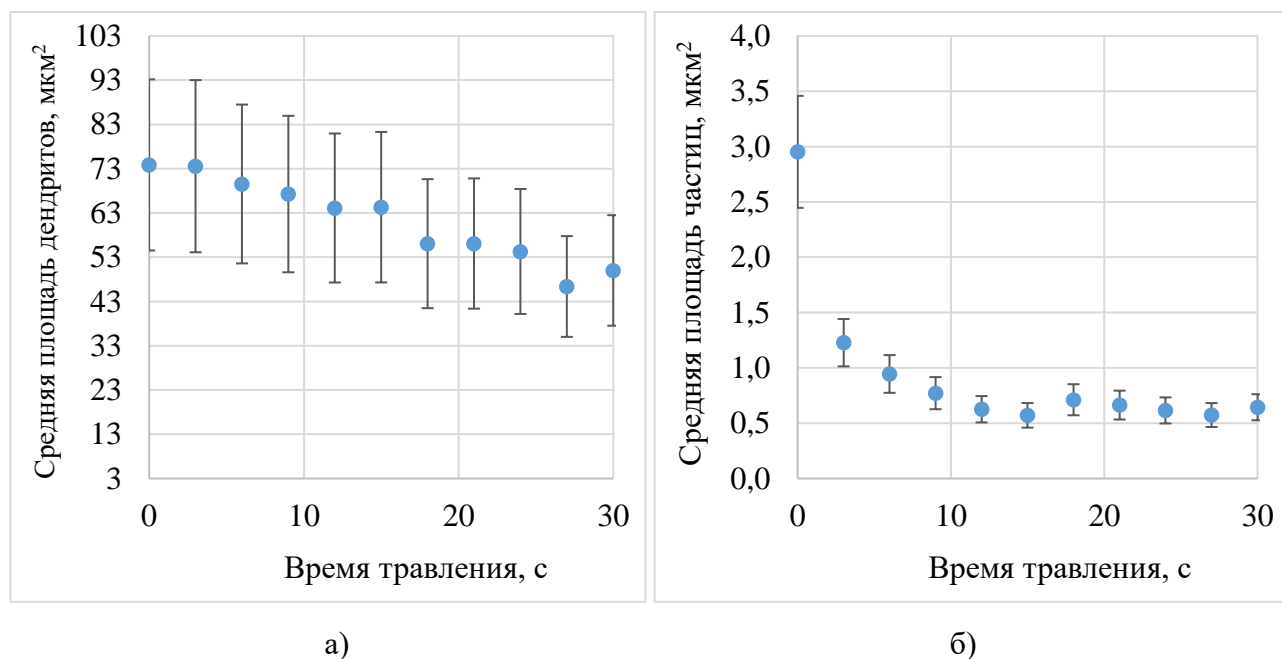
Таблица 9 – Критерии Колмогорова-Смирнова твердого сплава 4

Время	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30
Критерий	-	0,703	1,405	0,653	1,306	0,869	0,949	0,358	0,811	0,615
Время	30-33	33-36	36-39	39-42	42-45	45-48	48-51	51-54	54-57	57-60
Критерий	0,896	0,887	0,818	0,447	0,860	0,757	0,504	0,669	0,513	0,493



Оба этих сплава являются традиционными и требуют травления для выявления основных объектов на изображении. Для них работает принцип мультитравления, так как вытравливание двух групп объектов не одновременно. Для них показана применимость данной методики выбора времени травления.

Образец сплава 2 сильнее вытравливается на границе покрытия, там зёрна коричневые. Травление для этого сплава приводит к уменьшению дендритов и появлению мелких черных объектов включений, что также ведет к уменьшению их среднего размера.



а – средняя площадь дендритов; б – средняя площадь частиц

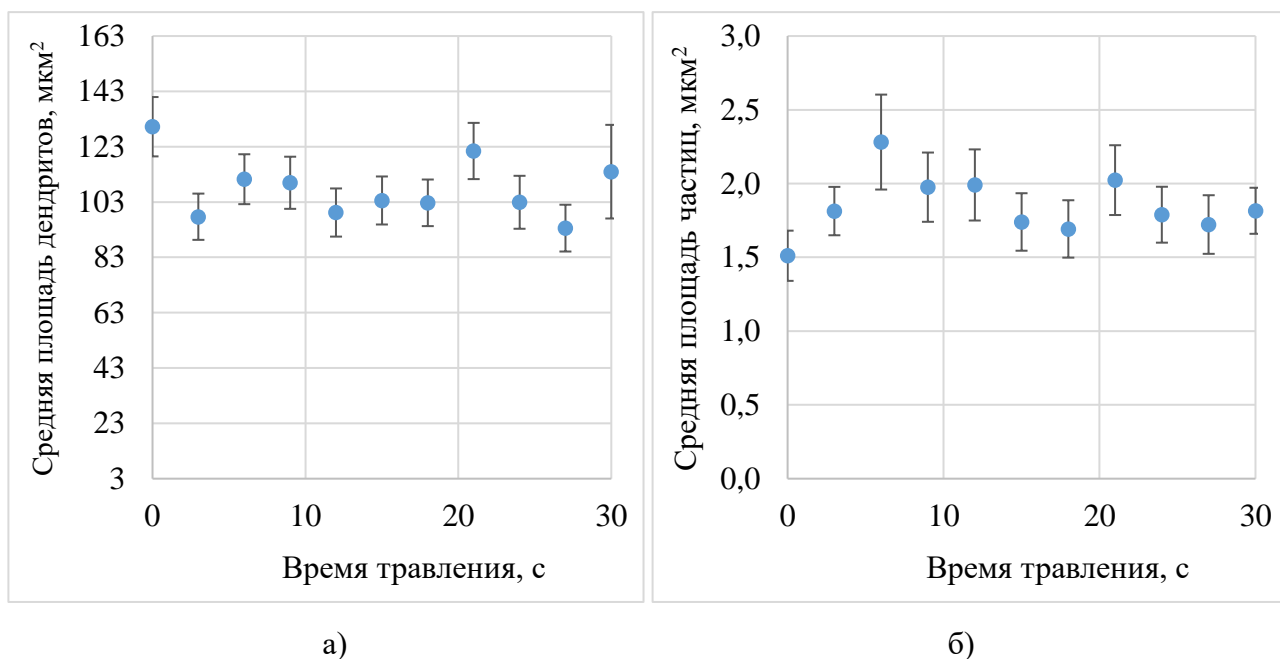
Рисунок 50 – Параметры объектов твердого сплава 2,  $\times 500$

Метод площадей для данного сплава показывает уменьшение размеров и дендритов, и включений от времени травления (рисунок 50). Данный сплав принадлежит к группе сплавов, для которых отсутствует необходимость травления. Объекты явно выделяются для изображений образца до травления. Критерий Колмогорова-Смирнова для метода секущих у этого сплава показал отклонения лишь на 21 секунде (таблица 10).

Таблица 10 – Критерии Колмогорова-Смирнова твердого сплава 2

Время	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30
Критерий	1,203	0,472	0,656	0,763	0,466	1,123	1,360	1,336	0,729	0,454

Для никелевого сплава эксперимент проводился при увеличении  $\times 200$ . Была замечена большая неоднородность размеров дендритов и их ориентировки. Это связано с методикой нанесения покрытий, а также морфологией порошка.



а – средняя площадь дендритов; б – средняя площадь частиц  
Рисунок 51 – Параметры объектов твердого никелевого сплава 3,  $\times 200$

Для данного сплава показано, что травление значимо не влияет на средний размер дендритов и включений (рисунок 51). Критерий Колмогорова-Смирнова показывает то же результат (таблица 11).

Таблица 11 – Критерии Колмогорова-Смирнова твердого никелевого сплава 3

Время	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30
Критерий	1,077	0,776	0,911	1,128	0,810	0,625	0,633	0,541	1,202	0,870

Однако измерение площадей составляющих структуры обычно не эффективно для описания различий в геометрии дендритного рисунка, в частности, вследствие трудностей в разделении, объединенных в один, смежных дендритов. В таких случаях предпочтительнее получение их линейных характеристик. Для сопоставления двух массивов результатов измерений  $n_1$  и  $n_2$  некоторого параметра  $\xi$  обычно по его средним значениям  $\langle \xi \rangle_1$  и  $\langle \xi \rangle_2$  и среднеквадратичным отклонениям, оценивают значимость различия  $[\langle \xi \rangle_1 - \langle \xi \rangle_2] \neq 0$  по критерию Стьюдента. При этом по умолчанию предполагается если не нормальное, то, по крайней мере, симметричное распределение значений. Однако применимо к параметрам

геометрии микроструктуры распределения чаще имеют асимметричный характер, в частности, для образца твердого сплава 2 коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения значений поперечников дендритов были равны 1,4 и 4,8 соответственно. В этой связи в работе выборки результатов измерения средних размеров светлых объектов (методом секущих в двух взаимно перпендикулярных направлениях) были сопоставлены с использованием критерия непараметрической статистики Колмогорова-Смирнова: попарно, для смежных значений времен травления и для предельных значений (с продолжительностью травления 3 и 30 с). Экспериментальные значения критерия Колмогорова-Смирнова  $|D^*(x^*)|$  изменялись в диапазоне от 0,45 до 1,36 (табличные значения составили 1,358; 1,224 и 1,070 для риска 0,05; 0,1 и 0,2 соответственно). При этом значимое различие структур после травления (по сравнению с исходной структурой, наблюдаемой после трехсекундного травления) после 18 сек травления и далее (с риском 0,2).

Это означает, что изменению продолжительности травления сопутствует изменение значений параметров геометрии светлой составляющей структуры исследуемого твердого сплава. Игнорирование этого обстоятельства не принципиально, когда речь идет о визуальном сравнении с эталоном (картинкой), но может привести к появлению псевдоразличий в характеристиках микроструктуры, когда оцениваются её количественные характеристики. Масштаб влияния данного фактора, по-видимому, будет определяться морфологией конкретной структуры.

Отсутствие травления для таких сплавов приводит к упрощению обработки шлифов, уменьшению затрат (время, закупка травителя, работа вытяжки и другое) на это и более точному результату измерения.

Для серийных сплавов данную методику необходимо применить только один раз при определении оптимального времени травления или его отсутствия с использованием компьютеризированной обработки изображений структур. В дальнейшем возможно создание баз данных такой методики определения времени травления для целого ряда сплавов.

### 3.2.3 Оценка влияния увеличения на геометрию элементов структуры

Далее было необходимо определить увеличение, при котором снимаются образцы. 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 ( $0,02 \text{ мм}^2$  в масштабе образца, получаемом при увеличении 500 крат) (рисунок 52).

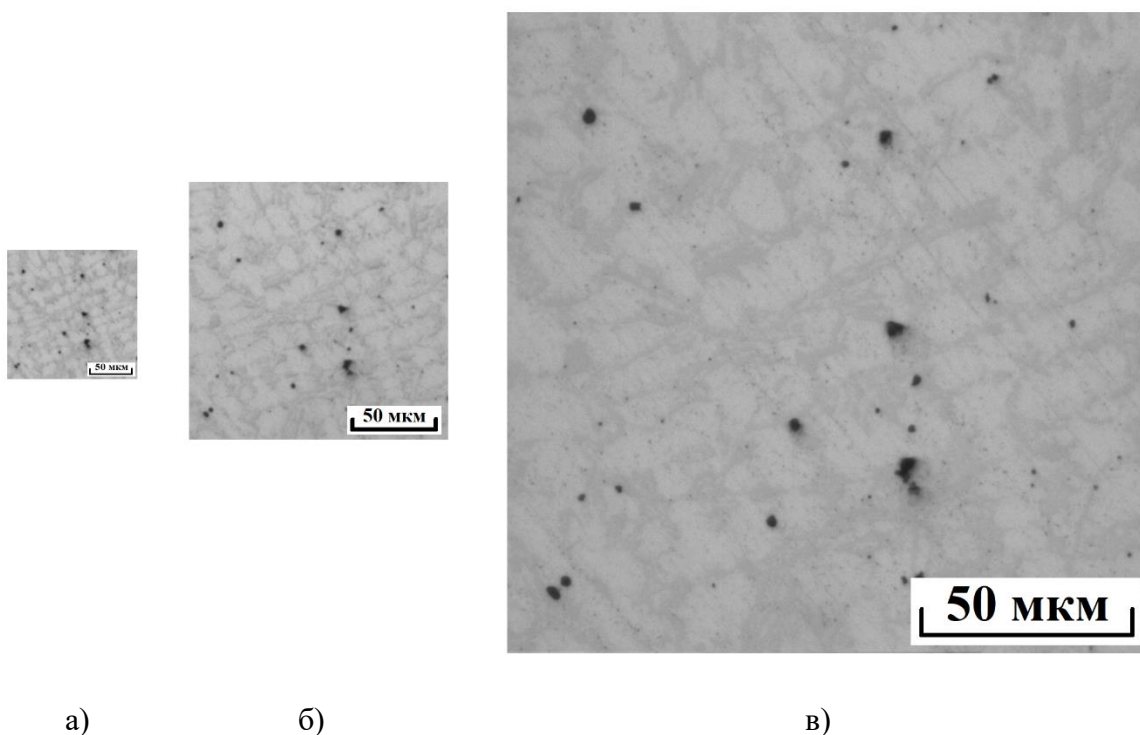


Рисунок 52 – Изображения микроструктуры твердого сплава 3 на никелевой основе при увеличениях 100 (а), 200 (б) и 500 (в) крат.

Для точности эксперимента важным является сопоставление одинаковых полей зрения для разных увеличений (рисунок 53). Попытки сравнения произвольных полей зрения другого никелевого образца привели к тому, что при одинаковой фильтрации объектов происходит скачок среднего значения при  $\times 200$  (рисунок 53). Это как раз связано с неоднородностью размера и ориентации объектов изображения на разных полях зрения.

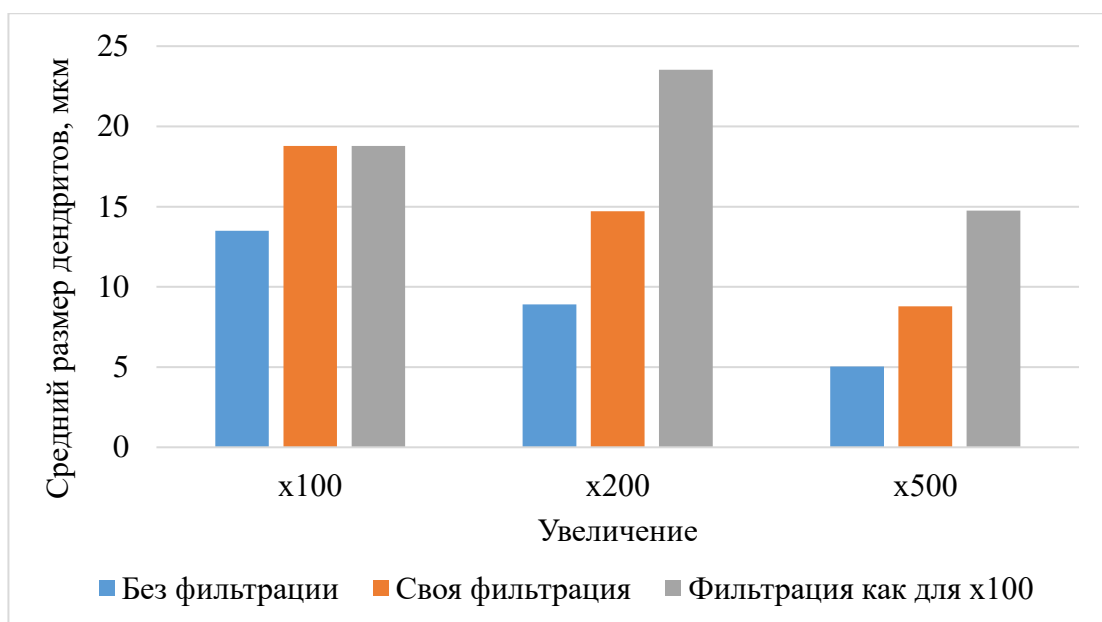


Рисунок 53 – Сравнение значений среднего размера дендритов твердого сплава на никелевой основе по измерениям методом секущих на разных полях зрения при разных увеличениях и уровнях фильтрации (едином для всех – база  $\times 100$ ; и индивидуальном для каждого увеличения)

Сопоставление одинаковых полей зрения при разных увеличениях требует съемки панорам. Чем больше поле зрения будет рассматриваться, тем более воспроизводимую характеристику абсолютной величины можно получить с учетом неоднородности размеров объектов. Вычитание полинома из панорамного изображения, склеенного из нескольких изображений, что необходимо при большом увеличении, для выравнивания его по освещенности невозможно. Это связано с тем, что каждое из склеенных изображений имеет свой градиент освещенности. Эта проблема не дает бинаризовать изображение для измерения размера объектов (рисунок 54).

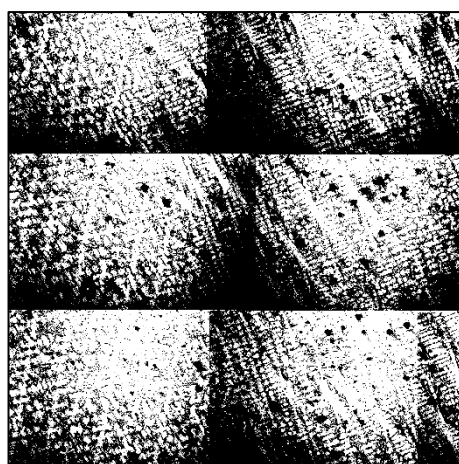
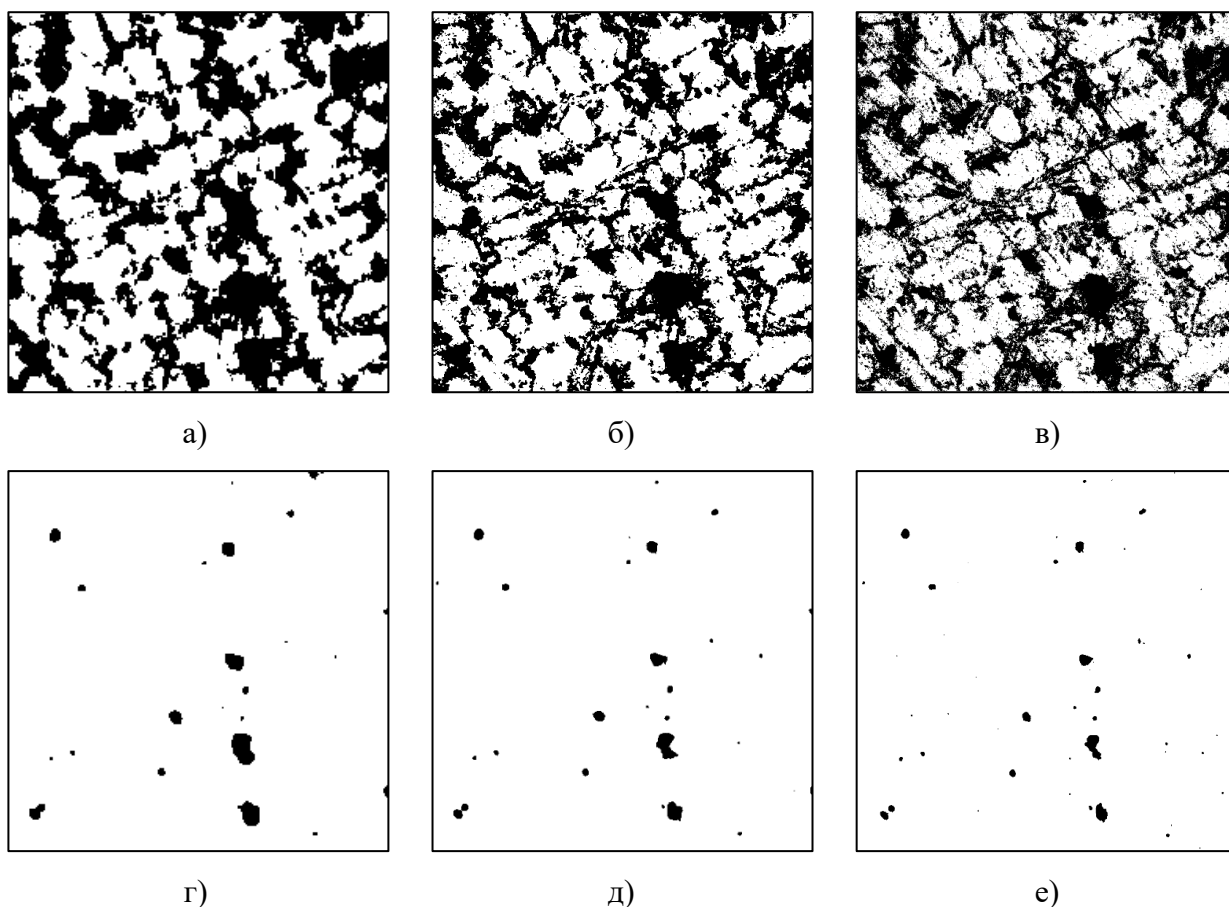


Рисунок 54 – Бинаризация панорамного изображения

Поэтому поле зрения выбиралось меньше одного из склеенных изображений большего увеличения  $\times 500$ . В дальнейшем предлагается встроить выравнивание изображений в процесс съёмки перед склеиванием для получения возможности измерения объектов панорамных изображений.

Полученные изображения подвергались последовательной обработке: удаление градиента по освещению, бинаризация, фильтрация шумов, измерение размера объектов. Так как на изображениях имеется 2 группы объектов (светлые дендриты и черные включения), то целесообразно использовать мультипликацию (рисунок 55).



а, г – увеличение  $\times 100$ ; б, д – увеличение  $\times 200$ ; в, е – увеличение  $\times 500$

Рисунок 55 – Бинарные изображения светлых дендритов после фильтрации и темных включений твердого сплава 3 на никелевой основе

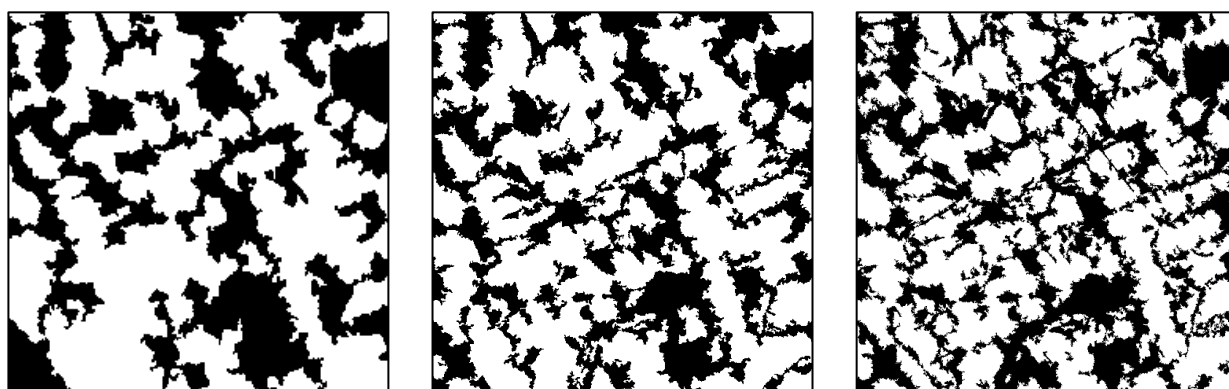
Повышение оптического увеличения привело к появлению более мелких элементов (объектов) изображения и снижению их среднего размера, в частности светлых объектов (таблица 12). Большинство из них различимы человеческим глазом, но надежно могут быть распознаны на изображении элементы структуры размером от 1 мм и выше. При оптическом увеличении 100, 200 и 500 крат поперечник такого минимально идентифицируемого объекта

в масштабе образца составит 10, 5 и 2 мкм соответственно. Это определило уровень фильтрации шумов на изображении: <100, 25 и 4 мкм<sup>2</sup> соответственно. Если изображения исследуются отдельно, то лучше использовать своё разрешение для каждого изображения (рисунок 56 и таблица 13). Фильтрация тёмных включений при этом не проводилась.

Таблица 12 – Параметры светлых дендритов и черных включений без фильтрации твердого сплава 3 на никелевой основе

Увеличение	×100		×200		×500	
Объекты	дендриты	включения	дендриты	включения	дендриты	включения
Среднее, мкм/мкм <sup>2</sup>	8,21	14,65	4,29	8,55	1,82	3,39
Ошибка	0,74	4,48	0,40	2,42	0,15	0,95
Периметр, мкм	-	9,49	-	8,47	-	4,67
Количество, шт.	95	24	197	28	469	52

По данным изображениям заметно, что при росте увеличения лучше прорисовываются границы объектов и, следовательно, не удаляются при фильтрации, что происходит при низком увеличении. При большем увеличении распознаются более мелкие объекты, пиксель весит меньше, и поэтому фильтрация не удаляет такое большое количество объектов. Это приводит к меньшему среднему размеру при ×500.



а)

б)

в)

а – увеличение ×100; б – увеличение ×200; в – увеличение ×500

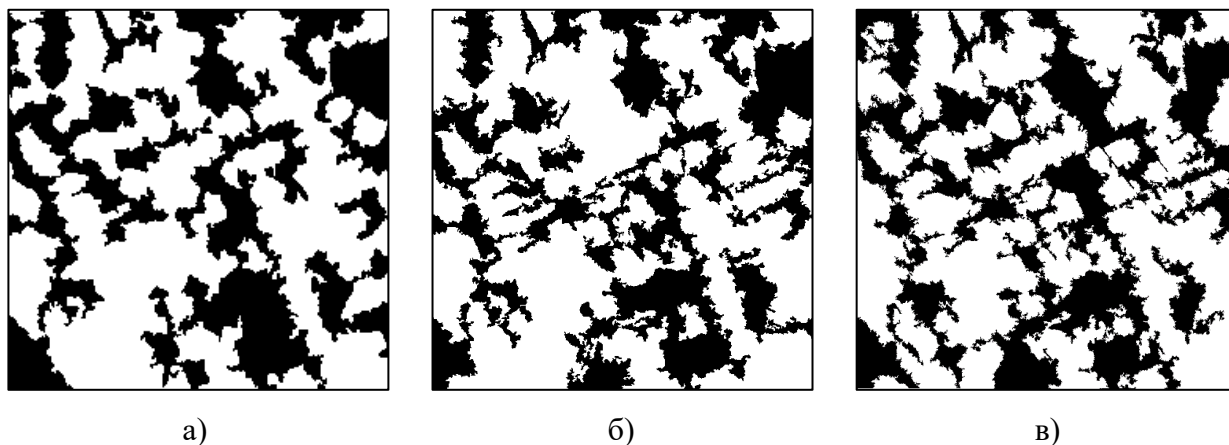
Рисунок 56 – Фильтрация шумов изображений твердого сплава 3 на никелевой основе индивидуальная для каждого увеличения

Как и следовало ожидать, большее увеличение даёт более точные результаты и позволяет измерить больше объектов (таблица 13).

Таблица 13 – Параметры светлых дендритов после фильтрации, индивидуальной для каждого увеличения, и чёрных включений изображений твердого сплава 3 на никелевой основе

Увеличение	×100	×200	×500
Среднее, мкм	12,30	7,61	4,04
Ошибка	1,59	0,75	0,41
Количество, шт.	61	110	202

Для получения же сопоставимых результатов была выполнена процедура фильтрации, ограничившая на всех изображениях минимальный размер их элементов уровнем  $<100 \text{ мкм}^2$ . Такое сопоставление показало, что с каждым шагом оптического увеличения средние размеры светлых и темных объектов (поперечники и площади соответственно) уменьшаются (рисунок 57). Это связано, в частности, с различием в уровне разрешения изображений: 40; 80 и 200 пк/дюйм, что обеспечивает более детальную «прорисовку» контура элементов на изображении, что может привести при формальном использовании метода секущих к появлению «новых» объектов. Это обстоятельство необходимо учитывать, при проведении количественных измерений.



а – увеличение ×100; б – увеличение ×200; в – увеличение ×500

Рисунок 57 – Фильтрация шумов для светлых дендритов изображения твердого сплава 3 на никелевой основе как для ×100

По изображениям (рисунок 57) можно заметить, что один и тот же объект при разных увеличениях может иметь разный размер, непохожую форму или вообще удаляться. Такая разница и играет роль в средних размерах объектов (таблица 14).



Таблица 14 – Параметры светлых дендритов после фильтрации изображения твердого сплава 3 на никелевой основе как для  $\times 100$

Увеличение	$\times 100$	$\times 200$	$\times 500$
Среднее, мкм	12,30	9,29	4,73
Ошибка	1,59	1,13	0,56
Количество, шт.	61	84	153

Результаты данного эксперимента показывают (рисунок 58), что независимо от типа обработки величина среднего размера дендритов уменьшается с ростом увеличения. Это связано с тем, что при большем увеличении лучше детализация объектов, видны более мелкие части объектов, а сами объекты тоже меньше. Хорошей иллюстрацией причин этого являются изображения черных включений (рисунок 55, г, д, е).

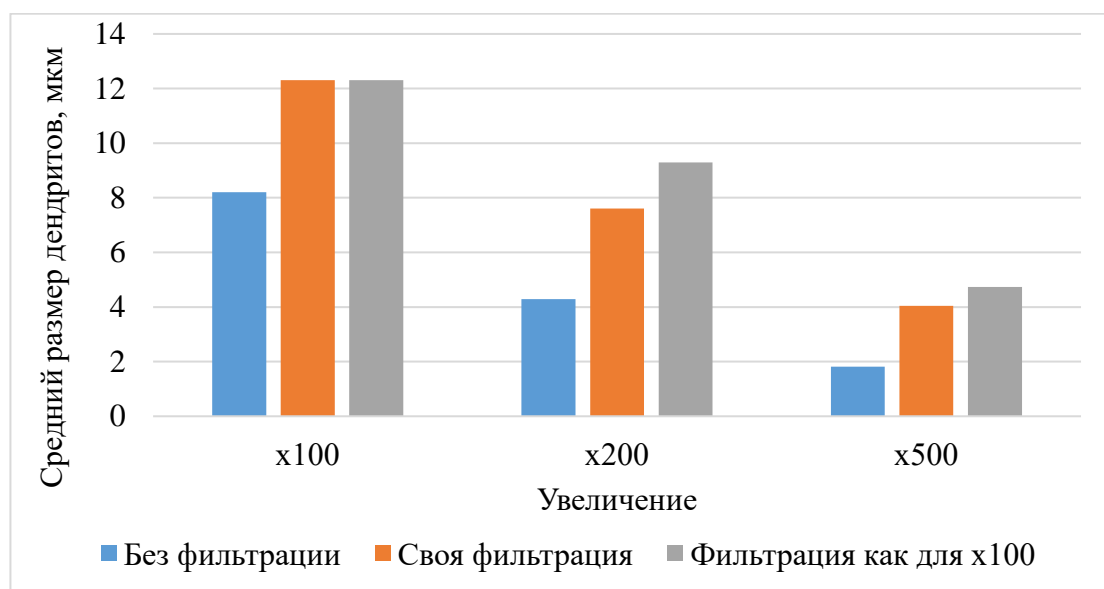


Рисунок 58 – Сравнение значений среднего размера дендритов твердого сплава на никелевой основе по измерениям методом секущих на одном и том же поле зрения при разных увеличениях и уровнях фильтрации (едином для всех - база  $\times 100$ ; и индивидуальном для каждого увеличения)

Дело в том, что на уменьшение среднего размера влияет не только мелкий шум, что было проверено как раз путем его удаления. Грубая прорисовка границ объектов при  $\times 100$  увеличивает эту границ и, как следствие, площадь данного объекта (рисунок 59).

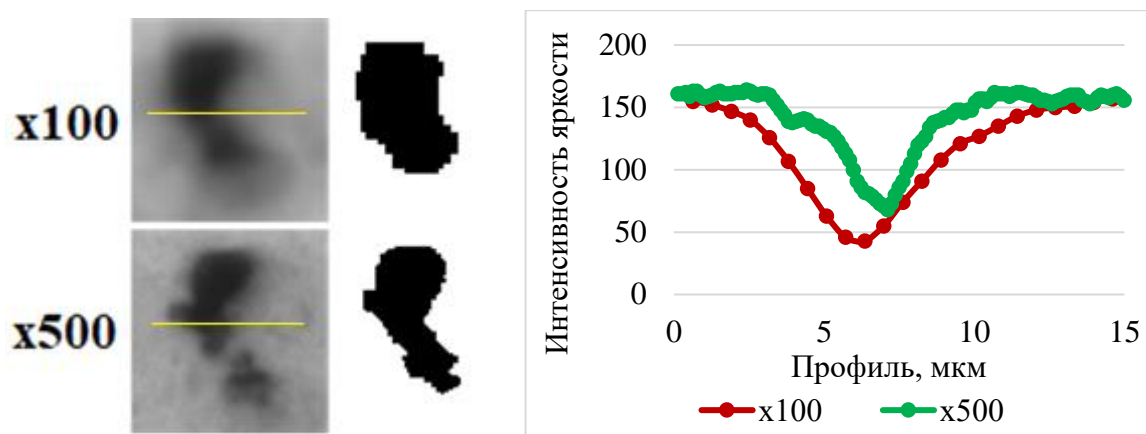


Рисунок 59 – Выделение объектов частиц на бинарных изображениях при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$

Параметры данного объекта (периметр и площадь) при указанных увеличениях показаны в таблице 15.

Таблица 15 – Параметры объектов частиц при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$

Увеличение	Периметр		Площадь	
	пкс	мкм	пкс <sup>2</sup>	мкм <sup>2</sup>
$\times 100$	72	45,7	220	88,7
$\times 500$	308	39,1	2302	37,1

Показано, что площадь в квадратных микронах одного и того же объекта при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$  отличается больше, чем в 2 раза. При этом аналогичной разницы в периметре нет, что объясняется развитостью поверхности объекта при увеличении  $\times 500$ .

Таким образом, получить одинаковый результат измерения при разных увеличениях невозможно, тем более при ручном методе обработке изображений. Чем выше увеличение, тем точнее результат. Поэтому выбор увеличения просто зависит от количества объектов на изображении для получения достоверных характеристик. Это значит, что сопоставлять результаты измерений при разных увеличениях напрямую нельзя. Например, при измельчении зерна во время пластической деформации нельзя сравнивать изображения, полученные при разном увеличении. В таком случае сужается диапазон измеряемого размера зерна.

В таком случае появляются вопросы:

1. как выбирать увеличение при съёмке;
2. как проводить эксперимент, если диапазон размеров слишком большой;

3. при каком увеличении снимать панорамные изображения.

Панорамные изображения снимаются чаще всего лишь для качественной оценки структуры в масштабах образца или изделия. Здесь выбор увеличения зависит от состава сплава и качества протравленности объектов для их распознавания.

Таким образом, очевидно, что различие в процедурах получения цифрового изображения, не слишком критичные для последующего их качественного (визуального) анализа может сказаться на конечных результатах измерения геометрии структур.

### 3.2.4 Влияние формата изображения на величину параметров структуры

При съёмке шлифов важным было определить формат изображения для получения максимально полной информации о структуре. Поэтому было проведено сравнение изображений двух форматов bmp и jpg с определением средних размеров объектов с ошибкой и их количества (таблица 16).

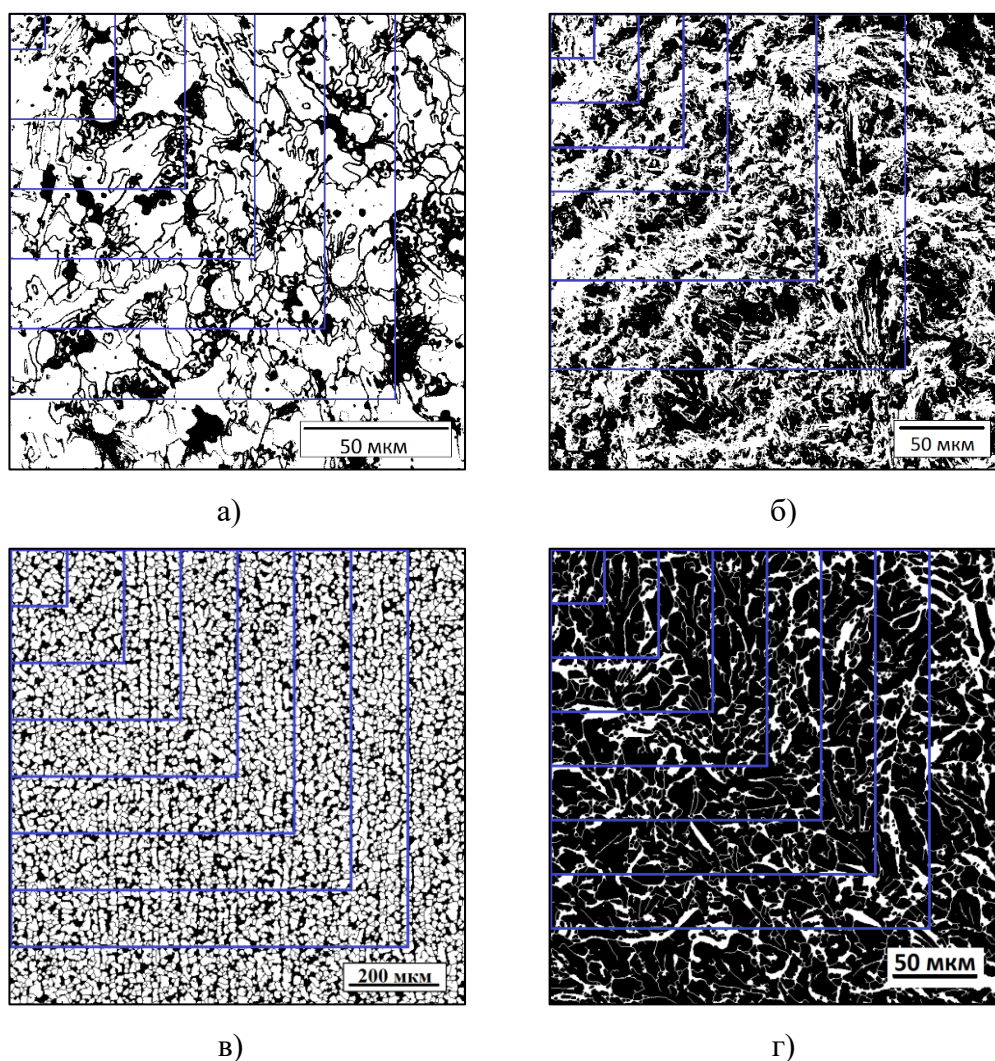
Таблица 16 – Изменение значений параметров структуры для различных форматов цифровых изображений

Объекты		Светлые дендриты		Частицы
Метод		Метод секущих	Метод площадей	Метод площадей
BMP	Среднее, мкм/мкм <sup>2</sup>	9,42	195,30	14,69
	Ошибка, мкм/мкм <sup>2</sup>	1,21	36,61	5,07
	Кол-во, шт.	121	120	10
JPG	Среднее, мкм/мкм <sup>2</sup>	9,54	200,27	15,02
	Ошибка, мкм/мкм <sup>2</sup>	1,20	37,36	5,09
	Кол-во, шт.	123	120	10
К-С критерий		0,324	0,323	0,447

По средним размерам объектов показана близость результатов измерений для обоих форматов. Сравнение выборок по критерию Колмогорова-Смирнова так же не показал разницы. Таким образом, при использовании различных программ на этапах обработки изображений информация не теряется при сохранении в том или ином формате. Однако рекомендуется использовать одинаковый формат на всех этапах во избежание накопления таких различий и получения уже значимо отличающегося результата.

### 3.2.5 Поле зрения

Для получения статистически воспроизводимых результатов при анализе изображений в материаловедении необходимо найти минимальное поле зрения, описывающее строение всего изображения в целом. Важную роль для воспроизводимости полученных результатов играет статистика измерений. Очевидно, что при малом размере кадра «вырезаемые» им фрагменты структуры могут характеризоваться различными геометрическими параметрами. В этой связи легко допустить существование некоторой минимальной (по площади) части изображения, достаточной для получения воспроизводимых характеристик ее геометрии.



а, б – структура и излом твердого сплава 1 соответственно;

в, г – структура и излом феррито-перлитной стали СтЗсп соответственно

Рисунок 60 – Определение минимального размера кадра на исследуемых изображениях, необходимого для получения воспроизводимых характеристик

С этой целью были проанализированы изображения структур и изломов твердого сплава и феррито-перлитной стали. 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 (рисунок 60).

В качестве минимального кадра была выбрана площадь, начиная с которой средний размер объектов изображения не изменялся (рисунок 61).

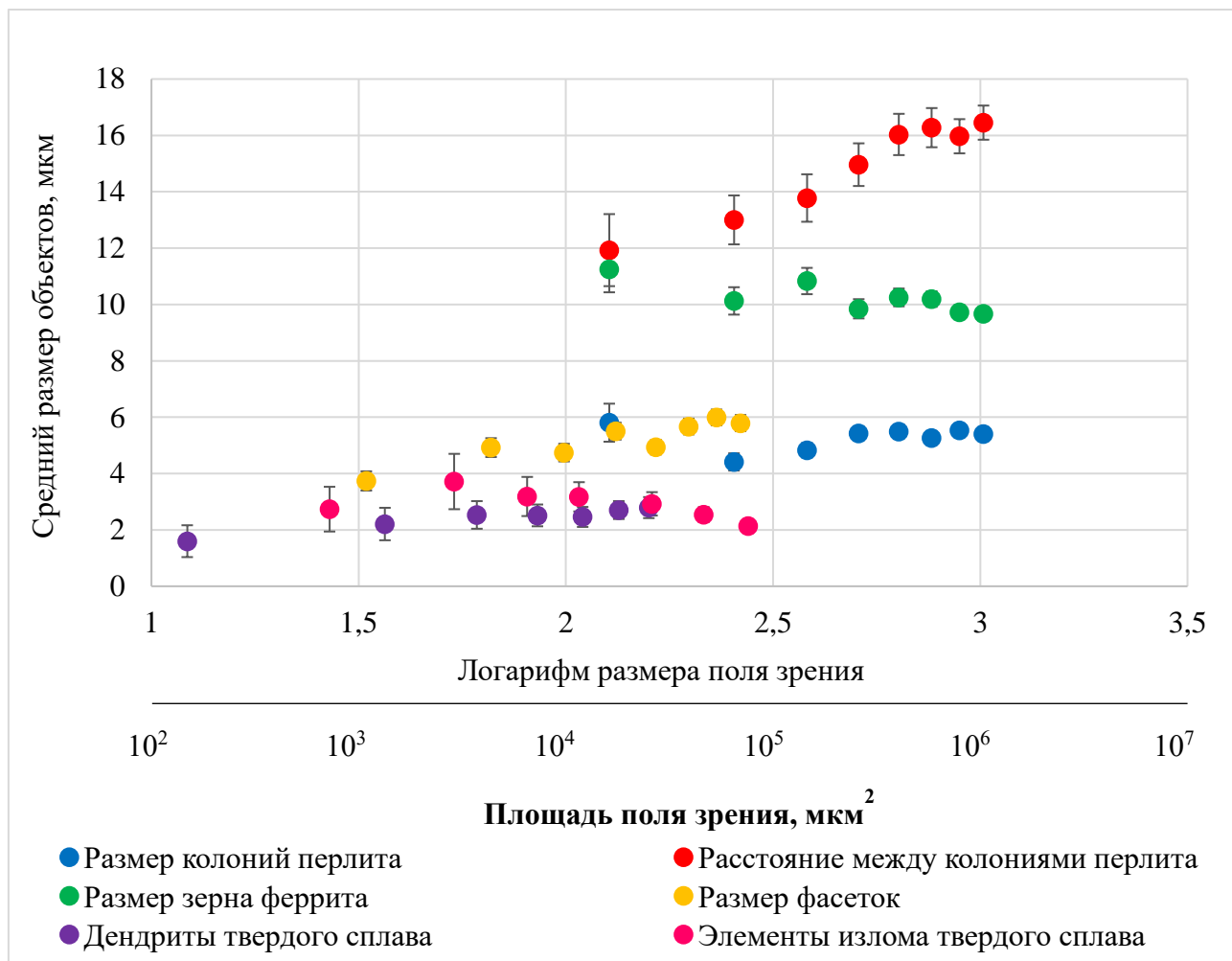
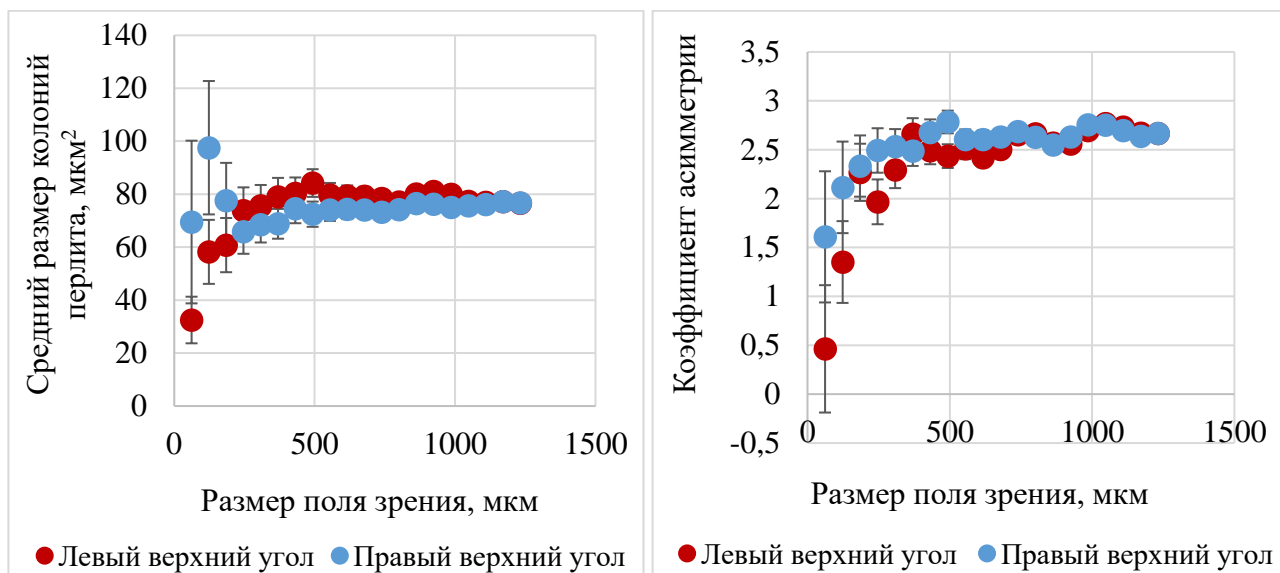


Рисунок 61 – Изменение среднего размера объектов от размера кадра

Показано, что сначала результаты колеблются, затем достигают насыщения, после этого с увеличением размера поля зрения результат не сильно изменяется. Для твердого сплава для воспроизводимости характеристик необходимо работать с кадром размером не менее 150x150 мкм<sup>2</sup>, для полосчатой феррито-перлитной структуры – с кадром не менее 600x600 мкм<sup>2</sup>, для излома – от 200x200 мкм<sup>2</sup> до 1500\*1500 мкм<sup>2</sup> и более.

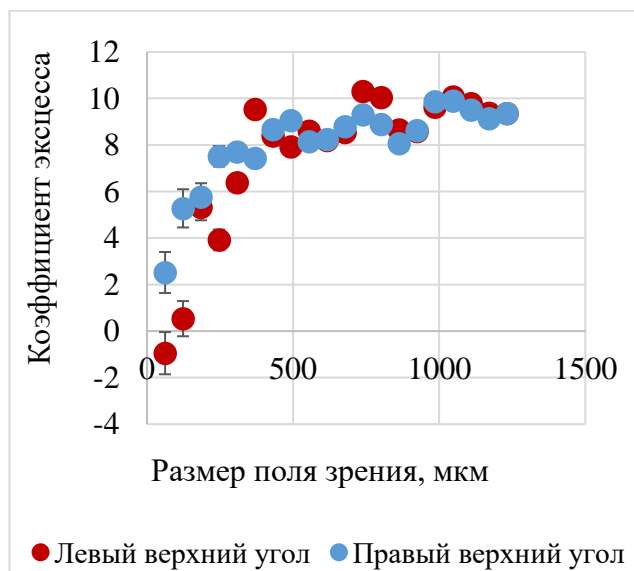
Оптимальный размер кадра возможно определять и по выходу на насыщение статистических характеристик распределений размеров объектов. Для этого на примере

реальной структуры с баллом полосчатости Б2 листовой стали СтЗсп определялось поле зрения по методу секущих и методу площадей. Для повышения достоверности результата отсчет кадра от минимального производился из левого и правого верхних углов изображения за счет его поворота на 90 градусов против часовой стрелки. Для метода площадей и по средним значениям площади объектов, и по статистическим коэффициентам показан (рисунок 62) выход на насыщение при площади кадра 500\*500 мкм<sup>2</sup>.



