

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСИС»

На правах рукописи

Кодиров Давронжон Фарходжон угли

Метрологическое обеспечение измерений цифровых изображений структур  
сплавов на основе железа

2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор  
Кудря Александр Викторович

Москва - 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Аналитический обзор литературы.....	8
1.1 Структура, как показатель качества металлопродукции.....	8
1.1.1 Факторы, определяющие неоднородность структуры .....	8
1.1.2 Влияние неметаллических включений и микроструктуры на свойства стали.....	12
1.2 Методы оценки разномасштабных структур сталей .....	19
1.2.1 Тенденция развития металлографии .....	19
1.2.2 Методы качественной оценки, регламентируемые международными стандартами.....	22
1.2.3 Необходимость перехода к цифровизации.....	26
1.3 Практика цифровых измерений структур.....	30
1.3.1 Пробоподготовка шлифов и получение изображений .....	30
1.3.2 Цифровая обработка изображений.....	41
1.3.3 Измерение параметров объектов и подходы к обработки получаемых результатов.....	46
Глава 2. Материалы и методы исследования .....	52
Глава 3. Метрологические факторы цифрового количественного анализа, определяющие воспроизводимость и сопоставимость результатов.....	56
3.1 Влияние разрешения камеры, оптического увеличения и яркости микроскопа .....	59
3.2 Процедуры получения бинарных изображений .....	68
3.3 Применение морфологических и геометрических фильтров.....	80
Глава 4. Цифровой количественный анализ эталонных шкал ГОСТ 5639-82 и 1778-70 с учетом метрологических факторов .....	87
ВЫВОДЫ.....	95
Список использованных источников .....	97

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

$A_s$  – коэффициент асимметрии,

$E_x$  – коэффициент эксцесса,

$T$  – порог бинаризации,

НВ – неметаллические включения,

КСU, КСV – ударная вязкость,

$\sigma_B$  – предел прочности,

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести,

$\delta$  – относительное удлинение

$\times 100^{\times 10}$  – 100 - кратность оптического увеличения, 10 – кратность цифрового увеличения

## ВВЕДЕНИЕ

Структура и излом главные показатели качества стали, потому что именно они, в конце концов, определяют значения сдаточных параметров. На сегодняшний день большинство металлургических предприятий ограничивается качественным описанием структуры при ранжировке выпускаемой продукции. Однако методика сопоставления с эталоном имеет ряд недостатков: субъективность, трудоемкость, не учитывается возможность различий в виде распределения значений параметров геометрии изображений, как эталонных, так и контролируемых структур. Это неизбежно затрудняет процесс управления качеством металла по структуре.

Актуальным и востребованным, в связи с этим является цифровизация: совокупность методов измерения и анализа изображений структур, которые предполагают применение современных цифровых средств регистрации изображений, вычислительной техники, программных решений оптимальных процедур статистической обработки результатов эксперимента. Необходим единый подход к метрологическому обеспечению применяемых процедур, позволяющий сопоставить результаты измерений структур в различных программных продуктах для анализа изображений структур. Очевидно, что при существующем многообразии существующих структур, предлагаемые цифровые решения должны отражать данное обстоятельство. Все это вместе взятое и определило актуальность постановки настоящей работы.

**Цель данной работы:** оценка влияния метрологических факторов на воспроизводимость и сопоставимость результатов компьютерного количественного анализа структур конструкционных материалов.

### **Научная новизна:**

- На основе анализа полей яркости (в 256 градациях серого) ряда изображений структур (феррито-цементитной смеси различной морфологии, литой, зерна феррита и аустенита, частиц неметаллической и графитовой природы) сопоставлены риски получения различных результатов измерения

значений геометрии составляющих структуры (определяющие процессы деформации и разрушения материала), возникающие при неизбежной вариации продолжительности травления, применении различных критериев выбора порогового значения контраста, включая оценку меры риска, обусловленного возможной трансформацией изображения структур при изменении оптического увеличения, различиями в процедурах перевода цветного изображения в оттенки серого и разрешении цифровой камеры. Проведенные оценки учитывали вид распределения значений геометрических параметров составляющих структуры.

- Из сопоставления значений параметров геометрии элементов (и их взаимного расположения – на основе статистики полиэдров Вороного) изображений эталонных структур, содержащихся в нормативных документах (ГОСТ 5639-82 и 1778-70 - шкалы ОТ, НТ и НА) и подобных реальных структур, выявлено существенное различие в статистических характеристиках (коэффициенты асимметрии и эксцесса) распределения исходных значений ( $-0,4 < A_s < 1,6$  и  $-0,9 < E_x < 2,4$ ), что отражает многообразие их статистической природы. Это обстоятельство необходимо учитывать при сопоставлении различных выборок результатов измерений параметров геометрии структур.

- Для изображений неметаллических включений на нетравленном металлографическом шлифе развита «локальная» методика определения порога бинаризации (с привязкой к однотипным элементам структуры), основанная на сопоставлении диаграмм распределения значений интенсивности яркости фона и неметаллических включений.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- масштабы рисков при сопоставлении результатов количественного анализа структур, полученных при различных параметрах цифровых средств и методов измерения структур;

- метрологические факторы цифровой обработки изображений структур, влияющие на получение сопоставимых и воспроизводимых результатов

- мера информативности геометрических и статистических параметров структурных составляющих эталонных изображений ГОСТ 5639-82 и 1778-70.

**Практическая ценность** работы заключается в возможности получения достоверных результатов цифровых измерений структур. Использование полученных результатов будет полезно при разработке метрологически обеспеченных серийных анализаторов изображений структур.

**Достоверность** результатов обеспечивается использованием современной исследовательской техники, массовых цифровых измерений структур в сочетании с использованием разнообразного программного обеспечения и адекватных статистических методов обработки результатов, согласием с результатами, имеющимися в научно-технической литературе по данной проблеме.

**Личный вклад** соискателя состоит в непосредственном планировании экспериментов, участии в них, разработке и апробации цифровых процедур, связанных с измерением структур, обработке изображений эталонных (шкалы ГОСТ 5639-82 и 1778-70) и реальных структур, изучении закономерностей их формирования; оценке влияния метрологических факторов цифровых процедур на результаты измерения структур (с учетом их природы), интерпретации и оформлении результатов в виде научных статей и тезисов докладов различных конференций. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

#### **Вклад соавторов**

Научный руководитель Кудря А.В. – постановка цели и задач научной диссертации, участие в обсуждении результатов исследования и полученных выводов. Соколовская Э.А. – консультант по вопросам методов компьютерной металлографии. Пережогин В.Ю. – помощь в разработке алгоритма по выравниванию освещенности изображений. Босов Е. В. – помощь в статистическом анализе полученных результатов. Тимошенко В. В. – помощь в построении графических зависимостей и гистограмм распределений.

Сергеев М.И. – помощь в обработке изображений эталонных шкал ГОСТ.  
Алексеев В.И. – помощь в реализации алгоритмов цифрового количественного анализа. Буданова Е.С. – пробоподготовка образцов и получение изображений структур.

### **Публикации**

Основные результаты, полученные в ходе научной работы опубликованы в виде 6 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus и WoS, 12 тезисов в сборниках различных конференций.

### **Апробация работы:**

Результаты диссертации были представлены на 4 конференциях: X-ой и XI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», г. Москва, 2021 и 2023 гг, LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» в 2021 г. и XI Международной школе «Физическое материаловедение» (победа в конкурсе в номинации «Молодой ученый») в 2023 г. в городе Тольятти. Также в рамках «Металл-Экспо 2020» в составе коллектива авторов получена Серебряная медаль за разработку импортозамещающих твёрдых сплавов с повышенной износостойкостью и сопротивляемостью преждевременному разрушению для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих сельхозмашин, эксплуатирующихся в абразивной среде. Результаты диссертации были представлены на 4 конференциях: X-ой и XI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», г. Москва, 2021 и 2023 гг, LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» в 2021 г. и XI Международной школе «Физическое материаловедение» в 2023 г. в городе Тольятти.

## **Глава 1. Аналитический обзор литературы**

### **1.1 Структура, как показатель качества металлопродукции**

#### **1.1.1 Факторы, определяющие неоднородность структуры**

Среди множества конструкционных материалов можно выделить главные, обладающие комплексом наиболее важных физико-технических свойств, удовлетворяющих экономическим требованиям и имеющих наиболее широкую область применения. Одним из таких материалов является прежде всего сталь, наиболее полно отвечающая указанным требованиям. Сталь является основным материалом в машиностроении, станкостроении, производстве военной техники, транспортных средств, строительных конструкций, производстве оборудования для пищевой промышленности, упаковочных материалов и др. Именно этим объясняется ее исключительно важная роль в развитии производительных сил и создании материальной базы человечества [1].

Актуальная на сегодняшний день проблема импортозамещения предъявляет высокие требования к качеству сталей. Это касается не только повышения минимальных требований к прочности, пластичности и вязкости, но и учета различных технологических и эксплуатационных свойств (коррозионная стойкость, свариваемость, трещиностойкость, хладноломкость, жаропрочность и другие), которые обеспечивают долговечность выпускаемой металлопродукции. Перечень показателей качества может быть достаточно широк и будет определяться назначением. В свою очередь повышение требований к качеству стали привело к усложнению технологического процесса её получения, который может включать в себя сталеплавильное производство, внепечную обработку, разливку жидкого металла, рафинирующие переплавы, горячую обработку давлением (прокатка или ковка), термическую обработку. Применимо к металлургическому предприятию полного цикла в технологическую цепочку входят также коксохимическое, агломерационное и доменное производства. Различие в

механизмах эволюции структур и дефектов в рамках отдельных траектории технологии - причина появления развитой неоднородности разномасштабных структур и как следствие разброса механических свойств [2].

Многолетние исследования И.Н. Голикова [3] и Чалмерса [4] показали, что практически все формы химической и структурной неоднородности металлов связаны с дендритной кристаллизацией, поэтому изучение природы этого явления имеет важное значение для разработки технологических мероприятий, направленных на снижение микрон неоднородности готового металла. Кристаллизация неразрывно связана с концентрационной неоднородностью вблизи фронта кристаллизации. Кроме того, сам расплав включает в себя как нерастворенные включения, так и возможные газовые пузыри и другие характерные дефекты расплавов, вызывая последующие микрон неоднородности, например, ликвацию [5]. Дендритная ликвация развивается в сплавах, кристаллизующихся в интервале температур вследствие неравновесной кристаллизации. Ликвация приводит к возникновению концентрационной микрон неоднородности: неоднородному распределению легирующих элементов и примесей по сечению кристаллитов твердого раствора или промежуточной фазы (внутрикристаллитная ликвация), а также к появлению в определенных условиях избыточных составляющих эвтектического или перитектического происхождения. Дендритная ликвация особенно сильно влияет на структуру и свойства литого сплава, сказывается на структурных и фазовых изменениях в нем при обработке давлением и термической обработке [6]. Меры предупреждения дендритной ликвации малоэффективны. Полезным является использование слитков малой массы, однако использование исключительно этого метода и, кроме того, не всегда дает положительный эффект, если уменьшение массы слитков приводит к уменьшению числа нагревов под горячую деформацию и, следовательно, к снижению степени диффузионного выравнивания состава. Более эффективным способом уменьшения дендритной ликвации является

термическая обработка при высокой температуре – гомогенизация. Нагрев стали при 1100-1280 °С в течении 2-20 часов в зависимости от марки стали и цели обработки может приводить к существенному уменьшению степени ликвации [7]. Кроме дендритной ликвации в стали при кристаллизации возникает так называемая зональная ликвация – химическая неоднородность в объеме слитка. Дендритная и зональная ликвация как бы противопоставляются друг другу. Если диффузия происходит в жидкой фазе в полной мере, то возникает только зональная ликвация. Если нет диффузии в жидкой фазе, то обязательно будет дендритная ликвация, которая является результатом ограниченной растворимости примесей в твердой фазе или как результат недостаточной диффузии в затвердевшем состоянии [8]. Неравномерное содержание легирующих элементов (а с ними и углерода) в литой структуре приводит к разнице в критической скорости охлаждения аустенита, в результате чего при одной той же скорости охлаждения стали в осях дендритов и между ними можно получить разную структуру. Отсюда влияние ликвации на прокат – структурная полосчатость среднеуглеродистой стали: мартенсит-бейнитная, бейнит-перлитная, феррит-перлитная, и карбидная строчечность в высокоуглеродистой стали. Другая причина полосчатости микроструктуры также связана с ликвацией: размещение легкоплавких неметаллических включений (сульфидов и силикатов) внутри ячейки дендрита и “раскатка их в нить” прокаткой. В месте соприкосновения с силикатом аустенит обогащен кремнием, отчего термодинамическая активность растворенного углерода здесь выше, и он отсюда вытесняется. Это приводит к феррито-перлитной полосчатости, в структуре возникают ферритные строчки с нитью силиката на оси ферритной полоски [9].

Конструкционные стали обычно содержат те или иные примеси, часто не учитываемые, попадающие в процессе выплавки металла из шихтовых, легирующих материалов и раскислителей. Кроме обычных, всегда присутствующих и контролируемых примесей серы и фосфора, а также газов

(кислорода, водорода, азота), могут попадать и такие легкоплавкие металлы, как цинк, олово, свинец, мышьяк, сурьма и другие, которые в большинстве случаев не учитываются и не определяются контрольным анализом плавки. Учитывая достаточно большое количество источников возможного загрязнения сталей различными примесями необходимо не только знать полный состав шихтовых, добавочных материалов и готового металла по обычным элементам и всем возможным примесям, но и применять необходимые меры для получения максимально чистого по вредным примесям металла. Поэтому очень важно знать какое влияние оказывают химические элементы на свойства различных сталей, какие из легкоплавких металлов являются наиболее вредной примесью и присутствие каких примесей и в каком количестве может допускаться без заметного ухудшения их качества, а также какие из примесей наиболее вероятно будут переходить из исходных материалов в металл в процессе выплавки [10]. Одной из самой распространенной и вредной примесью является фосфор. В большинстве случаев фосфор в стали находится в твердом растворе и его влияние на свойства сказывается посредством изменения свойств феррита и аустенита. Вредное воздействие фосфора на свойства может усугубиться из-за сильной склонности его к ликвации [11]. Вред от фосфора всегда в зернограничной хрупкости, но в сталях разных классов он проявляется в разных обстоятельствах: в низкоуглеродистой стали усилении хладноломкости из-за сегрегации на границах зерен (зернограничный излом); в улучшаемых сталях (38ХНЗМФА), особенно в крупных изделиях приводит к отпускной хрупкости. Отчасти действие фосфора нейтрализуется молибденом, который образует в феррите трудноподвижные пары атомов Мо - Р и этим замедляет образование сегрегации. У сурьмы и олова энергия связи с границами зерна еще больше, чем у фосфора, и они точно также образуют сегрегации по границам. Но если фосфор можно удалять, то сурьму и олово при плавке не удастся ни выжечь (средство к кислороду у них меньше, чем у железа) ни

перевести в шлаки (тоже оксиды), ни испарить (у них малая упругость паров). Кардинальное решение – применение первородной шихты прямого восстановления (металлизированных окатышей) [1]. Особое место среди примесей занимает водород. Это связано с его уникальными характеристиками и отрицательным воздействием на свойства и поведение стали в процессе производства и эксплуатации. Высокая подвижность водорода в металлах обуславливает легкость, с которой он может проникать в сталь в самые различные моменты ее получения, обработки и службы в конструкциях. Водород вызывает замедленное разрушение стали при постоянной нагрузке ниже предела текучести, потерю пластических свойств, снижение уровня разрушающих напряжений при средних скоростях их приложения, приводит к появлению дефектов в сталях – образованию флокенов, «рыбьего глаза», «светлых пятен», к ликвационной неоднородности, водородным раковинам, растрескиванию при охлаждении сварных швов и коррозионному разрушению под напряжением. В перечисленных явлениях главной причиной является водород, однако появление упомянутых дефектов реализуется сложным образом при взаимодействии напряжений, вызываемых водородом, с температурными градиентами, структурными превращениями, механическими нагрузками и зависит от свойств и состояния стали [12].

### **1.1.2 Влияние неметаллических включений и микроструктуры на свойства стали**

Повышение качества сталей тесно связано с уменьшением количества неметаллических включений. Их наличие может исключить все усилия, затраченные при разработке состава стали и режимов ее термической обработки [13]. На всех стадиях раскисления стали, охлаждения жидкого металла, кристаллизации и охлаждения твердой стали происходит образование и трансформация неметаллических включений, которые занимают обычно долю  $10^{-3}$  объема в рядовой стали и до  $10^{-4}$  в наиболее чистой

(после рафинирующих переплавов). Включения, образовавшиеся на всех этапах технологического цикла, частично или полностью остаются в стали и оказывают влияние на ее свойства и образование дефектов [14].

По Бельченко Г.И.: «Неметаллические включения в стали разделены на две группы в зависимости от их происхождения: эндогенные и экзогенные. Образование эндогенных неметаллических включений – неизбежный процесс при производстве стали вследствие реакций между ее компонентами, уменьшения растворимости последних с понижением температуры, добавления в сталь раскислителей и десульфуратов. Момент и место образования включений – гомогенное зарождение в результате ликвации примесей или гетерогенное зарождение на поверхности ранее существовавших включений или на поверхности кристаллов – определяются термодинамическими и кинетическими факторами. На состав эндогенных включений влияют состав и технология производства стали (способ выплавки, раскисление, рафинирование). Экзогенные неметаллические включения представляют собой продукты разрушения футеровки сталеплавильных агрегатов и сталеразливочных устройств. Состав экзогенных включений близок к составу огнеупоров или шлаков. Экзогенные включения, попадающие в жидкую сталь, подвергаются активному воздействию ее компонентов и в ряде случаев приближаются по составу к эндогенным» [15]. Классификация неметаллических включений по их химическому составу носит несколько условный характер, т.к. во многих случаях включения не являются однородными, чаще всего они многофазны. Кроме того, и гомогенные включения часто представляют химические соединения и твердые растворы нескольких окислов или окислов и сульфидов, карбонитриды и т.д. По В.И. Явойскому: «включения классифицируются по их происхождению, размерам и характеру залегания в среде кристаллов матричного металла (Рисунок 1): первичные – существующие в исходном расплаве, вторичные – образующиеся при охлаждении расплава, третичные – возникающие в

процессе кристаллизации и четвертичные – выпадающие после затвердевания. Такая классификация весьма полезна как в отношении разработки методов борьбы с неметаллическими включениями в металле на разных стадиях технологии его производства, так и в отношении изучения природы влияния включений на служебные свойства стали» [16].

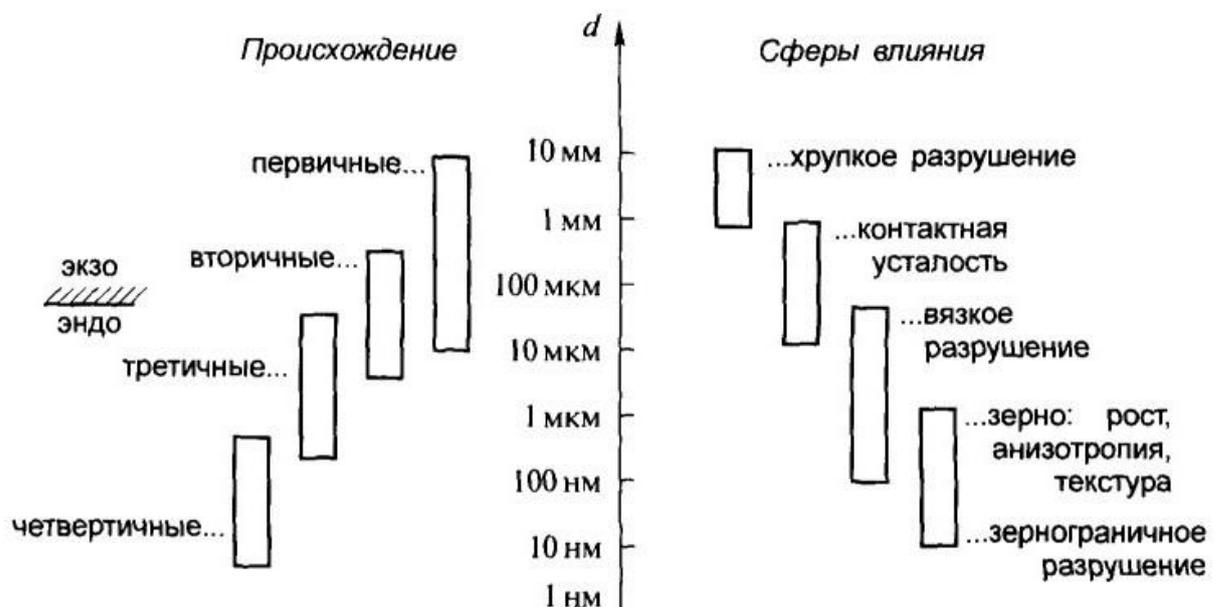


Рисунок 1 – Происхождение равноосных неметаллических включений и сферы их влияния на свойства стали [1]

Существует большое количество работ, посвященных изучению влияния количества, типа, размера и распределения включений на свойства стали. Неметаллические включения в первую очередь играют решающую роль в процессах, связанных с вязким разрушением, усталостью и коррозией. Кроме того, неметаллические включения могут влиять на образование зародышей во время фазовых превращений [17].

Штремель М.А. писал: «При объемной доле  $<10^{-3}$  неметаллические включения любых размеров не дают заметного упрочнения, однако они могут сыграть решающую роль в процессе разрушения. Наиболее важно, что различные виды разрушения обусловлены наличием включений разных размерных классов. Главное отличие хрупкого разрушения от вязкого – автокаталитическое распространение трещины от единственного очага.

Наличие НВ в хрупком изломе случайно и опасно лишь как первичный очаг. При напряжениях  $\sigma < \sigma_T$  расколовшееся или отслоившееся от матрицы включение становится очагом трещины, если критическая интенсивность напряжений  $K_{Ic} < \sigma(2d/n)^{1/2}$ . Поэтому как очаги хрупкого разрушения опасны лишь НВ размером  $d > d_{кр} = \pi/2 (K_{Ic}/\sigma_T)^2$ . Для низкоуглеродистых сталей  $d_{кр} > 100$  мм, а для высокопрочных  $d_{кр} = 2$  мм т. е. разрушение начинается от макроскопических концентраторов напряжений на поверхности. В отличие от хрупкого разрушения вязкое практически всегда контролируется неметаллическими включениями. Начинается вязкое разрушение от более крупных частиц, но в слиянии микротрещин в магистральную трещину участвуют и более мелкие включения – до 0,05 мкм. При этом крупные неметаллические включения определяют стадию зарождения вязкого излома в шейке, а мелкие вносят вклад в работу его распространения» [18,19]. Кроме размера неметаллических включений на процессы разрушения влияет их тип(состав) и распределение. В работах [20-22] показано отрицательное влияние «кучно» расположенных включений на сопротивляемость разрушению конструкционных сталей, а в работе [23] изучено влияние модуля упругости включений на распространение трещин в подшипниковой стали. Помимо этого, неметаллические включения, находящиеся вблизи поверхности детали, как концентраторы напряжений и деформаций могут стать очагом усталостной трещины. Зарождение усталостной трещины – результат многократной знакопеременной микропластической деформации в зоне перегрузки, ширина которой пропорциональна поперечному размеру неметаллического включения. Для каждого напряжения существует минимальный необходимый размер площадки для размножения дислокаций и образования полосы скольжения. Вследствие этого первым очагом усталости становится самая широкая зона – от наибольшего неметаллического включения [18]. В работах [24-27] показано, что усталостные характеристики конструкционных сталей чувствительны как к

размеру включений, так и типам, и распределению. Одной из основных причин отрицательного воздействия неметаллических включений на коррозионную стойкость является различие в электрохимических характеристиках между матрицей и включениями [28]. Показано, что практически все виды неметаллических включений (оксиды [29,30], силикаты [31], сульфиды [32], КАНВы [33]) в разной степени (зависит от марки стали, эксплуатационной среды и формы включений) являются причиной локальной коррозии. В книге [1] указано что: «опасность представляют вытянутые и строчечные включения. Особенно вредна вытянутость включений (силикатов или сульфидов) в прокате. Они делают сталь анизотропной. При растяжении в поперечном направлении ленты включений рано отслаиваются от металла, а перемычки между ними быстро срезаются. Удлинение, сужение и ударная вязкость на поперечных образцах обычно много меньше, чем на поперечных. Когда же растяжение листа двухосное, то ленты и строчки включений ухудшают вытяжку. Помимо этого, строчки сульфидов понижают пластичность на поперечных образцах и вызывают коррозионное расслоение трубных сталей» [1].

Решение проблем неметаллических включений требует обязательного развития теоретических основ их влияния на процессы пластической деформации и разрушение стали. Результаты большого количества работ показывают, что регулирование состава, формы, количества и распределения включений в стали является важным резервом улучшения её свойств. Для направленного изменения параметров неметаллических включений необходимо знание всех аспектов их воздействия на механические, технологические и эксплуатационные свойства, а также на развитие деформации и разрушение стали в различных условиях эксплуатации [34]. Согласно [35]: «Большие затруднения вызывает исследование включений прежде всего вследствие их малого содержания в стали и сплавах. Однако развитие методов металлографического исследования включения на шлифах и

широкое распространение различных других методов исследования включений (петрографического, химического, рентгеновского) позволяют объективно различать качественные и количественные характеристики загрязненности плавок металла, полученного различными технологическими процессами. Проблема изыскания путей снижения загрязненности стали и сплавов включениями оказывается очень сложной не только ввиду того, что на загрязненность металла влияют очень многие элементы технологического процесса производства стали и сплавов, но также из-за трудоемкости оценки включений» [35].

В [1] отмечено, что: «Уровень прочности и пластичности стали определяется ее микроструктурой. В большинстве сталей конечная структура изделия получена в результате превращений высокотемпературной фазы (аустенита) при его охлаждении. Зависимость конечной структуры от скорости охлаждения отображают термокинетические диаграммы. С ростом скорости охлаждения структурные составляющие сменяются в порядке: феррит-перлит-сорбит-бейнит-мартенсит. В этом же порядке твердость и прочность растут, а пластичность падает. А максимум вязкости, чаще всего, приходится на середину этого ряда» [1].

Начало перлитно-аустенитного превращения характеризуется образованием зародышевых центров аустенита. К окончанию превращения после того, как весь перлит превратится в аустенит, сталь состоит из большого количества мелких аустенитных зерен. Дальнейший нагрев (или выдержка) после окончания превращений ведет к росту аустенитных зерен. Рост зерна является естественно протекающим процессом, высокая температура обеспечивает достаточную его скорость [36]. В стали различают два размера зерна: наследственный и действительный. Наследственный (природный) размер зерна аустенита определяется при температуре цементации или другой температуре и характеризует способность зерна к росту. Рост зерна крупнозернистой стали начинает развиваться постепенно с температуры 820

°С, а зерно мелкозернистых сталей до температуры 970 °С упорно сопротивляется росту. Зато выше этой температуры скачком сразу достигает громадных размеров и может обогнать по своей величине зерно крупнозернистой стали. Наследственный природный размер зерна является характерной особенностью данной плавки и оказывает влияние на весь технологический процесс горячей механической и термической обработки. Часто наследственный и действительный размер зерна резко отличаются друг от друга, например кипящая листовая сталь, применяемая для глубокой штамповки, имеет очень крупный наследственный размер зерна и мелкий действительный [37].

