

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

А.Н. Проничев (МИФИ)

Представлена система обработки изображений АТЛАНТ-ТК, предназначенная для автоматизированного измерения размеров зерна топливных таблеток из диоксида урана при промышленном контроле качества серийной продукции. Отмечены особые требования к методике проведения автоматизированных измерений, выполнение которых обеспечивает получение достоверных результатов. Показано, что предложенный подход к решению задачи автоматизации измерения параметров микроструктуры топливных таблеток из диоксида урана при соответствующей адаптации к особенностям объекта измерения может быть применен для измерения характеристик микроструктуры различных видов материалов и сплавов.

В практике заводских лабораторий при исследовании микроструктуры материалов и сплавов для измерения размера зерна широко используется метод подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра зерна. Популярность такого решения обусловлена тем, что в условиях, когда измерения проводятся "вручную", этот метод позволяет более точно оценить микроструктуру, чем метод визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал, и при этом требует меньше трудозатрат, чем более точный метод подсчета числа зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа [1]. Тем не менее, следует признать, что существенным недостатком применения указанного метода является зависимость результата измерения от субъективных ошибок лаборанта, выполняющего подсчет пересечений границ зерен отрезками прямых. Кроме того, для материалов, содержащих зерна разных размеров, измерение среднего условного диаметра зерна не позволяет однозначно вычислить реальный средний диаметр зерна. Соотношение этих параметров зависит от процентного состава зерен разных размеров. Такая неоднозначность при измерении параметра качества продукции недопустима. Метод подсчета зерен позволяет более точно и однозначно определить средний размер зерна, но при "ручных" измерениях крайне трудоемок и подвержен субъективным ошибкам.

Размер зерна топливных таблеток из диоксида урана является важной характеристикой ядерного топлива, подлежащей контролю при промышленном производстве топливных таблеток. С учетом вышеизложенного задача автоматизации измерения этого параметра является актуальной. Для ее решения разработана система

обработки изображений АТЛАНТ-ТК [2]. Структурная схема и общий вид системы представлены на рис. 1 и 2.

На основе анализа объектной среды – изображений шлифов топливных таблеток (рис. 3), выборка которых формировалась на основе исследования образцов штатной продукции, выпускаемой в течение длительного времени (около одного года), сформирована модель изображения шлифа и предложен метод цифровой обработки, который реализован в ПО системы АТЛАНТ-ТК [3, 4]. Основные сложности, с которыми пришлось столкнуться при разработке указанного метода – это отсутствие видимости части границ зерен и наличие пористости на поверхности шлифа. В ходе выполнения компьютерной программы производится автоматическое построение линий границ зерен с последующим определением значений площади каждого из зерен.

В результате программной обработки изображения шлифа в системе определяются следующие характеристики микроструктуры топливной таблетки: средний размер зерна A , вычисляемый по формуле $(\sum_{i=1}^N S_i/N)^{1/2}$, и средний эффективный диаметр $D_{ср.эф}$, определяемый как $\sum_{i=1}^N 2(S_i/\pi)^{1/2}/N$, где N – число зерен, находящихся в исследуемом поле шлифа топливной таблетки, S_i – площадь i -го отдельного зерна. Таким образом, точность результатов измерения размера зерна зависит от точности построения линий границ зерен на анализируемом изображении.

Для использования системы в промышленном контроле качества серийной продукции необходимо разработать и аттестовать соответствующую методику выполнения измерений.

Для автоматизированного измерения размера зерна с применением системы АТЛАНТ-ТК необходимо: изготовить шлиф топливной таблетки, произвести травление поверхности шлифа для выявления границ зерен,

Основные технические характеристики системы	
Тип микроскопа	инвертированный металлографический микроскоп
Оптическое увеличение (при наблюдении через окуляры), крат	500
Тип регистратора изображения	аналоговая черно-белая телекамера
Время ввода кадра изображения, мс	40
Размер поля шлифа, соответствующего одному кадру изображения, мм	0,26x0,2
Размер цифрового изображения, пиксель	768x576
Число градаций яркости в цифровом изображении	256
Напряжение питания, В	220
Потребляемая мощность, Вт	≤900

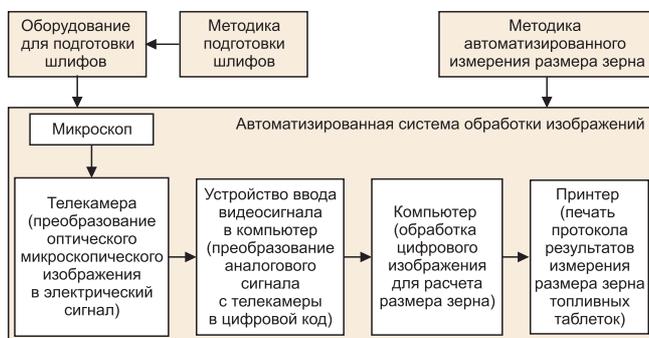


Рис. 1

установить исследуемый образец на предметный столик микроскопа, сфокусировать оптическую систему микроскопа, выбрать поле шлифа для анализа, ввести микроскопическое изображение поверхности шлифа в компьютер, запустить программу анализа изображения, сформировать и распечатать протокол результатов измерения.

