
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 620.186.8

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСПЕРСНЫХ МИКРОСТРУКТУР АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЫ

© 2024 г. Р. С. Ахметханов^{1, *}, В. В. Столяров¹

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: mibsts@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

В статье описана методика и выполнен анализ оптической микроструктуры многофазного сплава БрАЖ9-4 на основе меди, подвергнутого структурному измельчению. Особенности микроструктуры сплава исследуются с помощью оценки пространственной однородности материалов по геометрическим характеристикам фаз и структурных составляющих. Для анализа структурных характеристик материала использованы следующие количественные характеристики изображений: статистическое разделение фаз с помощью кластеризации, выделение фаз по уровню окрашенности пикселей изображения серого оттенка, определение гистограмм распределений размеров зерен, суммарных площадей (длины) границ зерен и фаз. По результатам исследования сделан вывод о степени измельчения α и β фаз, укрупнения γ фазы за счет распада α и β фаз при охлаждении сплава после обработки РКУП, об увеличении длины границ зерен материала и однородности распределения зерен фаз по площади микрошлифа.

Ключевые слова: алюминиевая бронза, микроструктура, фаза, размер зерен, суммарные площади фаз, длина (площадь) границ зерен, степенной закон, статический центр момента инерции изображения

DOI: 10.31857/S0235711924050068, **EDN:** NTXDTZ

Металлические сплавы в процессе изготовления конкретных изделий (литье, деформация, термическая обработка) испытывают структурные превращения и соответствующие изменения физико-механических свойств. Для повышения качества полуфабрикатов большую роль играет оперативный количественный контроль эволюции микроструктуры, который включает в себя получение и оценку оптических изображений на предмет размера и распределения структурных элементов. Как правило, для крупнозернистых структур (размер зерен десятки и сотни микрон) это не представляет особой сложности при наличии современных металлографических микроскопов. Однако, для деформированных материалов, например, ультрамелкозернистых с размером зерен менее 1 мкм, анализ структурных особенностей становится затруднительным. Он требует применения более дорогостоящих методов анализа и оборудования, таких как электронные просвечивающие и сканирующие микроскопы, атомносиловые микроскопы и др. В этой связи применение методов оценки оптических изображений, основанных на уровне окрашенности пикселей и методов выделения особенностей изображения микрошлифов, является хорошим дополнением для получения геометрических характеристик структуры.

Анализ микроструктуры материала является важным инструментом для оценки его физико-механических свойств и поведения при эксплуатации. Он позволяет изучать и оценивать различные параметры микроструктуры, такие как размер, форма и распределение зерен, наличие включений, фаз и микродефектов. Количественный анализ микроструктуры может быть полезен при анализе технологических свойств полуфабрикатов, контроле качества готовых изделий, автоматизации процессов производства, идентификации и классификации материалов [1].

При анализе структуры определяют, как правило, следующие характеристики: фазовый состав (природу фаз); форму и размеры частиц отдельных фаз; взаимное расположение фаз и структурных составляющих по отношению друг к другу; количественное соотношение фаз и структурных составляющих и т.п. Эти характеристики можно описать качественно и количественно. Развитие компьютерных методов обработки изображений позволяет выбрать алгоритмы для получения численных характеристик, которые полностью описывают особенности структуры материала. Появляется возможность непосредственно измерить геометрические параметры каждой структурной единицы, обработать результаты и получить не только среднее, но и ряд конкретных зависимостей — распределений определенной величины (размера зерен, площади границ зерен и пр.) по размерам (частотная кривая). В настоящее время существуют специализированные программные продукты для анализа микроструктуры материалов по изображению микрошлифов. Также многие авторы используют различные процедуры компьютерного моделирования. Приведем примеры использования вычислительных процедур в анализе микрошлифов.

Например, в работе [2] представлено алгоритмическое обеспечение для предварительной обработки и дальнейшего анализа изображений микроструктуры металлов, реализующее металлографические методы: сравнение с эталонными шкалами; подсчет зерен на микрошлифе; подсчет пересечения границ зерен; измерения хорд. В качестве исходных данных может использоваться заданное количество цифровых изображений шлифа. Далее выполняется сегментация зерен. Для этого используется комбинация методов адаптивной бинаризации, дистанционного преобразования и водораздела. А для определения границ зерен используется контурный анализ.