По мнению Золоторевского В.С.: «Зависимость предела текучести от размера зерна является важнейшей характеристикой в теории прочности поликристаллов. Границы зерен служат эффективными барьерами для движущихся дислокаций. Чем мельче зерно, тем чаще встречаются эти барьеры на пути скольжения дислокаций и большие напряжения требуются для продолжения пластической деформации уже на начальных стадиях. В результате по мере измельчения зерна предел текучести возрастает. Зависимость нижнего предела текучести от размера зерен описывает уравнение Петча-Холла» [38]:

$$\sigma_{т.н.} = \sigma_i + k_y/\sqrt{d}$$

где  $\sigma_i$ ,  $k_y$  – константы материала при определенной температуре испытания и скорости деформирования,  $d$  – диаметр зерна. В [1] отмечается, что: «Чем больше деформация, тем больше препятствий создают внутри зерна сами следы скольжения и тем меньше влияет размер зерна на сопротивление течению. Поэтому предел прочности зависит от размера зерна феррита слабее, чем предел текучести. Если сталь будет подвергаться термической обработке, то важно оценивать «наследственное зерно аустенита» – то, что получится после нагрева под закалку. У мартенсита очень сложная субзеренная структура, поэтому в ней границы зерна оказывают пренебрежимо слабое

препятствие. Прочность двухфазных структур также не зависит от зерна исходного аустенита, а определяется прежде всего температурой образования (дисперсностью цементита). При вязком разрушении на деформацию до разрушения зерно почти не влияет. Но в условиях, например, хладноломкости транскристаллитное хрупкое разрушение (скол) распространяется по одной кристаллографической плоскости – через все зерно. Чем зерно феррита крупнее, тем сильнее концентрация напряжений от рассекшей его фасетки скола и тем сталь более хрупкая. Так же сильно влияет зерно исходного аустенита при зернограничной хрупкости, вызванной ослаблением границ от собирания на них примесей. Тогда вскрыть грань зерна (зернограничную фасетку) тем легче, чем зерно крупнее (чем больше концентрация напряжений у его границ). Поэтому мелкое зерно желательно при всех структурах, если есть риск хрупкого разрушения» [1].

При исследовании влияния величины зерна на механические свойства все же надо иметь в виду, что изменение определяемых величин связано, в конечном счете, с влиянием границ зерен (приграничных объемов). Однако при принятых методах получения различных величин зерен неизбежно изменение состояния и внутризеренных объемов (формирование субструктуры). Принципиальная трудность оценки влияния величины зерна на свойства состоит в том, что чаще всего неизвестно, в каком соответствии находятся внутризеренные и приграничные объемы для разных образцов одного и того же материала с различной средней величиной зерна. Это положение всегда следует принимать во внимание при обсуждении результатов различных экспериментов по выяснению влияния величины зерна на механические свойства [39].

## **1.2 Методы оценки разномасштабных структур сталей**

### **1.2.1 Тенденция развития металлографии**

Металлография – это металлургическая дисциплина о структурах различных металлов и сплавов и закономерностях структурообразования.Metalлография развивалась главным образом на базе производственного опыта и таких наук, как физическая химия и структурный анализ [40]. Особая роль в становлении металлографии отводится французскому ученому-естествоиспытателю, автору фундаментальных работ («Искусство превращения ковкого железа в сталь» и «Искусство умягчения литого чугуна») в области черной металлургии Рене Антуану де Реомюру [41]. По Беккерту: «Ещё в XVIII веке Реомюр, рассматривая под микроскопом структуру образца, воспроизводил её карандашом на бумаге. Таким образом, он был первым, кто создавал и расшифровывал металлографические изображения. По характеру излома Реомюр разделил чугун, используемый для получения стали, на 7 групп, каждая из которых имела своё назначение» [42].

Счастливец В.М. писал, что: «Основоположниками металлографии в России считаются металлурги П. П. Аносов и К. Д. Чернов: в 1831 г. П. П. Аносов впервые применил микроскоп для изучения структуры сталей, что помогло ему разгадать тайну сверхпрочности булата; в свою очередь открытие полиморфизма железа К. Д. Черновым в 1868 г. ознаменовало рождение металлографии как науки» [43]. В 1896 г. ученик и преемник Д.К.Чернова по Обуховскому заводу А.А.Ржешотарский организовал первую в России металлографическую лабораторию, а в 1898 году опубликовал работу «Микроскопические исследования железа, стали и чугуна», в которой были разработаны методы металлографического исследования стали и чугуна [44]. Ржешотарский писал, что изучение перемены микроструктуры стали имеет для нас двойное значение: «научное, потому что оно поможет нам выяснить много темных фактов и явлений, как, например, причины перемен свойств металла, происходящих при критических температурах или в промежутках между ними во время нагрева и охлаждения стали, а также дать более ясное представление о тех молекулярных и химических превращениях, которые

претерпевает металл в критических моментах; практическое, потому что благодаря применению к микроскопу фотографии, воспроизводящей микроскопические изображения при любом увеличении, можно составить из целого ряда наблюдений нормальную шкалу и, сравнивая с ней исследуемый образец стали, определить: а) какого приблизительно состава сталь; б) в каком состоянии находится металл, т. е. в закаленном, отпущенном или отожженном; в) какая степень закалки, отпуска или отжига, т. е. при какой температуре металл был закален, отпущен или отожжен; г) с пороками ли металл или нет; д) каких можно приблизительно ожидать от этой стали механических результатов; е) при совместном сравнении микроскопических исследований с химическими и механическими - насколько примененная обработка соответствовала данному сорту стали. Таким образом, микроскопический анализ может быть отличным контролем при производстве стали, а для приемщиков послужит указанием настоящих качеств металла - качеств, которые не всегда в состоянии определить один химический анализ и механические испытания» [45]. Также следует отметить значительный вклад в разработку научных основ металлографии таких ученых и металлургов как Курнаков Н.С., Гутовский И.В., Курдюмов Г.В и др.

Первое применение микроскопа для изучения структуры металла зарубежом было сделано англичанином Н. Сl. Sorby в 1863 году. Однако его первые работы не привлекли всеобщего интереса к новому методу исследования; это уже выпало на долю Martens'a, руководителя Королевской Испытательной Станции (Gross-Lichterfelde), который не зная работ Sorby, в 1878 году опубликовал свои первые результаты о микроструктуре железа и стали главным образом практического значения. Дальнейшее свое развитие металлография прежде всего обязана F. Osmond'у, его классический труд: «Methode générale pour l'analyse micrographique des aciers au carbone» — является основным для теории сплавов углерода с железом [46].

Таким образом в начале XX века были сформулированы основные задачи металлографии:

1) Определение отдельных составных частей сплавов (по виду строения), определение их химических и физических свойств, а также и назначения; изучение зависимости между этими последними факторами и свойствами металла в целом.

2) Определение тех изменений в строении, который вызываются различными обработками сплавов (нагрев, закалка, мех. обработка и др.) [47].

Также следует упомянуть о стереометрической металлографии, которая возникла в 1950 и представляет собой систему методов микроскопического анализа, позволяющих по количественным измерениям на плоскостной структуре рассчитать геометрические параметры действительной пространственной микроструктуры металлов и сплавов. По мнению Салтыкова С.А. при оценке микроскопического строения нецелесообразно в качестве критериев выбирать параметры мнимой структуры, которая не существует в реальной пространственной структуре. Поэтому двухмерная структура даже при качественной оценке создает неправильное представление о действительном строении. В свою очередь использование стереометрического метода оценки структуры создаст новые большие возможности при разработке новых металлических материалов и по-новому подойти ко многим практически и теоретически важным проблемам в металловедении [48].

### **1.2.2 Методы качественной оценки, регламентируемые международными стандартами**

Одной из стратегических целей современного экономического развития является формирование глобального рынка, что не может быть достигнуто без образования гармонизированной системы технического регулирования. Причем ключевым фактором в достижении этой цели, а также повышении производительности труда и обеспечении экономического роста в целом

являются стандарты, которые становятся одной из важнейших составляющих обеспечения конкурентоспособности продукции, помогают осуществлять инновации и поддерживают внедрение новых технологий [49]. Поэтому развитие металлографии было тесно связано с появлением организаций по стандартизации и созданием нормативных документов, регламентирующих весь процесс металлографического исследования. Первой такой крупной организацией была ASTM (American Society for Testing and Materials), которая была создана в 1898 г. Чарльзом Б. Дадли, химиком Пенсильванской железной дороги (США). Основная причина создания компании – это частая поломка рельсов, которая тормозила активно развивающееся в то время железнодорожную отрасль. Тогда и был разработан первый стандарт на сталь, из которой изготавливали железнодорожные рельсы. На сегодняшний день количество стандартов превысило отметку 12000 и применяются они в более чем 150 странах. Несмотря на то, что ASTM является международной и общепринятой организацией, соблюдение их стандартов в большинстве стран остается добровольной [50]. В дальнейшем и в остальных интенсивно развивающихся странах начали появляться такого рода организации: DIN (Deutsches Institut für Normung) – 1917 г. Германия; BSI (British Standards Institution) – 1901 г. Великобритания; JISC (Japanese Industrial Standards Committee) – 1921 г. Япония и другие.

Катыхин А.И. и Малиновская А.В. пишут о том, что: «Развитие системы стандартизации, использование международных стандартов – хорошее условие для создания предприятием систем обеспечения качества, которые в будущем повысят конкурентоспособность отечественной продукции. Международные рекомендации по стандартизации не являются обязательными для всех государств. Но соответствие продукции установленным критериям международных стандартов определяет ее конкурентоспособность и стоимость на международном рынке, а также дает возможность выйти российским предприятиям на международный рынок.

Одну из ведущих ролей в менеджменте качества играет Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization – ISO), которая представляет собой всемирное объединение национальных органов по стандартизации. Специализирование международных стандартов проводится в специально подобранных технических комитетах ISO. Каждое предприятие – член ISO может быть представлено в тех технических комитетах, тематика которых соответствует ее интересам. В этой работе могут принимать участие международные организации – как правительственного характера, так и неправительственные» [51].

По мнению авторов [52]: «Первые зафиксированные результаты работы по стандартизации в России относятся к периоду правления Ивана Грозного, когда были стандартизированы размеры пушечных ядер, а для их измерения применялись стандартные калибры – кружала. При Петре I разработаны и применялись технические условия на экспортную продукцию России, соответствующую требованиям западных стран – импортеров. Работы по стандартизации на государственном уровне впервые были начаты лишь в 1923 г., когда было создано Всесоюзное бюро стандартов. В 1925 г. эта организация по стандартизации преобразуется во Всесоюзный комитет стандартов (ВКС) при Совете труда и обороны, основной задачей которого явилось руководство разработкой, утверждение и опубликование стандартов. ВКС возглавил работу по стандартизации всех ведомств СССР. Были введены общесоюзные (ОСТ) и ведомственные стандарты (например, СТ НКЗаг – стандарт Народного Комиссариата заготовок). В 1926 г. были разработаны общесоюзные стандарты на чугун и прокат из черных металлов. В 30-ые годы прошлого столетия работы по стандартизации проводились интенсивными темпами, в результате чего были созданы общесоюзные стандарты на наиболее важные товары народного хозяйства» [52]. А в свою очередь согласно [53]: «В 1940 г. на смену общесоюзным и отраслевым стандартам пришли государственные общесоюзные стандарты – ГОСТы. Индекс ГОСТ с

добавлением порядкового номера и года утверждения – это индекс государственных стандартов. В этом же году вышел указ Президиума Верховного Совета СССР о придании государственным стандартам СССР статуса закона. Всего до 1941 г. было разработано и утверждено 8 600 государственных стандартов. Таким образом, государственная стандартизация в России стала формироваться при советской власти. Причём темпы развития стандартизации соответствовали потребностям страны, необходимости в кратчайшие сроки осуществить индустриализацию. В первые десятилетия советской власти была выстроена эффективная система стандартизации, поддерживавшая высокий уровень ответственности на производстве, позволявшая рационально использовать сырьё, минимизировать потери от брака, освоить новую технику» [53].

Для оценки структуры выпускаемой продукции современные металлургические предприятия используют большое количество как отечественных, так и зарубежных стандартов. Основные из которых:

- ГОСТ 5639 (Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна), в котором описаны следующие методы определения величины зерна: сравнением с эталонными шкалами; подсчета количества; подсчета пересечений границ; измерения длин хорд и ультразвуковой;

- ГОСТ 1778 (Металлографические методы определения неметаллических включений), который распространяется на стали и сплавы и устанавливает металлографические методы определения загрязненности их неметаллическими включениями;

- ГОСТ 5640 (Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского) устанавливает методы оценки в стали нелегированной и легированной структурно-свободного цементита, перлита, полосчатости и видманштеттовой структуры;

- ASTM E112 Стандартные методы испытаний для определения среднего размера зерна;

- ASTM E45 Стандартные методы испытаний для определения содержания включений в стали.

### **1.2.3 Необходимость перехода к цифровизации**

По Вейнбергу: «В XX веке металлография была главным образом качественным методом, весьма полезным при выявлении причин наблюдающихся различий в свойствах материалов. За последнее время наметились значительные изменения в подходе к металлографическим исследованиям. Это связано с пониманием того, что свойства технических сплавов зависят не только от качественных особенностей микроструктуры, но также и от ее количественных характеристик. Гензамером было показано наличие связи между механическими свойствами перлитных сталей и межпластинчатым расстоянием; он также установил зависимость свойств отпущенных мартенситных сталей от среднего расстояния между карбидными частицами. Признание правильности соотношения Холла-Петча, привело к тому, что определение размеров зерен стало существенной частью исследований механических свойств. Поэтому продолжают попытки развития соответствующих методов измерения параметров микроструктуры» [54].

Авторы работы [55] пишут, что: «Уровень разработки теоретических основ и методов обработки изображений, интенсивное развитие аппаратной базы, необходимость снижения «эффекта человеческого фактора» и повышения статистической точности измерений привело к созданию автоматизированных и автоматических программно-аппаратных комплексов для анализа изображений. На сегодняшний день существует огромное количество анализаторов изображений: Image Expert Pro 3, Image J, Siams, Thixomet и другие. Основное преимущество использования систем анализа изображений SIAMS как инструментария цифровой микроскопии – это современный программный исследовательский инструментарий является реализацией совместного проекта специалистов некоторой предметной

области и специалистов-разработчиков программного обеспечения. Анализаторы изображений SIAMS не только позволяют проводить исследования, но и влияют на их организацию, формируя понятие промежуточного результата и новый вид протокола исследований» [55]. В свою очередь, автоматизированный программно–аппаратный комплекс Thixomet SmartDrive установленный на десятках предприятий и компаний для обеспечения объективной количественной оценки всех типов структурных неоднородностей в современных трубопроводных сталях, таких как микроструктурная полосчатость, общая анизотропия, блоки бейнита с пластинчатой морфологией и сегрегация по осевой линии использует панорамный подход, который позволяет выполнять точные измерения с высоким разрешением на достаточной площади для получения адекватной оценки качества конструкции [56]. Основным недостатком всех существующих анализаторов изображений – различный подход, применяемый к получению, обработке и анализу изображений структур. В первую очередь это связано с отсутствием отечественных нормативных документов (стандартов), регламентирующих цифровой анализ изображений.

Стандарты (за исключением технических регламентов и их нормативного обеспечения) стали добровольными документами, и это было воспринято как сигнал к тому, что их разработке не стоит уделять большого внимания, разработка стандарта перестала считаться научно-исследовательской работой. Стандарты на вещества и материалы обычно делятся на две взаимодополняющие группы стандарты технических условий (требований) и стандарты на методы испытаний (измерений, анализа). Если первый вид стандартов существует достаточно длительный период времени, то стандарты на метод испытаний, базирующиеся на прогрессе электроники и информатики требуют частого обновления. Поэтому то обстоятельство, что основная часть стандартов в области металлургии, горнорудной промышленности, химии была разработана еще в Советском Союзе, вызывает

серьезную тревогу, особенно у специалистов в области аналитического контроля. При аккредитации аналитических лабораторий возникает парадоксальная ситуация: с одной стороны, многие лаборатории оснащены самой современной дорогостоящей техникой, а с другой – используют государственные стандарты тридцатилетней давности [57].

Авторы работы [58] полагают, что: «Приведение стандартов на металлографические методы исследований в соответствие с уровнем развития компьютерной микроскопии и количественной металлографии станет мощным стимулом для внедрения современных технологий контроля качества продукции на предприятиях. 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, т. е. для тех задач, с которыми не может справиться ни одна компьютерная система и которые по силам только металловедам профессионалам» [58]. При этом важно, чтобы результаты совершенствования методов, опубликованные в научных статьях, находили отражение в нормативных документах, регламентирующих процедуры контроля. Так, например, по мнению Казакова А.А.: «Важной составляющей количественной металлографии является метрологическая ценность полученных результатов измерений. Все пересмотренные или вновь создаваемые ГОСТ, посвященные количественной металлографии, должны быть проверены в межлабораторных круговых сличениях. Поэтому для каждого типа структур нужно приготовить серию их цифровых изображений, которые будут использованы для процедуры сличения. Цифровая металлография с использованием анализаторов изображений, прошедших межлабораторные круговые сличения, существенно упростит приемо-сдаточные испытания между поставщиком и потребителем металлопродукции, когда технические эксперты

будут сравнивать цифры, характеризующие качество микроструктуры, а не спорить, какому баллу по их субъективному мнению соответствует данная микроструктура» [59]. В свою очередь Анисович А.Г. пишет, что: «основной проблемой является несоответствие увеличения эталонов реальным структурам современных сплавов. Также качество изображений структур, приведенных в стандартах, затрудняет их использование. Общим недостатком рассматриваемых стандартных шкал структур является отсутствие метрики на фотографиях, что не отвечает современному уровню металловедения и доставляет определенные неудобства при сравнении структур. Необходимо пересмотр стандартов, регламентирующих структуру металлов и сплавов. Следует проводить исследования по разработке нового поколения стандартов, опираясь на реальные структуры современных промышленных сплавов. Также требуется разработка новых методов анализа структуры. Прежде всего это касается анализа в программах обработки изображений» [60].

Согласно источнику [61]: «стандартизация должна стать более адаптивной, гибкой и устойчивой через внедрение экспериментальных механизмов: регуляторных песочниц, мульти-стейкхолдерного подхода к использованию стандартов, продвижения международных инициатив, внедрения информационных технологий. Международные и национальные организации по стандартизации разрабатывают подходы и инициативы в области цифровой трансформации по стандартизации. Так, ИСО в 2019 была предложена концепция SMART-стандарта (Standards Machine Applicable, Readable and Transferable) и в рамках Стратегической консультативной группы по машиночитаемым стандартам (Strategic Advisory Group on Machine Readable Standards) была сформулирована классификация машиночитаемых документов, которая позволяет определить уровень цифровизации документа по стандартизации на основе способов его применения. В стратегии развития CEN-CENELEC до 2030 года цифровая трансформация стандартизации является одним из ключевых разделов и направлена на изменение подходов к

созданию и управлению содержанием стандартов, внедрению новых цифровых сервисов и решений для пользователей. В стратегии развития национальной системы стандартизации Германии предусмотрено использование открытых (open-source) стандартов и практик их разработки, а в Белой книге Британского института стандартов предусмотрены концепция и комплекс мер перехода к использованию гибких (agile) стандартов. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что конкуренция за технологическое лидерство требует быстрого изменения институциональных и регуляторных условий распространения инноваций» [61]

### **1.3 Практика цифровых измерений структур**

#### **1.3.1 Пробоподготовка шлифов и получение изображений**

По мнению Вашуль: «Важнейшими инструментами в металлографии являются микроскопы – оптические, электронно-лучевые и ионные, позволяющие получать достаточную информацию о структуре металлических материалов. Для разных микроскопов требуются приготовленные соответствующим образом образцы материала. Для оптической микроскопии на компактном образце подготавливают плоскую, гладкую и хорошо контрастированную поверхность исследования. Поскольку основным способом обработки было и остается шлифование, такой образец получил название шлифа. Вообще металлографический образец, пригодный для микроскопического исследования, можно приготовить без шлифования, например, путем вырезки, микромирования и электролитического полирования. Понятие «шлиф» следует относить к таким компактным образцам для оптической микроскопии, которые в процессе изготовления подвергаются шлифованию и механическому полированию. Затраты на изготовление металлографических образцов возрастают с ростом требований к разрушающей способности для распознавания деталей малой протяженности» [62]. В свою очередь Анисович А.Г. считает, что: «К настоящему времени методы приготовления шлифов претерпели значительную модернизацию, и

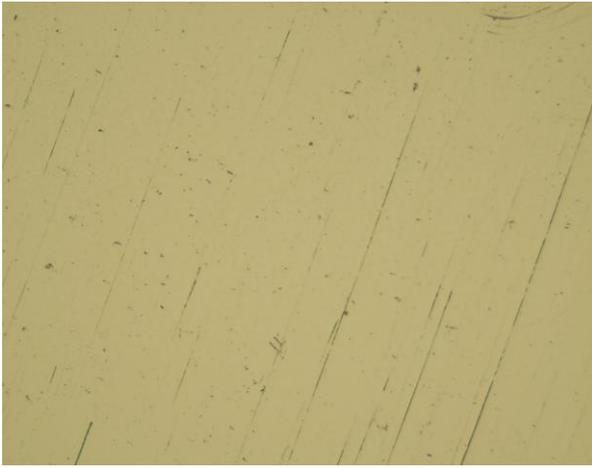
теперь разработаны комплексы лабораторного оборудования для металлографического препарирования. Тем не менее все описываемые в литературе методы, методики и артефакты, внесенные в процессе изготовления образца, актуальны и сегодня, поскольку управляет процессом пробоподготовки человеческий фактор. Современные технические средства металлографии позволяют только до некоторой степени нивелировать его влияние. В связи с этим актуальным является вопрос: как отделить структурные эффекты, несущие полезную информацию, от эффектов, внесенных на этапе пробоподготовки» [63].

Первоначальной процедурой в пробоподготовке является вырезка образцов. Место вырезки образцов для металлографического исследования чрезвычайно важен, поскольку для того, чтобы их интерпретация имела значение, образцы должны быть репрезентативными для исследуемого материала. Намерение или цель металлографического исследования обычно определяют местоположение исследуемых образцов [64] Согласно источнику [65]: «Для установления степени однородности структуры изделия шлифы вырезают из различных мест, располагая их в шахматном порядке по сечению. Если надо изучить закономерность изменения структуры в каком-то направлении, то шлифы вырезают последовательно один за другим в этом направлении. В тех случаях, когда микроструктурный анализ предусмотрен стандартом, размеры шлифов и способ их отбора также стандартизированы. Вырезать их в этом случае можно любым способом, обеспечивающим сохранение структуры металла. Образцы для микроскопического исследования могут иметь различную форму, определяемую характером изделия и задачами исследования» [65].

Шлифование и полирование образца должны осуществляться таким образом, чтобы на его поверхности оставался минимальный слой деформированного металла. На поверхности шлифа не должно быть дефектов. В процессе приготовления шлифа не должно происходить выкрашивание

неметаллических включений, карбидных и других фаз. Кроме того, поверхность шлифа должна быть достаточно плоской, чтобы его можно было рассматривать при больших увеличениях. Большое значение при шлифовании имеет величина давления, приложенная к образцу. Давление должно быть достаточно высоким, чтобы обеспечить резание абразивом и нужную скорость шлифования. Недостаточное давление создает условия трения, не обеспечивающие эффективного удаления металла. В то же время чрезмерное давление приводит к нежелательному выделению тепла и вдавливанию абразивных частиц в металл. Важное условие получения качественных шлифов – тщательное соблюдение чистоты при полировании [66].

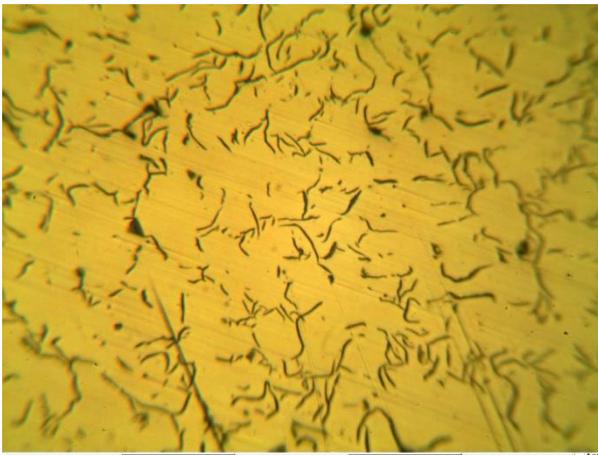
Артефакты или дефекты (рисунок 2), возникшие в результате пробоподготовки вносят значительный вклад в получение объективных результатов при количественном анализе структур. К общепринятым дефектам шлифовки обычно относят «хвосты комет». Как правило, этот эффект создается частичками образца, которые «перекатываются» по поверхности образца в процессе шлифовки. Иногда такие дефекты могут быть приняты за включения упрочняющих или избыточных фаз. Присутствие царапин, сформировавшихся на различных этапах приготовления шлифа создает трудности при компьютерной обработке изображений. Как правило программы обработки изображений построены на сравнительном анализе яркости различных участков структуры. Поэтому царапины воспринимаются программой как отдельные объекты или границы фаз. Довольно частым явлением бывает неодинаковая степень обработки различных участков шлифа, например заполировка и завалы краев. Данный вид дефекта приводит к расфокусировке этих областей и как следствие к потере информативной составляющей. Кроме перечисленных артефактов существует большое множество других (пыль [67], нитки и волокна [68], смазывание, пятна жидкостей и другие), которые в разной мере могут повлиять на дальнейший металлографический анализ [63].



а)



б)



в)



г)

а) царапины; б) «хвосты комет»; в) завал краев; г) «смазывание» [69]  
Рисунок 2 – Пример некоторых видов дефектов пробоподготовки

Беккерт М считает, что: «В настоящее время структуру чаще всего выявляют путем химического или электролитического травления, при этом реактив взаимодействует с полированной поверхностью шлифа. При травлении поверхность шлифа растворяется или окрашивается тонким слоем продуктов травления. Под действием реактивов в металлах и сплавах прежде всего растворяются выделения с наибольшей свободной площадью контакта реактив-фаза. Каждая фаза растворяется по-разному: одна структурная составляющая растворяется в реактиве быстрее, другая медленнее. Структура становится видимой, при этом отражательная способность шлифа испытывает изменения, которые внутри каждой фазы одинаковы независимо от условно

ориентированного воздействия реактива. Возникает рельеф, который состоит из выступающих фаз. Благодаря этому становятся видимы контуры структурных составляющих» [70]. Время травления зависит от применяемого увеличения: для малого увеличения следует травить дольше, чем для большого. В ряде случаев признаком протравленности является слабое потускнение полированной поверхности. Некоторые сплавы, имеющие структуру однородных растворов, и ряд металлов сохраняют блестящую поверхность и в травленном виде. Время травления таких сплавов и металлов устанавливается в индивидуальном порядке под просмотром под микроскопом, а для однотипных образцов – по секундомеру [71].

С травлением могут быть связаны и появление артефактов, которые могут повлиять на результаты исследования. Поэтому фиксирование ошибок пробоподготовки является также важной частью металлографического исследования. Примерами неудачного подбора травителя являются такие дефекты, как цвета побежалости на образце и в некоторых случаях ямки травления [72]. Травление является одним из факторов, определяющих сопоставимость результатов измерения геометрии структур [73]. Выбор травителя и время травления необходимо подбирать в зависимости от исследуемого объекта и поставленных задач, важно чтобы данные параметры были регламентированы. Так, например согласно [74] «отклонение в измерениях произойдет в том случае, если подготовка образца не отвечает требованиям; для наилучшей точности измерения и отсутствия отклонения следует выявлять истинную структуру и полностью очерчивать границы зерна; по мере того, как увеличивается процент неочерченных границ зерна, отклонение растет, а точность, повторяемость и воспроизводимость становятся хуже». В работе [75]: «было оценено влияние времени травления на геометрию структуры твердого сплава на основе железа и вольфрама. Показано, 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 микро-структуры, когда оцениваются ее количественные характеристики. Масштаб влияния данного фактора, по-видимому, будет определяться морфологией конкретной структуры»

По Анисович А.Г.: «Помимо развития методов пробоподготовки материалов, важным является выбор соответствующего исследовательского оборудования. Зачастую неправильный выбор прибора для анализа материалов ведет или к неправильной трактовке результатов, или же к отсутствию возможности любой трактовки. Особенно это проявляется применительно к сложному исследовательскому оборудованию, которое обслуживает зачастую не специалист-материаловед, а оператор, знающий прибор, но не владеющий навыками анализа материалов» [76]. А по Брандону Д.: «В общем случае исследование микроструктуры основано на взаимодействии некоторой формы излучения с тщательно подготовленным образцом. Обычно для этого используют видимый свет, рентгеновское излучение или пучок высокоэнергетичных электронов. Эти формы излучения соответствуют методам оптической микроскопии, рентгеновской дифрактографии и электронной микроскопии. На рисунке 3 представлены основные методы исследования структур и их пределы пространственного разрешения. Появившийся в результате взаимодействия сигнал обрабатывают для получения качественной или количественной информации. Как правило, микроскоп создает двумерное изображение образца, а методы микроанализа позволяют получить спектр, в котором интенсивность сигнала представлена в виде зависимости от энергии или длины волны. Сигнал может также иметь вид дифракционной картины или дифракционного спектра» [77].