а)

б)



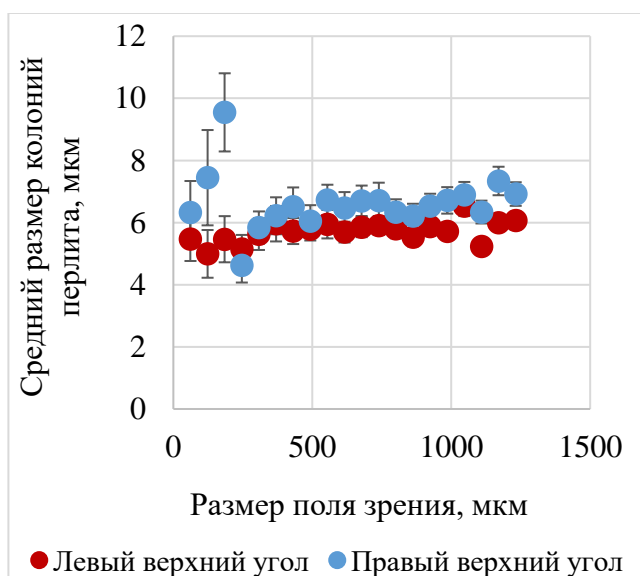
в)

а – средний размер колоний перлита; б, в – коэффициенты асимметрии и эксцесса среднего размера колоний перлита

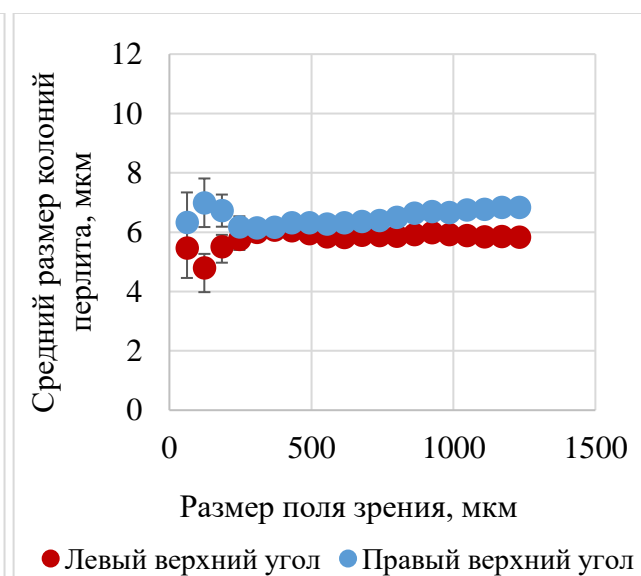
Рисунок 62 – Определения поля зрения по выходу на насыщение параметров объектов и статистических характеристик их распределений метода площадей для изображений листовой стали СтЗсп

Для метода секущих показан аналогичный результат по средним значениям размера колоний перлита (рисунок 63, а), однако значения статистических коэффициентов на насыщение не выходят (рисунок 63, в, д). Это связано с тем, что проводилось одинаковое количество (10 шт.) секущих на каждом кадре изображения (рисунок 63, а, б). При рекуррентно изменяющемся количестве секущих в зависимости от высоты кадра  $m$  ( $m/d_{ср}$  или в данном случае  $m/10$  (6 мкм – 10 пкс)) значения статистических коэффициентов также выходят на насыщение (рисунок 63, г, е).

Определение поля зрения является важным этапом металлографических исследований независимо от наличия автоматизированных процедур. Однако его проведение без таких процедур очень трудоемко. Поэтому в исследованиях с ручными измерениями такой методики не было замечено. Для получения достоверных результатов структурного описания материалов, особенно неоднородных на всех масштабных уровнях, необходимо исследование кадра, не меньше определенного выше. Качественные методы сопоставления увиденного в окуляр с балльной шкалой могут быть недостоверными в случае, когда минимальное поле зрения больше кадра в окуляре. В такой ситуации оценка качества продукции может быть неверной.

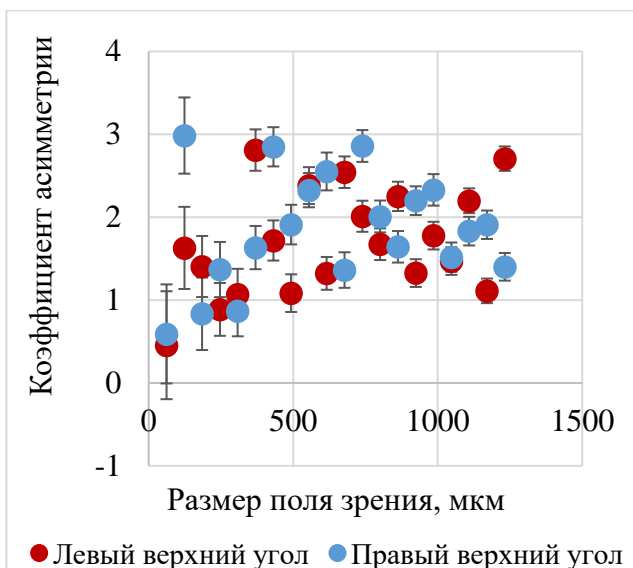


а)

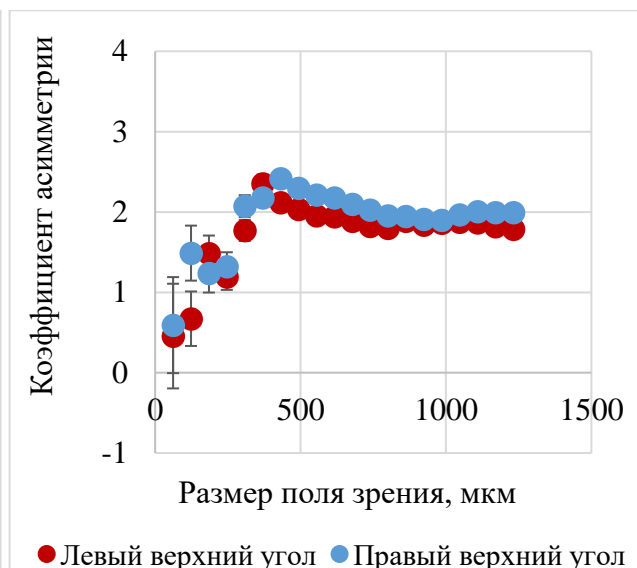


б)

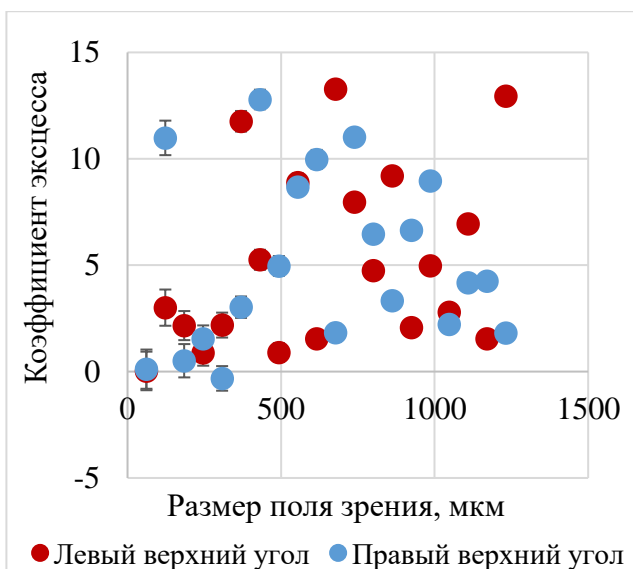




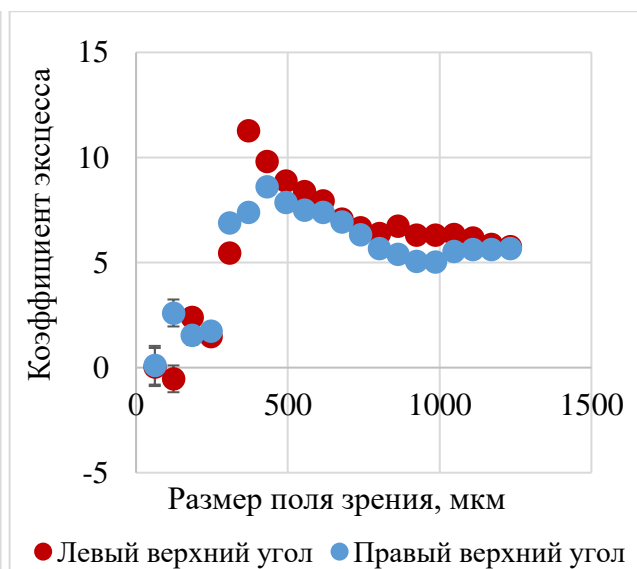
в)



г)



д)



е)

а, в, д – одинаковое количество секущих; б, г, е – изменяющееся количество секущих

Рисунок 63 – Определение поля зрения по выходу на насыщение параметров объектов и статистических характеристик их распределений метода секущих для изображений листовой стали СтЗсп

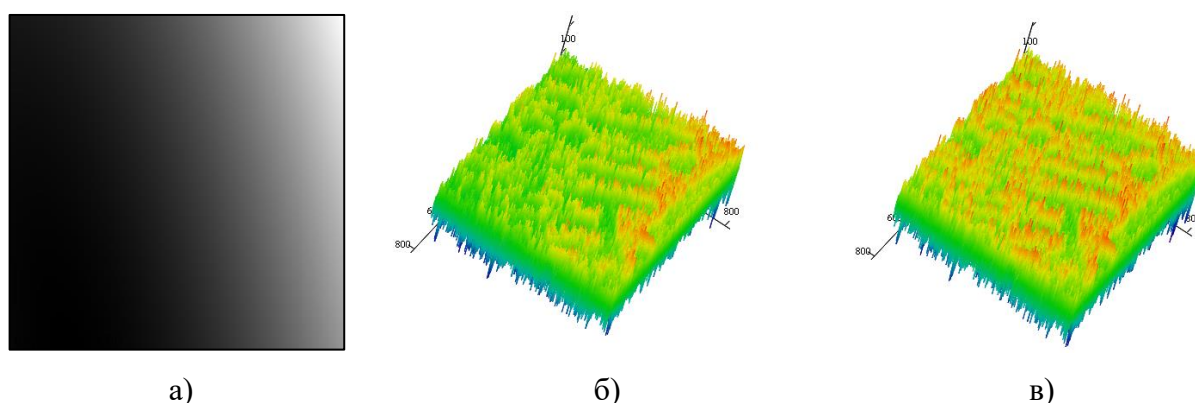
Очевидно, что величина такой минимальной площади характеризует масштаб неоднородности изображения структуры, определяющей разброс пластичности и вязкости металла. В таком случае использование образцов для механических испытаний меньших габаритов по сравнению с масштабом структурной неоднородности может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

### 3.2.6 Выравнивание изображений

В цифровой форме изображения структур представляли собой поля яркости (в 256 оттенках серого)  $z(x,y)$  – однозначной функции координат на плоскости кадра. Её исходное распределение по плоскости могло быть неравномерно, например, в связи с падением освещенности к периферии поля зрения микроскопа или отсутствием горизонтальности поверхности шлифа, и тогда её устранили вычитанием линейного или нелинейного фона [55]. Самым оптимальным методом является вычитание поверхности 2-й степени из 3D распределение интенсивностей яркости изображения. Для изломов такой необходимости не было в силу другого принципа работы сканирующего микроскопа.

Неоднородности изображения могут вносить существенный вклад в результаты измерения параметров элементов. При использовании широкоугольного объектива («рыбий глаз») получается большая неоднородность по освещению изображения, что приводит к наличию затемнённых и засветлённых полей, то есть разброс интенсивностей на изображении становится больше. Это приводит к существенной потере информации при бинаризации и невозможности измерения большей части объектов (элементов) изображения. Также здесь существенную роль играет структурная неоднородность и тени на изображениях изломов.

Для выявления неоднородности освещения строились карты градиента интенсивностей, по которым вычислялись вычитаемые поверхности, а также строились 3D распределения интенсивностей яркости изображения до и после выравнивания (рисунок 64).



а – градиент интенсивности яркости; б, в – 3D распределения интенсивности яркости до и после выравнивания

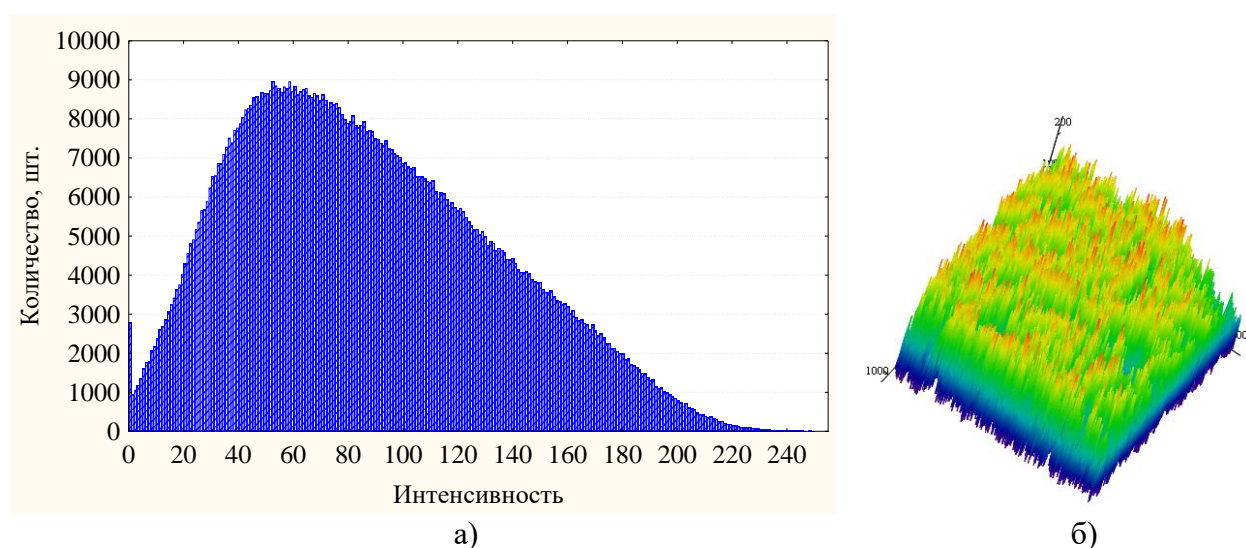
Рисунок 64 – Выравнивание изображений

Данный метод позволил сохранить часть информации, исчезающей за счёт объединения объектов в чёрные или белые пятна после бинаризации. Вычитание 3D

поверхности является более точным, чем ранее используемый метод вычитания полинома 2-й степени по горизонтальным или вертикальным профилям.

Важно заметить, что помимо неоднородности по освещению бывает неоднородность по фокусу, которую, в отличие от первой, невозможно убрать. Для этого рекомендуется использовать специальный шлифовально-полировальный станок, обеспечивающий плоско-параллельность шлифа. Такой вид неоднородности создаёт именно ручной метод.

Чтобы выделить плоские участки частиц (образования типа фасеток) в изломе также строились 3D распределения и гистограммы интенсивностей изображений.



а – 2D распределение; б – 3D распределение

Рисунок 65 – 2D и 3D распределения интенсивностей яркости изображения излома, твердый сплав 1,  $\times 500$

Вид данных гистограмм (см. рисунок 65, а) показывает отсутствие существенных неоднородностей изображений. 3D распределение интенсивностей яркости явно показывает плоские участки карбидов (см. рисунок 65, б), которые имеют малый разброс интенсивностей на своей поверхности, что является основой для их дальнейшего выделения и измерения.

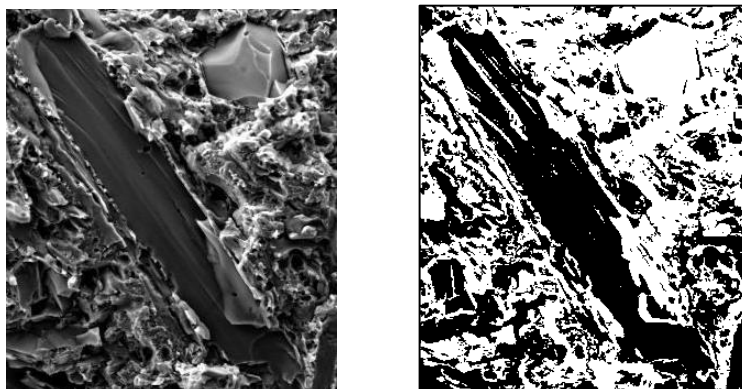
### 3.2.7 Бинаризация изображений

В работе было опробовано большинство существующих методов бинаризации несмотря на все их минусы для сравнения и выявления более подходящих для конкретных задач, так как производительность и качество методики бинаризации влияет на качество распознавания объектов [61]. Опишем работу методов детально. Необходимо объяснить принципы работы данных методов и их преимущества для конкретных задач.

Исследуемые глобальные методы хорошо работают на изображениях с крупными тёмными или разделёнными объектами (эритроциты на рисунке 33, глобулярный цементит, неметаллические включения) [121]. В таких случаях не имеет смысла использование локальных методов с созданием большого количества шума и других методов сегментации, так как это существенно усложняет работу.

Для комплексных структур с наличием нескольких структурных составляющих на С-образной кривой имеется несколько пиков (данный метод описан в теоретическом разделе (см. пункт 1.3.1). Ранее бинаризация проводилась по максимальному пику, что было ошибочно для таких изображений. Таким образом бинаризация становится мультиризацией, которая будет описана ниже.

Аналогичная методика была применена и для изображений изломов. Данный метод, как и все глобальные методы бинаризации, не применим для задач фрактографии, так как ориентировка элементов излома в пространстве сказывается на их цвете после бинаризации и, соответственно, на результат измерения. Для изломов недостатки глобальных методов более очевидны, так как здесь важную роль играет неровность поверхности изломов. Лучше всего это можно проследить на рисунке 66: плоские фасетки карбидов после бинаризации могут быть как белыми, так и чёрными.



а)

б)

а – участок исходного изображения излома; б – метод С-образной кривой

Рисунок 66 – Глобальная бинаризация изображения излома

Для описания глобальных методов также показана работа весьма популярного метода Оцу после выравнивания. Для изображений изломов метод Оцу сливает объекты сильнее, что можно заметить по доле чёрного на изображениях.

Всё выше приведённое наглядно показывает, что обычные глобальные методы бинаризации, в том числе и простой метод среднего, не позволяют измерять конкретные мелкие объекты: зерна, частицы, карбиды и прочее. Если же на изображении имеется несколько типов объектов, то бинаризация в принципе не может помочь в вопросе сегментации изображения.

Для визуального сравнения глобальных методов строился профиль изображения с указанием уровня бинаризации для различных методов (рисунок 67):

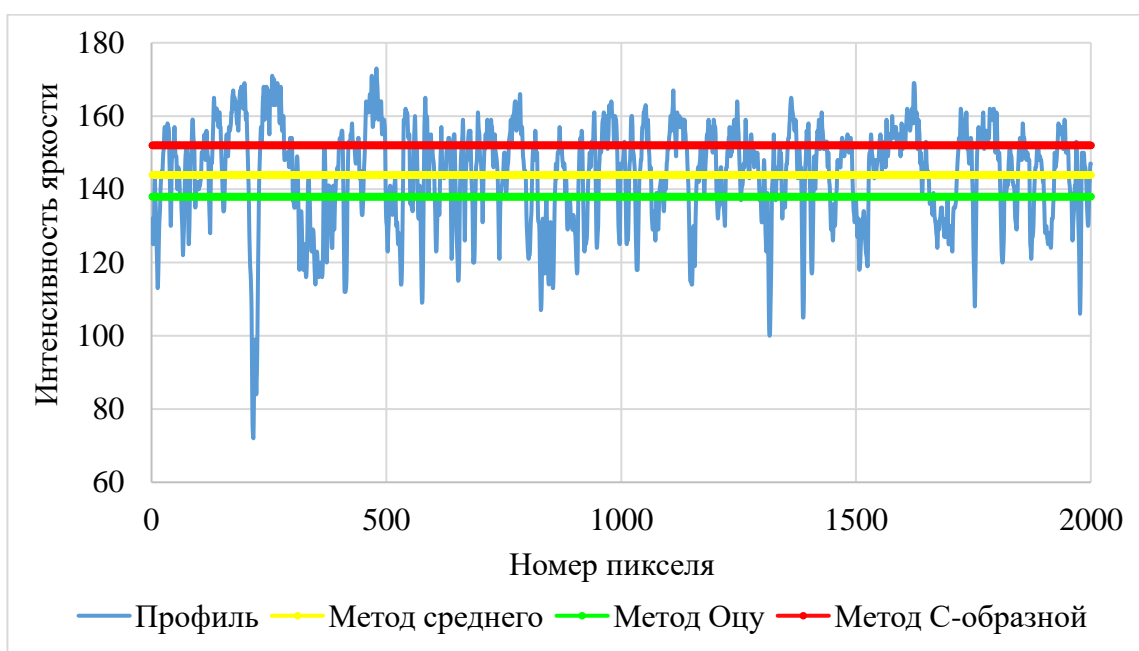


Рисунок 67 – Профиль с указанием уровней бинаризации для различных методов

Ниже представлено сравнения трех методов (рисунок 68) путём наложения друг на друга с использованием разного цвета. Заметна наглядная разница этих глобальных методов. Данная разница в зависимости от типа строения структуры, количества структурных составляющих, а также уровня подготовки шлифа и изображения может увеличиваться или уменьшаться вплоть до совпадения бинарных изображений, полученных разными методами бинаризации.

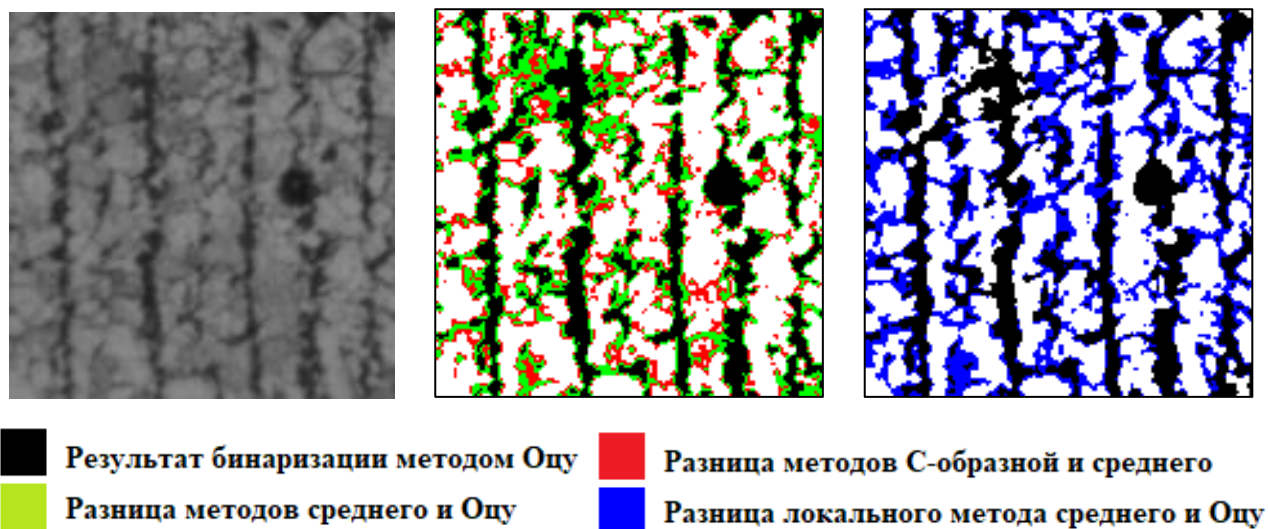
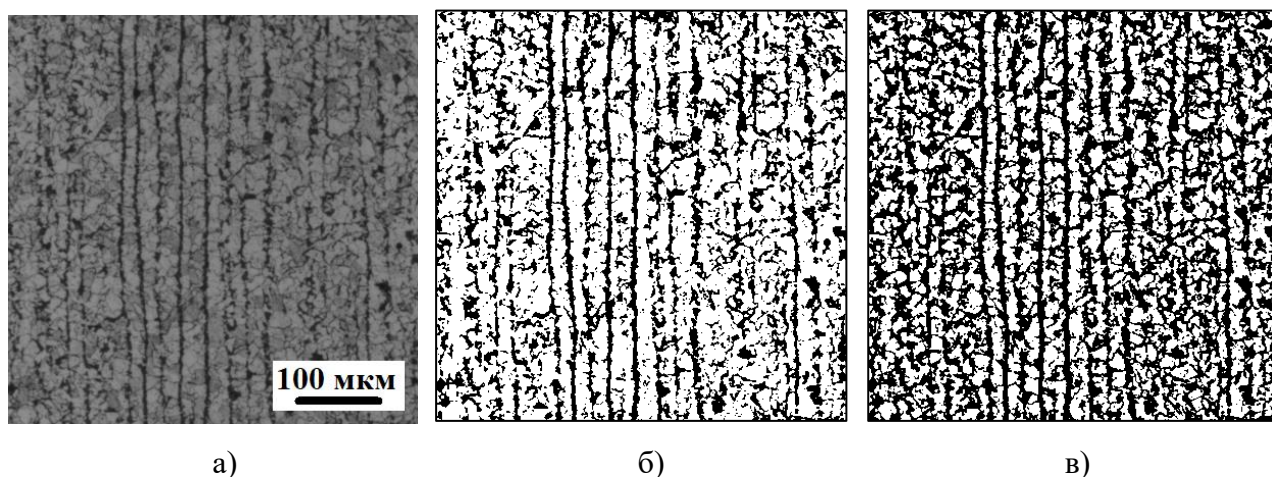
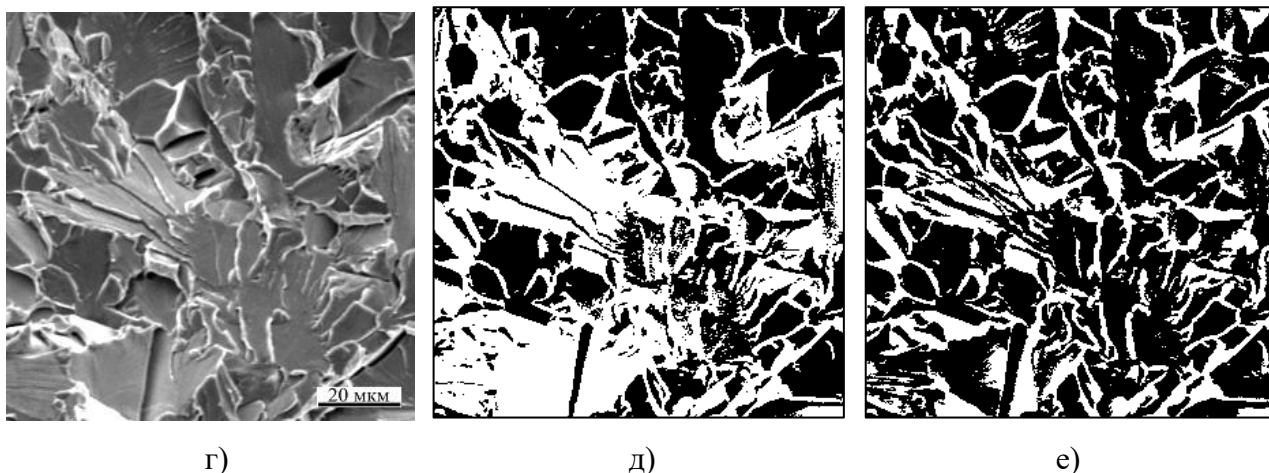


Рисунок 68 – Сравнение методов бинаризации микроструктуры стали 09Г2С

Однако существует ряд ситуаций, когда бинаризация в принципе не может решить проблемы выделения объектов изображения: низкое увеличение ( $\times 50$ ), плохая протравленность границ, неудовлетворительное качество съёмки изображения, неровность поверхности изломов (тени) (см. рисунок 69). Автоматическое измерение таких изображений структур с помощью глобальных методов бинаризации дает только интегральную оценку изображения. Для изломов за счёт наличия теней и неровностей одна фасетка может частично стать фоном, а частично объектом.





а, г – исходные изображения; б, д – метод С-образной кривой; в, е – метод Niblack ( $r=13$  и  $20$ )

Рисунок 69 – Сравнение бинаризации изображений структур и изломов стали 09Г2С по глобальному и локальному методам

Для объяснения работы локальных методов использовался самый простой и надёжный метод среднего. Сначала был выбран стандартный радиус, используемый в программе ImageJ и равный 15. Но затем встал вопрос об обоснованности данного радиуса для каждого отдельного изображения. Для этого по принципу метода С-образной кривой были построены также кривые изменения  $P$  от  $S$  для каждого радиуса от 1 (начало от верхнего хвоста кривой) до 50 пкс. Радиус определялся по крайнему значению «носа» кривой (рисунок 70). По перегибу кривой определяется радиус, при котором значение площади чёрных объектов (перлита для структур или фасеток для изломов) минимально.

Как видно, здесь сначала падает, а затем растёт площадь, а не периметр, как в методе С-образной кривой. Это говорит о другом физическом смысле данного метода. Чем меньше радиус, тем меньше создаваемый шум и тоньше все границы. При росте радиуса постепенно уменьшается количество шума, и в конце бинаризация переходит в глобальную, если радиус равен половине размера изображения.

Точка перегиба определяет момент, когда из общего шума выявляется каркас структуры. Чем выше радиус, тем меньше шума после бинаризации и тем менее точно описано само изображение как массив интенсивностей яркости.

Применимость тех или иных методов бинаризации связаны с природой структурных элементов на металлографических и фрактографических изображениях. В зависимости от поставленных задач возможно использование разных методов.

Для изображений полосчатых структур и изломов листовой стали 09Г2С при увеличении  $\times 50$  показана применимость локальных методов бинаризации (рисунки 70, 71).



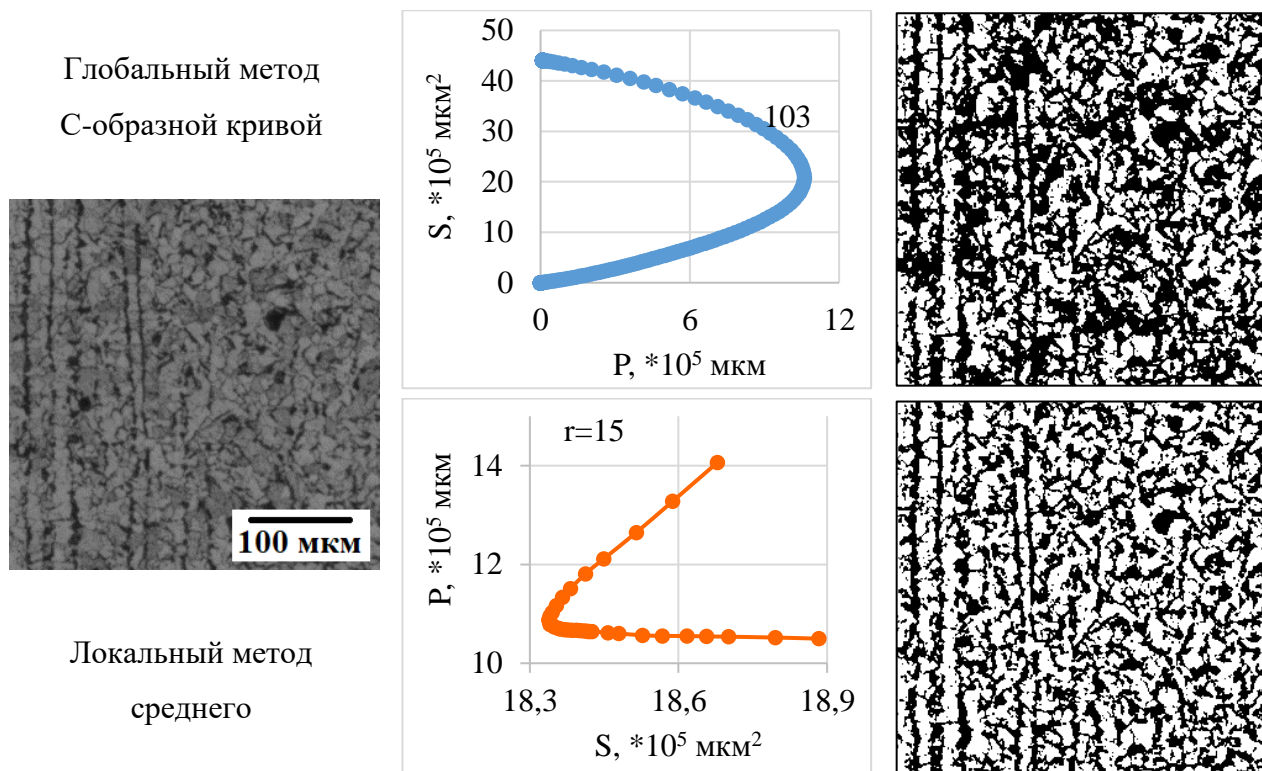


Рисунок 70 – Использование глобальных и локальных методов бинаризации для изображения полосчатой структуры листовой стали 09Г2С при увеличении  $\times 50$

Аналогичная методика была применена и для изображений изломов. Данные результаты показывают, что глобальные методы бинаризации не применимы для задач фрактографии, так как ориентировка элементов излома в пространстве сказывается на их цвете после бинаризации и, соответственно, на результат измерения. Для изломов недостатки глобальных методов более очевидны, так как здесь важную роль играет неровность поверхности.

Направление кривой для изломов противоположно направлению кривой для структур (рисунок 71), что связано с заменой цвета границ и объектов: для структур границы чёрные, а объекты белые (кроме тёмных объектов), для изломов – наоборот. Локальные методы бинаризации позволяют более точно выделять фасетки на хрупком изломе (для вязких изломов данная методика применима частично) и определять параметры их геометрии.



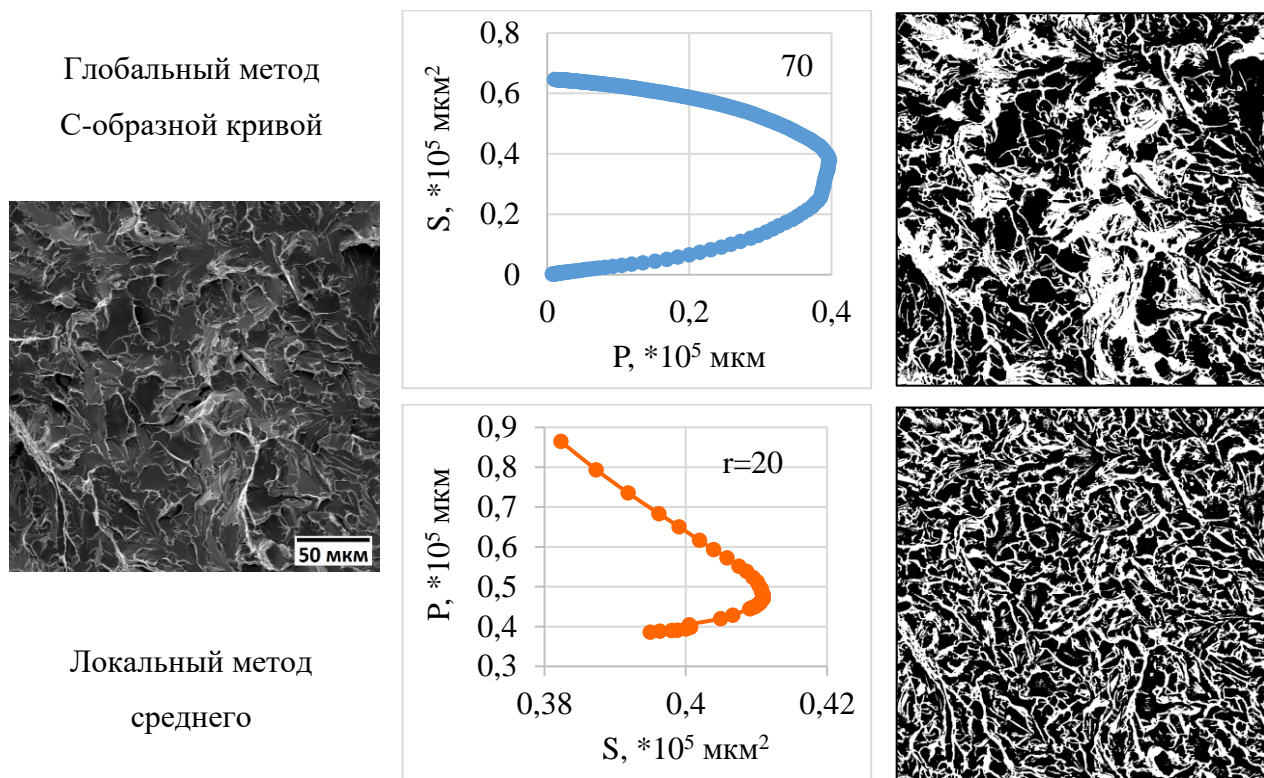


Рисунок 71 – Использование глобальных и локальных методов бинаризации для изображения излома листовой стали 09Г2С при увеличении  $\times 300$

Для сравнения двух методов бинаризации измерены параметры объектов изображений структур и изломов, а также статистические характеристики их распределений (таблица 17).

Таблица 17 – Результаты измерения объектов изображений структур и изломов после глобальной и локальной бинаризации

Параметр	Метод секущих							
	Структура				Излом			
	Глобальная		Локальная		Глобальная		Локальная	
	белые	черные	белые	черные	белые	черные	белые	черные
Среднее, мкм	$8,19 \pm 0,18$	$7,51 \pm 0,17$	$8,77 \pm 0,17$	$6,42 \pm 0,13$	$2,93 \pm 0,19$	$4,15 \pm 0,28$	$2,10 \pm 0,09$	$3,90 \pm 0,17$
Количество, шт.	1329	1328	1375	1375	345	341	418	413
Коэффициент эксцеса	2,79	6,30	3,66	5,81	15,92	11,67	8,91	2,96
Коэффициент асимметрии	1,50	2,03	1,44	1,80	3,23	2,89	2,41	1,55
Доля черного, %	0,537		0,423		0,582		0,635	

Остальные более сложные локальные методы бинаризации были также применены к структурам для оценки возможности их применения в металлографии. Для всех методов записывалось время работы (см. таблицу 18) для изображения размером 2353\*2369 пкс\*пкс.

Метод Sauvola позволяет выделять чёрные объекты (грязь или включения), так как данный метод рассчитан на работу с текстом на изображении. Его применимость необходимо проверять для отдельных изображений. Существенно также то, что изображения с выделенными таким образом объектами можно складывать или вычитать из изображений, полученных другим методом.

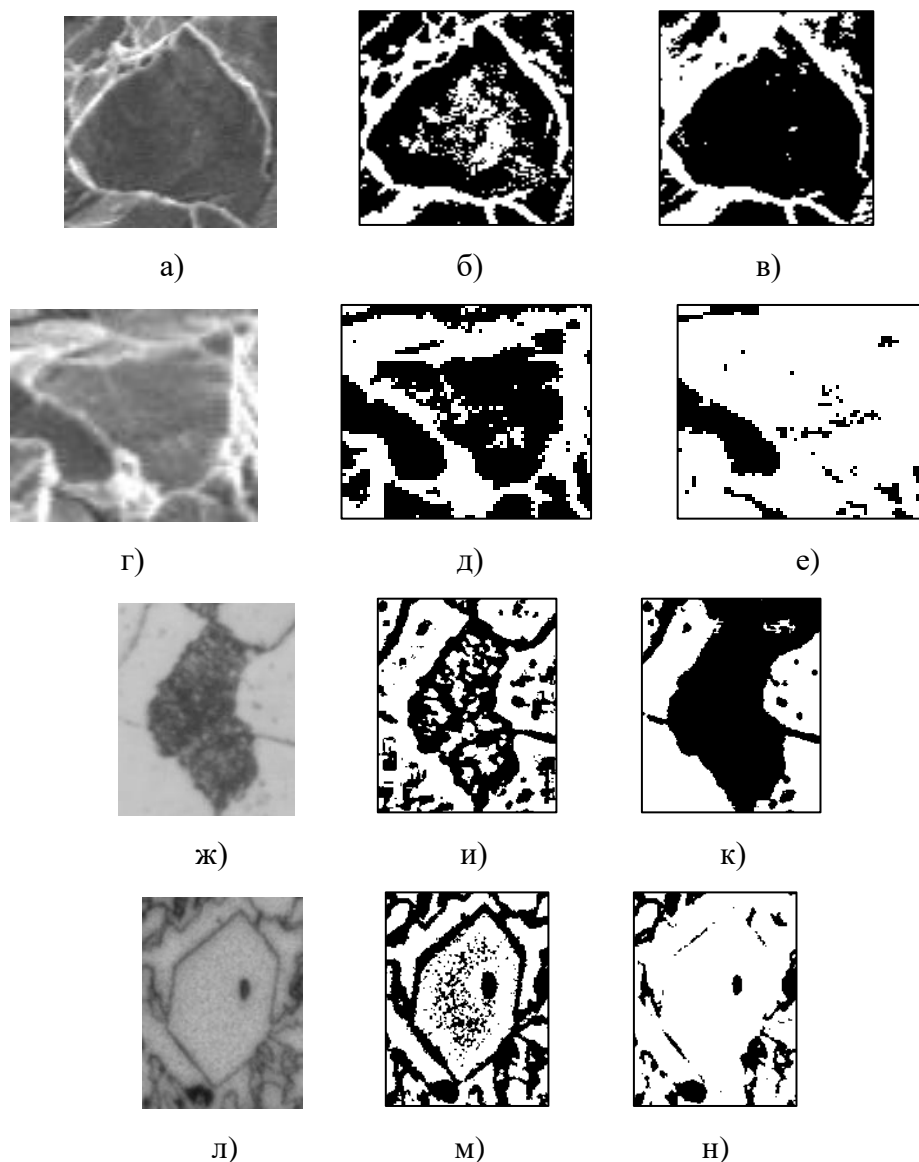
Локальный метод медиан достаточно долго работает и также, как Niblack, оставляет очень много шума. Метод Bernsen не полностью прорисовывает границы объектов и закрашивает области по аналогии с глобальными методами, но меньше. Также удаляет белые шумы, таким образом создаёт новые чёрные объекты в области фона.

Таблица 18 – Время бинаризации различными методами

Время бинаризация, с								
Локальные					Глобальные			
Метод среднего	Метод медиан	Метод Niblack	Метод Sauvola	Метод Bernsen	Метод среднего	Метод С-образной	Метод Оцу	Метод мульти-Оцу
3	12	3	5	5	3	57	3	17

Стоит отметить немаловажную особенность работы алгоритмов локальной бинаризации, а именно плотность точек границы объектов, полученных в процессе бинаризации и сформированных как элементы границы в последующих алгоритмах, поскольку не у всех алгоритмов потенциальная граница объектов получалась непрерывной. Это также накладывает ограничения на применение алгоритмов распознавания и кластеризации, в частности, на применение методов контурного и факторного анализа.

У глобальных и локальных методов есть существенное отличие (рисунок 72). Глобальная бинаризация очень чувствительна ко всякого рода неоднородностям: по освещению, завал образца и прочие неровности шлифа, структурные неоднородности. При этом часть объектов становятся темными без создания дополнительных шумов (рисунок 72, в, к), а часть объектов вовсе исчезает (рисунок 72, е, н). Локальная же бинаризация, наоборот, создаёт много и белых, и чёрных шумов (рисунок 72, б, и), которые могут заметно уменьшать измеряемые показатели, но при этом хорошо прорисовывает границы объектов (рисунок 72, д, м), где глобальная бинаризация помочь не может.



а, г, ж, л – участки исходного изображения; б, д, и, м – локальная бинаризация;  
в, е, к, н – глобальная бинаризация

Рисунок 72 – Недостатки локальных и глобальных методов бинаризации

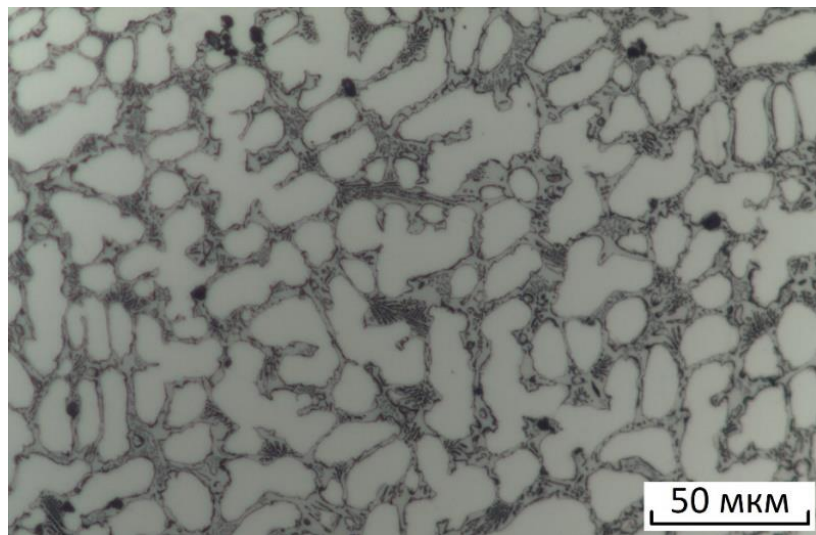
При глобальной бинаризации после слияния мелких объектов образуются чёрные области. Для изломов это происходит из-за неровности поверхности излома. Такое слияние объектов происходит почти на всех исследуемых изображениях. Слившиеся мелкие объекты после этого выделить невозможно. Необходима в этом случае хорошая протравленность границ. Казалось бы, что шумы после локальной бинаризации являются отрицательным результатом. На самом деле на исходном изображении эти шумы видны глазом, значит это хорошо, что их возможно выделить автоматически. А уже что дальше с этим делать, это вопрос последующей фильтрации. Эти преимущества показывают применимость локальной бинаризации для некоторых типов объектов.

Как известно при больших увеличениях неоднородности на изображениях неизбежны, а иногда они после глобальной бинаризации дают совсем плохие ситуации. Это связано прежде всего с природой света и объектов [122], а также с методами создания панорамных изображений, рисками после шлифования или полировки, выпуклостью поверхности структуры или банально грязью.

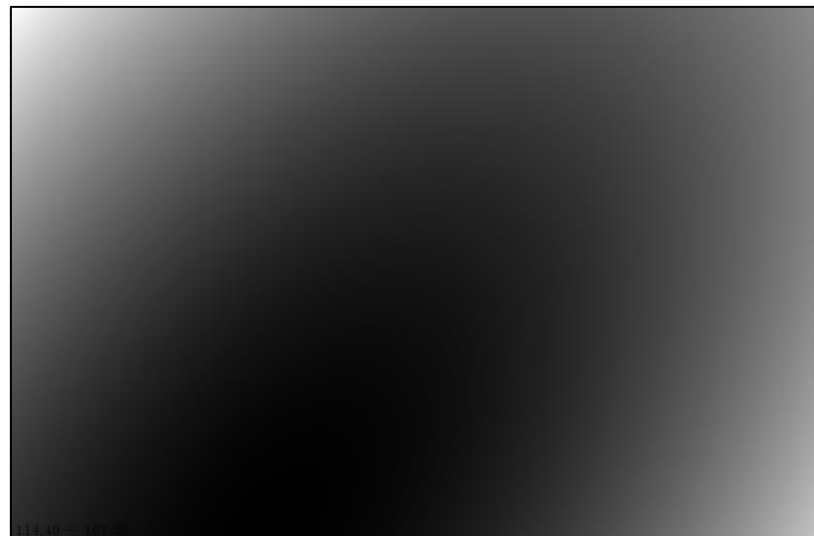
Для того, чтобы обойти данные проблемы, разработан метод мультиризации (рисунок 73), который заметно упрощает процедуры дальнейшей фильтрации и измерения. Данный метод, как и все глобальные методы в работе, проводился после предварительного выравнивания. Способность отделить тёмные и светлые объекты (тринаризация, тетранаризация, пентанаризация и т.д.) от матрицы позволила вместо интегральной оценки измерять объекты только одного класса, а также более чётко выделять границы объектов, чем простые глобальные методы.

Были исследованы виды С-образных кривых (рисунок 73, г) после выравнивания. Несколько пиков на С-образной получаются тогда, когда имеется несколько пиков на исходном распределении интенсивности яркости изображения. При анализе полученных изображений было выявлено, что построение исходной гистограммы распределения интенсивности яркости изображения, методы С-образной кривой и мульти-Оцу описывают одно и то же. Все это в комплексе можно назвать мультиризацией. Построение гистограммы распределения интенсивности яркости позволяет увидеть отличия объектов по цвету (интенсивности яркости). Метод С-образной кривой очень похож на исходную гистограмму распределения интенсивности яркости, но также позволяет увидеть влияние размерного фактора по величине пиков и графически определить необходимый уровень бинаризации. Метод мульти-Оцу позволяет математически разделить эти пики на определенное количество групп и определить впадины. Всё это даёт понимание метода мультиризации структур с несколькими структурными составляющими.

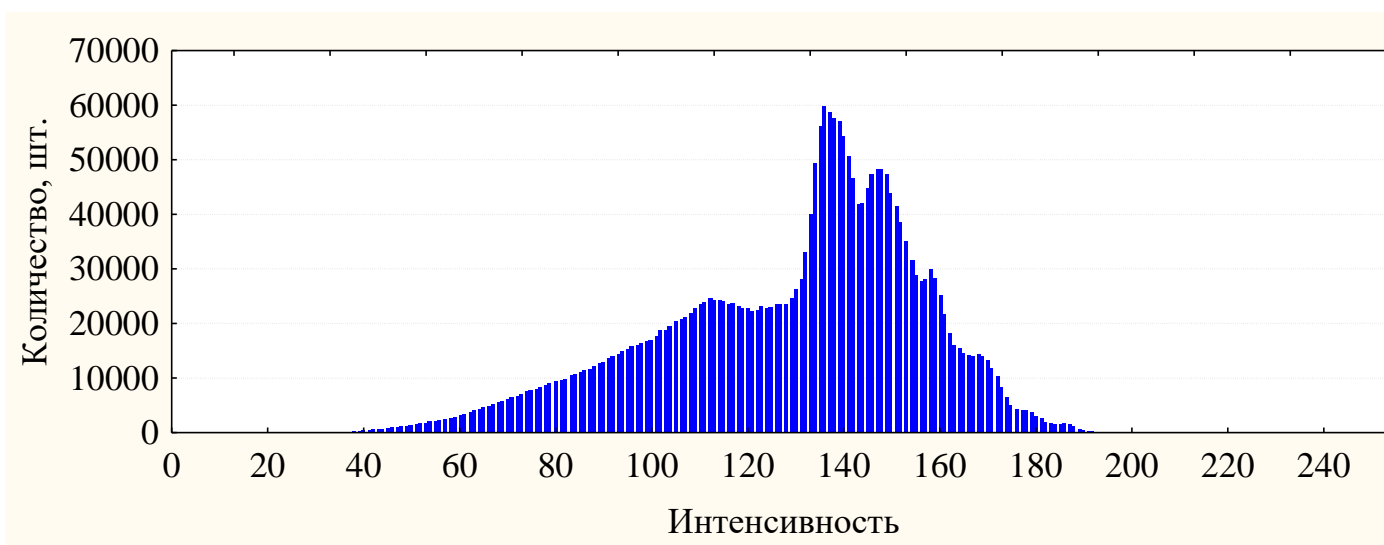
Точка перегиба на С-образной кривой является точкой пересечения двух распределений и является местом смены механизма формирования изображения (рисунок 73, д, е, ж). В зависимости от количества структурных составляющих количество распределений и, соответственно, точек перегиба может расти, а в зависимости от размеров данных структурных составляющих эти распределения будут более заметны (рисунок 73, и).