В другой работе [3] рассматривается задача выборочного контроля качества металлических функциональных материалов, которые должны обладать строго определенными и настраиваемыми физическими и химическими свойствами, дающими возможность реализовывать служебные характеристики конструкций и устройств, недостижимые при использовании других материалов. Предлагается проверять соответствие получаемых потребительских свойств создаваемого материала заданным значениям путем сравнения параметров микроструктуры, определяемым по фотографиям шлифов с помощью автоматизированной информационной системы. В качестве контролируемых величин выступают параметры фазового состава (объемные доли фаз) и структуры (размеры и степень анизотропии зерен) исследуемого материала. Приводится демонстрационный пример выборочного контроля качества арматурной стали с заданными прочностными свойствами. Показано, что путем сравнения значений трех параметров зеренно-фазовой структуры можно контролировать значение твердости исследуемой стали. В качестве основных параметров зеренно-фазовой структуры выбраны: объем фаз, средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна и степень анизотропии зерен.

Методология обнаружения пластической деформации на микроуровне представлена в работе [4]. Анализ основан на статистических данных, описывающих морфологическую и кристаллографическую текстуру микроструктуры образца, полученных методом оптической микроскопии с использованием цифрового анализа изображений. Важной характеристикой, необходимой для описания микроструктуры, авторами было выбрано распределение зерен по размерам и ориентации.

Подход автоматизированного измерения параметров микроструктуры материалов при промышленном контроле качества представлен в работе [5]. В результате программной обработки изображения шлифа определяются следующие характеристики микроструктуры топливной таблетки: средний размер зерна, средний эффективный диаметр, число зерен, находящихся в исследуемом поле шлифа площадь i -го отдельного зерна, длина границы i -го отдельного зерна.

В работе [6] исследуются возможности искусственных нейронных сетей третьего поколения в задачах распознавании микроструктуры материалов. В работе предложена архитектура нейронной сети (относится к сетям третьего поколения), способной к распознаванию элементов микроструктуры. Обучение и апробация сети выполнена на задаче распознавания наличия дендритных структур на снимках микрошлифов металлов. Достигнуты положительные результаты с точностью более 90%. Авторами отмечается, что высокая достоверность полученных результатов говорит о перспективности применения нейронных сетей третьего поколения в задачах распознавания и классификации микроструктур металлов и сплавов.

В работе [7] исследованы особенности распределений размеров зерен. Проведен эксперимент и измерены объемы образца меди, подвергающегося одноосной деформации на разных стадиях деформации. Для каждой стадии были получены большие наборы измерений 7000 зерен, что позволило получить репрезентативные данные: выборка дефектов, накопление и пластическая деформация, и их эволюция. Микроструктурная эволюция изучалась как на макроскопическом, так и на локальном уровнях. Полученные результаты подчеркивают, что в деформации меди преобладает неоднородность, и что каждое зерно находится в уникальной анизотропной среде из-за своего специфического соседства.

Цель настоящей статьи — количественная оценка структурных изменений материала при его обработке интенсивной пластической деформацией методом РКУП и представления методологии обработки изображений микрошлифов.

Исследуемый в статье медный сплав (бронза), является более сложным объектом по сравнению с описанными выше. Он является многокомпонентным, состоящим как из медной основы, так и из легирующих элементов алюминия, железа, никеля и марганца [8]. С точки зрения физико-механических свойств и эксплуатационных качеств сплав обладает многими достоинствами и широко применяется для изготовления деталей судовой арматуры, шестерни, втулки, седла клапанов в авиапромышленности. БрАЖ9-4 имеет высокие механические, коррозионные и антифрикционные свойства. Однако для традиционного качественного анализа структуры и фазового состава сплав представляет проблему, поскольку при незначительной вариации химического состава и режима деформационно-термической обработки может быть однофазным или многофазным [9], а также мелкозернистым. В этой связи, авторы полагают, что применяя методы количественного анализа структуры с использованием алгоритмов анализа изображений возможно точнее описать особенности сплава и его свойств.

Материал и метод исследования. Материалом исследования служил сплав БрАЖ9-4 (сплав меди с алюминием, железом, никелем и марганцем). Химический состав бронзы представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав алюминиевой бронзы (вес.%)

Марка сплава	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Примеси
БрАЖНМц 9-4-4	82.4	7.38	4.67	4.56	0.86	0.13

Сплав по ГОСТ 18175-78 был поставлен в форме горячепрессованных прутков диаметром 20 мм и длиной 100 мм в отожженном состоянии при температуре 800 °С в течение 3 часов. Структурное измельчение было выполнено методом равно-ка-

нального углового прессования (РКУП), основные технологические принципы, которого подробно описаны в [10].

В связи с высокой прочностью исследуемого сплава РКУП выполняли при повышенной температуре в интервале 700–850 °С, при угле пересечения каналов 135°. Количество проходов составило четыре. Микроструктура исходного и РКУП сплава исследовалась на образцах, вырезанных методом электроискровой резки в поперечном сечении к направлению прессования.

