

На правах рукописи



Шарыбин Сергей Игоревич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь – 2015

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Столбов Валерий Юрьевич , декан факультета прикладной математики и механики
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Ясницкий Леонид Нахимович , профессор кафедры прикладной математики и информатики ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» кандидат технических наук Вожаков Артём Викторович , директор по информационным технологиям ПАО «Мотовилихинские заводы», г. Пермь
Ведущая организация	ФГБОУ ВПО «Южно-уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.04 на базе ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «6» ноября 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.А. Южаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы в машиностроении резко возросла роль так называемых «функциональных» материалов, отличающихся заданным комплексом эксплуатационных характеристик (прочность, пластичность, электропроводность и т.п.), формируемым за счет применения новых технологий получения материала и/или специальных технологий его дальнейшей физико-механической обработки. Однако при этом возрастает необходимость разработки новых средств автоматизированного контроля качества подобных материалов для анализа сложных зёренных структур на мезо- или микромасштабных уровнях, отвечающих за формирование требуемого комплекса свойств на макроуровне. Это, в свою очередь, приводит к необходимости автоматизации всех этапов контроля качества, особенно при мелкосерийном производстве функциональных материалов.

В настоящее время на большей части промышленных предприятий и лабораторий материаловедения применяется контроль качества продукции, основанный на анализе микрошлифов этой продукции. Он позволяет получать более полную картину о состоянии материала и его свойствах на макро- и микроуровнях. Он также позволяет контролировать соответствие целого спектра физико-механических свойств без проведения отдельных испытаний по каждому из свойств. Но такой подход имеет и имеет серьёзный недостаток – а именно требует привлечения высококвалифицированных экспертов в области материаловедения и физики твёрдого тела. В настоящее время становится очевидным, что для повышения эффективности и объективности идентификации свойств материалов необходимо привлекать подходы, основанные на применении современных математических методов обработки данных и алгоритмов искусственного интеллекта при решении задач классификации и идентификации сложных зёренных структур.

Современный уровень развития средств получения фотографий микрошлифов материалов позволяет проводить исследования структур в оперативном режиме. Совершенствованию методов классификации микроструктур материалов посвящены работы Д.А. Форсайта и Д. Понс. Применение методов искусственного интеллекта для определения свойств материала рассмотрено в работах В.А. Емельянова, С.В. Гонтового. Создание программно-аппаратных комплексов, использующих методы искусственного интеллекта, рассмотрено в работах В.А. Ильинского, Л.В. Костылевой, Н.В. Мартюшева, Е.А. Санталовой. Исследования российских учёных А.А. Чубова, А.В. Яковлева и др. посвящены дальнейшему улучшению методов классификации микроструктур и их реализации в виде программного комплекса. Вместе с тем большинство из существующих методов и программных реализаций могут быть использованы лишь как начальный этап идентификации физико-механических свойств материалов по параметрам их микроструктуры, а все известные подходы предполагают наличие эксперта-металловеда для приведения заключения о свойствах материала. Следует отметить, что в настоящее время недостаточно разработаны алгоритмы идентификации макросвойств, отсутствуют программные

средства автоматизации контроля качества материалов, позволяющие снизить участие человека за счёт применения интеллектуальных средств поддержки принятия решений. Кроме того, основная часть из известных методов затрагивает контроль лишь какого-то одного свойства, а не комплекса заданных физико-механических свойств, что не позволяет их использовать при контроле качества функциональных материалов.

Поэтому актуальным является решение научной задачи, связанной с разработкой новых подходов к идентификации физико-механических свойств функциональных материалов при автоматизированном контроле их качества, основанных на применении принципов инженерии знаний и современных технологиях обработки данных. Реализация этих подходов в рамках автоматизированной системы поддержки принятия решений позволит повысить достоверность и эффективность процесса контроля качества изделий, а также сделает возможным устанавливать соответствие макросвойств материала параметрам его микроструктуры.

