

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

Кодиров Давронжон Фарходжон угли

Метрологическое обеспечение измерений цифровых изображений структур сплавов на
основе железа

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2024

Актуальность работы

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 и 1778 - шкалы ОТ, НТ и НА) и подобных реальных структур, выявлено существенное различие в статистических характеристиках (коэффициенты асимметрии A_s и эксцесса E_x) 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 и 1778.

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 и 1778) 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. На «Металл-Экспо 2020» в составе коллектива авторов получена Серебряная медаль за разработку импортзамещающих твёрдых сплавов с повышенной износостойкостью и

сопротивляемость преждевременному разрушению для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих сельхозмашин, эксплуатирующихся в абразивной среде.

Общая структура и объем научной работы:

Научная работа включает в себя введение, анализ литературных источников, четыре главы, выводы и список источников литературы (121 источник). Научная работа представлена на 107 страницах, включает 14 таблиц и 32 иллюстраций.

Основное содержание работы

Введение включает в себя актуальность научной работы, цели и поставленные задачи исследования, научную новизну и основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы. Изучены вопросы влияния морфологии структур на качество металла, проведен анализ тенденции развития металлографии в России и за рубежом, описаны теоретические основы, существующие методы и алгоритмы обработки изображений.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методов исследования.

В качестве объектов исследования были выбраны эталонные изображения зеренной структуры (ГОСТ 5639) и неметаллических включений (ГОСТ 1778 шкалы: ОТ, НТ и НА), изображения 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 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых материалов

Объект исследования	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
38ХНЗМФА	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, плавок или партий, столбцам n - значения технологических параметров (n_i) и характеристик качества металлопродукции (n_q). Для исследуемых баз данных, описывающих технологические процессы получения металлопродукции из сталей 38ХНЗМФА, 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_i/n_q) 91/20, 18/17 и 84/15 соответственно. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программы Excel.

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.

Изображения микроструктуры и неметаллических включений (НВ) 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 выравнивали 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.

В третьей главе проведен статистический анализ баз данных производственного контроля технологии производства исследуемых сталей и оценены риски, возникающие вследствие отсутствия учета роли метрологических факторов при цифровых измерениях изображений структур различных сплавов на основе железа.

Статистический анализ баз данных показал большой разброс значений выходных параметров (таблица 2).

Таблица 2. Масштаб неоднородности качества металлопродукции

Сталь	Тип изделия	Размах значений в выборке Δ , ($y_i^{\max} - y_i^{\min}$)						σ_b , МПа	δ , %
		KCU ⁺²⁰ , Дж/см ²	KCV ⁰ , Дж/см ²	KCU ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	KCU ⁻⁵⁰ , Дж/см ²	KCU ⁻⁶⁰ , Дж/см ²			
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	

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.

Цифровой количественный анализ структур включает в себя большое количество этапов: пробоподготовка образцов, получение изображений, цифровая обработка изображений, измерение параметров объектов и подходы к обработке получаемых результатов. Важным этапом при проведении анализа изображений структур является подготовка применяемого оборудования, которая включает в себя: регулировку оптической и световой системы микроскопа, калибровку масштабной линейки, настройку камеры, выбор оптического увеличения, фокусировку и другие. Показано, например, что в зависимости от изменения уровня освещенности (которое достигалось путем регулировки мощности осветительной лампы) одно и тоже НВ

изменяет свою форму и размеры вплоть до исчезновения из-за слияния с фоном (рисунок 1а-г), при этом существует определенный интервал значений яркости (характерный для каждого микроскопа), при котором площадь НВ значительно не меняется (рисунок 1д).