невидимой части спектра – ультрафиолетовых и инфракрасных; при использовании видеокамеры фиксировать быстро изменяющиеся структуры. Фотографирование осуществляется либо с помощью фотокамеры, которая является частью самого микроскопа, либо с помощью специальной фотонасадки [65].

Согласно работе [79]: «Большинство фотографий микроструктур есть двумерное отображение наблюдаемой «сцены», возникающее как результат регистрации лучистой энергии, исходящей из наблюдаемой «сцены» (рисунок 4), с помощью некоторого устройства – например сенсора (или совокупности сенсоров). Регистрируемый сенсором сигнал возникает в результате взаимодействия источника «освещения» с элементами изображаемой «сцены» в условиях эффектов отражения и/или поглощения энергии этого источника. Примером первого вида может быть свет, отраженный от поверхности предметов. Второй вид взаимодействия имеет место, например, при пропускании рентгеновских лучей. Сама идея преобразования очень проста: падающая энергия преобразуется в напряжение благодаря сочетания материала, обладающего чувствительностью к интересующему виду излучения, и приложенной к нему электрической энергии. В ответ на энергию внешнего излучения такой чувствительный элемент выдает сигнал выходного напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму» [79].

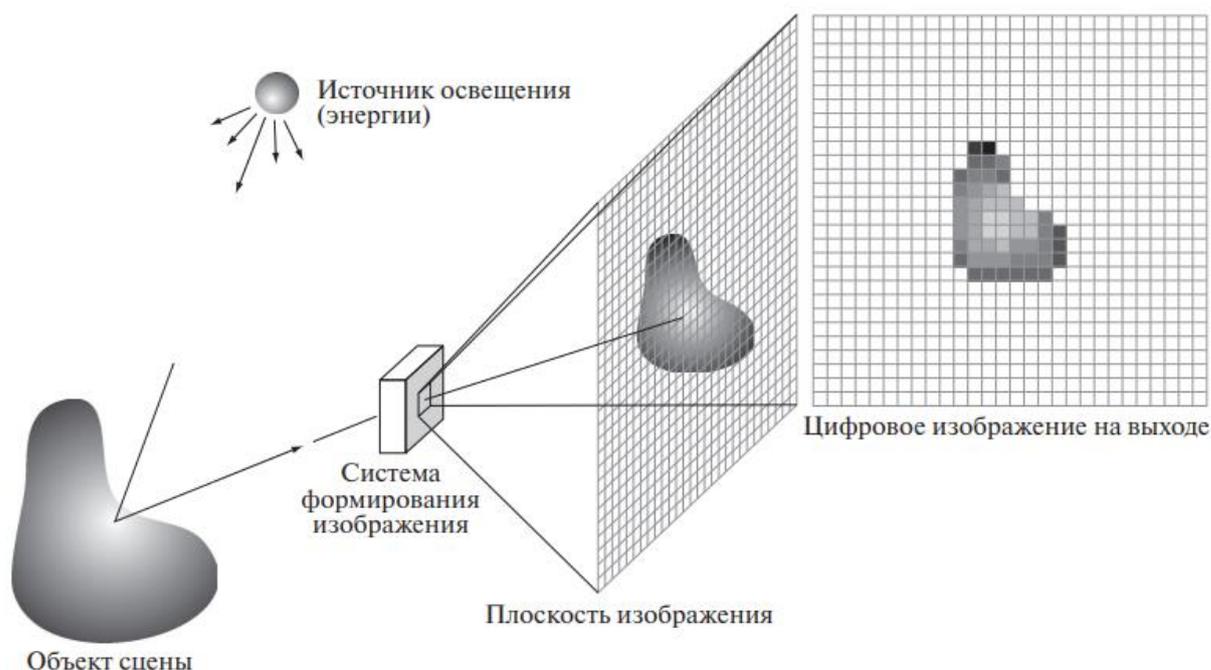


Рисунок 4 – Процесс регистрации цифрового изображения (пример) [79]

Полученное изображение представляется в виде двумерных массивов точек. Точка на 2-D сетке называется пикселем (pixel). Это название является сокращением понятия picture element (элемент изображения). Пиксель представляет собой энергетическую освещенность в соответствующем месте сетки. В простейшем случае пиксели располагаются на прямоугольной сетке. Положение пикселя задается с помощью общепринятого обозначения для матриц. Каждый пиксель представляет не просто точку на изображении, а скорее прямоугольную область, элементарную ячейку сетки. Значение, соответствующее пикселю, должно представлять среднюю энергетическую освещенность в соответствующей ячейке надлежащим образом [80].

Формирование цветного изображения возможно благодаря цветовой модели (называемой также цветовым пространством или системой цветов) назначение которой состоит в том, чтобы сделать возможным описание цветов некоторым стандартным, общепринятым образом. Большинство современных фото- и видеокамер применяют модель RGB, основанную на всесторонних экспериментах [81,82] в результате которых установлено, что все 6—7

миллионов колбочек (рецепторы, отвечающие за восприятие цветов) человеческого глаза могут быть разделены по их восприимчивости к спектральному составу света на три основные группы, которые приблизительно соответствуют чувствительности к красному (R), зеленому (G) и синему (B) цветам. Остальные цвета получаются путем смешивания в определенных пропорциях основных 3 цветов (рисунок 5). Камеры, использующую модель RGB оснащены 3 фильтрами, которые фиксируют интенсивность от 0 до 255 (возможно и большее количество оттенков цвета, однако общепринятым является применение 8-битового формата для каждой из компонент) каждого из основных цветов. На выходе получается матрица, в которой каждый пиксель имеет три значения интенсивности [83]. Для упрощения дальнейшей обработки цветное изображение обычно переводится в полутоновое (псевдоцвета).

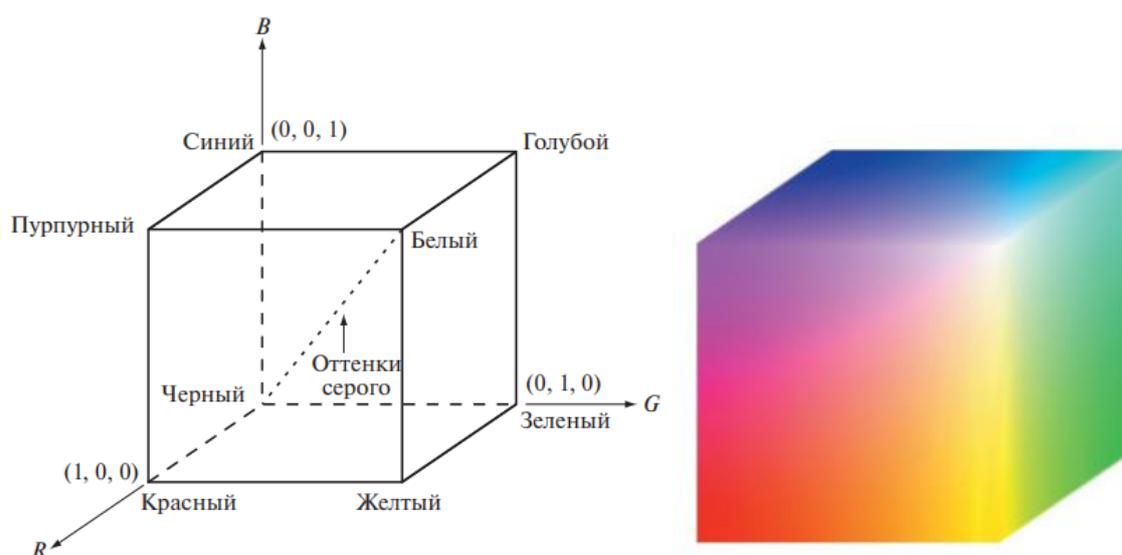


Рисунок 5 – Схематическое изображение цветового куба RGB [79]

Камера должна подбираться исходя из поставленной задачи. Черно-белая или цветная, высокочувствительная или нет, с разной степенью разрешения и управления. Камера в значительной степени определяет качество изображения, передаваемого в компьютер. Неверно подобранная камера может стать причиной некачественного изображения. [84]. Основной

характеристикой качества цифрового изображения является разрешение. Бытует мнение, что разрешение – это размер изображения, определяемый количеством пикселей. Однако согласно международным стандартам [85] данное определение является не совсем корректным. Следует учитывать число пикселей на единицу длины (размер пикселя), которое зависит не только от количества пикселей в матрице, но и от размеров самой матрицы. Размеры изображения сами по себе полезны только для сравнения возможностей получения изображений.

На сегодняшний день в мире широко используется несколько десятков различных форматов файлов для хранения и передачи цифровых изображений. В первую очередь это связано с необходимостью хранения в заголовке цифрового изображения различных типов дополнительных данных, в зависимости от различных задач, устройств ввода и предметных областей. Кроме непосредственно самого массива пикселей в файле изображения могут храниться размеры, а также описание структуры пикселя с указанием его типа и битности. Авторы работы [86] полагают, что: «многие разработчики систем для работы с изображениями стремятся встроить возможность сжатия данных непосредственно в формат файла изображений. Отчасти это связано с тем, что так удобнее пользоваться файлами изображений, не вызывая внешних архиваторов. Отчасти – с тем, что изображение, как пространственно распределенный тип данных, обладает некоторой дополнительной специфической избыточностью по отношению к любым произвольным числовым или текстовым данным, что позволяет строить специализированные алгоритмы сжатия изображений, более эффективные чем общепринятые. Наиболее распространёнными на сегодняшний день являются следующие форматы цифровых изображений: BMP, PCX, TIFF, GIF, JPEG. Основные характеристики этих форматов приведены в таблице 1» [86].

Таблица 1. Файловые форматы цифровых изображений

Формат	Макс. число бит/пикс.	Макс. число цветов	Макс. размер изображения, пикс.	Метод сжатия	Хранение нескольких изображений
BMP	24	16777216	65535×65535	-, RLE	-
PCX	24	16777216	65535×65535	RLE	-
GIF	8	256	65535×65535	LZW	+
TIFF	24	16777216	всего 4294967295	-, LZW, RLE	+
JPEG	24	16777216	65535×65535	JPEG	-

Примечание: RLE – Run Length Encoding (алгоритм кодирования цепочек); LZW – метод сжатия без потерь, предложенный Лемпелем, Зивом и Уэлчем; JPEG – метод сжатия с потерями, созданный Joint Photographic Experts Group.

Применение форматов, которые основаны на методе сжатия с потерями может привести к получению изображение, отличающегося от оригинала. Значение интенсивностей RGB-цвета пикселей может измениться в зависимости от выбранного метода сжатия. Человеческому глазу трудно будет уловить различия, но данный фактор может повлиять на результаты цифрового анализа изображений [87].

### 1.3.2 Цифровая обработка изображений

Одна из основных целей обработки изображений повышение его качества, которое достигается двумя методами: реставрацией (исправлением) изображений и их улучшением. Под реставрацией обычно понимают процедуру восстановления или оценивания элементов изображения, целью которой является коррекция изображений и наилучшая аппроксимация идеального неискаженного изображения. Для улучшения изображений используется комплекс операций, призванный улучшить восприятие изображения наблюдателем или же преобразовать его в другое изображение,

для упрощения дальнейшей компьютерной обработки. В настоящее время не существует общей теории улучшения изображений. Это объясняется тем, что до сих пор еще не выработан общепринятый стандарт качества изображения, который мог бы послужить критерием при проектировании систем улучшения изображений [88]. В данном разделе представлены основные методы обработки изображений, которые необходимы при проведении цифрового количественного анализа структур.

В работе [89] отмечается, что: «Цифровые изображения, сформированные различными оптико-электронными системами и зарегистрированные разными приемниками, искажаются под действием помех различного характера. Так, искажения изображения вносятся всеми компонентами изображающего прибора, начиная с осветительной системы (например, неравномерность освещенности предмета). Оптическая система вносит искажения, которые называются абберациями, а электронные приемники излучения, например ПЗС-матрицы, – электронный шум. Все помехи, вносимые в цифровое изображение, принято называть шумом. Шум затрудняет как визуальный анализ изображений человеком, так и их автоматическую обработку. Многие методы улучшения изображений уменьшают влияние шума, внесенного в процессе формирования цифрового изображения. Выбор конкретного фильтра и его параметров зависит от задачи и условий ее реализации, например скорости вычислений. Арифметический усредняющий фильтр помимо подавления шума искажает резкие границы и размывает мелкие детали изображения, но он самый быстрый. Фильтр Гаусса меньше размывает мелкие детали и лучше убирает шум, достаточно быстр, если коэффициенты вычисляются один раз. Медианный фильтр резких границ не искажает, убирает мелкие детали, изображение становится более однородным» [89].

Одной из распространенных проблем при обработке изображений является наличие неравномерности освещения изображения. Причиной

появление неравномерности может быть плохая пробоподготовка, особенность применяемых микроскопов и фотокамер. Применение глобальных алгоритмов повышения качества изображений (изменение контраста, преобразование гистограмм изображения и т.д.) может не дать желаемого результата, т.к. при изменении яркости всего изображения, которое происходит при отработке этих алгоритмов, изначально светлые участки могут оказаться совсем засвеченными. В таких сложных случаях можно применить так называемые продвинутые алгоритмы, например Retinex и его модификации. Алгоритм Single-Scale Retinex (SSR) выравнивает освещенность изображения, сохраняя локальный контраст в плохо и ярко освещенных областях. Алгоритм SSR можно применить к исходному изображению несколько раз с разными параметрами фильтра Гаусса и вычислить взвешенную сумму яркостей каждого пиксела, тогда получится алгоритм Multi-Scale Retinex (MSR) [89-91].

Сегментация позволяет выделить участки изображения, которые являются однородными; эта операция обеспечивает разбиение изображения на области одинакового вида. Сравнительно не трудно определить однородность в категориях уровней серого тона или цвета. Значительно сложнее определить, что именно имеется в виду под «однородной текстурой». В принципе сегментацию можно осуществлять двумя способами. Можно считать, что характеристики областей нам известны заранее, но можно определять эти характеристики и в процессе обработки. Более трудная задача, если требуется разделить изображение на две группы областей, в каждую из которых входят области одного цвета, причем сами цвета заранее не заданы. В таком случае приходится либо изучать статистические характеристики изображений и отыскивать моды распределения, либо проверять отдельные группы пикселов, выясняя, образуют ли они однородную область. На сегодняшний день существует большое количество методов сегментации, самые



тривиальна: можно взять любое значение между «пиками». На практике имеет место более сложный случай: изображение зашумлено, кроме того, как для объектов, так и для фона характерен некоторый разброс яркостей. В результате функция плотности распределения интенсивностей размывается» [93]. Именно этим объясняется существования большого количества методов бинаризации, продолжающиеся поиски новых методов и попытки совершенствования имеющихся.

Одним из распространенных методов глобальной бинаризации является метод Оцу [94]. По Гонсалесу: «Этот метод является оптимальным в том смысле, что он максимизирует межклассовую дисперсию – хорошо известную характеристику, применяемую в статистическом дискриминантном анализе. Основная идея состоит в том, что если классы хорошо разделяются по порогу, они должны отличаться значениями яркости своих пикселей, и наоборот, порог, который хорошо разграничивает классы по яркости, будет наилучшим. Помимо оптимальности, метод Оцу имеет то важное свойство, что он целиком основан на вычислениях, выполняемых над гистограммой изображения, легко вычисляемым одномерным массивом» [79].

Статистические характеристики, необходимые для построения алгоритмов обработки, могут быть оценены только по самому изображению. При применении глобальных методов бинаризации считается что они неизменны по всему изображению. Однако во многих практических случаях яркость не является однородной, также не учитывается наличие двух и более разных объектов на изображении. В этом случае методы глобальной бинаризации оказываются неработоспособными или не обеспечивают требуемое качество. Для нестационарных изображений используются локальные методы бинаризации. Простейший подход к построению таких процедур заключается в том, что всё изображение разбивается на небольшие фрагменты, на каждом из которых оценивается «локальные» характеристики изображения. Каждый фрагмент обрабатывается независимо, как отдельное

изображение с однородными свойствами [95]. Существует большое количество методов локальной бинаризации: Брэдли-Рота, Ниблэка, Sauvol [96], Яновица-Брукштейна [97] и другие.

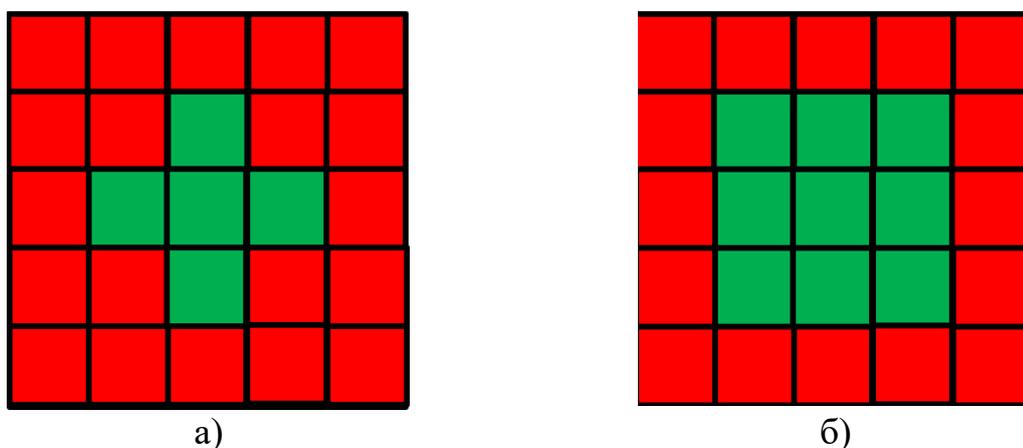
Локальный метод бинаризации Брэдли-Рота является улучшенным вариантом метода Уэллнэра [98]. Основная идея алгоритма заключается в том, что каждый пиксель сравнивается со средним значением окружающих его пикселей. Реализация метода происходит в два этапа. На первом этапе из исходного изображения формируется интегральное, путем вычисления среднего значения для массива пикселей определенного размера. На втором этапе вычисляется среднее значение каждого пикселя интегрального изображения, а затем выполняется сравнение. Если значение текущего пикселя на определенный процент меньше этого среднего значения, то ему присваивается значение черного, в противном случае белого [99]. Метод Ниблэка основан на расчете среднего значения и стандартного отклонения пикселей, окружающих пиксель, для которого находится порог бинаризации [100,101]. Переменными параметрами в данном методе являются размер локальной области и коэффициент  $k$ . Основные недостатки локальных методов бинаризации: плохая стыковка обработанных фрагментов (на полученном изображении образуются заметные скачки яркости по линиям «швов») и необходимость эмпирического подбора вводимых переменных.

### **1.3.3 Измерение параметров объектов и подходы к обработки получаемых результатов**

При анализе изображения наибольший интерес представляет получение описания того, что на нем представлено; в этом и заключается проблема распознавания зрительных образов. Это описание можно построить просто в отнесении изображения к одному из нескольких заранее указанных классов, измеряя различные параметры изображения в целом. С другой стороны, в это описание могут входить свойства представленных на изображении объектов и связи между ними. Для получения такого описания обычно необходимо четко

выделить объекты на изображениях и дать оценку их свойств (топологии, размера, формы и т.д.), а также их взаимосвязей [102].

Важным параметром при измерении объектов на цифровых изображениях является окрестностное соотношение, поскольку оно определяет то, что будет рассматриваться как связная область и, следовательно, как цифровой объект. У двумерного изображения существует два возможных способа определения соседствующих пикселей. Можно рассматривать пиксели как соседние элементы либо когда они имеют общее ребро, либо когда они имеют по меньшей мере общий угол (рисунок 7). Таким образом, пиксель имеет четыре или восемь соседних элементов и вводится понятие 4-х или 8-ми компонентной окрестности (связности). Оба типа окрестности необходимы для правильного определения объектов как связных областей. Область или объект называется связным, когда можно достигнуть любого пикселя в области, переходя от одного соседнего пикселя к следующему [80].



а)

б)

а) четырехсвязность; б) восьмисвязность

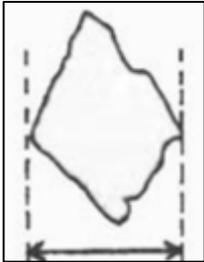
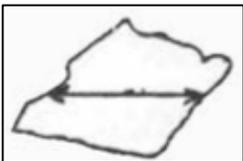
Рисунок 7 – Окрестностное соотношение пикселей

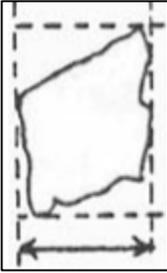
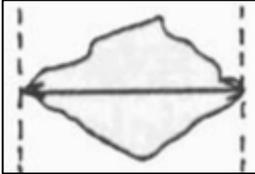
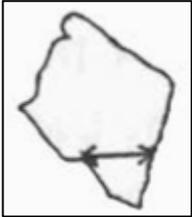
Количественная оценка изображений структур невозможна без определения параметров объекта и всего изображения в целом, которые необходимы рассчитывать исходя из поставленной задачи. Основные геометрические параметры объекта – это его длина ( $L$ ), ширина ( $B$ ), площадь ( $S$ ), периметр ( $P$ ) и вытянутость ( $L/B$ ). В свою очередь для всего изучаемого

поля зрения рассчитываются объемная доля, плотность, средние значения параметров объектов и их распределение, неоднородность размещения, анизотропия и другие. Все расчеты данных параметров проводятся в пикселях, дальнейший перевод в размерности СИ производится при помощи масштабного коэффициента, который зависит от разрешения изображения.

Размер сферической однородной частицы однозначно определяется при помощи расчёта ее диаметра. Такой подход может быть целесообразным для анализа НВ в стали, однако чаще всего различные структурные составляющие (например, зерно, графитовые включения и частицы второй фазы) имеют неправильную форму. Для частиц неправильной формы конечный размер обычно зависит от метода измерения, следовательно, методика определения размера частиц должна дублировать процесс, который требуется контролировать. Примеры таких методов, применяемых на сегодняшний день приведены в таблице 2 [103].

Таблица 2. Методы определения размеров частиц неправильной формы.

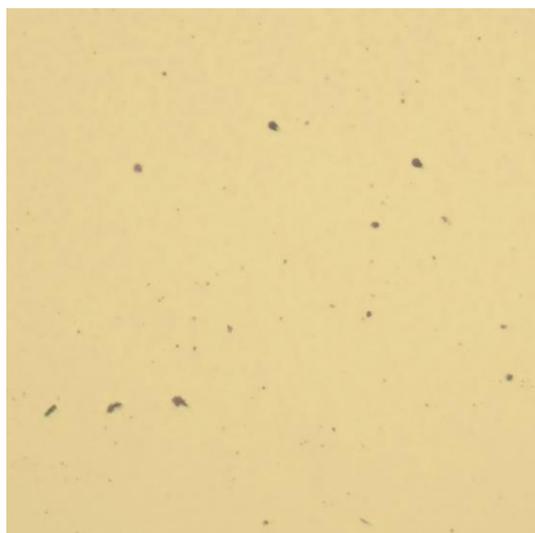
<p>Диаметр Ферета (<math>D_F</math>)</p>	<p>расстояние между двумя параллельными касательными на противоположных сторонах изображения случайно ориентированной частицы (иногда используется среднее значение по многим ориентациям)</p>	
<p>Диаметр Мартина (<math>D_M</math>)</p>	<p>диаметр частицы в точке, которая делит случайно ориентированную частицу на две равные проецируемые области (иногда используется среднее значение по многим ориентациям)</p>	

Ширина ( $B$ )	минимальный диаметр Ферета	
Длина ( $L$ )	диаметр Ферета перпендикулярный ширине (в некоторой литературе имеется в виду максимальный диаметр Ферета)	
Длина хорды ( $CL$ )	расстояние пересечения частицы, начинающееся со случайно выбранной точки по периметру в случайном направлении	

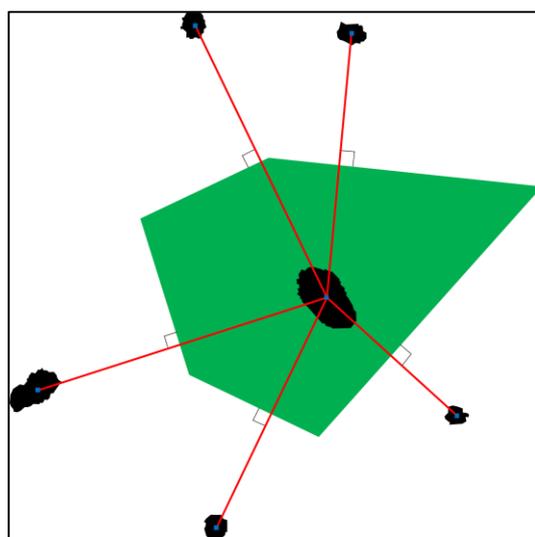
Частицы, имеющие одинаковый диаметр, могут иметь совершенно разную форму, поэтому данные параметры следует применять комплексно. Когда линейный размер измеряется параллельно в некотором фиксированном направлении (диаметр Мартина и Ферета) распределение размеров этих измерений отражает распределение размеров проецируемых областей частиц. Одна частица может иметь бесконечное число статистических диаметров, поэтому эти диаметры дают адекватную оценку, когда было измерено достаточное количество частиц [104].