Изображения микроструктуры получены методом оптической микроскопии при увеличении 50÷250 на микроскопе AXIO Observer.A1m образцов, поверхность которых предварительно подвергалась шлифовке, полировке и травлению в 20% растворе хромового ангидрида в воде.

Количественную оценку структурных параметров и пространственной однородности выполняли с помощью программных продуктов ImageJ, Gwiddion и Matlab. Используемые программы позволяют получить геометрические характеристики фаз (составляющих материала), определить размеры зерен, их форму, ориентацию и другие параметры микроструктуры.

Используемый подход не ограничен формой зерен (равноосной или другой формы) и количеством фаз в материале. Для анализа структурных характеристик материала использованы следующие количественные характеристики изображения: выделение фаз, оценка гистограмм распределение средних размеров зерен, суммарной площади (длины) границ зерен и фаз. Особенности предложенного подхода — статистическое разделение фаз материала (кластеризация), получение гистограмм распределения зерен фаз по размеру.

Результаты исследования и их обсуждение. Обычно основными объектами исследуемых изображений являются зерна (их форма, распределение по размерам), границы зерен (межфазные и межзеренные), межзеренные пространства. На рис. 1 приведены оптические изображения микроструктуры алюминиевой бронзы до (рис. 1а, б) и после (рис. 1в, г) РКУП.

Низкое увеличение на рис. 1а ($\times 100$) не позволяет различить детали микроструктуры, кажущейся относительно однородной. При большем увеличении на рис. 1б ($\times 200$) видно, что имеются светлые участки размером 10–20 мкм и более, внутри которых слабо угадываются мелкодисперсные светлые частицы. Отметим, что внутри светлых участков на рис. 1б, г имеются межзеренные границы. Интенсивная деформация методом РКУП привела к измельчению микроструктуры, анализ которой на рис. 1в при увеличении $\times 200$ не в состоянии достоверно аттестовать размеры структурных элементов. В таком случае приходится повышать увеличение, при котором на рис. 1г ($\times 800$) более отчетливо видны форма и размеры тех же фазовых составляющих. Даже слабый контраст позволяет предполагать, что структура РКУП сплава является многофазной и состоит из светлых и серых областей, а также темных точек. Тем не менее, количественная оценка микроструктуры и в этом случае затруднительна.

Структура сплава после обработки РКУП из крупнозернистой превратилась в мелкозернистую. На рис. 2 показаны гистограммы распределения окрашенности пикселей в оттенках серого (0–255) до обработки (рис. 2а) и после обработки (рис. 2б). По статистическим данным и форме распределений видно, что структуры материала до и после деформации отличаются друг от друга. Гистограммы являются бимодальными. Изображения микрошлифов рассматривались в формате оттенка серого цвета. Значения пикселей изображения меняются от 0 и до 255. Обозначим условно пиксели изображения, имеющие значения близкие к 0 — как темные (фаза β), другие пиксели, которые ближе к значению 255 — светлые (фаза α), а пиксели между ними серыми (фаза γ).

Для оценки границ все зерна условно разделим на две фазы — темную и светлую, в которые войдет и серая фаза. Деление на фазы провели по минимальной точке гисторамм (рис. 2) между горбами распределений.

На рис. 3 приведены изображения границ между зернами и фазами.

Для получения этих изображений был применен алгоритм (оператор) Собеля поиска границ зерен [13]. При определении размеров зерен и их границ учитываются все зерна от маленьких до больших. Мелкие зерна хорошо видны на рис. 3. в виде отдельных точек.

При определении границ зерен их ширина принималась величиной в два–три пикселя (2–3 px) в зависимости от формы зерен. В табл. 2 приведены количественные данные по суммарным площадям фаз.

Таблица 2. Количественные данные по занимаемой площади S фаз и границ зерен S_g

Состояние сплава	Суммарная площадь темной фазы ($\beta+\gamma$) $S_{(\beta+\gamma)}$, %	Суммарная площадь светлой фазы ($\alpha+\gamma$) $S_{(\alpha+\gamma)}$, %	Суммарная площадь границ фаз S_g , %	Размеры изображения, $n \cdot m$ (px)
До РКУП	44.73	55.27	11.89	2040·1536
После РКУП	48.83	51.17	23.79	2448·1920

