



*Mistakes of an operator at quantitative analysis of microstructure at working in the program of images processing Image SP are considered. The mistake arising at the stage of creation of the calibration table of increases is defined.*

А. Г. АНИСОВИЧ, А. В. БАСАЛАЙ, ФТИ НАН Беларуси

УДК 620.186:681.3.01

## ОЦЕНКА ОШИБОК ОПЕРАТОРА ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОМ АНАЛИЗЕ СТРУКТУРЫ КОМПЬЮТЕРНЫМИ МЕТОДАМИ

Металлография является одним из важных направлений в металловедении и занимается изучением структуры металлов и сплавов.Metalлографический анализ дает объяснения явлениям, происходящим при различных видах обработки материалов, а также о возможном браке при изготовлении материалов или изделий. Наиболее объективная оценка структуры может быть дана при использовании количественного металлографического анализа. За последнее время количественный анализ структуры в металловедении претерпел значительные изменения. Методы анализа структуры прошлых лет использовали статистические методы обработки, представленные, в частности, в ГОСТ 5639–82 (Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна). В качестве методов определения величины зерна непосредственно по изображению структуры в этом ГОСТ представлены метод сравнения с эталонными шкалами; метод подсчета зерен; метод подсчета пересечений границ зерен; метод измерения длин хорд. Перечисленные методы определяют значение средней величины зерна. Если требовался более сложный анализ, например распределение зерен по размерам, параметры анизотропии или пространственной ориентации структуры, то прибегали к трудоемким операциям измерения количественных параметров микроструктуры вручную. Детально такие методы описывались в литературе прошлых лет [1].

Вопрос об ошибке измерения при оценке количественных параметров структуры время от времени поднимается при обсуждении результатов научных работ и является важным для объяснения результатов исследований.

Ошибку измерения для ручных методов анализа микроструктуры определяли достаточно про-

сто, поскольку использовали окуляр-микрометр, объект-микрометр или же измерение проводили на увеличенных изображениях микроструктуры с помощью линеек.

Причинами появления погрешности могут быть [2] ограниченная точность изготовления средств измерения; влияние на измерение внешних условий (изменение температуры, колебание напряжения и т. д.); действие экспериментатора (дрожание руки, различное положение глаза, проблемы со зрением, разное видение структуры различными операторами и т. п.); приближенный характер законов, используемых для нахождения измеряемых величин.

Перечисленные причины появления погрешностей неустранимы, хотя и могут быть сведены к минимуму.

В металлографии погрешность, как правило, связана с точностью измерительного инструмента, а также ошибкой оператора. Относительная погрешность определяется как  $\delta_x = \Delta x/x$  ( $x$  – измеренное значение;  $\Delta x$  – абсолютная ошибка измерения). Для любой шкалы измерительного инструмента  $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/2$ , т. е. ошибка для линейки любого рода равна половине цены деления шкалы. При этом ошибка определения параметров структуры тем меньше, чем больше масштаб анализируемого изображения при условии, что для анализа выбирается статистически достаточное количество структурных составляющих (зерен, фаз, различных включений и т. д.). Ошибка для ручных методов обработки структуры составляет 3,3–8,1% при доверительной вероятности 0,50–0,90 [1].

За последнее время метод регистрации изображений претерпел значительные изменения. Фотографии микроструктуры сменились цифровыми

изображениями, которые фиксируются цифровой камерой и передаются на монитор персонального компьютера. При этом параметры, свойства и, в конечном счете, качество изображения определяются разрешением видеокамеры, а также возможностями компьютерной системы. При определении размера зерна компьютерными методами с помощью программ обработки изображений результаты гораздо точнее, чем при подсчете размера зерна вручную.

Как правило, вопрос об ошибке не обсуждается, если метрический отрезок является принадлежностью объектива микроскопа и фиксируется вместе с изображением структуры. Микроскопы белорусского производителя ГНПО «Планар» до недавнего времени такой метрики не имели. Программа обработки изображений для этого случая должна иметь в своем составе калибровочную таблицу увеличений. Для ее формирования используется стандартный объект-микрометр для работы в отраженном свете.