Целью диссертации является повышение достоверности и эффективности процесса контроля качества функциональных материалов путём его автоматизации за счёт обеспечения интеллектуальной поддержки принятия решений.

Задачи диссертации. В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

- аналитического обзора существующих методов и программных средств анализа зёренных структур при контроле качества функциональных материалов;
- классификации микроструктур по цифровой фотографии микрошлифа изучаемого материала с помощью алгоритмов интеллектуальной поддержки;
- идентификации параметров микроструктуры по её цифровой фотографии;
- разработки программного обеспечения автоматизации процесса контроля качества изготавливаемых функциональных материалов, задаваемого в виде комплекса их эксплуатационных характеристик.

Объект исследования – процесс контроля качества функциональных материалов по их микрошлифам.

Предмет исследования – средства интеллектуальной поддержки, обеспечивающие повышение эффективности контроля эксплуатационных свойств материалов путем автоматизированного анализа микроструктур по фотографиям микрошлифов.

Методы исследования базируются на теории оптимизации и управления, теории обработки изображений и искусственного интеллекта, математической статистике и вычислительных экспериментах.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в разработке новых средств интеллектуальной поддержки процесса контроля макросвойств материала по его микроструктуре, включающих:

- новый гибридный алгоритм классификации сложных фазовых структур,

отличающийся двухуровневой организацией и меньшей чувствительностью к шумам, поворотам и масштабам изучаемого микрошлифа;

- алгоритм идентификации параметров зёрненной структуры материалов, новизна которого состоит в применении специально разработанных фильтров при определении границ зёрен, что приводит к повышению его точности;
- модель системы автоматизированного контроля качества материалов, основанная на алгоритмах интеллектуальной поддержки принятия решений и отличающаяся методикой построения базы знаний, обеспечивающей непротиворечивость набора правил вывода и устойчивость механизма логического вывода.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. разработанный гибридный алгоритм классификации микроструктур и алгоритм идентификации параметров шлифов металлов и сплавов, базирующиеся на методах интеллектуальной поддержки принятия решений (п. 15 паспорта специальности);
2. разработанные функциональные, архитектурные и структурные модели автоматизированной системы контроля качества (п. 8 паспорта специальности);
3. разработанное программное обеспечение, реализующее модели и методы контроля макросвойств материалов по их микроструктурам (п. 4 паспорта специальности);
4. результаты практической реализации, демонстрирующие повышение эффективности процесса контроля качества функциональных материалов (п.п. 1, 2 паспорта специальности).

Достоверность и обоснованность выводов и результатов работы подтверждаются применением известных научных методов теории оптимизации, обработки изображений и искусственного интеллекта, а также хорошим совпадением теоретических и экспериментальных данных.

Практическая значимость работы заключается в повышении достоверности получаемой информации за счёт учета предыдущего опыта и снижения роли человеческого фактора, а также повышении эффективности процесса контроля качества материалов за счёт существенного снижения времени обработки необходимой информации.

Внедрение результатов работы. Разработанное программное обеспечение автоматизированной системы контроля качества функциональных материалов, включающее модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки, внедрено в практику металлографического анализа лаборатории металлографии НИИ Наносталей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова и используется при создании новых материалов и изделий с заданными эксплуатационными свойствами, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Результаты исследования применяются в учебном процессе Пермского национального исследовательского политехнического университета при преподавании учебных дисциплин «Проектирование интеллектуальных систем

управления производством» и «Интеллектуальные информационные системы» в рамках реализации образовательных программ по направлениям подготовки «Управление в технических системах (уровень магистратуры)» и «Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата)».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах, конференциях и научно-технических сессиях:

Всероссийская конференция «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (г. С.-Петербург, 2012г.), X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (г. Уфа, 2013г), XI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (г. Арзамас, 2014г.), 1-я и 2-я Всероссийские конференции молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления» (г. Пермь, 2013, 2014 гг.), Всероссийское совещание по проблемам управления (г. Москва, 2014 г.), научный междисциплинарный семинар НОЦ ПНИПУ по проблемам управления (г. Пермь, 2014, 2015 гг.).