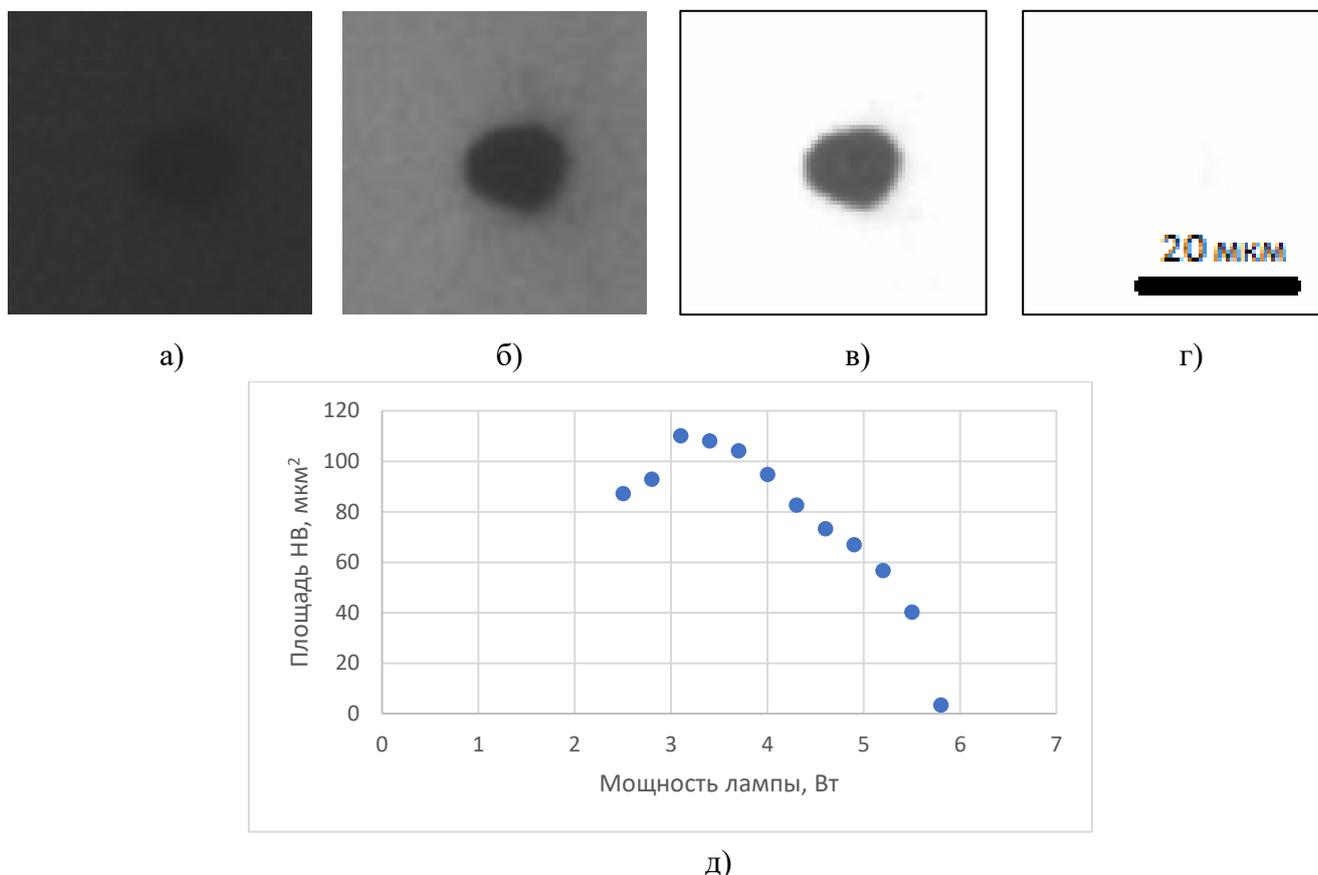
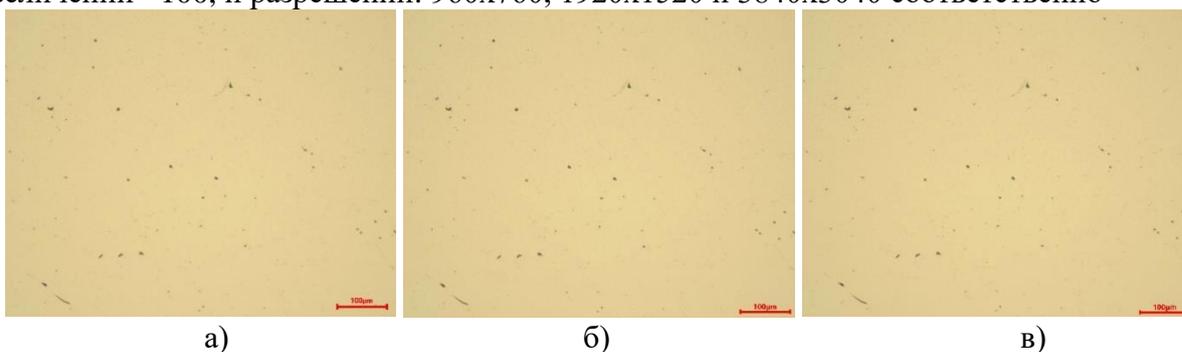


Рисунок 1 – Изменение площади одного и того же НВ при вариации мощности осветительной от 2,5 до 5,8 Вт (а-г)

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 2) и измерены (табл. 3,4) 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 2 – Изображения темных объектов (НВ) и зерна аустенита стали 40X2H2MA (одних и тех же полей зрения), полученные при различном разрешении 960x760 (а,г), 1920x1520 (б,д) и 3840x3040 (в,е), пкс×пкс

Таблица 3. Изменение значений параметров темных объектов на изображениях одной и той же области, полученных при трех вариантах разрешения кадра

Порог фильтрации, мкм ²	Разрешение изображения, пкс×пкс	Количество, шт	Средняя площадь, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей	Коэффициент эксцесса 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 4. Изменение значений геометрических параметров зерен на изображениях одной и той же области шлифа, полученных при трех уровнях разрешения

Порог фильтрации, мкм ²	Разрешение изображения, пкс×пкс	Количество, шт	Средняя площадь, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей	Коэффициент эксцесса 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 3). 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.

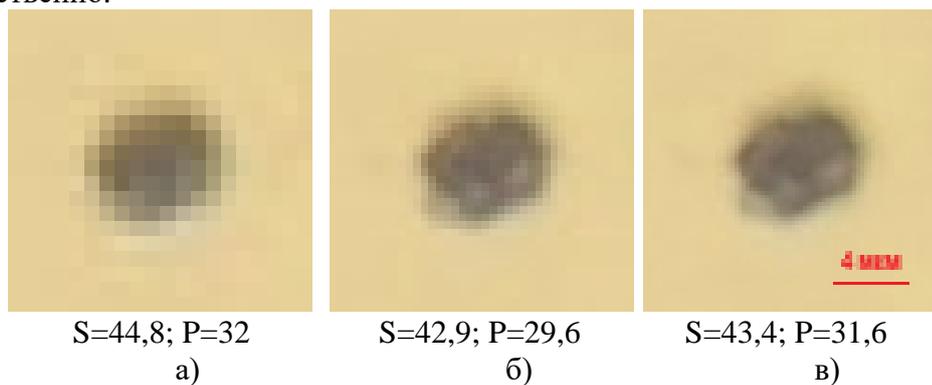


Рисунок 3 – Изменение площади (S, $\mu\text{м}^2$) и периметра (P, $\mu\text{м}$) одного и того же НВ при различном разрешении изображения: 960x760 (а), 1920x1520 (б) и 3840x3040 (в), пкс×пкс

Важную роль при получении достоверных результатов измерения структур играет выбор оптимального оптического увеличения. Нередко требуется сопоставление структурных составляющих, которые получены при различных увеличениях. Риски, возникающие при этом, оценены на изображениях НВ (одной и той же площади) улучшаемой стали 38ХНЗМФА, полученных при увеличениях микроскопа от 50 до 1000 крат (рисунок 4).

