

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С КОМПЬЮТЕРНЫМИ ПРОЦЕДУРАМИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

© 2019

А.В. Кудря, доктор технических наук, профессор кафедры металловедения и физики прочности
Э.А. Соколовская, кандидат технических наук, доцент кафедры металловедения и физики прочности
В.Ю. Пережогин, аспирант кафедры металловедения и физики прочности
Нго Нгок Ха, аспирант кафедры металловедения и физики прочности
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва (Россия)

Ключевые слова: морфология структур; травление; фильтрация шумов; коэффициенты эксцесса и асимметрии; площадь поля зрения; цифровое изображение; изображения структур и изломов; изображение полосчатости в микроструктуре; процедуры обработки изображений.

Аннотация: Традиционный подход к ранжировке структур и изломов – сопоставление с эталонами (картинками) – не позволяет объективно описать существующее разнообразие их геометрии, обеспечить прямое сопоставление морфологии структур и изломов для выявления критических параметров структур, определяющих различие в их сопротивляемости разрушению. Формализация подходов к описанию цифровых изображений структур и изломов 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. Обычно подразумевается, что это обеспечивается в рамках используемых специализированных программных продуктов по умолчанию, но на практике не всегда уделяется необходимое внимание сопоставлению альтернативных вариантов процедур обработки изображений с целью выбора оптимального.

В этой связи в работе рассмотрены некоторые аспекты получения цифровых изображений структур и изломов, их обработки, обеспечивающих получение воспроизводимых и сопоставимых результатов, несущих содержательную информацию об их морфологии. В частности, оценены роль продолжительности травления, выбор оптимального увеличения микроскопа (в диапазоне величин, сопоставимых по своим возможностям для решения конкретной задачи), процедуры удаления шумов. Обсуждены подходы к выбору эффективных алгоритмов обработки изображений, например, при переходе от балльных оценок структур к измерению геометрии их строения (с учетом представлений о статистической природе строения структур и изломов, масштабов измерения). Оценены эффективность использования классической и непараметрической статистик при сравнении результатов измерений геометрии структур и изломов, возможность классификации «размытых» изображений микроструктур на основе Фурье-преобразования.

На основе полученных результатов уточнены некоторые процедуры обработки изображений структур и изломов и показано, что использование статистических характеристик изображений структур и изломов позволяет более объективно ранжировать структуры по геометрии их строения.

ВВЕДЕНИЕ

Классические подходы к ранжировке структур предполагают их сравнение с эталоном (картинкой). Однако статистическая природа строения структур определяет необходимость получения представительных оценок (в масштабах образца или изделия), а технологически неизбежная структурная неоднородность – выявления особенностей механизмов деформации и разрушения различных структур, что определяет потребность в измерении геометрии отдельных структурных составляющих и их конфигурации в целом [1; 2]. Оценить влияние структур на разрушение можно на основе сопоставления строения структур и изломов, но оценка морфологии поверхности разрушения часто ограничивается словесным описанием, что обусловлено, в частности, трудностями получения их 3D-моделей (на разных масштабных уровнях наблюдения). Цифровизация сделала возможным получение количественных оценок структур и изломов и уточнение на этой основе механизмов разрушения разномасштабных структур, их кооперативного влияния на разрушение [3–5]. Однако есть ряд вопросов, связанных как с получением цифровых изображений, так и с разработкой оптимальных алгоритмов для их обработки [6; 7].

Цель работы – выявление факторов риска при получении цифровых изображений, в частности при подборе

режима травления и выборе увеличения светового микроскопа; оценка влияния масштаба изображения на получаемый результат.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были использованы изображения структур и изломов, соответствующих различным видам металлопродукции: листовые стали СтЗсп и 09Г2С, твердые сплавы на железно-вольфрамовой и никелевой основах (для упрочняющих наплавов рабочих органов сельскохозяйственных машин), крупные поковки из стали 38ХНЗМФА, полученные по общепринятым технологиям [8; 9].

Пробоподготовка шлифов для анализа структур включала в себя операции запрессовки образца на прессовальном аппарате SimpliMet 1000 (Buehler), шлифования, полирования и травления в 3 % растворе азотной кислоты и смеси азотной и соляной кислот (в соотношении 1 к 5) для листовых сталей и твердых сплавов соответственно.

Изломы получали при ударных испытаниях образцов с U-образным надрезом (ГОСТ 9454) на копре класса МК-30.

Структуры наблюдали в световом микроскопе Axio Observer D1m Carl Zeiss, изломы – в сканирующем

электронном микроскопе VEGA 3 SBH производства TESCAN в диапазоне увеличений 50–500 и 100–1000 крат соответственно.

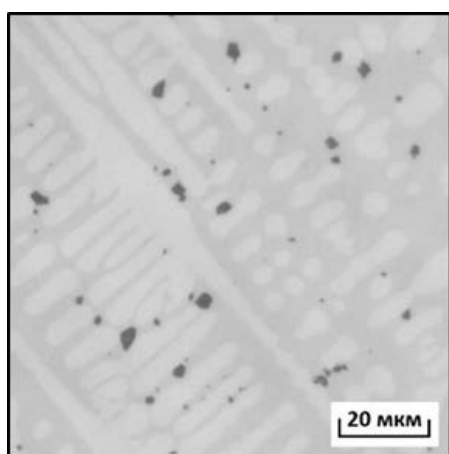
Количественный анализ изображений структур и изломов производили при помощи программного обеспечения ImageJ, Mathcad, Statistica, а также Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

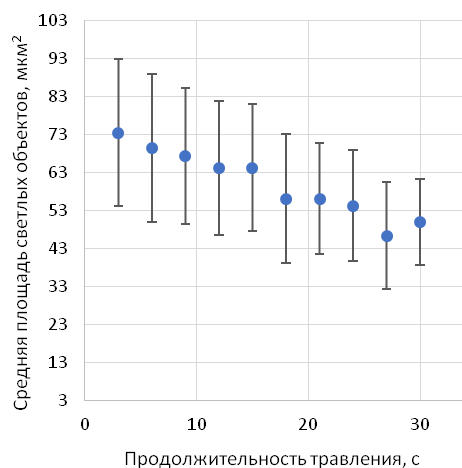
Исходя из классических представлений [1; 2] ключевую роль в процессах деформации и разрушения играют размеры, форма и особенности размещения элементов структуры. Изображение структур и изломов представляет собой, как правило, поле яркости в оттенках серого (256 единиц), где однотипные элементы характеризуются определенными диапазонами яркости и геометрии. В этой связи для выделения однотипных элементов [10; 11], в частности, необходимо обосновать уровень интенсивности яркости, определяющий границу, разделяющую элемент структуры от окружающего ее фона, что предполагает трансформацию матрицы в бинарную [3; 12]. Для этого используют различные подходы, в частности метод построения С-образной кривой (в координатах «площадь измеряемых объектов – их периметр»), перегиб на которой соответствует оптимальному уровню бинаризации. Их может быть не-

сколько (мультиризация), если в структуре наблюдаются несколько типов однотипных элементов.