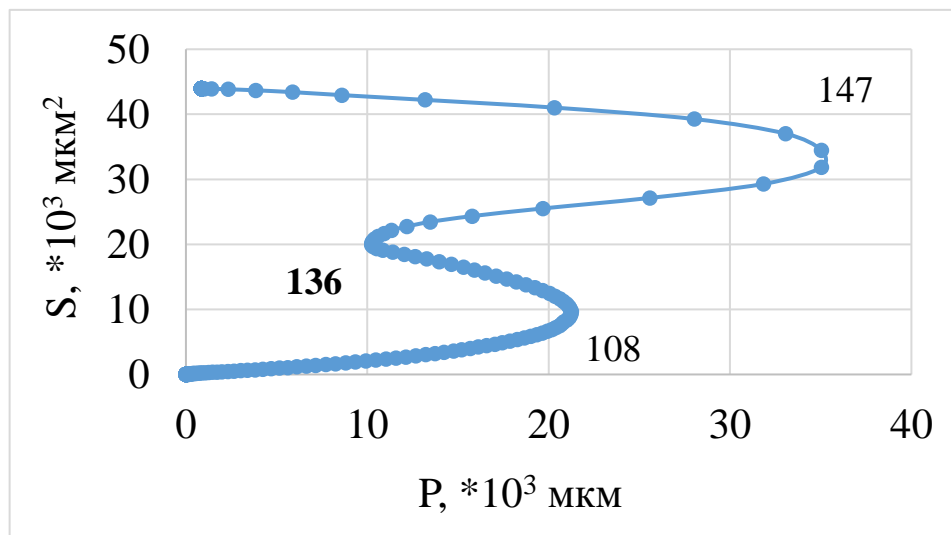
а)



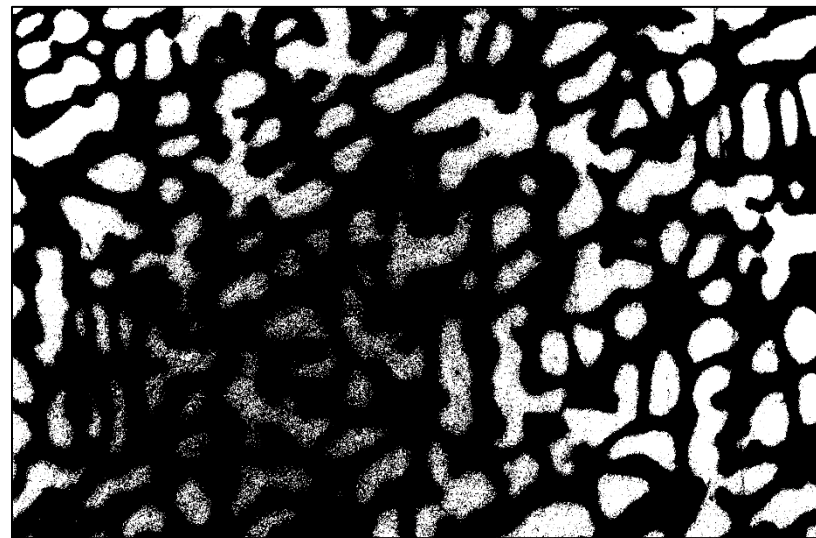
б)



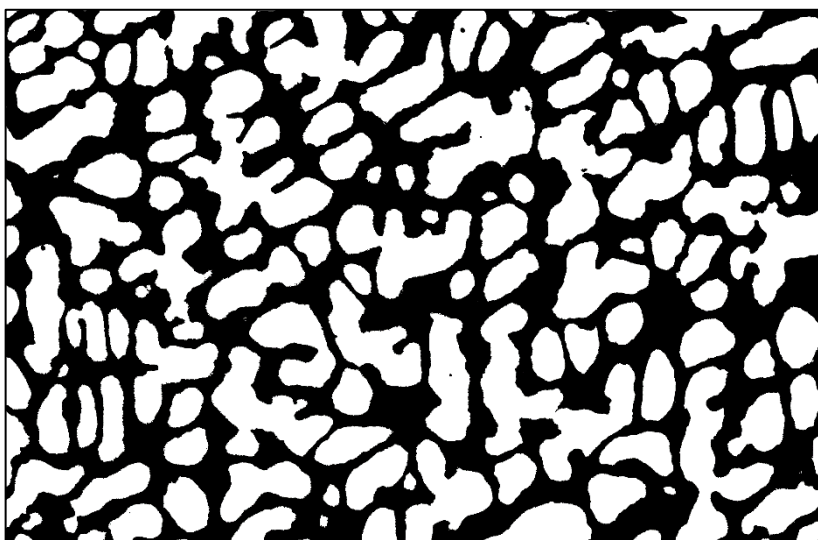
в)



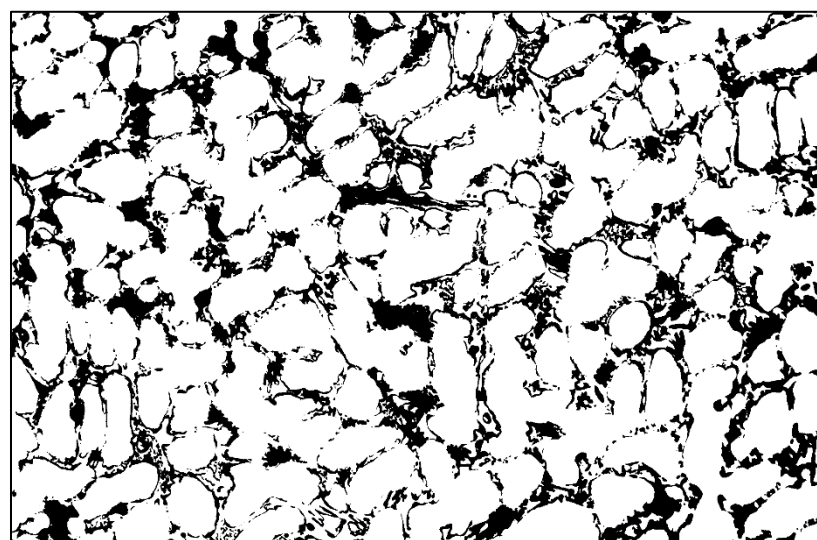
г)



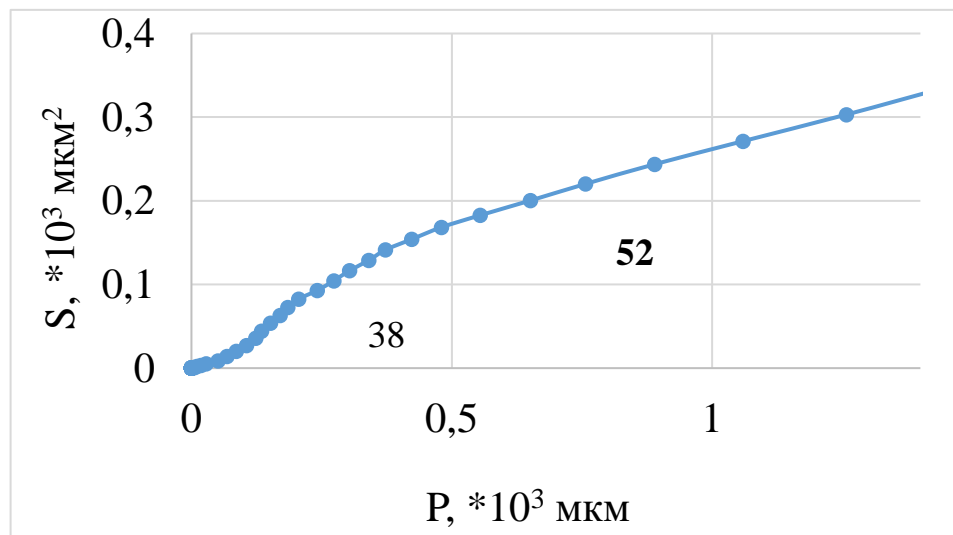
д)



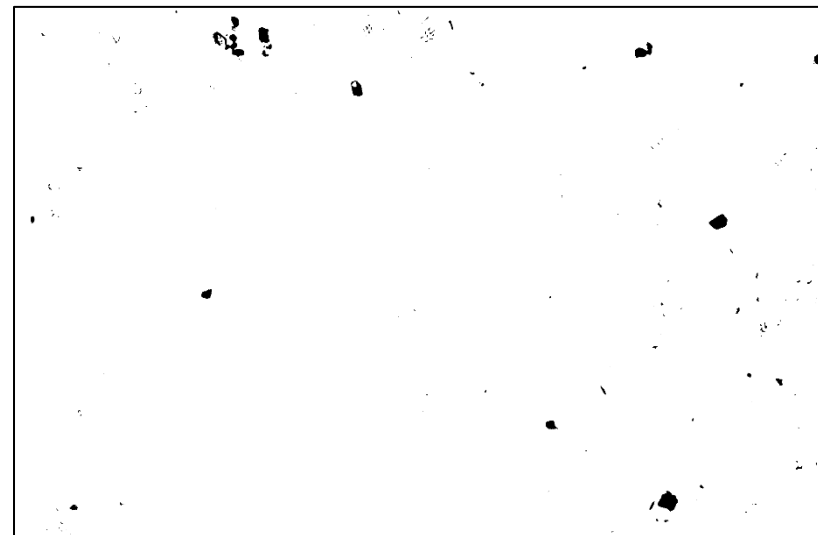
е)



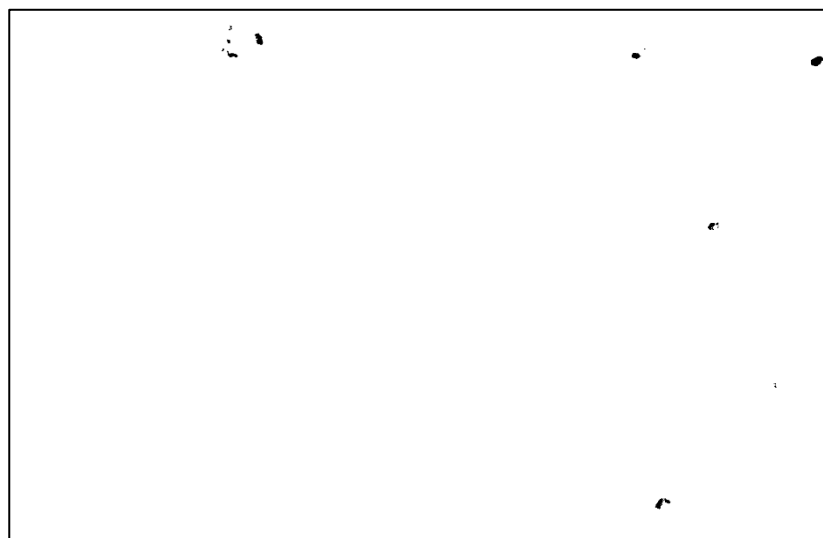
ж)



и)



к)

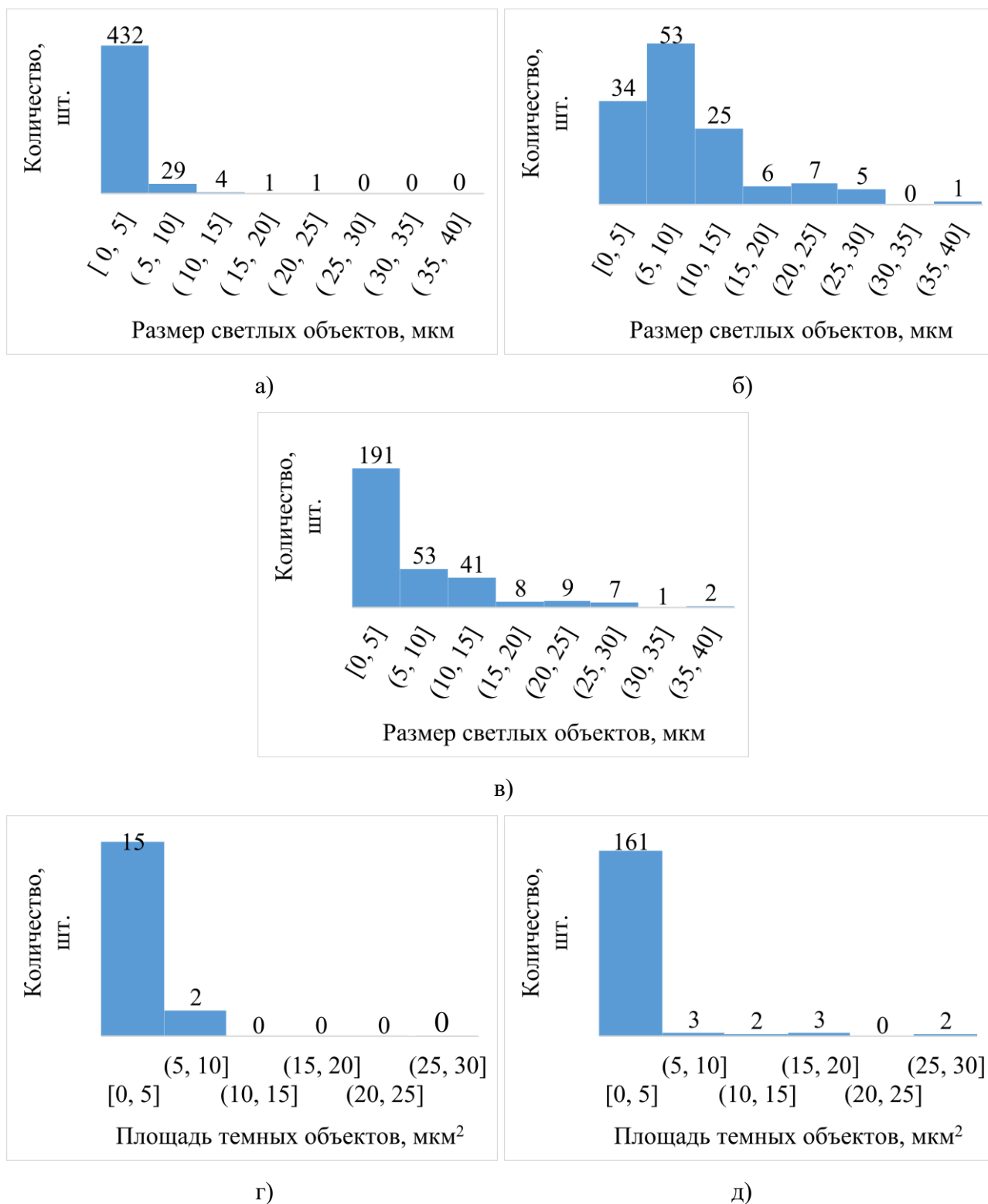


л)

а – исходное изображение; б – карта градиента интенсивности яркости исходного изображения; в – исходная гистограмма распределения интенсивности яркости изображений; г – S-образная кривая; д – бинаризация исходного изображения методом S-образной кривой по верхнему пику; е – бинаризация исходного изображения методом S-образной кривой по верхней впадине; ж – бинаризация исходного изображения методом S-образной кривой среднему пику; и – S-образная кривая в нижней части; к – бинаризация исходного изображения методом S-образной кривой по нижней впадине; л – бинаризация исходного изображения методом S-образной кривой по нижнему пику.

Рисунок 73 – Алгоритм мультиризации изображения структуры твердого сплава 2

Количественное сравнение параметров объектов изображений после бинаризации по различным критическим точкам показало значимое отличие бинаризации по впадинам от остальных (см. рисунок 74 и таблицу 19).



а, в, г – верхний, средний и нижний пики; б, д – верхняя и нижняя впадины

Рисунок 74 – Гистограммы распределения параметров объектов твердого сплава 2 после мультипликации



Действительно, бинаризация по впадинам позволяет более точно выделять объекты обоих классов. На рисунке 74 для возможности сравнения для обоих классов гистограммы имеют одинаковые шаг и количество столбцов. Верхняя впадина лучше выделяет светлые дендриты, не создавая при этом большое количество шумов, как верхний и средний пики (измерения проводились без фильтрации). Это подтверждается гистограммами распределения (рисунок 74, а, б, в), а также более высоким средним значением размера дендритов (таблица 19) для впадины (в 1,6 раза больше, чем для среднего пика, и в 7,2 раз больше, чем для верхнего пика) и более низкими статистическими критериями его распределения. Нижняя впадина, наоборот, позволяет выявлять большее количество объектов вплоть до шума (измерения проводились без фильтрации). Это подтверждается гистограммами распределения (рисунок 74, г, д), а также более низким средним значением площади включений для впадины (в 1,8 раз, чем для нижнего пика) и более высокими статистическими критериями ее распределения.

Таблица 19 – Параметры объектов изображений твердого сплава 2 после мультиризации

Параметр	Верхний пик	<b>Верхняя впадина</b>	Средний пик	<b>Нижняя впадина</b>	Нижний пик
Номер	1	<b>2</b>	3	<b>4</b>	5
Измеряемые объекты	Дендриты			Включения	
Среднее, мкм/мкм <sup>2</sup>	1,31	<b>9,40</b>	5,80	<b>1,17</b>	2,10
Ошибка, мкм/мкм <sup>2</sup>	0,23	<b>1,14</b>	0,80	<b>0,57</b>	1,33
Количество, шт.	467	<b>131</b>	312	<b>171</b>	17
Коэффициент эксцесса	22,12	<b>2,20</b>	4,14	<b>24,88</b>	1,49
Коэффициент асимметрии	3,98	<b>1,34</b>	1,95	<b>4,84</b>	1,41

Попарное сравнение распределений параметров объектов по критериям Стьюдента и Колмогорова-Смирнова также выявило значимые различия (таблица 20).

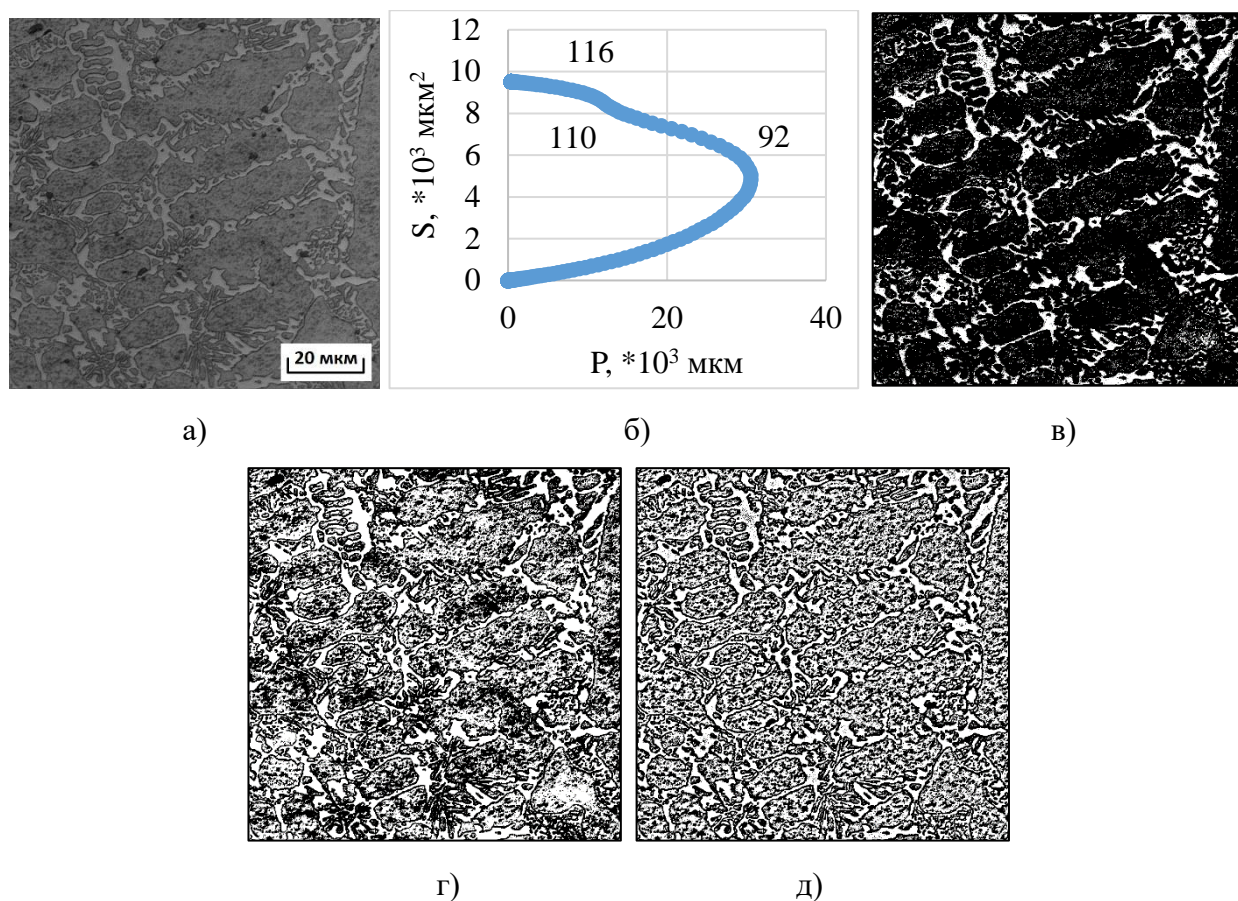
Попарное сравнение распределений белых дендритов показало значимое различие для всех трех точек по обоим критериям с риском  $< 0,001$ . Сравнение распределений площади включений для нижней впадины и нижнего пика по критерию Стьюдента не показало различие (риск 0,4), а по непараметрическому критерию Колмогорова-Смирнова показало различие с риском  $< 0,05$ . Последнее показывает также преимущества использования критериев непараметрической статистики.

Таблица 20 – Сравнение распределений параметров объектов изображений твердого сплава 2 по критериям Стьюдента (t) и Колмогорова-Смирнова (К-С)

Сравниваемые распределения		t	К-С
Размер белых дендритов			
1-2	Критерий	21,58	7,68
	Риск	—	—
1-3	Критерий	12,50	6,71
	Риск	—	—
2-3	Критерий	4,95	4,22
	Риск	—	—
Табличные (Риск 0,001)		3,39	1,95
Площадь черных включений			
4-5	Критерий	0,98	1,60
	Риск	0,4	0,05
Табличные		0,85	1,36

Данные результаты показывают, что графический метод С-образной кривой становится мультиризацией при наличии на изображении нескольких структурных составляющих. При этом в отличие от структур с одной структурной составляющей, где оптимальный уровень бинаризации выбирается по крайнему значению пика на С-образной кривой, для структур с несколькими структурными составляющими оптимальный уровень бинаризации выбирается по впадинам. Бинаризация же в данном случае по пику не дает оптимальные значения параметров объектов, а позволяет лишь давать интегральную характеристику изображения в целом.

Исследование тёмных объектов изображений (рисунок 75) явно показывает необходимость создания разных алгоритмов обработки изображений для разных типов структур, потому что в данном случае ни один вариант обычной бинаризации не позволяет качественно получить необходимый результат. Данный принцип лежит в основе выделения тёмных объектов для любого типа структур (неметаллические включения, серный отпечаток и другие). При увеличении размеров тёмных включений более явным становится нижний пик.



а – исходное изображение; б – С-образная кривая; в, г – бинаризация методом С-образной кривой по впадине и нижнему пику; д – бинаризация локальным методом среднего

Рисунок 75 – Бинаризация изображения твердого сплава 3 с тёмными объектами

В ходе работы было проведено количественное сравнение изображений после бинаризации различными глобальными и локальными методами с помощью F-меры и распределений параметров данных изображений с помощью К-С критерия. В таблице 21 представлен пример сравнения распределений белых и черных объектов до и после фильтрации К-С критерием для изображения из рисунка 75. Данное сравнение позволило сделать следующие выводы:

1. Фильтрация значительно влияет на величину измеряемых объектов и для глобальных, и для локальных методов бинаризации (красные стрелки показывают разницу распределений объектов с риском  $< 0,001$ ). Проведение фильтрации исключает влияние шумов (как черных, так и белых) на результат измерения.

2. Для данного изображения параметры объектов после глобальных и локальных методов до и после фильтрации значительно не отличаются (зеленые области показывают отсутствие разницы распределений, риск от 0,1 до  $> 0,5$ ). Исключением здесь является метод мультиризации (риск  $< 0,001$ ), что подтверждает оптимальность его использования для данного изображения.

Таблица 21 – Сравнение объектов изображений твердого сплава 3 после различных методов бинаризации с помощью К-С критерия

Локальные				Фильтрация после локальных				Глобальные				Глобальные с фильтрацией			
среднего	медиан	Niblack	Bernsen	среднего	медиан	Niblack	Bernsen	среднего	С-образной (средний пик)	Оцу	Мульти ризация	среднего	С-образной (средний пик)	Оцу	Мульти ризация
1-1 0	1-2 0,322	1-3 1,387	1-4 0,539	1-5 5,334	1-6 5,241	1-7 5,977	1-8 4,733	1-9 0,464	1-10 0,595	1-11 0,464	1-12 4,424	1-13 4,847	1-14 4,771	1-15 4,847	1-16 5,834
1-2 0,822	2-2 0	2-3 1,153	2-4 0,728	2-5 5,585	2-6 5,505	2-7 5,999	2-8 4,988	2-9 0,423	2-10 0,555	2-11 0,423	2-12 4,373	2-13 5,090	2-14 4,881	2-15 5,090	2-16 5,829
1-3 1,230	2-3 0,430	3-3 0	3-4 1,785	3-5 4,715	3-6 4,615	3-7 5,034	3-8 4,541	3-9 1,213	3-10 0,792	3-11 1,213	3-12 3,574	3-13 4,331	3-14 4,296	3-15 4,331	3-16 5,502
1-4 2,057	2-4 2,557	3-4 2,828	4-4 0	4-5 4,989	4-6 5,038	4-7 5,933	4-8 4,45	4-9 0,762	4-10 1,015	4-11 0,762	4-12 4,768	4-13 4,580	4-14 4,760	4-15 4,580	4-16 5,976
1-5 5,339	2-5 5,933	3-5 6,171	4-5 3,854	5-5 0	5-6 0,346	5-7 1,548	5-8 0,311	5-9 5,313	5-10 5,138	5-11 5,313	5-12 3,118	5-13 0,753	5-14 0,907	5-15 0,753	5-16 4,655
1-6 4,995	2-6 5,718	3-6 5,736	4-6 3,619	5-6 0,859	6-6 0	6-7 1,242	6-8 0,638	6-9 5,214	6-10 5,037	6-11 5,214	6-12 3,026	6-13 0,724	6-14 0,904	6-15 0,724	6-16 4,634
1-7 4,614	2-7 5,317	3-7 5,169	4-7 3,337	5-7 1,365	6-7 0,643	7-7 0	7-8 1,514	7-9 5,734	7-10 5,476	7-11 5,734	7-12 3,049	7-13 1,231	7-14 1,050	7-15 1,231	7-16 4,154
1-8 5,564	2-8 5,942	3-8 6,104	4-8 4,003	5-8 1,624	6-8 2,209	7-8 2,571	8-8 0	8-9 4,728	8-10 4,568	8-11 4,728	8-12 2,979	8-13 0,615	8-14 0,851	8-15 0,615	8-16 4,498
1-9 0,363	2-9 0,936	3-9 1,055	4-9 1,974	5-9 5,425	6-9 4,991	7-9 4,505	8-9 5,465	9-9 0	9-10 0,440	9-11 0	9-12 4,269	9-13 4,836	9-14 4,62	9-15 4,836	9-16 5,771
1-10 0,694	2-10 0,642	3-10 0,767	4-10 2,305	5-10 5,710	6-10 5,297	7-10 4,916	8-10 5,724	9-10 0,495	10-10 0	10-11 0,440	10-12 3,994	10-13 4,668	10-14 4,451	10-15 4,668	10-16 5,645
1-11 0,363	2-11 0,936	3-11 1,055	4-11 1,974	5-11 5,425	6-11 4,991	7-11 4,505	8-11 5,465	9-11 0	10-11 0,495	11-11 0	11-12 4,269	11-13 4,836	11-14 4,620	11-15 4,836	11-16 5,771
1-12 3,132	2-12 2,666	3-12 2,647	4-12 4,401	5-12 7,297	6-12 7,020	7-12 6,684	8-12 7,206	9-12 3,206	10-12 2,884	11-12 3,206	12-12 0	12-13 2,925	12-14 2,798	12-15 2,925	12-16 3,810
1-13 5,356	2-13 6,035	3-13 5,887	4-13 4,046	5-13 0,669	6-13 1,365	7-13 1,783	8-13 1,134	9-13 5,241	10-13 5,639	11-13 5,241	12-13 7,268	13-13 0	13-14 0,310	13-15 0	13-16 4,168
1-14 4,694	2-14 5,386	3-14 5,236	4-14 3,382	5-14 0,746	6-14 0,918	7-14 1,287	8-14 1,494	9-14 4,648	10-14 4,987	11-14 4,648	12-14 6,671	13-14 0,647	14-14 0	14-15 0,310	14-16 4,117
1-15 5,356	2-15 6,035	3-15 5,887	4-15 4,046	5-15 0,669	6-15 1,365	7-15 1,783	8-15 1,134	9-15 5,241	10-15 5,639	11-15 5,241	12-15 7,268	13-15 0	14-15 0,647	15-15 0	15-16 4,168
1-16 3,269	2-16 3,530	3-16 3,470	4-16 2,716	5-16 0,944	6-16 1,262	7-16 1,520	8-16 0,732	9-16 3,190	10-16 3,348	11-16 3,190	12-16 4,663	13-16 0,697	14-16 0,981	15-16 0,697	16-16 0

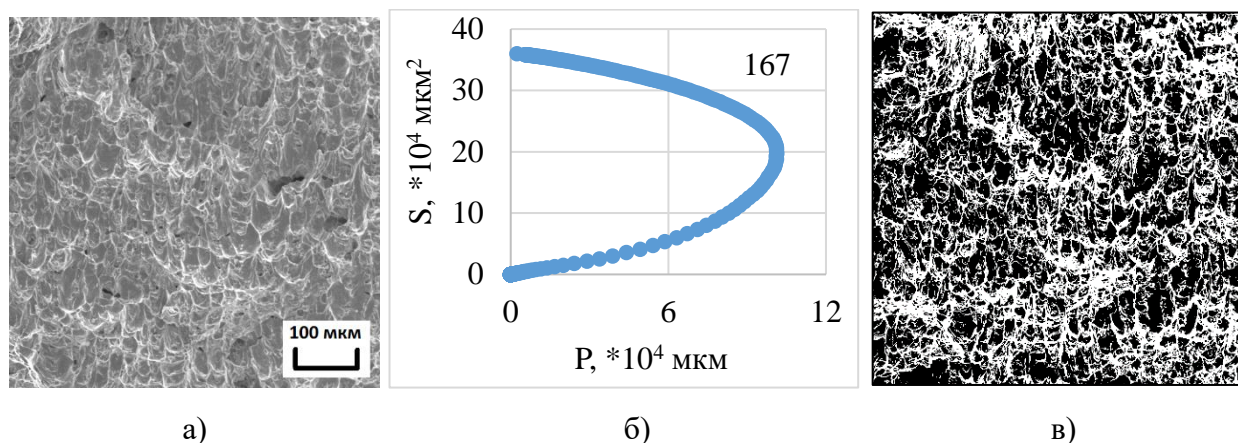
144

Метод секущих для белых

Метод секущих для чёрных

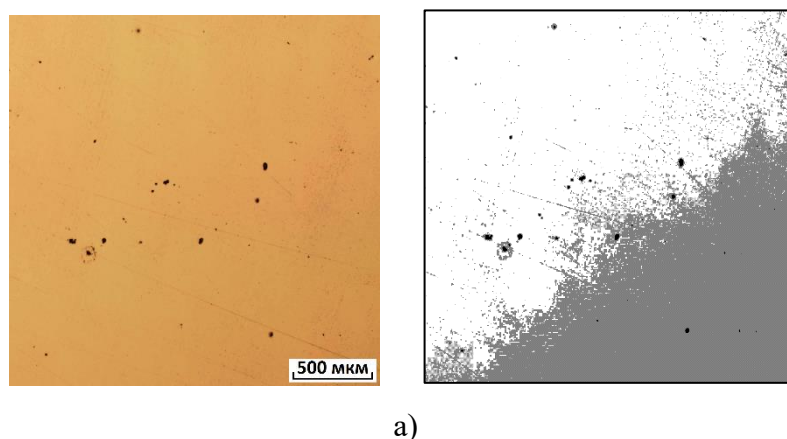
2

Аналогичную методику пытались применить для изображений изломов (рисунок 76). Для большого ряда изображений показано, что на С-образной кривой изломов имеется только один пик. Это связано с тем, что интенсивность яркости элемента излома при обычной съёмке не зависит от химического состава. Выделение происходит по высоте, что требует создания специальных алгоритмов для обработки изображений изломов.



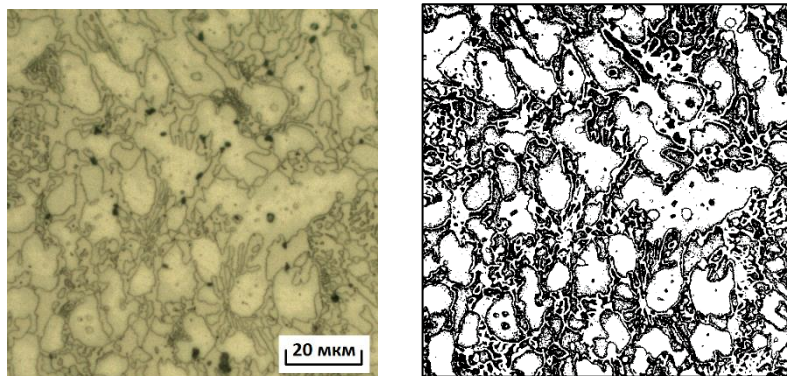
а – исходное изображение; б – С-образная кривая; в – бинаризация по С-образной кривой  
Рисунок 76 – Бинаризация изображения излома СтЗсп методом С-образной кривой

Данный метод позволяет решать несколько дополнительных задач: выделять объекты определённого цвета, в том числе и фоновый шум (рисунок 77, а), выделять границы объектов (на границах всегда есть переход, поэтому есть промежуточная область, рисунок 77, б), упрощать процедуру фильтрации белых шумов [115, 118], удалять риски, полученные в результате шлифования или полирования.



а)





б)

а – выделение объектов одного цвета стали 38ХНЗМФА, выделение неоднородного по освещению фона; б – выделение границ светлых дендритов твердого сплава 1  
Рисунок 77 – Примеры дополнительного использования метода мультизации

Основным же преимуществом метода мультизации является то, что, используя разные впадины на кривой, можно напрямую сегментировать разные классы объектов. Это помогает решать гораздо больше задач, чем обычная бинаризация, которая дает лишь интегральную оценку объектов изображений структур с несколькими структурными составляющими. Можно заметить, что данного метода не обнаружено в используемых программных продуктах.

Далее необходимо показать разницу результатов измерения для основных методов бинаризации. Для дендритной (рисунок 73) и полосчатой (рисунок 70) структур и неметаллических включений (рисунок 77, а) измерялись параметры объектов по методу секущих и площадей (см. таблицу 22).

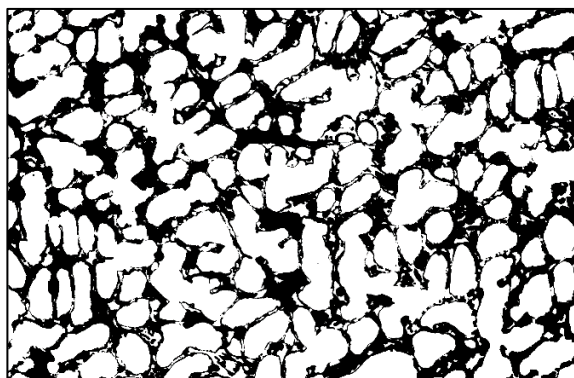
Для дендритной структуры параметры объектов после мультизации (метод С-образной кривой) существенно отличаются от параметров после других методов. Это подтверждает тот факт, что мультизация создает меньше шумов.

Для неметаллических включений в качестве мультизации выступает метод Оцу (здесь он почти совпадает с мульти-Оцу), который не создает лишних объектов.

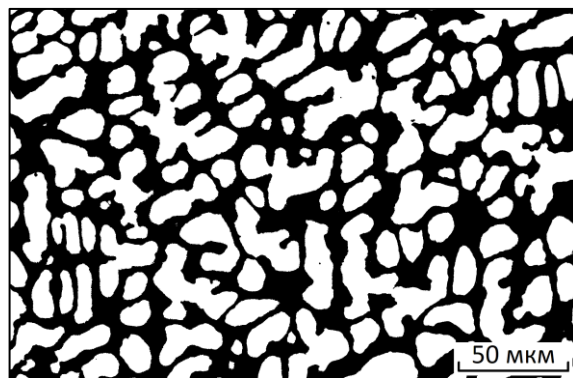
Таблица 22 – Изменение параметров объектов в зависимости от выбора метода бинаризации в сталях с различным типом структуры

Тип структуры	Метод измерения	Параметры объектов	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 для дендритов	Общая площадь, мкм <sup>2</sup>	23440	29261	26181	28078
		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
		Заполненность	0,68	0,69	0,75	0,74
		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	Общая площадь, мм <sup>2</sup>	10	7	62	195
		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
		Заполненность	0,78	0,74	0,78	0,77
		Ориентировка, град	-2,31	-8,01	12,40	11,36
		Плотность, шт./мм <sup>2</sup>	1,1	0,6	103,1	23,6

Сравнение классического метода Оцу с мультиризацией с учетом вида распределения размера объектов показано на рисунке 78 и таблице 23.



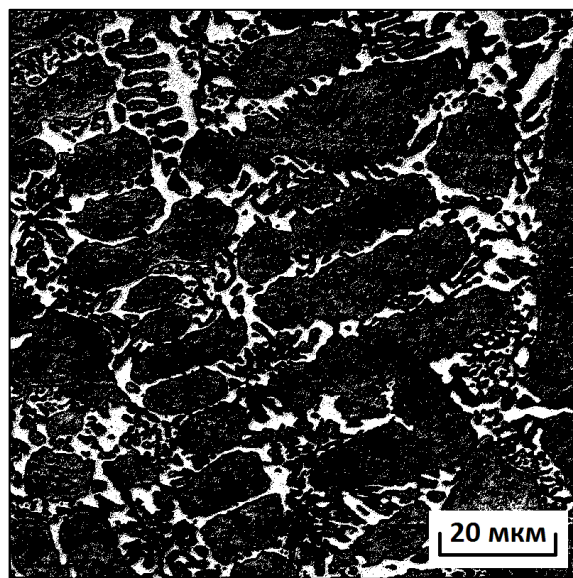
а)



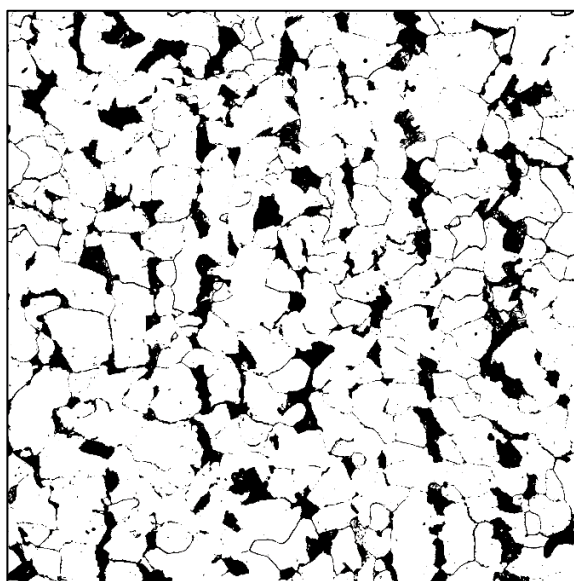
б)



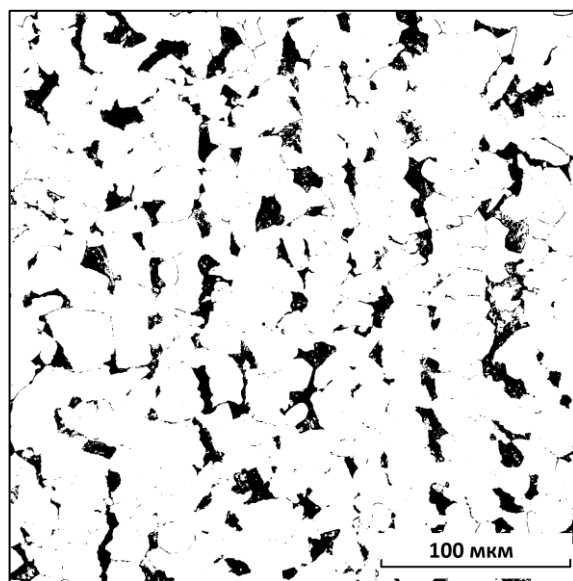
в)



г)

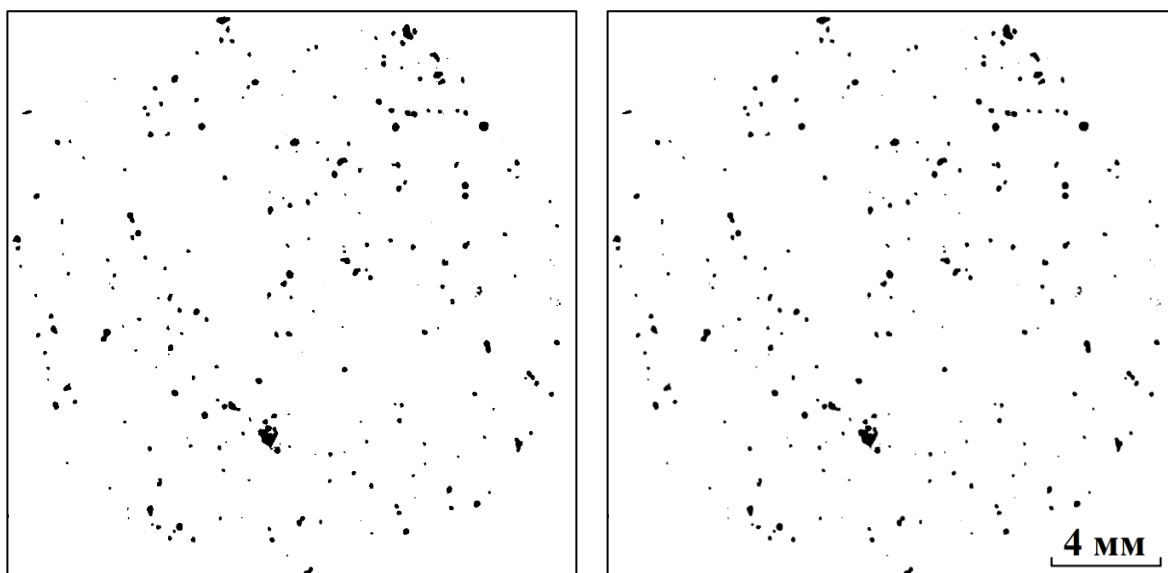


д)



е)





ж)

и)

а, б – светлые объекты на изображении твердого сплава 2;

в, г – темные объекты на изображении твердого сплава 4;

д, г – полосчатая структуры стали СтЗсп;

ж, и – серный отпечаток стали 38ХНЗМФА

Рисунок 78 – Сравнение методов Оцу (а, в, д, ж) и мультиризации (б, г, е, и)

Таблица 23 – Статистика различий геометрии строения элементов изображений после бинаризации методом Оцу и мультиризации

Параметры	Метод секущих				Метод площадей
	Дендриты		Полосчатая структура		СО
	Светлые объекты	Тёмные объекты	Толщина полос перлита	Расстояние между полосами перлита	
Стьюдент (n=60)	4,60 ( $< 0,001$ )	12,91 ( $< 0,001$ )	0,92 (0,4)	2,18 (0,05)	0,29 ( $> 0,5$ )
К-С	3,61 ( $< 0,001$ )	4,90 ( $< 0,001$ )	0,88 (0,5)	1,26 (0,1)	0,41 ( $> 0,5$ )

Метод Оцу совпадает с мультиризацией, когда на изображении имеется только 2 группы объектов (например, НВ и СО – фон и темные объекты), мульти- переходит в би-.

### 3.2.8 Фильтрация шумов

Часто бывает полезно удалить малые области из изображения. Малая область может образоваться из-за *шума* или *может представлять низкоуровневую деталь*, которую не надо учитывать при формировании описания изображения. Малые области можно удалять посредством изменения отдельных пикселей или путем удаления компонент после выделения связанных компонент на изображении.

Одиночные темные пиксели, лежащие внутри светлых областей, или одиночные светлые пиксели внутри темных областей образуют *шум «соль и перец»*. Название отражает очевидную бытовую аналогию. Шум «соль и перец» часто возникает в результате пороговой бинаризации изображения. «Соль» соответствует таким пикселям из темных областей, которые по каким-либо причинам преодолели порог, установленный для светлых пикселей. «Перец», наоборот, соответствует тем пикселям из светлых областей, значения которых оказались меньше порога бинаризации. Шум «соль и перец» может возникать из-за шума процесса аналого-цифрового преобразования или вследствие ошибок классификации, вызванных неоднородностями на поверхностях объектов или изменением освещения, что может существенно влиять на измеряемые параметры. В некоторых случаях эти изолированные пиксели не являются классификационными ошибками, а соответствуют небольшим контрастным деталям на фоне более крупных объектов (например, пуговица на рубашке, поляна в лесу и т. п.). При формировании описаний изображений может потребоваться игнорировать такие мелкие детали [55, 65].

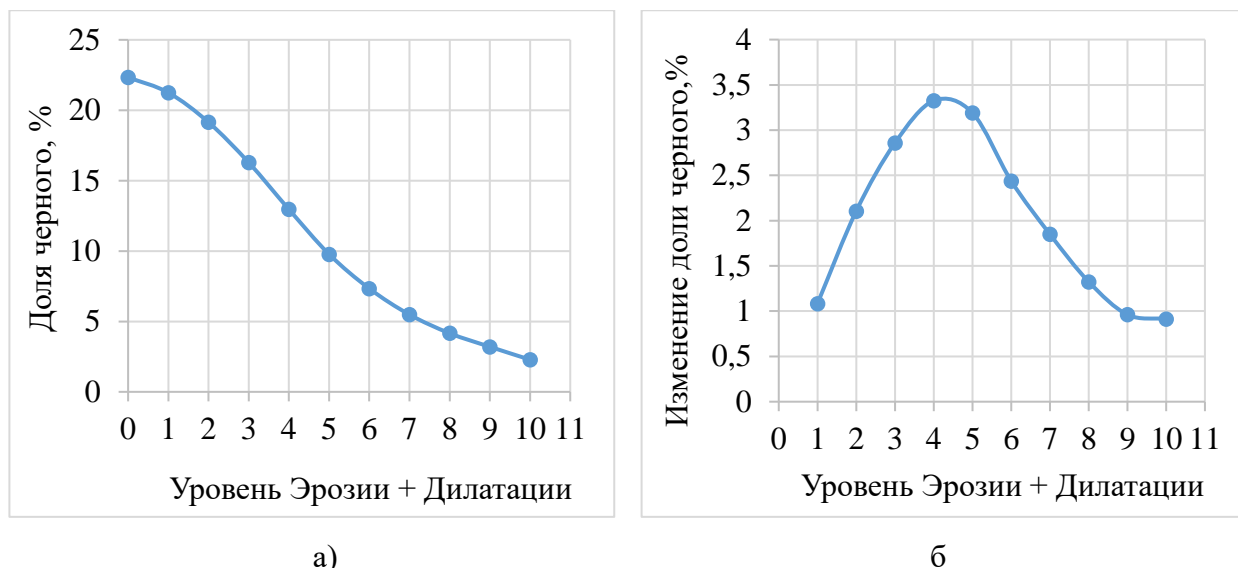
Одним из самых распространённых методов удаления шумов является *медианный фильтр*, который заменяет значение пиксела на медиану значений из окрестности данного пиксела. Иногда значение медианы по-разному вычисляется для массивов с четным и нечетным количеством элементов. При нечетном значении  $n$  средний элемент массива определяется единственным образом. Если  $n$  имеет четное значение, то медиану можно определять по-разному: выбрать  $A[n/2]$ , или  $A[n/2 - 1]$ , или вычислить среднее двух этих значений. Хотя в определении медианы рассматривается отсортированный массив, на практике обычно не требуется выполнять полную сортировку множества чисел, медиану которого необходимо вычислить. Известный алгоритм быстрой сортировки можно изменить так, чтобы рекурсивный вызов в нем выполнялся только для той части массива  $A$ , в которой содержится  $(n + 1)/2$ -й элемент. Как только центр разбиения попадет на элемент массива, положение которого соответствует медиане всего исходного массива, то искомое значение медианы будет определено.

Когда обрабатываемый пиксел выбирается из некоторой белой клетки близко к ее краю, вероятно, большинство пикселей в его окрестности тоже окажутся белыми зашумленными пикселями. Если это так, то для определения выходного значения обрабатываемого пикселя соседние пиксели из черных клеток использоваться не будут. Аналогично, при вычислении выходного пикселя вблизи границы со стороны черной клетки высока вероятность того, что большинство пикселей в окрестности обрабатываемого пикселя будут черными зашумленными пикселями. Значит, для вычисления выходного значения в этом случае не будут использоваться белые пиксели. Таким образом, в отличие от усредняющего сглаживания, медианный фильтр стремится сохранять структуру краев, в то же время сглаживая однородные области. Медианный фильтр позволяет удалять шум «соль и перец» и большинство других малых деталей, которые можно рассматривать как присутствие на идеальном изображении произвольных шумовых значений.

Так как для вычисления медианы требуется выполнять сортировку (хотя бы частичную), то эта операция занимает больше времени по сравнению с вычислением среднего значения интенсивности в пиксельной окрестности. Кроме того, медианную фильтрацию сложнее реализовать на аппаратном уровне, что может быть необходимо для обработки в реальном времени (например, для организации конвейерной видеообработки). Однако во многих задачах анализа изображений достоинства медианной фильтрации оправдывают увеличение вычислительных затрат.