Объект-микрометр представляет собой металлическую или стеклянную пластинку в форме предметного стекла (ГОСТ 7513–75). На этой пластинке обозначен круг, в центре которого имеется шкала величиной 1 мм. Она разделена на 100 частей. Интервалы между делениями равны 0,01 мм, т. е. 10 мкм. Сущность механизма калибровки иллюстрирует рис. 1, на котором показан снимок шкалы объект-микрометра и формирование метки увеличения в программе Image SP. В процессе формиро-

вания калибровочной таблицы увеличений длина калибровочного отрезка (рис. 1, стрелка 1) программы приравнивается к определенному количеству делений объект-микрометра (стрелка 2). В окне «калибровка» эти значения ставятся в однозначное соответствие с увеличением (в данном случае 408) и запоминаются программой с формированием калибровочной таблицы. На основании этого программа автоматически калибрует изображение (т. е. проставляет метрику на изображении структуры), если указано значение увеличения (рис. 2).

При работе с цифровыми изображениями погрешность измерения количественных параметров структуры определяется:

- на этапе создания калибровочной таблицы увеличений в связи ограниченной точностью объект-микрометра;
- ошибкой программного обеспечения, в том числе наличием системных ошибок;
- ошибками оператора как на этапе создания калибровочной таблицы, так и при выделении объектов для количественного анализа на калиброванном изображении.

Нарушение калибровки может происходить также при работе с оптической частью микроскопа, если имеют место переустановка объектива, адаптера, чистка оптической системы, при которой происходит частичная разборка микроскопа. После работ такого типа калибровка системы должна быть проверена и обновлена по необходимости. Следует отметить также, что калибровочная табли-