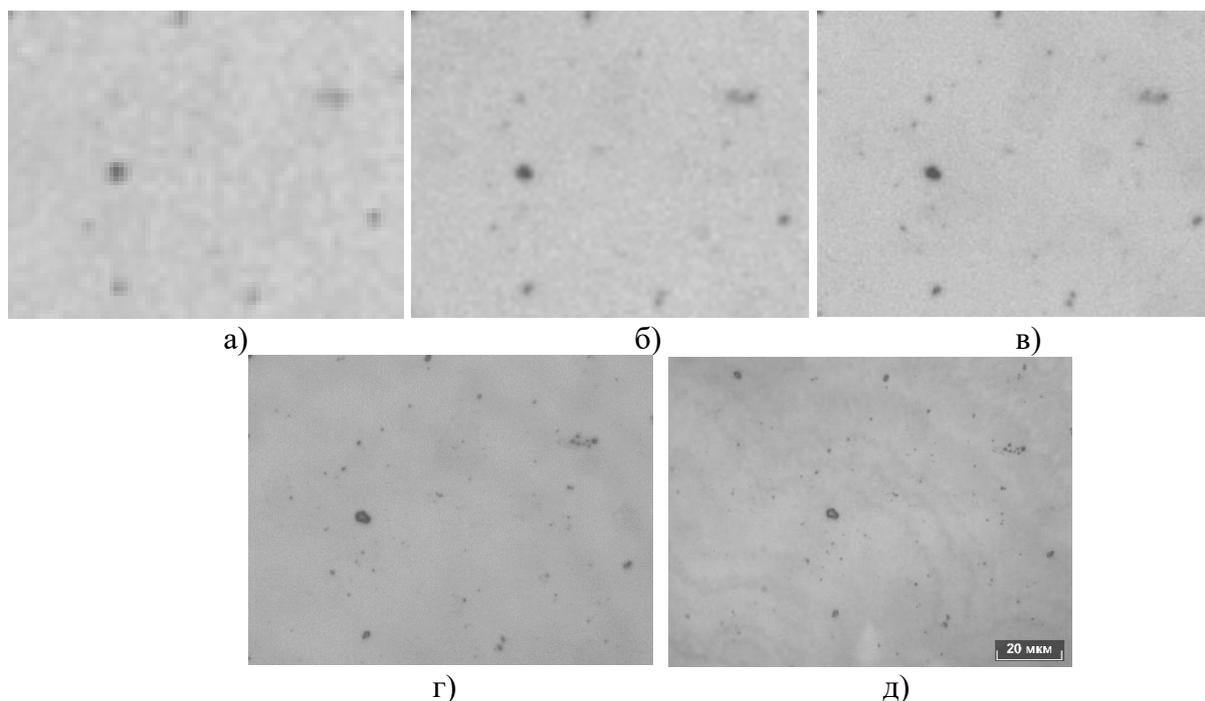


Рисунок 4 – Изображения НВ стали 38ХНЗМФА (равной площади в масштабе образца), полученные при разных увеличениях: $\times 50^{\times 20}$ (а), $\times 100^{\times 10}$ (б), $\times 200^{\times 5}$ (в), $\times 500^{\times 2}$ (г), $\times 1000$ (д)

Последующая обработка изображений, с целью измерения геометрических параметров темных объектов (их периметра и площади) проводилась единообразно. Графическое представление результатов представлено на рисунке 5.

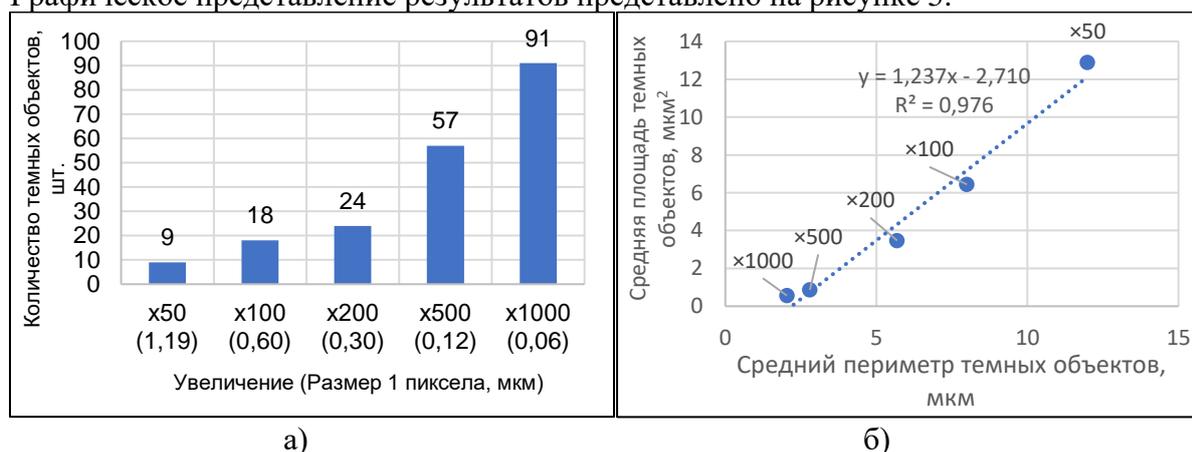


Рисунок 5 – Изменение количества (а) и геометрических параметров темных объектов (б) в зависимости от увеличения микроскопа

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 или разделения объекта на кластер мелких темных частиц (рисунок б).