Общие требования к методике выполнения измерений определены в ГОСТе Р 8.563-96 "ГСИ. Методики выполнения измерений". При разработке методики выполнения измерений следует руководствоваться рекомендациями МИ 2377-98 "Разработка и аттестация методик выполнения измерений". Проведем анализ проблемных вопросов, связанных с особенностями применения системы АТ-ЛАНТ-ТК для измерения размера зерна топливных таблеток из диоксида урана в условиях промышленного контроля серийной продукции.

На концептуальном уровне рассмотрения вопросов разработки указанной методики выделим наиболее значимые этапы: изготовление шлифа, ввод изображения шлифа в компьютер, оценка качества результатов компьютерного анализа. Внимание к этим этапам вызвано тем, что нарушение правил их выполнения может привести к неверным результатам измерения.

Характеристики объекта измерений, имеющие влияние на погрешность измерения. В основу метода измерений размера зерна положен анализ микроскопического изображения, в ходе которого выделяются видимые линии границ зерен, образовавшиеся в результате химического травления поверхности шлифа топливной таблетки. Это обуславливает зависимость результатов измерения от качества подготовки шлифа (шлифовки, травления). Недостаточная шлифовка или отклонение от предусмотренных режимов шлифовки приводит к образованию на поверхности шлифа царапин, которые при компьютерном анализе могут быть ошибочно отнесены к линиям границ зерен. Существенным фактором является время травления образца, обеспечивающее выявление границ зерен на поверхности шлифа. При недостаточном времени травления многие границы зерен оказываются непротравленными и вследствие этого не видны на изображении. При превышении оптимального времени травления участки вокруг границ зе-

рен и пор оказываются растравленными, что искажает картину границ зерен, и в конечном итоге приводит к ошибочному измерению размера зерна. В этой связи необходимо контролировать качество изготовления шлифа. Измерения допускается производить на шлифах, удовлетворяющих следующим требованиям

по качеству подготовки: на шлифе в поле зрения не должно быть царапин, линий деформации, находящихся в зернах структуры, углублений от абразивных частиц, грязи (в том числе от смазочных и полировочных веществ), посторонних примесей, следов от высушенной воды и спирта, вырывов элементов структуры, выпуклостей, рельефа, задиров, следов термических повреждений, кометных следов, трещин. На поверхности шлифа допустимы лишь минимальные повреждения структуры, необнаруживаемые с помощью оптического микроскопа и не влияющие на результаты исследования. Шлифы не должны иметь недопустимого недотрава или перетрава. Примеры изображений недотравленных и перетравленных шлифов приведены на рис. 4 и 5.

Ввод изображения шлифа в компьютер.

После установки исследуемого образца на предметный столик производится фокусировка оптической системы микроскопа, выбирается на шлифе поле анализа, после чего производится фиксация изображения и ввод его в компьютер. Факторы, влияющие на качество введенного изображения: неточная фокусировка изображения (границы зерен оказываются "размытыми"), недостаточная или избыточная освещенность поверхности шлифа (из-за неправильно установленного регулятора накала лампы осветителя микроскопа), движение образца в момент фиксации (из-за перемещения предметного столика оператором; вибрации основания микроскопа, вызванной работой технологического оборудования; случайных толчков стола, на котором установлен микроскоп, в том числе и из-за сильных ударов по кнопкам клавиатуры компьютера). Для контроля действия указанных факторов предлагается после ввода изображения шлифа в компьютер проводить визуальную оценку изображения, выводимого на экран монитора. Качество изображения считается достаточным для компьютерной обработки, если: изображение сфокусировано; в поле изображения отсутствуют задиры, царапины, грязь



Рис. 2

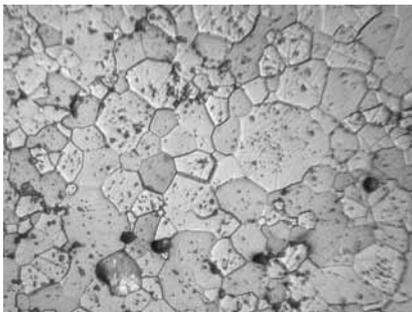


Рис. 3. Изображение поверхности шлифа топливной таблетки

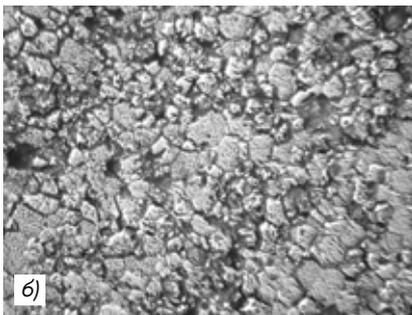
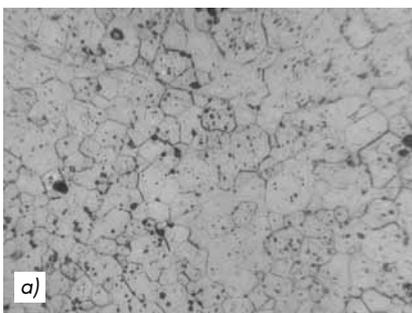


Рис. 4. Изображение поверхности шлифа а) недотравленного, б) перетравленного

и прочие объекты, искажающие изображение микро-структуры; отсутствует смаз изображения; яркость в точках цифрового изображения не достигает предельно черного и предельно белого цвета. В противном случае следует после устранения факторов, вызвавших недопустимое качество изображения, повторно ввести изображение шлифа в компьютер.