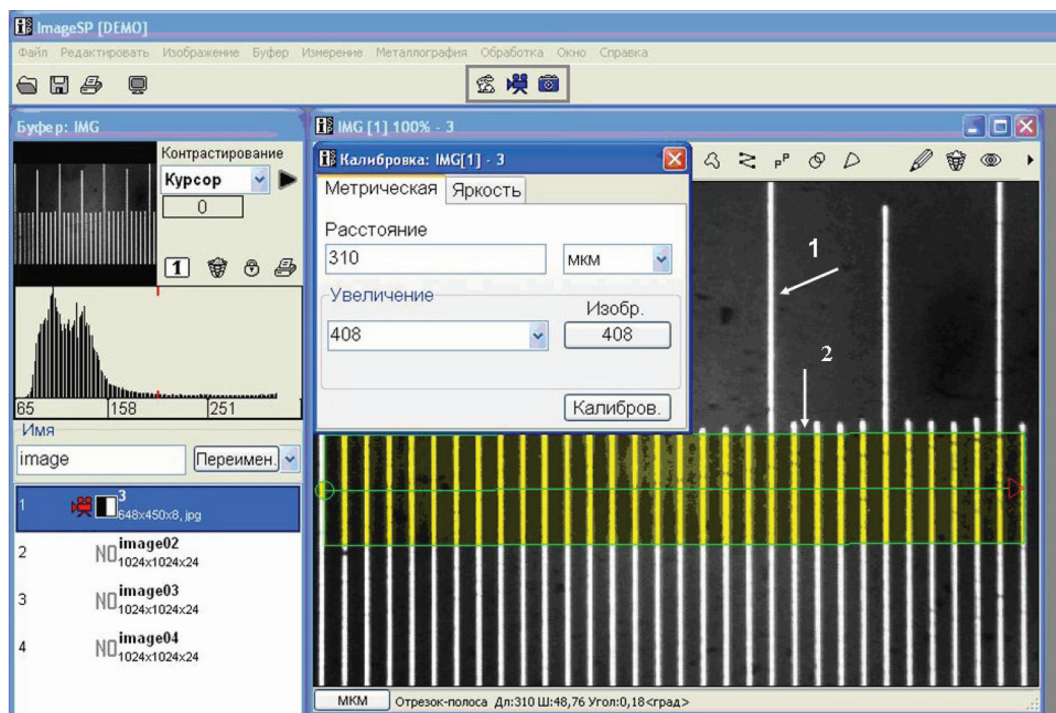


Рис. 1. Создание калибровочной таблицы увеличений

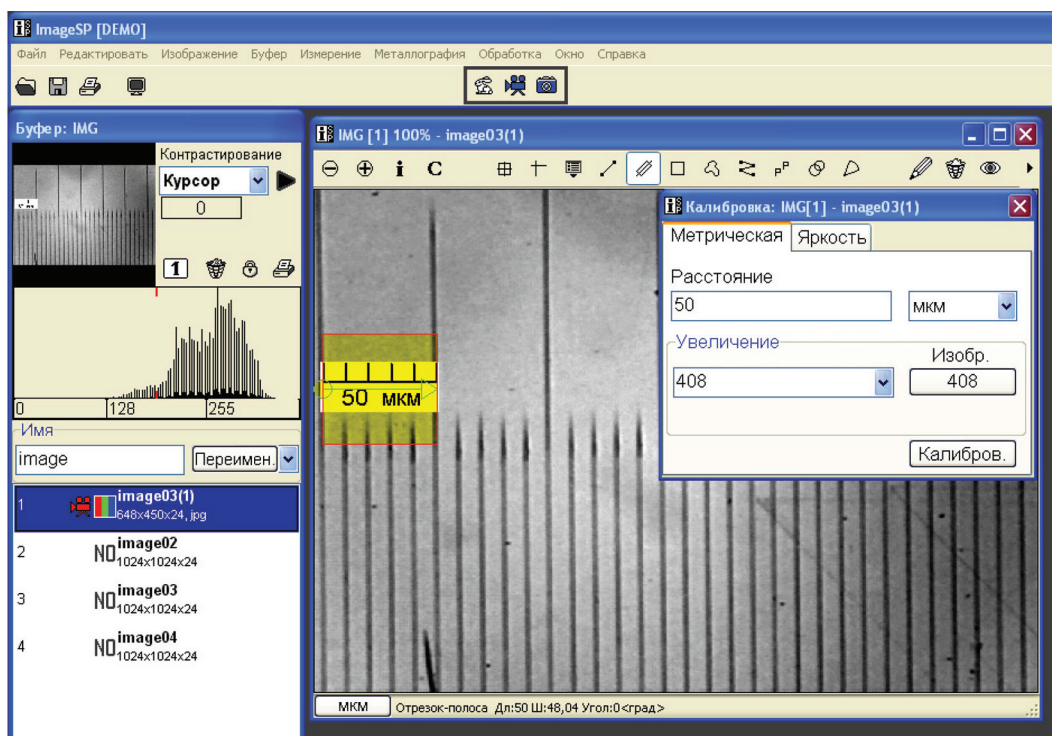


Рис. 2. Калибровка изображения

ца формируется для данной конкретной камеры с конкретными параметрами разрешения.

С точки зрения математика или программиста вопрос точности при работе с цифровыми изображениями связан прежде всего с размерами изображения, т. е. с количеством элементов изображения («пиксель»). Воросы точности измерений при изменении пространственного и яркостного разрешения являются предметом специального рассмотрения и в данной работе не обсуждаются. Эффекты, связанные с изменением числа отсчетов или числа градаций яркости в цифровом изображении, рассмотрены в [3].

В данной статье рассматривается влияние возможных ошибок оператора при создании калибровочной таблицы увеличений программы обработки изображений, а также на этапе количественного анализа калиброванного изображения.

Анализ проводили при фиксированном разрешении видеокамеры (864×600), а также при фиксированном размере окна камеры и окна для обработки изображений. Анализ проведен применительно к программе обработки изображений Image SP. Разработчиками программного обеспечения Image SP являются компании СисПрог и TRS (Республика Беларусь).