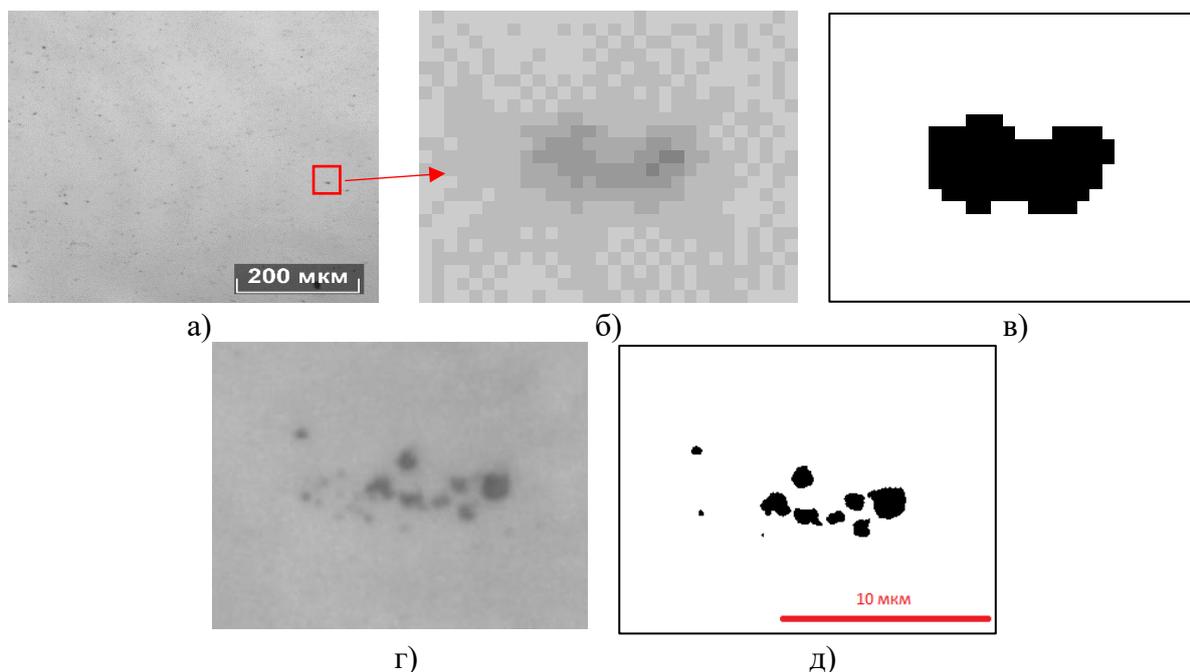


Рисунок 6 – Эффект возможной трансформации «крупного», при увеличении микроскопа $\times 100^{10}$ (б,в), неметаллического включения с повышением кратности оптического увеличения до $\times 1000$ (г,д)

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.

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. 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; $I_3=0,333*R+0,333*G+0,333*B$ – применяется в некоторых анализаторах изображений (например, Image Expert Pro 3) [1].

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 7).

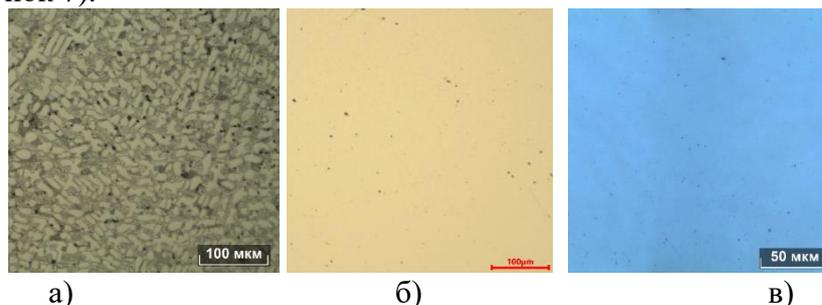


Рисунок 7 – Изображения микроструктуры твердого сплава (а) и неметаллических включений стали 40Х2Н2МА (б) и 38ХН3МФА (в) с различным цветом фона

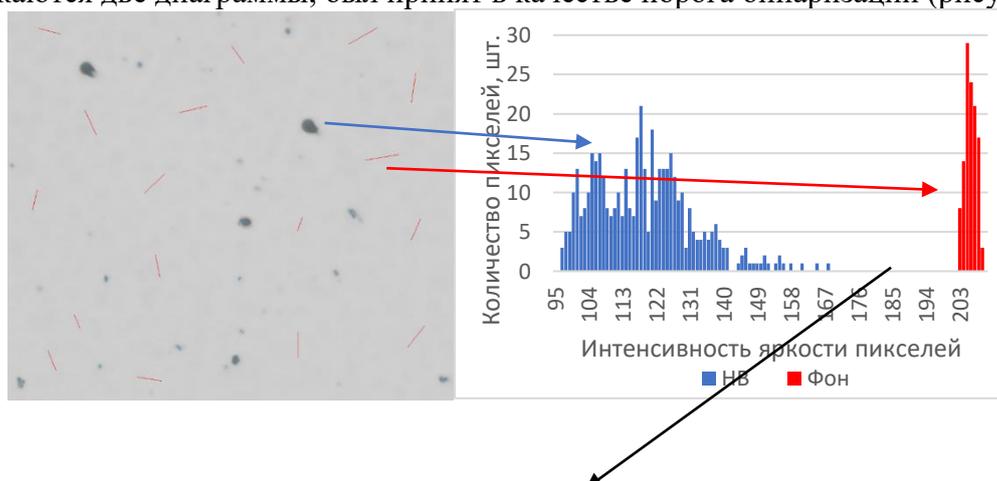
Каждое изображение переводилось в оттенки серого при помощи трех разных вариантов и полученные матрицы интенсивностей сравнивались между собой. Интенсивность пикселей в оттенках серого при переводе по формуле I_3 на 13 оттенков выше по сравнению с формулами I_1 и I_2 , различие между I_1 и I_2 небольшие (1-3 оттенка). На следующем этапе изображения бинаризовались и подвергались количественному анализу (таблица 5).