Актуальным является оценка неоднородности размещения частиц в поле зрения, например определение размещения НВ на шлифе, т.к. кучность и разреженность в их размещении определяет благоприятные условия для образования вязкого излома и пластического течения соответственно [105]. Существует немало методов для проведения такого рода анализа: евклидово минимальное остовное дерево [106], триангуляция Делоне [107],  $k$ -ближайших соседей [108], диаграммы Вороного [109] и другие. Последний из методов является довольно ценным эвристическим приемом, используемым при разработке геометрических алгоритмов. Суть алгоритма состоит в

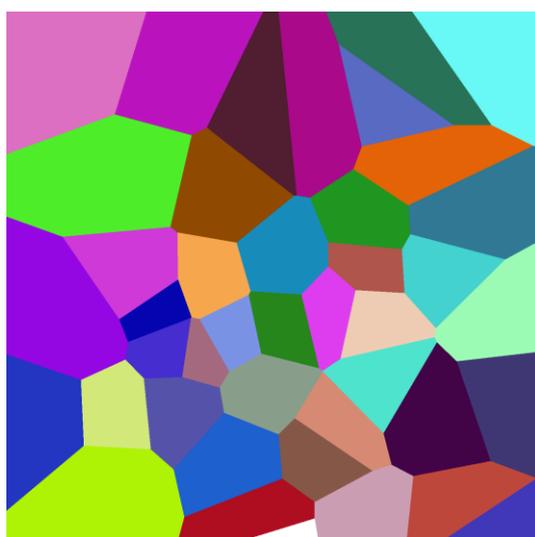
следующем: пусть имеются две точки, множество остальных точек, более близких к первой, чем второй есть не что иное как полуплоскость, определяемая прямой, перпендикулярной отрезку между двумя точками и делящей его пополам; множество точек более близких к первой, чем к любой другой точке получается в результате пересечения полуплоскостей; это множество является выпуклой многоугольной областью, называемой многоугольником Вороного; точки которые имеют общие грани многоугольников являются соседними (рисунок 8) [110]



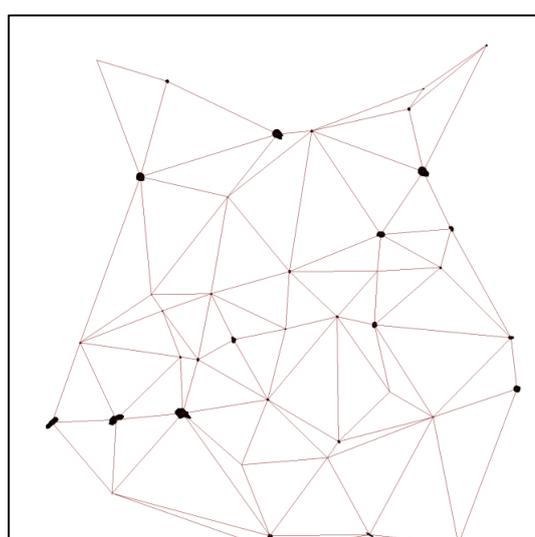
а)



б)



в)



г)

а) исходное изображение; б) построение серединных перпендикуляров; в) многоугольники Вороного для определения ближайших соседей; г) расчет расстояний между ближайшими соседями

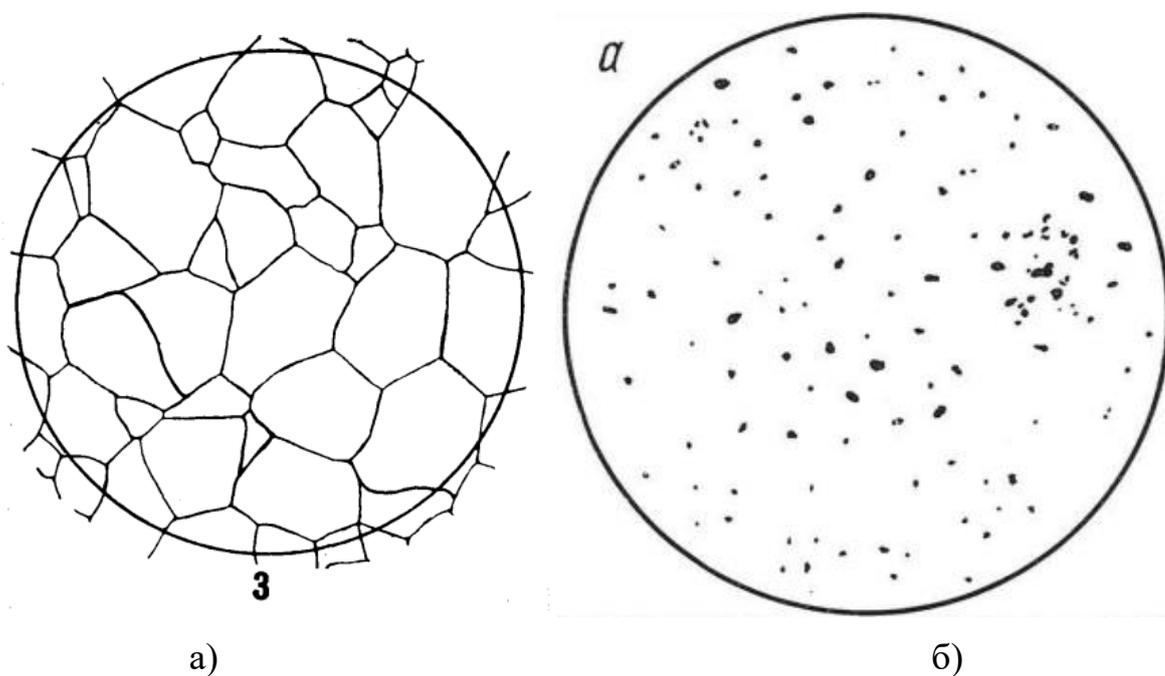
## Рисунок 8 – Алгоритм оценки неоднородности распределения НВ при помощи построения полиэдров Вороного

В работе [111] сказано, что: «При количественной оценке может возникнуть систематическая погрешность, связанная с учетом граничных зерен (попавших в кадр только частично) при оценке среднего размера зерна методом подсчета по отдельным полям зрения. В стандарте ГОСТ 5639 её предлагается устранять методом Салтыкова. Аналогичные рекомендации приводятся в ГОСТ 21073, ISO 643, ASTM E 112. В ASTM E 1382 при оценке размера зерна с помощью автоматического анализа изображения рекомендуется исключать все пограничные зёрна. Граница поля зрения с большей вероятностью проходит по более крупным зёрнам, поэтому именно они будут исключаться из статистики измерений, что исказит не столько значение среднего размера зерна, сколько характер распределения зёрен по размерам. При панорамных исследованиях удельное число пограничных зёрен уменьшается, поэтому их игнорирование практически не влияет на результат измерения» [111].

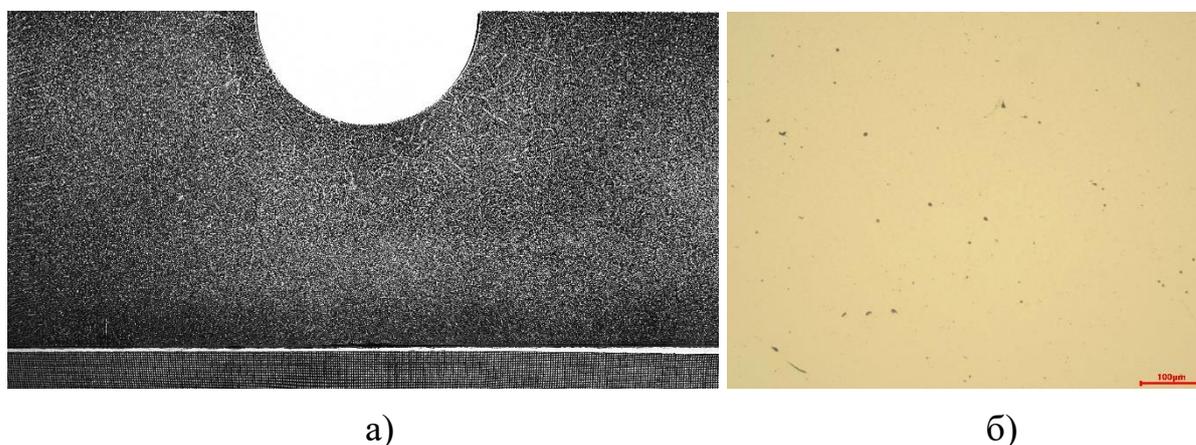
По мнению Кудря А.В.: «Формализация подходов к описанию цифровых изображений структур осложнена, в частности, из-за различий в механизмах разрушения номинально однотипных структур, отличающихся геометрией строения отдельных ее элементов и их конфигурацией в целом; вытекающими отсюда отличиями в метрологическом обеспечении процедур обработки изображений. Очевидно, что различие в процедурах получения цифрового изображения, не слишком критичное для последующего их качественного (визуального) анализа, может сказаться на конечных результатах измерения геометрии структур. В этой связи актуальным является изучение аспектов получения цифровых изображений структур, их обработки, обеспечивающих получение воспроизводимых и сопоставимых результатов, несущих содержательную информацию об их морфологии» [75].

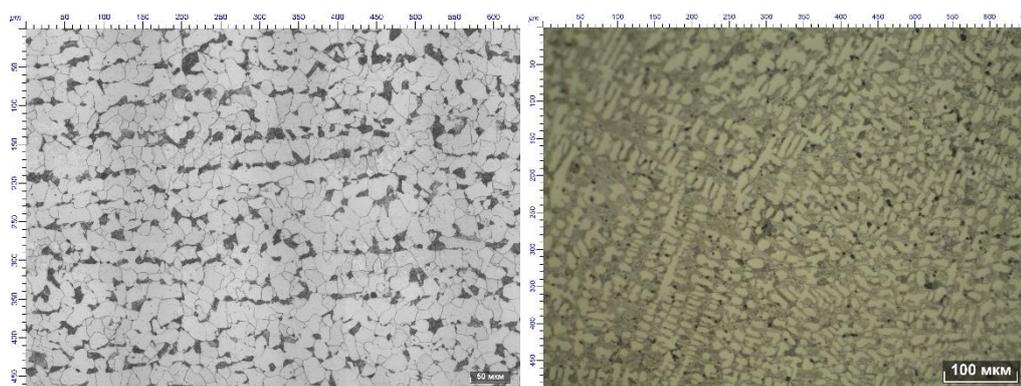
## Глава 2. Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны эталонные изображения (рисунок 9) зеренной структуры (ГОСТ 5639-82) и неметаллических включений (ГОСТ 1778-70 шкалы: ОТ, НТ и НА), изображения (рисунок 10) разнородных структур (дендритная макроструктура, графитовые и неметаллические включения на металлографическом шлифе и микроструктура), базы данных производственного контроля технологий получения различных сплавов на основе железа. Их химический состав представлен в таблице 3.



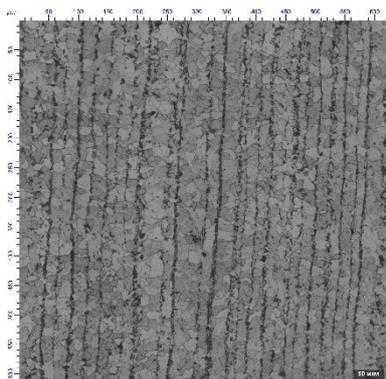
а) 5689-82, шкала 1, балл 3; б) 1778-70, шкала ОТ, балл 5а  
Рисунок 9 – Пример эталонных изображений структур ряда ГОСТ





в)

г)



д)

е)

а) дендритная макроструктура стали 38ХН3МФА; б) неметаллические включения стали 40Х2Н2МА; в) зеренная структура стали Ст3сп; г) микроструктура твердого сплава ПГ-ФБХ6-2; д) полосчатая структура стали 09Г2С; е) графитовые включения чугуна 40М

Рисунок 10 – Типовые изображения структур исследуемых сплавов на основе железа.

Таблица 3. Химический состав исследуемых материалов

Объект исследования	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
38ХН3МФА	0,41	0,29	0,33	0,010	0,006	0,98	3,12	0,60	0,12
40Х2Н2МА	0,37	0,46	0,25	0,012	0,010	1,42	1,71	0,24	-
15Х2НМФА	0,17	0,47	0,29	0,009	0,014	2,24	1,34	0,51	0,09
09Г2С	0,11	1,58	0,66	0,012	0,016	0,03	0,03	-	-
Ст3сп	0,17	0,50	0,24	0,018	0,006	0,11	0,11	-	-
36Г2С	0,37	1,57	0,54	0,005	0,005	0,16	0,09	-	-
ПГ-ФБХ6-2	4,5	3,2	2,0	0,030	0,030	34,6	-	-	-
40М	3,02	0,92	1,72	0,058	0,024	0,19	0,81	0,39	-

Базы данных производственного контроля представляли собой матрицу  $A_{m \times n}$ , где строкам  $m$  соответствовало количество, плавов или партий, столбцам

$n$  - значения технологических параметров ( $n_t$ ) и характеристик качества металлопродукции ( $n_q$ ). Для исследуемых баз данных, описывающих технологические процессы получения металлопродукции из сталей 38ХНЗМФА-Ш, 40ХМФА, 09Г2С количество строк  $m$  в матрицах (с привязкой к химическому составу) составило 342, 166, 530 и 1460 (выплавка в конверторе и электродуговой печи соответственно) соответственно, что представляло собой объем однородной продукции, произведенной в течение одного-двух лет. Количество строк в матрице с привязкой к свойствам металлопродукции могло быть и больше, в т.ч. с учетом возможности испытания нескольких образцов на точку, различных температур испытаний. Количество столбцов  $n$  в матрицах составило ( $n/n_q$ ) 91/20, 18/17, 84/15 соответственно. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программы Excel [2].

Пробоподготовка образцов проводилась на шлифовально-полировальном станке с независимым управлением TwinPrep 5. Для выявления микроструктуры проводилось травление в растворе состоящем из 3 процентной азотной кислоты и спирта этилового, макроструктуры - в 50% - ном водном растворе HCl (~ 30 мин); зерна аустенита - травление в пересыщенном растворе пикриновой кислоты с добавкой поверхностно-активных веществ. Серные отпечатки по Бауману получены согласно ГОСТ 10243–75.

Изображения микроструктуры и неметаллических включений получены при помощи оптических микроскопов Axio Observer и NIM-100 при увеличениях от 50 до 1000 крат. Процедура цифровой количественной оценки проводилась в программном обеспечении, написанном на языке C# и включала в себя следующие алгоритмы (если иного не предусматривала поставленная задача): цветные изображения получены в цветовой модели RGB при разрешении 3840x3040 и кодировании 8 бит (256 оттенков); перевод в оттенки серого производился в соответствии с выражением:

$I=0,299*R+0,587*G+0,114*B$ ; неоднородность освещенности выравняли при помощи вычитания из матрицы поля яркости (в оттенках серого) полинома оптимальной степени; бинаризация проводилась на основе анализа поля яркости; выделение информативных объектов осуществлялось по принципу 4-х связности; граничные объекты не учитывались.

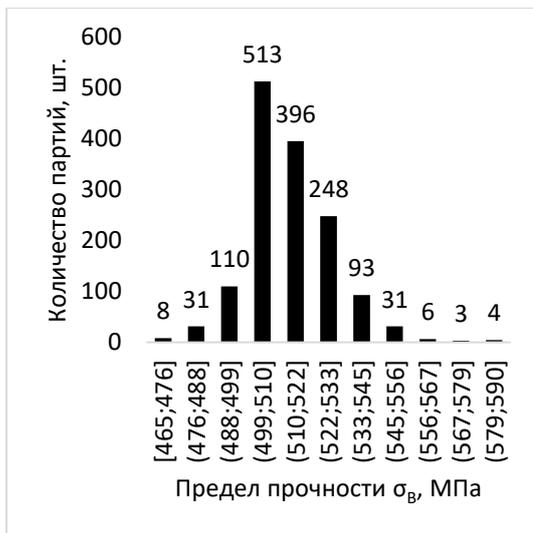
### Глава 3. Метрологические факторы цифрового количественного анализа, определяющие воспроизводимость и сопоставимость результатов

Накопление большого количества данных производственного контроля открывает новые возможности для прогнозирования и управления качеством металлопродукции. Для этих целей уже существуют достаточно объемные архивы результатов сквозного контроля, которые включают в себя данные каждого из этапов производства металлопродукции: от разливки стали до конечной термической обработки. При этом подбор оптимального соотношения управляющих параметров целиком зависит от знаний и опыта операторов без опоры на независимые характеристики распределений значений в выборках, что несомненно приведет к большому разбросу значений выходных параметров. Это подтверждается результатами статистического анализа баз данных исследуемых сталей (таблица 4).

Таблица 4. Масштаб неоднородности качества металлопродукции [2,112].

Сталь	Тип изделия	Размах значений в выборке $\Delta$ , ( $y_i^{\max} - y_i^{\min}$ )					$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
		KCU <sup>+</sup> <sub>20</sub> , Дж/с м <sup>2</sup>	KCV <sub>0</sub> , Дж/с м <sup>2</sup>	KCU <sup>-</sup> <sub>40</sub> , Дж /см <sup>2</sup>	KCU <sup>-</sup> <sub>50</sub> , Дж/с м <sup>2</sup>	KCU <sup>-</sup> <sub>60</sub> , Дж /см <sup>2</sup>		
38ХНЗМФА	поковка	63-28	-	-	58-20	-	1570-1340	17,5-8,8
40ХМФА	сорт	175-60	-	-	-	-	1400-1030	20-7
09Г2С	лист	438-80	461-89	-	-	430-78	590-465	38-28

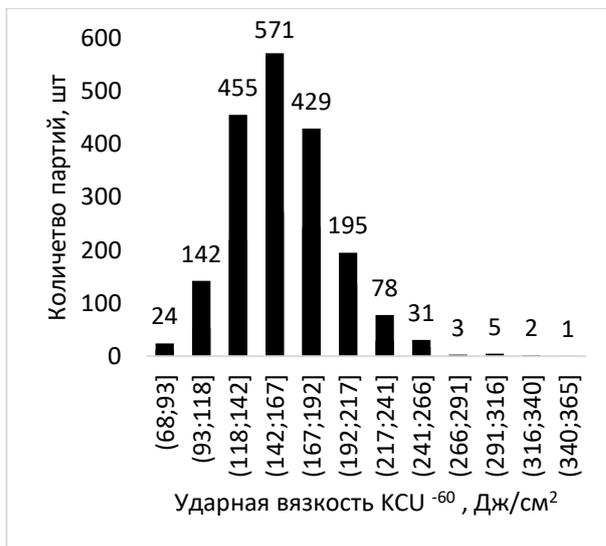
Такой большой разброс не связан с появлением случайных выбросов, что подтверждается построением гистограмм распределения значений сдаточных параметров (рисунок 11)



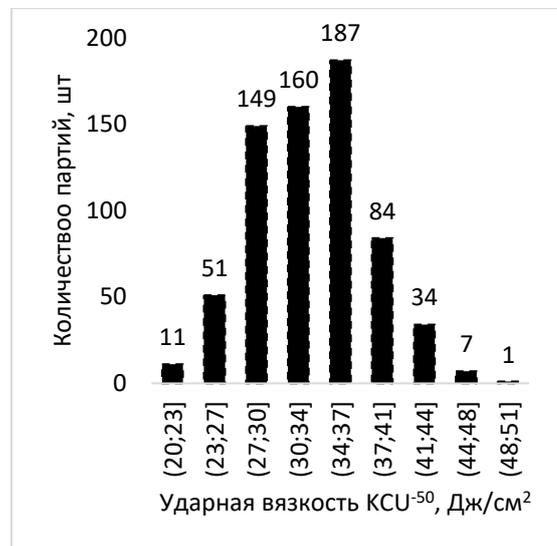
а)



б)



в)



г)

а) 09Г2С, предел прочности; б) 09Г2С, относительное удлинение;  
в) 15ХСНД, ударная вязкость (температура испытания -60 °С, U- надрез); г) 38ХНЗМФА, ударная вязкость (температура испытания -50 °С, U- надрез)

Рисунок 11 – Гистограммы распределения значений механических свойств исследуемых сталей

При таких характеристиках распределений и большом разбросе значений ударной вязкости (двукратном и более) очевидно, что, как минимум, половина продукции имеет уровень свойств выше среднего, причем может значительно превышать его. Это связано с многообразием номинально однотипных, но различных по геометрии структур. Это определяет

необходимость в их измерении для оценки вклада в разрушение и выявления критических параметров структур. При качественной оценке структур различия в качестве изображения (с учетом вариаций режима травления, условий съемки: ракурсов, освещения, увеличений), как правило, не сказывается на её результатах. Опытный глаз металлографа визуально выделит характерные элементы на изображении, поставит ему в соответствие тот или иной балл соответствующей эталонной шкалы. Однако применение цифровых процедур с целью получения количественных оценок параметров геометрии структур сопряжено с известными трудностями, в частности, с необходимостью объективного программного выделения (разделения) информативных элементов структуры, удаления шумов и т. д. В этой связи важно оценить сопутствующие риски. [2].

При качественной оценке структур различия в качестве изображения (с учетом вариаций режима травления, условий съемки: ракурсов, освещения, увеличений) не играют принципиального значения. Опытный глаз металлографа визуально выделит характерные элементы на изображении, поставит ему в соответствие тот или иной балл соответствующей эталонной шкалы. Однако применение цифровых процедур с целью получения количественных оценок параметров геометрии структур сопряжено с известными трудностями, в частности, с необходимостью объективного программного выделения (разделения) информативных элементов структуры, удаления шумов и т. п. [113]. Цифровой количественный анализ включает в себя большое количество этапов, которые можно разделить на три условные группы:

- пробоподготовка образцов и получение изображений;
- цифровая обработка изображений;
- измерение параметров объектов и подходы к обработки получаемых результатов

### 3.1 Влияние разрешения камеры, оптического увеличения и яркости микроскопа

Первостепенным этапом при проведении анализа изображений структур является правильная подготовка применяемого оборудования, которая включает в себя: регулировку оптической и световой системы микроскопа, калибровку масштабной линейки, настройку камеры, выбор оптического увеличения, фокусировку и другие [114]. В данном разделе оценена степень влияния некоторых из этих параметров на результаты цифрового количественного анализа.

Настройка осветительной системы необходима поскольку неравномерное освещение может повлиять на идентификацию объектов и определение порога с помощью автоматических анализаторов изображений. Перед анализом следует отцентрировать источник света (как описано в инструкции по эксплуатации микроскопа) и отрегулировать полевую и апертурную диафрагмы для обеспечения наилучшей четкости изображения. В дальнейшем могут быть использованы цифровые методы коррекции неравномерности освещенности; однако эти методы не следует использовать вместо правильного выравнивания и настройки микроскопа [115]. У микроскопа должна быть возможность регулировки яркости, чтобы равномерно освещать поле зрения и полностью заполнять светом заднюю апертуру объектива. Металлографические образцы должны быть освещены для выявления важных структурных деталей с оптимальным контрастом и разрешением, а также с достаточной яркостью для точной фотографической регистрации [116]. Однако в существующих стандартах отсутствует точная информация о численном значении яркости, которое является оптимальным. Вероятнее всего это связано с тем, что данное значение сложно унифицировать, т. к. оно будет варьироваться в зависимости от источника и метода освещения. Не учет данного фактора может оказаться критичным, например при анализе НВ. На рисунке 12 показано, что в зависимости от

изменения уровня освещенности (которое достигалось путем регулировки мощности осветительной лампы) одно и то же НВ изменяет свою форму и размеры вплоть до исчезновения из-за слияния с фоном.

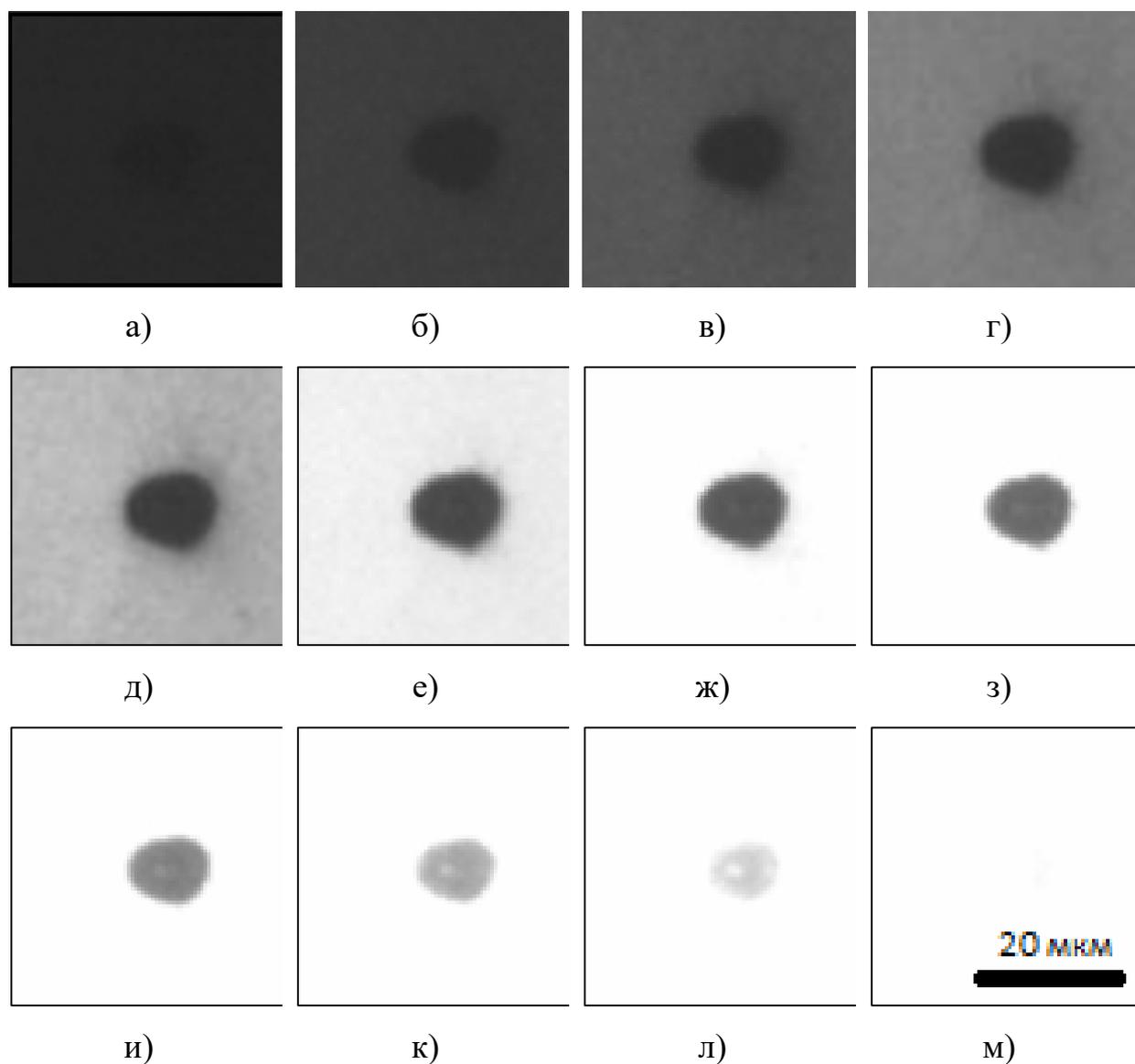


Рисунок 12 – Типичные изображения одного и того же НВ при вариации мощности осветительной лампы от 2,5 до 5,8 Вт (а-м)

В свою очередь на рисунке 13 показано, что существует определенный интервал значений яркости, при котором площадь НВ значимо не меняется. Данный интервал будет варьироваться для различных микроскопов, в зависимости от их осветительной системы.