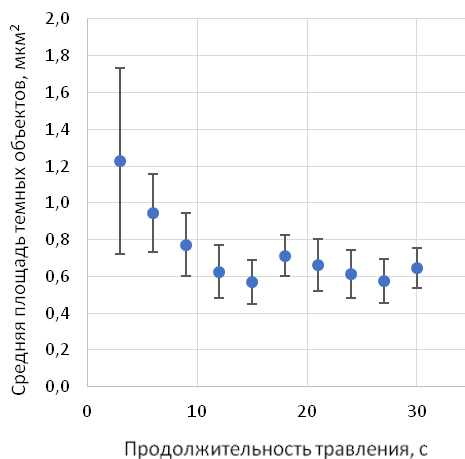
Одним из факторов, определяющих сопоставимость результатов измерения геометрии структур, является режим травления [13; 14]. В работе было оценено влияние времени травления на геометрию структуры твердого сплава на основе железа и вольфрама, где наблюдались светлые объекты (дендриты или карбиды) и россыпь темной составляющей точечной формы (рис. 1 а). Темные объекты были видны еще на нетравленных шлифах, что обычно характерно для неметаллических включений (НВ) или углублений, оставшихся на их месте (либо крупных карбидов), в том случае, когда частицы были «вырваны» из образца при его шлифовке. Последовательное увеличение времени травления (с шагом в 2–3 с от 3 до 30 с) позволило зафиксировать изменения на изображении структуры (на одних и тех же полях зрения площадью 0,01 мм² в масштабе образца), измерить площади светлых и темных объектов, рассчитать их средние значения для фиксированных времен выдержки (рис. 1 б, 1 в). Показано, что средние значения площадей светлых и темных объектов стабилизируются при увеличении продолжительности травления в исследуемом интервале времен, поля их ошибок перекрываются.



а



б



в

Рис. 1. Изменение параметров структуры твердого сплава на железо-вольфрамовой основе (а) при увеличении продолжительности травления: средней площади светлых (б) и темных объектов (в)

Однако измерение площадей составляющих структуры обычно не эффективно для описания различий в геометрии дендритного рисунка, в частности, вследствие трудностей в разделении объединенных в один, смежных дендритов. В таких случаях предпочтительнее получение их линейных характеристик. Для сопоставления двух массивов результатов измерений n_1 и n_2 некоторого параметра ξ обычно по его средним значениям $\langle \xi \rangle_1$ и $\langle \xi \rangle_2$ и среднеквадратичным отклонениям, оценивают значимость различия $[\langle \xi \rangle_1 - \langle \xi \rangle_2] \neq 0$ по критерию Стьюдента. При этом по умолчанию предполагается если не нормальное, то, по крайней мере, симметричное распределение значений. Однако применимо к параметрам геометрии микроstructures распределения чаще имеют асимметричный характер [3; 8; 9], в частности в нашем случае, коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения значений поперечников дендритов были равны 1,4 и 4,8 соответственно. В этой связи в работе выборки результатов измерения средних размеров светлых объектов (методом секущих в двух взаимно перпендикулярных направлениях) были сопоставлены с использованием критерия непараметрической статистики Колмогорова – Смирнова: попарно, для смежных значений времен травления и для предельных значений (с продолжительностью травления 3 и 30 с). Экспериментальные значения критерия Колмогорова – Смирнова $|D^*(x^*)|$ изменялись в диапазоне от 0,45 до 1,36 (табличные значения составили 1,358; 1,224 и 1,070 для риска 0,05; 0,1 и 0,2 соответственно). При этом значимое различие структур после травления (по сравнению с исходной структурой (после трехсекундного травления)) наблюдалось с 18 с травления и далее (с риском 0,2).

Это означает, что изменению продолжительности травления сопутствует изменение значений параметров

геометрии светлой составляющей структуры исследуемого твердого сплава. Игнорирование этого обстоятельства не принципиально, когда речь идет о визуальном сравнении с эталоном (картинкой), но может привести к появлению псевдоразличий в характеристиках микроstructures, когда оцениваются ее количественные характеристики. Масштаб влияния данного фактора, по видимому, будет определяться морфологией конкретной структуры.

Существенную роль в получении объективных результатов измерения структур играет выбор оптимального увеличения. Очевидно, что большее увеличение позволяет выявить более мелкие детали структуры. Однако нередко приходится сопоставлять строение однотипных структур, полученных при различных увеличениях. Связанные с этим риски были оценены на примере изображений микроstructures твердого сплава на никелевой основе, полученных при увеличении 100, 200 и 500 крат на одних и тех же, сопоставимых по площади, полях зрения ($0,02 \text{ мм}^2$ в масштабе образца, получаемом при увеличении 500 крат) (рис. 2).