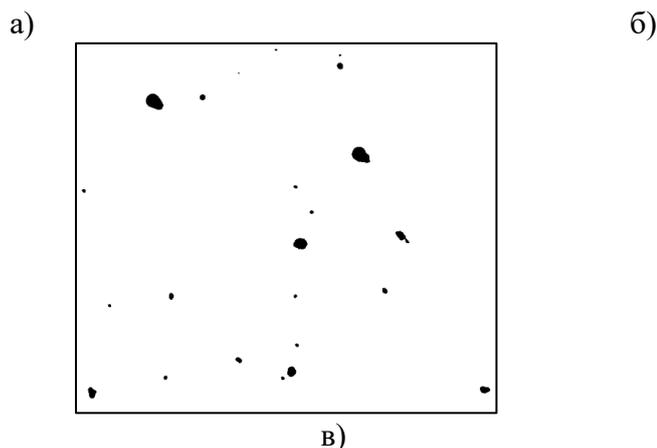
Таблица 5. Результаты количественного анализа структур, отличающихся цветом фона, после их перевода в оттенки серого различными способами

Изображение структуры	Уровень черного	Способ для перевода в оттенки серого	Количество объектов, шт.	Средняя площадь объектов, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей объектов	Коэффициент эксцесса распределения площадей объектов
НВ стали 40Х2Н2МА	≤ 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 38ХН3МФА	≤ 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 [2], 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 [3]. 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 8).





а) секущие на темных и светлых объектах; б) сопоставление диаграмм интенсивности яркости для определения порога бинаризации; в) бинарное изображение
 Рисунок 8 – Бинаризация изображения 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 6 и 7) бинаризация которых была проведена на основе четырех глобальных (метод среднего, Оцу, Лагранжа и С-образной кривой) и двух локальных (Бредли-Рота и Ниблэка) [4].

Из полученных результатов следует, что 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. В первую очередь различия связаны с появлением объектов, которые относятся к фону. В таблице 8 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 «защите» 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 6. Результаты измерения площадей структурных составляющих (объектов) при различных глобальных методах бинаризации

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

Таблица 7. Результаты количественной оценки структур сплавов при различном локальном методе бинаризации и вариации вводных переменных.

Изображение структуры	Метод бинаризации	Переменная*		Средняя площадь объектов, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей объектов	Коэффициент эксцесса распределения площадей объектов	Плотность объектов, шт/мм ²	Объемная доля, %
		<i>d</i>	<i>k</i>					
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

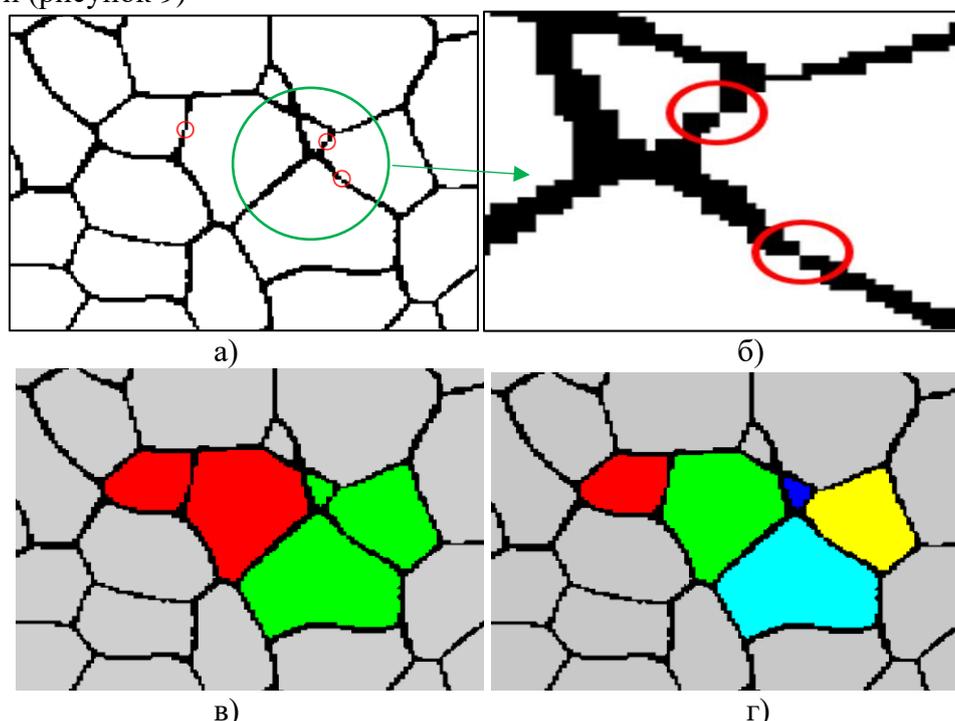
* *d* – размер локальной области, пкс×пкс.; *k* – коэффициент (для метода Ниблэка при среднеквадратичном отклонении, а для метода Брэдли-Рота при среднем значении)

Таблица 8. Результаты количественного анализа изображения НВ стали 40Х2Н2МА после применения фильтра по площади и при вариации метода и порога бинаризации

Метод бинаризации	Порог фильтрации, мкм ²	Уровень черного	Средняя площадь объектов, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей объектов	Коэффициент эксцесса распределения площадей объектов	Плотность объектов, шт/мм ²	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 Ст3сп при использовании различных глобальных методов бинаризации варьируется от 133 до 224 МПа, а в случае локальных методов достигает запредельных значений в 7384 МПа.

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 9)



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 9 – 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 9).

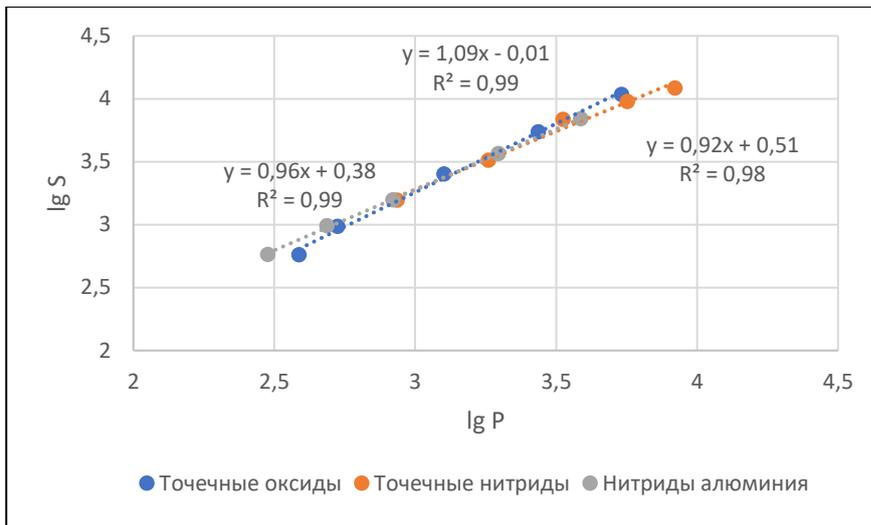
Таблица 9. Результаты количественной оценки морфологии изображений некоторых структур при применении 4-х и 8ми связности