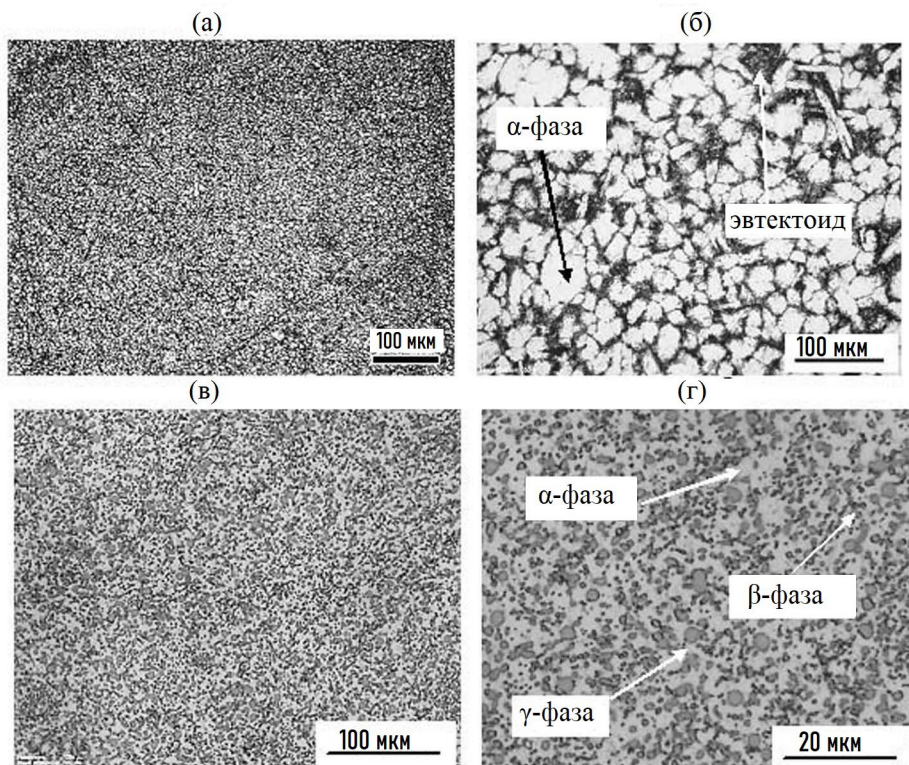


Рис. 1. Оптическое изображение микроstructures в поперечном сечении исходного (а), (б) и РКУП (в), (г) сплава при низком (а), (в) и повышенном увеличении (б), (г).

Если до РКУП площади темной ($\beta + \gamma$) и светлой ($\alpha + \gamma$) фаз составляли соответственно 44.73% и 55.27%, то после РКУП соответствующие площади фаз изменились на 48.83% и 51.27%, т.е. приблизилось к 1:1. РКУП приводит к объемным изменениям соотношения черных и светлых областей с одновременным их измельчением структуры. Суммарная площадь границ также изменилась, она увеличилась с 11.89%, до 23.29%. Приблизительную суммарную длину границ зерен можно получить пересчетом из суммарной площади границ. После обработки РКУП площадь границ зерен стала примерно вдвое больше.

Выполним оценку однородности распределения белых и черных областей по площади микрошлифа. Для чего применим характеристику расположения центра статического момента инерции сечения (изображения микрошлифа) [14].

Оценим условные центры статического момента инерции сечения условно светлых областей ($\alpha + \gamma$). Расчет ведется относительно начала координат в центре изображения. Если до начала обработки центр момента инерции светлой фазы был смещен от центра изображения на $X_c = 84.5$ мкм; $Y_c = 69.73$ мкм, то после обработки смещение стало $X_c = 83.68$ мкм; $Y_c = 64.26$ мкм. То есть светлая фаза ($\alpha + \gamma$) распределилась более равномерно по объему материала.

Имеющиеся в литературе [15] данные относятся к двухкомпонентной диаграмме Cu–Al или к изотермическому сечению трехкомпонентной диаграммы Cu–Al–Fe. В соответствии с двухкомпонентной диаграммой состояния Cu–Al в равновесном состоянии при комнатной температуре сплав с содержанием алюминия около 7.5 вес. %

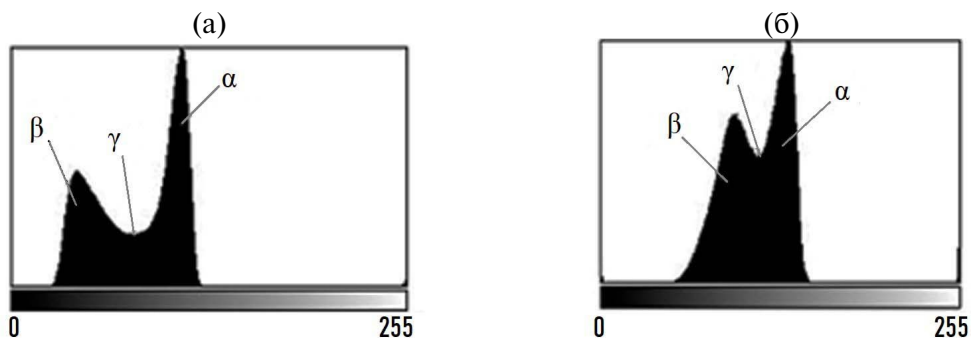


Рис. 2. Гистограммы распределения окрашенности пикселей в оттенках серого (0–255): (а) — до обработки; (б) — после РКУП.