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, удостоены гранта программы фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка (108 наименований). Общий объём диссертации составляет 162 страницы, в том числе 67 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится описание области применения функциональных материалов, включая металлургический и машиностроительный комплексы. Установлено, что применение функциональных материалов является неотъемлемой частью повышения качества выпускаемой продукции. Приведён типичный процесс контроля качества функциональных материалов, указаны проблемы этого процесса.

Проведён аналитический обзор научных работ и реализованных программно-аппаратных решений в области автоматизации процессов контроля свойств функциональных материалов. Показано, что рассмотренные методы и системы не решают всех поставленных задач.

Определены рамки разрабатываемых моделей контролируемых свойств материалов путём формулирования основных гипотез исследования. Обосновано, что для увеличения эффективности контроля качества функциональных материалов необходимо использовать методы автоматизированной обработки

данных, для чего необходимо разработать средства интеллектуальной поддержки принятия решений, позволяющие переложить накопленный опыт экспертной оценки и анализа микроструктур на компьютер.

Во второй главе рассмотрена задача классификации микроструктур на фотографии микрошлифа изучаемого материала. При этом под классом понимается известный вид микроструктуры, оформленный в виде шаблона фотографии. Для проведения классификации микроструктур на фотографии микрошлифа предполагается применение методов распознавания по образцу с учителем, идея которых заключается в обучении разрабатываемого алгоритма классам, которые он в последствие может распознавать. Входными данными алгоритма является фотография микрошлифа в электронном виде, а также база с шаблонами структур, которым алгоритм был обучен. Выходными данными являются классы, к которым были отнесены структуры, присутствующие на изучаемой фотографии.

При разработке алгоритма предложена двухуровневая схема, которая сначала использует признаковый анализ отдельных образов, а затем – структурный, при котором анализируется микроструктура материала в целом.

При проведении классификации элемент изображения $X(i, j)$ относится к классу O^α :

$$X(i, j) \rightarrow O^\alpha$$

по принципу максимального правдоподобия, если

$$P(O^\alpha | X(i, j)) = \max_{\{\beta=1..A\}} P(O^\beta | X(i, j)),$$

где O – множество всех структур (шаблонов) из обучающей выборки; A – количество элементов множества O ; O^β – элементы множества O , по которым осуществляется проверка правдоподобия; $P(O^\beta | X(i, j))$ – заданная функция правдоподобия; (i, j) – координаты внутри изображения.

Из-за специфики работы алгоритмов распознавания при проведении классификации немаловажную роль играет взаимное расположение (в большей степени поворот) изучаемой фотографии и образцов из обучающей выборки. Для уменьшения влияния этих факторов на качество проводимой классификации предложен подход, в основу которого положен алгоритм подсчёта степени похожести блоков изображений, широко распространённый в задачах (де)кодирования видео. Этот алгоритм считает степень похожести изображений как функцию невязки, именуемую манхэттен-расстоянием.

Предлагаемая модификация этого алгоритма подразумевает задание функции правдоподобия в виде обратной величины от минимума квадрата невязки между изучаемой фотографией и преобразованным шаблоном из обучающей выборки:

$$\hat{P}(X | O^\beta) = SAD^2(X, O^\beta) = \min_M \sum_{i=1}^{width} \sum_{j=1}^{height} (X(i, j) - O^\beta(M \times (i, j)))^2,$$

$$P(O^\beta | X(i, j)) = \frac{1}{\hat{P}(X | O^\beta)}$$

где *width*, *height* – ширина и высота изображений (оба изображения должны быть одинаковой размерности); *M* – матрица аффинного преобразования двумерных координат.