Повышение оптического увеличения привело к появлению более мелких элементов (объектов) изображения и снижению их среднего размера, в частности светлых объектов (таблица 1). Большинство из них различимы человеческим глазом, но надежно могут быть распознаны на изображении элементы структуры размером от 1 мм и выше [1; 2]. При оптическом увеличении 100, 200 и 500 крат поперечник такого минимально идентифицируемого объекта в масштабе образца составит 10, 5 и 2 мкм соответственно. Это определило уровень фильтрации шумов на изображении: уровнями менее 100, 25 и 4 мкм² соответственно. Для получения же сопоставимых результатов была

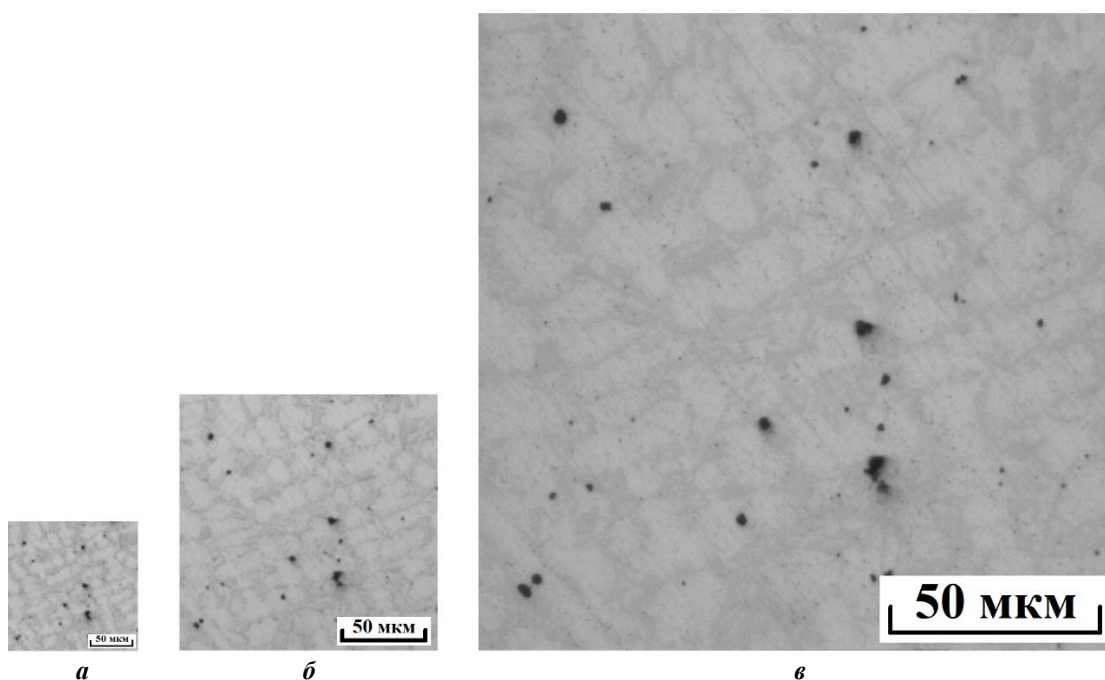


Рис. 2. Изображения микроstructures твердого сплава на никелевой основе при увеличениях 100 (а), 200 (б) и 500 (в) крат

Таблица 1. Средний размер объектов

Тип объекта	Метод измерения	Уровень фильтрации шумов F , менее, мкм^2		Средний размер объектов (мкм) при фиксированном увеличении		
				100 крат	200 крат	500 крат
Светлые	Метод секущих	нет		8,21±0,74	4,29±0,40	1,82±0,15
		Увеличение, крат	F	12,30±1,59	7,61±0,75	4,04±0,41
		×100	100			
		×200	25			
		×500	4			
		Для всех увеличений	100	12,30±1,59	9,29±1,13	4,73±0,56

выполнена процедура фильтрации, ограничившая на всех изображениях минимальный размер их элементов уровнем менее 100 мкм^2 . Такое сопоставление показало, что с каждым шагом оптического увеличения средние размеры светлых и темных объектов (поперечники и площади соответственно) уменьшаются. Это связано, в частности, с различием в уровне разрешения изображений: 40, 80 и 200 пк/дюйм, что обеспечивает

более детальную «прорисовку» контура элементов на изображении [15], что может привести при формальном использовании метода секущих к появлению «новых» объектов (рис. 3). Это обстоятельство необходимо учитывать, при проведении количественных измерений.

Таким образом, очевидно, что различие в процедурах получения цифрового изображения, не слишком