Оценка качества компьютерного анализа цифрового изображения. Когда изображение зафиксировано и его качество оценено как удовлетворительное, производится запуск программы его анализа, в результате работы которой на цифровом изображении шлифа формируются замкнутые линии видимых и невидимых границ зерен. Размер зерна определяется в результате программного расчета площадей зерен, образованных построенными линиями.

Ошибки, допущенные на этапах подготовки шлифа и ввода изображения шлифа в компьютер, невыявленные на соответствующих этапах, приводят к построению линий "ложных" границ зерен или к пропуску в действительности существующих границ. Оценка картины построенных программой линий позволяет выявить эту ситуацию и, в случае ее обнаружения, произвести измерения заново. При незначительном числе ошибочно построенных или недостроенных линий оператору предоставляется возможность в интерактивном режиме работы с системой отредактировать рисунок построенных программой линий.

Для обеспечения визуальной оценки качества работы программы линии границ, окрашенные контрастным цветом, выводятся поверх изображения шлифа на экране монитора. Ошибки в построении линий видимых границ обнаруживаются "одним взглядом" — это темные области границ, на которых программа не построила линии. Ошибки в построении "ложных" границ (линии построены там, где в действительности нет границ зерен) могут быть выявлены в результате сравнения двух картин — изображения исходного и изображения с нанесенными программой линиями. Для этого в системе предусмотрен режим сравнения двух изображений путем попеременного отображения их в одной и той же позиции на экране монитора, что помогает визуально зафиксировать ложные линии границ.

Для того чтобы оператор, выполняющий автоматизированные измерения размера зерна, мог оценить правильность автоматической обработки изображения он должен иметь достаточную для этого квалификацию. Проблема оценки правильности результатов автоматической обработки связана с неоднозначностью интерпретации картины зерен при анализе изображений микро-структуры топливной таблетки из диоксида урана. Даже при обеспечении оптимальных условий шлифовки и травления образца часть границ зерен оказываются непрозрачными. В методе автоматического построения границ зерен учитывается модель изображения зерна,

основанная на интерпретации картины зерен экспертами. С целью обучения операторов интерпретировать картину границ зерен на изображении шлифа топливной таблетки и для обеспечения адекватной оценки результатов автоматической обработки изображения разработан атлас типовых изображений микро-структуры топливных таблеток из диоксида урана с указанием на них определенных экспертами линий границ зерен.

Заключение

На основе анализа особенностей автоматизированного измерения размеров зерна топливных таблеток из диоксида урана определены проблемные вопросы в разработке соответствующей методики выполнения измерений: изготовление шлифа, ввод изображения шлифа в компьютер, оценка качества результатов компьютерного анализа изображения шлифа.

Установлены требования к качеству изготовления шлифа и изображению, введенному в компьютер.

Для разрешения проблемы неоднозначной интерпретации картины границ зерен разработан атлас типовых изображений микро-структуры топливных таблеток из диоксида урана с заключениями экспертов об истинных положениях линий границ зерен. Атлас может использоваться как учебное пособие для персонала, проходящего подготовку к проведению автоматизированных измерений размера зерна, так и как справочник для разрешения вопросов о положении линий границ на изображении исследуемого шлифа в случаях неоднозначной интерпретации картины границ зерен.

Разработанная методика выполнения измерений размера зерна с применением автоматизированной системы обработки изображений АТЛАНТ-ТК аттестована и внедрена в промышленный контроль качества серийно выпускаемых топливных таблеток из диоксида урана.

Предложенный подход к решению задачи автоматизации измерения параметров микро-структуры топливных таблеток из диоксида урана при соответствующей адаптации к особенностям объекта измерения может быть применен для измерения характеристик микро-структуры различных видов материалов и сплавов.

Список литературы

1. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М.: Издательство стандартов, 1983.
2. Михайлов В.Н., Акимов С.В., Бибилашвили Ю.К., Ермолов Б.Б. и др. Автоматизированная система промышленного контроля микро-структуры топливных таблеток // Научная Сессия МИФИ-2000. Сборник научных трудов. В 13 томах. Т. 1. М.: МИФИ. 2000.
3. Михайлов В.Н., Никитаев В.Г., Проничев А.Н., Зайцев С.М. Концептуальная модель автоматизированной обработки изображений зерен // Там же. Ч. 1. М.: МИФИ. 2000.
4. Проничев А.Н. Метод автоматизированного построения границ зерен при обработке изображений микро-структуры керамических материалов // Там же. Т. 1. М.: МИФИ. 2000.

Проничев Александр Николаевич — ведущий инженер кафедры "Компьютерные медицинские системы" Московского инженерно-физического института (государственного университета).
Контактные телефоны: (095)324-82-25, 324-75-54.