Физический смысл метода *«эрозия и дилатация»* состоит в последовательном применении процедур двумерных эрозии и дилатации с заданным уровнем. Уровень этого метода показывает количество пикселей для удаления (эрозия) или добавления (дилатация). После эрозии все объекты, имеющие размеры по двум направлениям меньшие или равные уровню эрозии, удаляются и на этапе дилатации не восстанавливаются.

Для определения уровня комплексного режима *«эрозии и дилатации»* строятся зависимости изменения доля чёрного от уровня комплексного режима (рисунок 79).



а – зависимость доли чёрного от уровня комплексной процедуры;  
 б – зависимость изменения доли чёрного от уровня комплексной процедуры  
 Рисунок 79 – Влияние уровня комплексного режима на долю чёрного

Данный метод также помогает удалять различные перешейки и ответвления от основных объектов изображения.

Для определения критического размера значений шума используется также *метод наилучшей ломаной*. В этом методе находится точка перегиба на линии зависимости логарифма площади – периметра с помощью значения суммарной дисперсии двух линий.

Сначала измеряется среднее значение черных объектов изображения до удаления. Потом удаляются все объекты с увеличением размера с шагом 1 пиксель до среднего значения, после каждого шага измеряются значения площади и периметра объектов. В результате получается линия зависимости (рисунок 80).

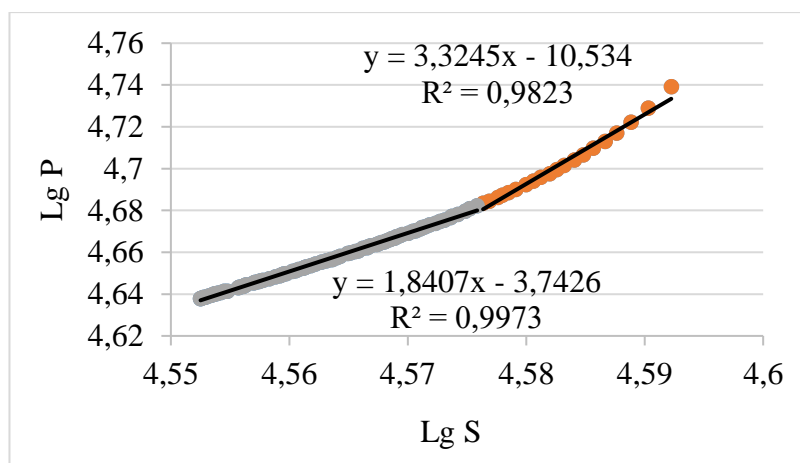


Рисунок 80 – Пример определения точки перегиба на зависимости «Суммарный периметр белых объектов P – общая их площадь S»

Линия зависимости суммарной дисперсии (рисунок 81) двух линий с количеством точек первой линии (это значение понимается как размер удаляемых объектов) является кривой с минимумом.

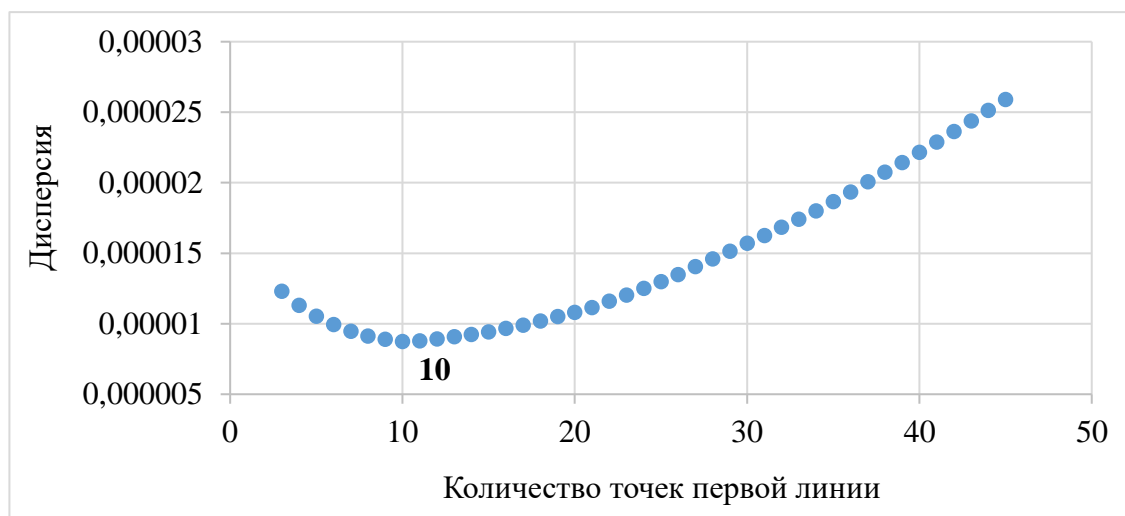


Рисунок 81 – Зависимость дисперсии с изменением количества точек первой линии

Данный метод весьма трудоёмкий. При этом часто на исследуемой кривой нет явного перегиба, а значения минимума очень близко к соседним значениям.

Один из самых качественных методов основан на понятии «соль-перец». Любой шум всегда гораздо меньше объектов, на которых он находится, что позволяет удалять шумы, меньшие среднего значения основных объектов: белый шум – меньше среднего значения чёрных объектов, и наоборот. Этот метод не работает для глобальных методов бинаризации, так как после них многие объекты являются несвязными и переходят в шум.

Другой вид удаления шумов, применяемый к входному изображению, представляется с помощью масок. Если окрестность входного изображения совпадает с маской, показанной слева, то эта окрестность заменяется на окрестность, заданную правой маской. В описанном методе применяются всего две маски. Если входное изображение является маркированным изображением, сформированным с использованием набора порогов или каких-либо процедур классификации, то для удаления шума можно применять маску обобщенного вида. Для принятия решения можно использовать 8- или 4-связность. В случае 4-связности при принятии решения не учитываются четыре угловых пиксела маски.

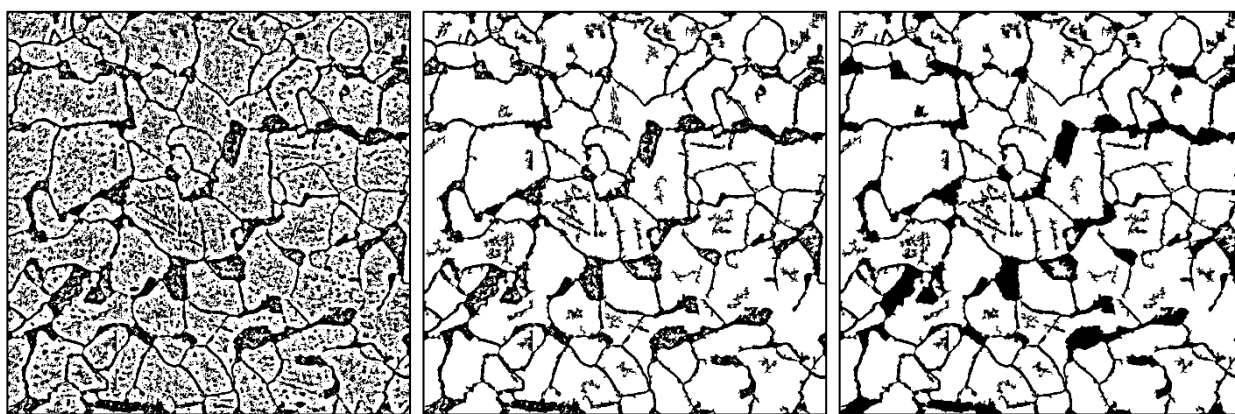
После удаления малых областей из описания изображения может потребоваться (или нет) построить соответствующее выходное изображение. Если выходное изображение необходимо, то информацию об удаленных компонентах надо сохранить, для правильного

преобразования пикселей входного изображения, принадлежащих областям удаленных компонент.

Большинство из исследуемых изображений необходимо фильтровать после проведения бинаризации для получения однозначно опознаваемого и измеримого собирательного образа.

Минимальный объект, распознаваемый глазом на изображении, равен 1 мм. В абсолютной величине это 1000 микрон, поделенные на увеличение. Данная величина в квадрате, переведённая в пиксели, является критическим значением для удаления шумов в стандартном методе фильтрации. Данный метод чаще всего используется для различных задач. При низком увеличении бывает так, что такое критическое значение меньше одного пикселя. В таком случае фильтрация не проводится.

Была разработана ещё одна процедура фильтрации шумов для зёрненных структур. Так как граница зёрен должна быть замкнутой, то все мелкие объекты, находящиеся внутри зерна, существенно влияют на его размер. Это может быть шум, грязь, включения и другое. Но если даже эти объекты являются важной частью структуры, например, включения могут создавать упрочнение материала, то их можно удалить, так как целью является измерение зерна. Если же целью является измерение размера данных частиц, то нужно наоборот оставлять только их. Размер данных частиц всегда меньше размера зерна и чаще всего намного меньше. Поэтому можно утверждать, что он меньше среднего размера зерна, даже с учётом влияния данных шумов. Поэтому эту процедуру, названную методом «соль-перец» можно автоматизировать с использованием метода секущих (рисунок 82).



а)

б)

в)

а – полосчатая структура после локальной бинаризации;

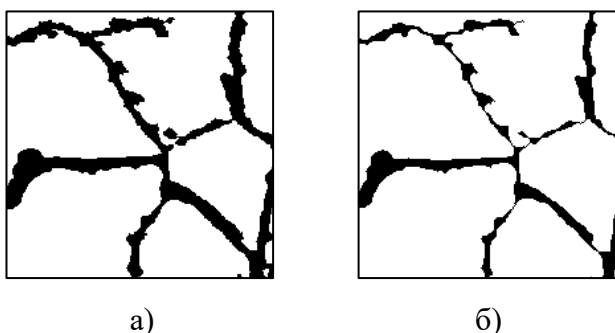
б – удаление чёрных шумов; в – удаление белых шумов

Рисунок 82 – Фильтрация шумов с помощью метода «соль-перец»

Можно заметить, что при достаточном увеличении полосчатые структуры являются зёрнеными. Для удаления белых шумов в зёрнах перлита использовалась та же процедура. При этом критическим размером шума являлся средний размер зерна феррита. Если же увеличение низкое, то тогда целью будет являться измерение параметров полосчатости.

Так как измерения параметров полосчатости проводились методом секущих, то фильтрация по форме объектов не производилась.

В задачах с необходимостью выделения чётких тонких границ необходимо использовать специальную процедуру, так как стандартный метод эрозии удаляет тонкие границы. В этих целях была разработана процедура «умной» эрозии (рисунок 83).



а – до «умной» эрозии; б – после «умной» эрозии

Рисунок 83 – Описание процедуры «умной» эрозии

Маски в таких процедурах могут быть различными в зависимости от поставленных целей. Эти маски были использованы для изображений зёрненных структур, а также фасеток изломов.

Довольно сложной задачей была фильтрация объектов по цвету. Бинаризация не позволяет отделить строго, а ручной метод является трудоёмким и невозобновимым. Для этого в том числе использовалась мультиризация, принцип работы которой описан ранее.

Для изломов с однородным строением, например, фасеточным или ямочным, после бинаризации удаётся получить строго определяемую морфологию строения излома. Для этого необходимо предварительно определить морфологическую единицу строения излома. Так, фасетка – это участок излома с малым изменением интенсивности и высокой плоскостностью. Это определение и позволило выделить фасетки излома.

Без понимания строения структур и изломов нет смысла проводить бинаризацию, так как непонятно, что будет после этого измеряться. Для изломов с наличием разных классов объектов рекомендуется вместо бинаризации использовать другие процедуры сегментации для определённых задач с использованием расположения элементов излома в пространстве или конфокальной микроскопии.

### 3.2.9 Измерение объектов бинарных изображений

Основной задачей было правильное измерение полученных изображений. Существует два стандартных метода: метод секущих и метод площадей. Второй метод применяется не так широко, поэтому было проведено его тщательное исследование.

Метод площадей проводится по 4-х и 8-и связности [55, 65]. Рисунок 84 иллюстрирует работу разных видов связности.

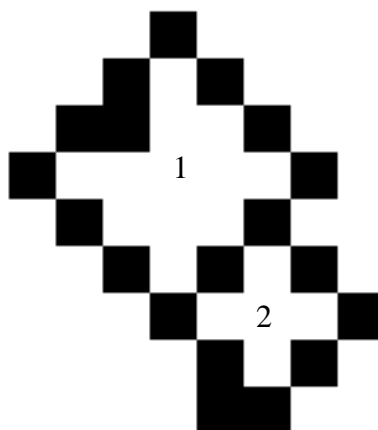


Рисунок 84 – Пример работы разного вида связности

По 4-х связности на рисунке 84 имеются 2 белых объекта и 15 чёрных объектов, а по 8-и связности – 1 белый объект и 1 чёрный объект. Поэтому для разных задач необходимо использовать разный вид связности (использование одинаковой программы для всех случаев некорректно). Например, для измерения белых зёрен нужно использовать 4-х связность, а для границ 8-и связность.

Измерение проводилось методом секущих, так как в результате бинаризации невозможно получение абсолютно точных изображений, поэтому некоторые объекты сливаются, образуя более сложные объекты неправильной формы. Очень часто на изображении объединяется большое количество объектов, из-за чего распределения размеров объектов по площадям становятся очень асимметричными, что не позволяет делать дальнейшие выводы о связи рассчитанных параметров со свойствами.

Метод площадей оказался применим для изображений неметаллических включений и серного отпечатка, включений в твердых сплавах, а также в выделениях на изображениях изломов. Здесь чаще всего использовалась 4-связность, чтобы максимально избежать объединения рядом стоящих объектов.



*Классификация объектов по параметрам:*

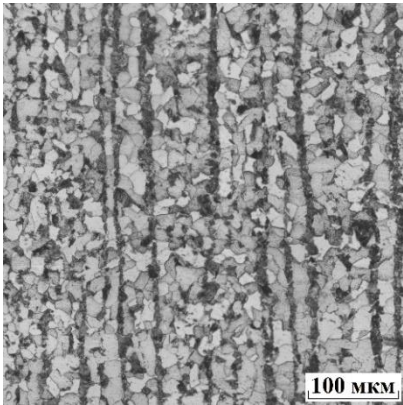
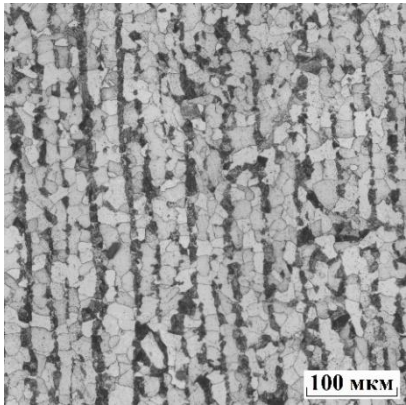
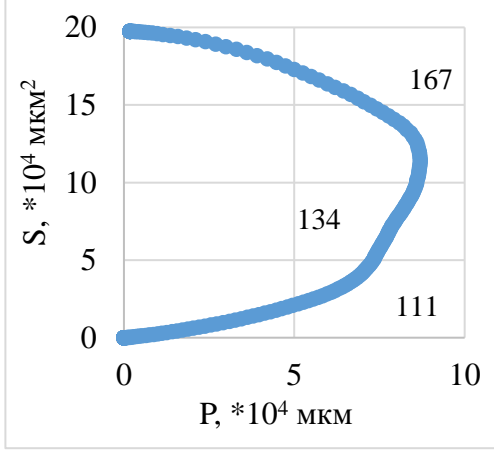
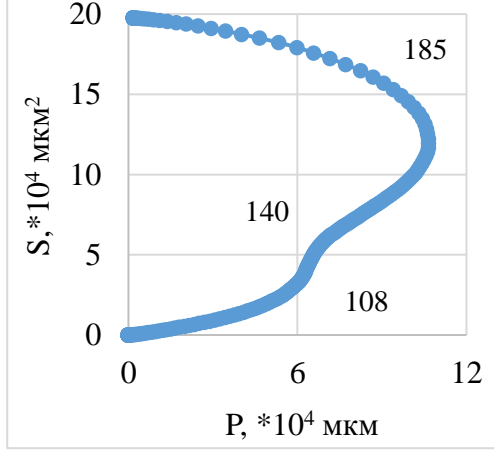
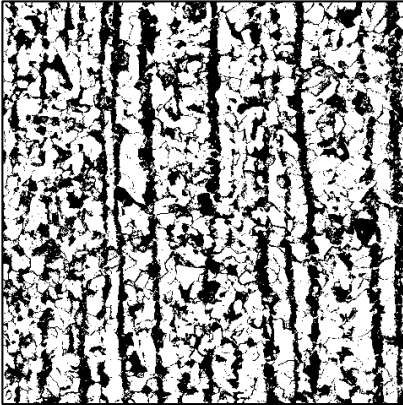
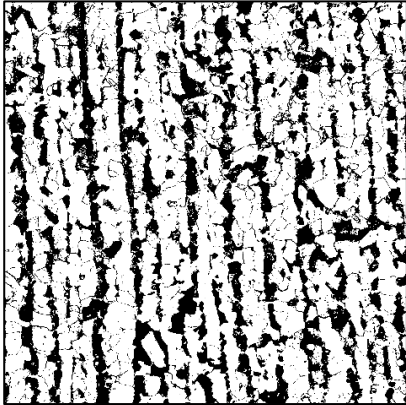
1. по цвету: светлые на светлом фоне, тёмные на светлом фоне (светлых на тёмном фоне не было, но потенциально такие структуры могут быть), частицы определённого цвета;
2. по форме и размеру: равноосные и вытянутые, квадратные и гексагональные, сложной формы («крокодильчики» дендритов) и другое;
3. по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

**3.2.10 Влияние химического состава образцов на размер структурных элементов**

При анализе близких по составу структур часто ручными методами невозможно определить разницу в размере структурных элементов. Это также подтверждает большой разброс результатов ручных измерений (см. пункт 3.2.11). Однако автоматизированные алгоритмы могут точно определить эту разницу, что может помочь в классификации сплавов и их идентификации на заводах, производящих или перерабатывающих продукцию большого ряда сплавов. Для этого на примере полосчатой структуры сталей 10ХСНД и 15ХСНД было проведено сравнение, и показана применимость созданных алгоритмов для данных целей.

После обработки изображений (см. таблицу 24) измерялись основные параметры перлитных колоний, а также критерии полосчатости [123] (см. таблицу 25), а затем полученные массивы сравнивались по критериям Стьюдента и Колмогорова-Смирнова (см. таблицу 26). По обоим критериям сравнения показана разница толщины полос перлита при риске не ниже 0,05. Остальные параметры структуры с таким же риском разницы не показали.

Таблица 24 – Обработка изображений структуры сталей 10ХСНД и 15ХСНД

№	10ХСНД	15ХСНД
Исходные изображения		
С-образные кривые		
Бинарные изображения с фильтрацией до 10 пкс <sup>2</sup>		

Только коэффициент  $\sigma_{VL\parallel} / \sigma_{VL\perp}$ , основанный на измерениях доли второй фазы на направленных секущих вдоль и поперек оси деформации, будет однозначно характеризовать полосчатость структуры вне зависимости от морфологии частиц второй фазы [123]. Это подтверждается и в данном случае: данный критерий отличается больше, чем в 2 раза. Параметр  $VL\parallel / VL\perp$  для данных структур равен 0,927 и 1,117 соответственно и не показывает настолько явно разницу сравниваемых изображений.

Таблица 25 – Изменение параметров структур сталей 10ХСНД и 15ХСНД

Параметры полосчатости					Критерии полосчатости		
Сталь	Толщина полос перлита, мкм	Расстояние между полосами перлита, мкм	Размер перлитных колоний, мкм <sup>2</sup>	Доля перлита, %	NL <sub>⊥</sub> /NL <sub>  </sub>	σNL <sub>  </sub> /σNL <sub>⊥</sub>	σVL <sub>  </sub> /σVL <sub>⊥</sub>
10ХСНД	4,1 ± 0,4	7,1 ± 0,7	4,27 ± 0,57	0,37	0,91	1,02	2,24
15ХСНД	3,4 ± 0,4	7,7 ± 0,7	3,66 ± 0,54	0,32	1,23	1,02	5,65

Таблица 26 – Сравнение параметров структур сталей 10ХСНД и 15ХСНД

Параметры	Толщина полос перлита	Расстояние между полосами перлита	Площадь перлита
Стьюдент (n=60)	2,23 (0,05)	1,35 (0,2)	0,42 (> 0,5)
К-С	1,45 (0,05)	1,24 (0,1)	0,73 (> 0,5)

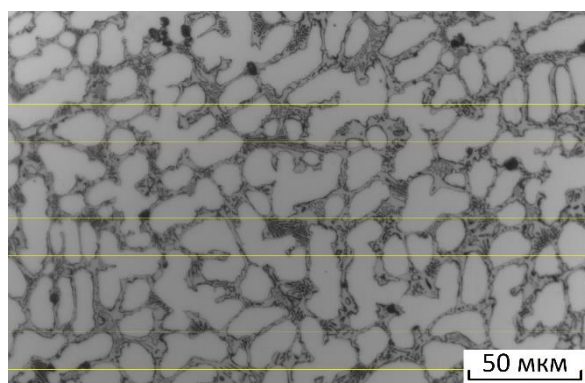
Также данный эксперимент показывает, что разброс значений содержания элементов в составе различных сталей и сплавов может давать статистически различимый размер параметров структуры. Так в стали 15ХСНД содержание углерода 0,12 – 0,18%. Это говорит о том, что размер перлитных колоний может также меняться внутри данного диапазона. Данный эксперимент показывает, что созданный автоматизированный алгоритм обработки и измерения параметра структур чувствителен к данному рода изменениям.

### 3.2.11 Влияние исследователя на результат ручного измерения

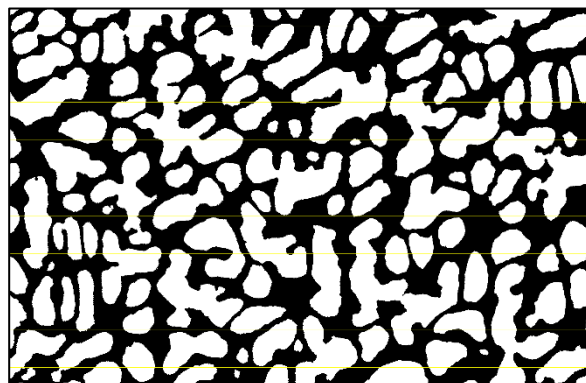
Давно замечены разногласия в результатах ручного измерения двух или более исследователей. Существует целый ряд факторов, определяющих размер параметров структуры при ручном измерении: идентификация измеряемого объекта, определение его границ, направление измерения, число измерений, уровень компетентности оператора, его зрение и состояние (усталость, болезнь, занятость и прочее), уровень компьютера и программного обеспечения, выбор метода статистического анализа данных. Все это говорит о том, что каждый этап ручной обработки изображений так же, как и их подготовки, может вносить ошибку в конечный результат.

Для неоднородных структур все эти факторы могут значительно усиливаться, а для многих неравноосных объектов ручное измерение не является объективным. Для измерения мелких объектов секущие не попадают на часть объектов, поэтому в таких случаях (неметаллические включения, серный отпечаток, мелкие объекты на электронно-микроскопических изображениях и другое) измеряют диаметры объектов. Такой метод завышает результаты измерения по сравнению с методом секущих. Поэтому в том числе важно создание единой методики измерений для решения данной проблемы.

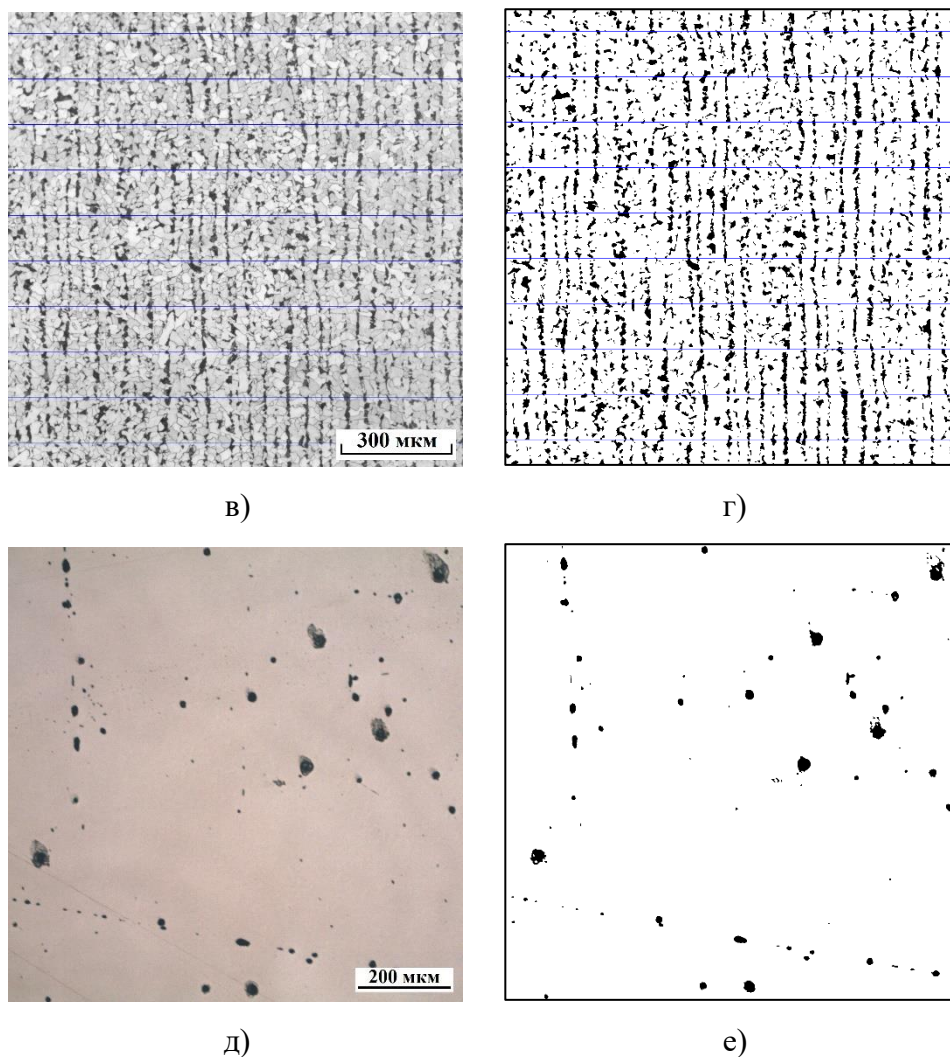
В связи с перечисленными проблемами было решено провести эксперимент по влиянию исследователя на результат ручного измерения. Исследовались 3 типа структур: дендритные ( $260 \times 169$  мкм), полосчатые ( $1233 \times 1233$  мкм) и неметаллические включения ( $956 \times 956$  мкм) (рисунок 85). Измерения проводили 5 исследователей с разным уровнем образования, компетентности и прочее. Для уменьшения ошибки измерения проводились по готовым исходным и бинаризованным изображениям с заранее проведенными горизонтальными секущими (для дендритных и полосчатых структур). Очевидно, что полный эксперимент от подготовки шлифов до конечного результата лишь увеличит величину ошибки, что можно заметить по результатам измерения неметаллических включений.



а)



б)



а, б – дендритная структура изображения твердого сплава 2; в, г – полосчатая структура стали Ст3сп; д, е – неметаллические включения стали 09Г2С

Рисунок 85 – Исходные и бинарные изображения для ручного измерения

Для измерений проводилось общее объяснение хода работы для всех исследователей. Поэтому результат данных измерений зависит полностью от уровня исследователя.

Измерения проводились в программе ImageJ. Далее результаты обрабатывались в Excel. Строились гистограммы распределения параметров объектов, рассчитывались (рисунок 86) средние значения (масштабные коэффициенты для дендритной структуры 0,13 мкм/пкс, полосчатой структуры 0,616 мкм/пкс, неметаллических включений 0,637 мкм/пкс), определялись максимальные и минимальные значения, коэффициенты эксцесса и асимметрии.

Различия рассчитывались путем деления разницы максимального и минимального результата измерения на максимальный. При измерении светлых объектов различие уменьшается после проведения бинаризации, для тёмных объектов – увеличивается (рисунок 87).

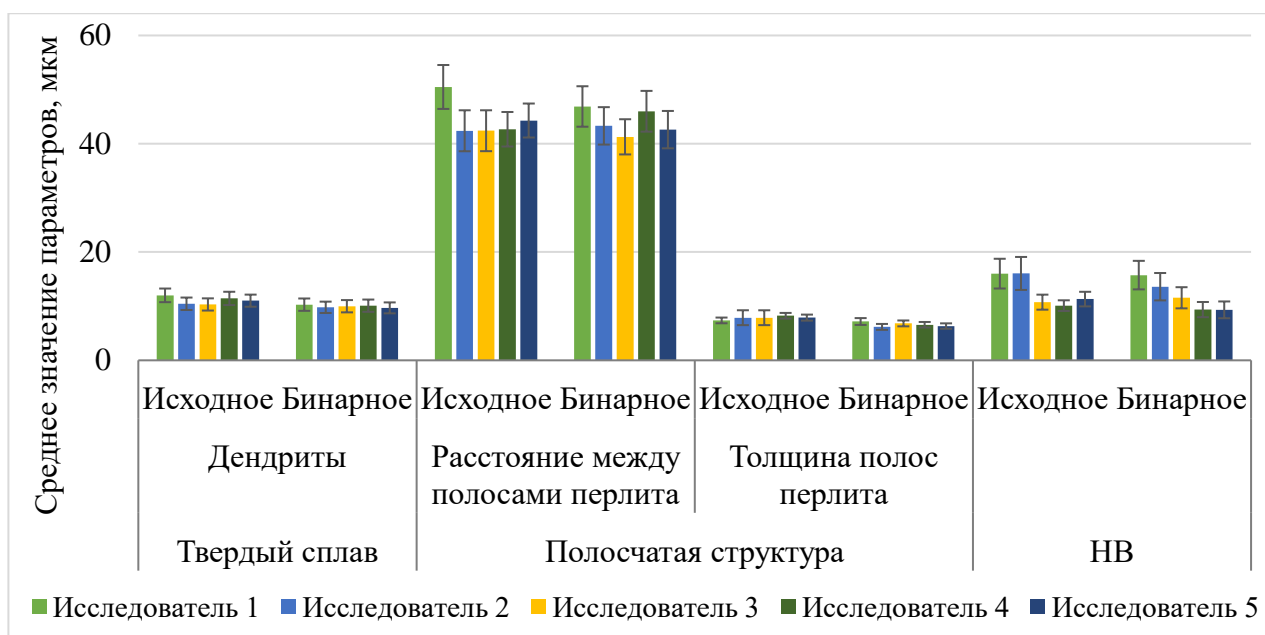


Рисунок 86 – Результаты измерения всех исследователей

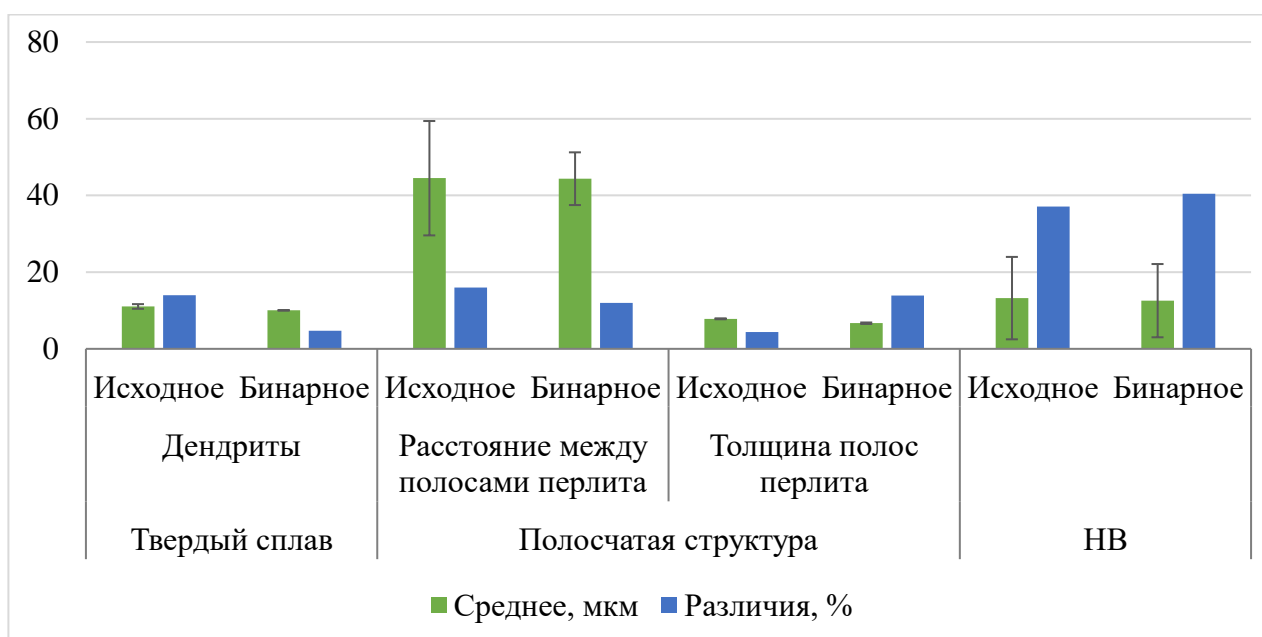


Рисунок 87 – Различия между результатами измерения всех исследователей

Для неметаллических включений различие больше, поскольку измерялись диаметры каждого включения, выбор которого и определил масштаб различий между измерениями разных исследователей. Это ещё раз подтверждает влияние каждого шага металлографического исследования на результат измерения.

### 3.2.12 Необходимые определения для изображений структур

Для проведения измерений после предварительной обработки изображений нужно внести ясность в определения измеряемых параметров структур [35, 36, 37].

Элементы пространственной структуры могут быть *трёхмерными* (зёрна, субзёрна, выделения фазы, поры), *двухмерными* (границы зёрен и субзёрен, межфазные поверхности), *одномерными* (ребра частиц и зёрен, дислокации) и *точеными* (вершины указанных объектов).

**Зерно (или кристаллит)** – минимальный объём кристалла в поликристаллическом материале, окруженный высокодефектными высокоугловыми границами (ГОСТ 5639). Для анализа изображений дендрит (зерно) – это замкнутая область одного или близкого оттенка серого на монохромном изображении.

**Дендрит (от греч. «дерево»)** – сложное кристаллическое образование древовидной ветвящейся структуры. Зерно является предельным, самым простым, случаем дендрита.

**Размер зерна** – средняя величина случайных сечений зёрен в плоскости металлографического шлифа (ГОСТ 5639). В случае определения величины зерна в разнозёренной структуре средние размеры не являются характеристиками оценки структуры.

**Граница зерна** – поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале. Чаще всего на изображениях граница зёрен и зёрна имеют разный оттенок.

Различные **выделения** фазы, неметаллические **включения**, **частицы**, серные отпечатки с точки зрения компьютерного анализа изображений также, как и зерно, являются замкнутыми объектами и измеряются по тем же принципам.

**Полоса перлита** – большое количество зёрен перлита, выстроенных в полосу вдоль направления прокатки, часть из которых может объединяться.

**Шум** – объекты, не совпадающие по оттенку серого с фоном, на котором они находятся. Так, шум может быть тёмным, находясь на светлом дендрите, или светлым, находясь на тёмном объекте. Второй вариант не так очевиден, но также влияет на величину измеряемого параметра.

### **Выводы по разделу:**

1. Показано, что изменение времени травления (при прочих равных условиях травления) в интервале «недотрав – перетрав» может оказать существенное влияние на результат измерения геометрии элементов структуры: вариация значений площади одних и тех же элементов может достигать трехкратных значений.

2. Показано, что повышение кратности увеличения одного и того же фрагмента структуры в световом микроскопе, не изменяя его качественное восприятие в целом, с одной стороны обеспечивает более точную детализацию (прорисовку) отдельных элементов структуры, с другой – за счет уменьшения ширины переходной зоны («элемент – фон») к уменьшению их размеров, вплоть до возможного разделения некоторых объектов. Данные изменения могут привести к различиям в значениях параметров геометрии отдельных элементов структуры и ее изображения в целом, для получения которых необходимы представительные объемы наблюдений. В частности показано, что для твердого сплава на железной основе необходима площадь кадра стороной не менее 150 мкм, для полосчатой феррито-перлитной структуры балла Б2 – 600 мкм.

3. На объектах исследования (изображения структур различной морфологии) сопоставлена статистика результатов измерения их геометрии после применения различных глобальных (4 шт.) и локальных (4 шт.) способов бинаризации. Показано, что для идентичных изображений структур наблюдаются различия их геометрии: линейных размеров, площади, объемной доли, плотности однотипных объектов от 5 до 30%. Это определяет интерес к выбору физически обоснованных критериев бинаризации применимо к конкретным типам структур.

4. Для различных структур сталей и сплавов на основе анализа полей яркости их изображений предложен алгоритм мультиризации – дальнейшее развитие графического метода бинаризации С-образной кривой, когда на ней, при наличии на изображении нескольких типов структурных составляющих, имеется несколько отвечающих им перегибов. В подобных случаях бинаризацию предпочтительнее проводить поэлементно по впадинам, что подтверждено сравнением средних значений размеров объектов и статистики их распределений по критериям Стьюдента и Колмогорова-Смирнова.

5. Показано также, что для достижения оптимального бинарного изображения структур процедура бинаризации при необходимости может быть дополнена процедурой фильтрации (эрозия + дилатация), проводимой с учетом природы анализируемых объектов.



### 3.3 Метрологическое обеспечение измерений неметаллических включений и серного отпечатка

Важной частью количественных металлографических исследований является измерение мелких точечных объектов, примерами которых являются неметаллические включения (нитриды, сульфиды и прочее), объекты серного отпечатка по Бауману (далее НВ и СО) и другие. Указанные объекты влияют на механизм разрушения, что говорит об актуальности их измерения.

Для лучшего понимания природы неметаллических включений как объекта изображений показано распределение интенсивности яркости профиля их изображения в монохромном виде (рисунок 88). Показано, что интенсивность яркости в объекте НВ уменьшается от его границы к центру, что говорит о том, что выбор метода бинаризации определяет линейный размер и площадь НВ. Также минимальное значение интенсивности НВ отличается от объекта к объекту, что говорит о том, что выбор метода бинаризации определяет количество о плотность НВ на изображении.

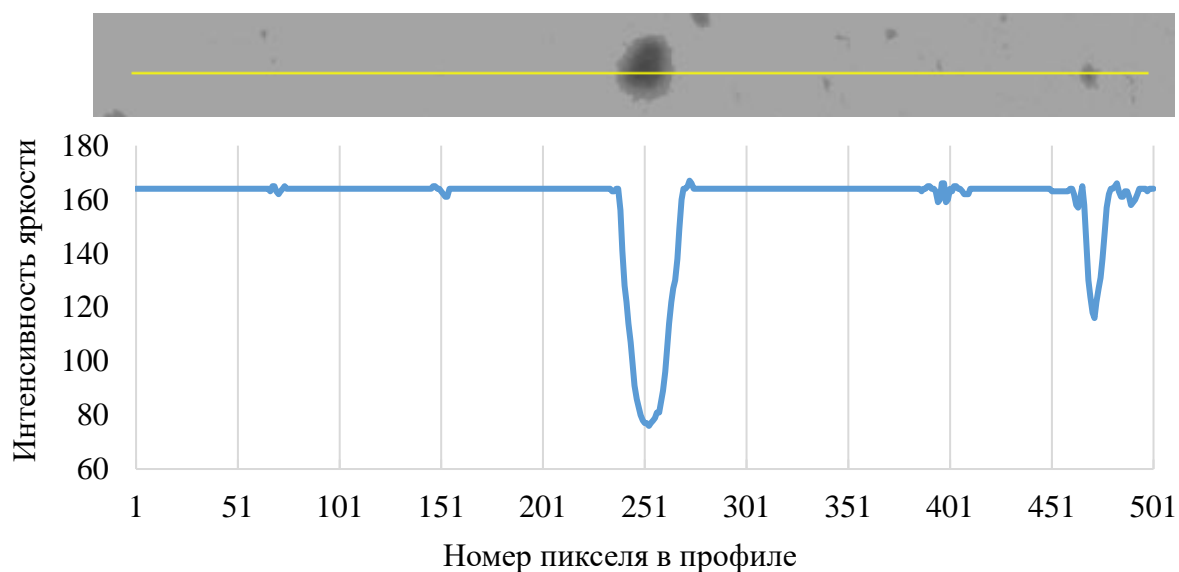
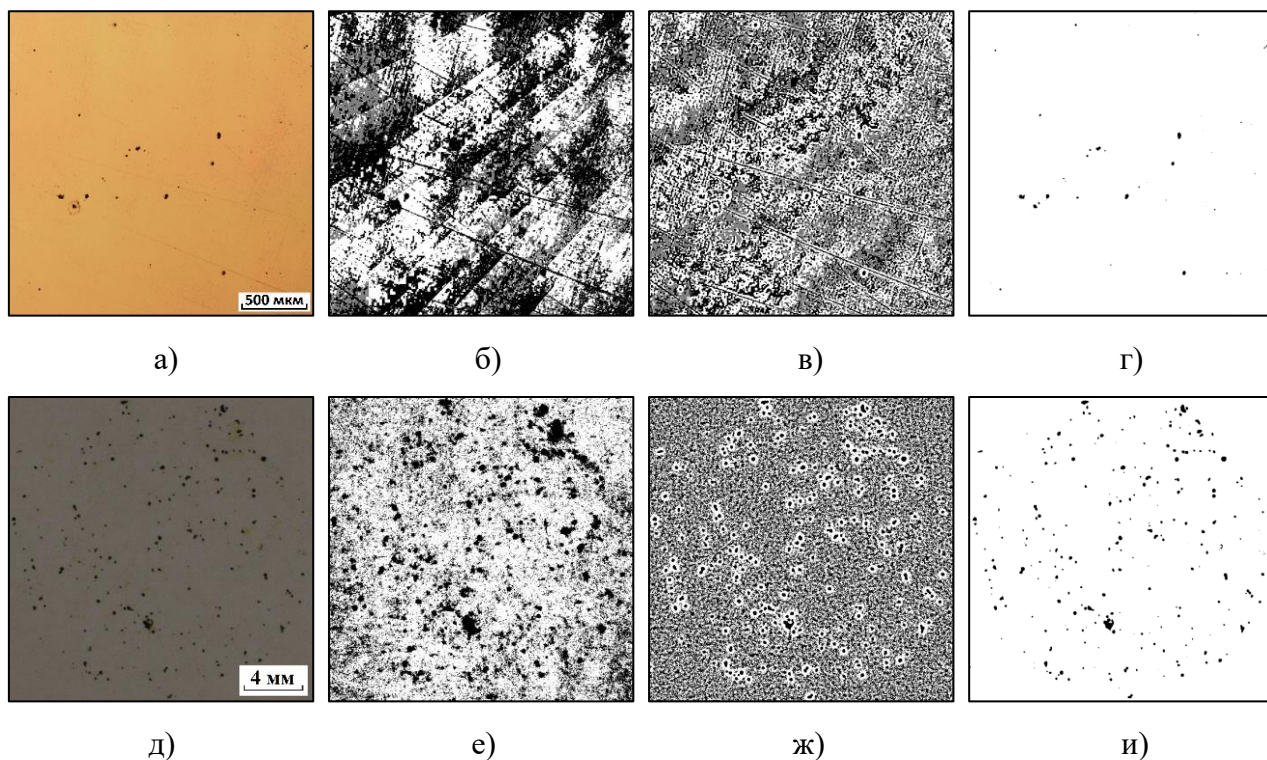


Рисунок 88 – Графическое описание интенсивности яркости неметаллических включений

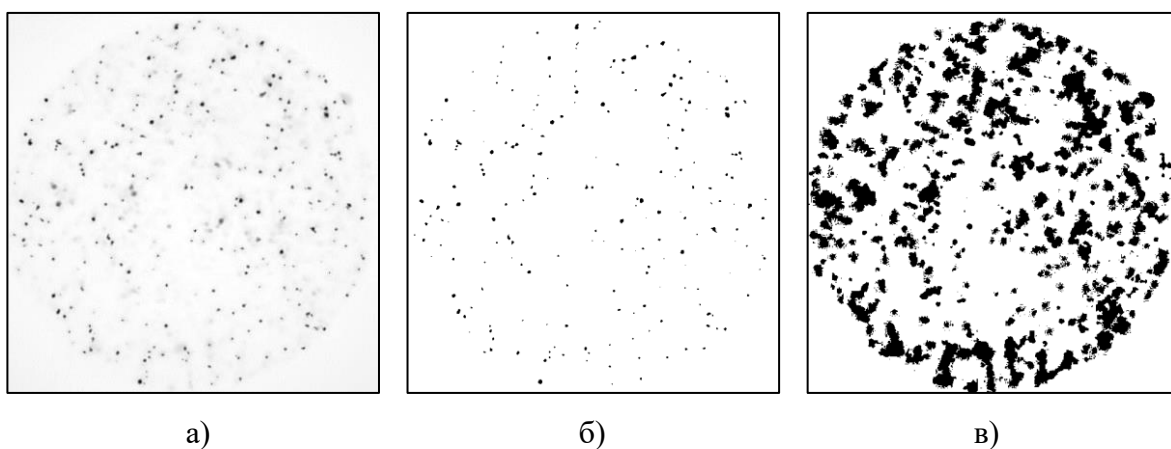
Невозможность использования метода секущих для точечных объектов определяет необходимость использования в данном случае метода площадей, что объясняет важность точности выделения данного типа объектов на изображениях в ходе бинаризации. Стандартные глобальные и локальные методы не позволяют выделять точечные объекты из-за их низкой объёмной доли, на фоне изображений в данных случаях появляется большое количество шумов (см. рисунок 89).



а, б – исходные изображения; б, е – глобальный метод среднего;  
в, ж – локальный метод среднего, стандартный  $r=15$ ; г, и – метод мультиризации (3 группы)

Рисунок 89 – Бинаризация объектов изображений неметаллических включений и серного отпечатка

Для количественного подтверждения значимой разницы распределений размеров объектов был выбран серный отпечаток с наименьшим числом создаваемых шумов после обычных методов бинаризации. Проведено сравнение изображений данного СО после глобального метода среднего и мультиризации (рисунок 90).



а – исходное изображение СО; б – мультиризация; в – глобальный метод среднего

Рисунок 90 – Бинаризация изображения серного отпечатка

После качественной оценки очевидна разница в средних размерах объектов, их количества, объемной доли и плотности. Количественная оценка также доказывает разницу получаемых бинарных изображений (см. таблицу 27).

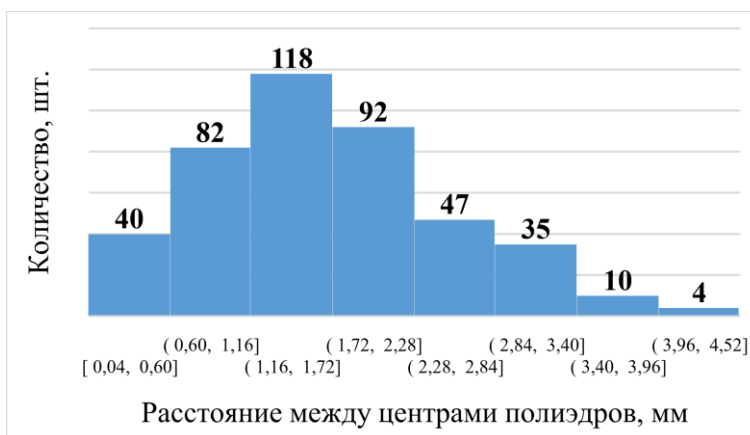
Таблица 27 – Статистика геометрии объектов и полиэдров Вороного изображения серного отпечатка после бинаризации методами мультиризации и глобального среднего

Метод	Мультиризация	Среднего
<b>Статистика геометрии объектов серного отпечатка</b>		
Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	506,36 ± 28,74	2878,75 ± 379,96
Количество, шт.	206	998
Доля, %	0,9	24,8
Плотность, шт./мм <sup>2</sup>	0,5	2,4
<b>Статистика геометрии полиэдров Вороного</b>		
Средняя площадь, мм <sup>2</sup>	2,17 ± 0,09	0,58 ± 0,02
Количество полиэдров, шт.	163	702
Среднее расстояние между центрами, мм	1,69 ± 0,04	0,83 ± 0,01
Коэффициент эксцесса	-0,1	0,8
Коэффициент асимметрии	0,5	0,9

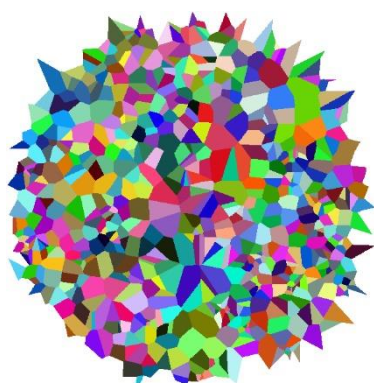
Для количественного сопоставления изображений использовано также построение полиэдров Вороного (рисунок 91) объектов СО [75]. Строились гистограммы распределения расстояний между центрами полиэдров (с одинаковым количеством столбцов для возможности их сопоставления). Статистика полиэдров Вороного (таблица 27) также показывает существенную разницу в геометрии полиэдров Вороного изображения СО после бинаризации методами мультиризации и глобального среднего.