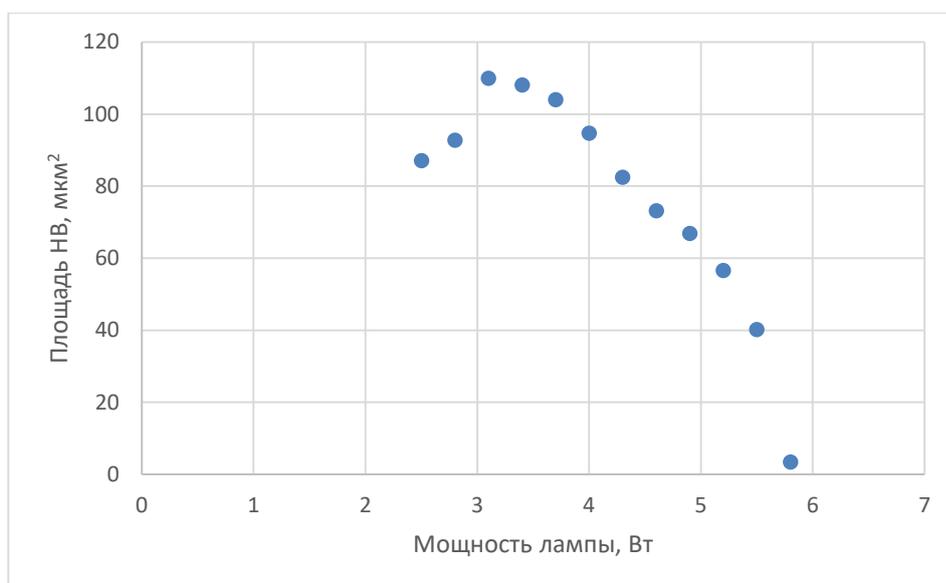
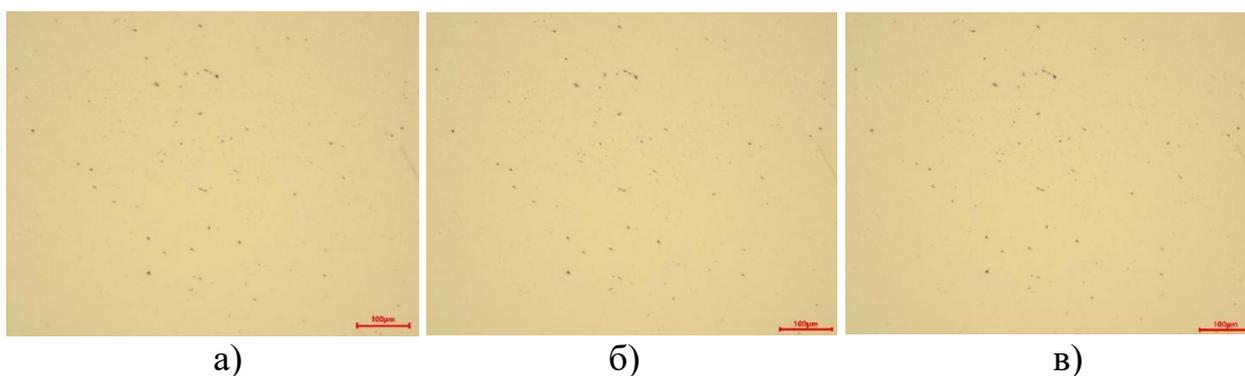
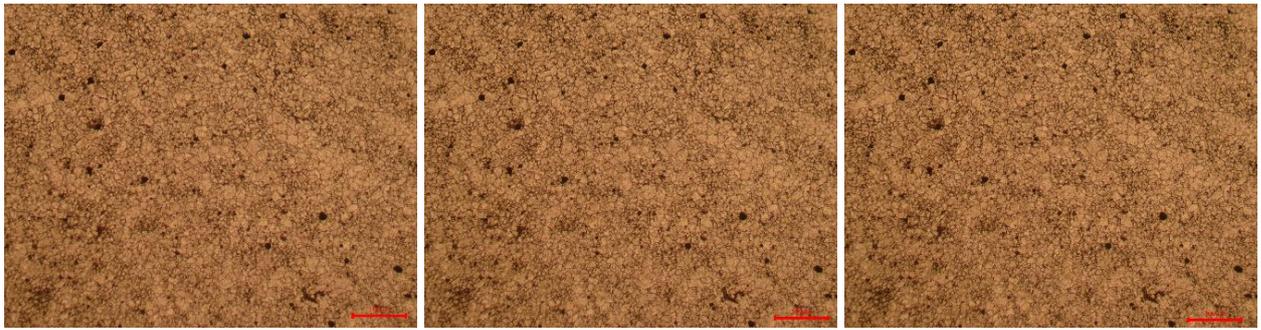


Рисунок 13 – Изменение площади одного и того же НВ при вариации мощности осветительной

Основной характеристикой, определяющей качество цифрового изображения, является разрешение. Разрешение определяется количеством пикселей и их размером. На примере изображений НВ на металлографическом шлифе было оценено влияние разрешения камеры на результаты измерения геометрических параметров элементов изображения. Для этого в микроскопе NIM-100 были получены (рисунок 14) и измерены (табл. 5,6) изображения НВ и зерна аустенита в одной и той же области при увеличении  $\times 100$ , и разрешении: 960x760, 1920x1520 и 3840x3040 соответственно





г)

д)

е)

Рисунок 14 – Изображения неметаллических включений и зеренной структуры стали 40X2H2MA одного и из поля зрения, полученные при разном разрешении 960x760 (а,г), 1920x1520 (б,д) и 3840x3040 (в,е), пкс×пкс

Таблица 5. Изменение значений параметров темных объектов на изображениях одной и той же области, полученных при трех вариантах разрешения кадра

Порог фильтрации, мкм <sup>2</sup>	Разрешение изображения, пкс×пкс	Количество, шт	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей	$E_x$ распределения площадей
без	3840×3040	304	4,1±0,5	3,8±0,1	15,9±0,3
	1920×1520	262	4,6±0,5	3,4±0,2	13,3±0,3
	960×760	164	7,2±0,8	2,6±0,2	7,3±0,4
10	3840×3040	32	24,2±2,3	1,1±0,4	0,6±0,7
	1920×1520	33	23,6±2,2	1,1±0,4	0,6±0,7
	960×760	34	24,3±2,3	1,1±0,4	0,6±0,7
25	3840×3040	13	36,7±2,9	0,9±0,6	-0,5±0,9
	1920×1520	12	37,3±3,1	0,8±0,6	-0,6±0,9
	960×760	13	37,6±3,1	0,7±0,6	-0,8±0,9

Таблица 6. Изменение значений геометрических параметров зерен на изображениях одной и той же области шлифа, полученных при трех уровнях разрешения

Порог фильтрации, мкм <sup>2</sup>	Разрешение изображения, пкс×пкс	Количество, шт	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей	$E_x$ распределения площадей
без	3840×3040	4640	17,9±2,9	37,5±0,0	1746,4±0,1
	1920×1520	3193	22,5±3,3	25,3±0,0	754,8±0,1
	960×760	2559	24,5±4,8	29,4±0,1	952,8±0,1
10	3840×3040	870	89,2±15,1	16,5±0,1	336,6±0,2

	1920×1520	762	83,8±12,9	12,8±0,1	191,5±0,2
	960×760	689	83,6±17,8	15,4±0,1	259,3±0,2
50	3840×3040	234	269,9±54,5	8,8±0,2	94,2±0,3
	1920×1520	212	251,3±46,6	6,8±0,2	52,1±0,3
	960×760	172	268,9±69,4	7,8±0,2	64,8±0,4
100	3840×3040	105	515,7±117,3	6,1±0,2	43,5±0,5
	1920×1520	94	477,1±100,5	4,5±0,3	22,5±0,5
	960×760	79	501,3±147,3	5,3±0,3	28,9±0,5

Полученные результаты показывают, что количество и средняя площадь темных объектов на изображении НВ изменяется с увеличением разрешения, видимо, в связи с фиксацией более мелких объектов. Повышение разрешения также может привести к детализации уже видимых объектов, и изменению их площади (рисунок 15). Различия в результатах измерения НВ, полученных при различном разрешении изображения, могут быть нивелированы объективной геометрической фильтрацией. Для зерен фильтрация менее эффективна, поскольку различия в результатах связаны с размыванием тонких границ при малом разрешении и как следствие слиянием нескольких зерен в одно. Сопоставление коэффициентов асимметрии и эксцесса исследуемых выборок показало их отличие от нормального распределения. Это объясняет причины различий при сравнении результатов измерений площадей объектов на основе критериев Смирнова и Стьюдента: риск различий был менее  $\leq 0,2$  и  $\leq 0,5$  соответственно.

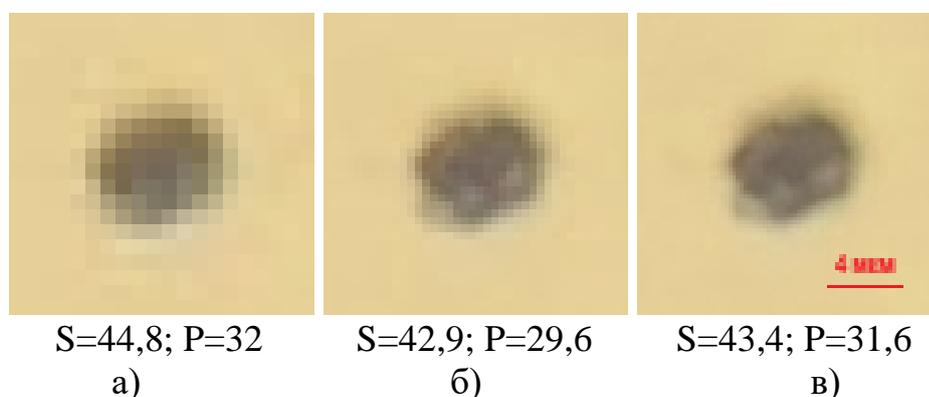


Рисунок 15 – Изменение площади ( $S$ ,  $\text{мкм}^2$ ) и периметра ( $P$ ,  $\text{мкм}$ ) одного и того же НВ при различном разрешении изображения: 960x760 (а), 1920x1520 (б) и 3840x3040 (в), пкс×пкс

Выбор необходимого увеличения играет важную роль при получении достоверных результатов при анализе структур. Для выявления дисперсных объектов на структуре следует применять большие увеличения. Нередко требуется сопоставление структурных составляющих, которые получены при различных увеличениях. Связанные с этим риски были оценены на примере изображений НВ стали 38ХНЗМФА, полученных при увеличении 50, 100, 200, 500 и 1000 крат на одних и тех же, сопоставимых по площади, полях зрения (рисунок 16).

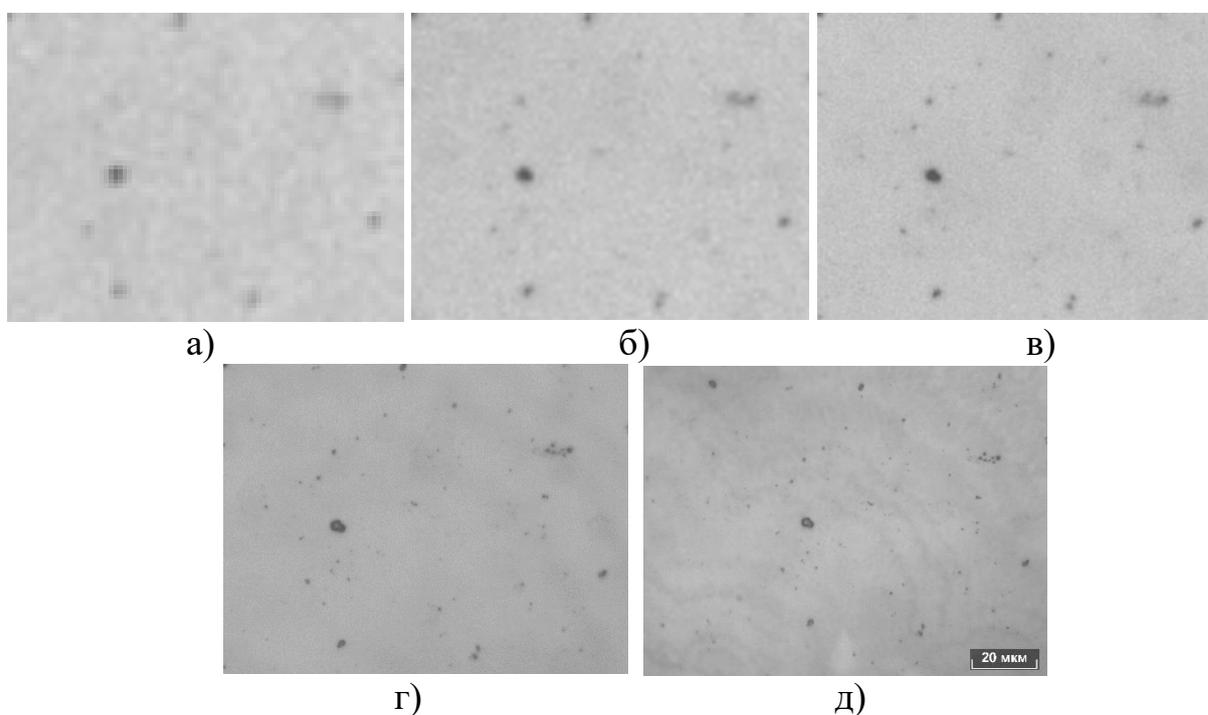
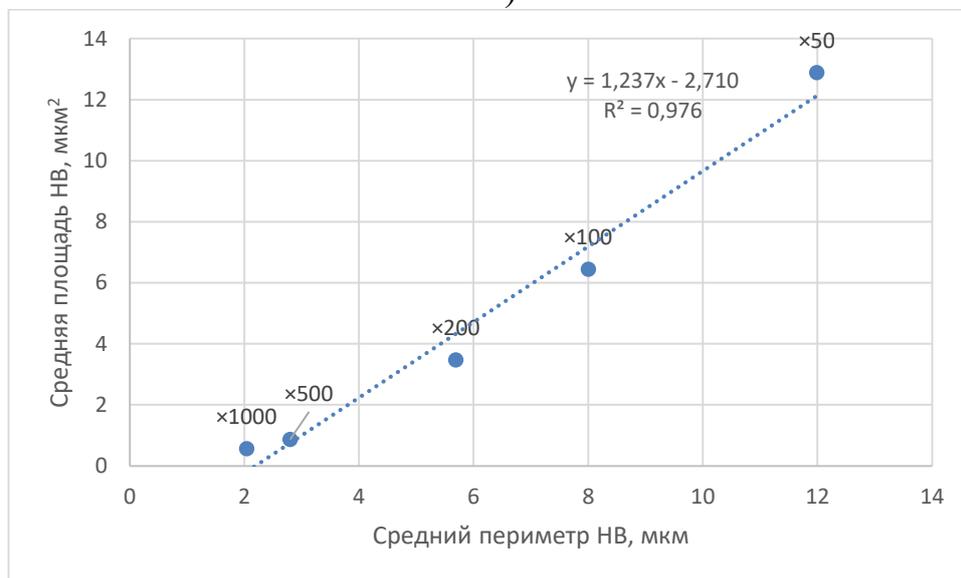


Рисунок 16 – Изображения НВ стали 38ХНЗМФА (равной площади в масштабе образца), полученные при разных увеличениях:  $\times 50^{\times 20}$  (а),  $\times 100^{\times 10}$  (б),  $\times 200^{\times 5}$  (в),  $\times 500^{\times 2}$  (г),  $\times 1000$  (д)

Последующая обработка изображений, с целью измерения геометрических параметров темных объектов (их периметра и площади) проводилась единообразно. Графическое представление результатов представлено на рисунке 17.



а)



б)

Рисунок 17 – Изменение количества (а) и геометрических параметров темных объектов (б) в зависимости от увеличения микроскопа

Повышение кратности увеличения микроскопа, приводит к возникновению все более мелких объектов, однако в отличие от «разрешения» площадь уже наблюдаемых включений может стать меньше за счёт более детальной прорисовки границ (рисунок 18).

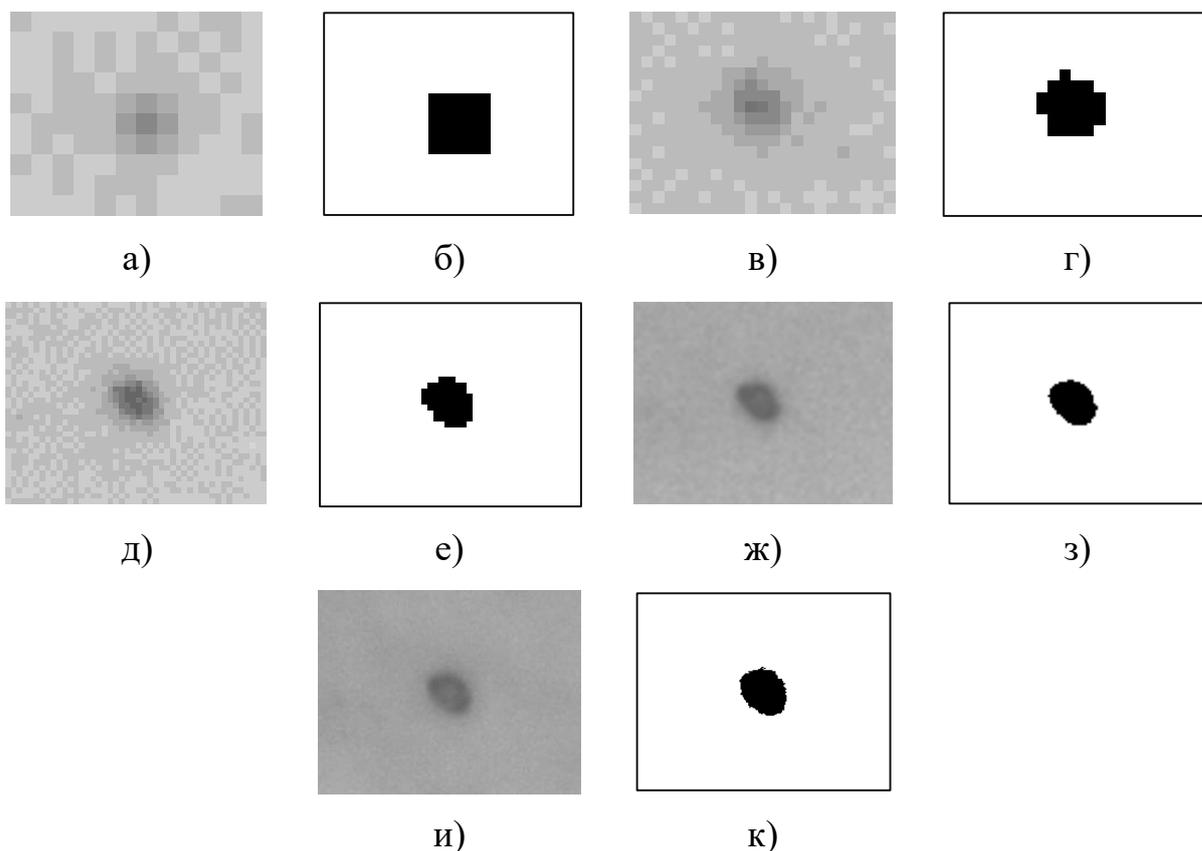


Рисунок 18 – Изменение формы и размера НВ на исходных и бинарных изображениях при повышении кратности увеличения микроскопа:  $\times 50^{20}$  (а,б),  $\times 100^{10}$  (в,г),  $\times 200^{5}$  (д,е),  $\times 500^{2}$  (ж,з),  $\times 1000$  (и,к)

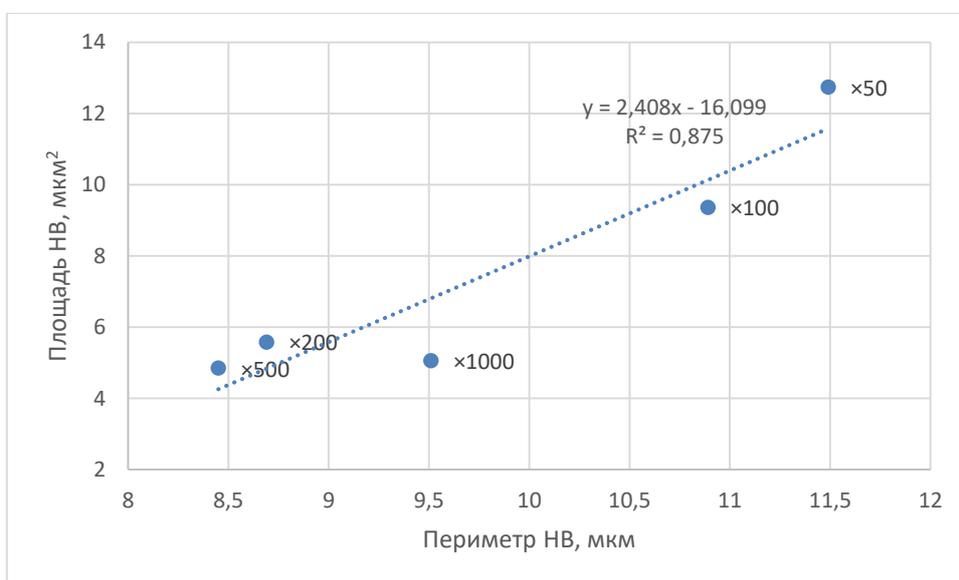


Рисунок 19 – Вариация значений периметра и площади одного и того же НВ, снятого при различном увеличении микроскопа

Нередки случаи, когда большой темный объект распадается на кластер мелких темных частиц при повышении кратности увеличения (рисунок 20).

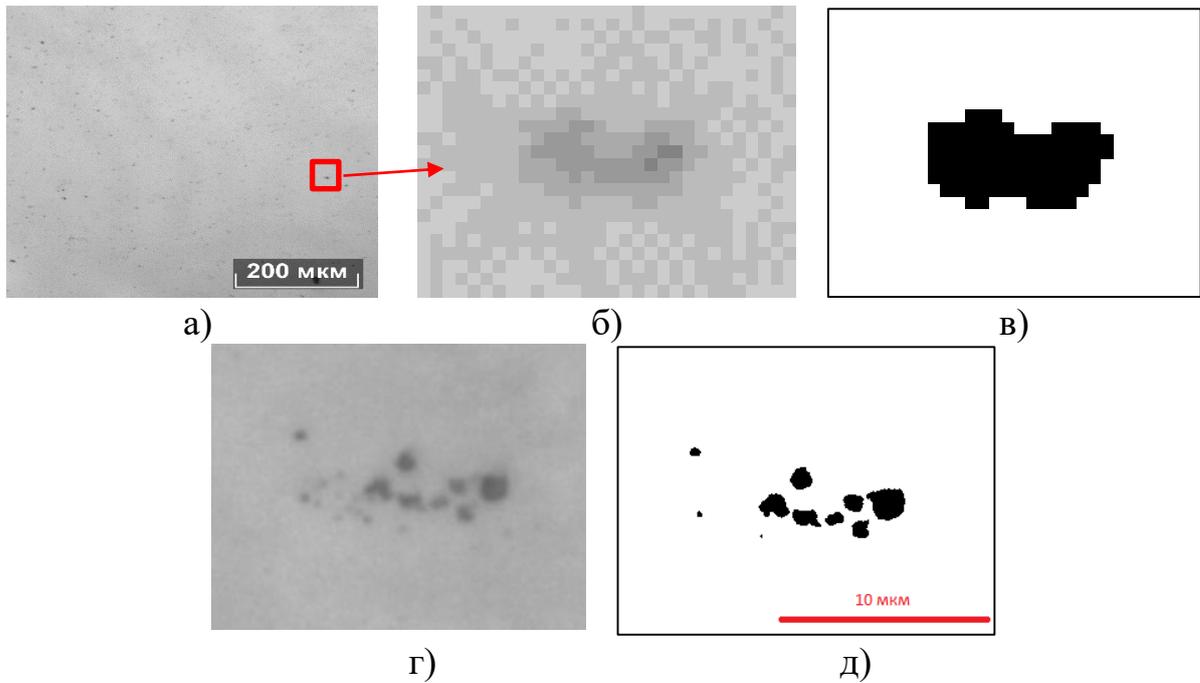
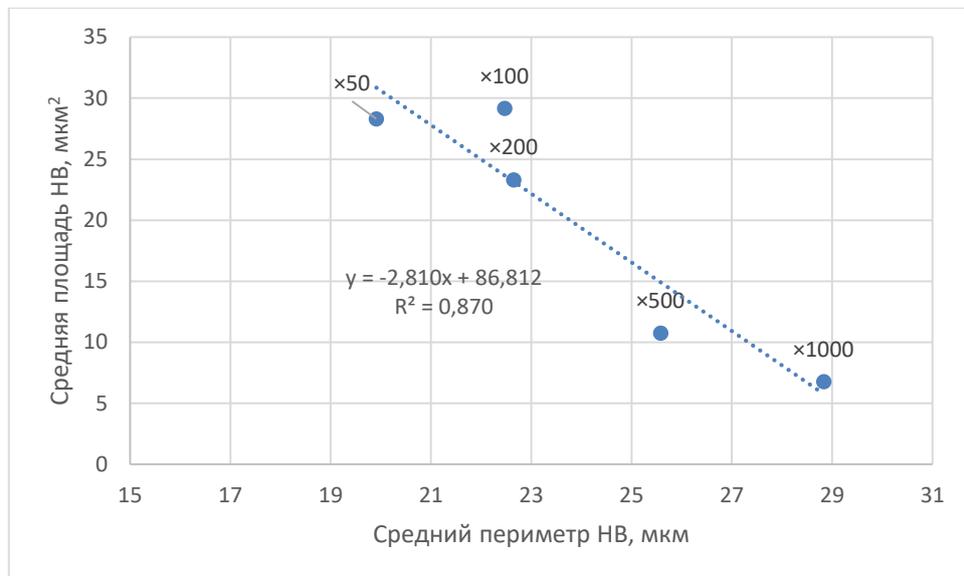


Рисунок 20 – Эффект возможной трансформации «крупного», при увеличении микроскопа  $\times 100^{\times 10}$  (б,в), неметаллического включения с повышением кратности оптического увеличения до  $\times 1000$  (г,д)

Результаты количественной оценки изображений одного и того же НВ при разном увеличении представлено на рисунке 21.



а)



б)

а – количество НВ; б – средняя площадь и периметр НВ

Рисунок 21 – Изменение количества (а) и геометрических параметров «при разбиении» темного объекта (б) в зависимости от кратности увеличения микроскопа

Таким образом измерение геометрии неметаллических включений, полученных при разных яркости, увеличении микроскопа и разрешении цифровой камеры, может привести к существенным различиям в результатах. В этой связи необходима регламентация данных параметров.

### 3.2 Процедуры получения бинарных изображений

Получаемые в микроскопе цифровые изображения могут переводиться в оттенки серого  $I_i$  следующими способами:  $I_1=0,299*R+0,587*G+0,114*B$  ( $R$ ,  $G$  и  $B$  интенсивность в оттенках красного, зеленого и голубого соответственно) – применяется в системах аналогового цветного телевидения PAL и NTSC, является стандартной (по умолчанию) функцией в программном обеспечении Mathcad [117] Однако существует и другие варианты перевода:  $I_2=0,2126*R+0,7152*G+0,0722*B$  – используется в системе HDTV и учитывает особенности восприятия изображения человеческим глазом [118];  $I_3=0,333*R+0,333*G+0,333*B$  – применяется в некоторых анализаторах изображений (например, Image Expert Pro 3)

Для оценки возможных различий в результатах измерения морфологии структур в этой связи сравнивались изображения микроструктуры твердого сплава (а) и НВ стали 40Х2Н2МА (б) и 38ХН3МФА, полученные на разных микроскопах, с различным цветом фона (при прочих равных условиях регистрации цифровых изображений и их обработки) (рисунок 22).