Ошибка, внесенная на этапе создания калибровочной таблицы увеличений (если исключить промахи оператора), может быть связана с неточностью совмещения шкал объект-микрометра и метрического отрезка программы обработки изображений. При увеличениях 100 и 200 можно считать, что штрих стандартного объект-микрометра не имеет толщины (имеется в виду видимая толщина при данном размере окна изображения). Поэтому абсо-

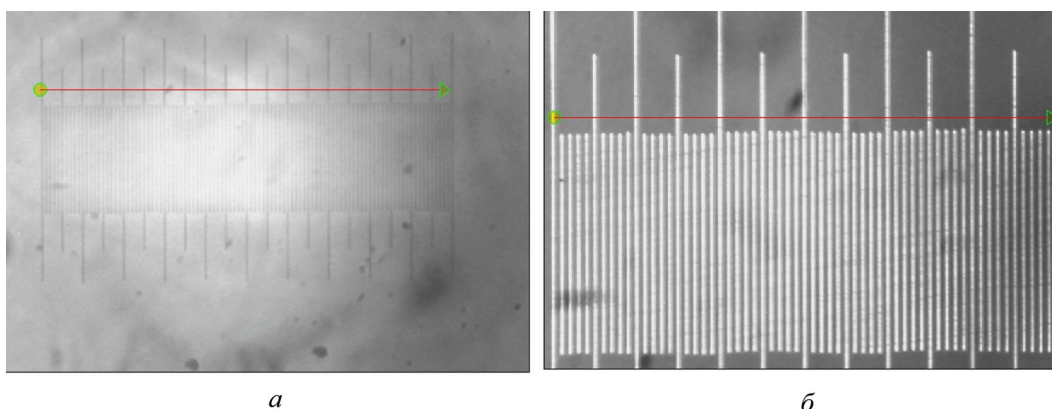


Рис. 3. Калибровка изображений при увеличении: а – 100; б – 200

лютная ошибка может быть равна половине цены деления объект-микрометра, т. е. 0,005 мм. Для того чтобы свести к минимуму ошибку при создании калибровочной таблицы, необходимо использовать максимальный отрезок объект-микрометра, который может поместиться в кадр (рис. 3).

При увеличении 100 для работы доступна вся шкала объект-микрометра (рис. 3, а), т. е. 1 мм. Тогда относительная ошибка будет составлять  $0,005/1 \cdot 100\% = 0,05\%$ . При увеличении 200 видимая часть шкалы объект-микрометра составляет 0,6 мм (рис. 3, б). В этом случае ошибка калибровки  $0,005/0,6 \cdot 100\% = 0,083\%$ .

При увеличении 400 штрихи объект-микрометра уже имеют видимую толщину и основная ошибка определяется как половина толщины штриха. Расстояние между серединами штрихов объект-микрометра (стрелка 1) составляет 0,005 мм. Минимизировать ошибку возможно при выборе расстояния 0,005 мм в соответствии со стрелками 2 или 3 (рис. 4, а). При увеличении 400 (рис. 4, б) в кадре помещается 31 деление. Средняя толщина штриха составляет 1,2 мкм, а длина 31 деления – 310 мкм. Относительная погрешность составляет  $\delta = (0,6 \cdot 100\%)/310 = 0,194\%$ .

Естественно при таком подходе к определению ошибки калибровки существует некоторая условность, так как толщина штриха определяется исходя из калибровки по стрелке 1, нами же сделанной.

При повышении увеличения в кадр помещается 15 и 6 делений шкалы объект-микрометра при увеличении 824 и 2000 соответственно (рис. 5, а, б). При увеличении 824 средняя толщина штриха оценивается как 1,3 мкм, длина 15 делений объект-микрометра составляет 150 мкм. Для увеличения 2000 средняя толщина штриха составляет 1,24 мкм, длина шести делений – 60 мкм. Погрешность определяется как 0,434% для увеличения 824 и 1,036% для увеличения 2000, т. е. основная ошибка при изменении увеличения складывается из наличия видимой толщины штриха объект-микрометра, а также определяется уменьшением количества делений, по которым производится формирование данных для калибровочной таблицы увеличений.