Изображение структуры	Связность	Количество объектов, шт.	Средняя площадь, мкм ²	Коэффициент асимметрии распределения площадей объектов	Коэффициент эксцесса 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		

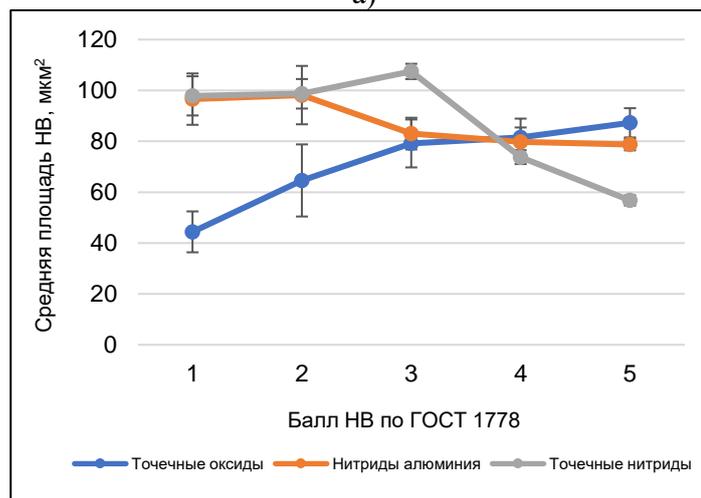
Влияние окрестностного соотношения при поиске объектов в меньшей мере сказывается при количественной оценке НВ, но при анализе строения дендритов или зерна различия могут быть значимыми. Показано, в частности, что при обработке изображений зерен следует применять принцип 4-х связности.

В четвертой главе проведен цифровой количественный анализ эталонных шкал ГОСТ 5639 и 1778 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 [5-6] и продолжен в настоящей работе, в связи с необходимостью обеспечения полноты учета метрологических факторов и расширения объектов исследования.

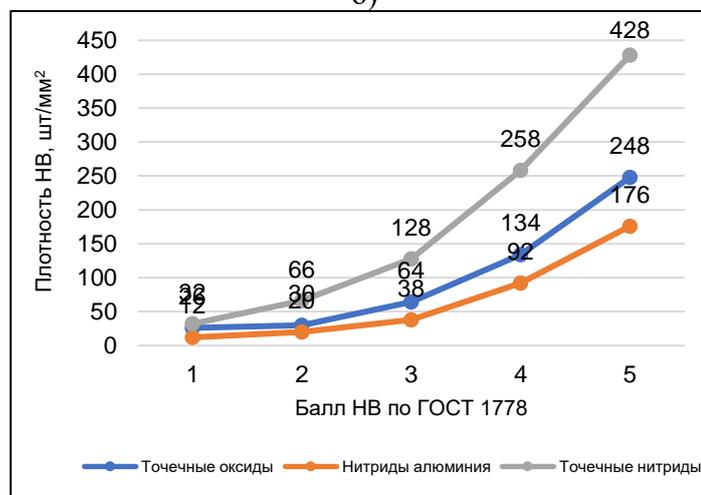
Для выявления границ эффективного применения эталонных шкал при реализации цифровых процедур проведен количественный анализ эталонных изображений НВ и зерна, представленных в линейке ГОСТ 1778 и 5639. Так для эталонных изображений ГОСТ 1778, шкал ряда Б следующих НВ: оксиды точечные, нитриды точечные и нитриды алюминия, в частности, были измерены и площади НВ и определены характеристики их распределения, значения средней площади, плотности и объемной доли (рисунок 10).



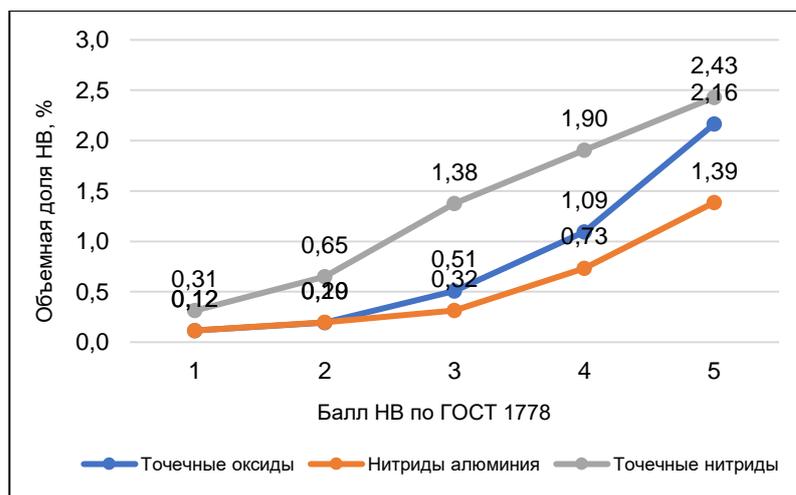
а)



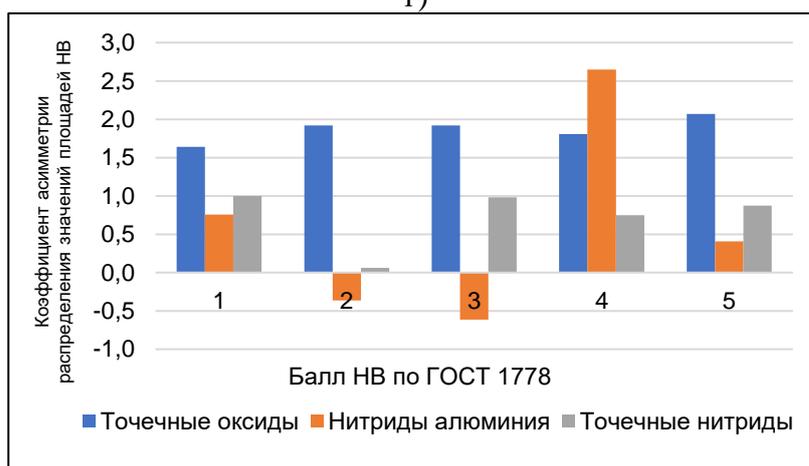
б)