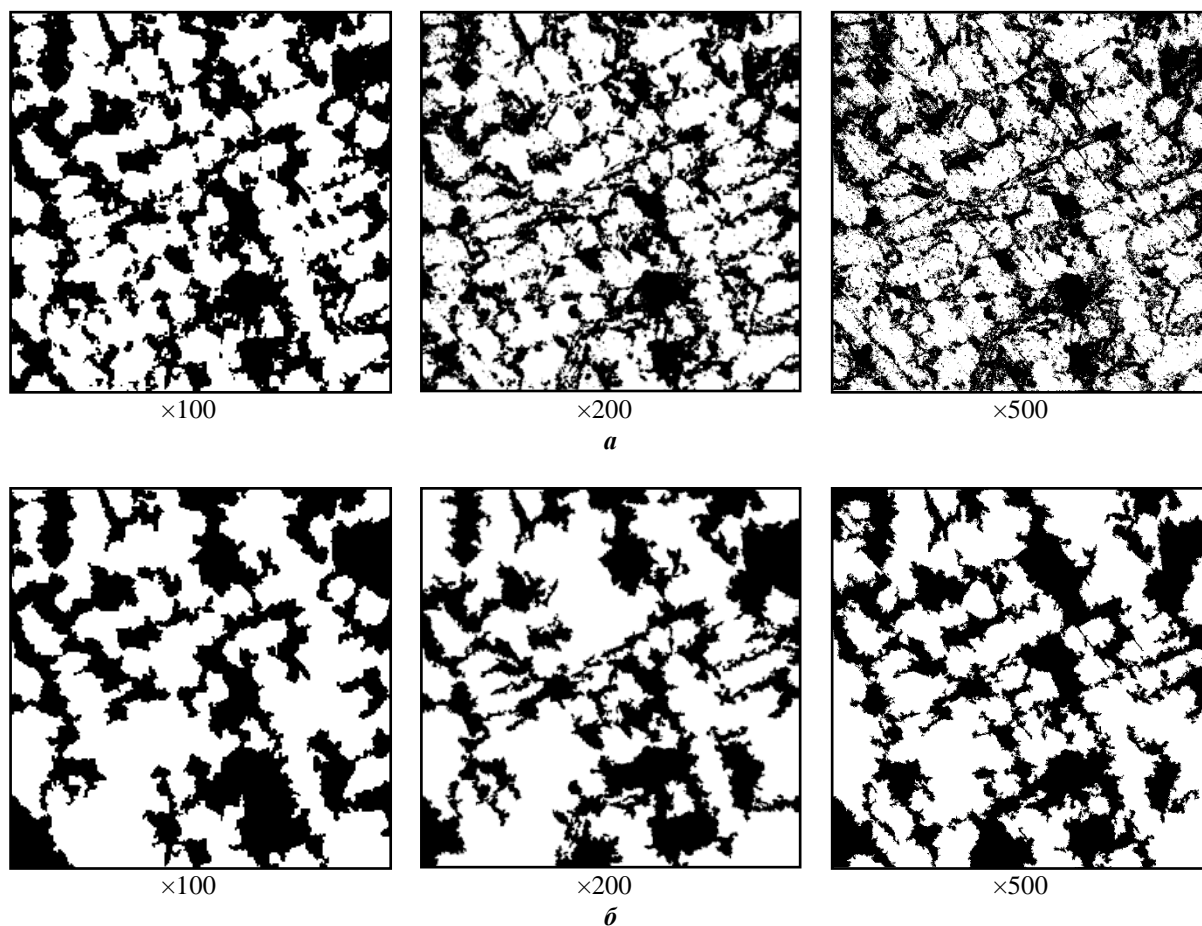


Рис. 3. Изображение фрагмента структуры никелевого твердого сплава после бинаризации (а) и фильтрации, ограничившей на всех изображениях минимальный размер их элементов уровнем менее 100 мкм^2 (б)

критичное для последующего их качественного (визуального) анализа, может сказаться на конечных результатах измерения геометрии структур.

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

Для балльных оценок характерна определенная субъективность и предполагается (по умолчанию) однородность структур в пределах фиксированного номера шкалы. В качестве меры такой однородности (с учетом статистической природы морфологии структур) можно принять значения коэффициентов асимметрии и эксцесса,

характеризующие вид распределения [9]. Если измерить после сканирования с разрешением 10 пк/дюйм изображения эталонных полей, приведенных в соответствующих нормативных документах, (в качестве примера взят ГОСТ 3443 (приложение 3, шкала 3Б)) и показатель структуры – площадь включений шаровидного графита, то можно сопоставить характеристики их распределений, соответствующих разным номерам шкалы (рис. 4). Оказалось, что значения коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения значений площадей включений графита для изображений шкал (ШГ2, ..., ШГ12) варьируются в пределах от $-0,1$ и $0,1$ до $1,3$ и $-1,5$ соответственно. Однако известно, что распределение симметрично (как при нормальном распределении), когда коэффициент асимметрии равен нулю и чем ближе по модулю его величина к единице в одновершинных распределениях, тем асимметрия существеннее. При уровне коэффициента асимметрии (по модулю) менее $0,25$, асимметрия считается незначительной, в диапазоне значений от $0,25$ до $0,5$ – умеренной, более $0,5$ – значительной. Положительный и отрицательный его знак указывает на смещение максимума распределения влево или вправо соответственно, а для коэффициента

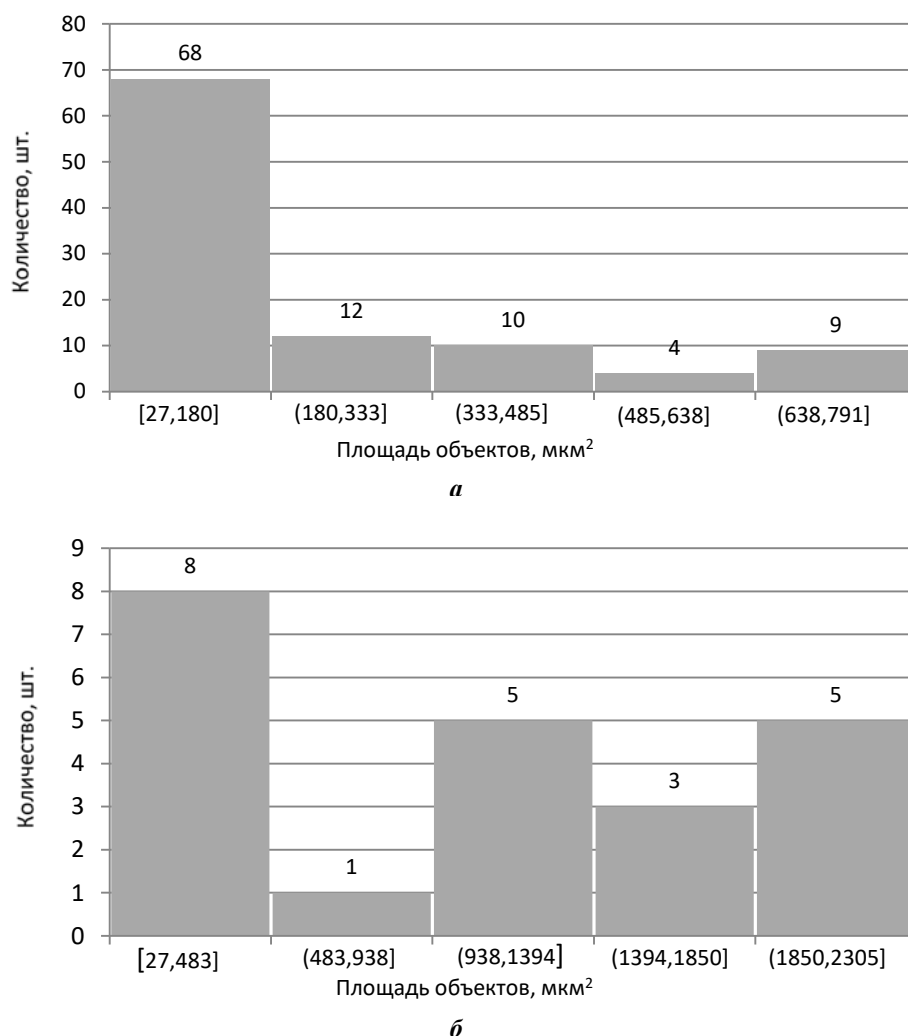


Рис. 4. Распределение включений шаровидного графита по площади на изображении эталонных шкал ГОСТ 3443 (приложение 3, шкала 3Б): ШГ2 (а) и ШГ6 (б)

эксцесса характеризует плоско- или островершинность распределения. Это означает, что у распределений частиц на изображениях эталонов, отвечающих различным номерам шкалы, наблюдается различие в их статистической природе. Нельзя, безусловно, исключить, что такая статистика может быть связана с малой площадью поля зрения эталона ($0,4 \text{ мм}^2$ в масштабе образца). В соответствии с ГОСТ балльная оценка применяется на шлифе площадью не менее $0,2\text{--}3,0 \text{ см}^2$. Однако это предполагает оценку масштабов наблюдения данного номера шкалы, а не оценку однородности строения изображения в пределах каждого номера шкалы.