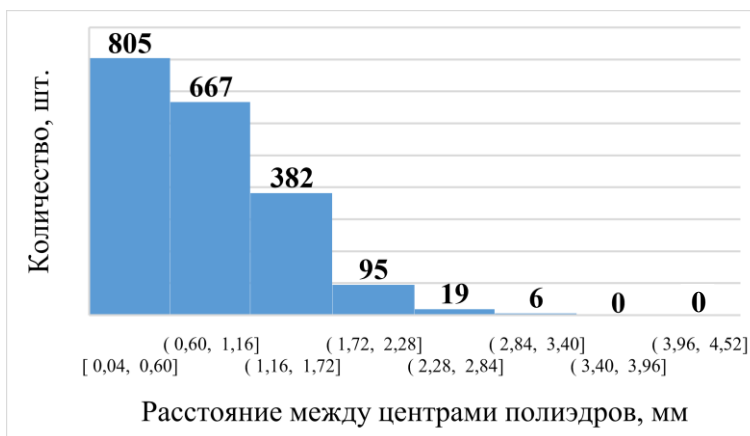
а)



б)



в)



г)

а, в – полиэдры Вороного после метода мультифрагментации и глобального среднего соответственно; б, г – гистограммы распределения расстояний между центрами полиэдров после метода мультифрагментации и глобального среднего соответственно

Рисунок 91 – Построение полиэдров Вороного изображения СО после бинаризации методами мультифрагментации и глобального среднего

Разработанный алгоритм мультифрагментации также применим для изображений мелких объектов при съемке до травления. Важно отметить, что в данном случае мультифрагментация позволяет отделить фон от объектов даже при наличии существенного градиента освещенности, а также исключить риски от шлифования (рисунок 77, а).

Важной процедурой для измерения неметаллических включений является фильтрация бинарных изображений. Для серных отпечатков данная процедура не проводилась, так как мелкие объекты (1 – 5 пкс) на изображении серного отпечатка могут быть скоплением мелких или одним крупным неметаллическим включением на панораме. При увеличении критического размера удаляемых объектов увеличивается средний размер объектов после удаления, и уменьшается их количество (см. рисунок 92).

При наличии неоднородности строения структур или необходимости анализа структур в масштабе образца актуальными становятся панорамные исследования образцов. Для этой цели компьютерная металлография незаменима.

Панорамные изображения снимаются чаще всего лишь для качественной оценки структуры в масштабах образца или изделия. Здесь выбор увеличения зависит от состава сплава и качества протравленности объектов для их распознавания. Количественные компьютеризированные измерения панорамных изображений пока затруднены из-за неоднородности по освещенности в каждом из склеенных кадров. Сопоставление одинаковых полей зрения при разных увеличениях требует съемки панорам. Чем больше поле зрения будет

рассматриваться, тем более воспроизводимую характеристику абсолютной величины можно получить с учетом неоднородности размеров объектов.

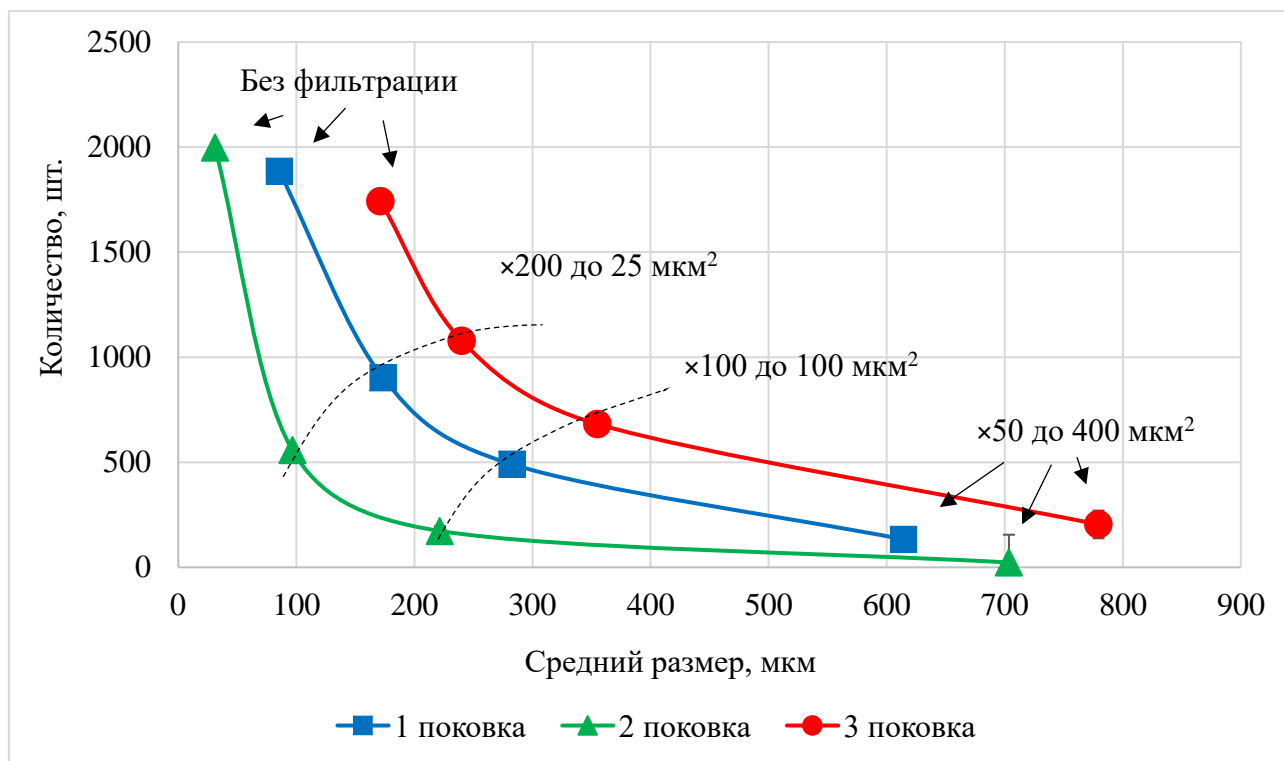


Рисунок 92 – Влияние фильтрации на размер объектов НВ

Необходимость выбора минимальной площади поля зрения, обеспечивающей воспроизводимость получаемых результатов, актуальна для структур различной морфологии [57]. Она может быть осложнена выраженной структурной неоднородностью, когда различным участкам изделия соответствует структура, описываемая своим номером той или иной шкалы. Так, например, при исследовании загрязненности трех крупных поковок кубической формы из улучшаемой стали 38ХНЗМФА неметаллическими включениями (при увеличении 100 крат) была оценена [116] вариация средних значений площадей НВ по кадрам площадью 80 мм<sup>2</sup> (эквивалент живого сечения ударного образца) на суммарной площади каждого шлифа площадью ~ 320 мм<sup>2</sup> (рисунки 93, 94).

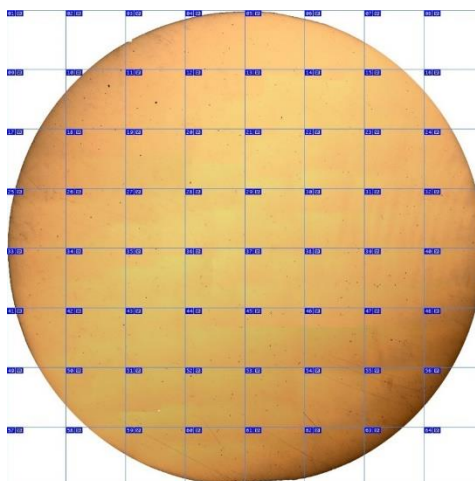


Рисунок 93 – Разбиение панорамы НВ на кадры

Очевидно, что при таком масштабе неоднородности (даже в мезомасштабах наблюдения) балльные оценки той или иной структуры должны быть дополнены массовыми прямыми измерениями геометрии их строения и соответствующих им изломов, выявлением их взаимосвязей [68, 124]. Цифровизация позволяет обеспечить массовость таких измерений и получить, в т.ч. статистические оценки геометрических параметров структур, например, недоступные ранее из-за трудоемкости при оценке роли разномасштабной полосчатости в микроструктуре в появлении неоднородности вязкости и пластичности листовых материалов.

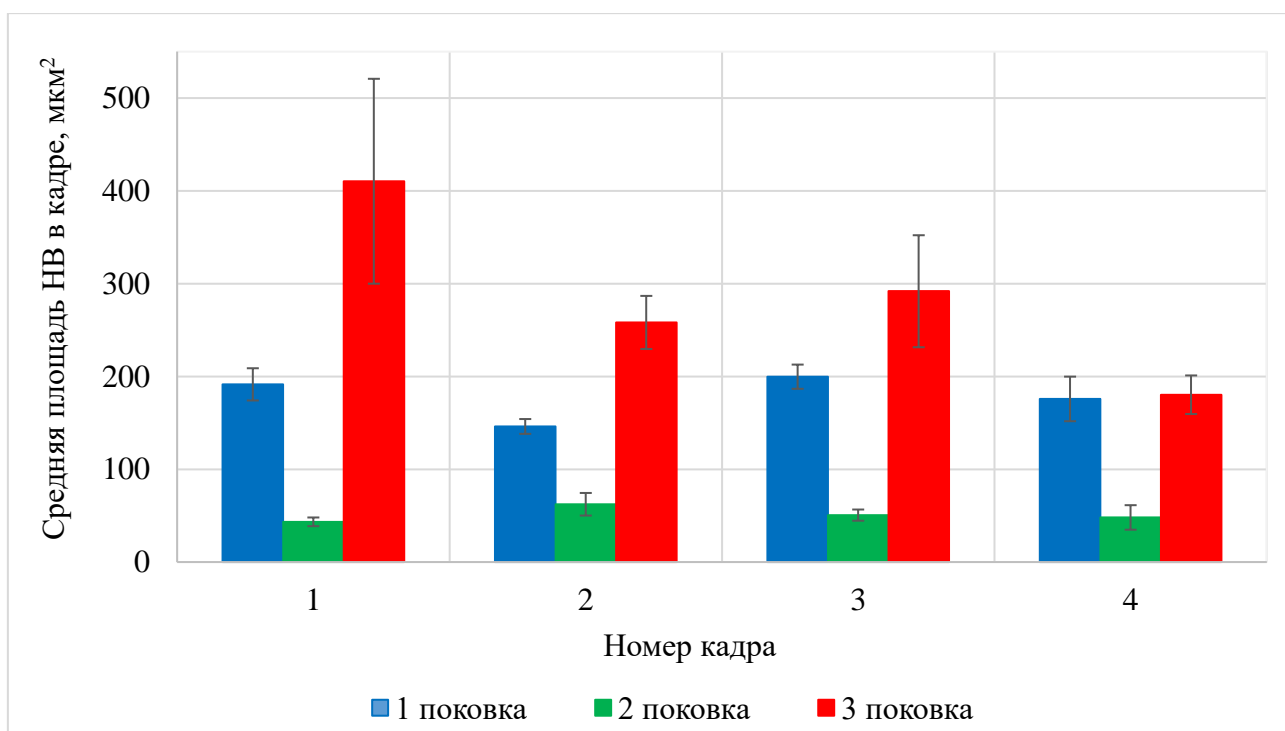


Рисунок 94 – Вариация средних значений площадей неметаллических включений, измеренных на панорамах площадью 80 мм<sup>2</sup>, на образцах (площадью ~320 мм<sup>2</sup> каждый), отобранных от трех крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА



Для оценки размещения неметаллических включений по сечению образца было использовано построение полиэдров Вороного на примере первой поковки (рисунок 95) для 4 разных областей сечения образца.

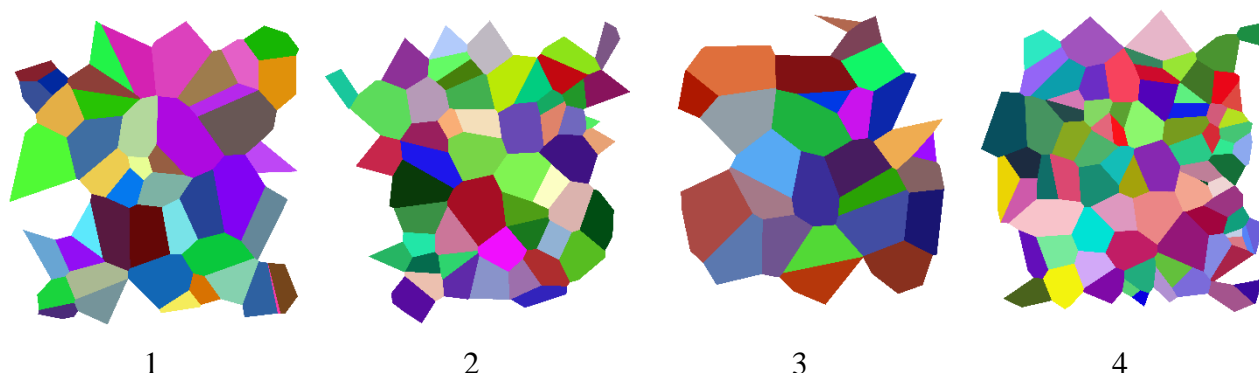


Рисунок 95 – Полиэдры Вороного объектов изображений НВ в четырех областях круглого образца, поковка №1 из улучшаемой стали 38ХН3МФА

Статистика полиэдров Вороного выявила (таблица 28) различия между кадрами как по средней площади и количеству полиэдров, так и по среднему расстоянию между их центрами.

Таблица 28 – Статистика полиэдров Вороного неметаллических включений на шлифе (четыре кадра, площадью 80 мм<sup>2</sup> каждый), поковки №1 из улучшаемой стали 38ХН3МФА

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 критерием Колмогорова-Смирнова показано (таблица 29), что большинство из них значительно отличается загрязненностью неметаллическими включениями с риском  $\leq 0,05$ .

Таблица 29 – Сравнение распределений расстояний между центрами полиэдров Вороного неметаллических включений поковки №1 из улучшаемой стали 38ХНЗМФА по критерию Колмогорова-Смирнова

Пара сравнения	К-С критерий	Риск
1-2	1,02	0,3
1-3	1,01	0,3
1-4	1,60	0,05
2-3	1,83	0,01
2-4	1,85	0,01
3-4	2,22	0,001

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 [125]. Наряду с этим возможно совместное влияние однородности 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.

В результате исследований панорамных структур неметаллических включений предложено усовершенствование панорамной склейки путем проведения вычитания полиэдра для выравнивания по свету и бинаризации изображений перед этапом склейки. Это поможет выделять объекты на панорамных изображениях более точно и избежать влияния неоднородности по освещению на количественный результат измерений.



### **Выводы по разделу:**

1. Разработана процедура обработки изображений с объектами точечной природы (на примере неметаллических включений и серных отпечатков), включающая выравнивание изображений по освещенности, мультиризацию, фильтрацию и измерение методом площадей.
2. С помощью статистики объектов изображений серного отпечатка и их полиэдров Вороного сопоставлены изображения после бинаризации методами мультиризации и глобального среднего. Показаны значимые различия полученных результатов при оценке морфологии серного отпечатка.
3. Выявлены значимые различия в загрязненности неметаллическими включениями темплета поковки (площадью  $\sim 300 \text{ мм}^2$ ) из улучшаемой стали 38ХНЗМФА в четырех его зонах (площадью  $25 \text{ мм}^2$  каждая) по средним размерам НВ и их размещению на основе статистики полиэдров Вороного (вариация коэффициентов эксцесса и асимметрии расстояний между НВ в пределах  $-0,54 - 0,32$  и  $0,33 - 0,73$  соответственно). Это является одним из факторов, определяющих условия образования вязкого излома, и, как следствие, одной из возможных причин разброса трещиностойкости (критического раскрытия трещины  $\delta_c$ ) в масштабах структурной неоднородности – до 30% (по сечению стандартных образцов для испытания на вязкость разрушения) по уточненной на кафедре металловедения и физики прочности методике.

### 3.4 Измерение структур и изломов твердых сплавов

Прогноз качества разнообразных 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.

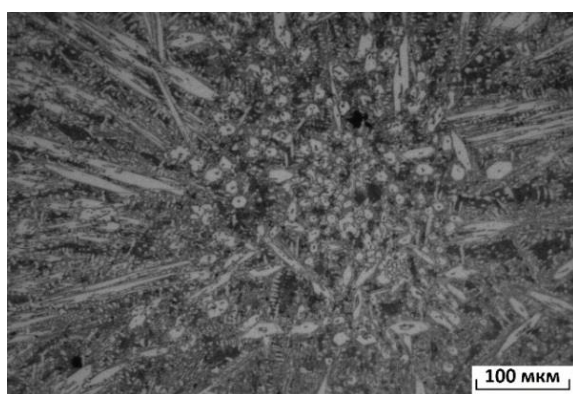
Рост вычислительных мощностей и появление современных программных продуктов обеспечивают возможность разработки необходимых компьютеризированных технологий для измерения изображений в материаловедении, но их создание и применение являются трудно поддающейся формализации процедурой, поскольку требует, с одной стороны, учета природы анализируемого объекта, а с другой – соответствующего метрологического обеспечения. Это далеко не всегда учитывается в исследовательской практике, поэтому, даже несмотря на достаточно широкое предложение специализированных программных продуктов, эффект от их применения оказывается несоизмеримо меньше их потенциальных возможностей. В подобных случаях важным является оценка информативности результатов измерения структур (на примере твердых сплавов) с использованием компьютеризированных процедур для прогноза их работоспособности.

Традиционный подход к решению материаловедческих задач базируется на измерении некоторых параметров структуры, связанных с определенным свойством. Однако возможность решения прямых задач реализуема лишь для некоторых частных случаев, где заранее известен закон связи. Принципиально важно решение обратных задач, где на основе сопоставления структур, разрушения и некоторых свойств  $Y$  для исследуемой группы сплавов или их состояний, определяются критические составляющие структуры (при необходимости их сочетание, конфигурация) масштаб которых  $x$  лимитирует данное свойство [126]. Отсюда возможность определения зависимости  $Y(x)$ , позволяющей прогнозировать это свойство для других структур аналогичного вида. На практике это обеспечивает условия для более эффективного управления свойствами материала по структуре.

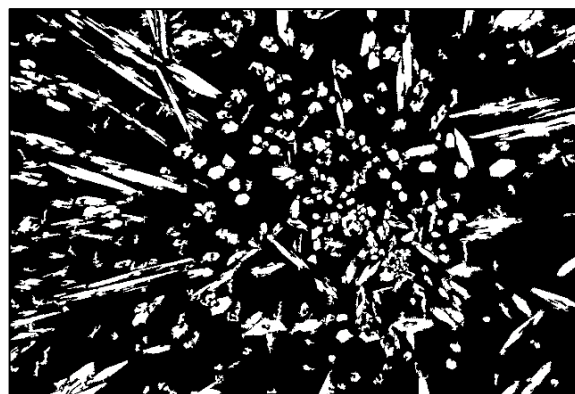
Высокая трудоемкость измерений, отсутствие быстродействующих средств и алгоритмов выделения необходимых элементов структуры, сложности при обработке полученных результатов затруднили постановку обратных задач, вплоть до недавнего времени. Современные масштабы компьютеризации экспериментальных исследований обеспечили возможность эффективной работы материаловедов по существу, что подразумевает выработку предположений о взаимосвязи структур и свойств, отработку метрологически обеспеченных процедур измерения выделенных числовых характеристик структуры (с учетом природы анализируемого объекта), накопление статистически представительных массивов результатов измерения структур и разрушения, установление объективных закономерностей влияния неоднородности структуры на свойства, разработку обоснованных рекомендаций по управлению свойствами, прогнозу оптимальных структур инновационных сплавов под заданные свойства [127].

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 [68]. Их внешнее сходство, например, для сплавов на железной основе, требовало количественного подтверждения, основанного на представительной статистике измерений (в масштабах покрытия). Это было необходимо с учетом неизбежной неоднородности структур твердого сплава, а также того естественного обстоятельства, что трещина «выбрав» для своего распространения самые слабые места в структуре навсегда исключает их из последующего металлографического анализа, что априори затрудняет оценку роли структур в разрушении.

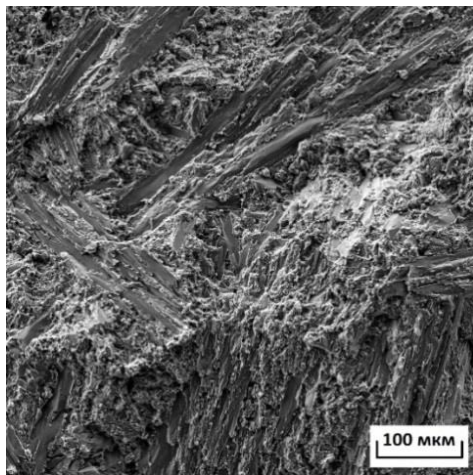
Цифровые изображения структур и изломов в 256 оттенках серого были подготовлены к измерению геометрии их строения с использованием разработанных компьютеризированных процедур, включающих в себя выравнивание интенсивности яркости, применение алгоритмов автоматизированной бинаризации и фильтрации шумов с учетом природы анализируемых объектов [57] (рисунок 96).



а)



б)

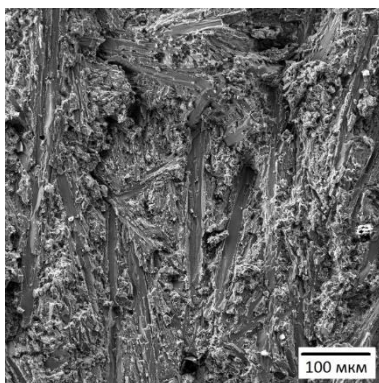


в)

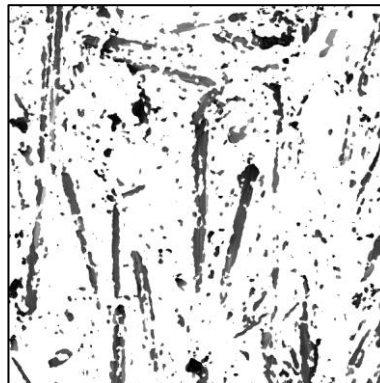
г)

Рисунок 96 – Пример изображений структуры сплава 4 на железной основе до (а) и после (б) бинаризации, его излома (в) и распределения размеров упрочняющей составляющей (г)

Одним весьма эффективным способом выделения объектов на изображениях изломов являются расчёт второго градиента в точке и последующее разделение изображения на группы по критическому значению, определённом из характерных участков (рисунок 97). Этот метод позволил выделить плоские участки, такие как фасетки или карбиды. Бинаризация в данном алгоритме проводилась простым переводом точек, принадлежащих выделенным объектам, в белый цвет, а матрицы в чёрный. Перед измерением параметров использовали медианный фильтр на бинарном изображении для удаления случайно попавших мелких участков.



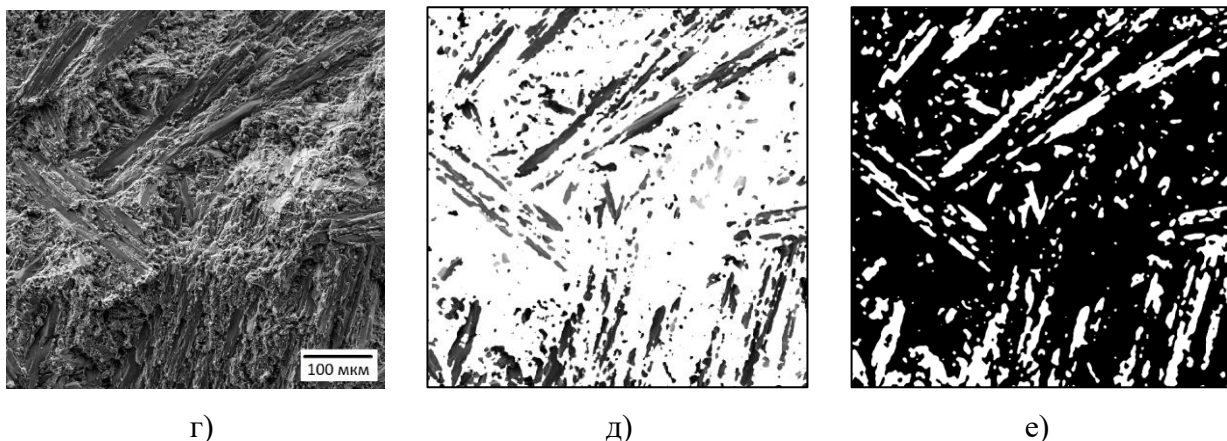
а)



б)



в)



а, г – исходные изображения; б – выделенные карбиды; в – удаление шумов с помощью медианного фильтра  $r=4$  на бинарном изображении

Рисунок 97 – Алгоритм обработки изображений изломов образцов сплава 4 при  $\times 500$

Полученные результаты измерения размеров упрочняющей фазы – карбидов (по методу секущей) и соответствующих им элементов излома подтвердили, что и в разрушении данных твердых сплавов определяющую роль играет структура (таблица 30).

Таблица 30 – Размеры соответствующих друг другу элементов структур (упрочняющая составляющая) и изломов твердого сплава 4 на железной основе\*

Параметр	Фильтрация, $\text{мкм}^2$	Микроструктура					Излом		
		Световая микроскопия, $\times 500$			Сканирующая микроскопия, $\times 500$		Сканирующая микроскопия, $\times 500$		
	Номер кадра	1	2	3	1	2	1	2	3
Средний размер, $\text{мкм}$	без	$2,00 \pm 0,18$	$1,63 \pm 0,10$	$1,78 \pm 0,07$	$2,14 \pm 0,16$	$3,21 \pm 0,25$	$7,51 \pm 0,52$	$4,66 \pm 0,34$	$5,38 \pm 0,49$
	$\leq 25$	$5,47 \pm 0,67$	$3,21 \pm 0,37$	$2,99 \pm 0,18$	$6,00 \pm 0,59$	$8,85 \pm 0,94$	$8,45 \pm 0,60$	$5,82 \pm 0,45$	$6,27 \pm 0,56$
Средняя площадь $\text{мкм}^2$	без	$3,15 \pm 0,38$	$2,68 \pm 0,21$	$3,93 \pm 0,53$	$3,28 \pm 0,33$	$6,43 \pm 0,57$	$72,59 \pm 9,31$	$45,95 \pm 6,38$	$43,48 \pm 4,64$
	$\leq 25$	$136,32 \pm 21,38$	$76,8 \pm 9,56$	$108,17 \pm 17,66$	$169,16 \pm 25,18$	$207,68 \pm 21,24$	$210,01 \pm 26,43$	$137,19 \pm 19,52$	$118,74 \pm 12,25$

\* По результатам измерения структур (в оптическом и сканирующем микроскопах) и изломов на двух случайно выбранных полях зрения площадью не менее  $1,0 - 1,5 \text{ мкм}^2$  каждое (в масштабе образца).

Статистика средних значений выборок (структур и изломов) подтвердила определяющую роль структур в развитии разрушения исследуемых твердых сплавов (рисунок 98).

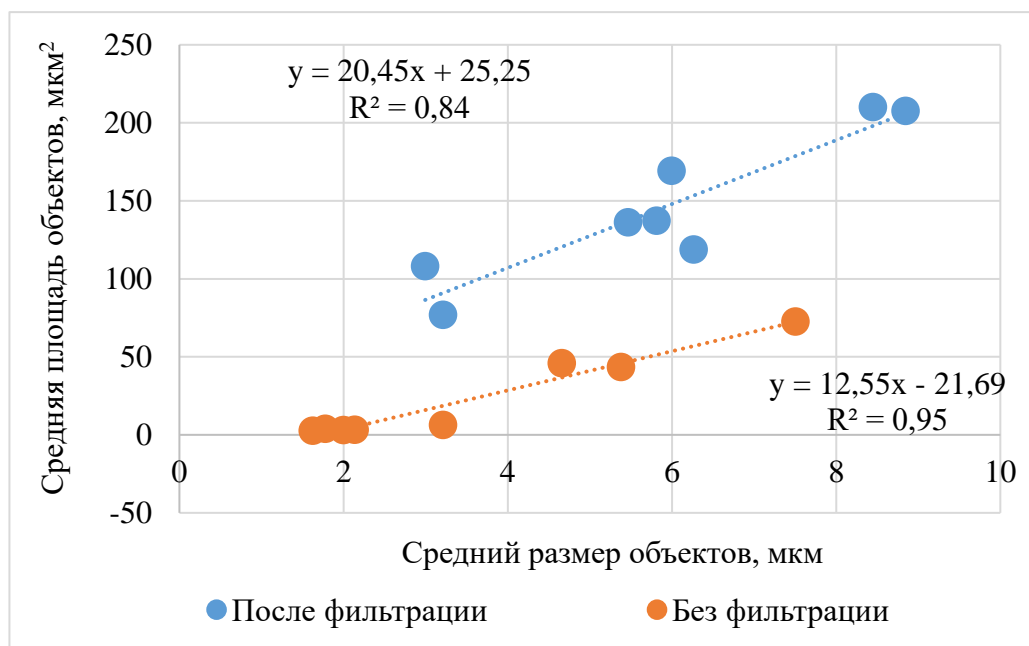


Рисунок 98 – Зависимости средней площади карбидов от их линейного размера

Отдельно следует отметить асимметричный характер распределения значений элементов (см. рисунок 96, г). При таком виде распределения сопоставление выборок результатов измерения изображений структур и изломов по их средним значениям на основе критерия Стьюдента может не выявить различий между ними, например, как это было при сопоставлении результатов измерения размеров структур и изломов на полях зрения малой площади  $\sim 0,3 \text{ мм}^2$  (в масштабах образца). Применение же критериев непараметрической статистики, в частности критерия Колмогорова-Смирнова [70] показало, что это два значительно отличающихся распределения. Отсюда вытекает важный методический вывод о необходимости дополнительного применения критериев непараметрической статистики для повышения объективности оценки однородности строения изображений структур и изломов.

При анализе структур твердых сплавов важно учитывать природу объекта – особенности влияния разнообразной геометрии структур на процессы деформации и разрушения [128, 129]. В этой связи на изображении структур полезно выделять отдельные структурные составляющие для последующего анализа их геометрии и оценки их роли в процессах деформации и разрушения. В частности, в структуре сплавов, легированных вольфрамом (сплав 2), существенную роль играет морфология дендритной составляющей [130]. Однако её выделение на изображении, с учетом визуально наблюдаемого небольшого



различия в уровнях интенсивности яркости дендритной составляющей и матрицы (рисунок 99, а), было затруднено на основе типичных процедур бинаризации. Ранее было показано [114], что даже измерения загрязненности стали неметаллическими включениями (с более высоким градиентом яркости в паре «частица – фон») с использованием автоматического анализатора структуры одного наименования, но разных модификаций на одних и тех же шлифах, дали различие в объемной доле мелких частиц до 2...3-кратной, а вытянутых включений – до 4...5 раз. В связи с этим, была накоплена представительная статистика результатов измерения распределения интенсивности яркости (вдоль секущих) и на её основе было показано, что объективное выделение границы отдельных дендритов возможно – по соответствующему перепаду значений интенсивности яркости (рисунок 99, б).

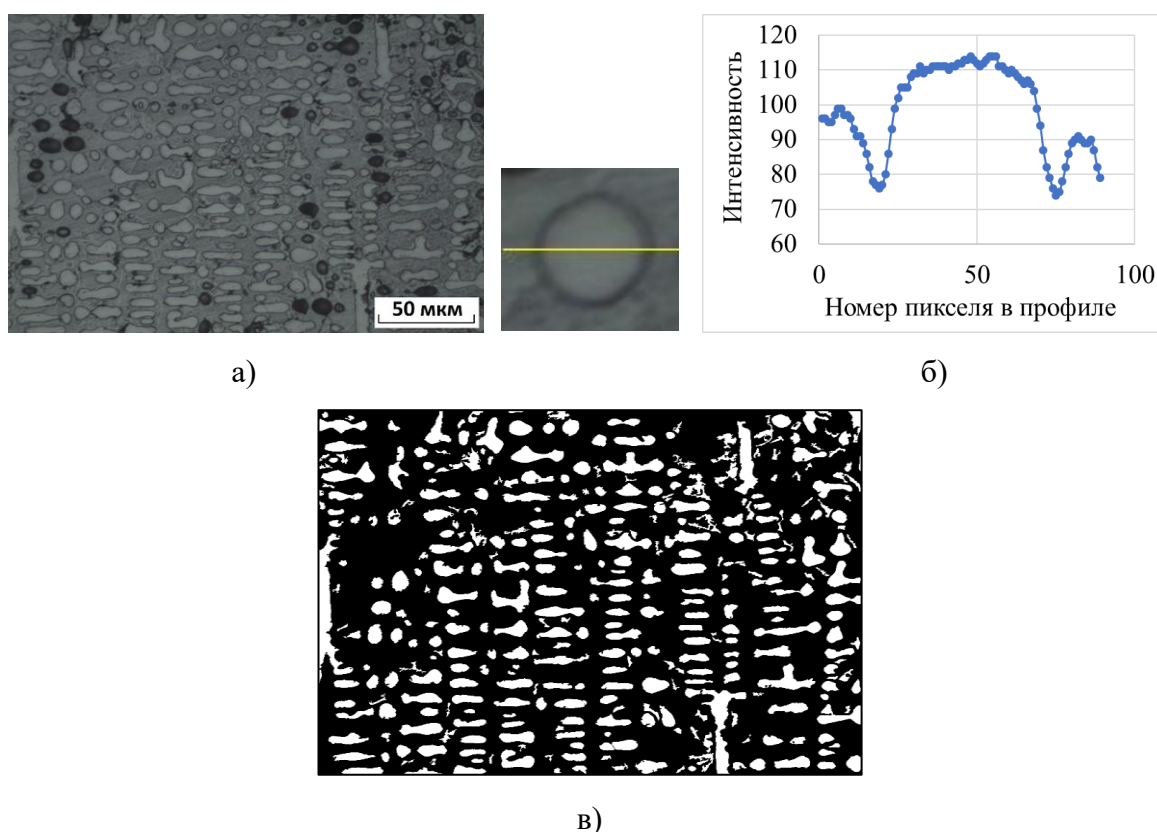
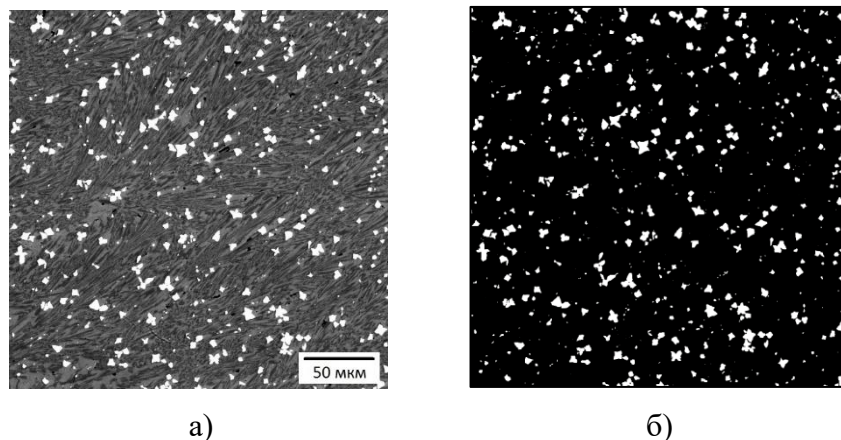


Рисунок 99 – Процедура обработки изображения микроструктуры сплава 2 (а), основанная на измерении интенсивности яркости отдельных дендритов и окружающей их матрицы (б) с целью выделения дендритного рисунка (в)

Это, в частности, позволило объективно оценить объёмную долю дендритов  $V$  на изображении ( $V=0,24$ ), а также подтвердило важность учета природы объекта при измерении морфологии изображений структур в материаловедении.

Для исследуемых твердых сплавов показана также возможность измерения частиц и определения их размещения на изображениях изломов (рисунок 100).



а – исходное изображение; б – бинарное изображение

Рисунок 100 – Алгоритм измерения частиц при  $\times 1000$  образца сплава 3

Для уточнения природы объектов (элементов структуры) использовали возможности сканирующей электронной микроскопии (микронзондовый анализ), результаты анализа морфологии фрагментов поверхности шлифа (в наномасштабах наблюдения) – по измерениям рельефа средствами атомно-силовой микроскопии. Это также позволило выделить их на изображении бинаризацией путём разделения на две группы с минимальной внутриклассовой дисперсией, что соответствует переходу между пиками на гистограмме распределения интенсивности (см. рисунок 101).

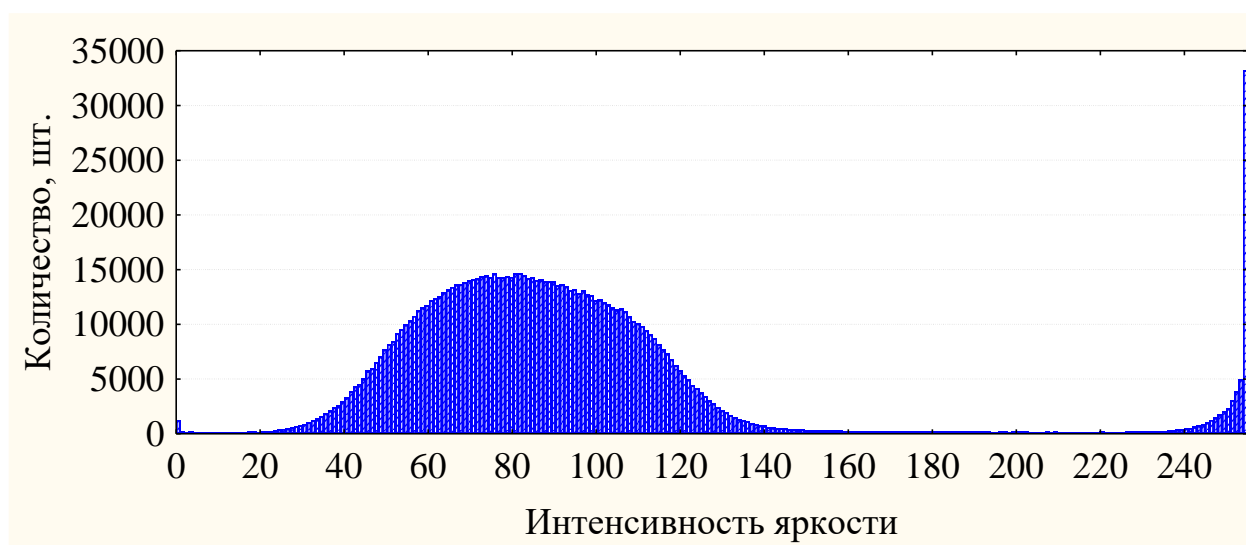


Рисунок 101 – Распределение интенсивностей изображения излома образца сплава 3



Измерение проводилось по методу площадей, так как объекты практически не сливаются, а область фона имеет достаточно большую долю от изображения. При измерении изображений структур и изломов разных образцов показано, что распределение значений параметров объектов имеет асимметричный характер (см. рисунок 96) [70]. Это затрудняет использование средних размеров для сопоставления различных выборок результатов измерения. В этой связи в работе на основе накопленной представительной статистики наблюдений геометрии элементов вязкого излома была проведена систематическая оценка вида их распределения (на основе применения непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова).

Изображения исследуемых изломов в большинстве своём представляют поле матрицы с включениями отдельных карбидов различной морфологии. При их анализе также была замечена схожесть строения матриц изображений различных изломов. Поэтому проводилось попарное сравнение видов распределений значений размеров элементов изломов для определения необходимости их интегральной оценки на основе использования критерия Колмогорова-Смирнова (см. таблицу 31).

Таблица 31 – Значения показателей сопоставления выборок методами секущих и площадей

Изображения	$D\sqrt{n}$ при $\alpha=0,05$	
	Метод секущих	Метод площадей
1-2	0,464	2,14
1-3	1,045	4,505
1-4	1,659	5,398
2-3	2,364	2,505
2-4	4,187	5,641
3-4	6,28	7,294

Так как большинство значений коэффициентов было меньше 1,36 (критическое значение для выборок данного размера и принятого уровня риска гипотезы), то выборки не принадлежат одному виду распределения. Отсюда вытекает необходимость измерения всех объектов изображений изломов.

Для оценки степени "кучности" объектов точечной природы (кластеров частиц) использовали построение ячеек Вороного. С целью обеспечения объективности при сопоставлении результатов измерения изображений структур и изломов была оценена статистика распределения элементов изломов.

На износостойкость твердых сплавов (при прочих равных) должно влиять размещение частиц. Неоднородность в размещении случайных точек на плоскости можно оценить, используя построение ячеек Вороного – метод пересечения серединных перпендикуляров: если центры всех объектов соединить отрезками и через середину каждого провести перпендикуляр, то около каждого объекта будет построен многоугольник, в котором все точки ближе к центру «своего» объекта, чем «чужого» (см. пункт 1.3.4).

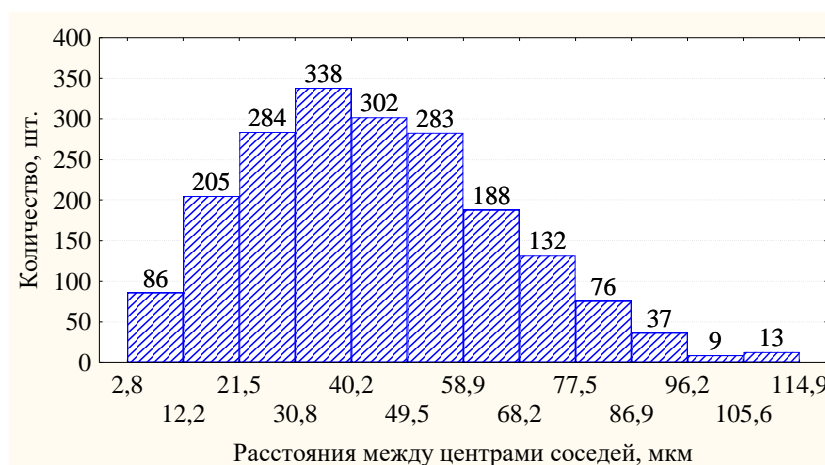
Для оценки неоднородности в данной работе было предложено построение многоугольников (ячеек) Вороного (см. рисунок 102). На основе построения ячеек Вороного предусмотрено последующее построение гистограммы распределения их площадей и расстояний между центрами полиэдров.



а)



б)



в)

а – построение ячеек Вороного; б – гистограмма распределения ячеек по площадям;

в – гистограмма распределения расстояний между центрами соседей

Рисунок 102 – Построение ячеек Вороного и определение их статистики для изображения излома твердого сплава 3

Полученные с использованием ячеек Вороного результаты полезны, в частности, для оценки неоднородности размещения частиц упрочняющей фазы в твердых сплавах, объективного сопоставления различных вариантов изображений структур и изломов.

#### **Выводы по разделу:**

1. Совместное измерение геометрии изображений структур, полученных использованием световой и сканирующей микроскопии, и соответствующих 2D-изображений изломов твердого сплава на железной основе выявило идентичность строения структур, полученных обоими способами, и их отражение в морфологии изломов. Это существенно для выявления критических элементов структур, определяющих неоднородность свойств твердых сплавов в упрочняющих наплавках рабочих органов почвообрабатывающих машин при разработке новых сплавов и совершенствовании существующих технологий наплавки.

2. Применение адаптированных к изображениям данного типа цифровых процедур обработки показало их перспективность для объективного выделения всех информативных элементов структур и изломов твердых сплавов и последующего измерения их геометрии.

### 3.5 Цифровые процедуры измерения полосчатости в микроструктуре листовых сталей и оценки её возможных последствий в изломах

При оценке остаточного ресурса листовых сталей с феррито-перлитной структурой, в частности, представляет интерес определение критических параметров феррито-перлитной полосчатости, лимитирующей неоднородность вязкости металла. Представления о параметрах полосчатых структур и механизмах их вязкого и хрупкого разрушений преимущественно также основываются на визуальном наблюдении соответствующих изображений структур и изломов сталей. Отсутствует алгоритм измерения параметров полосчатых структур, а также единое представление о механизме протекания разрушения, что объясняется недостаточной статистикой экспериментальных данных (при существующем многообразии качественных наблюдений). Для этого необходимо создать цифровые методы преобразования и обработки изображений, благодаря которым можно повысить качество измерений структур и изломов.

Кристаллы растут из расплава в виде дендрита, обычно с ветвями первого, второго порядка, структуру которого характеризуют шаг осей дендритов  $\Lambda_0$  и коэффициент ликвации  $K=c_{\max}/c_{\min}$  – отношение наибольшей и наименьшей концентрации элемента (в осях и в межосьях дендритов). Обычно измеряемый на случайной секущей (без деления на оси первого и второго порядков) средний шаг осей дендритов, в частности, определяет впоследствии структурную полосчатость [114].

Дендритная неоднородность сохраняется и в прокате, например, в листе, который в  $k$  раз тоньше (и в  $k$  раз длиннее) сляба в продольном сечении дендриты наблюдаются в виде лент толщиной  $\Lambda \approx \Lambda_0/k$ , вытянутых вдоль поверхности листа. Переменное содержание легирующих элементов и углерода в полосах дифференцирует критические скорости охлаждения аустенита в осях и в межосьях дендритов, что приводит к появлению различных структур. Так в листе микрополосы ликвации на месте дендритов порождают структурную полосчатость среднеуглеродистой стали: мартенсит-бейнитную, бейнит-перлитную, феррит-перлитную (а в высокоуглеродистой – карбидную строчечность).

Возможна и другая причина феррито-перлитной полосчатости [114]: когда при прокатке, выделившиеся в пределах ячейки дендрита легкоплавкие силикаты и сульфиды, «раскатываются в нитку». Повышенная концентрация кремния в аустените в приграничной с силикатом области повышает термодинамическую активность растворенного углерода, отчего наблюдается его вытеснение и после охлаждения здесь будет феррит.

Вблизи нитей MnS слой аустенита обогащен марганцем, вследствие чего сюда втягивается углерод, что после охлаждения даст полосы перлита. В итоге это приведет к одинаковому результату: чередованию полос феррита и перлита вдоль направления прокатки.

Структурная полосчатость приводит к анизотропии пластичности (иногда и прочности). Ослабленная полоса может спровоцировать как скол фасеток, так и вязкое разрушение. Существенна толщина чередующихся слоев, в частности, чтобы трещина могла остановиться в вязком слое радиус пластической деформации в её вершине должен быть меньше его толщины. При этом толщина составляющих более прочного каркаса должна обеспечить несущую способность композиции в целом [26, 113, 114, 131, 132].

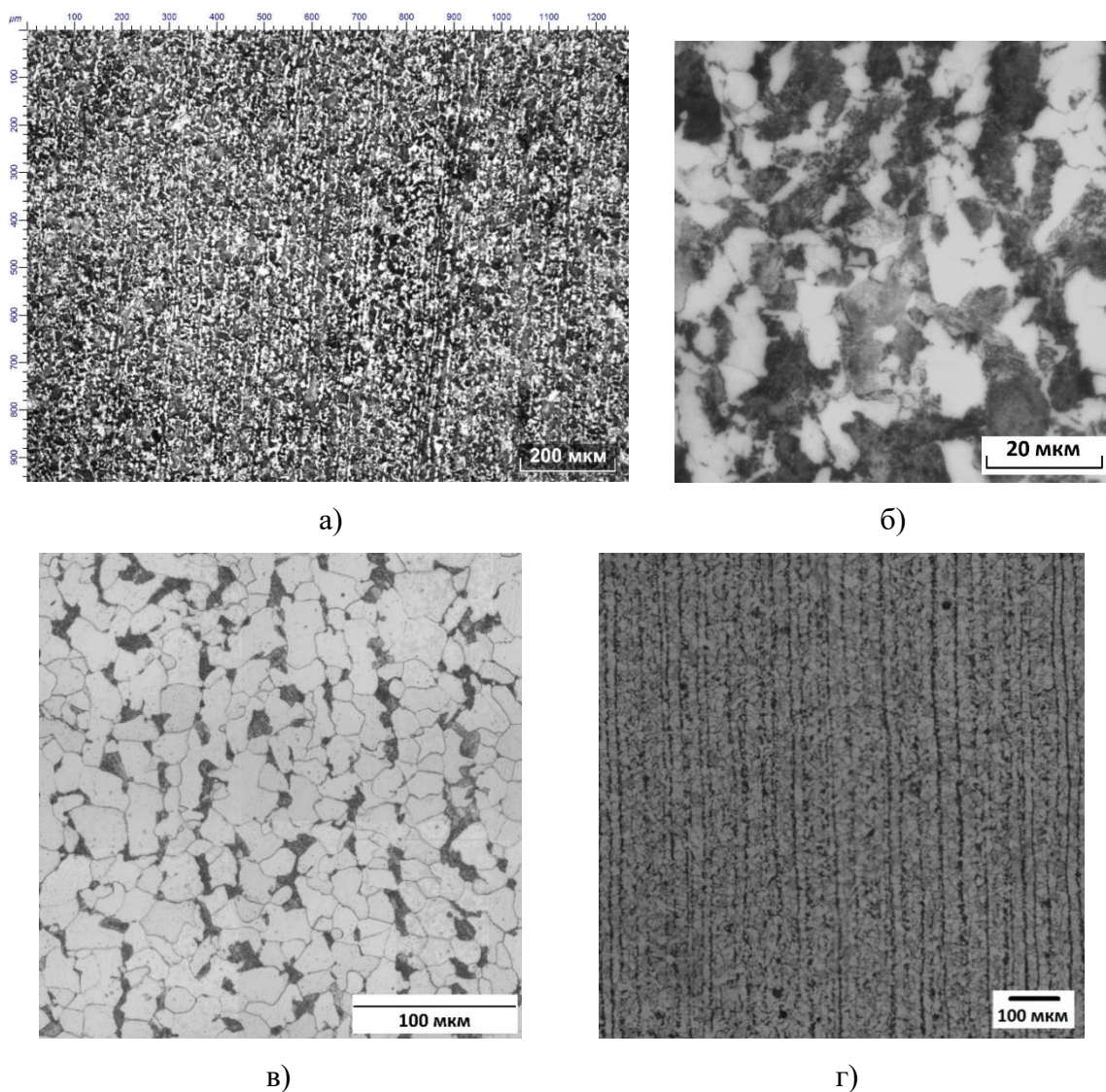
В этой связи объективное определение масштабов полосчатости в микроструктуре приобретает существенное значение при сопоставлении качества листовых сталей, прогноза их остаточного ресурса [133, 134]. Обеспечение единообразного подхода к этой проблеме долгое время регламентировалось ГОСТ 5640. В последние годы – в соответствии с ГОСТ Р 54570, где балл определяется на основе стереологических коэффициентов, найденных методом направленных секущих при панорамных исследованиях с помощью автоматического анализатора изображений [122]. Однако при этом не совсем понятно каков должен быть приемлемый масштаб измерений, обеспечивающий воспроизводимость результатов измерений. Балльная оценка позволяет различить структуры с различным масштабом полосчатости в микроструктуре, но при этом также важна статистика измерений неоднородности геометрии размеров её элементов. Например, в листе из стали 09Г2С [117] изменение ширины мягких ферритных прослоек (с 30...40 мкм до 100...170 мкм) при локализации пластического течения в шейке способствовало вытягиванию пор в направлении действия нормальных напряжений и увеличению глубины ямок. В долевых же образцах вследствие дробления хрупких полос перлита при деформации, смежные прослойки феррита объединяются, что делает предпочтительным вытягивание пор по толщине листа с образованием крупных неглубоких ямок поперечником от 8 – 10 мкм и более. В целом, это приводит к анизотропии пластичности в листе. Влияние полосчатости на разрушение, не всегда очевидно, например, в стали СтЗсп связь между размерами зерна феррита и шагом полос перлита с одной стороны и морфологией вязкого излома (поперечник ямок и периодичность строения его мезорельефа) с другой стороны, была выявлена только на основе Фурье-преобразования их 2D-изображений (в 256 оттенках серого) [135]. Однако существенное значение результатов измерения геометрии полосчатости в микроструктуре для прогноза деформации и разрушения листовых сталей не вызывает сомнений [131, 133].