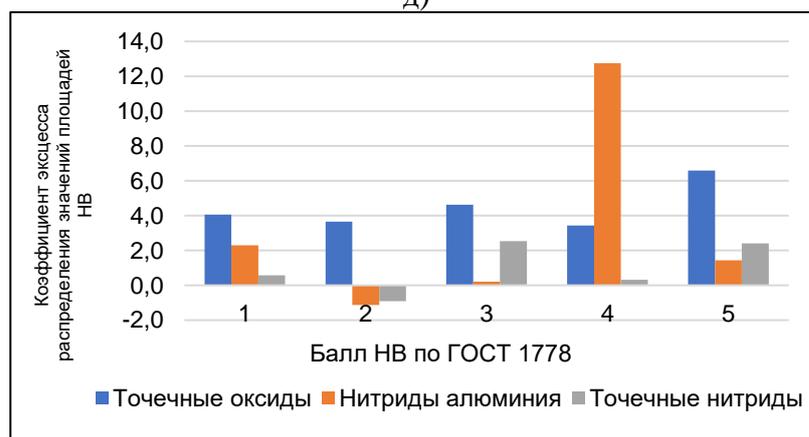
в)



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 10 – Различие в строении изображений эталонных шкал НВ

Показано, что при подобии изображений НВ различных баллов в пределах своих шкал (рис. 10а), средняя площадь включений может, как расти, так и падать при повышении балла в зависимости от шкалы (рис. 10б). Его относительная эффективность для оценки загрязненности стали НВ связана с видом распределения включений по величине площади (Рис. 10 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.

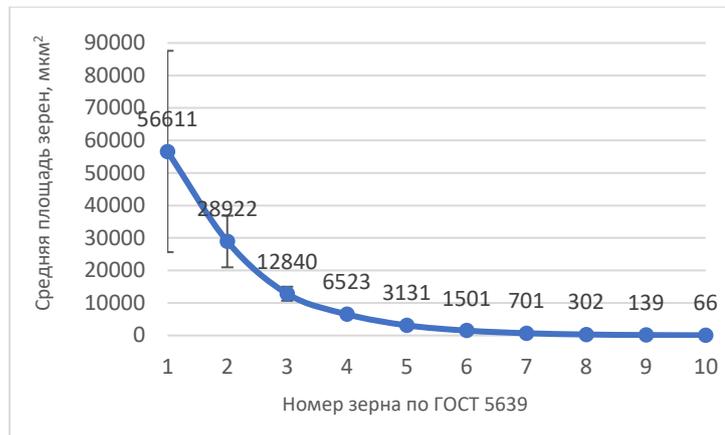
Помимо размеров для НВ важен характер их размещения, в частности, их кучность и разреженность определяют различие в работе образования вязкого излома и условия протекания пластической деформации соответственно [7]. Для оценки характера размещения НВ на эталонных изображениях были построены полиэдры Вороного, рассчитаны расстояния между центрами НВ (ближайшими соседями) и оценена их статистика распределения (таблица 10).

Таблица 10. Результаты оценки размещения НВ на эталонных шкалах ГОСТ 1778 на основе построения полиэдров Вороного.

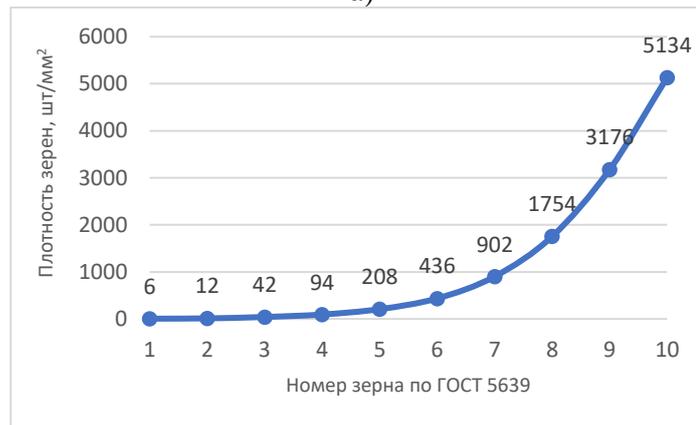
Шкала	Балл по ГОСТ 1778-70	Среднее расстояние между центрами НВ, мкм	Коэффициент асимметрии распределения расстояний между центрами НВ	Коэффициент эксцесса распределения расстояний между центрами НВ
Точечные оксиды	1	440,6 ± 44,4	0,3±0,4	-0,7±0,8
	2	437,6 ± 34,4	0,5±0,4	-0,5±0,7
	3	290,6 ± 15,2	-0,1±0,3	-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.

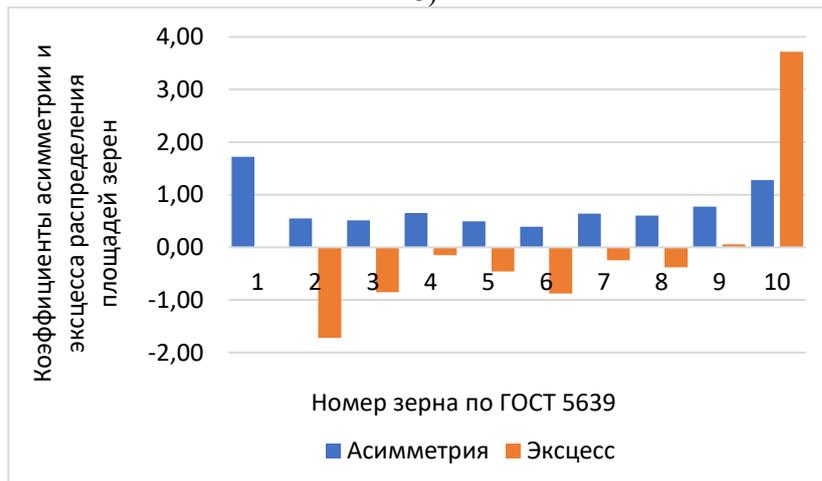
На рисунке 11 представлены статистические показатели геометрических параметров эталонных изображений зерна различного масштаба (ГОСТ 5639).