Необходимость выбора минимальной площади поля зрения, обеспечивающей воспроизводимость получаемых результатов, актуальна для структур различной морфологии [3]. Ее выбор может быть осложнен выраженной структурной неоднородностью, когда различным участкам изделия соответствует структура, описываемая номером эталонной шкалы. Так, например, при исследовании загрязненности трех крупных поковок кубической формы из улучшаемой стали 38ХНЗМФА неметаллическими включениями (при увеличении 100 крат) была оценена вариация средних значений площадей НВ по кадрам площадью 80 мм^2 (эквивалент живого сечения ударного образца) на суммарной площади каждого шлифа площадью $\sim 320 \text{ мм}^2$ (рис. 5).

Очевидно, что при таком масштабе неоднородности (даже в мезомасштабах наблюдения) балльные оценки той или иной структуры должны быть дополнены массовыми прямыми измерениями геометрии их строения и соответствующих им изломов, выявлением их взаимосвязей [16; 17]. Цифровизация позволяет обеспечить массовость таких измерений и получить в том числе статистические оценки геометрических параметров структур, недоступные ранее из-за трудоемкости, что важно, в частности, при оценке роли разномасштабной полосчатости в микроструктуре при появлении неоднородности вязкости и пластичности листовых материалов.

В рамках данной работы это было наглядно использовано при сопоставлении неоднородности строения

феррито-перлитной полосчатости в структуре и сопутствующих изломах ударных образцов, отобранных от четырех партий листа из стали 09Г2С. С использованием метода секущих были измерены такие параметры структуры: размер зерна феррита, толщина полос перлита и расстояние между ними, поперечник фасеток в хрупких изломах, оценен балл полосчатости в соответствии с ГОСТ 5640. Показано (рис. 6), что при отсутствии значимого различия между средними значениями параметров структур и изломов, при вариации балла полосчатости от первого до третьего, статистические характеристики их распределений (коэффициенты эксцесса и асимметрии) изменяются существенно. При этом максимум величины коэффициента эксцесса и асимметрии для толщин полос перлита и размера фасеток наблюдался для партии металла, полосчатость которого в микроструктуре оценивалась вторым баллом. Это еще раз подтверждает необходимость оценки строения структур и изломов исходя из их статистической природы.

Альтернативный способ, позволяющий выявить наличие периодичности в микроструктуре с полосчатостью и определить ее характеристики, – Фурье-анализ [18; 19] распределения интенсивности яркости (в 256 оттенках серого) на ее цифровом изображении. В работе Фурье-преобразование проводилось для профилей интенсивности яркости, проведенных вдоль, между и поперек полос перлита (рис. 7).

Показано, что значения спектральной плотности для секущих, проведенных в поперечном (по отношению к полосам перлита) направлении, в 3–10 раз были больше соответствующих значений для остальных вариантов направлений секущих. Ему отвечает среднее значение периода, равное $19,2 \pm 0,8 \text{ мкм}$ (усредненное по 10 секущим), что соответствует среднему значению расстояния между полосами перлита, определенному традиционным способом (пошаговое измерение расстояния между смежными полосами перлита вдоль секущих). Аналогичные результаты были получены при выявлении периодичности на изображениях феррито-

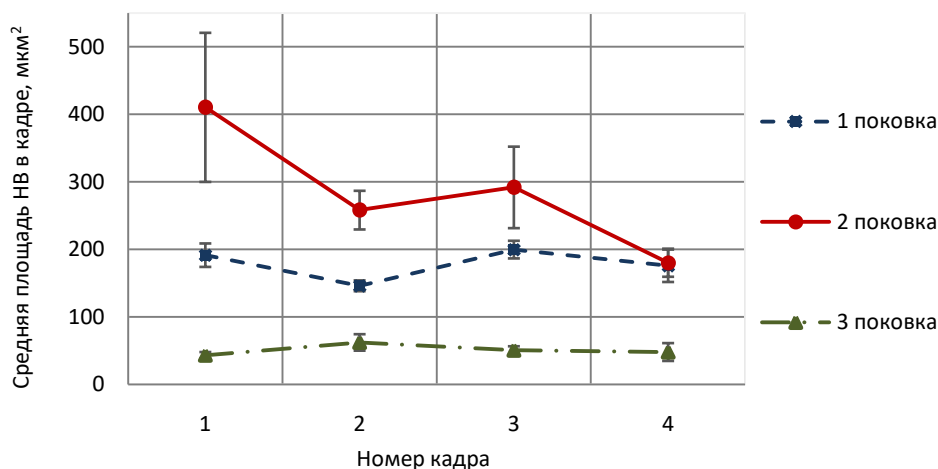


Рис. 5. Вариация средних значений площадей неметаллических включений, измеренных на кадрах площадью 80 мм^2 , на образцах (площадью $\sim 320 \text{ мм}^2$ каждый), отобранных от трех крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА