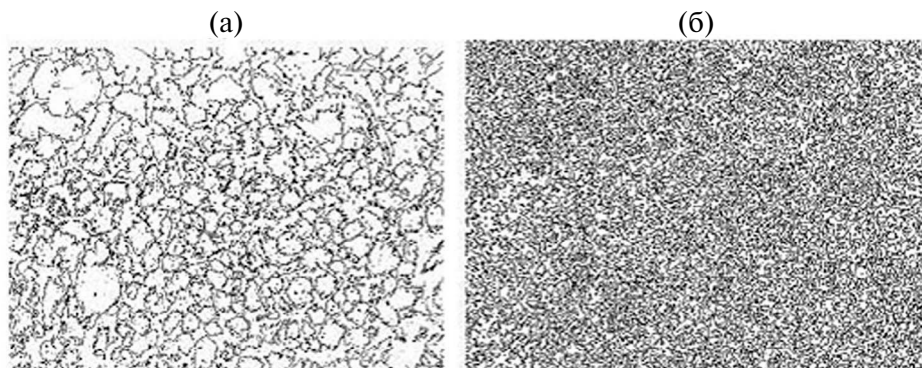


Рис. 3. Границы зерен структуры сплава: (а) — исходное состояние; (б) — после РКУП.

должен быть однофазным, т.е. содержать гранецентрированную (ГЦК) α -фазу на основе твердого раствора алюминия в меди. Однако вид структуры на рис. 1б, г свидетельствует о присутствии областей серого и темного цвета, которые указывают на многофазность сплава. Исследуемый сплав БрАЖ9-4 кроме алюминия содержит в своем составе также железо и никель. Кроме того, сплав был подвергнут термомеханической обработке РКУП в температурном интервале 700–850 °С с последующим быстрым охлаждением. Эти детали состава и обработки сплава могли привести к формированию неравновесной фазы β , твердого раствора на основе интерметаллидного соединения Cu_3Al .

Теоретическое рассмотрение изотермических сечений трехкомпонентной диаграммы $\text{Cu}-\text{Al}-\text{Fe}$ [15] показывает, что в интересующей нас области может находиться три фазы: α — твердый раствор алюминия и железа в меди, β — твердый раствор на основе Cu_3Al и γ — твердый раствор на основе железа.

Таким образом, теоретическое рассмотрение фазового состава сплава БрАЖ9-4 при комнатной температуре показывает, что в нем может находиться не менее трех фаз. Точный ответ на вопрос о фазовом составе сплава мог бы дать рентгеноструктурный анализ, но его возможности в данном случае тоже ограничены. Применение компьютерного анализа изображений в настоящей статье позволило выявить (подтвердить) существование трех фаз.

До обработки серая фаза почти незаметна (она находится в белой и темной фазе в виде дисперсных вкраплений), а после обработки она становится больше в виде отдельных зерен. По-видимому, при РКУП белая и темная фазы испытывают частичный распад с выделением серой фазы.

Выделим серую фазу с помощью кластеризации. Для иллюстрации распределения локальных температур проведем кластеризацию термограмм методом K -средних [12]. Алгоритм основан на рассмотрении спектров графики, извлекаемых из объемных данных (высота рельефа изображения). Алгоритм инициализируется случайным выбором K (заданное число кластеров) точек из имеющегося набора спектров в качестве центров кластеров. Затем применяется обычный двух-стадийный алгоритм: статистическое распределение каждой точки по кластерам таким образом, чтобы она принадлежала к кластеру, центр которого будет ближе всего к ней, и затем перемещаются центры кластеров. Результаты последней итерации возвращаются в виде изображения распределения кластеров фаз. При этом цвет кластеров корректируется — происходит их разделение по уровню окрашенности пикселей.

На рис. 4 представлены гистограммы структуры сплава с четким разделением на три фазы: темная β , серая γ и светлая α .