Важной частью работы стала разработка оптимальной схемы программной обработки изображений для измерения параметров неоднородной полосчатой структуры (размера зерна феррита и/или перлита, толщины полос перлита и их периодичность) и геометрии сопутствующих вязких и хрупких изломов (размеры ямок и фасеток) и их сравнения, а также

для оценки возможностей использования Фурье анализа для обработки данных изображений. Необходимо также провести отработку методов измерения и их описание.

Большинство коэффициентов не могут точно описать параметры полосчатости, а также размер (балл) зерна, особенно если работа связана с мелкозернистой структурой. Размер элементов излома вообще не измеряется: имеются только приблизительные оценки. При этом эти параметры должны быть сопоставимы.

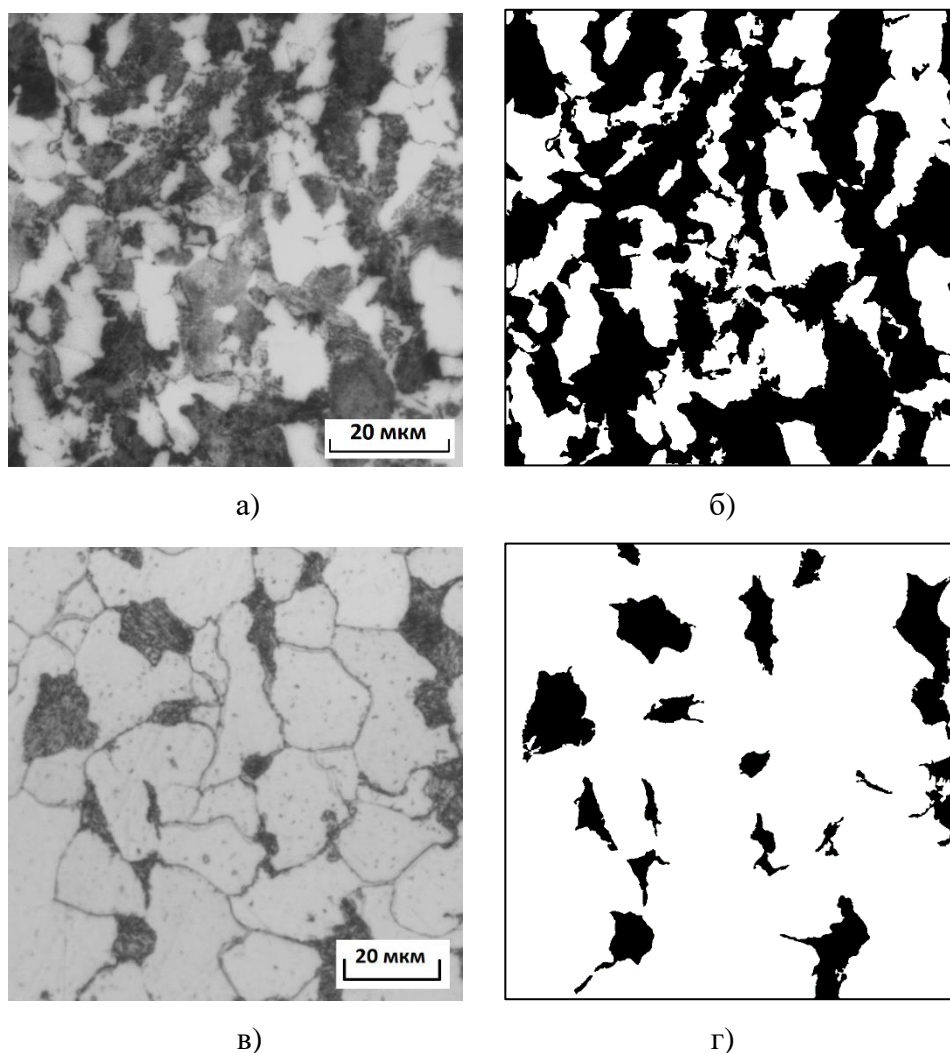
Уровень прочности листовых сталей зависит от объемной доли, дисперсности и строения основных структурных составляющих в нормализованном состоянии и после закалки с высоким отпуском. Для обеспечения необходимого уровня свойств, очень важным является создание заданного структурного состояния. Был проведён анализ изображений (рисунок 103) феррито-перлитных структур различных марок сталей (35Г2, 45Г, Ст3сп, 09Г2С и других более старых аналогов для оценки ресурса действующих сталей).



а – сталь 35Г2,  $\times 100$ ; б – сталь 35Г2,  $\times 1000$ ; в – сталь Ст3сп,  $\times 500$ ; г – сталь 09Г2С,  $\times 50$

Рисунок 103 – Изображение структуры образцов после прокатки

Вводимые данные – бинаризованные фото микроструктур, где объектами задаются интересующие нас структуры феррита, перлита, сорбита или бейнита. Феррито-перлитные структуры могут иметь разную конфигурацию в зависимости от содержания углерода, предварительной обработки и наличия включений. Методы обработки изображений подбираются в зависимости от типа структуры. Также в зависимости от конфигурации структур используются разные методы измерения объектов (методы секущих или площадей).



а, б – сталь 35Г2 после прокатки,  $\times 1000$ ;  
в, г – сталь СтЗсп после прокатки,  $\times 500$

Рисунок 104 – Исходные и бинарные изображения феррито-перлитных структур

При возможности измерения параметров объектов с помощью метода площадей определяется не только средний размер объектов, но и многие другие параметры. С помощью компьютеризированных процедур обработки изображений структур были определены такие параметры структуры как средняя площадь и периметр зерен феррита и перлита, их объемная



доля, степень вытянутости ферритных и перлитных зерен, плотность распределения и направление их ориентировки (таблица 32).

Таблица 32 – Геометрические параметры структурных составляющих для Ст3сп, ×500

№	Геометрические параметры перлита	Ст3сп
1	Объемная доля, %	13,2
2	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	69,8 ± 16,0
3	Степень вытянутости (a/b)	2,6 ± 0,3
4	Средний периметр, мкм	50,5
5	Плотность, шт/мм <sup>2</sup>	1893,5
6	Преимущественная ориентировка, град	3 (0 – 45)

Более подробное описание объектов с помощью метода площадей позволяет внести ясность в понимание причин неоднородности строения структур и механизмов разрушения. Средний размер объектов по методу секущих несёт очень мало информации, особенно для ненормальных распределений, но в ряде случаев метод площадей нельзя использовать в силу слипания большого числа объектов (рисунок 104, б, г). На рисунке 105 приведены гистограммы распределений значений площадей и степени вытянутости зерен перлита для стали Ст3сп после прокатки.

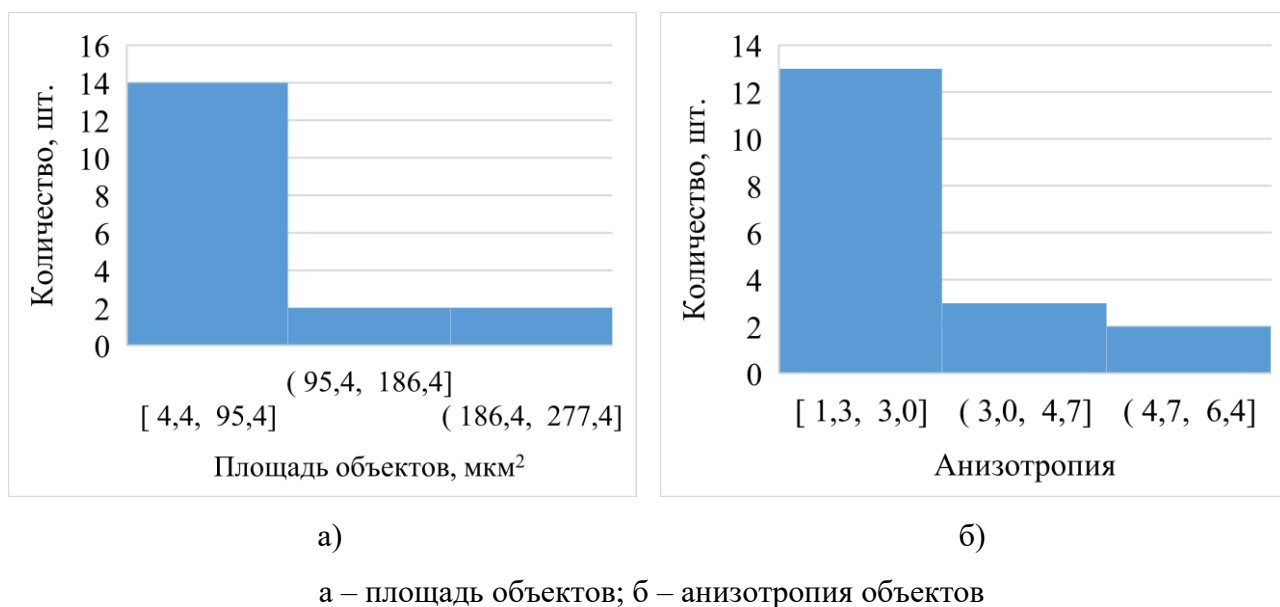


Рисунок 105 – Гистограммы распределения значений площади и степени вытянутости перлитных зерен

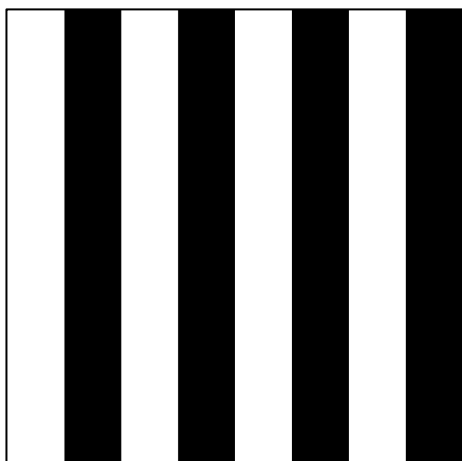


При определении полосчатости одной из существенных характеристик является периодичность полос перлита. Помимо метода секущих для этого возможно применение Фурье анализа. Для понимания механизма работы данного метода были созданы экспериментальные изображения полос с разным периодом и построены графики спектральной плотности для каждого из них: с одинаковой толщиной белых и черных полос (рисунок 106, а, в) и с разной толщиной полос (рисунок 106, д). Показано корректное определение периода полос для эталонных изображений. Для варианта с разной толщиной полос показана чувствительность метода к изменению толщины полос.

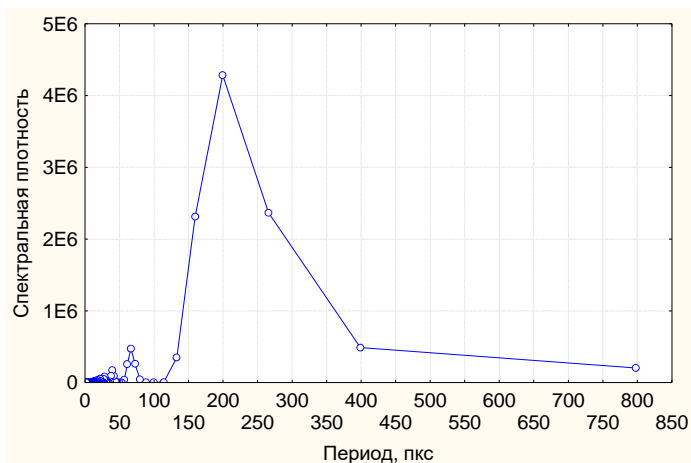
Альтернативный способ, позволяющий выявить наличие периодичности в микроструктуре с полосчатостью и определить её характеристики – Фурье-анализ распределения интенсивности яркости на её цифровом изображении [55, 65].

Реальные полосчатые структуры достаточно неоднородны: толщина полосы может меняться, полосы могут прерываться внутри одного изображения, имеются поры, ответвления и шумы. Была оценена возможность применения Фурье-преобразования в более сложных случаях, в частности, при наличии «размытых» полос перлита и неоднородности в их расположении. Для этого были смоделированы изображения бинарной полосчатой микроструктуры с различным шагом темных полос (сопоставимые по своим размерам с эталонными шкалами полосчатости ГОСТ 5640). Эти полосы поэтапно «размывали» и определяли значения спектральной плотности кривых распределения интенсивности яркости вдоль секущих (10 на каждое изображение), расположенных перпендикулярно направлению «прокатки» (рисунки 106 и 107). Для самого «дефектного» изображения (шестая итерация «размытия») степень совпадения с первичным изображением (по абсолютному значению периодичности) была не менее 60%. Такие результаты указывают на перспективность развития данного подхода к описанию полосчатости в микроструктуре. Однако очевидно, что при дальнейшем разработке методики необходимо принять во внимание масштабный фактор, играющий существенную роль при обеспечении необходимой воспроизводимости результатов измерений.

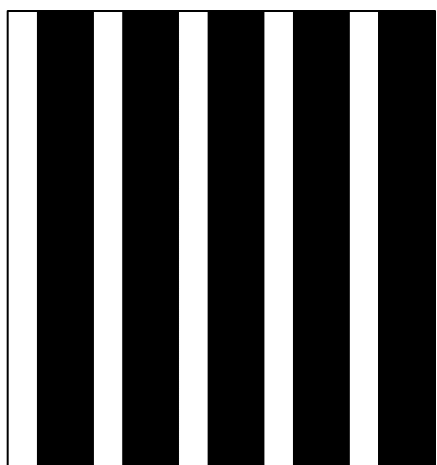
Для неоднородных структур обычный Фурье анализ, проводимый для профиля изображения, не дает объективной оценки всего изображения. Здесь появляется необходимость создания методики Фурье анализа всего изображения: построение карты периодов Фурье анализа по всем профилям или двумерный Фурье анализ.



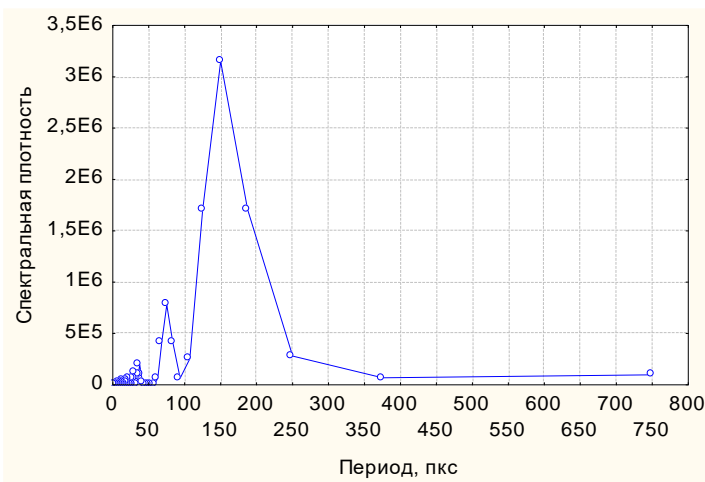
а)



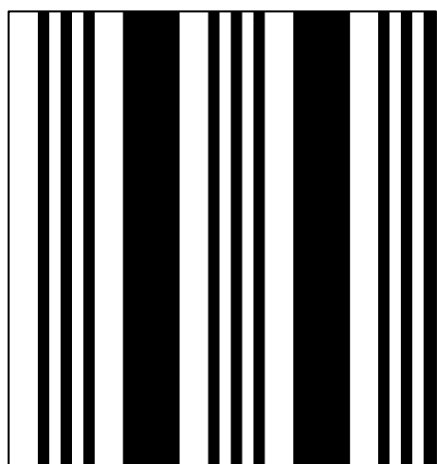
б)



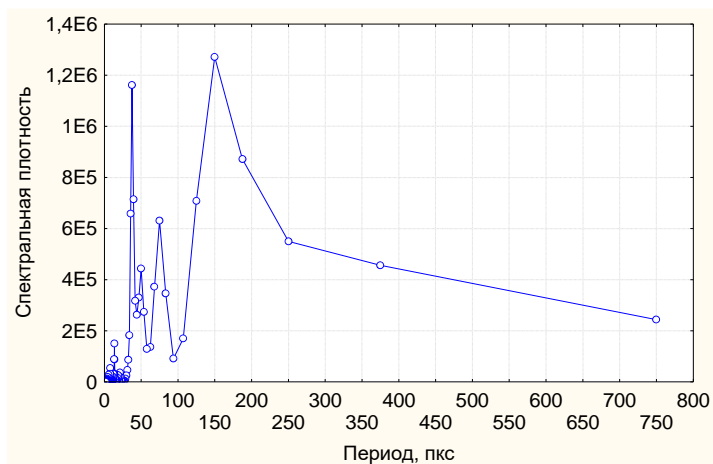
в)



г)



д)



е)

а, б – период 200 пкс; в, г – период 100 пкс;

д, е – разная толщина полос (20, 50 и 100 пкс)

Рисунок 106 – Фурье анализ модельных структур

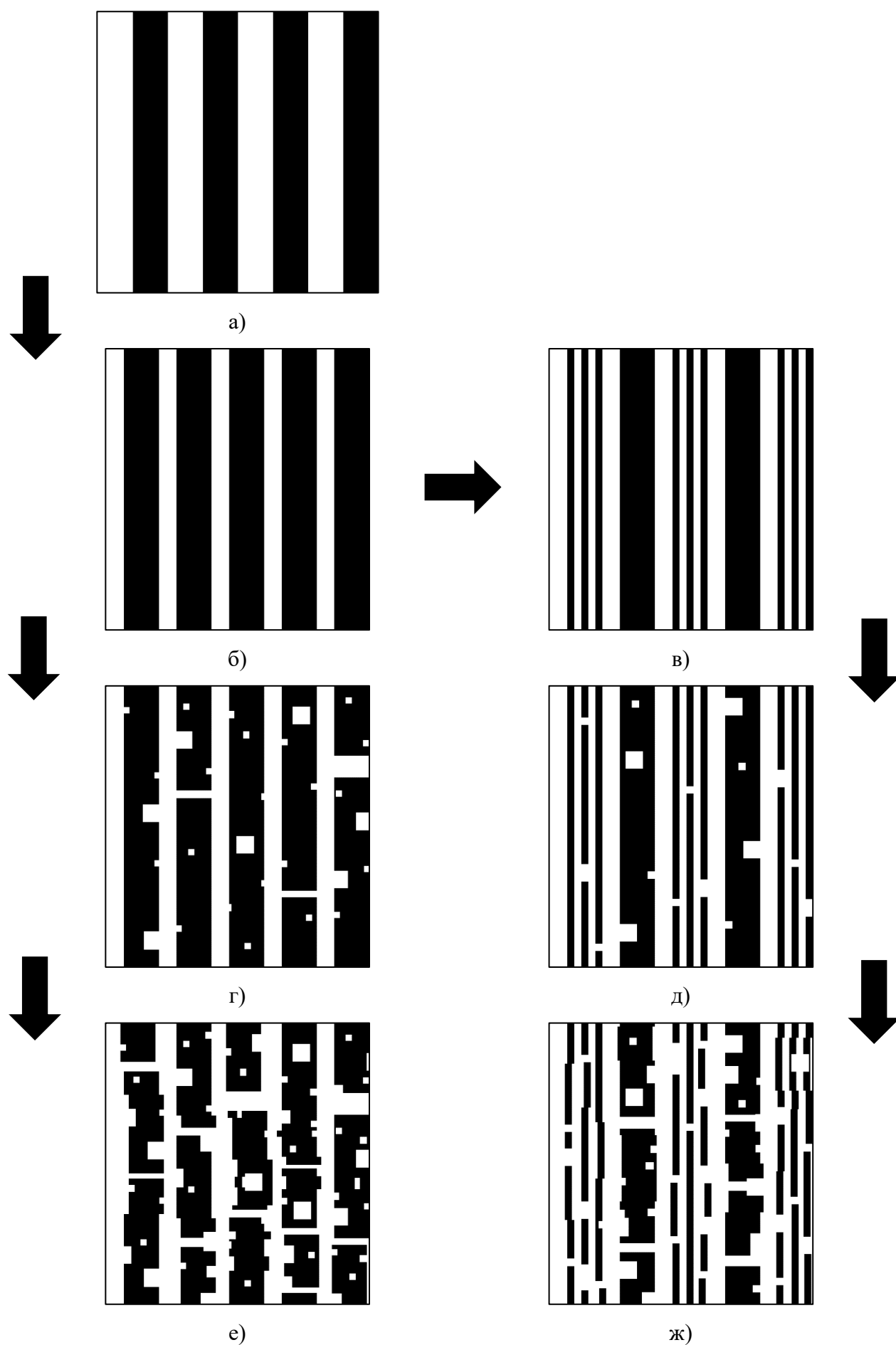
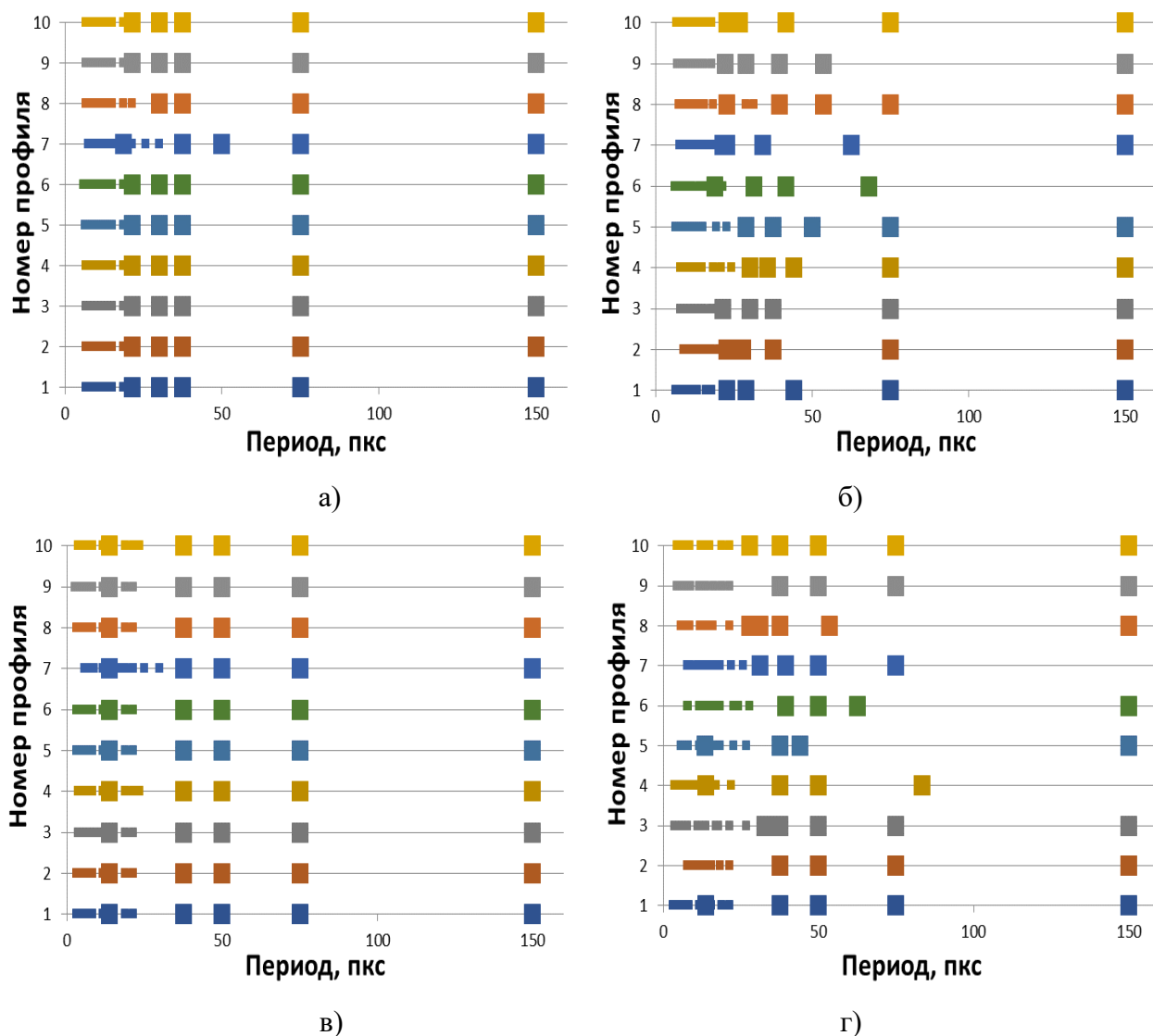


Рисунок 107 – Генезис полосчатых структур – от идеального к реальному

Первый вариант реализуется достаточно легко путем построения графика спектральной плотности для каждого профиля и создания удобной карты периодов Фурье анализа по профилям (рисунок 108).

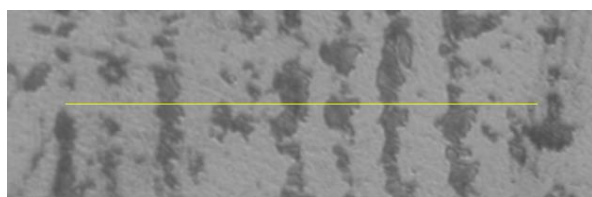


а, б – от изображений г, е соответственно; в, г – от изображений д, ж соответственно

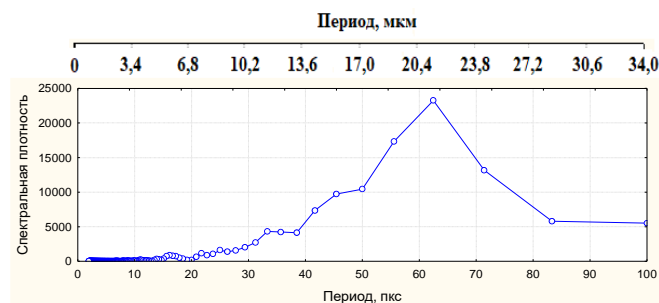
Рисунок 108 – Карты периодов Фурье анализа изображений рисунка 76

По данным картам видно изменение неоднородности структуры, однако основные периоды при данной степени неоднородности сохранились. Не исключено, что на реальных структурах конечный результат Фурье-преобразования может зависеть от особенностей распределения поля яркости.

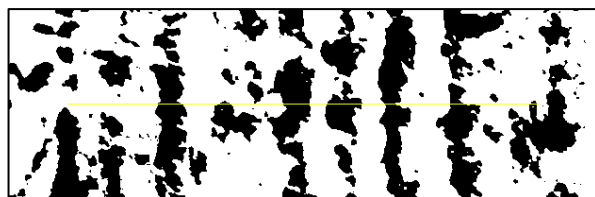
Было необходимо проверить влияние бинаризации на результат Фурье анализа. Для этого построены графики спектральной плотности изображений до и после бинаризации (рисунок 109), для которых показано отсутствие явных различий.



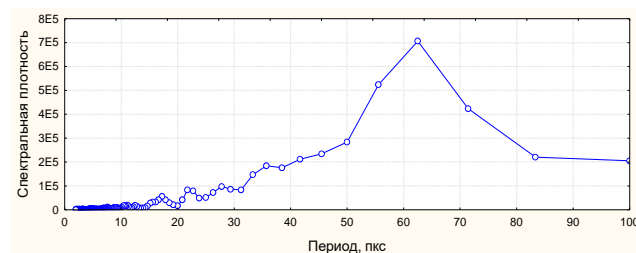
а)



б)



в)



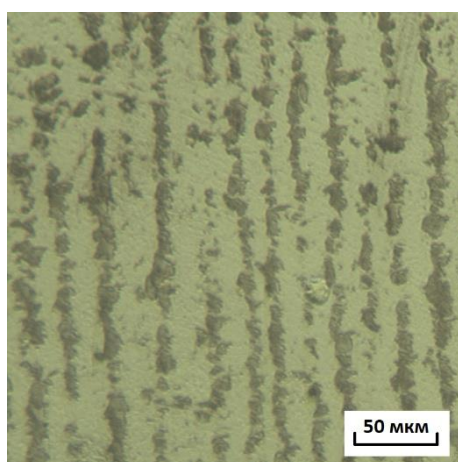
г)

а, б – исходная структура; в, г – бинарная структура

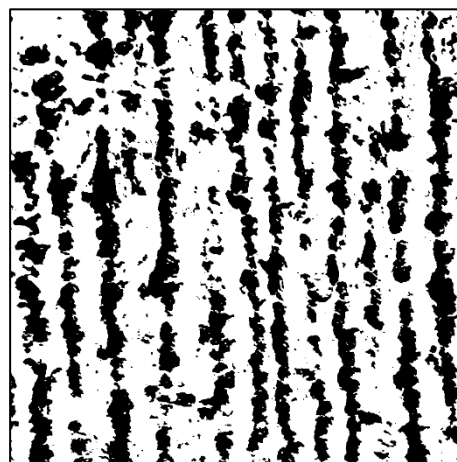
Рисунок 109 – Изображения полосчатой структуры стали 09Г2С до и после бинаризации и графики спектральной плотности

Данный результат показывает, что определение периодичности полос перлита может быть существенно ускорено методом Фурье анализа за счёт возможности его применения к исходным изображениям и построения карты периодов Фурье анализа.

Ясно, что, чем ниже уровень бинаризации, тем меньше толщина полос перлита, и тем больше расстояние между этими полосами (рисунок 110). Здесь появляется две задачи: доказать значимость этой периодичности (не всегда она явная) и определить её параметры.



а)



б)

а – исходное изображение; б – бинарное изображение

Рисунок 110 – Бинаризация изображений полосчатой структуры стали 09Г2С,  $\times 50$

Для доказательства наличия периодичности и её определения использовался Фурье-анализ профилей вдоль (по полосе и вне её) и поперёк полос (рисунок 111).

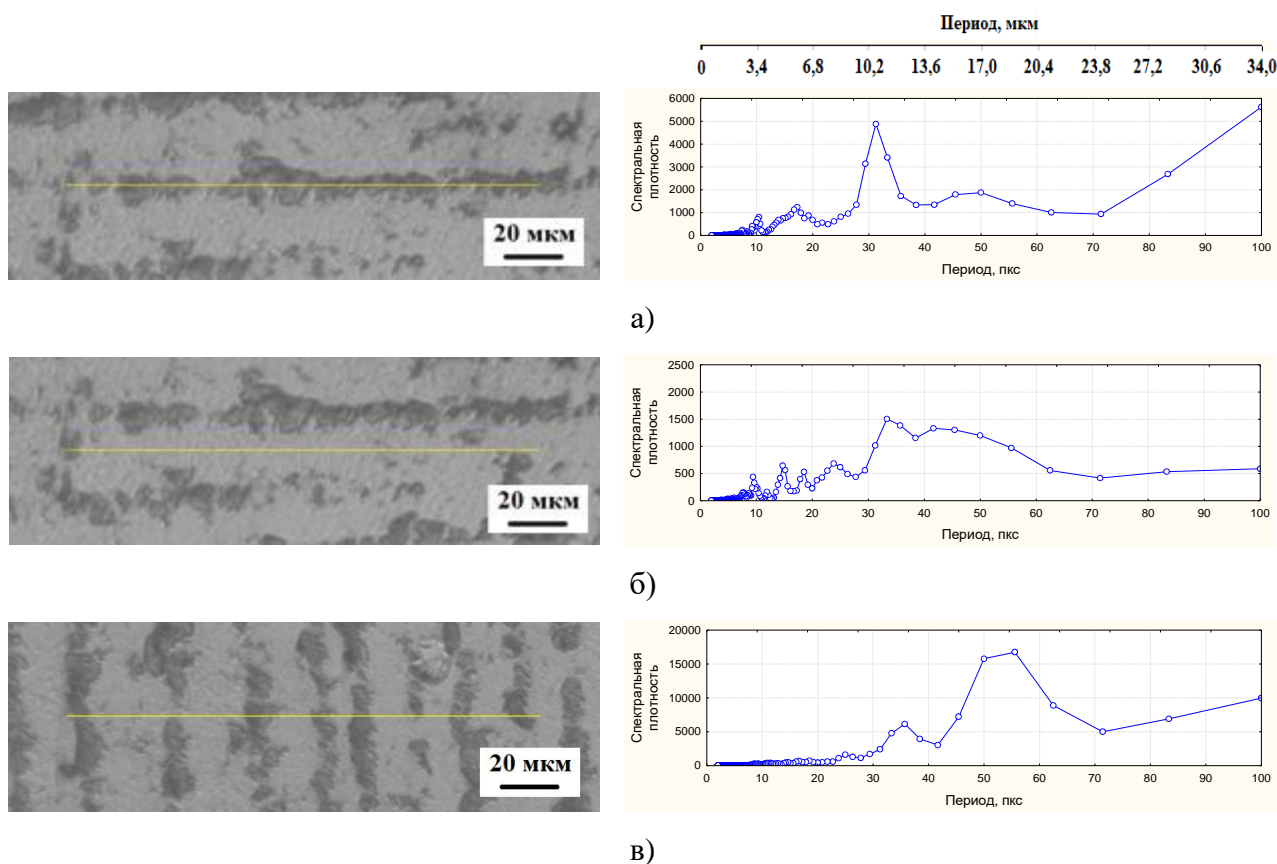


Рисунок 111 – Кривые спектральной плотности, полученные для профилей интенсивности яркости в 256 оттенках серого, проведенных вдоль (а), между (б) и поперек (в) полос перлита в микроструктуре с полосчатостью (балл 3) листовой стали 09Г2С

При проведении профиля вне полосы имеется небольшой пик на графике спектральной плотности от периода в районе 33 пкс (или 11,3 мкм). При попадании профиля на перлитную полосу этот пик вырастает более, чем в 3 раза. При проведении профиля поперёк полосы данный пик остаётся, но при этом появляется очень большой пик в области 56 пкс (19,2 мкм), который как раз отвечает за периодичность перлитных полос. Таким образом Фурье анализ показывает наличие явной периодичности полос перлита.

После проведённого анализа становится необходимым сравнение результата Фурье анализа с результатом анализа изображения после бинаризации. В таком случае для объективности результата Фурье анализа необходимо построение карты периодограмм Фурье анализа (рисунок 112).

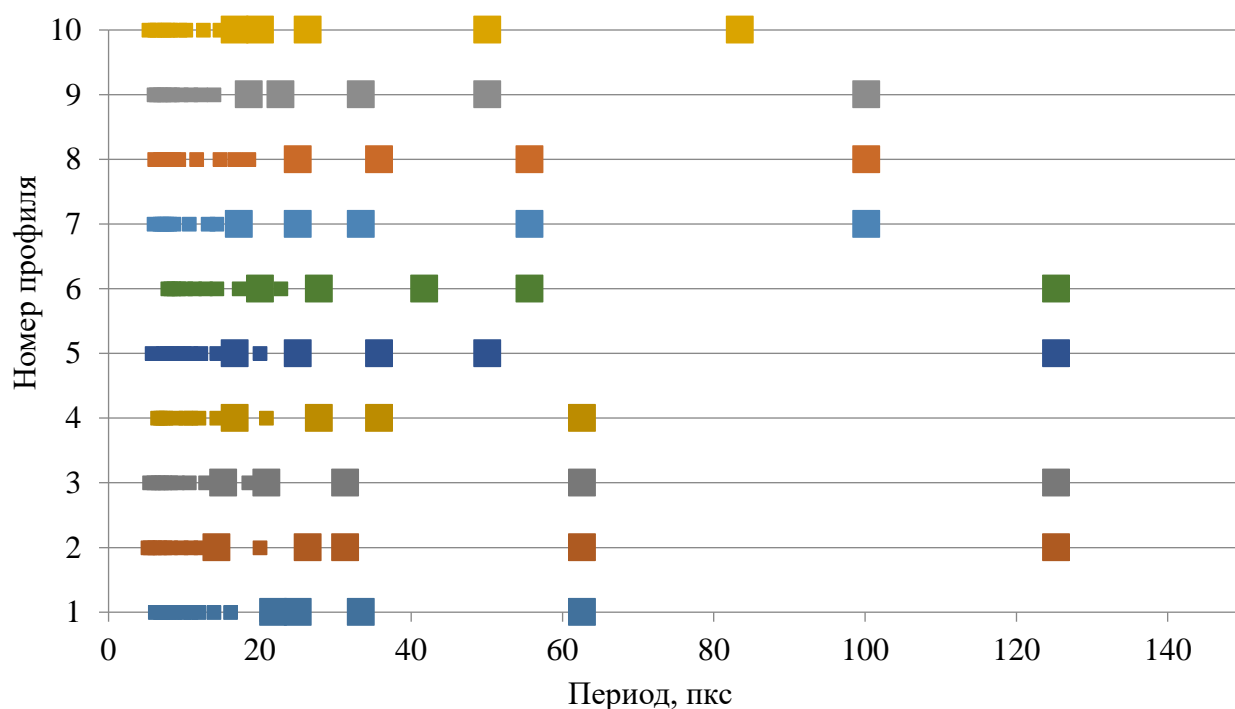
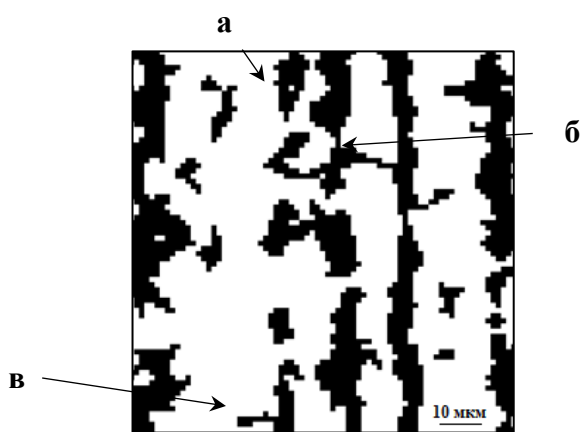


Рисунок 112 – Карта периодограмм Фурье спектра полосчатой структуры стали 09Г2С

После бинаризации на изображении могут оставаться тонкие «мосты», ответвления в  $1 - 2 \text{ пкс}^2$ , которые не являются полосой перлита, а также поры (рисунок 113). Эти объекты заметно изменяют измеряемые параметры.



а – поры; б – «мосты»; в – ответвления

Рисунок 113 – Типичные «артефакты» изображения

Поэтому в некоторых случаях для выявления чистой полосчатости возможно последовательное применение эрозии и дилатации. После эрозии все объекты, которые имеют размеры по двум направлениям меньше или равные уровню эрозии, удаляются и не восстанавливаются при дилатации с тем же уровнем (рисунок 25).

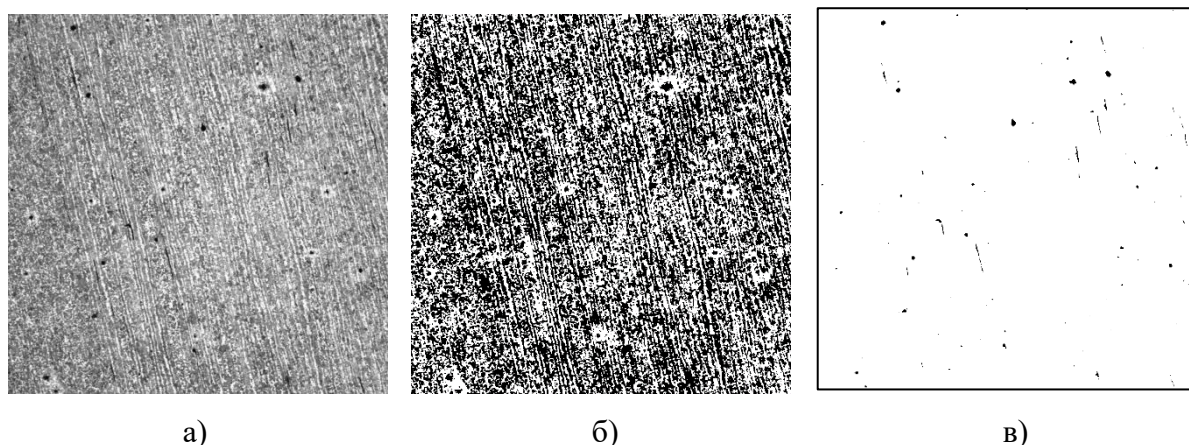
После проделанных процедур на изображении присутствует много мелких объектов обоих цветов, заметно уменьшающих среднее расстояние между полосами. Поэтому данные объекты удалялись. После всех этапов проводится автоматическое измерение параметров методом секущих (таблица 33).

Таблица 33 – Параметры полосчатости структуры стали 09Г2С,  $\times 50$

Среднее расстояние между полосами, мкм	Толщина полос, мкм	Период полос, мкм
$11,6 \pm 1,5$	$5,8 \pm 0,6$	$17,4 \pm 2,1$

Таким образом замечено сходство результатов двух методов определения периодичности полосчатых структур (это подтверждается и построенной картой периодограмм Фурье анализа), что говорит о достоверности данных результатов.

Аналогичные результаты были получены при выявлении периодичности на изображениях феррито-перлитной полосчатости в микроструктуре и сопутствующих им изображениях изломов ударных образцов из стали Ст3сп. Это позволило установить наличие взаимосвязи между параметрами феррито-перлитной структурной полосчатости (размер зерна феррита и шаг полос перлита) и морфологии вязкого излома (размер ямок в изломе и периодичность его мезорельефа), что обычно затруднено при использовании балльных оценок при оценке полосчатости в микроструктуре.



а – исходное изображение; б – бинарное изображение; в – выделение включений

Рисунок 114 – Выделение включений в феррито-перлитной структуре стали 35Г2,  $\times 50$

Также весьма важным фактором, определяющим механизм разрушения сталей, является наличие и размер включений (рисунок 114). В большинстве случаев возможно



определить параметры этих включений из оптических изображений (таблица 34). Подобный анализ включений является весьма полезным для получения качественной стали на этапе металлургического производства.

Таблица 34 – Геометрические параметры включений для стали 35Г2, ×50

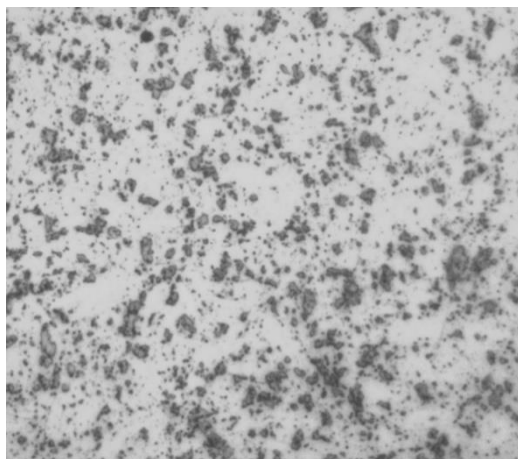
№	Геометрические параметры перлита	35Г2
1	Объемная доля, %	0,3
2	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	42,9 ± 6,1
3	Степень вытянутости (a/b)	2,4 ± 0,2
4	Средний периметр, мкм	19,5
5	Плотность, шт/мм <sup>2</sup>	62,9
6	Преимущественная ориентировка, град	-26 (-45 – 0)

У бейнитных сталей при обычном травлении нет зёрненной структуры как таковой, поэтому здесь речь будет идти об определении параметров бейнита (сорбита или троостита). При необходимости с помощью специального травителя можно выявить исходное зерно аустенита, параметры которого будут измеряться по вышеуказанным методам.

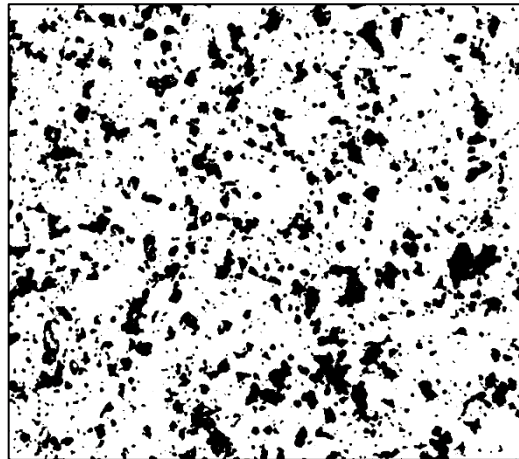
Высокие требования к трубным сталям по прочности, вязкости, трещиностойкости, хладостойкости, а тем более по коррозионной стойкости, определили происходящий в настоящее время переход от феррито-перлитных структур к более дисперсным бейнитным и сорбитным структурам, обеспечивающим сочетание высокой прочности и сопротивления хрупкому разрушению. Для марганцовистых сталей это условие обеспечивается применением улучшения. Соответственно, при необходимости повышенного комплекса механических свойств труб, производителями регламентируется производство улучшенных труб.

Микроструктура стали 35Г2 после операции улучшения (после закалки с 870 °С и отпуска при 620 °С) представляет собой структуру сорбита отпуска (рисунок 115, а).

Как видно из фото микроструктуры, сорбит отпуска под микроскопом не всегда имеет светлую игольчатую структуру, частички цементита в сорбите значительно укрупнены и сфероидизированы. Соответственно, особый интерес в структуре стали вызывали составляющие цементита сорбита отпуска как упрочняющей составляющей структуры стали (рисунок 115, б). Данные о параметрах объектов микроструктуры представлены в таблице 35.



а)

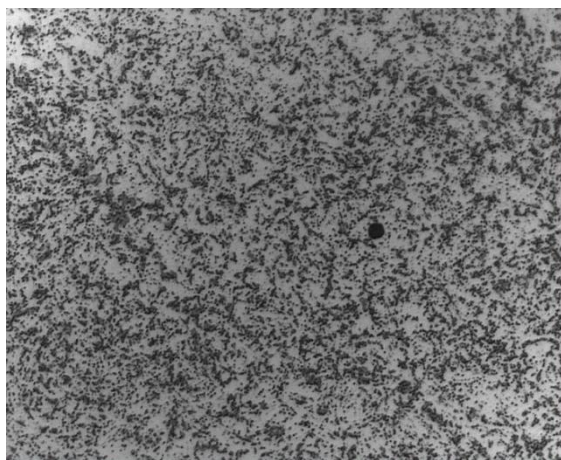


б)

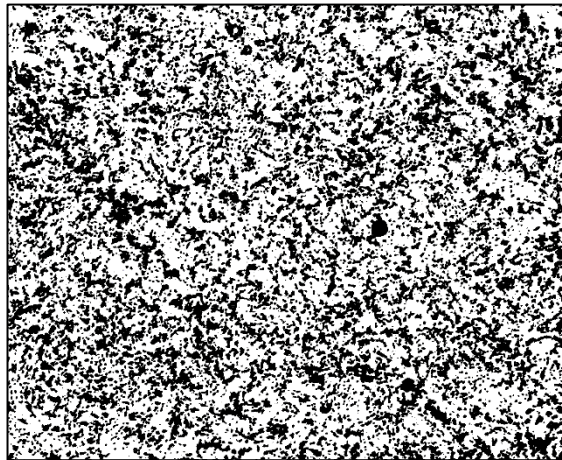
а – исходное изображение; б – бинарное изображение

Рисунок 115 – Микроструктура образца стали 35Г2 после закалки и отпуски,  $\times 1000$

После закалки с отпуском образцы из стали 45Г имеют феррито-бейнитную структуру (рисунок 116). Категория выявленного бейнита – высоко дисперсионный нижний бейнит.



а)



б)

а – исходное изображение; б – бинарное изображение

Рисунок 116 – Микроструктура образца стали 45Г (первоуральская труба) после закалки и отпуски,  $\times 1000$

Средняя площадь цементитной составляющей бейнита стали 45Г в три раза меньше цементита сорбита отпуски стали 35Г2, объемная доля цементита в феррито-бейнитной структуре стали 45Г выше и плотность распределения цементита в стали 45Г в три раза выше, чем в стали 35Г2 (таблицы 35).

Таблица 35 – Геометрические параметры цементита сталей 35Г2 и 45Г

№	Геометрические характеристики изображений	Бинарное изображение	
		Труба А	Труба Б
1	Объемная доля, %	22,3	37,8
2	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	1,15 ± 0,09	0,65 ± 0,04
3	Степень вытянутости (a/b)	1,58 ± 0,02	1,54 ± 0,01
4	Средний периметр, мкм	3,3	3,0
5	Плотность, 10 <sup>6</sup> шт/мм <sup>2</sup>	0,19	0,58
6	Преимущественная ориентировка, град	-8 (-45 – 0)	-27 (-45 – 0)

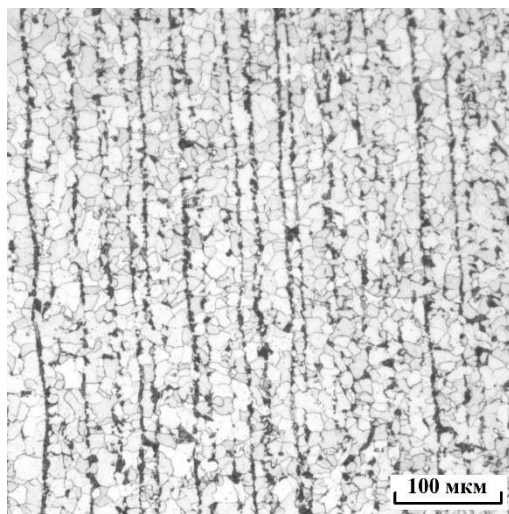
В стали 35Г2 марганца в два раза больше, чем в стали 45Г. Известно, что марганец усиливает склонность зерна к росту, поэтому логично, что сталь 35Г2 более чувствительна к перегреву и, соответственно, имеет пониженную ударную вязкость, особенно при отрицательных температурах. Сталь 45Г малосклонна к отпускной хрупкости, нежели сталь 35Г2, отличающаяся склонностью к отпускной хрупкости. Сталь 45Г сохраняет значительную ударную вязкость и при очень низких температурах (при температуре жидкого азота). Это связано с тем, что после отпуска в структуре стали 35Г2 карбидные включения (цементит) достаточно грубые и неоднородно распределенные, в результате чего скол может непрерывно распространяться на значительные расстояния, составляющие несколько зерен, тогда как в стали 45Г карбиды мелкие и однородно распределенные [20]. Порог хладноломкости существенно повышается (на 120 – 140 °С), резко падает работа распространения трещины. Эти стали рекомендуется применять обработке ТВЧ. Кроме того, известно, что получение однородной по толщине ферритно-бейнитной структуры в стали обеспечивает высокую сопротивляемость водородному растрескиванию трубы [136].