Проведена оценка ошибки оператора при количественном анализе калиброванного изображения. Для этого использовали изображение структуры бериллиевой бронзы БрБ2 при увеличении 408 (рис. 6). При анализе зерна, пересеченные границами кадра, не учитывались.

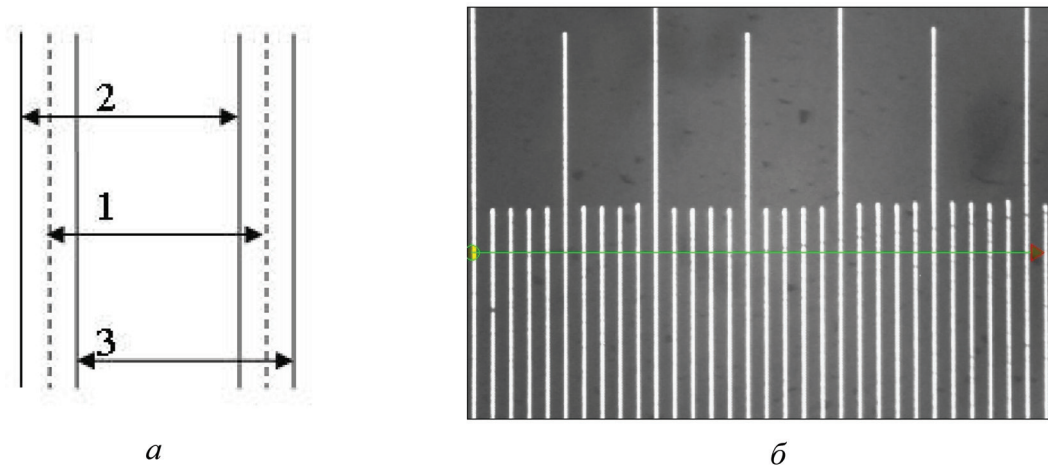


Рис. 4. Схема одного деления объект-микрометра (а); калибровка изображения при увеличении 400 (б)