По гистограммам хорошо видно, что серая фаза наименьшая из трех фаз в исходном состоянии, а после обработки значительно увеличилась. Суммарные площа-

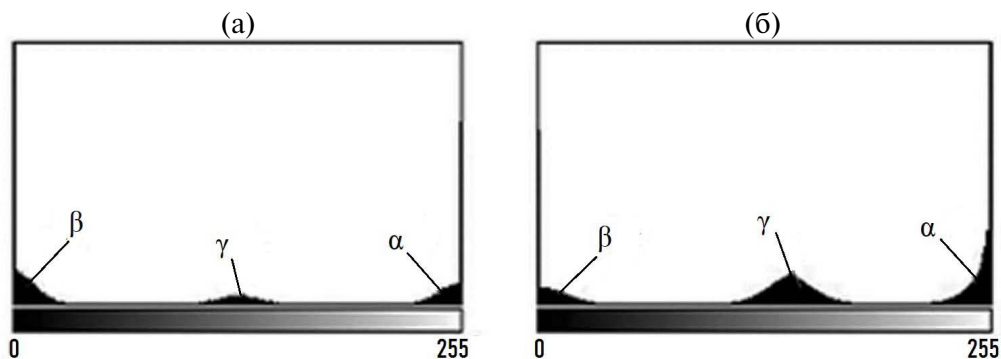


Рис. 4. Гистограммы распределения фаз α , β и γ : (а) — исходное состояние; (б) — после РКУП.

ди фаз после РКУП изменились: светлая фаза α уменьшилась до 41.12%, и темной фазы β стало значительно меньше — 19.85%, а серой фазы γ стало больше — 39.03%. То есть можно предположить, что часть фазы β превратилась в серую фазу γ .

Размеры зерен определялись сегментированием, основанным на алгоритме водораздела — алгоритме Винсента в цифровых пространствах [11].

Для оценки размеров зерен площади зерен в пикселях (px) приводились к форме круга с равной площадью, и определялся средний диаметр этого круга. Обычно при исследовании микроструктуры оцениваются среднеарифметические размеры зерен. Однако наиболее интересно сравнить распределения зерен по размеру, в которых можно оценить количество мелких и крупных зерен.

В результате статистического разделения изображения на три фазы, мелких частиц, которые входили в светлую α и темную β , стало меньше. На рис. 5 приведены распределения числа зерен по их размеру D_z . А в табл. 3 приведены статистические данные по геометрическим характеристикам светлых и черных областей, в частности минимальный D_{\min} и максимальный диаметр D_{\max} Мартина, средний размер областей D_s . Диаметр Мартина — это длина особой линии, проходящей через зерно в заданном направлении, которая делит площадь зерна на две равные части (срединная линия).