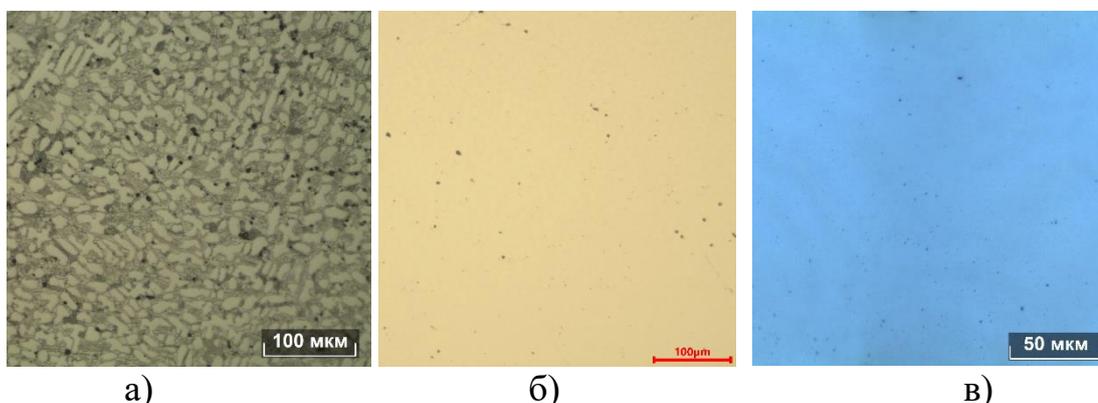
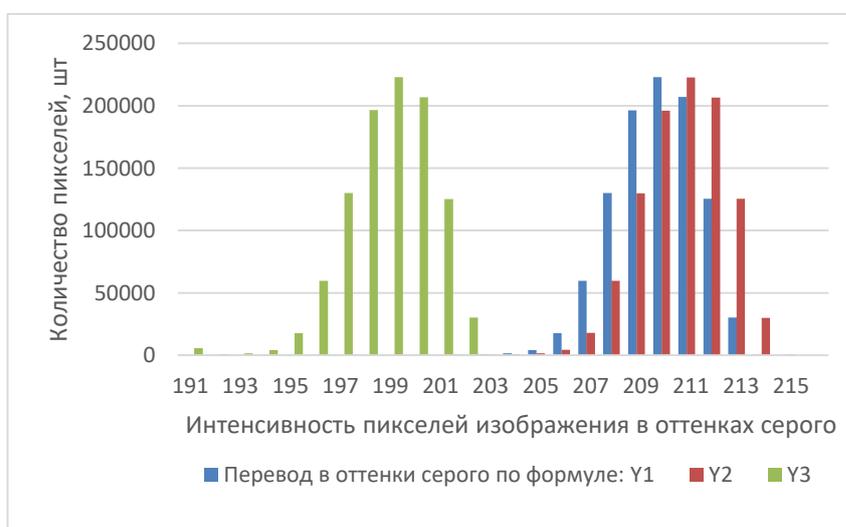
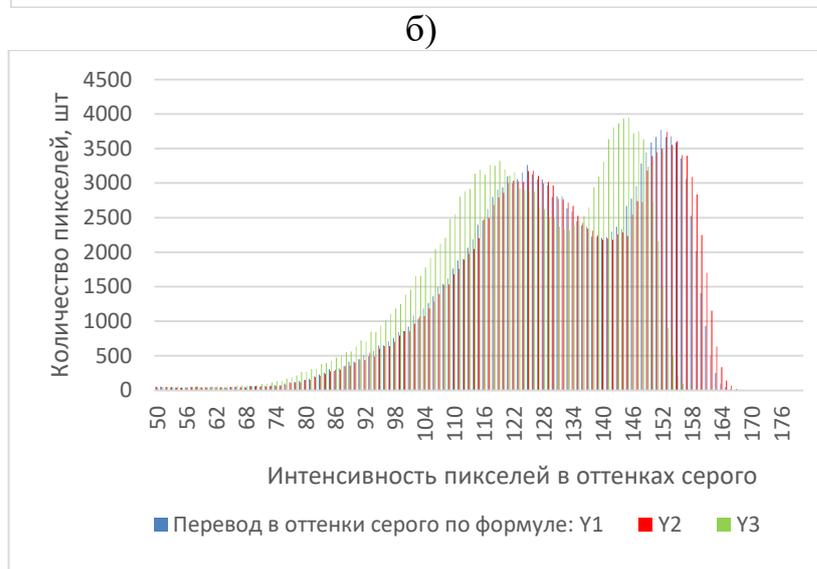
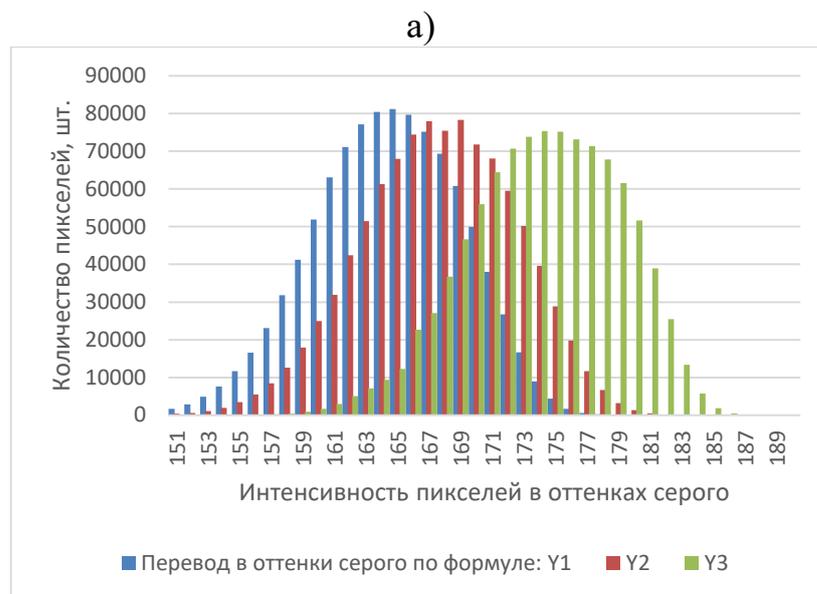


Рисунок 22 – Изображения микроструктуры твердого сплава (а) и неметаллических включений стали 40Х2Н2МА (б) и 38ХН3МФА (в) с различным цветом фона

Каждое изображение переводилось в оттенки серого при помощи трех разных вариантов и полученные матрицы интенсивностей сравнивались между собой (рисунок 23). Интенсивность пикселей в оттенках серого при переводе по формуле  $I_3$  на 13 оттенков выше по сравнению с формулами  $I_1$  и  $I_2$ , различие между  $I_1$  и  $I_2$  небольшие (1-3 оттенка). На следующем этапе изображения бинаризовались и подвергались количественному анализу (таблица 7).





в)

а) НВ стали 40X2H2MA; б) НВ стали 38XH3MFA; в) структура твердого сплава

Рисунок 23 – Распределение значений интенсивностей пикселей изображений в оттенках серого при использовании разных формул

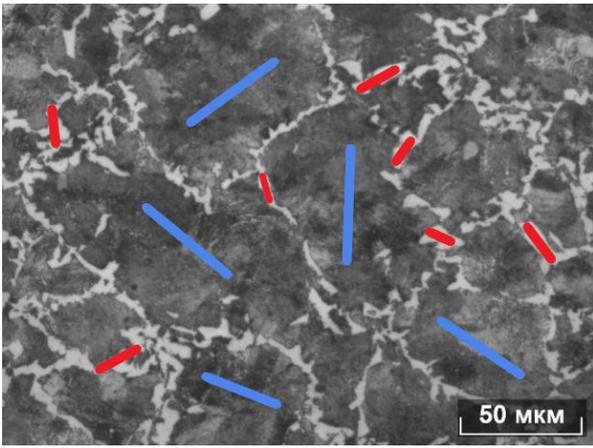
Таблица 7. Результаты количественного анализа структур, отличающихся цветом фона, после их перевода в оттенки серого различными способами

Изображение структуры	$T$	Способ для перевода в оттенки серого	Количество объектов, шт.	Средняя площадь объектов, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей объектов	$E_x$ распределения площадей объектов
НВ стали 40X2H2MA	$\leq 198$	$I_1$	41	4,2±0,2	3,3±0,4	10,6±0,7
		$I_2$	41	4,1±0,2	3,3±0,4	10,6±0,7
		$I_3$	560	53,3±2,0	23,7±0,1	559,6±0,2
НВ стали 38XH3MFA	$\leq 140$	$I_1$	19	19,4±2,0	2,5±0,5	5,3±0,9
		$I_2$	22	15,7±1,5	2,7±0,5	6,5±0,8

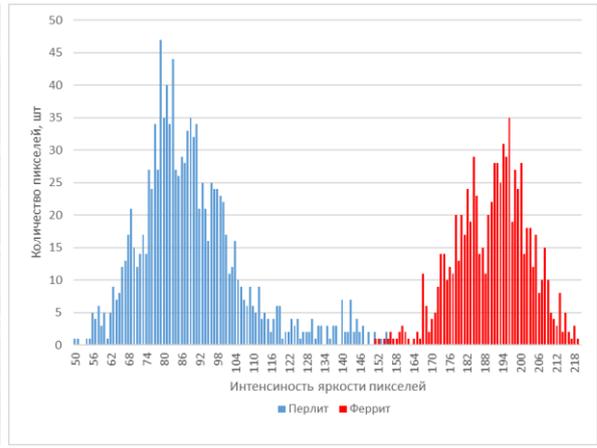
		$I_3$	7	35,0±6,01	1,2±0,7	-0,8±0,9
Структура твердого сплава	≤ 137	$I_1$	133	459,4±39,7	11,5±0,2	133,0±0,4
		$I_2$	129	463,0±40,7	11,4±0,2	129,0±0,4
		$I_3$	741	97,7±3,6	27,2±0,1	741,0±0,2

Выявлено отличие результатов, полученных при переводе изображения в оттенки серого в соответствии с выражением  $I_3=0,333*R+0,333*G+0,333*B$ . Следовательно, этот фактор также необходимо учитывать при цифровых измерениях.

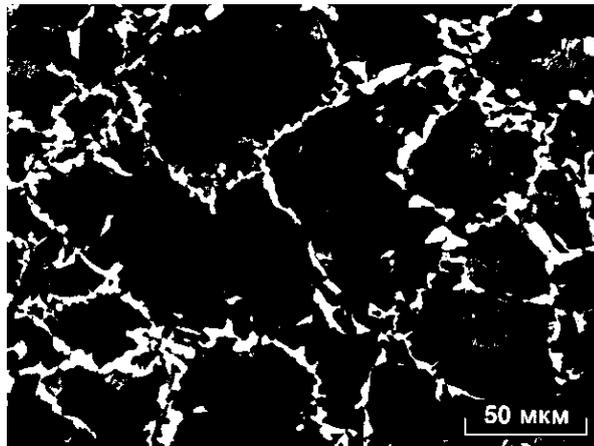
Следующей важной стадией обработки изображений является отделение объектов от фона или разделение групп однотипных объектов по их уровню интенсивности яркости – бинаризация. Существуют различные алгоритмы бинаризации, их применение при выборе критерия для установления границы раздела «объект-фон», как было показано ранее [113,119], может привести к получению несопоставимых результатов измерения геометрии однотипных структур. В этой связи есть практический интерес к дальнейшей выработке подходов к бинаризации изображений структур и изломов различной морфологии, в частности, НВ на металлографическом шлифе, отличающихся уровнем своей яркости [120]. Для достижения данной цели предложен метод бинаризации, основанный на оценке статистики распределения интенсивностей пикселей НВ и фона. Интенсивность яркости, соответствующей темным объектам и фону находили, проводя через них секущие, это позволило построить сводную диаграмму распределения значений интенсивности их яркости. Уровень серого, соответствующий точке, в которой пересекаются две диаграммы, был принят в качестве порога бинаризации (рисунок 24).



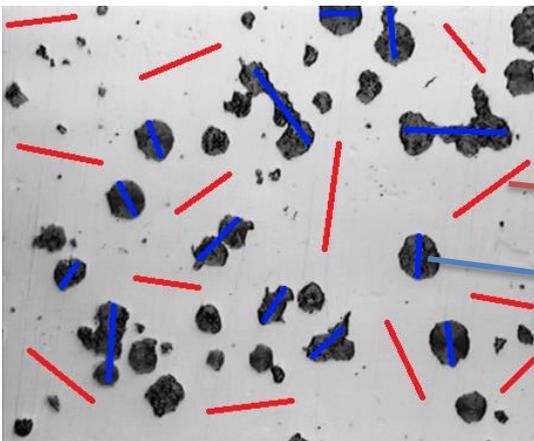
а)



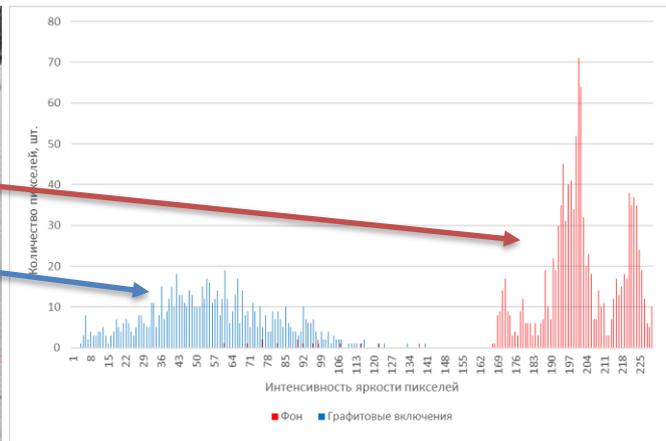
б)



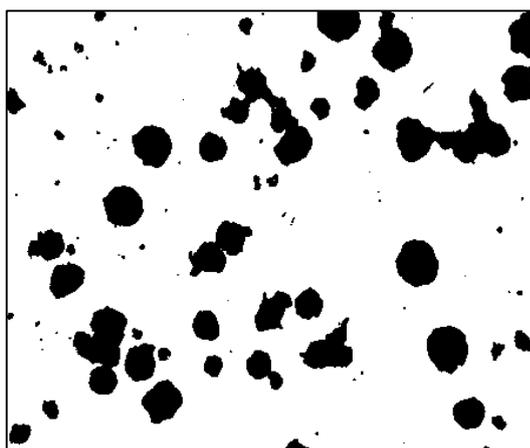
в)



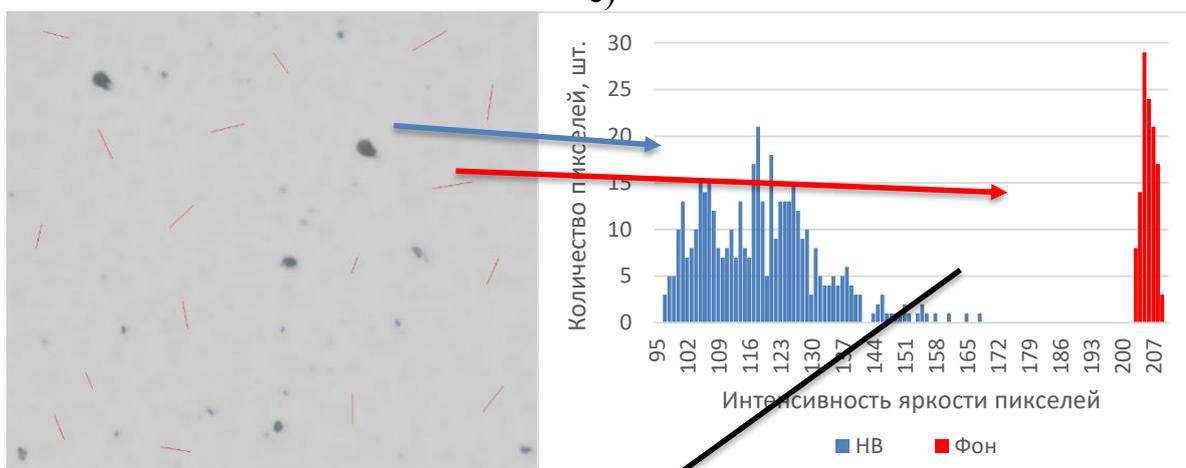
г)



д)

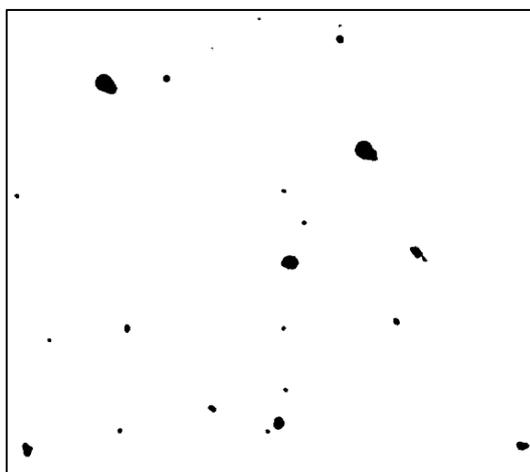


е)



ж)

з)



и)

а,г,ж) секции на темных и светлых объектах; б,д,з) сопоставление диаграмм интенсивности яркости для определения порога бинаризации; в,е,и) бинарное изображение

Рисунок 24 – Бинаризация изображений феррито-перлитной микроструктуры стали 3Г2С, чугуна и НВ стали 40Х2Н2МА на основе сопоставления диаграмм распределения значений интенсивности яркости НВ и фона

Для оценки возможных рисков, связанных с использованием различных алгоритмов бинаризации, в работе также сопоставлены результаты измерения типичных структур (таблица 8 и 9) бинаризация которых была проведена на основе четырех глобальных (метод среднего, Оцу, Лагранжа и С-образной кривой) и двух локальных (Бредли-Рота и Ниблэка) [79].

Таблица 8. Результаты измерения площадей структурных составляющих (объектов) при различных глобальных методах бинаризации

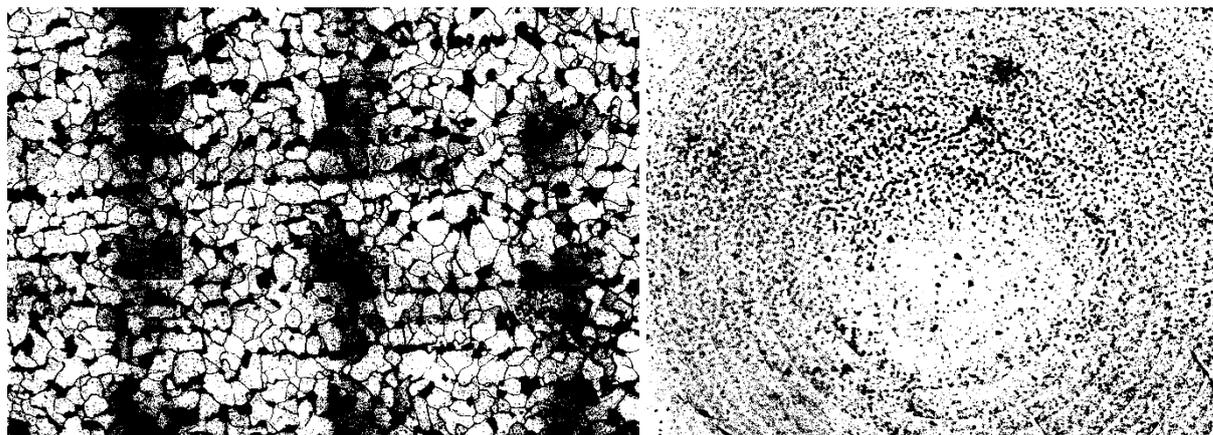
Изображение структуры	Метод бинаризации	$T$	Средняя площадь объектов, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей объектов	$E_x$ распределения площадей объектов	Плотность объектов, шт/мм <sup>2</sup>	Объемная доля, %
Дендриты в стали 38ХНЗМФА	Оцу	$\leq 136$	$156772,9 \pm 1537,3$	$40,4 \pm 0,01$	$3434,9 \pm 0,01$	3	41
	С-образная	$\leq 99$	$269583,4 \pm 23589,8$	$236,5 \pm 0,01$	$60448,6 \pm 0,01$	2	49
	Лагранж	$\leq 121$	$188827,9 \pm 4827,8$	$279,2 \pm 0,01$	$99465,9 \pm 0,01$	2	44
	Среднего	$\leq 120$	$191417,9 \pm 4985,9$	$274,2 \pm 0,01$	$96515,1 \pm 0,01$	2	44
НВ в стали 40Х2Н2МА	Оцу	$\leq 175$	$5,6 \pm 0,7$	$2,9 \pm 0,17$	$9,0 \pm 0,33$	433	0,3
	С-образная	$\leq 205$	$12,3 \pm 10,2$	$151,2 \pm 0,02$	$22869,7 \pm 0,03$	46749	57,6
	Лагранж	$\leq 204$	$2,9 \pm 0,1$	$41,2 \pm 0,01$	$2879,5 \pm 0,02$	87447	25,4
	Среднего	$\leq 203$	$1,1 \pm 0,04$	$44,1 \pm 0,01$	$3391,3 \pm 0,03$	68350	8,1
	на основе сопоставления диаграмм распределения значений интенсивности яркости	$\leq 198$	$4,88 \pm 0,4$	$7,03 \pm 0,08$	$69,72 \pm 0,17$	1657	0,8
Зерно феррита в полосчатой структуре стали 09Г2С	Оцу	$\leq 104$	$5,6 \pm 0,7$	$40,8 \pm 0,02$	$2056,5 \pm 0,04$	41486	24
	С-образная	$\leq 122$	$9,1 \pm 8,6$	$138,8 \pm 0,02$	$19272,3 \pm 0,04$	51622	47
	Лагранж	$\leq 101$	$5,3 \pm 0,4$	$24,2 \pm 0,02$	$775,8 \pm 0,04$	40337	22
	Среднего	$\leq 115$	$6,9 \pm 5,8$	$136,4 \pm 0,02$	$18624,3 \pm 0,04$	49902	35
Дендриты в твердом сплаве	Оцу	$\leq 126$	$28,3 \pm 2,1$	$13,4 \pm 0,04$	$269,7 \pm 0,07$	18161	51
	С-образная	$\leq 140$	$39,4 \pm 2,1$	$4,3 \pm 0,06$	$28,4 \pm 0,11$	7799	31
	Лагранж	$\leq 118$	$75,4 \pm 70,2$	$46,8 \pm 0,05$	$2194,3 \pm 0,10$	9011	68
	Среднего	$\leq 126$	$28,3 \pm 2,1$	$13,4 \pm 0,04$	$269,7 \pm 0,07$	18161	51
Зерно феррита в стали СтЗсп	Оцу	$\leq 153$	$155,1 \pm 152,3$	$38,3 \pm 0,06$	$1473,8 \pm 0,13$	5287	82
	С-образная	$\leq 112$	$66,3 \pm 65,9$	$61,7 \pm 0,04$	$3809,0 \pm 0,08$	13662	91
	Лагранж	$\leq 151$	$139,4 \pm 137,1$	$40,6 \pm 0,06$	$1648,8 \pm 0,12$	5915	82
	Среднего	$\leq 178$	$135,9 \pm 17,1$	$12,3 \pm 0,06$	$195,9 \pm 0,13$	5427	74

Таблица 9. Результаты количественной оценки структур сплавов при различном локальном методе бинаризации и вариации входных переменных.

Изображение структуры	Метод бинаризации	Переменная*		Средняя площадь объектов, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей объектов	$E_x$ распределения площадей объектов	Плотность объектов, шт/мм <sup>2</sup>	Объемная доля, %
		$d$	$k$					
НВ в стали 40Х2Н2МА	Брэдли-Рота	10×10	0,3	1,1 ± 0,2	1,1±0,5	0,1±0,8	4	0,0005
	Брэдли-Рота	20×20	0,2	53,3 ± 7,5	2,3±0,2	5,2±0,5	23	0,1
	Брэдли-Рота	30×30	0,1	44,4 ± 4,5	3,1±0,1	11,1±0,3	65	0,3
	Ниблэка	20×20	+0,2	98,6 ± 42,4	123,2±0,02	16199,0±0,03	5520	55
	Ниблэка	20×20	-0,2	36,5 ± 0,6	8,1±0,01	113,5±0,02	9906	36
Зерно феррита в стали Ст3сп	Брэдли-Рота	10×10	0,3	172559,2 ± 172558,7	5,0±0,4	25,0±0,8	6	99
	Брэдли-Рота	20×20	0,2	2010,3 ± 2007,3	44,6±0,05	1994,0±0,1	461	93
	Брэдли-Рота	30×30	0,1	854,8 ± 812,9	65,0±0,04	4229,5±0,1	977	84
	Ниблэка	20×20	+0,2	118,1 ± 6,6	15,6±0,02	394,5±0,03	4763	56
	Ниблэка	20×20	-0,2	293,8 ± 99,0	87,1±0,02	8316,3±0,05	2426	71

\*  $d$  – размер локальной области, пкс×пкс.;  $k$  – коэффициент (для метода Ниблэка при среднеквадратичном отклонении, а для метода Брэдли-Рота при среднем значении)

Как видно из полученных результатов порог бинаризации может варьироваться в широких пределах в зависимости от применяемого метода, что неизбежно приводит к значимым различиям в результатах количественного анализа. Вариация значений составила: для объемной доли НВ до двух порядков, дендритов, графитовых включений, и зерен феррита 19, 40 и 17 % соответственно, в зависимости от метода бинаризации. Также большая вариация наблюдается в количестве объектов, их средней площади и параметрах распределения. Аналогичная вариация наблюдается и для локальных методов бинаризации, изменяя переменные можно получить диаметрально противоположные результаты вплоть до неправдоподобных. В первую очередь различия связаны с появлением (исчезновением) объектов, которые могут принадлежать либо к элементам структуры, либо фона (рисунок 25).



а) зеренная структура стали Ст3сп; б) НВ стали 40X2H2MA

Рисунок 25 – Бинарные изображения структур при некорректном выборе метода бинаризации.

В таблице 10 показано, что даже в случае применения геометрических фильтров для отсека неинформативных объектов (на примере НВ) не удается нивелировать различия между методами бинаризации. Именно поэтому невозможно при выборе критерия бинаризации игнорировать вид (морфологию) исследуемой структур и решаемой задачи. В какой мере учитывается это обстоятельство в программных продуктах для анализа изображений не всегда ясно: в некоторых не доступна информация о

«защитом» в программе методе, а в других, выбор ограничен 2-3 методами. Практически во всех из них включена опция «по визуальной оценке оператора», это вносит субъективность в результаты измерения. Очевидно, что объективный подход к определению порога бинаризации позволит нивелировать различия в результатах количественной оценки, возникающие при переводе изображений в оттенки серого различными способами.

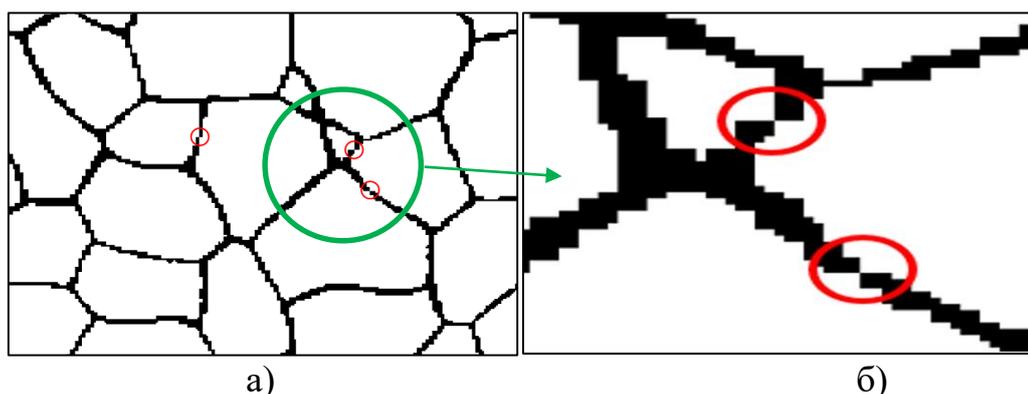
Таблица 10. Результаты количественного анализа изображения НВ стали 40X2H2MA после применения фильтра по площади и при вариации метода и порога бинаризации

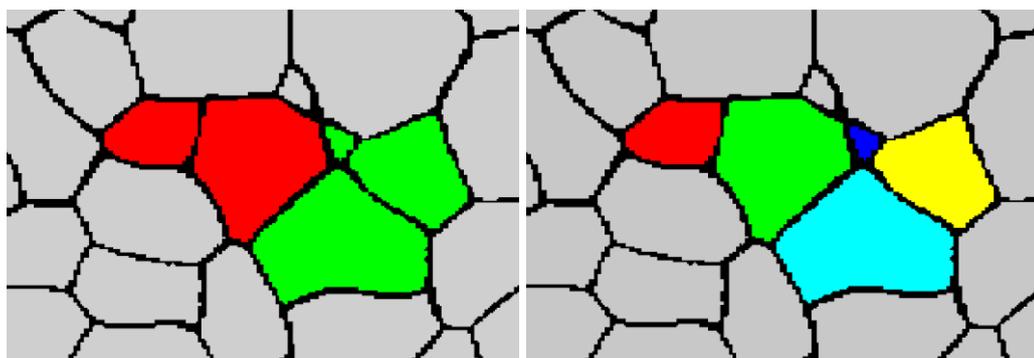
Метод бинаризации	Порог фильтрации, мкм <sup>2</sup>	$T$	Средняя площадь объектов, мкм <sup>2</sup>	$A_s$ распределения площадей объектов	$E_x$ распределения площадей объектов	Плотность объектов, шт/мм <sup>2</sup>	Объемная доля, %	Коэффициент (риск гипотезы о различии выборок)	
								Смирнова	Стьюдента
Оцу	< 10	< 176	25,1 ± 2,3	1,1±0,4	0,1±0,7	73	0,18	0,34 (0,99)	0,15 (0,9)
		≤ 176	25,6 ± 2,3	1,1±0,4	0,1±0,7	73	0,19		
	< 25	< 176	40,4 ± 3,1	0,3±0,6	-1,2±0,9	28	0,11	0,19(0,99)	0,14 (0,9)
		≤ 176	41,0 ± 3,1	0,3±0,6	-1,2±0,9	28	0,11		
С-образная	< 10	< 206	41,7 ± 1,5	1,9±0,1	3,4±0,2	1181	4,93	1,03 (0,25)	1,91 (0,1)
		≤ 206	50,2 ± 4,9	1,6±0,3	1,6±0,5	161	0,81		
	< 25	< 206	62,2 ± 2,1	1,4±0,1	1,5±0,3	651	4,05	0,88(0,51)	1,34 (0,2)
		≤ 206	70,2 ± 6,4	1,1±0,3	0,3±0,6	101	0,71		
Лагранж	< 10	< 205	37,3 ± 0,7	2,1±0,1	4,8±0,1	4594	17,19	1,16 (0,17)	2,91 (0,01)
		≤ 205	41,6 ± 1,5	1,9±0,1	3,4±0,2	1181	4,93		
	< 25	< 205	56,9 ± 0,9	1,7±0,1	2,7±0,1	2380	13,54	1,22 (0,12)	2,46 (0,02)
		≤ 205	62,2 ± 2,1	1,4±0,1	1,5±0,3	651	4,05		
Среднего	< 10	< 204	22,1 ± 0,6	4,2±0,1	23,2±0,2	2001	4,44	7,98 (0,001)	14,37(0,001)
		≤ 204	37,3 ± 0,6	2,1±0,1	4,7±0,1	4594	17,19		
	< 25	< 204	45,3 ± 1,8	2,5±0,2	6,9±0,3	448	2,03	2,96 (0,001)	4,96(0,001)
		≤ 204	56,9 ± 0,9	1,7±0,1	2,7±0,1	2380	13,54		

Возможные риски в связи с отсутствием метрологического обеспечения цифровых измерений структур могут проявиться при прогнозе различных свойств. Так, например, условный предел текучести по Петчу-Холлу для стали СтЗсп при использовании различных глобальных методов бинаризации варьируется от 133 до 224 МПа, а в случае локальных методов достигает запредельных значений в 7384 МПа.