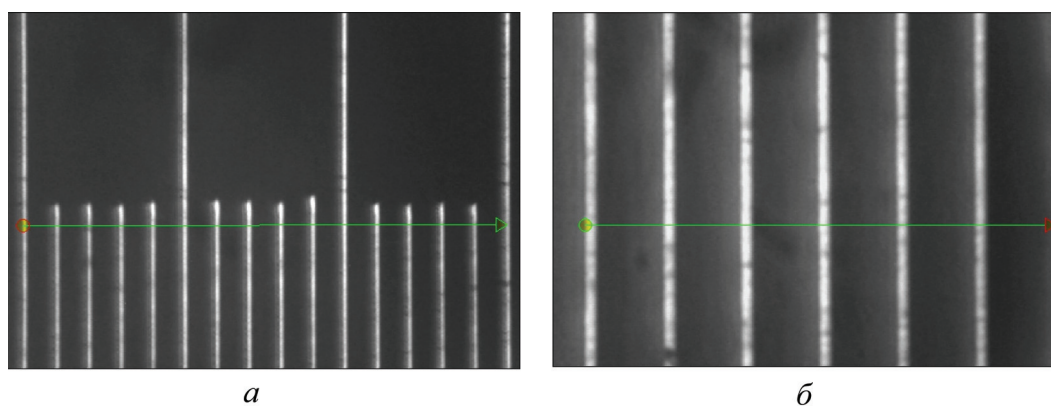


Рис. 5. Калибровка изображений при увеличении: а – 100; б – 200

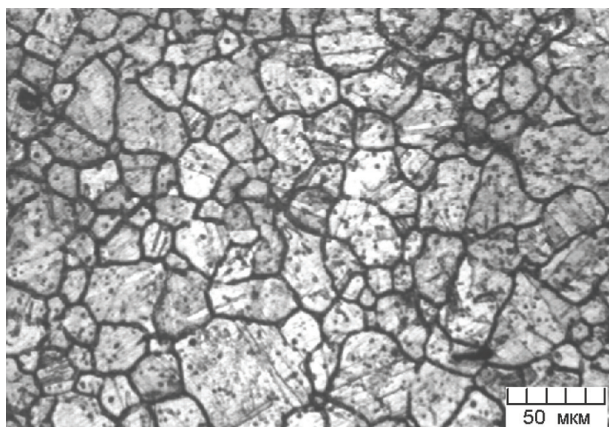


Рис. 6. Микроструктура бериллиевой бронзы

На изображении структуры вручную выделяли зерна, после чего программа автоматически определяла средний размер зерна (диаметр). Оценивали ошибку одного оператора при вычислении диаметра зерна при многократной обработке кадра и ошибку результата обработки того же кадра четырьмя операторами. Обработку изображения одним оператором осуществляли с временным интервалом в одни сутки между очередной обработкой. Результаты измерения приведены в таблице.

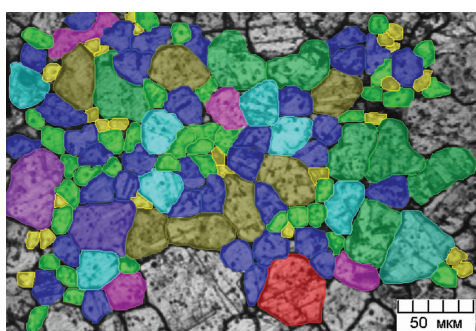
При обработке изображения одним оператором получено, что величина среднего значения диаметра по результатам пятикратного определения одним оператором составила 22,2 мкм, средняя абсолютная ошибка – 0,2 мкм, средняя относительная

Результаты измерения среднего размера зерна

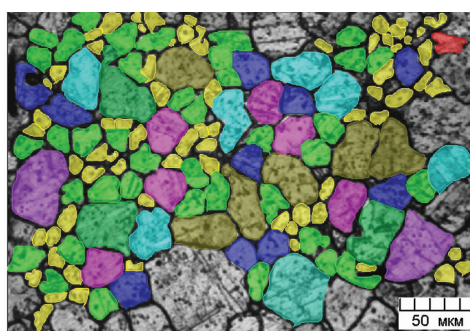
Номер измерения	Размер зерна					
	одним оператором			разными операторами		
	размер зерна, мкм	абсолютная ошибка ε, мкм	относительная ошибка δ, %	размер зерна, мкм	абсолютная ошибка ε, мкм	относительная ошибка δ, %
1	22,1	0,1	0,5	22,1	0,3	1,4
2	21,9	0,3	1,4	19,8	2,0	9,2
3	22,4	0,2	0,9	21,1	0,7	3,2
4	22,4	0,2	0,9	24,0	2,2	10
5	22,2	0	0	–	–	–
<>	22,2	0,2	0,9	21,8	1,3	6,0

ошибка – 0,9%. Максимальный разброс значений среднего диаметра, полученных одним оператором, 0,5 мкм (табл. 1), что составляет 2,3% от среднего значения по пяти результатам. Величина ошибки измерения зависит от способа ее вычисления. Поэтому окончательный результат измерений диаметра зерна исследуемой микроструктуры в соответствии с [4] можно записать как  $d = (\langle d \rangle \pm r_d)$ , где  $d$  – размер зерна;  $\langle d \rangle$  – среднее значение результата измерений;  $r_d$  – вероятная ошибка измерения. Вероятная ошибка измерения определяется по

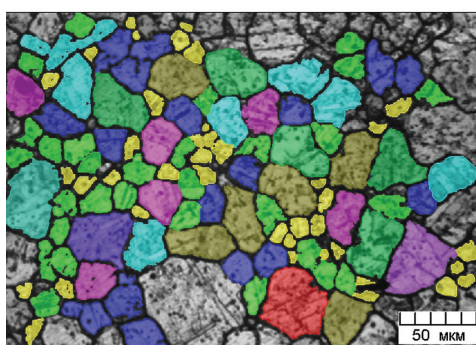
формуле:  $r_d = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n(n-1)}}$ . Тогда в соответствии с вышесказанным  $d = (22,20 \pm 0,06)$  мкм. Первый член в правой части неравенства дает наиболее вероятное значение диаметра зерна  $d$ , а второй – вероятную ошибку его измерения.