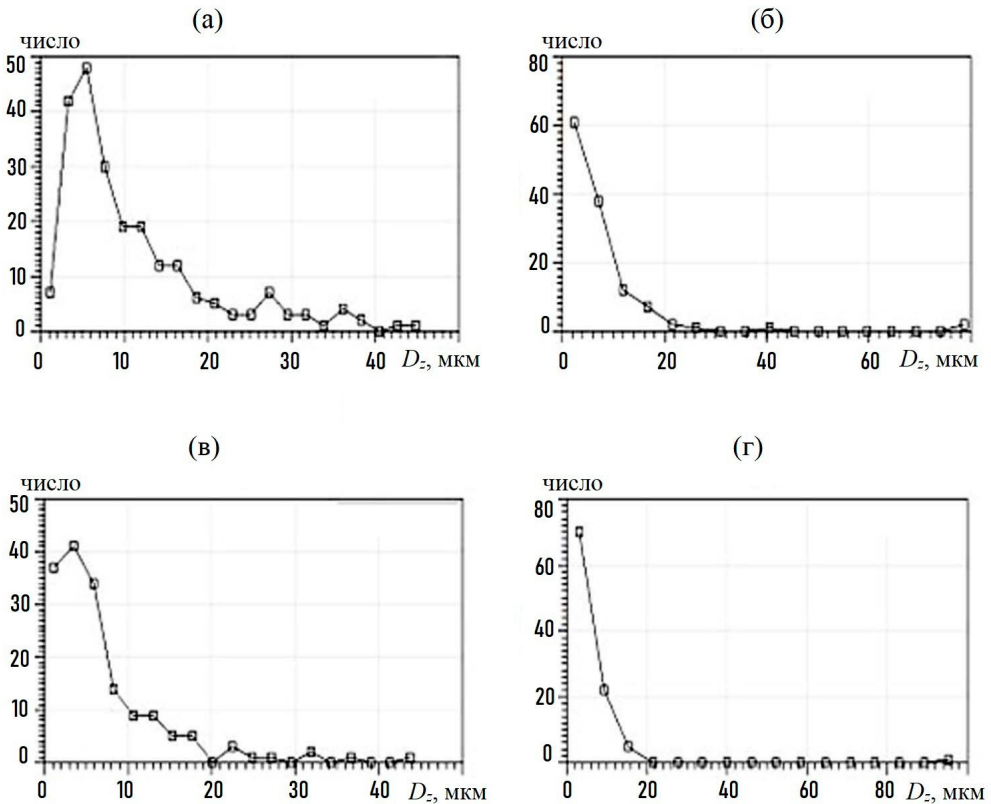


Рис. 5. Распределение размеров зерен фаз: до обработки α (а) и β (в); после обработки РКУП α (б) и β (г).

Таблица 3. Статистические данные геометрических характеристик зерен

Фазы сплава и состояние	Мат. ожидание мин. диаметра Мартина, D_{\min} , мкм	Мат. ожидание макс. диаметра Мартина, D_{\max} , мкм	Мат. ожидание усредненного диаметра областей, D_s , мкм	Степень измельчения	Условный коэфф. разносности D_{\min}/D_{\max}
Светлая фаза α до обработки	2.771	17.28	5.522	1.78	0.160
Светлая фаза α после РКУП	2.051	11.76	3.098		0.174
Темная фаза β до обработки	3.582	20.98	7.004	1.96	0.170
Темная фаза β после РКУП	1.94	9.5	3.58		0.202

При РКУП зерна α и β фаз не только измельчаются, но и меняется соотношение минимального и максимального диаметров Мартина.

Сравним серую фазу γ до обработки и после РКУП. На рис. 6а, б приведены изображения распределения серой фазы по микрошлифу до обработки и после РКУП. Если до обработки серая фаза занимала 12.28% площади изображения микрошлифа, то после обработки она занимает 39.03% площади.

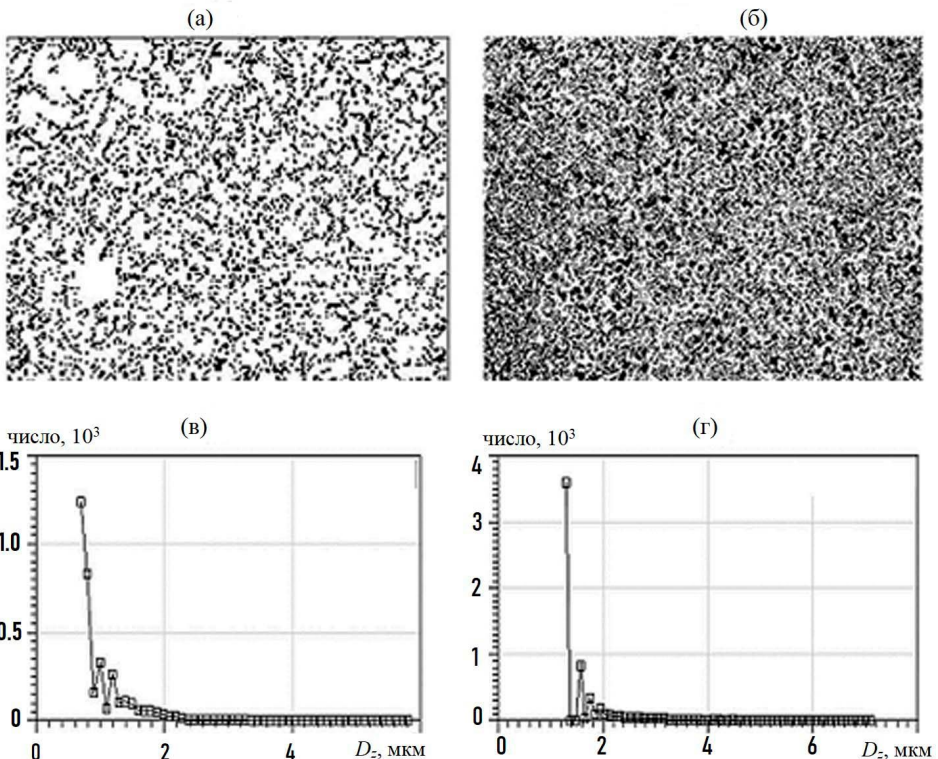


Рис. 6. Распределение серой фазы γ до (а) и после РКУП (б) и распределение серой фазы γ по размеру зерен D_2 до (в) и после РКУП (г).