### 3.3 Применение морфологических и геометрических фильтров

На этапе количественной оценки бинарных изображений важным параметром является окрестностные соотношения пикселей, поскольку они определяют то, что мы будем рассматривать как связную область и, следовательно, как цифровой объект. Существует два возможных способа определения соседствующих пикселей: можно рассматривать пиксели как соседние элементы либо когда они имеют общее ребро, либо когда они имеют, по меньшей мере, общий угол. Таким образом, пиксель имеет четыре или восемь соседних элементов, и мы говорим о 4-компонентной окрестности (связности) или 8-компонентной окрестности (связности). Оба типа окрестностей необходимы для правильного определения объектов как связных областей. Различие в связности может сказаться на количестве и геометрических характеристиках исследуемых объектов. Так, например, при анализе геометрии зерна наличие тонких однопиксельных границ может привести к слиянию зерен при использовании 8-связности (рисунок 26)





в)

г)

а) бинарное изображение эталонной шкалы ГОСТ; б) фрагмент изображения с наличием однопиксельных границ; в) слияние зерен при использовании 8-ми связности; г) определение зерен при использовании 4-х связности

Рисунок 26 – Возможные искажения в строении зерна при использовании принципа 8-и и 4-х связности

На примере 3 различных изображений структур показаны различия в статистических параметрах объектов при количественной оценке по принципу 4-х и 8-ми связности. (таблица 11)

Таблица 11. Результаты количественной оценки морфологии изображений некоторых структур при применении 4-х и 8ми связности

Изображение структуры	Связность	Количество объектов, шт.	Средняя площадь, мкм <sup>2</sup>	A <sub>s</sub> распределения площадей объектов	E <sub>x</sub> распределения площадей объектов	Коэффициент (риск гипотезы о различии выборок)	
						Стьюдента	Смирнова
Неметаллические включения стали 40X2H2MA	4	216	5,7 ± 0,7	2,9±0,2	9,8±0,3	0,27 (0,80)	0,48 (0,99)
	8	206	6,0 ± 0,7	2,9±0,2	9,2±0,3		
Структура твердого сплава	4	2591	32,3 ± 1,5	4,1±0,1	23,4±0,1	3,63 (0,001)	3,25 (0,001)
	8	2029	41,3 ± 1,9	3,6±0,1	18,1±0,1		
Серный отпечаток стали 38XH3MФА	4	254	4440,5 ± 223,2	1,5±0,2	2,7±0,3	0,44 (0,70)	0,39 (0,99)
	8	248	4547,9 ± 226,6	1,5±0,2	2,6±0,3		
Зерно аустенита стали 40X2H2MA	4	11708	20,1±1,1	40,4±0,02	2637,5±0,1	1,38 (0,1)	4,27 (0,001)
	8	10482	22,4±1,3	37,4±0,02	2263,9±0,1		

Влияние окрестностного соотношения при поиске объектов в меньшей мере сказывается при количественной оценке НВ, но при анализе строения дендритов или зерна различия могут быть значимыми. Показано, в частности, что при обработке изображений зерен следует применять принцип 4-х связности.

Удаление граничных объектов необходимо при анализе изображений, поскольку учет неполноценных частиц может вносить погрешность в результаты количественного анализа. Больше всего данный эффект проявляется в случае обработки изображений зеренной структуры (рисунок 27). Так на примере изображений эталонных шкал ряда ГОСТ 5639-82 (балл зерна с 1 по 10) показано различие в геометрических параметрах зерен при учете и удалении граничных объектов (таблица 12).

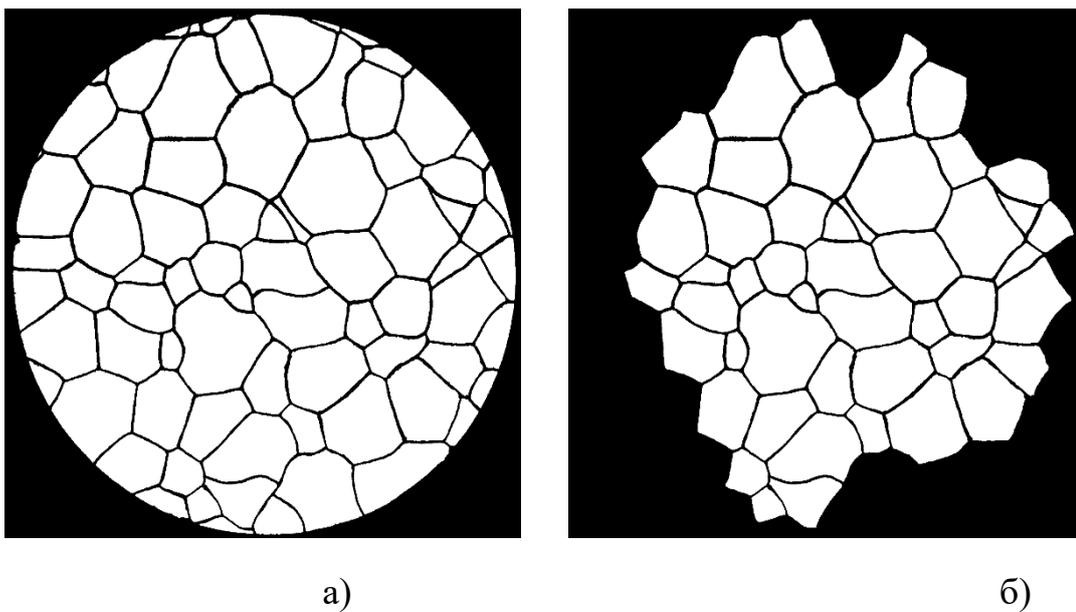


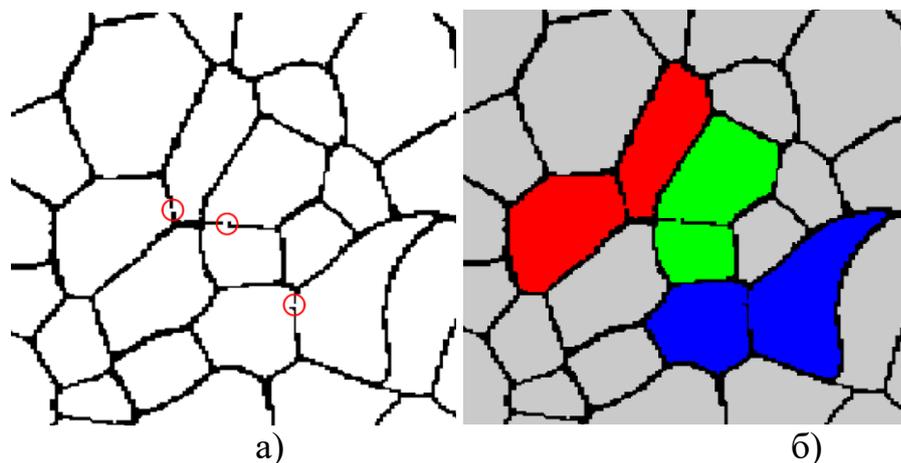
Рисунок 27 – Типичное изображение эталонной шкалы ГОСТ 5639-82 (балл 4) до (а) и после (б) удаления граничных зерен

Таблица 12. Изменение результатов количественной оценки зерен на эталонных изображениях ГОСТ 5639-82 при удалении граничных объектов

Номер балла	Граничные объекты	Количество зерен, шт.	Средняя площадь зерен, мкм <sup>2</sup>	A <sub>s</sub> распределения площадей зерен	E <sub>x</sub> распределения площадей зерен	Коэффициент (риск гипотезы о различии выборок)	
						Стьюдента	Смирнова
1	есть	13	15329±3989	1,4±0,6	1,4±0,9	0,65 (0,71)	0,82 (0,4)
	удалены	3	23636±12930	1,7±0,7	-		
2	есть	24	8008±1672	1,7±0,5	2,4±0,8	0,83 (0,38)	1,28 (0,2)
	удалены	6	12854±3533	0,6±0,7	-1,7±0,8		
3	есть	43	4413±633	0,9±0,4	-0,4±0,7	0,69 (0,71)	1,00 (0,3)
	удалены	21	5530±930	0,5±0,5	-0,9±0,8		
4	есть	77	2471±211	0,6±0,3	-0,4±0,5	0,80 (0,51)	1,26 (0,2)
	удалены	47	2899±266	0,7±0,3	-0,2±0,6		
5	есть	148	1223±74	0,7±0,2	-0,4±0,4	0,84 (0,38)	1,46 (0,1)
	удалены	104	1391±88	0,5±0,2	-0,5±0,5		
6	есть	286	576±26	0,5±0,1	-0,8±0,3	0,59 (0,85)	1,15 (0,2)
	удалены	220	621±29	0,4±0,2	-0,9±0,3		
7	есть	546	266±9	0,7±0,1	-0,2±0,2	0,51 (0,95)	0,73 (0,4)
	удалены	465	275±10	0,6±0,1	-0,3±0,2		
8	есть	1070	103±3	0,7±0,1	-0,3±0,1	0,34 (0,99)	0,46 (0,6)
	удалены	964	105±3	0,6±0,1	-0,4±0,2		
9	есть	2006	48±1	0,8±0,1	0,06±0,1	0,47 (0,95)	0,60 (0,5)
	удалены	1867	48±1	0,8±0,1	0,003±0,1		
10	есть	3480	21±0,2	1,7±0,04	11,2±0,1	0,45 (0,95)	0,48 (0,6)
	удалены	3308	22±0,2	1,0±0,04	2,1±0,1		

Степень влияния граничных объектов на итоговый результат количественной оценки изображений эталонных шкал тем больше, чем ниже балл зерна. При чем различия наблюдаются как в средней площади, так и в характере их распределения. Очевидно, что для нивелирования данного фактора следует оценивать панорамные изображения, а в случае «одиночных» кадров рекомендуется удалять или не учитывать граничные объекты.

Для обеспечения единственности процедуры измерения в ряде случаев необходима морфологическая обработка изображений, которая применяется на этапах предварительной или заключительной обработки. К ним, в частности, относятся операции эрозии и дилатации. Задача эрозии - удаление деталей изображения с размерами меньше элементов структуры (при одновременном уменьшении размеров последних), дилатации на следующем этапе – восстановление исходных размеров элементов структуры на изображении. Для некоторых задач возможно их независимое использование. Существует большое количество различных морфологических фильтров: размыкание и замыкание, сглаживание, преобразования «выступ» и «впадина» и др. Каждый из этих фильтров должен применяться в зависимости от поставленных задач. На примере зеренной структуры показана необходимость применения морфологических фильтров (например, дилатация или замыкание) для устранения прерывистости границ, возникших в результате плохого вытравления или некорректного выбора метода бинаризации (рисунок 28).



а) прерывистость границ зерен; б) слияние нескольких отдельных зерен  
Рисунок 28 – Необходимость применения морфологических фильтров на примере зеренной структуры

В качестве шумов могут быть неметаллические включения, находящиеся за «пределом видимости». Например, при увеличении 100 крат человеческий глаз не способен однозначно идентифицировать принадлежность темных объектов поперечником  $\leq 10$  мкм к неметаллическим включениям. Для «машинного» же зрения после бинаризации к включениям могут быть отнесены все черные объекты размером вплоть до одного пиксела. Очевидно, что в любом из вышеперечисленных случаев, необходимо применение геометрических фильтров (рисунок 29).

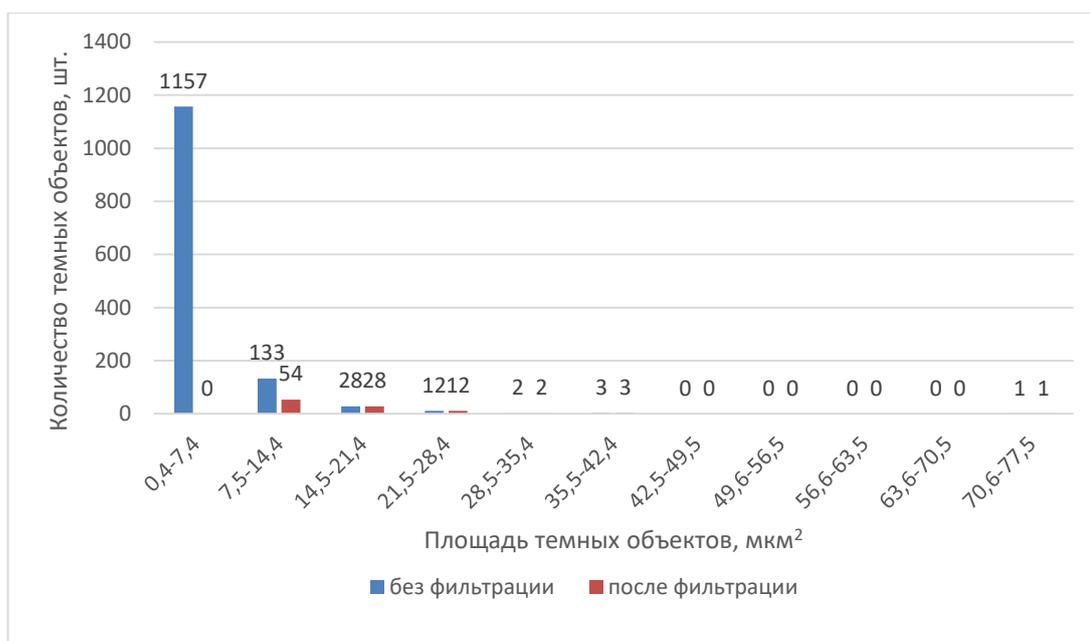


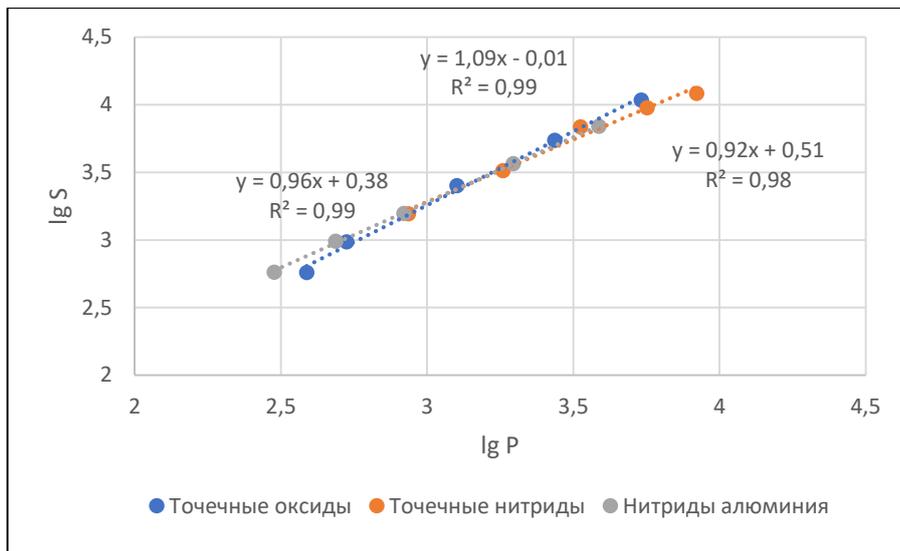
Рисунок 29 – Распределение площадей неметаллических включений стали 38ХНЗМФА-Ш до и после отсечения неинформативных (или неидентифицируемых) объектов площадью менее 10 мкм<sup>2</sup>

Геометрическая фильтрация изображения НВ привела к удалению большого количества шумов и как следствие, увеличению их средней площади с 3,6 до 16,6 мкм<sup>2</sup> и виду их распределения, значения коэффициентов асимметрии и эксцесса составили 4,71; 3,96 и 44,40; 22,76 соответственно. Полученные результаты показывают, важность обоснованного выбора порога фильтрации объектов шумовой природы для получения объективной оценки морфологии структур.

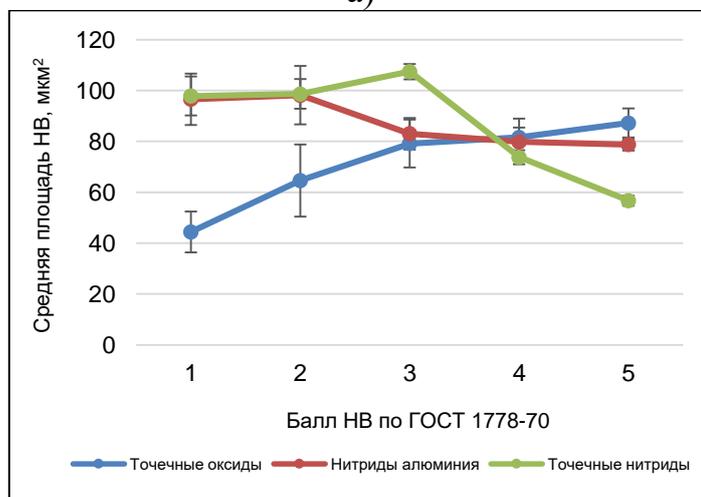
#### **Глава 4. Цифровой количественный анализ эталонных шкал ГОСТ 5639-82 и 1778-70 с учетом метрологических факторов**

Оценка структур с ярко выраженным различием в размерах зачастую обеспечивается сопоставлением с эталонными шкалами, причем подобным ранжированием структур «на глаз» пользуются при классификации на предприятиях. Однако, эталонных шкал недостаточно для описания возможной морфологии структурных составляющих. Для выявления границ применимости эталонных шкал проведен цифровой количественный анализ эталонных шкал ГОСТ 5639–82 и 1778–70 с учетом метрологических факторов, рассмотренных в предыдущей главе. Оценка проводилась с целью установления закономерностей формирования изображений эталонов и выявления геометрических параметров, определяющих возможность выявления различий при ранжировке стали по структуре. Такого рода анализ был начат ранее [121] и продолжен в настоящей работе, в связи с необходимостью обеспечения полноты учета метрологических факторов и расширения объектов исследования.

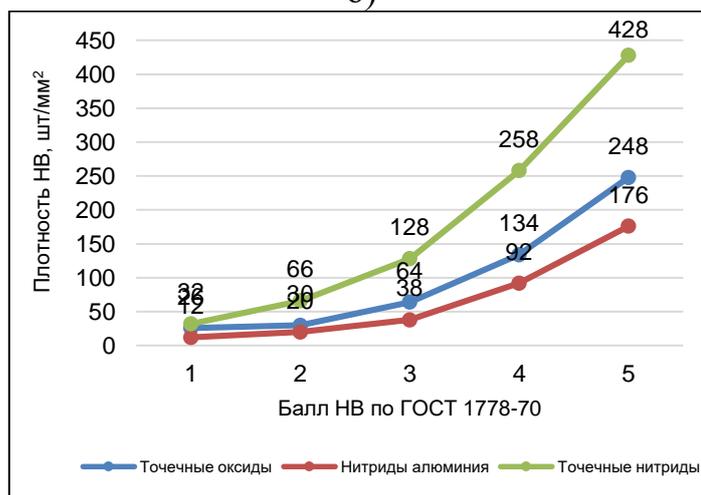
Для выявления границ эффективного применения эталонных шкал при реализации цифровых процедур проведен количественный анализ эталонных изображений НВ и зерна, представленных в линейке ГОСТ 1778-70 и 5639-82 Так для эталонных изображений ГОСТ 1778–70, шкал ряда Б следующих НВ: оксиды точечные, нитриды точечные и нитриды алюминия, в частности, были измерены и площади НВ и определены характеристики их распределения, значения средней площади, плотности и объемной доли (рисунок 30).



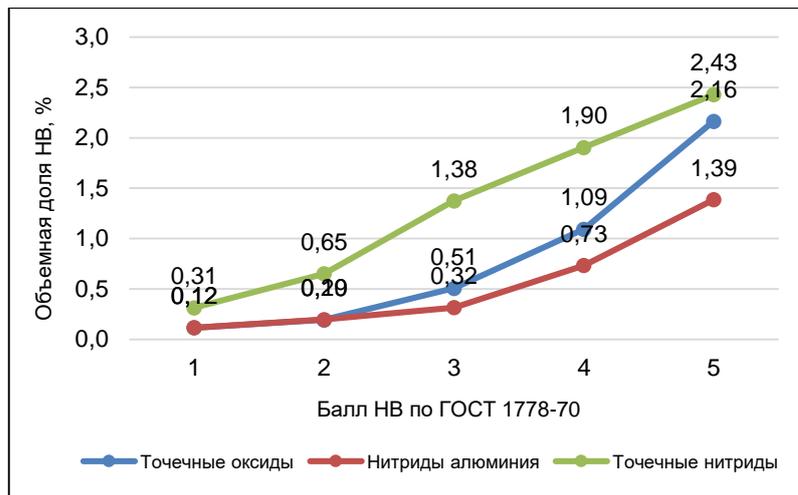
а)



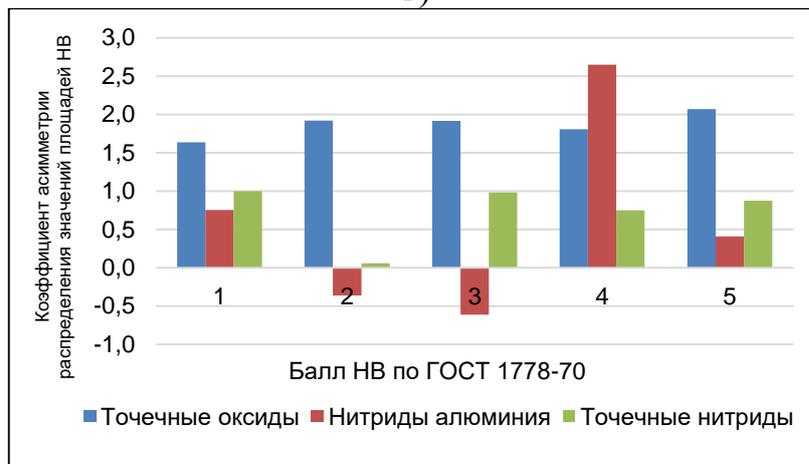
б)



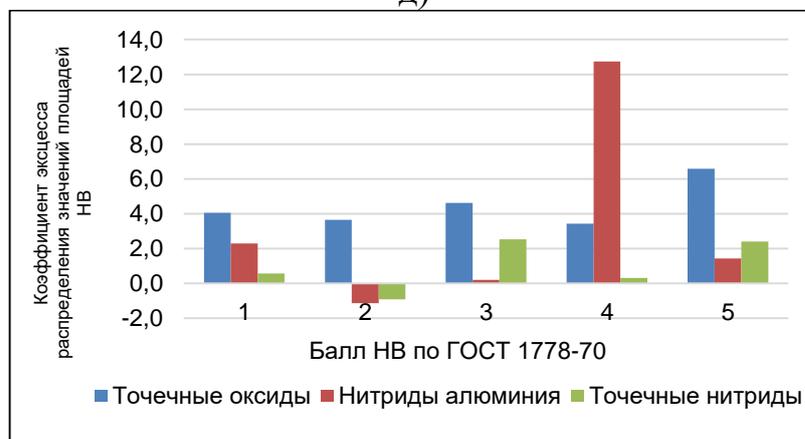
в)



Г)



Д)



е)

а) соотношение логарифма суммарного периметра и площади б) средняя площадь; в) плотность; г) объемная доля; д) и е) коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения НВ по площадям соответственно  
 Рисунок 30 – Различие в строении изображений эталонных шкал НВ

Показано, что при подобии изображений НВ различных баллов в пределах своих шкал (рисунок 30 а), средняя площадь включений может,

как расти, так и падать при повышении балла в зависимости от шкалы (рисунок 30 б). Его относительная эффективность для оценки загрязненности стали НВ связана с видом распределения включений по величине площади (рисунок 30 д и е). Вариация значений соответствующих коэффициентов асимметрии и эксцесса с одной стороны отражает масштаб отклонения распределений от нормального, с другой указывает на различие в статистической природе распределения для различных баллов, шкал.

Помимо размеров для НВ важен характер их размещения, в частности, их кучность и разреженность определяют различие в работе образования вязкого излома и условия протекания пластической деформации соответственно [19.]. Для оценки характера размещения НВ на эталонных изображениях были построены полиэдры Вороного, рассчитаны расстояния между центрами НВ (ближайшими соседями) и оценена их статистика распределения (таблица 13).

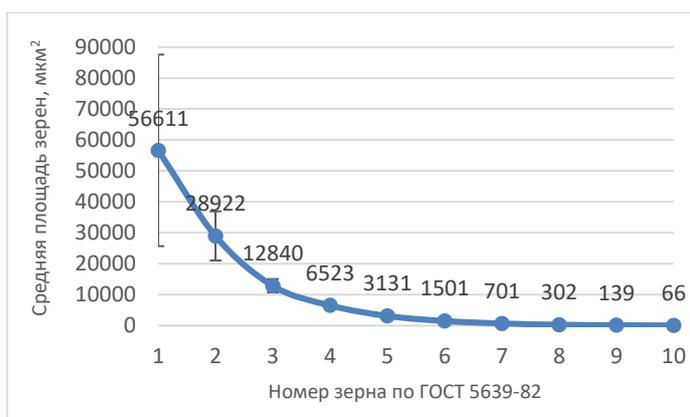
Таблица 13. Результаты оценки размещения НВ на эталонных шкалах ГОСТ 1778-70 на основе построения полиэдров Вороного.