Таким образом и в сталях данного класса количественный автоматизированный анализ структур может помочь сформулировать объективные принципы выбора оптимального режима термической обработки, что наряду с усилиями по улучшению металлургического качества улучшит комплекс эксплуатационных характеристик металла в изделии.

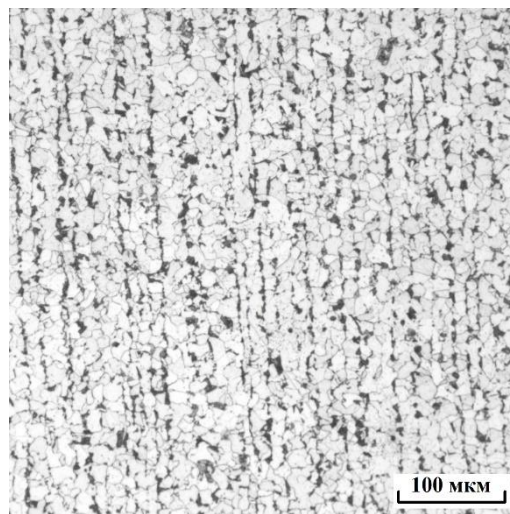
В целом, объективный мониторинг качества стали предполагает учет многих факторов, способствующих формированию структурного состояния объекта исследований. В основе любого подхода к управлению качеством готовой продукции должен лежать анализ неоднородности структуры и свойств исходного металла. В целях минимизации расходов предприятий можно рекомендовать добиться улучшения эксплуатационных свойств труб обеспечением получения оптимальной геометрии структур и их взаимного соотношения

путем использования компьютеризированных процедур для статистики, количественного и качественного анализа структур.

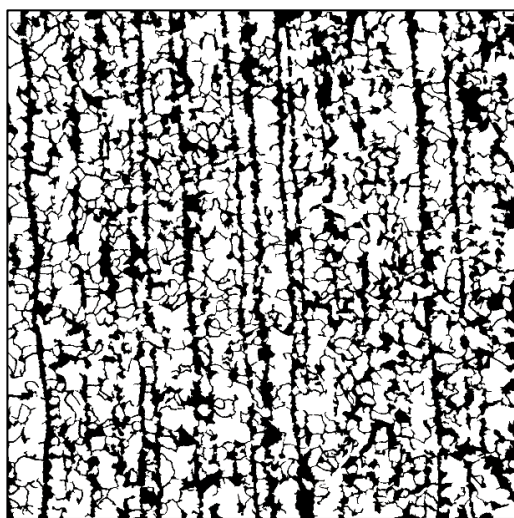
После подготовки изображения измеряли параметры геометрии характерных элементов микроструктуры (размеры зерна феррита, шаг полос перлита), определяющих различие в масштабах полосчатости. Так, например, для типичных изображений структур образцов, отобранных от двух партий стали 09Г2С, отличающихся масштабом полосчатости (рисунки 117), были проведены её количественные оценки в зависимости от размера исследуемого поля зрения. С этой целью последовательно увеличивали (с шагом 30 мкм по каждой координате) размеры поля зрения первичного 2D-кадра.



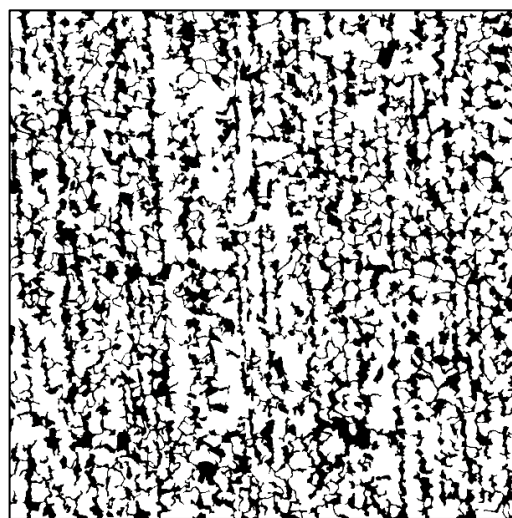
а)



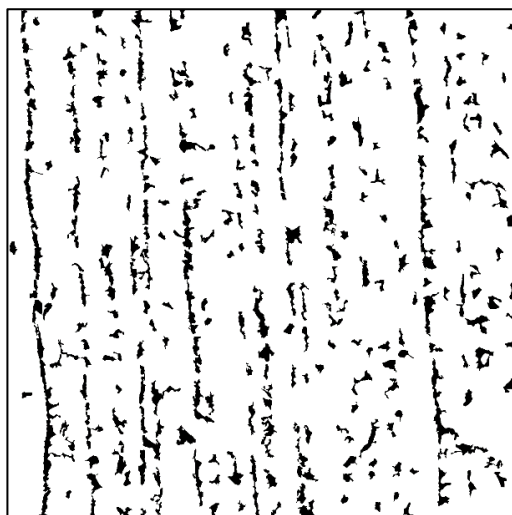
б)



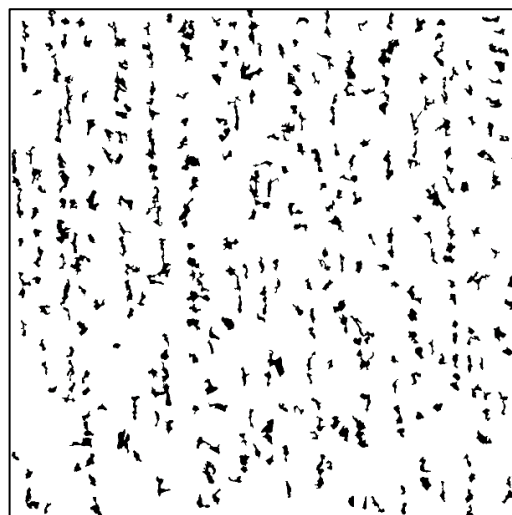
в)



г)



д)

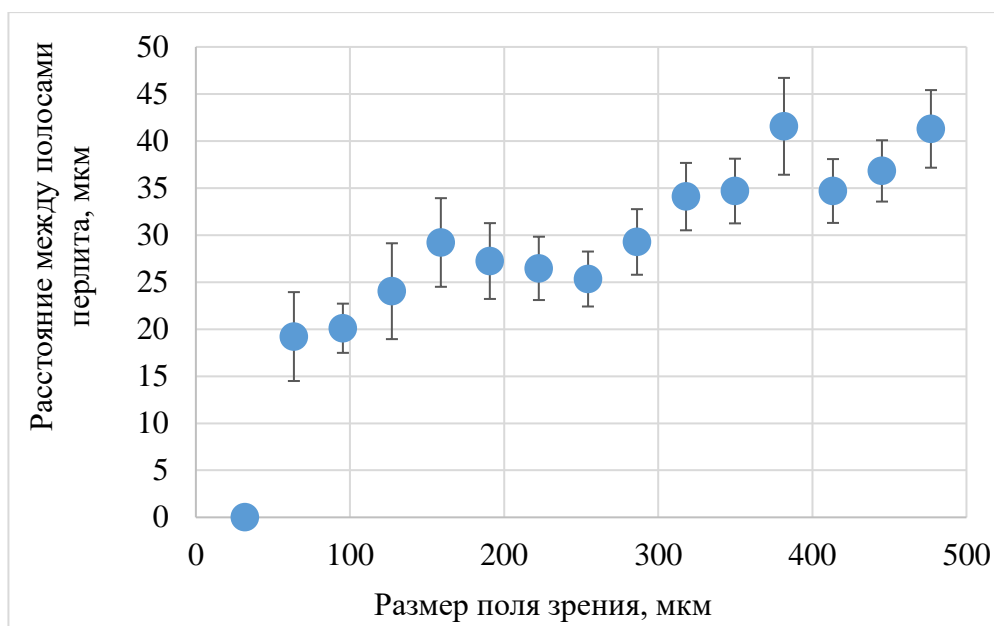


е)

а, б – исходные изображения; в, г – выделение феррита; д, е – выделение перлита

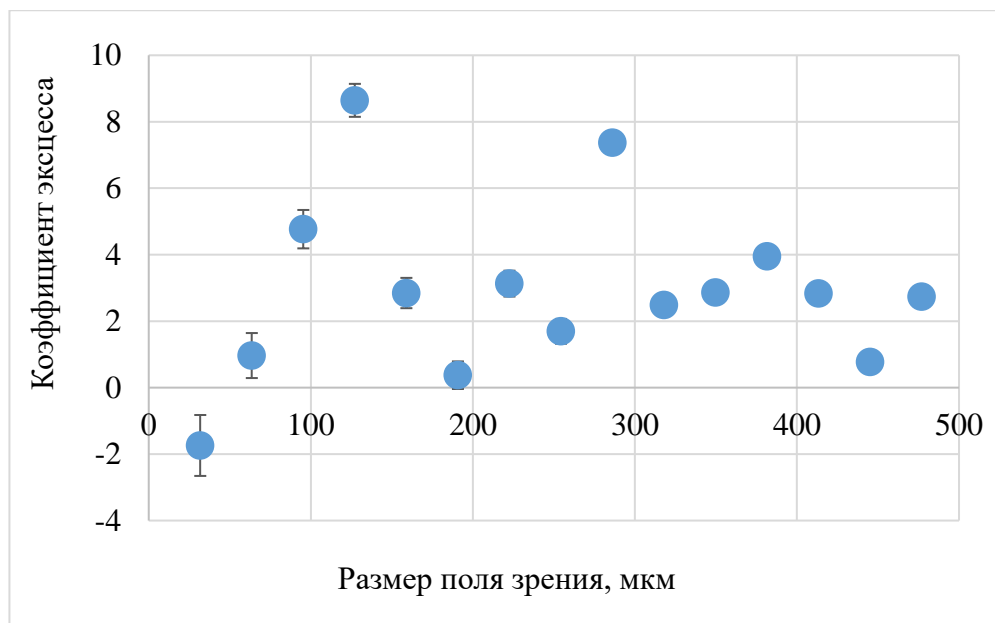
Рисунок 117 – Полосчатость в микроструктуре двух партий с явными широкими полосами (а) и с невыраженными полосами (б) листовой стали 09Г2С

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 (рисунок 118).

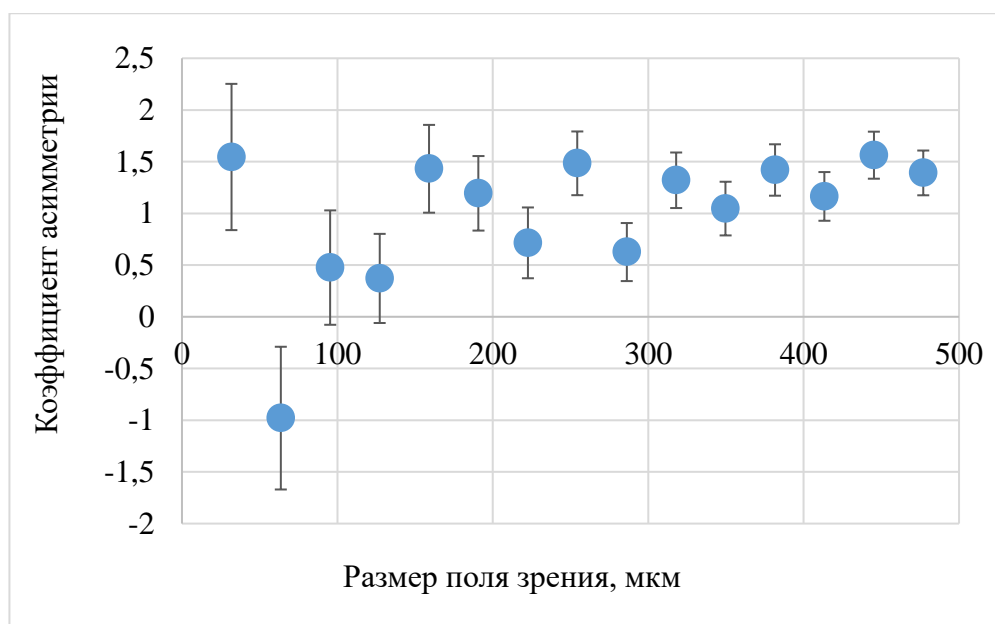


а)





б)



в)

Рисунок 118 – Изменение средних значений шага полос перлита (а), коэффициентов эксцесса распределений значений поперечника зерна феррита (б) и асимметрии шага перлита (в) в микроструктуре листа из стали 09Г2С в связи с изменением масштаба поля зрения

Практически для всех исследуемых изображений феррито-перлитных структур (различной степени полосчатости) распределение значений параметров геометрии структуры (во всем диапазоне вариации площадей наблюдаемых полей зрения) имеет асимметричный характер. Диапазон изменения значений коэффициента асимметрии изменялся от 1,0 до 2,6; эксцесса – от 4,7 до 10,4 и стабилизировался, начиная с полей зрения стороной 0,38 – 0,45 и 0,32 – 0,43 мм соответственно (таблица 36). При этом ошибка статистических коэффициентов

слишком маленькая. Из полученных результатов, с учетом их статистической природы, следует, что для получения воспроизводимых средних значений и параметров их распределений необходима некоторая минимальная площадь наблюдения. Таким образом, минимальная площадь наблюдения достаточно велика – поле зрения со стороной 0,4 мм и выше (при увеличении 200 крат).

Очевидно, что учет данного обстоятельства приобретает особую роль при переходе к автоматизированным измерениям геометрических характеристик полосчатости в микроструктуре для получения её объективных, статистически значимых оценок.

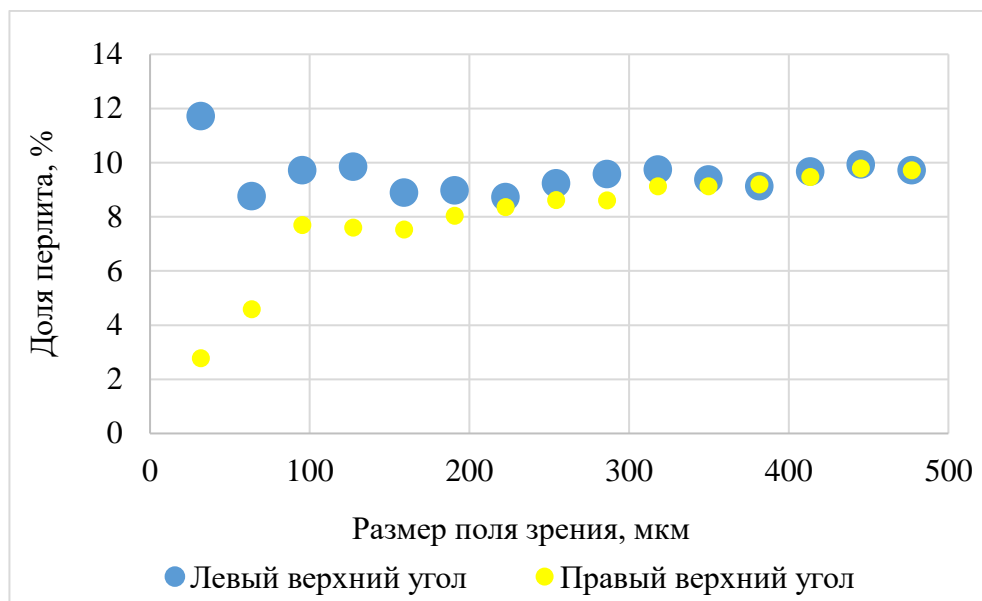
Таблица 36 – Сводная таблица значений коэффициентов асимметрии и эксцесса изображений структур с разными масштабами полосчатости в микроструктуре листа из стали 09Г2С,  $\times 200$

Тип полосчат ости	Коэффициент эксцесса				Коэффициент асимметрии			
	Область неустойчивых значений		Область устойчивых значений		Область неустойчивых значений		Область устойчивых значений	
	Разме р зерна ферр ита	Шаг поло с перл ита	Размер зерна феррита (минималь ный размер стороны поля зрения, мкм)	Шаг полос перлита (минималь ный размер стороны поля зрения, мкм)	Разме р зерна ферр ита	Шаг поло с перл ита	Размер зерна феррита (минималь ный размер стороны поля зрения, мкм)	Шаг полос перлита (минималь ный размер стороны поля зрения, мкм)
Слабо выражен ный	-1,8 – 8,6	-2,0 – 8,0	2,5 – 4,0 (320 - 480)	2,0 – 2,5 (420 - 480)	-0,4 – 2,2	-0,3 – 2,5	1,0 – 1,3 (450 - 480)	0,8 – 1,6 (420 - 480)
Сильно выражен ный	0,2 – 4,5	-1,6 – 3,6	1,5 – 1,7 (430 - 470)	2,8 – 3,2 (430 - 460)	0,75 – 1,6	-1 – 1,5	1,1 – 1,2 (450 - 480)	1,3 – 1,6 (380 - 460)

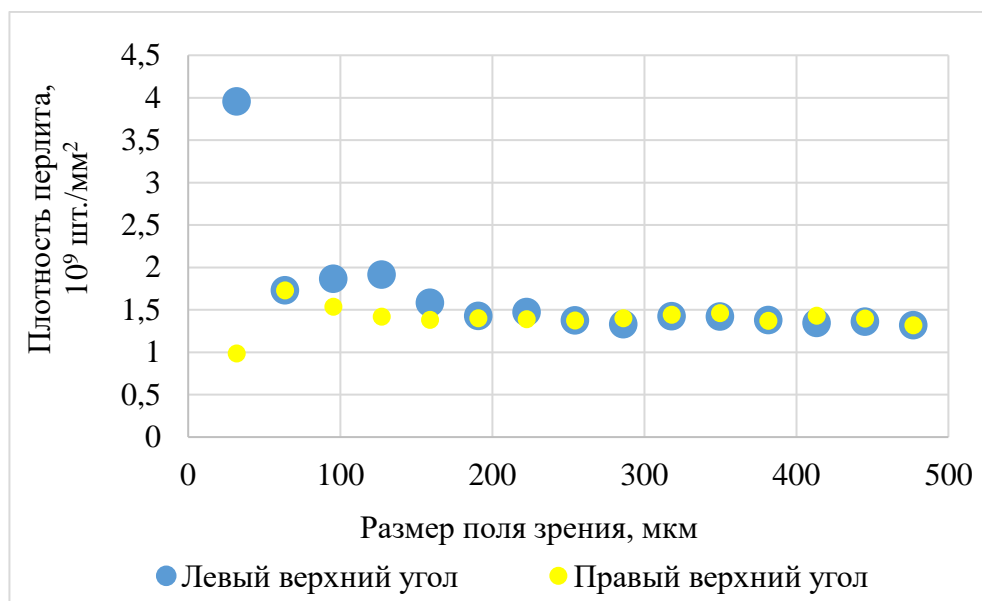
Причиной такого длительного «выхода на насыщение» статистических характеристик распределений является неоднородность микроструктуры по сечению листа, номинально однотипной, но отличающейся своей геометрией. Такое различие в строении микроструктур наблюдается не только в масштабах одного листа, но между листами отдельных партий, вследствие различий в эволюции структур и дефектов в ходе технологического передела в рамках достаточно широкого поля допуска технологии [1, 114, 133].

Для объективной ранжировки масштабов полосчатости важно также учитывать уровень величин статистических характеристик, описывающие вид распределения

(коэффициенты эксцесса и асимметрии) геометрических параметров элементов полосчатой структуры, например, шага полос перлита.



а)



б)

а – поле зрения по доли перлита; б – поле зрения по плотности перлита

Рисунок 119 – Определение поля зрения на разных областях изображения феррито-перлитной структуры стали 09Г2С,  $\times 200$

Продемонстрировать неоднородность легко путем определения поля зрения из разных углов большого изображения, принципиально отличающихся строением структуры. В таком случае в насыщении результат будет похож, но графики будут сходиться с разных сторон (рисунок 119).



Известно [137], что они оценивают степень соответствия экспериментального распределения нормальному (когда коэффициент асимметрии и эксцесса равны нулю). 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. Для полученных экспериментальных распределений значений шага перлита стали 09Г2С со слабо и выраженной полосчатостью коэффициент асимметрии (при его выходе на насыщение) находился на уровне 0,8 – 1,6 и 1,3 – 1,6 соответственно, что характеризует значительное отклонение от нормального вида распределения, когда длинный хвост распределения находится справа от его вершины. Величина коэффициента эксцесса при этом была положительной и находилась на уровне 2,0 – 2,5 и 2,8 – 3,2 соответственно.

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. Для таких случаев эффективным, как показывает практика [68, 138], может быть применение критериев непараметрической статистики, в частности Колмогорова-Смирнова.

При выборе измеряемых параметров изображений структур важно учитывать особенности геометрии строения однотипных элементов структур (в т.ч. с учетом их возможного влияния на свойства стали). В частности, измерение площадей объектов, например, сорбита в стали СтЗсп (после отпуска при 620 °С) или фрагментов перлита возможно в случае случайного их размещения в поле зрения (см рисунок 104). Однако при формировании их связности (полосчатость начальных баллов) для их выделения необходимо применение неформальных процедур дилатации и эрозии, отсюда часто бывает предпочтительнее использование линейных характеристик объектов, определенных при их пересечении секущими.

При оценке феррито-бейнитной полосчатости в микроструктуре высокопрочных трубных сталей класса Х80 одним из факторов, обеспечивающим возможность объективного разделения структурных составляющих, является их ранжировка по интенсивности яркости. Удовлетворительное соответствие изображения микроструктуры трубной стали в световом микроскопе её поликристаллическому строению подтверждает карта EBSD, полученная с того же поля зрения [53]. Однако при частичном перекрытии гистограмм распределения интенсивностей яркости двух составляющих – феррита и бейнита, например, из-за образования квазиполигонального (помимо полигонального) феррита, с повышенной плотностью дислокаций [139] и с более темными оттенками на световом изображении соответственно, полезно дополнительно ранжировать составляющие структуры по их

геометрии. Можно выделить две основные группы фрагментов структур: равноосные, такие как полигональный феррит и вытянутые – бейнит, и при необходимости разделить феррит на полигональный и квазиполигональный – по его форме (у квазиполигонального феррита неправильная форма и «рванные границы»).

В этой связи учет факторов, обсуждаемых в работе (время травления, выбор увеличения, роль бинаризации и фильтрации) может оказаться немаловажным при объективной оценке геометрии строения такого рода структур для ранжировки металла по качеству, уточнению состава и технологии получения.

Давно известно, что листовая сталь имеет явную неоднородность внутри одного листа, а различия структурной неоднородности между партиями носит системный характер (рисунок 120). Современные требования к производимой металлопродукции заставляют задуматься о мерах снижения изменчивости структуры, а вместе с ней и свойств листовой стали. Для выбора оптимальных параметров термической обработки и контролируемой прокатки, определяющих уровень механических свойств стали и ее сопротивление хрупкому разрушению, необходимо прямое сопоставление неоднородности строения структур и сопутствующих изломов.

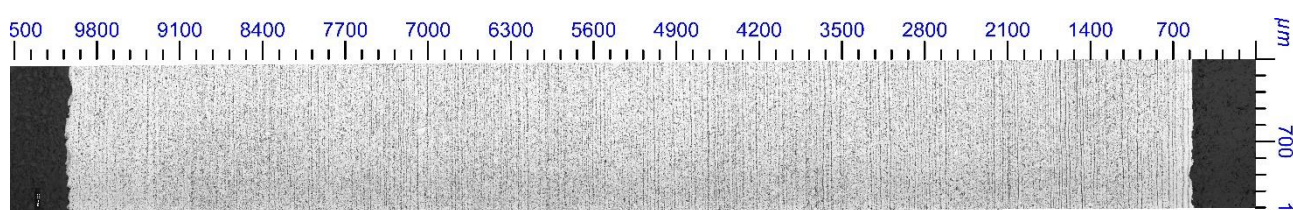
Исследовались образцы двух плавок (по 2 партии от каждой) низколегированной листовой стали 09Г2С близкого состава (см. таблицу 4).

При анализе структур феррито-перлитных сталей важно отметить, что различия интенсивности границ зёрен феррита и перлита, подтвержденные анализом матрицы интенсивности яркости изображений, обусловлены разной дифракционной природой: в случае ровной полированной поверхности свет отражается и попадает в объектив; при формировании канавок в месте стыка соседних зерен отражение происходит от криволинейной поверхности, отраженный свет не попадает в объектив; при небольшом увеличении перлит не распознается. Данный факт в большинстве случаев позволяет использовать методику мультиризации для отдельного выделения перлитных колоний.

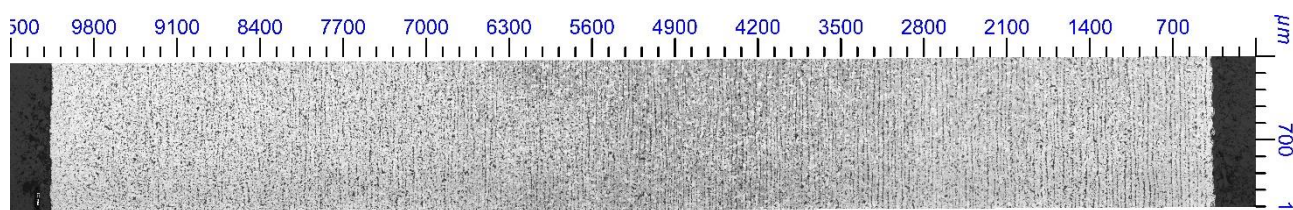
Были получены изображения при увеличении  $\times 50$  для определения параметров полосчатости. Для точного измерения размера зерна феррита необходимо большее увеличение (около  $\times 500$ ), позволяющее получить замкнутую зёрненную структуру, четко разделить все объекты изображения и использовать метод площадей для измерения объектов. Очевидно, что измерение толщин между пластинами цементита требует ещё большего увеличения.

Стандартной процедурой подготовки (шлифование, полирование, травление, съемка, выравнивание изображения по освещенности), обработки (мультиризация, эрозия-дилатация, удаление мелких объектов) и измерения (метод секущих) изображений (см. рисунок 121) были определены толщины полос перлита и расстояния между ними (см. рисунки 122 и 128).

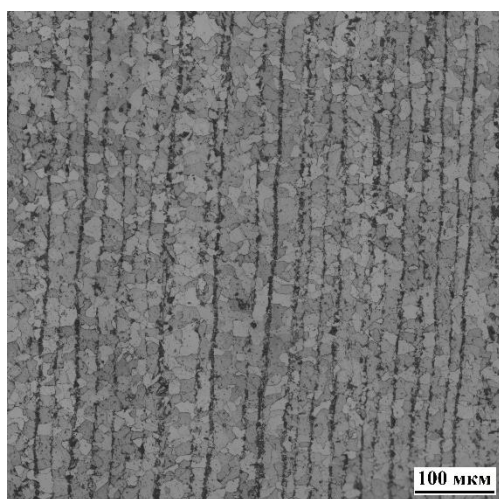
Внутри всех партий стали (особенно 3 и 4) замечена явная неоднородность по распределению перлита, что скорее всего связано с ликвацией Mn: редкие полосы перлита на ферритной матрице, либо наоборот (партия 2). Данную неоднородность можно заметить по длинным «хвостам» на гистограммах распределения параметров полосчатости (см. рисунок 122). При чем количество сформировавшихся длинных полос перлита существенно отличается по партиям, что также видно из изменения разброса значений данных гистограмм. Такая неоднородность может объяснить нестабильность свойств продукции внутри одной партии [131, 135].



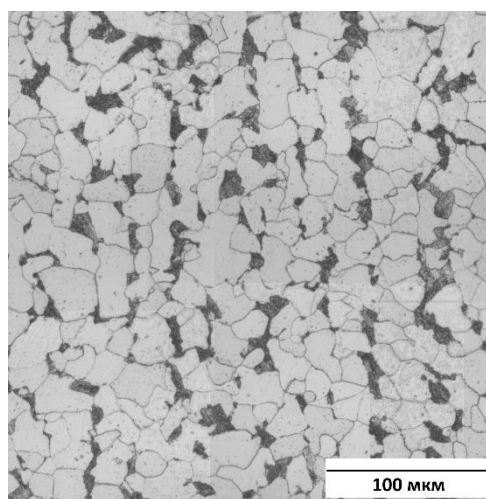
а)



б)



в)



г)

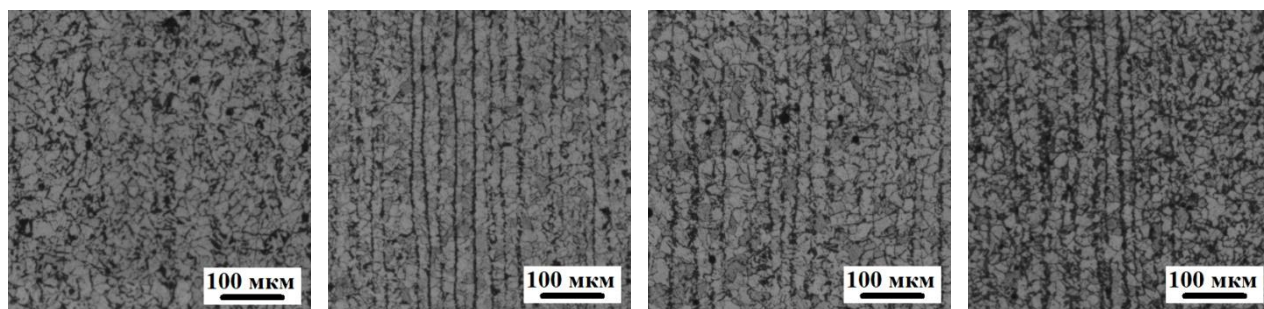
а – сталь 09Г2С в масштабах сечения ударного образца,  $\times 100$ ;

б – сталь Ст3сп в масштабах сечения ударного образца,  $\times 100$ ;

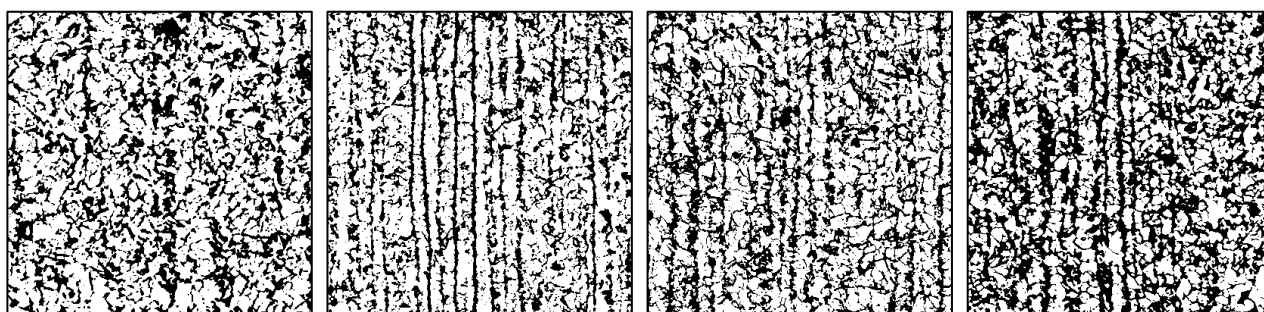
в – сталь 09Г2С,  $\times 500$ ; г – сталь Ст3сп,  $\times 500$

Рисунок 120 – Неоднородность полосчатости в феррито-перлитной структуре листовых сталей при разных масштабах наблюдения

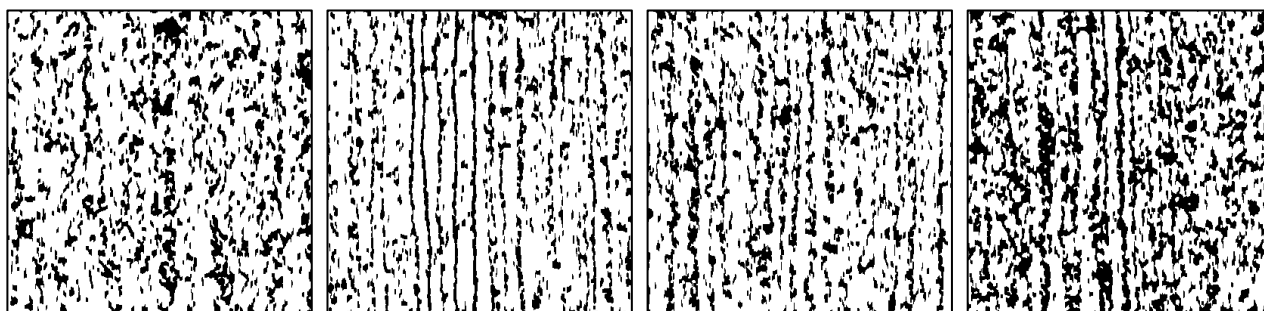
Для 1-й плавки структура сильно отличается между партиями 1 и 2. Структура партии 1 состоит из равномерно распределенных перлитных зёрен в ферритной матрице с низкой степенью полосчатости перлитных колоний. Структура партии 2 отличается высокой степенью полосчатости (коэффициент эксцесса распределения толщины полос перлита увеличивается в 2 раза, коэффициент эксцесса распределения расстояний между полосами перлита уменьшается больше, чем в 2 раза). Внутри второй плавки значения параметров полосчатости почти не меняются.



Исходные изображения полосчатых структур



Изображения после мультиризации



Изображения после эрозии, дилатации и удаления мелких объектов

партия 1 (порог = 90)    партия 2 (порог = 92)    партия 3 (порог = 90)    партия 4 (порог = 84)

Рисунок 121 – Обработка изображений полосчатых феррито-перлитных структур четырех партий листовой стали 09Г2С для измерения параметров полосчатости

Такую неоднородность внутри одной плавки можно объяснить технологическими параметрами – толщиной листа или степенью обжатия (для 1 партии – 40 мм, 2 партии –



14 мм, 3 партии – 30 мм, 4 партии 20 мм). Различия толщины листа стали в 1,5 раза для 2 плавки не даёт существенных изменений параметров полосчатости. При этом такая степень обжатия не позволяет создать одинаковую степень полосчатости – структура получается сильно неоднородной. Изменение толщины листа почти в 3 раза для 1-й плавки, наоборот, позволяет существенно изменить структуру стали, при этом степень обжатия 1 партии не создает заметной полосчатости перлита, а во 2-й партии структура явно полосчатая. Это же объясняет различия структуры между плавками.

Определенные виды неоднородности показывают, что главным фактором, определяющим степень полосчатости, является конечная толщина листа стали. Данный вывод говорит о том, что тонколистовая сталь в сравнении с толстолистовой должна иметь повышенную анизотропию свойств листа.

Необходимо отметить, что наличие неоднородности разных масштабов и видов может только усугубить результаты классического ручного измерения параметров изображений феррито-перлитных сталей. Действительно, при возможном разбросе значений в зависимости от исследователя до 16% для одного поля зрения (см. пункт 3.2.11) выбор области неоднородной структуры может критически сказаться на величине определяемых параметров.

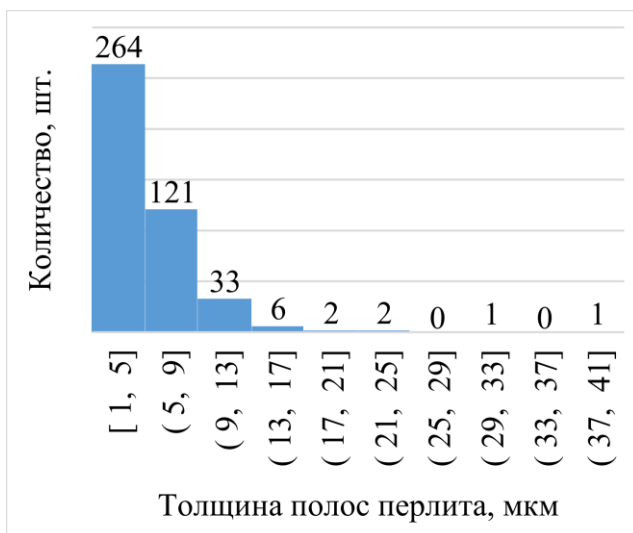
Для определения параметров измерялись изображения с размером 3,24 мм<sup>2</sup>, что больше минимального поля зрения. Параметры измерялись автоматизированным проведением 10 горизонтальных секущих на изображениях после последнего этапа обработки. Все гистограммы распределения показаны в рисунке 122.



а)



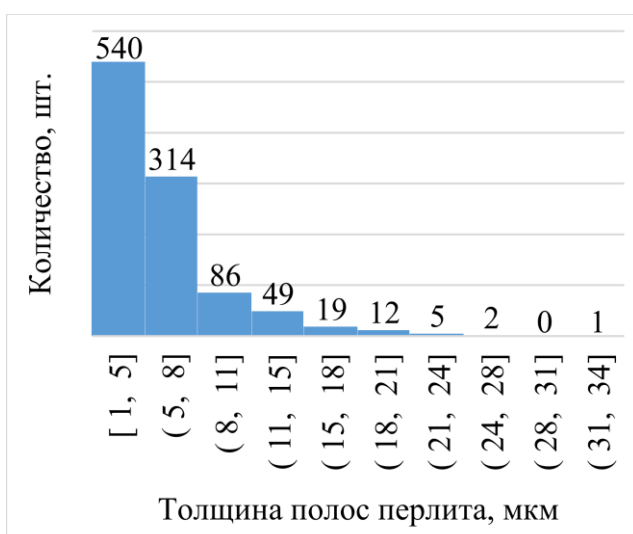
б)



в)



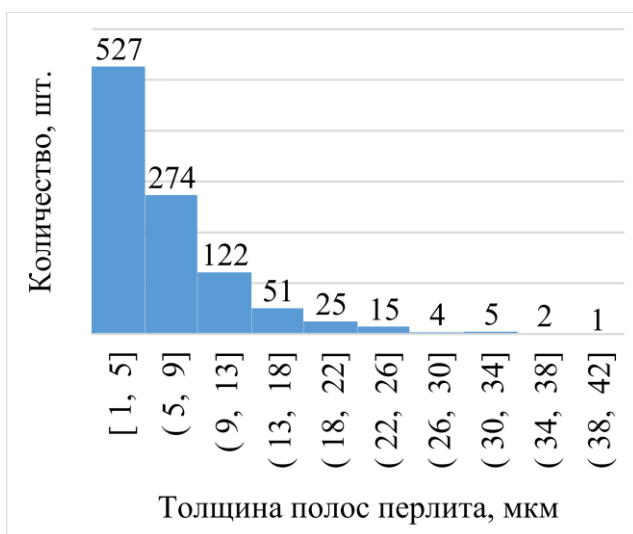
г)



д)



е)



ж)

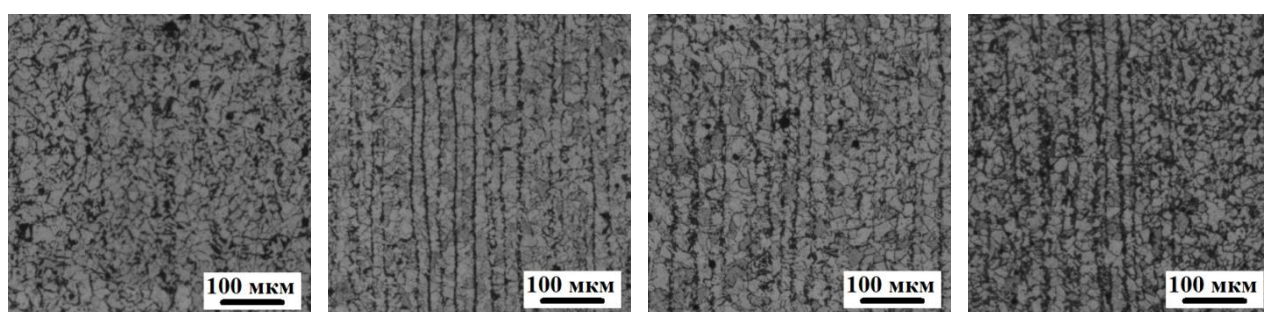


з)

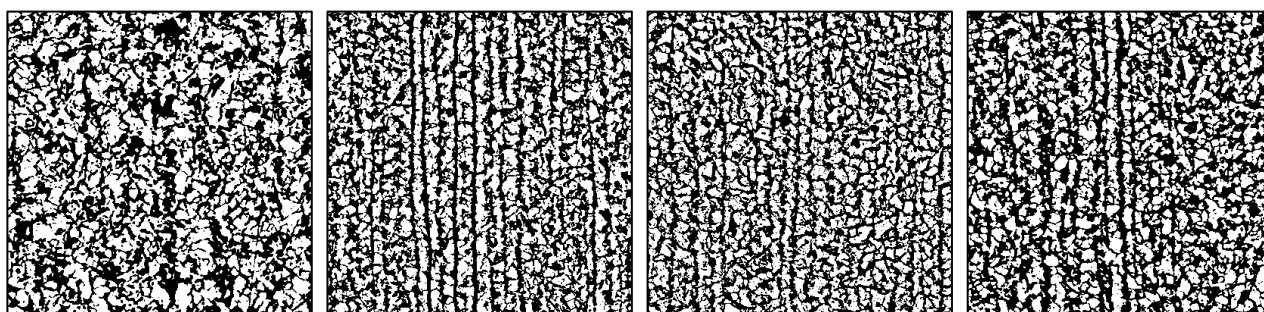
а, б – партия 1; в, г – партия 2; д, е – партия 3; ж, з – партия 4

Рисунок 122 – Гистограммы распределения параметров полос перлита

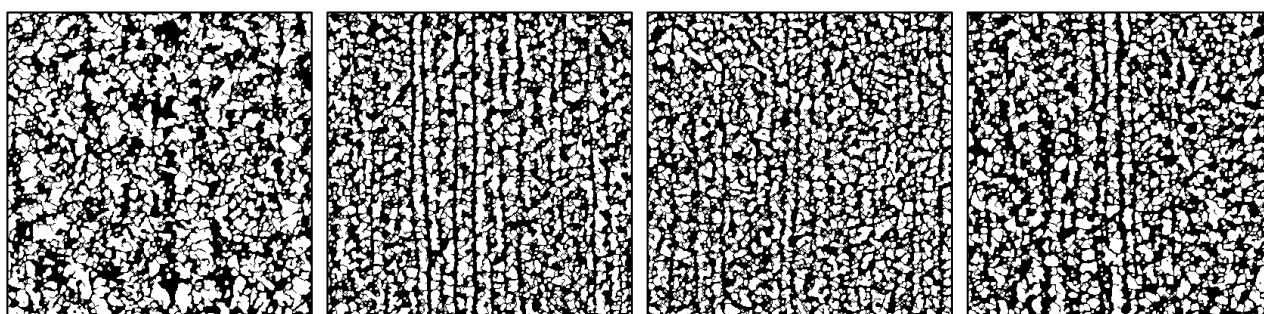
Полученные гистограммы, в частности разбросы значений, показывают явную неоднородность параметров полосчатости внутри всех партий [115]. При оценке вида распределения параметров полосчатости между партиями замечено смещение к нормальному распределению измеренных параметров перлита партии 2 относительно других партий, однако полностью нормальным распределение не становится. Это также говорит о невозможности описания данных структур средним значением, что делается во многих научных исследованиях. Так как основным фактором упрочнения феррито-перлитных сталей является зернограницное, необходимо строгое определение параметров зерна феррита и его системный контроль по различным плавкам и партиям, что весьма трудоемко. Автоматизированные процедуры обработки изображений позволяют достаточно быстро проводить данные измерения (см. рисунок 123).



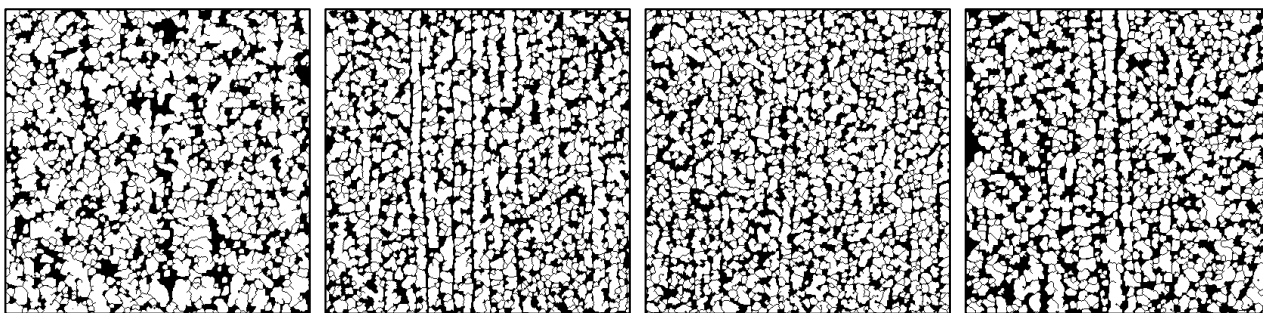
Исходные изображения полосчатых структур



Локальная бинаризация изображений



Изображения после замыкания



Изображения после «умной» эрозии и удаления мелких объектов

Партия 1 ( $r=46$ )

Партия 2 ( $r=13$ )

Партия 3 ( $r=10$ )

Партия 4 ( $r=16$ )

Рисунок 123 – Обработка изображений полосчатых феррито-перлитных структур четырех партий листовой стали 09Г2С для измерения зерен феррита

Определение параметров полосчатости требует съемку при низких увеличениях, однако при этом граница зерна феррита вытраивается плохо. Поэтому обработка изображений с выделением зерна феррита будет разной для разных увеличений. Для низких увеличений предложена процедура локальной бинаризации, что позволяет более точно распознать границы зерна, а также вместо процедуры «эрозия-дилатация» – замыкание и «умную» эрозию. Для визуального удобства на рисунке 124 показано инвертированное изображение после последнего этапа обработки.

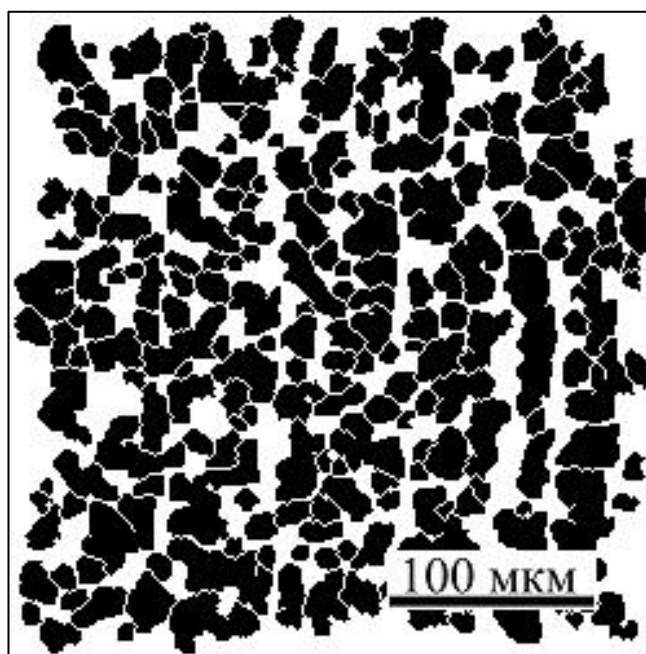


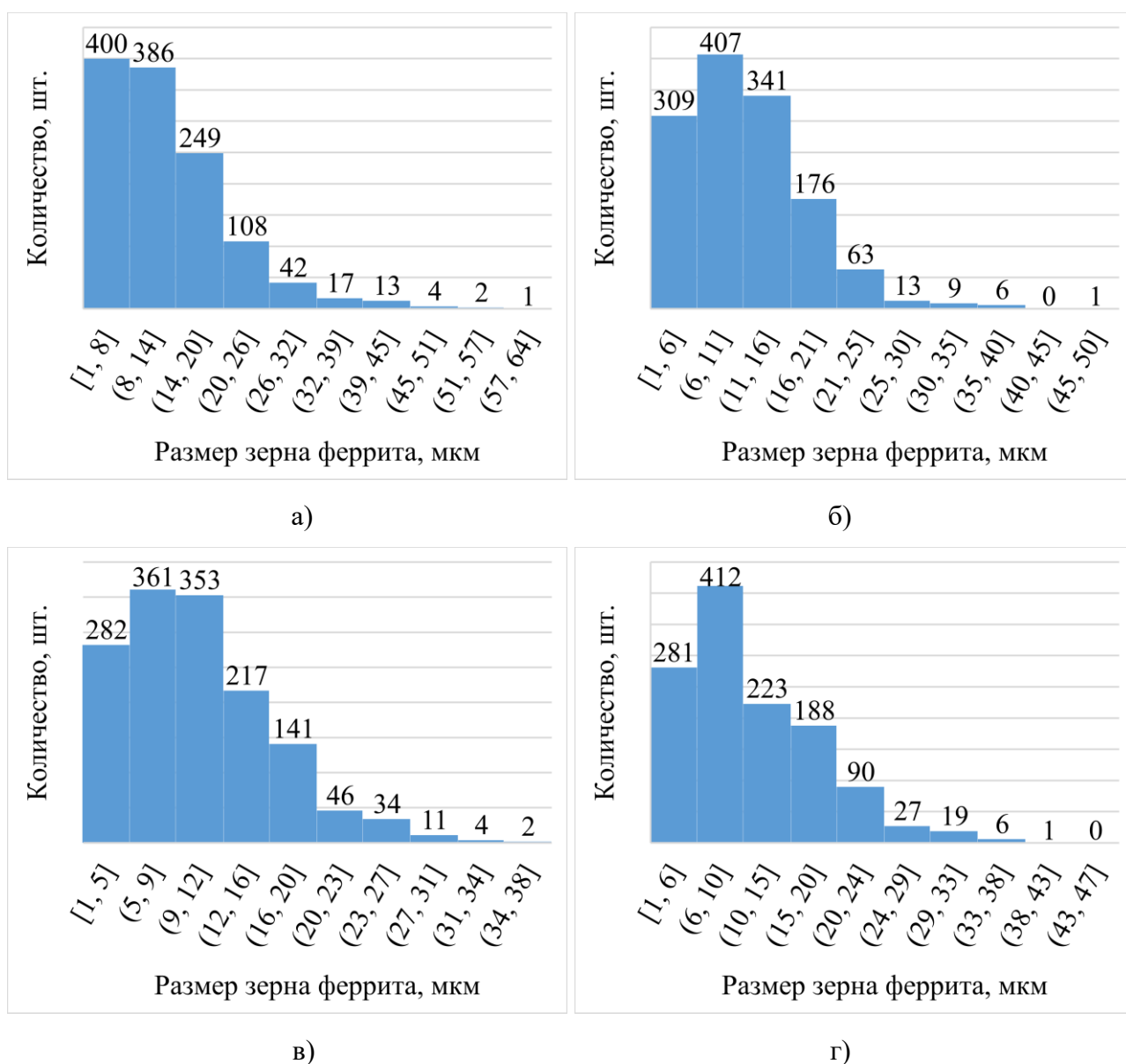
Рисунок 124 – Изображение после всех этапов обработки

Данные алгоритмы благодаря процедуре «умной» эрозии позволяют использовать более точный метод площадей за счёт разделения объектов изображения, однако в данном



исследовании применялся только метод секущих для возможности сопоставления результатов измерения элементов структур и изломов.