На рис. бв, г приведены распределения средних диаметров зерен серой фазы γ до обработки и после РКУП. По распределению средних радиусов зерен серой фазы видно, что после РКУП размер зерен серой фазы увеличивается. Если до обработки наибольшее количество зерен имело средний размер примерно 0.6 нм ($n = 1500$), то после РКУП он увеличился до 1.3 мкм ($n = 3600$). Распределение зерен по размеру близко к степенному закону распределения множества.

При обработке методом РКУП происходит измельчение темной β и светлой α фаз сплава. Степень измельчения светлой фазы α 1.78, а темной β — 1.96 (табл. 3). А размеры зерен серой фазы γ увеличиваются при РКУП, происходит преобразование части темной фазы β в серую γ . И поэтому меняются суммарные площади фаз S .

Если суммировать число зерен фаз и определить средний размер получим величину близкую к 1.3 мкм за счет большого числа мелких зерен серой фазы γ .

Выводы. 1. Методами оптической металлографии и цифровой обработки изображений подтверждено структурное измельчение бронзы БрАЖ9-4 в результате применения интенсивной пластической деформации РКУП, а именно: уменьшение размеров зерен α и β фаз. 2. Цифровая обработка показывает, что РКУП способствует повышению однородности распределения зерен по микрошлифу, так и по перемешиванию фаз. 3. Цифровые методы обработки изображений микрошлифов позволяют получить исчерпывающие количественные характеристики структуры материала — распределение зерен по размерам, суммарную площадь фаз, длину границ между структурными составляющими, центр статического момента инерции изображений фаз. 4. Количественные характеристики структуры могут быть полезны для обнаружения корреляции с прочностными характеристиками бронзы при деформационно-термической обработке. 5. Особенностью цифрового метода оценки изображений является статистическое разделение фаз кластеризацией изображения микрошлифа на заданное число кластеров и построение гистограмм распределений средних размеров зерен фаз, которые, как показало исследование, являются степенными функциями и имеют фрактальные свойства. 6. Качество цифровой обработки изображений и точность характеристик зерен и фаз зависит от качества микрошлифа.

Благодарность. Авторы благодарят проф. Савенкова Г.Г. за предоставленные образцы бронзы.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ИМАШ РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
2. Богущ Р.П., Адамовский Е.Р., Денисьев С.Ф. Обработка и анализ изображений микроструктуры металлов для определения балла зерна // Доклады БГУИР. 2021. Т. 9. № 4. С. 70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79>
3. Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Выборочный контроль качества металлических функциональных материалов на основе когнитивного анализа фотографий микрошлифов / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18. № 4. С. 127.
4. Suban M., Svelbar R., Borut B. Digital imaging analysis of microstructures as a tool to identify local plastic deformation // Materials and Technologies. 2012. V. 46 (4). P. 355. <http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:doc-JPQZ1M1L>

5. *Проницев А. Н.* Автоматизация измерения параметров микроструктуры материалов при промышленном контроле качества. Производственные системы // Автоматизация в промышленности. 2005. № 9. С. 11.
6. *Аристов Г. В., Ключев А. В.* Распознавание и классификация микроструктуры металлов и сплавов с использованием глубоких нейронных сетей. Труды конференции GraphiCon 2017, 24–28 September 2017, Perm, Russia. С. 180.
7. *Pokharel R., Lind J., Li S. F. et al.* In-situ observation of bulk 3D grain evolution during plastic deformation in polycrystalline Cu // Int. J. of Plasticity. 2015. № 67. P. 217.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.10.013>
8. *Смаковский М. С., Кацюба М. В., Морендель Ю. Д., Скобин С. А., Луканин В. Л.* Применение наплавленных покрытий, упрочненных боридами, для судовой арматуры из бронзы // Тяжелое машиностроение. 2022. № 3. С. 11.
9. *Святкин А. В., Попова Л. И., Шендерей П. Э.* Моделирование микроструктуры алюминиевой бронзы БрАЖ 9–4, обеспечивающей повышенное сопротивление изнашиванию // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22. № 2. С. 12.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2020.2.02>
10. *Валиев Р. З., Рааб Г. И., Боткин А. В., Дубинина С. В.* Получение ультрамелкозернистых металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации: новые подходы в разработке технологий, Известия высших учебных заведений // Черная металлургия. 2012. Т. 55. № 9. С. 54.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-9-54-57>
11. *Vincent L., Soille P.* Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991. P. 583.
<https://doi.org/10.1109/34.87344>
12. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 528 с.
13. *Klapetek P., Nečas D., Anderson C.* Руководство пользователя Gwyddion. Статистический анализ (gwyddion.net).
14. *Фаворин М. В.* Моменты инерции тел. Справочник / Под ред. М. М. Гернета. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1977. 511 с.
15. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3-х т. / Под ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996–2000.