Шкала	Балл по ГОСТ 1778-70	Среднее расстояние между центрами НВ, мкм	$A_s$ распределения расстояний между центрами НВ	$E_x$ распределения расстояний между центрами НВ
Точечные оксиды	1	440,6 ± 44,4	0,3±0,4	-0,7±0,8
	2	437,6 ± 34,4	0,5±0,4	-0,5±0,7
	3	290,6 ± 15,2	-0,1±0,3	-0,6±0,5
	4	210,2 ± 8,1	0,1±0,2	-0,9±0,4
	5	157,2 ± 3,9	0,4±0,1	-0,4±0,3
Точечные нитриды	1	438,3 ± 23,4	-0,4±0,4	0,5±0,7
	2	307,9 ± 12,9	-0,4±0,3	-0,8±0,5
	3	227,3 ± 5,8	0,3±0,2	0,9±0,4
	4	164,9 ± 2,9	0,3±0,1	-0,1±0,3
	5	128,9 ± 1,9	0,3±0,1	0,8±0,2
Нитриды алюминия	1	484,9 ± 71,1	1,6±0,6	2,4±0,9
	2	446,4 ± 34,7	0,1±0,5	0,1±0,8
	3	274,9 ± 24,9	0,3±0,4	-0,8±0,7
	4	224,0 ± 13,1	0,9±0,2	1,1±0,4
	5	182,4 ± 6,8	0,5±0,2	-0,4±0,3

Показано, что для большинства эталонных изображений распределение расстояний между центрами НВ значительно отличается от нормального, что говорит об их неслучайном размещении. Более того

коэффициенты асимметрии и эксцесса отличаются от балла к баллу в рамках одной шкалы. Это обстоятельство необходимо учитывать при сопоставлении загрязненности сталей на основе сравнения с эталонными шкалами.

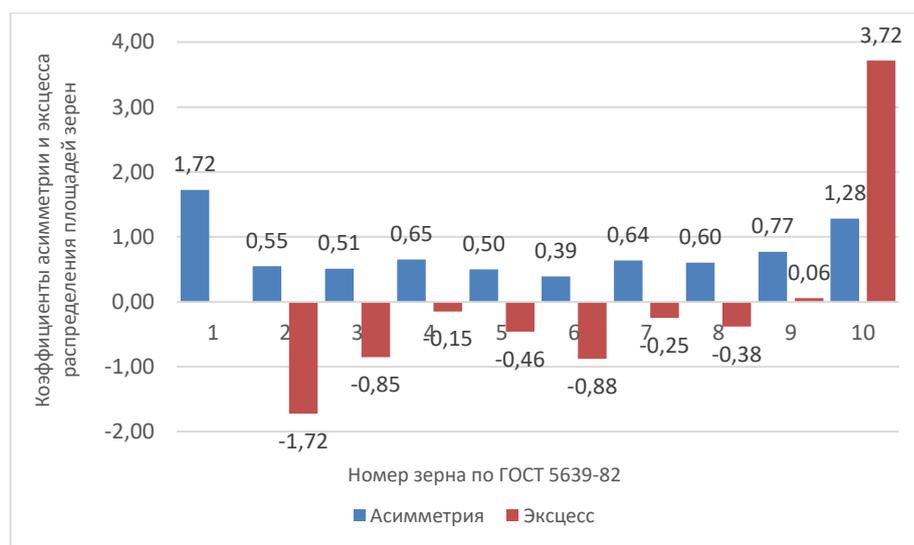
Аналогичным образом проведен цифровой количественный анализ эталонных изображений зеренной структуры ГОСТ 5639-82. На рисунке 31 представлены статистические показатели геометрических параметров зеренной структуры для эталонных изображений.



а)



б)



в)

а – средняя площадь зерен; б – плотность зерен; в – коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения площадей зерен

Рисунок 31 – Графическое представление результатов количественной оценки эталонных изображений зерна по ГОСТ 5639-82

Показано, что ранжированию по эталонным шкалам в ГОСТ 5639 соответствует повышение плотности зерен, при понижении средней площади с возрастанием номера зерна. Вариация рассчитанных коэффициентов асимметрии и эксцесса так же, как и в случае с НВ отражает различную статистическую природу формирования изображений эталонов (для спектра номеров от 1 до 10). Между значениями средней площади зерен эталонных изображений (по результатам их прямых измерений) и средними значениями (табл.1, ГОСТ 5639) наблюдается следующая зависимость (рисунок 32).

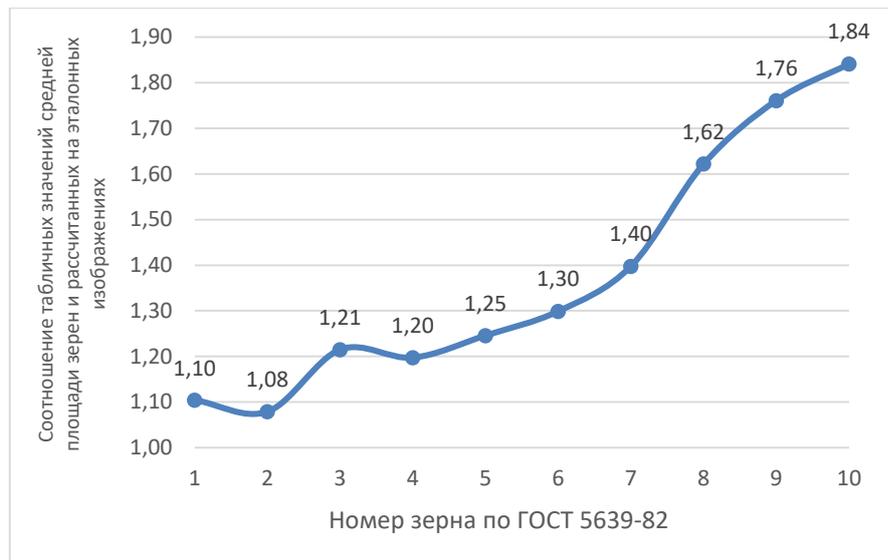


Рисунок 32 – Соотношение между табличными (ГОСТ 5639) и рассчитанными по измерениям эталонных изображений значений средней площади зерен для различных номеров зерна

Для реальных структур различия в статистических характеристиках отдельных полей зрения, учитывая их неоднородность, будут еще выше. Так, например, для зерна аустенита стали 40X2H2MA, полученного после закалки с температур 1050, 950 и 850 °С (выдержка 1 час), значения средней площади зерен, коэффициентов асимметрии и эксцесса, измеренные на площади не менее 2 мм<sup>2</sup> (в масштабе каждого образца) с учетом метрологических факторов, значительно отличались от показателей зерен, отвечающих соответствующим эталонным изображениям по ГОСТ 5639 (таблица 14).

Таблица 14. Статистические характеристики морфологии структуры зерна аустенита стали 40X2H2MA (по результатам цифровых измерений) в сопоставлении с соответствующими показателями эталонных шкал (ГОСТ 5639).

Параметр	T, °C	Номер зерна	T, °C	Номер зерна	T, °C	Номер зерна
	850	9	950	8	1050	7
Средняя площадь зерен, мкм <sup>2</sup>	223,9±2	139±2	245,7±2	302±7	497,0±7	701±24
Плотность зерен, шт/мм <sup>2</sup>	3179	3176	2564	1754	1313	902
A, распределения значений площадей зерен	2,1±0,04	0,7±0,08	2,1±0,04	0,6±0,10	1,6±0,04	0,6±0,14

$E_x$ распределения значений площадей зерен	$6,8 \pm 0,08$	$0,1 \pm 0,15$	$5,9 \pm 0,07$	$-0,4 \pm 0,20$	$2,4 \pm 0,09$	$-0,3 \pm 0,27$
---	----------------	----------------	----------------	-----------------	----------------	-----------------

Применение цифровизации открывает широкие перспективы для количественного описания различий в строении изображений технологически неизбежных неоднородных структур и изломов сталей и сплавов. Последующее сопоставление морфологии структур и изломов обеспечит получение всего спектра характеристик геометрии структур, определяющих механизмы деформации и разрушения металла, как среды со структурой. На этой основе возможно внесение в измерение структур и изломов количественной меры (при условии необходимого метрологического обеспечения процедур подготовки к измерениям и самих измерений), что при накоплении необходимой статистики результатов, позволит разработать новую линейку стандартов структур и разрушения, обеспечивающих более глубокое понимание причин неоднородности свойств металла, как основы для выработки обоснованных технологических решений, направленных на повышение качества металлопродукции [113].

## ВЫВОДЫ

1. Расширено представление о влиянии основных этапов металлографических процедур подготовки и анализа изображений структур на конечный результат цифровых измерений – значений параметров геометрии элементов изображения и их конфигурации в целом: выявлены возможные сценарии трансформации НВ при изменении увеличений от 50 до 1000 крат, уточнено влияние разрешения матрицы цифровой камеры, связности элементов цифрового изображения. Установлено, что их влияние при получении цифровых изображений различных типов структур (зерно, включения, скелет дендритной структуры и др.) носит разноплановый характер.
2. Показано, что результаты, полученные на основе традиционно применяемых приемов для назначения уровня порогового контраста применимо к изображению типичных структур (феррито-цементитная смесь различной строения, литая структура, зерно, частицы неметаллической природы), в связи с необходимостью их перевода в бинарную матрицу характеризуются существенным различием измеряемых значений геометрических параметров структур – в разы и более. Это определяет необходимость выбора критериев бинаризации, основанных на учете закономерностей формирования поля яркости изображений, отражающих морфологию структуры, что подтвердило применение S-образных диаграмм для структур развитой морфологии, развито для случая цифровых измерений геометрии частиц на изображениях НВ на нетравленных металлографических шлифах.
4. Сопоставление статистической природы ряда изображений эталонных структур (шкалы зерна и неметаллических включений), включенных в нормативные документы, выявило ее неоднородность, масштаб различий значений коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения включений (ГОСТ 1778, шкалы ряда Б: оксиды точечные, нитриды точечные и нитриды

алюминия) и зерен (ГОСТ 5639) по площадям находится в пределах от – 1,1 до 12,7 и от – 1,7 до 3,7 соответственно.

4. Показано, что при подобии эталонных изображений НВ различных баллов в пределах своих шкал, средняя площадь включений может, как расти, так и падать при повышении балла в зависимости от шкалы. Его относительная эффективность для оценки загрязненности стали НВ связана с видом распределения включений по величине площади. Вариация значений соответствующих коэффициентов асимметрии и эксцесса с одной стороны отражает масштаб отклонения распределений от нормального, с другой указывает на различие в статистической природе распределения для различных баллов, шкал.

5. Сопоставление строения изображений, полученных при увеличении  $\times 100$  аустенитного зерна стали 40X2H2МА после закалки с различных температур показало, что значения средней площади, коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения зерен по величине их площадей (для идентичных номеров шкалы) значительно отличаются от значений, соответствующих эталонным изображениям ГОСТ 5639-82 и ASTM E 112. Это подтверждает необходимость развития методов цифровой оценки структур для повышения информативности и объективности процедур их классификации при аттестации качества металлопродукции по структуре.

### Список использованных источников

1. Сталь на рубеже столетий / Под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСиС, 2001. С. 445-543.
2. Kudrya, A.V., Sokolovskaya, E.A., Kodirov, D.F., Bosov, E.V., Kotishevskiy, G.V. On necessity of taking into account statistical nature of the objects using Big Data in metallurgy // CIS Iron and Steel Review. - 2022. Volume 23.
3. Голиков, И.Н., Масленков, С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. Москва: Металлургия. – 1977. – 224 с.
4. Чалмерс, Б. Теория затвердевания: Пер. с англ. Москва: Металлургия. – 1969. – 327 с.
5. Ершов, Г.С., Позняк, Л.А. Микронеоднородность металлов и сплавов. Москва: Металлургия. – 1985. – 214 с.
6. Новиков, И.И. Золоторевский, В.С. Дендритная ликвация в сплавах. Москва: Наука. – 1966. – 156 с.
7. Новокщенова, С.М., Виноград, М.И. Дефекты стали. Справ. изд. Москва: Металлургия. – 1984. – 199 с.
8. Хворинов, Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. Пер. с чеш. Москва: Машгиз. – 1958. – 392 с.
9. Кудря, А.В. Соколовская, Э.А. Прогноз разрушения материалов с неоднородной структурой // Физика металлов и металловедение. – 2022. Т. 123, № 12.
10. Приданцев, М.В. Влияние примесей и редкоземельных элементов на свойства сплавов. Москва: Металлургиздат. – 1962. – 208 с.
11. Гольдштейн, М.И., Грачев, С.В., Векслер, Ю.Г. Специальные стали. Учебник для вузов. Москва: Металлургия. – 1985. – 408 с.
12. Касаткин, Г.Н. Водород в конструкционных сталях. – Москва: Интернет Инжиниринг. – 2003. – 335 с.

- 13.Кислинг, Р., Ланге, Н. Неметаллические включения в стали. Пер. с англ. – Москва: Металлургия. – 1968. – 123 с.
- 14.Агеев, Н.В. Металлургические методы повышения качества стали: сборник статей. - Москва: Наука. – 1979. - 288 с
- 15.Бельченко, Г.И., Губенко, С.И. Неметаллические включения и качество стали. Киев: Техника. – 1980. – 168 с.
- 16.Явойский, В.И., Близнюков, А.Ф. Вишкарев, А.Ф. Включения и газы в сталях. Москва: Металлургия. – 1979. – 272 с.
- 17.Costa e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. Volume 8, Issue 2
- 18.Штремель, М.А. Проблемы металлургического качества стали (неметаллические включения) // МиТОМ. – 1980. № 8.
- 19.Штремель, М.А. Разрушение. В 2-х книгах. Книга 1 Разрушение материала. Москва: Изд. дом МИСиС. – 2014. – 670 с.
- 20.Singh, V., Khan, R., Bandi B., Roy, G.G., Srirangam, P. Effect of non-metallic inclusions (NMI) on crack formation in forged steel // Materialstoday: Proceedings. – 2021. Volume 41, Part 5
- 21.Garrison W.M. Controlling inclusion distributions to achieve high toughness in steels // Iron & Steel Technology. – 2007. Volume 4, Issue 6.
- 22.Choudhary, P. The Effect of Inclusion Type on the Toughness of 4340 Steel // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. Volume 25, Issue 1.
- 23.Guan, J., Wang, L., Chuanwei, Z., Xinxin, M. Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel // Materials Science, Engineering. – 2017. Volume 106.
- 24.Wang P., Wang B., Liu Y., Zhang P., Luan Y.K., Li D.Z., Zhang, Z.F. Effects of inclusion types on the high-cycle fatigue properties of high-strength steel // Scripta Materialia. – 2022. Volume 206.

25. Murakami Y. Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on the Fatigue Strength of Metals. // JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials. – 1989. Volume 32, Issue 2.
26. Grad P., Reuscher B., Brodyanski A., Kopnarski M., Kersche E.. Mechanism of fatigue crack initiation and propagation in the very high cycle fatigue regime of high-strength steels // Scripta Materialia. – 2012. Volume 67, Issue 10.
27. Lankford, J. Effect of oxide inclusions on fatigue failure. // International Metals Reviews. – 1977. Volume 22, Issue 1
28. Chao Liu, Xuan Li, Reynier I. Revilla, Tong Sun, Jinbin Zhao, Dawei zhang, Shufeng Yang, Zhiyong Liu, Xuequn Cheng, Herman Terryn, Xiaogang Li. Towards a better understanding of localised corrosion induced by typical non-metallic inclusions in low-alloy steels // Corrosion Science. – 2021. Volume 179, Issue 109150
29. Ha, H.Y., Park, C.J., Kwon, H.S. Effects of non-metallic inclusions on the initiation of pitting corrosion in 11% Cr ferritic stainless steel examined by micro-droplet cell // Corrosion Science. – 2007. Volume 49, Issue 3
30. Hou, Y., Wang, J., Liu, L., Li, G., Zhai, D. Mechanism of pitting corrosion induced by inclusions in Al-Ti-Mg deoxidized high strength pipeline steel // Micron. – 2020. Volume 138.
31. Jin, T.Y., Liu, Z.Y., Cheng, Y.F. Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. Volume 35, Issue 15.
32. Scotto V., Ventura G., Traverso E. The influence of non-metallic inclusion nature and shape on the pitting corrosion susceptibility of 18Cr9Ni and 17Cr11Ni2Mo austenitic stainless steels // Corrosion Science. – 1979. Volume 19, Issue 4.
33. Родионова, И.Г., Бакланова, О.Н., Амежнов, А.В., Князев, А.В., Зайцев, А.И., Феоктистова, М.В. Влияние неметаллических

- включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов // Сталь. – 2017. № 10.
34. Губенко, С.И., Ошкадеров, С.П. Неметаллические включения в стали. – Киев: Наук. думка. – 2016. – 527 с.
35. Виноград, М.И. Включения в стали и ее свойства. Москва: Металлургиздат. – 1972. – 220 с.
36. Гуляев, А.П., Лахтин, Ю.М., Тарусин, А.И.. Термическая обработка стали. – Москва: Машгиз. – 1946. – 283 с.
37. Болховитинов, Н.Ф. Величина зерна и свойства стали. Москва: Металлургиздат. – 1943. – 168 с.
38. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. 2-е изд. Москва: Металлургия. – 1983. – 352 с.
39. Бернштейн, М.Л., Займовский, В.А. Механические свойства металлов. Москва: Металлургия. – 1979. – 496 с.
40. Лившиц, Б.Г. Металлография. Москва: Металлургия. – 1990. – 337 с.
41. Черноусов, П.И., Коротченко, Н.А., Голубев, О.В. Основоположник прикладной металлургии // История науки и техники в системе современных знаний : материалы научной конференции, посвященной 10-летию кафедры истории науки и техники УГТУ – УПИ, Екатеринбург, 14 декабря 2009 г.
42. Беккерт, М. Железо. Факты и легенды. Пер. с нем. Москва: Металлургия. – 1988. – 240 с.
43. Счастливец, В. М., Академик В.Д. Садовский и развитие физического металловедения на Урале. - Екатеринбург: УрО РАН. – 2010. – 366 с
44. Байков, А.А. Собрание трудов. Москва; Ленинград: Издательство академии наук СССР. – 1952. Том. 1. – 344 с.

- 45.Ржешотарский, А. А. Микроскопические исследования железа, стали и чугуна. - В кн.: Русские ученые-металловеды. Москва. – 1951.
- 46.Гейн, Е., Бауер, О. Металлография. Общая часть. Рига: Наука и жизнь. – 1914. – 87 с.
- 47.Тихонов, Т.И. Металлография. Томск: Паровая типография Н.И. Орловой. – 1907. – 67 с.
- 48.Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия. 1975 г. 273 с
- 49.Зажигалкин А.В., Панкратова Н.П. Промышленности России нужна международная стандартизация! Стандарты и качество. 2009. № 6. С. 36-39
- 50.ASTM International - Standards Worldwide: website. - USA. - URL: <https://www.astm.org>
- 51.Катыхин, А. И., Малиновская А.В. Международная стандартизация как фактор повышения конкурентоспособности. Дельта науки. – 2018. – № 1. – С. 72-75
- 52.Николаева М.А., Лебедева Т.П. История возникновения и развития стандартизации в России и за рубежом. Сибирский торгово-экономический журнал. – 2015. – № 1(20). – С. 86-89
- 53.Морев, В. А. К истории советской стандартизации в 1918-1945 гг. Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 386. – С. 130-134
- 54.Вейнберг, Ф. Приборы и методы физического металловедения. Выпуск 2. Пер. с англ. Москва: Мир, – 1974. – 368 с.
- 55.Кадушников Р.М., Алиевский В.М., Сомина С.В.. Цифровая микроскопия от нано до макро с использованием системы анализа изображений SIAMS. Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 1. – С. 77-82

56. Kazakov, A.A., Kiselev, D. Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloy's Microstructure. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 5, 2016. 294–301
57. Карпов, Ю. А. Новый Федеральный закон "О стандартизации в Российской Федерации" и аналитика // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 11. – С. 5-6
58. Михайлович, А.П., Кадушников, Р.М., Баймаганбетов, Д.Б. Проблемы перехода от полуколичественных к количественным методам анализа структуры металлов и сплавов // I Международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института : тезисы докладов (Екатеринбург, 21–25 апреля 2014 г.). - Екатеринбург: УрФУ. – 2014.
59. Казаков, А.А., Киселев, Д.В., Казакова, Е.И. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ // *Литье и металлургия.* – 2021. № 2.
60. Анисович, А.Г. Проблемы применения стандартов при оценке микроструктуры металлов и сплавов // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2021. – Т. 66, №1.
61. Саламатов В.Ю., Ватолкина Н.Ш., Дробышев Д.А., Сапожникова П.Н. Цифровая трансформация в сфере стандартизации для повышения международной конкурентоспособности России. *Российский внешнеэкономический вестник.* 2023. № 6. С. 7-29
62. Вашуль, Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов. Пер. с нем. – Москва: Металлургия. – 1988. – 320 с.
63. Анисович, А.Г., Румянцева, И.Н. Практика металлографического исследования материалов. – Минск: Беларуская навука. – 2013. – 221 с.
64. ASTM E3-11 «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens»

- 65.Панченко, Е.В., Скаков, Ю.А., Кример, Б.И. Лаборатория металлографии. Москва: Металлургия. – 1965. – 439 с.
- 66.Бернштейн, М.Л., Рахштадт, А.Г. Металловедение и термическая обработка стали. Том 1. Методы испытаний и исследования. Москва: Металлургия. – 1983. – 352 с.
- 67.Анисович А.Г. Артефакты в металлографии: Пыль // Литье и металлургия. – 2020. № 3
- 68.Анисович, А.Г., Маркевич, М.И. Артефакты в металлографии. нитки и волокна // Литье и металлургия. – 2022. № 2.
- 69.Metallographic products, knowledge and service: website. - France. - URL: <https://www.struers.com>
- 70.Беккерт, М., Клемм, Х. Способы металлографического травления: Справ. изд. Пер. с нем. 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Металлургия. - 1988. – 400 с.
- 71.Баранова, Л.В., Демина, Э.Л. Металлографическое травление металлов и сплавов. Москва: Металлургия. – 1986. – 256 с.
- 72.Анисович, А.Г. Артефакты в металлографии. Ямки травления // Литье и металлургия. – 2023. № 1.
- 73.Malage, A., Rege, P.P., Rathod, M.J. Automatic quantitative analysis of microstructure of ductile cast iron using digital image processing // Metallurgical and Materials Engineering. - 2015. Volume 21. No 3.
- 74.ASTM E112-13 «Standard Test Methods for Determining Average Grain Size»
- 75.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).

- 76.Анисович, А.Г. Выбор исследовательского оборудования для анализа структуры промышленных сплавов // Литье и металлургия. – 2012. № 2 (65).
- 77.Брандон, Д., Каплан, У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. Москва: Техносфера. – 2004. – 384 с.
- 78.Кларк, Э.Р., Эберхардт, К.Н. Микроскопические методы исследования материалов. Пер. с англ. – Москва: Техносфера. – 2007. – 371 с.
- 79.Гонсалес, Р., Вудс, Р. Цифровая\_обработка\_изображений. Издание 3-е исправленное и дополненное. Москва: Техносфера. – 2012. – 1104 с.
- 80.Яне, Б. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. А.М. Измайловой. — Москва: Техносфера. – 2007. – 584 с.
- 81.Troland L. T. Report of Committee on Colorimetry for 1920–21 // Journal of the Optical Society of America. – 1922. Volume 6, No. 6.
- 82.Jones, L.A. Historical background and evolution of the colorimetry report // Journal of the Optical Society of America . – 1943. Volume 33. No. 10.
- 83.Луизов, А.В. Цвет и свет. Ленинград: Энергоатомиздат. – 1989. – 256 с
- 84.Пантелеев, В.Г., Егорова, О.В., Клыкова, Е.И. Компьютерная микроскопия. Москва: Техносфера. – 2005. – 304 с.
- 85.CIPA DCG-001-Translation-2005. Guideline for Noting Digital Camera Specifications in Catalogs. Published by Camera & Imaging Products Association. – 2005.
- 86.Визильтер, Ю.В., Желтов, С.Ю., Бондаренко, А.В. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – Москва: Физматика. – 2010. – 672 с.
- 87.Миано, Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. Москва: Издательство Триумф. – 2003. – 336 с.

- 88.Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. Москва: Мир. – 1982. Кн. 2. – 480 с.
- 89.Старовойтов, В.В., Голуб, Ю.И. Цифровые изображения от получения до обработки. Минск: ОИПИ НАН Беларуси. – 2014. – 202 с.
- 90.Монич, Ю.И., Старовойтов, В.В. Преобразование цветных изображений на базе технологии Ретинекс // Искусственный интеллект. – 2007. № .3.
- 91.Kimmel R., et al. A Variational Framework for Retinex // International Journal of Computer Vision. – 2003. Volume 52, Issue 1.
- 92.Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. Пер. с англ. Москва: радио и связь. – 1986. – 400 с.
- 93.Фурман, Я.А., Юрьев, А.Н., Яншин, В.В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та. – 1992. – 245 с.
- 94.Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1979. Volume 9, Issue 1
- 95.Гашников, М.В., Глузов, Н.И., Ильясова, Н.Ю. и др. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. Софферва В.А. 2-е изд. – Москва: Физматлит. – 2003. – 784 с.
- 96.Sauvola J., M. Pietikäinen. Adaptive document image binarization // Pattern Recognition. – 2000. Volume 33, Issue 2.
- 97.Yanowitz, S.D., Bruckstein, A.M. A New Method for Image Segmentation // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1989. Volume 46, Issue 1
- 98.Wellner, P.D. Adaptive thresholding for the digitaldesk. Tech. Rep. EPC-93-110, EuroPARC - 1993.
- 99.Bradley, D., Roth, G. Adaptive Thresholding Using Integral Image // Journal of Graphics Tools. – 2007. Volume 12, Issue 2.

100. Niblack, W. An Introduction to Digital Image Processing. Prentice Hall. – 1986. – 215 p.
101. Samorodova, O.A., Samorodov, A.V. Fast implementation of the Niblack binarization algorithm for microscope image segmentation // Pattern Recognit and Image Analysis. – 2016. Volume 26, No.3.
102. Розенфельд, А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. Пер. с англ. Москва: Мир. – 1972. – 230 с.
103. Merkus, H.G. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. Springer Science + Business Media. – 2009. – 531 p.
104. Allen, T. Particle Size Measurement. 3rd Edition. – London: Chapman and Hall, 1981. – 130 p.
105. Штремель, М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур: моногр. Москва: Изд. Дом МИСиС. – 2015. – 976 с.
106. Yao, A.C.-C. Lower bounds for algebraic computation trees with integer inputs // Proc. 30th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 1989). – 1989.
107. Скворцов, А.В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2002. – 128 с.
108. Cover, T., Hart P. Nearest neighbor pattern classification // IEEE Transactions on Information Theory. – 1967. Volume 13, No. 1.
109. Voronoi G.F. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie de formes quadratiques // Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1908. Volume 134.
110. Препарата, Ф., Шеймос, М. Вычислительная геометрия: Введение: Пер. с англ. Москва: Мир. – 1989. – 478 с.
111. Михайлович, А.П., Сивкова, Т.А., Кадушников, Р. М., Сомина, С.В. Металлографический анализ: история и перспективы развития // Мир измерений. – 2014. № 2.

112. Тимошенко В.В., Буданова Е.С., Кодиров Д.Ф., Соколовская Э.А., Кудря А.В. О выборе областей с доминирующим типом зависимости при анализе данных производственного контроля. *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 3. С. 103-114
113. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Пережогин В.Ю., Танг В.Ф., Кодиров Д.Ф., Сергеев М.И. Возможности цифровизации измерений в металловедении для внесения в оценку структур и разрушения количественной меры. *Металлург*. 2022. № 7. С. 48-57
114. ASTM E1951-14 «Standard Guide for Calibrating Reticles and Light Microscope Magnifications»
115. ASTM E1382-97 «Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis»
116. ASTM E883-11 «Standard Guide for Reflected Light Photomicrography»
117. McHugh, Sean T. *Understanding Photography*. San Francisco: No Starch Press. – 2018. – 240 p.
118. Francus, P. *Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments*. Springer Science + Business Media. – 2005. Volume 7. – 319 p.
119. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Кодиров Д.Ф. Об учете статистической природы объектов при анализе структур в металловедении. *Электromеталлургия*. 2020. № 7. С. 22-27.
120. ASTM E45 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel
121. Пережогин Виталий Юрьевич. Оценка факторов, определяющих воспроизводимость результатов цифровых измерений структур в сталях и сплавах дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01: М., 2020. - 235 с