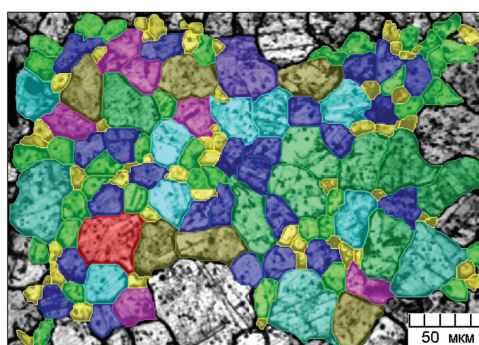
а



б



в



г

Рис. 7. Маски изображений микроструктуры бериллиевой бронзы, обработанные оператором № 1 (а); оператором № 2 (б); оператором № 3 (в); оператором № 4 (г)

На рис. 7 представлены результаты обработки структуры четырьмя разными операторами. Маски изображений, сделанные различными операторами, отличаются, что может быть объяснено как различием в опыте, так разным видением структуры. Различия могут быть связаны, в том числе с невозможностью надежно различить границы зерен и двойников [5], а также выделить участки плохо протравившихся границ зерен. В связи с этим количественный металлографический анализ серии образцов должен производиться одним оператором.

В таблице приведены результаты обработки одного и того же кадра четырьмя различными операторами. Среднее значение размера зерна, подсчитанное действием четырех операторов, составляет 21,8 мкм. Среднее значение абсолютной ошибки составило 1,3 мкм, а относительной ошибки – 6,0%. Максимальный разброс значений 4,2 мкм, что составляет 19,3% от среднего значения диаметра зерна для четырех операторов. Окончательный результат измерений среднего диаметра зерна действием четырех операторов в соответствии с [4] составляет  $d = (21,75 \pm 0,60)$  мкм, т. е. вероятная ошибка измерения диаметра зерна разными операторами равна 0,6 мкм.

### Выводы

1. Установлено, что ошибка количественного анализа структуры может быть внесена на стадии

создания калибровочной таблицы увеличений программы обработки изображений и связана с ограниченной точностью объект-микрометра, используемого в качестве метрического эталона. Причина ограничения точности связана с тем, что при современных оптических регистрирующих средствах значимой является толщина делений шкалы.

2. Ошибка, внесенная при создании калибровочной таблицы, в целом возрастает с повышением увеличения и составляет 1% для увеличения 2000. При меньших увеличениях она составляет менее 0,5%.

3. Среднее значение относительной ошибки количественного анализа структуры, внесенное оператором при многократной обработке одного и того же изображения, составляет 0,9% и сравнимо по величине с ошибкой, имеющей место при создании калибровочной таблицы увеличений.

4. Наибольшая относительная ошибка при количественной обработке может быть связана с неодинаковым восприятием изображения структуры различными операторами, среднее значение которой составляет 6,0%.

5. Таким образом, ошибка количественного анализа изображений может быть оценена в ~2% как результат двух независимых событий: возникновение ошибки на этапе создания калибровочной таблицы увеличений, а также на этапе создания маски изображения для количественного анализа действиями одного оператора.

### Литература

1. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976.
2. Новичкий П. В., Зогфар И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
4. Краткий физико-технический справочник / Под общ. ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1960.
5. Билюк Л. В., Анисович А. Г., Елисева Н. С. Определение балла зерна стали в программе обработки изображений при наличии двойников // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: VII Междунар. науч.-техн. конф. 2012. Ч. 1. С. 43–48.