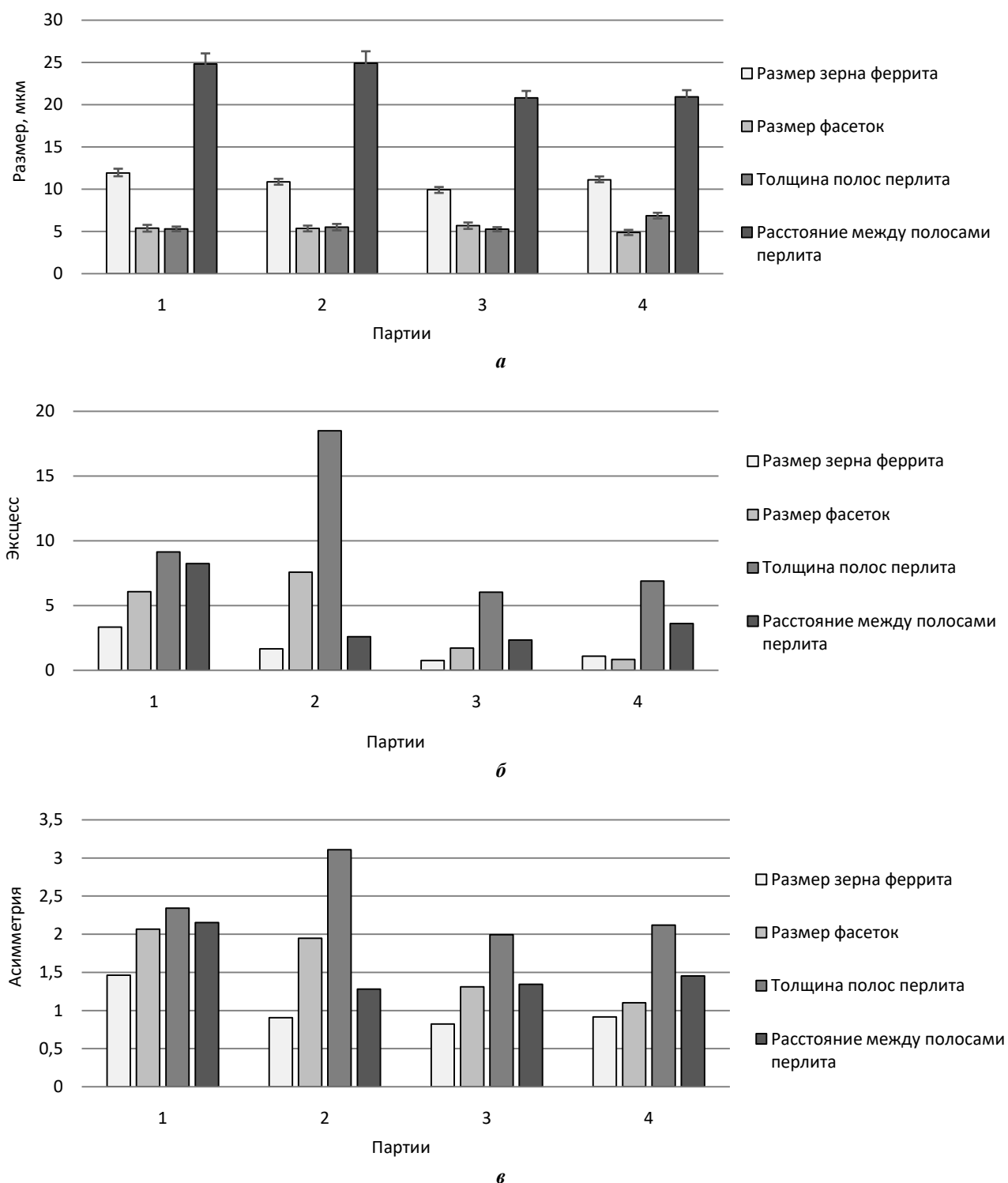


Рис. 6. Сопоставление средних значений геометрических параметров полосчатости в микроструктуре (в диапазоне 1–3 балла по ГОСТ 5640): размера зерна феррита, толщины полос перлита и расстояния между ними; размера фасеток в хрупких изломах (а) и статистических характеристик их распределений: коэффициентов эксцесса (б) и асимметрии (в) (ударных образцов, отобранных от четырех партий листовой стали 09Г2С)