а)



б)



в)

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

Рисунок 11 – Графическое представление результатов количественной оценки эталонных изображений зерна по ГОСТ 5639

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 12).

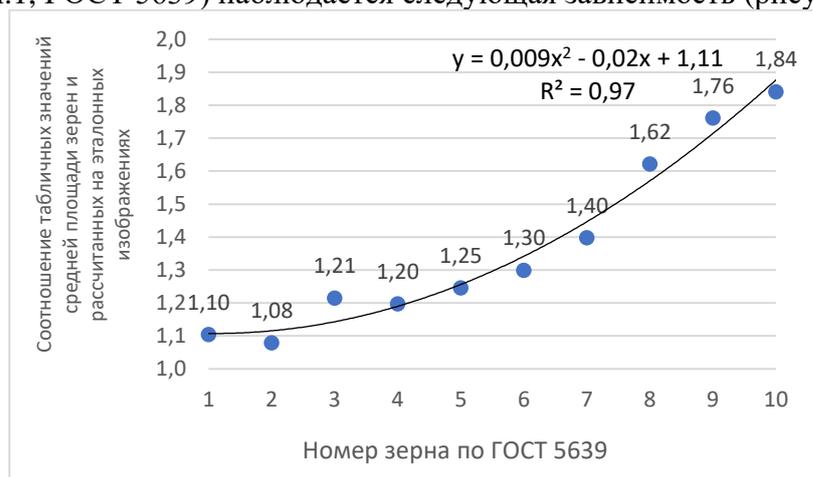


Рисунок 12 – Соотношение между табличными (ГОСТ 5639) и рассчитанными по измерениям эталонных изображений значений средней площади зерен для различных номеров зерна

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 мм² (в масштабе каждого образца) с учетом метрологических факторов, значительно отличались от показателей зерен, отвечающих соответствующим эталонным изображениям по ГОСТ 5639 (таблица 11).

Таблица 11. 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 ²	223,9±2	139±2	245,7±2	302±7	497,0±7	701±24
Плотность зерен, шт/мм ²	3179	3176	2564	1754	1313	902
Коэффициент асимметрии 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
Коэффициент эксцесса распределения значений площадей зерен	6,8±0,08	0,1±0,15	5,9±0,07	-0,4±0,20	2,4±0,09	-0,3±0,27

Не вызывает сомнений, что действующие стандарты на структуру разрабатывались исходя из существовавших на тот момент времени представлений о её влиянии на свойства сталей и сплавов. Их польза подтверждена практикой многих десятилетий, отсюда неизбежность консервативного характера процедур такого рода, так же, как и неизбежность их развития, при создании необходимых условий, в данном случае при наличии возможности цифровизации измерений. Однако цифровизация процедур не должна ограничиваться только лишь «оцифровкой» действующих стандартов, а должна быть направлена на получение всех информативных геометрических параметров структуры, основа которых – более глубокое представление о механизмах деформации и разрушения материалов с неоднородной структурой. Для этого необходима регламентация метрологических процедур,

обеспечивающих получение воспроизводимых и сопоставимых значений характеристик морфологии структур.

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 С-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 подобию 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 зерна аустенита (при увеличении 100 крат) стали 40Х2Н2МА после закалки с 850, 950 и 1050 °С (выдержка 1 час) 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 56 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. Sean T. McHugh. Understanding Photography. San Francisco: No Starch Press, 2018. 240 p.
2. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Пережогин В.Ю., Танг В.Ф., Кодиров Д.Ф., Сергеев М.И. Возможности цифровизации измерений в металлведении для внесения в оценку структур и разрушения количественной меры. Металлург. 2022. № 7. С. 48-57
3. ASTM E45 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel
4. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с
5. 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
6. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Кодиров Д.Ф. Об учете статистической природы объектов при анализе структур в металлведении. Электрометаллургия. 2020. № 7. С. 22-27.
7. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материалов: моногр. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 670 с.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., **Кодиров Д.Ф.** Об учете статистической природы объектов при анализе структур в металлведении. Электрометаллургия. 2020. № 7. С. 22-27.
2. Соколовская Э.А., Кудря А.В., Пережогин В.Ю., Танг В.Ф., **Кодиров Д.Ф.**, Сергеев М.И. Возможности цифровизации измерений в металлведении для внесения в оценку структур и разрушения количественной меры. Металлург. 2022. № 7. С. 48-57.
3. A. V. Kudrya, E. A. Sokolovskaya, **D. F. Kodirov**, E. V. Bosov, G. V. Kotishevskiy On necessity of taking into account statistical nature of the objects using Big Data in metallurgy. CIS Iron and Steel Review. 2022. №1. pp. 105–112.
4. Кудря А.В., Соколовская Э. А., **Кодиров Д. Ф.**, Босов Е. В., Тимошенко В. В. Возможности «раскопок данных» производственного контроля в металлургии для прогноза прочности, пластичности и вязкости металлопродукции. Деформация и разрушение материалов. 2023. № 3s. С. 31-40.
5. 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.
6. Соколовская Э.А., Кудря А.В., **Кодиров Д.Ф.**, Сергеев М.И., Буданова Е.С., Самошина М.Е. О достоверности результатов цифровых измерений изображений структур в металлведении. Металлург. 2024. № 1. С. 36-39