По гистограммам распределения зерна феррита также замечена небольшая неоднородность размеров, однако между партиями разница незначительна, что подтверждается средними значениями, гистограммами распределений (рисунок 125) и статистическими параметрами распределений (рисунок 128, б). Результаты показали, что средний размер зерна поперёк направления прокатки всех партий листовой стали 09Г2С находятся в интервале от 10 до 12 мкм. Отсутствие значительной разницы в размере зерна феррита говорит о том, что разница механических свойств данных партий стали 09Г2С не связана с зернограницным упрочнением [20].



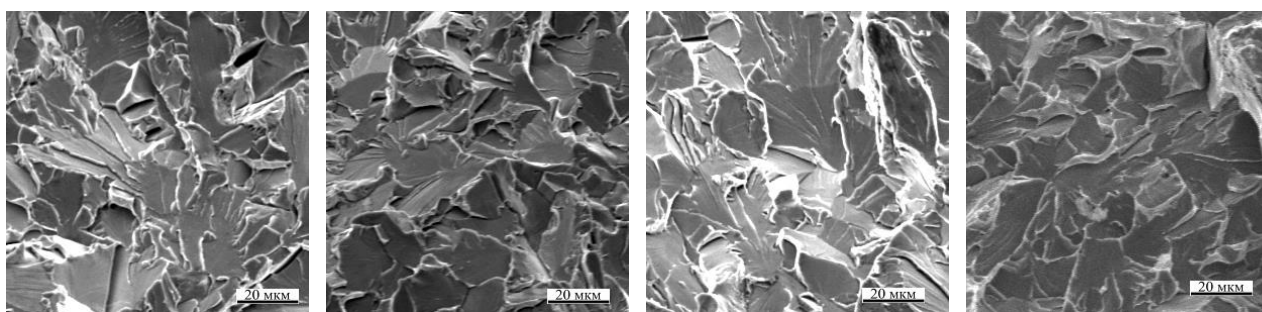
а – парти́я 1; б – парти́я 2; в – парти́я 3; г – парти́я 4

Рисунок 125 – Измерение размера зерна феррита методом секущих

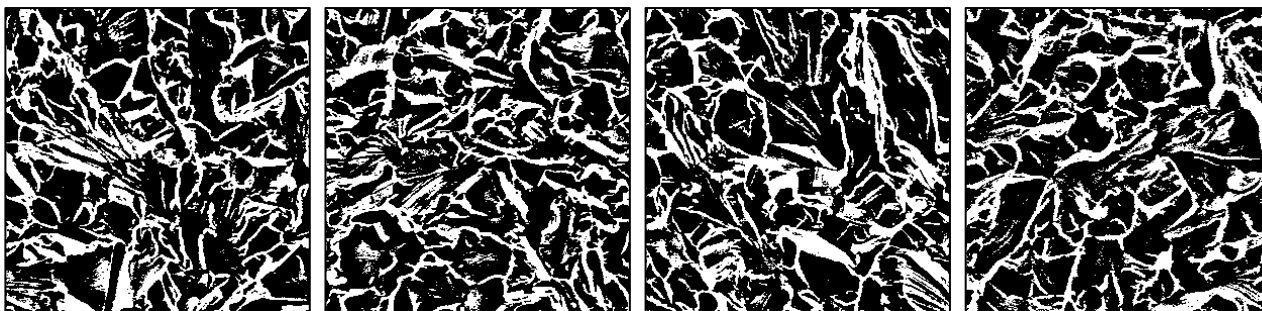
Для понимания механизма разрушения наблюдаемых структур были получены изображения изломов ударных образцов с U-образным надрезом (от стандартных сдаточных испытаний при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), на половинках которых и исследовали микроструктуру. После локальной бинаризации и фильтрации на бинарных изображениях изломов методом секущих измеряли поперечник фасеток транскристаллитного разрушения (на панораме площадью  $0,15\text{ мм}^2$ , в масштабе образца).

Такая же процедура обработки применялась для изображений изломов (рисунок 126). На изломе присутствуют характерные для данного механизма разрушения детали – фасетки скола, ступеньки скола и гребни отрыва. Ступеньки скола на некоторых участках излома делают смежными участки фасеток. Поэтому для изломов возможно применение только метода секущих. Анализируя все эти объекты на изображениях изломов и измеряя их параметры путем компьютеризированной обработки возможно получить информацию об особенностях зарождения и распространения трещин при данном типе разрушения, а также связать параметры разрушения со структурными параметрами (в некоторых случаях при сложности вытравливания объектов структуры измерение фасеток может помочь в оценке структуры).

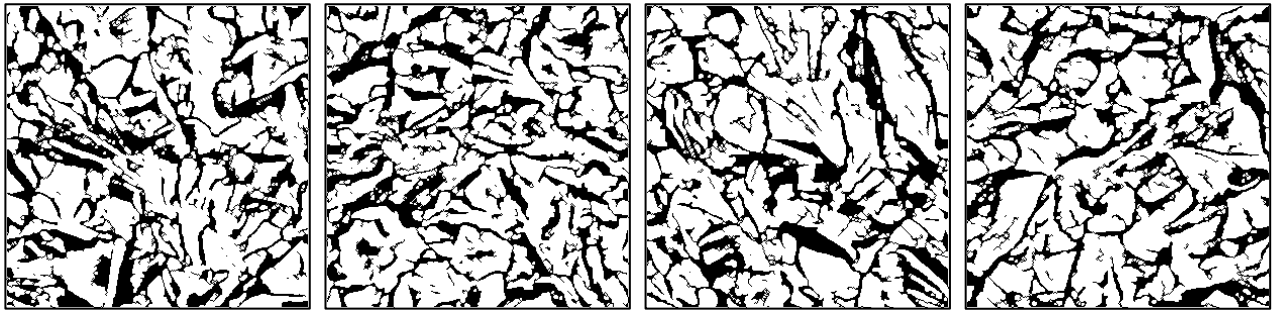
Размер фасеток вдоль и поперек направления прокатки существенно не отличался по всем партиям, поэтому результаты измерения приведены (рисунок 128) только для поперечного направления. Гистограммы распределения размера фасеток представлены на рисунке 127. Средний размер фасеток не показал существенной неоднородности по данному параметру партий и значимых отличий между партиями (около  $5\text{ мкм}$ ).



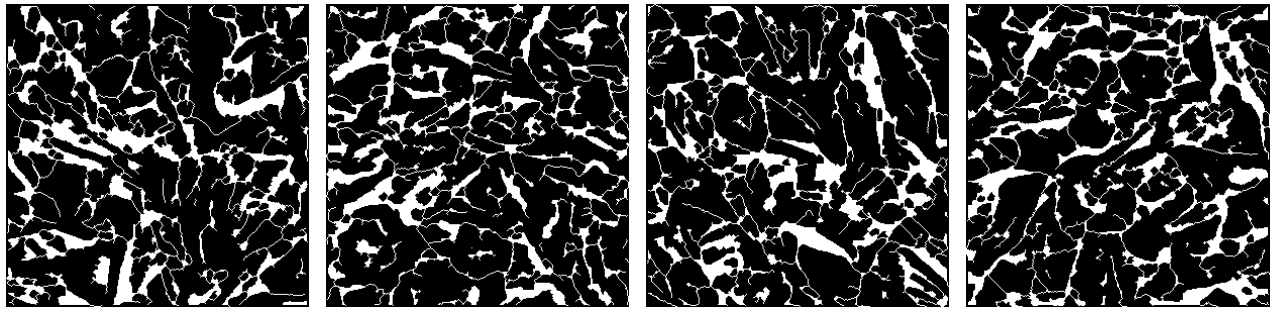
Исходные изображения изломов



Изображения изломов после локальной бинаризации



Изображения после негатива и замыкания



Изображения «умной» эрозии и удаления мелких объектов

Партия 1 ( $r=20$ )

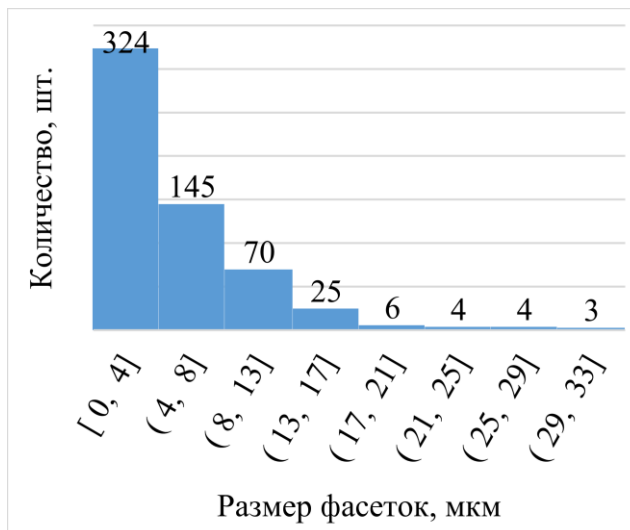
Партия 2 ( $r=16$ )

Партия 3 ( $r=19$ )

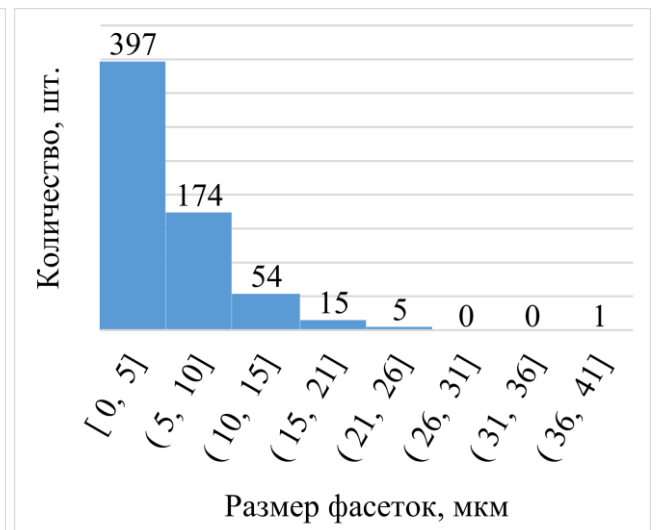
Партия 4 ( $r=19$ )

Рисунок 126 – Обработка изображений изломов четырех партий листовой стали 09Г2С

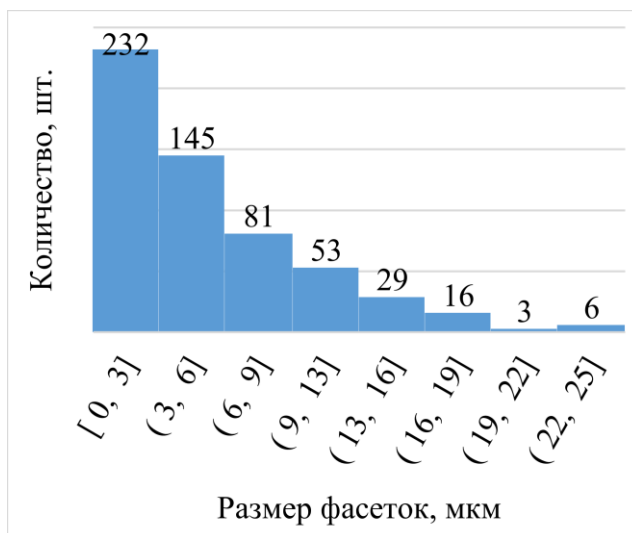
Сложно оценить связь размера зерна феррит с размером фасеток, так как их средний размер практически не меняется между партиями. Однако данная методика может оказаться полезной в случаях, когда изменения механических свойств будет определять именно зернограничное упрочнение.



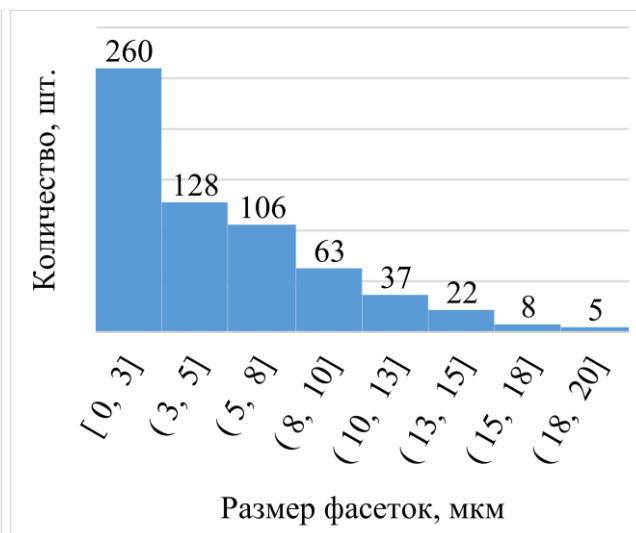
а)



б)



в)

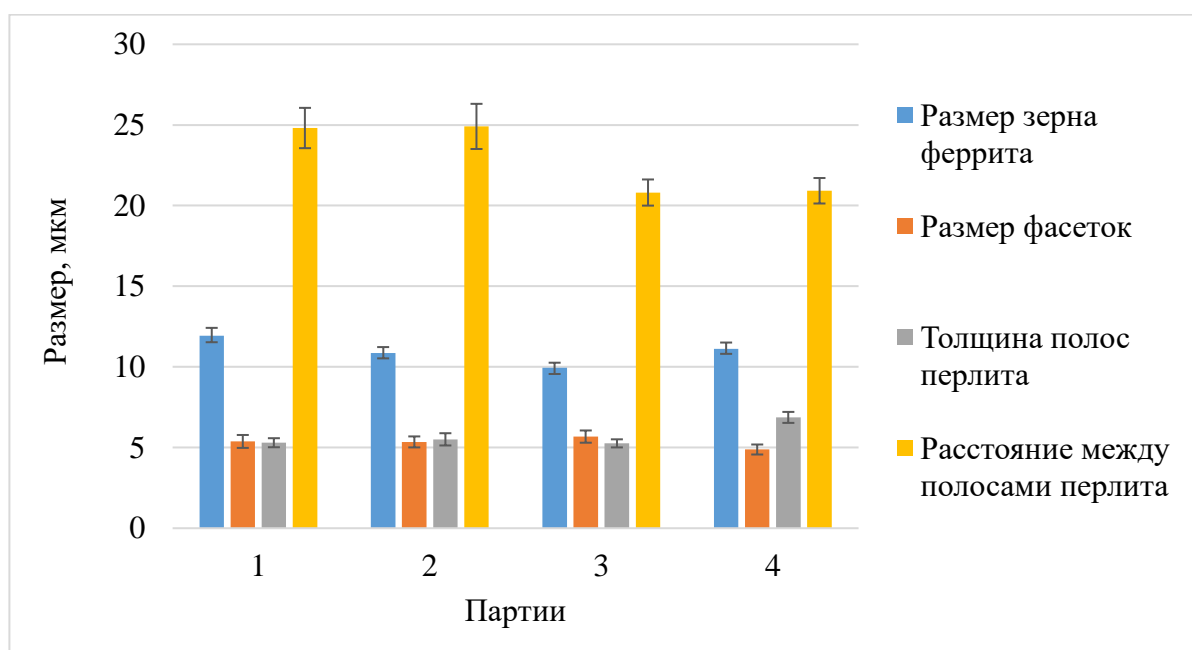


г)

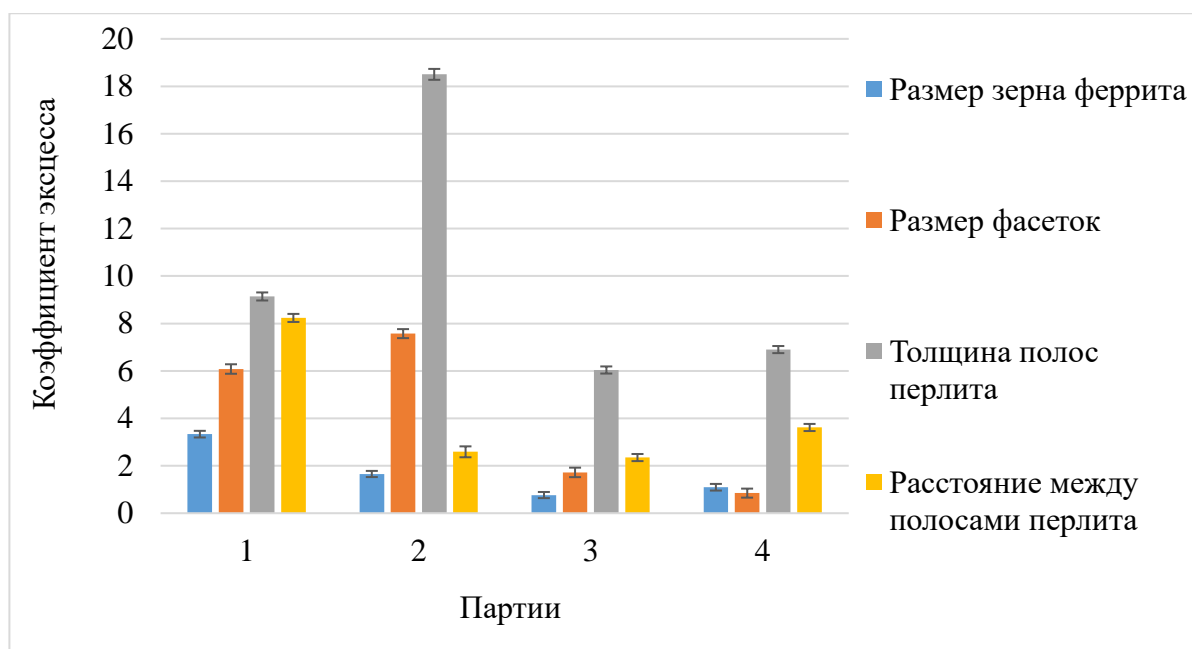
а – партия 1; б – партия 2; в – партия 3; г – партия 4

Рисунок 127 – Измерение размера фасеток методом секущих

Численное сравнение измеренных параметров между собой (рисунок 128, а) показало, что расстояние между полосами перлита (или, другими словами, толщина ферритной прослойки) примерно в 2 раза больше размера зерна. Иначе говоря, между двумя полосами перлита помещаются порядка двух зерен феррита. Значения среднего размера фасеток и толщины полос перлита практически не отличаются и при этом в 2 раза меньше среднего размера зерна феррита. Из рисунка 128 (а) видно, что средние значения параметров структур и изломов не всегда позволяют выявить различия между партиями листов стали [139].



а)



б)

а – средние значения параметров; б – коэффициенты эксцесса их распределений

Рисунок 128 – 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)

Для объективного выявления степени различия структур и изломов необходимо учитывать статистическую природу их строения, в частности вид распределения значений параметров геометрии отдельных элементов. В этой связи определяли значения коэффициентов эксцесса (рисунок 128, б) и асимметрии, изменения которых от партии к партии имели одинаковый характер. Максимумы коэффициента эксцесса распределений размера фасеток и толщины полос перлита совпадают и соответствуют партии 2. Это подтверждает значимое отличие данной партии от остальных, что видно также из значений предела текучести и удлинения (рисунок 129).

Данные результаты показывают, что средние значения параметров структур и изломов не могут описывать качество листовой стали.

Было также проведено попарное сравнение распределений значений всех параметров между партиями критериями Стьюдента и Колмогорова-Смирнова. Проверялось выявленное статистическими коэффициентами отличие партии 2 по толщине полос перлита. При сравнении партии 2 с партиями 1 и 3 по толщине полос перлита критерий Стьюдента не показал различий (риски 0,5 и 0,3 соответственно). К-С критерий в данных случаях выявил различия с риском 0,1 и 0,01 соответственно (таблица 37).

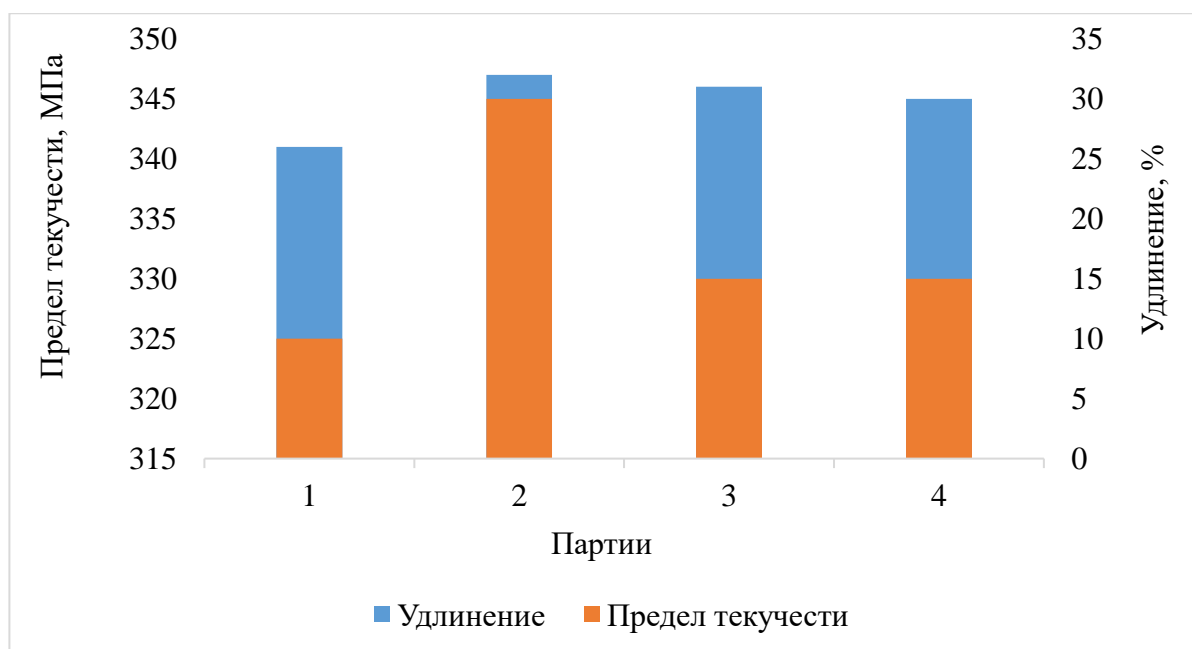


Рисунок 129 – Механические свойства листовой стали 09Г2С по партиям

Таблица 37 – Сравнение распределений значений параметров объектов структур и изломов четырех партий листовой стали 09Г2С критериями Стьюдента и Колмогорова-Смирнова

Сравниваемые партии	Экспериментальные значения критериев различия выборок: Стьюдента (t) и Колмогорова-Смирнова ( $K_\alpha$ )							
	Размер зерна феррита		Толщина полос перлита		Расстояние между полосами перлита		Размер фасеток	
	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$	t	$K_\alpha$
1-2	3,46	1,68	<b>0,84</b> (0,5)	<b>1,31</b> (0,1)	<b>0,10</b> (> 0,5)	<b>1,36</b> (0,05)	0,10	0,74
1-3	6,89	2,50	0,25	0,58	5,40	2,12	<b>1,08</b> (0,3)	<b>1,22</b> (0,1)
1-4	2,55	1,17	6,87	3,58	5,33	2,26	<b>1,95</b> (0,1)	<b>0,78</b> (> 0,5)
2-3	3,82	2,14	<b>1,09</b> (0,3)	<b>1,69</b> (0,01)	5,20	2,56	<b>1,26</b> (0,3)	<b>0,79</b> (> 0,5)
2-4	<b>0,95</b> (0,4)	<b>0,76</b> (> 0,5)	4,63	2,61	5,18	2,50	2,00	1,20
3-4	4,69	1,92	7,58	3,56	<b>0,18</b> (> 0,5)	<b>0,97</b> (0,3)	3,24	1,63

Таким образом показано, что средние значения параметров не всегда могут объективно оценить различия или сходства металла отдельных партий по тем или иным сдаточным механическим характеристикам. Применение критериев классической статистики, в частности критерия Стьюдента, может быть не вполне корректно, так как исходят из предположения о нормальном распределении значений измеряемых параметров. Однако результаты работы показывают, что вид таких распределений может в разной мере отличаться от нормального, в связи с чем для объективного сопоставления различных выборок результатов измерений, также как и для других, исследованных ранее, типов структур, предпочтительнее использовать критерии непараметрической статистики (например, Колмогорова-Смирнова). Они в меньшей мере чувствительны к виду распределения и позволяют сопоставлять измеряемые выборки в целом.

#### **Выводы по разделу:**

1. При определении геометрических характеристик полосчатости листовых сталей с использованием компьютеризированных процедур подтверждена существенная роль метрологических аспектов измерений (масштаб измерения, бинаризация и фильтрации) для обеспечения воспроизводимости получаемых геометрических характеристик изображения.
2. Показано, что при оценке геометрии изображений реальных феррито-перлитных структур с полосчатостью с использованием принятого на практике метода секущих необходимо учитывать, что вид распределения значений параметров отличается от нормального. В частности, для шага перлитных полос стали 09Г2С величина коэффициентов асимметрии и эксцесса варьируется в интервале от -1,0 до 1,5 и от -2 до 8,0 соответственно, выходя на насыщение до ~1,3 и 2,0 соответственно на суммарной площади измерения в квадрате стороной 400 мкм. Показано, что при сопоставлении выборок результатов измерений параметров геометрии микроструктуры с использованием критериев классической и непараметрической статистики (Стьюдента и Колмогорова-Смирнова соответственно) в ряде случаев (для всех измеряемых параметров) наблюдались как различия в уровне рисков (от 0,1 до 0,3) проверяемых статистических гипотез, так и противоположные результаты их проверки. В частности, при сопоставлении значений толщин перлита – 0,1 и 0,5 по критериям Стьюдента и Колмогорова-Смирнова соответственно. Это указывает на необходимость учета статистической природы строения феррито-перлитной структуры с полосчатостью при ее количественных оценках.
3. Для оценки периодичности строения феррито-перлитной структуры с полосчатостью (балл 3) листовой стали 09Г2С апробированы возможности использования

Фурье преобразования. Показано, что его применение на исходных и бинарных изображениях структур дало идентичные результаты измерения шага полосчатости порядка 20-22 мкм, что совпадает с результатами измерения методом секущих на бинарных изображениях. Это может быть использовано для экспресс-анализа периодичности строения такого рода структур. На модельных изображениях полосчатых структур показано, что Фурье преобразование может быть также использовано для оценки неоднородности их строения.

4. Качественный анализ феррито-перлитной структуры с полосчатостью в листовых сталях 09Г2С и Ст3сп, полученных по действующей технологии, выявил различия в ее строении для разных толщин листа (14, 20, 30, 40 мм) и наличие неоднородности полосчатости в масштабах сечения ударных образцов, между отдельными полями зрения, а также в их пределах (в световом микроскопе при фиксированных увеличениях от 50 до 500 крат). Это определяет практический интерес к количественным измерениям геометрии таких структур для выявления различий в их морфологии.



## 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 зернами, 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 ковки), 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.).

Опубликованные статьи по теме:

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. Perezhogin**, 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 // *Металлург*, 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 металловедения сталей и сплавов»: XXIII Уральская школа металлословов-термистов 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. – Тольятти: 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 использованной литературы

1. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А. Факторы неоднородности качества листовой стали. // Электromеталлургия. – 2013, № 9. – с. 23-33.
2. Счастливец В.М., Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л. и др. Структура и механические свойства листового проката из низкоуглеродистых низколегированных сталей после термомеханической обработки // Деформация и разрушение, 2006, №10, с. 5-12.
3. Пилюшенко В.Л. Математическая модель механических свойств феррито-перлитных сталей, М. Сталь, 2002, №8, с. 97-102.
4. Голованенко С.А., Чевская О.Н. Влияние контролируемой прокатки на характер разрушения малоперлитных сталей для сварных труб большого диаметра. – М.: Сталь, 1984, №12, с. 51-55.
5. Матросов Ю.И. Влияние условий контролируемой прокатки на структурные превращения и свойства малоперлитных сталей. – Сталь, 1985, №12, с. 68-72.
6. S.V. Dobatkin, S.P. Galkin, Y. Estrin, V.N. Serebryany, M.Diez, N.S. Martynenko, E.A. Lukyanova, V.Y. Perezhogin Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling, Journal of Alloys and Compounds, Volume 774, 2019, pp. 969-979.
7. Кантор М.М., Боженков В.А. Материаловедческое обеспечение долговечности магистральных трубопроводов, М. – Сталь, 2010, №4, с. 80-84.
8. Смагоринский М.Е., Кудряшов С.В. Повышение прочности толстолистового проката из низколегированных сталей. М. – Митом, 1990, №12, с. 74-77.
9. Рожко Л.С., Мостовенко Г.Г., Страшко А.Ф. и др. Упрочняющая термическая обработка толстолистовой стали СтЗсп. – М. Сталь, 1982, №4, с. 75-76.
10. Хун-Бинь Цзя, Хун-Мэй Чжан, Чэн-Цянь Сунь Исследование растворения частиц второй фазы и роста аустенитного зерна при нагреве мелкозернистой высокопрочной IF-стали, М., Митом, 2016, №6, с. 14-19.
11. Паргамонов Е.А., Мирошниченко С.А. Влияние степени деформации при холодной прокатке на структуру и механические свойства стали 08ГСЮТ, М. – Сталь, 2003, №10, с. 60-61.
12. Урицкий А.Г., Редикульцев А.А., Смирнов С.В. Формирование структуры и текстуры по ширине полосы ферритной стали при горячей прокатке // Известия ВУЗов – 2014 – №10 – С. 42-46.

13. Эфрон Л.И., Морозов Ю.Д., Голи-Оглу Е.А. Влияние режимов контролируемой прокатки на измельчение структуры и комплекс механических свойства низкоуглеродистых микролегированных сталей, М. – Сталь, 2011, №5, с. 67-72.
14. Навроцкий И.В., Дрюкова И.Н. Влияние изменения структуры при увеличении толщины листа на механические свойства и хрупкое разрушение стали, М. Сталь, 1975, №6, с. 548-551.
15. Науменко В.В., Багмет О.А. Влияние ванадия и азота на формирование структуры и свойств рулонного проката классов прочности К60 (Х700), Сталь, 2017, №5, с. 50-55.
16. Голи-Оглу Е.А., Эфрон Л.И., Морозов Ю.Д. Влияние режимов деформации на основных этапах контролируемой прокатки на микроструктуру трубной стали, МЮ – МиТОМ, 2013, №6, с. 9-13.
17. Medina S., Quispe A. Improved model for static recrystallization kinetics of hot deformed austenite in low alloy and Nb/V microalloyed steels // ISIJ International. 2001. V. 41, No. 7. P. 774-781.
18. Гольдштейн М.И., Гладштейн Л.И., Голованенко С.А., Довгопол В.И. И ДР. Карбонитридное упрочнение низколегированных сталей, М. Сталь, 1977, №9, с. 833-837.
19. Полухин В.П., Бернштейн М.Л., Пешков В.А. и др. Влияние режимов контролируемой прокатки на структуру и механические свойства стали. М. – Сталь, 1983, №9, с. 68-71.
20. Специальные стали: Учебник для вузов / Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСиС, 1999 – 408 с.
21. Лякишев Н.П., Литвиненко Д.А., Морозов Ю.Д. Листовая сталь 09Г2ФБ для магистральных газопроводных труб большого диаметра в северном исполнении. – Сталь, 1982, №3, с. 67-70.
22. Голованенко С.А., Фонштейн Н.М., Жукова Е.Н. И ДР. Влияние структуры и морфологии сульфидов на свойства трубной стали 09Г2ФБ, полученной контролируемой прокаткой. Сталь– 1979 – №12 – С. 939-942.
23. Лейтес А.В., Акимова Е.И. Металлографический метод оценки склонности углеродистой стали к образованию кристаллизационных трещин // Сталь – 1974, №4, с. 357-358.
24. Глебов А.Г., Свяжин А.Г. Арабей А.Б. и др. Нитриды титана в трубной стали, Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2012, №7, с. 3-11.

25. Воробьёв Р.А., Сорокина С.А., Ермилин А.С. Влияние дендритной ликвации на структуру и механические свойства горячедеформированных труб из стали 38ХН3МФА // *Металловедение и термическая обработка металлов* – 2016 – №3 – С. 3-7.
26. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур: моногр. / Штремель М.А. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 976 с.
27. Самедов О.В., Соркин Л.П., Жарикова О.Н. Влияние горячей деформации аустенита на характер разрушения перлитной стали // *Известия ВУЗов* – 1987 – №3 – С. 96-99.
28. Атапек Ш.Х., Гюмюш С., Полат Ш. Влияние вязкости матрицы и морфологии зерна на разрушение сталей// *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2012, №12, с. 33-38.
29. Оленин М.И. Разработка научно-технологических основ термической обработки хладостойких перлитных и мартенситных сталей для ответственных конструкций атомной техники: дис. д-ра техн. наук, Санкт-Петербург, 2018.
30. Аксенова С.И., Гольдштейн Л.Я., Гурарий М.М. Влияние структурной полосчатости на хрупкую прочность стали 45ХН2МФА // *Известия ВУЗов*, 1989, №1, с. 108-111.
31. Горынин В.И. Сопротивление хрупкому разрушению марганцево-кремнистых низкоуглеродистых сталей со слоисто-полосчатой структурой // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2009, №3, с. 33-37.
32. Марков С.И., Головин С.В., Казанцев А.Г. и др. Комплексная оценка штрипса импортной поставки 2006 года для труб нефтемагистралей Восточная Сибирь – Тихий океан // XV Международная научно-техническая конференция «Трубы-2007», Челябинск, 2007.
33. И.И. Сафронов. Основы рационального легирования сплавов. Под ред. Д.т.н. В.С. Калмуцкого. 1991 – 279с.
34. А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. N 9. (71), 2010.
35. Лившиц Б.Г. Металлография Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
36. Микроструктура металлических сплавов Р.И. Малинина, В.Ю. Введенский, Е.С. Малютина / *Лабораторный практикум №1* 165. – М.: МИСиС, 2007 – 198 с.
37. С.А. Салтыков. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

38. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения // Литье и металлургия, 2019, № 2, с. 99-108.
39. Анисович А.Г. Резкость изображений в металлографии // Литье и металлургия, 2018, № 3, с. 76-81.
40. Яценко Р. В. Использование современных средств количественной металлографии / Р. В. Яценко, Ю. Ф. Терновой, М. Ю. Яценко // Металлургическая и горная промышленность. – 2012. – № 1. – С. 59-64.
41. Михайлович А.П., Сивкова Т.А., Кадушников Р.М., Сомина С.В. Металлографический анализ: история и перспективы развития // Мир измерений – 2014 – №2, с. 3-9.
42. Кадушников Р. М. Метод топологический реконструкции и количественной оценки размеров зёрен/Р. М. Кадушников, И. Г. Каменин, В. М. Алиевский, С. Е. Черных, С. В. Сомина//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1997. – № 4. – С. 30-34.
43. Черных С. Е. Интегральный и локальный морфометрический анализ графита в чугунах/С. Е. Черных, Р. М. Кадушников, В. И. Гроховский, И. Г. Каменин, В. М. Алиевский//Заводская лаборатория. – 1997. – № 6. – С. 30-33.
44. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. – М.: Либроком., 2010, 280 с.
45. Ильин В.В., Калинин А.Т. Природа науки: Гносеологический анализ. – М.: Высшая школа, 1985, 128 с.
46. Metallography Principles and Practice George F. Vander Voort, ASM International – 1999, 752 p.
47. Клыпин Б.А. Основные направления развития металлографии, М. – Сталь, 1997, №6, с. 67-71.
48. Колпишон Э.Ю., Дурынин В.А., Казаков А.А. Металлографический контроль заготовок ответственных изделий энергомашиностроения и автоматизация методов исследования микроструктуры // Тяжелое машиностроение, 2016, № 11-12, с. 2-8.
49. Копцева Н.В., Чукин М.В., Никитенко О.А. Использование программного продукта Thixomet Pro для количественного анализа ультрамелкозернистой структуры низко- и среднеуглеродистой стали, подвергнутой равноканальному угловому прессованию. – М.: МиТОМ, 2012, №8, С. 12-17.
50. Ереметов А.М., Цепин М.А, Доровских М.А. Опыт использования автоматического анализатора изображений – М. Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1987, №11, с. 98-101.



51. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Сравнение методов распознавания образов в задачах поиска характерных зерновых микроструктур на фотографиях шлифов металлов и сплавов – М. Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2012, №9, с.49-53.
52. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Идентификация параметров сложной зерновой структуры металлов и сплавов – М. Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2013, №3, с.34-38.
53. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В. Возможности цифровой световой микроскопии для объективной аттестации качества металлопродукции – М.: МиТОМ, 2018, №4, С. 15-23.
54. Чугун по ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова – М. Металлургия, 1991, 576 с., Сильман Г.И., Макаренко К.В. Графитизированные чугуны – М.: МиТОМ, 2014, №2, С. 3-10.
55. Компьютерное зрение [Электронный ресурс] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.
56. Исафилов Х.С. Исследование методов бинаризации изображений // Вестник науки и образования, 2017, № 6 (30), том 2, с. 43-50.
57. Соколовская Э.А. О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур // Вопросы материаловедения. – 2013, № 4. – с. 143-153.
58. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, 1. – pp. 62-66.
59. 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.
60. Niblack W. An Introduction to Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ, 1986, pp. 115-116.
61. Николаев Д.П., Сараев А.А. Критерии оценки качества в задаче автоматизированной настройки алгоритмов бинаризации. // Труды ИСА РАН. Том 63.3 – 2013 – с. 85-94.
62. Sauvola J., Petikainen M. Adaptive document image binarization, Pattern recognition, 2000, pp. 225-236.
63. Christian Wolf, Jean-Michel Jolion and Francoise Chassaing. Text Localization, Enhancement and Binarization in Multimedia Documents Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition (ICPR), volume 4, pages 1037-1040, IEEE Computer Society. August 11th-15th, 2002, Quebec City, Canada. 4 pages.
64. Bernsen J. Dynamic thresholding of grey-level images, Proceedings of the Eighth ICPR, 1986, pp. 1251-1255.

65. Цифровая обработка изображений Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
66. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с. ISBN 978-5-89155-201-2.
67. Jinyang Liu, Qingyun Dai The two dimensional microstructure characterization of cemented carbides with an automatic image analysis process // *Ceramics International*. 43 – 2017 – с. 14865-14872.
68. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Васильев С.Г. Использование компьютеризированных процедур для оценки неоднородности структур твердых сплавов// *Металлург*, 2016, №12, с.77-80.
69. А.С. Мельниченко. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. Учебник. – М.: Издательский дом МИСиС, 2009. – 268 с.
70. Никитин Я.Ю. Асимптотическая эффективность непараметрических критериев. М.: Физматлит, 1995. – 240 с.
71. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. – 464с.
72. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. М.: ИЛ. 1960. - 436 с.
73. Штремель М.А., Кудря А.В., Иващенко А.В. Непараметрический дискриминантный анализ в задачах управления качеством // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2006. – Т. 72. – № 5. – С. 53- 62
74. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978, – 560 с.
75. А.Г.Глебов, Е.И.Кузько, Г.В.Пантелеев, М.А.Штремель. Способы описания распределения сульфидов в толстолистовой стали. *ФММ*, 2004, т.97, №4, с.79-87.
76. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Москва – Ижевск, РХД, 2001, 528 с.
77. Myles J.P., Flenley E.C., Fieller N.R.J., Atkinson H.V., Jones H. Statistical tests for clustering of second phases in composite materials. *Phil. Mag. A*. 1995, v.72, N2, p.515.
78. Louis P., Gokhale A.M. Application of image analysis for characterization of spatial arrangements of features in microstructures. *Met.Mat.Trans. A*, 1995, v.26A, N6, p.1449.
79. Препарата Ф., Шеймос М., Вычислительная геометрия. Введение. М., Мир, 1989, 480с.
80. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. Изд. 2-е. / Штремель М.А. – М.: МИСИС, 1999, 384с.
81. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972. – 192с.

82. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия. М.: Наука, 1964, 186с.
83. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
84. Pierre D. Wellner Adaptive Thresholding for the DigitalDesk, Technical Report EPC, 1993, p. 110.
85. Чуриков А.Ю. Метод адаптивной бинаризации в реальном времени изображений со слабой контрастностью // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. – 2010, №10. – с. 74-78.
86. Прэйт У. Цифровая обработка изображений. – Кн. 1,2. – М.: Наука, 2000. – 1024 с.
87. Meng-Ling Feng, Yap-Peng Tan. Contrast adaptive binarization of low quality document images. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University. IEICE Electronics Express, Vol. 1, No. 16, pp. 501-506, 2004.
88. Артюхова О. А., Самородов А. В. Разработка алгоритма автоматической сегментации флуоресцентно-микроскопических изображений препаратов клеточных культур для задач микробиологии // Наука и образование – 2013. – №6 – С. 275-288.
89. Селянинов М.Ю., Чернявский Ю.А. Сегментация дактилоскопических изображений в автоматизированных информационных системах // Информатика – 2005. – №2. – С. 86-92.
90. E. Kavallieratou, and S. Stathis, “Adaptive Binarization of Historical Document Images”, 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR’06), Hong Kong, China, 2006, vol. 3, pp. 742-745.
91. D. Trier, and T. Taxt, “Evaluation of Binarization Methods for Document Images”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, March 1995, vol. 17, no. 3, pp. 312-315.
92. Gatos B., Ntirogiannis K. and Pratikakis I. ICDAR 2009 Document Image Binarization Contest (DIBCO 2009), 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, Computer Society, 2009.
93. Pratikakis, I., Gatos, B., Ntirogiannis, K.: ICDAR 2011 document image binarization contest (DIBCO 2011). 11th International Conference on Document Analysis and Recognition, pp. 1506-1510 (2011)
94. Pratikakis, I., Gatos, B., Ntirogiannis, K.: ICDAR 2013 document image binarization contest (DIBCO 2011). 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, 2013.

95. M. Sezgin, and B. Sankur, "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation", Journal of Electronic Imaging, January 2004, vol. 13, no. 1, pp. 146-168.
96. T. Obafemi-Ajayi, G. Agam, and O. Frieder, "Ensemble LUT Classification for Degraded Document Enhancement", Proceedings of SPIE, 15th Document Recognition and Retrieval Conference, San Jose, California, USA, January 2008, vol. 6815.
97. N. R. Howe, "Document binarisation with automatic parameter tuning", International Journal on Document Analysis and Recognition, Online first DOI: 10.1007/s10032-012-0192-x and DOI: 10.1007/s10032-013-0200-9.
98. S. Ayatollahi and H. Ziaei Nafchi, "Persian heritage image binarization competition (PHIBC 2012)," in First Iranian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA), March 2013.
99. K. Ntirogiannis, B. Gatos, and I. Pratikakis, "An objective evaluation methodology for handwritten image document binarization techniques," in Document Analysis Systems, 2008, pp. 217-224.
100. Sasaki Y. The truth of the F-measure, School of Computer Science, University of Manchester MIB, 131 Princess Street, Manchester, M1 7DN. Version: 26th October, 2007.
101. M. Sokolova and G. Lapalme, "A systematic analysis of performance measures for classification tasks," Information Processing and Management, vol. 45, pp. 427-437, 2009.
102. Levenshtein V. I.: Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals. Sov. Phys. Dokl., 6 (1966) 707-710.
103. I. Pratikakis, B. Gatos, and K. Ntirogiannis, "H-DIBCO 2010 handwritten document image binarization competition," International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition, pp. 727-732, 2010.
104. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-5639-82> Дата обращения 07.07.19.
105. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-3443-87> Дата обращения 15.07.19.
106. URL: <http://law.rufox.ru/view/mashine/101200004803.htm> Дата обращения 03.05.19.
107. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005709> Дата обращения 15.07.19.
108. ImageJ User Guide, 2012, 187 p.
109. Конюхов А.Л., Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: Учебное методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 105 с.
110. Mathcad 15. Наиболее полное руководство / Д.В. Кирьянов. БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

111. Alasdair McAndrew An Introduction to Digital Image Processing with Matlab, School of Computer Science and Mathematics, Victoria University of Technology, Notes for SCM2511, Image Processing 1, Semester 1, 2004.
112. Сизова Т.М. Статистика: Учебное пособие. – СПб.: СПб ГУИТМО, 2005. – 80 с.
113. Прочность сплавов. Часть II. Деформация: Учебник для вузов / Штремель М.А.- М.: МИСиС. 1997. – 527 с.
114. Сталь на рубеже столетий / Под ред. Ю.С. Карабасова. - М.: МИСиС. - 2001. – 664 с.
115. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., Пережогин В.Ю. Неоднородность структур и разрушение твердых сплавов на основе железа и их измерение // Электрометаллургия. 2017. – №6. – с. 32-40.
116. 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.
117. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А., Ле Хай Нинь, Скородумов С.В., Папина К.Б. Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 4 (718). С. 12-18.
118. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., Пережогин В.Ю. Информативность морфологии структур твердых сплавов для прогноза качества наплавов // Москва: Цветные металлы, 2017 – №12 – с. 78-83.
119. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Нго Нгок Ха // Об учете природы объекта при выборе алгоритмов обработки изображений в материаловедении. Сб. тезисов. Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». 22-26 мая 2017 года. – Витебск, Беларусь, УО «Витебский государственный технологический университет».
120. Kazakov A.A., D. Kiselev D.V., Pakhomova O. V. Quantitative description of Microstructure for Structure-Property Relationships of pipeline plate steel // CIS Iron & Steel Review, 2012, pp. 4-12.
121. Abhijit Malage, Priti P. Rege, Manoj J. Rathod Automatic quantitative analysis of microstructure of ductile cast iron using digital image processing, Metall. Mater. Eng. Vol 21 (3) 2015 p. 155-165.
122. E. Girault, P. Jacques, Ph. Harlet Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels, Materials Characterization, 1998, v. 40, pp. 111-118.

123. 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.
124. Казаков А.А., Житенев А.И., Салынова М.А. Оценка крупных одиночных неметаллических включений в стали с помощью статистики экстремальных значений // Черные металлы, 2018, № 11, с. 70-74.
125. 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/ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – Москва, 2019 – 129 с.
126. Штремель М. А. Возможности фрактографии // МиТОМ. 2005. № 5. С. 35–43.
127. Duval L., Moreaud M., Couprie C., Image processing for materials characterization: issues, challenges and opportunities // ESIEE Paris 2014, vol. 2, pp. 12-16.
128. Алифанов А. В. и др. Перспективные материалы и технологии: монография / под ред. В. В. Клубовича; в 2 т. Т. 2. – Витебск: УО ВГТУ, 2017. С. 435-452.
129. Kazuki Shibamura, Yoshiki Nemoto, Takashi Hiraide. Investigation of micro-crack initiation as a trigger of cleavage fracture in ferrite-pearlite steels // ISIJ International. 2017. Vol. 57, No. 2. P. 365-373.
130. Сидоров С. А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах: дис. докт. техн. наук. – М.: МГУЛ, 2007. – 441 с.
131. Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материала: моногр. / Штремель М.А. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 670 с.
132. Горицкий В.М., Лушкин М.А., Горицкий О.В., Шнейдеров Г.Р. Влияние структурных факторов на анизотропию ударной вязкости листового проката из ферритно-перлитных сталей, Деформация и разрушение материалов. 2014. № 8. С. 16-21.
133. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой металлургии». Трубные стали. М.: Металлургиздат. 2012. -696 с.
134. Проскуркин Е. В., Большаков В. И., Дергач Т. А., Петров И. В., Дмитриев В. Б. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надежности труб в осложненных условиях нефтегазодобычи. // Сталь. 2013. № 9. С.60-64.
135. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ле Х.Н., Траченко В.А., Скородумов С.В., Папина К.Б., Чинь Х.Ч. Оценка строения изломов и структур в конструкционных сталях с

использованием компьютеризированных процедур // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 4 (34). С. 44-52.

136. Матросов Ю.И., Холодный А.А., Матросов М.Ю. и др. // Влияние параметров ускоренного охлаждения на микроструктуру и сопротивление водородному растрескиванию низколегированных трубных сталей. Журн. «Металлург», №1, 2015 г.

137. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов/В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

138. Кудря А.В., Штремель М.А. О достоверности анализа данных в управлении качеством // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 7. С. 50-55.

139. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Борякова А.Н. К вопросу о классификации микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей // Metallurg. 2010. №7. С. 45-51.