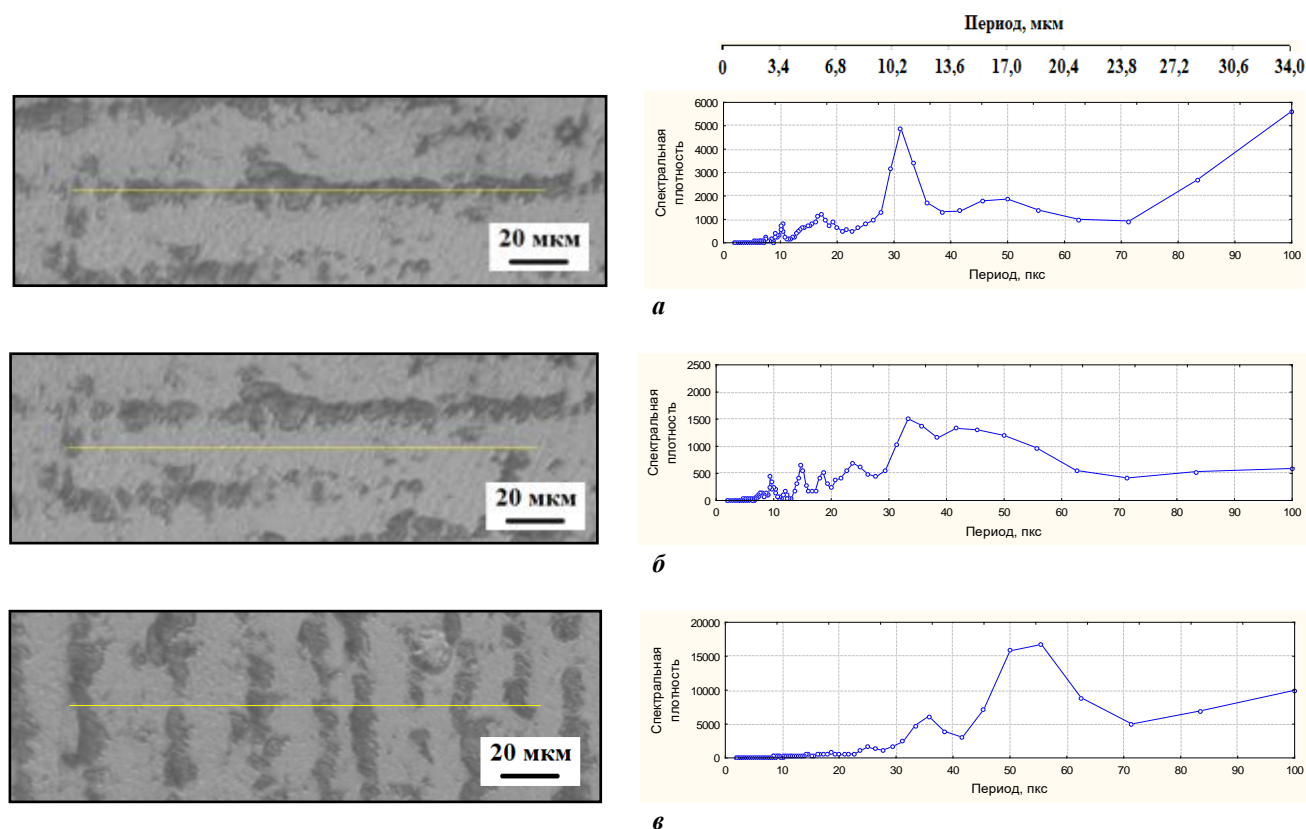


Рис. 7. Кривые спектральной плотности, полученные для профилей интенсивности яркости в 256 оттенках серого, проведенных вдоль (а), между (б) и поперек (в) полос перлита в микроструктуре с полосчатостью (балл 3) листовой стали 09Г2С

перлитной полосчатости в микроструктуре и сопутствующих им изображениях изломов ударных образцов из стали СтЗсп. Это позволило установить наличие взаимосвязи между параметрами феррито-перлитной структурной полосчатости (размер зерна феррита и шаг полос перлита) и морфологии вязкого излома (размер ямок в изломе и периодичность его мезорельефа), что обычно затруднено при использовании балльных оценок при оценке полосчатости в микроструктуре [20].

Была также оценена возможность применения Фурье-преобразования в более сложных случаях, в частности, при наличии «размытых» полос перлита и неоднородности в их расположении. Для этого были смоделированы изображения бинарной полосчатой микроструктуры с различным шагом темных полос (сопоставимые по своим размерам с эталонными шкалами полосчатости ГОСТ 5640). Эти полосы поэтапно «размывали» и определяли значения спектральной плотности кривых распределения интенсивности яркости вдоль секущих (10 на каждое изображение), расположенных перпендикулярно направлению «прокатки» (рис. 8). Для самого «дефектного» изображения (шестая итерация «размытия») степень совпадения с первичным изображением (по абсолютному значению периодичности) была не менее 60 %. Такие результаты указывают на перспективность развития данного подхода при описании полосчатости в микроструктуре. Однако очевидно, что при дальнейшей разработке методики необходимо принять во внимание масштабный (размерный) фактор,

играющий существенную роль в обеспечении необходимой воспроизводимости результатов измерений.



Рис. 8. Моделирование размытия изображения полосчатой структуры: изображение исходное и после «размытия» (шестая итерация)

Таким образом, цифровизация изображений в материаловедении при своем последующем развитии позволит уточнить алгоритмы подготовки изображений к обработке, развить алгоритмы самой обработки изображений, что в конечном итоге позволит применять количественные меры при измерении морфологии структур и изломов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволили уточнить некоторые практические вопросы, связанные с получением корректного цифрового изображения структур, в частности вариации времени травления для выявления

микроструктуры и увеличения световой микроскопии. Исходя из особенностей гистограмм распределения значений геометрических параметров полученных изображений (асимметричные и бимодальные) оценены риски применения критериев классической статистики при сопоставлении результатов измерения нескольких выборок по их средним значениям. Показано, что применение критериев непараметрической статистики более полно учитывает статистическую природу строения структур и изломов.

Использование статистических характеристик распределения параметров геометрии изображения (коэффициенты эксцесса и асимметрии) показало, что статистическая природа морфологии структур получила свое отражение в эталонных шкалах структур, в частности, в классификации включений шаровидного графита в соответствии с ГОСТ 3443 (приложение 3, шкала 3Б).

С использованием коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения значений геометрических параметров изображений полосчатости в микроструктуре и сопутствующих изломах стало возможным выявить различия в их морфологии (в диапазоне балльной оценки от первого до третьего балла). Показана перспективность использования Фурье-преобразования для описания подобных структур с целью выявления масштабов их периодичности.

Показано (оценка вариации загрязненности металла крупных поковок из стали 38ХНЗМФА неметаллическими включениями), что масштаб наблюдения имеет существенное значение при получении воспроизводимых результатов измерений геометрии НВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: МИСиС. 1997. 527 с.
2. Штремель М.А. Разрушение. Кн. 2. Разрушение структур. М.: МИСиС, 2015. 976 с.
3. Соколовская Э.А. О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур // Вопросы материаловедения. 2013. № 4. С. 143–153.
4. Михайлович А.П., Сивкова Т.А., Кадушников Р.М., Сомина С.В. Металлографический анализ: история и перспективы развития // Мир измерений. 2014. № 2. С. 3–9.
5. Колишон Э.Ю., Дурьнин В.А., Казаков А.А., Житенев А.И., Титова Т.И., Малихина О.Ю. Металлографический контроль заготовок ответственных изделий энергомашиностроения и автоматизация методов исследования микроструктуры // Тяжелое машиностроение. 2016. № 11–12. С. 2–8.
6. Яценко Р.В., Терновой Ю.Ф., Яценко М.Ю. Использование современных средств количественной металлографии // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 1. С. 59–64.
7. Duval L., Moreaud M., Couprie C., Jeulin D., Talbot H., Angulo J. Image processing for materials characterization: issues, challenges and opportunities // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Paris, 2014. P. 4862–4866.
8. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А., Скородумов С.В., Папина К.Б., Мишнев П.А., Палигин Р.Б., Балашов С.А., Огольцов А.А. Факторы неоднород-

ности качества листовой стали // Электromеталлургия. 2013. № 9. С. 23–33.

9. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., Пережогин В.Ю. Информативность морфологии структур твердых сплавов для прогноза качества наплавов // Цветные металлы. 2017. № 12. С. 78–83.
10. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
11. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 99–108.
12. Исрафилов Х.С. Исследование методов бинаризации изображений // Вестник науки и образования. 2017. Т. 2. № 6. С. 43–50.
13. 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. Vol. 21. № 3. P. 155–165.
14. Vander Voort G.F. Metallography: Principles and Practice. ASM International, 1999. 752 p.
15. Анисович А.Г. Резкость изображений в металлографии // Литье и металлургия. 2018. № 3. С. 76–81.
16. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ахмедова Т.Ш., Васильев С.Г. Использование компьютеризированных процедур для оценки неоднородности структур твердых сплавов // Металлург. 2016. № 12. С. 77–80.
17. Казаков А.А., Житенев А.И., Салынова М.А. Оценка крупных одиночных неметаллических включений в стали с помощью статистики экстремальных значений // Черные металлы. 2018. № 11. С. 70–74.
18. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 752 с.
19. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
20. Kazakov A.A., D. Kiselev D.V., Pakhomova O.V. Microstructural Quantification for Pipeline Steel Structure-Property Relationships // CIS Iron and Steel Review. 2012. № 1. P. 4–12.

REFERENCES

1. Shtremel M.A. *Prochnost' splovov. Ch. 2. Deformatsiya* [The strength of alloys. Part 2. Deformation]. Moscow, MISIS Publ., 1997. 527 p.
2. Shtremel M.A. *Razrushenie. Kn. 2. Razrushenie struktur* [Destruction. Book 2. Destruction of structures]. Moscow, MISIS Publ., 2015. 976 p.
3. Sokolovskaya E.A. On the results reproducibility of structures and fractures measurements using computerized procedures. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 143–153.
4. Mikhaylovich A.P., Sivkova T.A., Kadushnikov R.M., Somina S.V. Metallographic analysis: history and development prospects. *Mir izmereniy*, 2014, no. 2, pp. 3–9.
5. Kolphishon E.Yu., Durnin V.A., Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Titova T.I., Malykhina O.Yu. Metallographic examination of semi-finished metallurgical products of critical parts of power plant industry and automation of microstructure research methods. *Tyazheloe mashino-stroenie*, 2016, no. 11–12, pp. 2–8.
6. Yatsenko R.V., Ternovoy Yu.F., Yatsenko M.Yu. Use of modern means of quantitative metallography. *Metallur-*

- gicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, 2012, no. 1, pp. 59–64.
7. Duval L., Moreaud M., Couprie C., Jeulin D., Talbot H., Angulo J. Image processing for materials characterization: issues, challenges and opportunities. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Paris, 2014, pp. 4862–4866.
8. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Trachenko V.A., Skorodumov S.V., Papina K.B., Mishnev P.A., Paligin R.B., Balashov S.A., Ogol'tsov A.A. Quality nonuniformity factors for sheet steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, vol. 2014, no. 6, pp. 489–497.
9. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Akhmedova T.Sh., Perezhogin V.Yu. Information content of hard alloy structures morphology for the forecast of facing quality. *Tsvetnye metally*, 2017, no. 12, pp. 78–83.
10. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 376 p.
11. Anisovich A.G. Modern metallography – the basis of foundry material science. *Lit'e i metallurgiya*, 2019, no. 2, pp. 99–108.
12. Israfilov H.S. Research of methods for binarisation of images. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 43–50.
13. 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, vol. 21, no. 3, pp. 155–165.
14. Vander Voort G.F. *Metallography: Principles and Practice*. ASM International, 1999. 752 p.
15. Anisovich A.G. The sharpness of the images in metallography. *Lit'e i metallurgiya*, 2018, no. 3, pp. 76–81.
16. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Perezhogin V.Yu., Akhmedova T.Sh., Vasil'ev S.G. Use of computerized procedure for evaluation of inhomogeneity of hard alloys structures. *Metallurg*, 2016, no. 12, pp. 77–80.
17. Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A. Estimation of single large nonmetallic inclusions in steel using statistics of extreme values. *Chernye metally*, 2018, no. 11, pp. 70–74.
18. Shapiro L., Stokman J. *Kompyuternoe zrenie* [Computer vision]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2013. 752 p.
19. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p.
20. Kazakov A.A., D. Kiselev D.V., Pakhomova O.V. Microstructural Quantification for Pipeline Steel Structure-Property Relationships. *CIS Iron and Steel Review*, 2012, no. 1, pp. 4–12.

SOME PRACTICAL CONCERNS RELATED TO COMPUTER PROCEDURES OF PROCESSING IMAGES IN MATERIAL SCIENCE

© 2019

A.V. Kudrya, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair of Metal Science and Strength Physics
E.A. Sokolovskaya, PhD (Engineering), assistant professor of Chair of Metal Science and Strength Physics
V.Yu. Perezhogin, postgraduate student of Chair of Metal Science and Strength Physics
Ngo Ngoc Ha, postgraduate student of Chair of Metal Science and Strength Physics
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow (Russia)

Keywords: structure morphology; etching; noise filtering; excess and asymmetry coefficients; field of view area; digital image; structure and fracture images; banding image in microstructure; image processing procedures.

Abstract: The traditional approach to ranking structures and fractures as the comparison with standards (pictures) does not allow to objectively describe the existing diversity of their geometry, to provide the direct comparison of the morphology of structures and fractures to identify critical parameters of structures determining the difference in their resistance to fracture. Formalization of approaches to the description of digital images of structures and fractures is complicated, in particular, due to the differences in the mechanisms of destruction of nominally similar structures that differ in the geometry of the structure of its individual elements and their configuration as a whole; the resulting differences in the metrological support of image processing procedures. It is usually understood that this is provided by default within the framework of the specialized software products used, but in practice, the necessary attention to comparing the alternative options for image processing procedures to choose the optimal one is not always paid.

In this regard, the paper considers some aspects of obtaining digital images of structures and fractures, their processing, providing reproducible and comparable results that carry meaningful information about their morphology. In particular, the authors evaluated the role of the etching duration, the choice of the optimal magnification of the microscope (in the range of values comparable in their capabilities to solve a specific problem), and the noise removal procedure. The paper discusses the approaches to the selection of effective image processing algorithms, for example, when changing over from the point estimates of structures to the measuring of their geometry (taking into account the ideas about the statistical nature of structures and fractures, measurement scales). The authors estimated the efficiency of using classical and nonparametric statistics when comparing the results of measurements of the structures and fractures geometry, and the possibility of classifying “blurry” images of microstructures based on the Fourier transform.

Based on the results obtained, the authors reviewed some procedures for processing the images of structures and fractures and showed that the use of statistical characteristics of images of structures and fractures makes it possible to rank more objectively the structures according to their geometry.