Минимизация функции невязки осуществляется за счёт варьирования коэффициентами матрицы преобразования координат *M*, используя алгоритм оптимизации Левенберга-Марквардта. Для решения проблемы нахождения глобального минимума в разработанном алгоритме минимизация невязки осуществляется несколько раз при различных начальных состояниях матрицы. Заполнение базы шаблонов осуществляется с привлечением эксперта-материаловеда, а выбор шаблона осуществляется таким образом, чтобы на нём была отражена наиболее характерная особенность микроструктуры.

Пример результата работы предложенного алгоритма при анализе шлифа закалённой стали 80P на признаковом уровне приведен на рис. 1. Видно, что алгоритм ошибочно классифицировал небольшие области мартенсита. Однако после структурного уровня анализа изображения эти зоны исчезли из окончательного результата классификации.

Для проверки согласованности результата классификации, проведённого разработанным алгоритмом, с результатами, полученными при ручном анализе шлифа экспертами материаловедов, используется критерий согласия Пирсона:

$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$, где χ^2 – статистика критерия Пирсона, O_i – частота появления класса микроструктуры, подсчитанная по результатам автоматической классификации, E_i – частота появления класса микроструктуры, подсчитанная по результатам анализа микроструктуры экспертом, n – количество различных классов структур на фотографии микроструктуры.

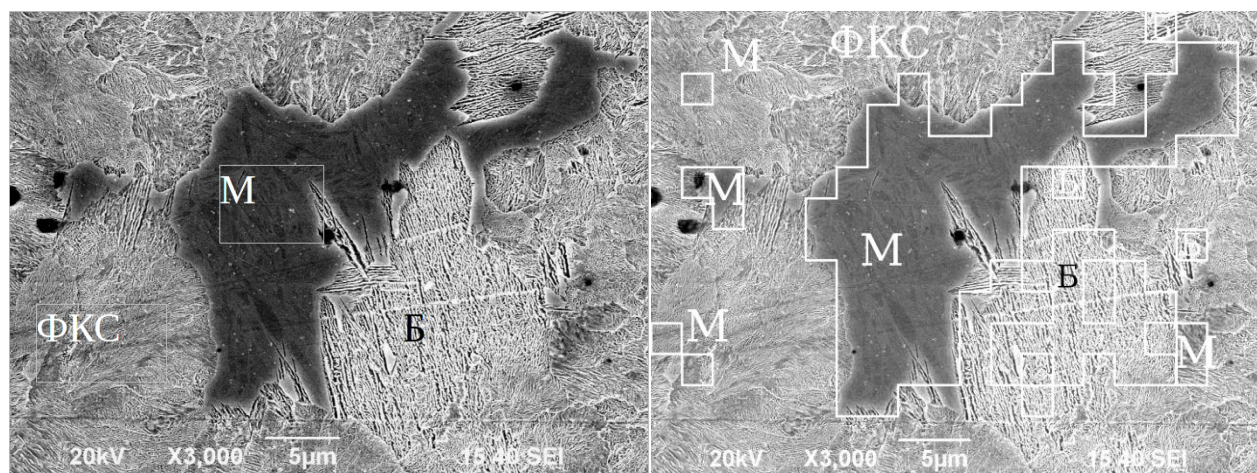


Рис. 1. Результат анализа шлифа экспертом (слева) и разработанным алгоритмом классификации (справа)

Для достижения необходимого размера выборки на небольшом объёме исследуемых фотографий, каждая из них была разделена на 25 блоков (5 разбиений вдоль каждой из сторон). Такое разбиение является корректным, так как алгоритм классификации можно запустить на каждом из таких блоков, тем самым гарантируя независимость классификации каждой из областей. Теоретические и прогнозируемые частоты E_i и O_i в этих областях считаются как площадь, занимаемая соответствующим классом микроструктуры, а области с нулевыми значениями частот игнорируются.

В рассматриваемом на рис. 1 примере на микрошлифе присутствует три различных класса структуры – мартенсит (М), бейнит (Б) и ферритно-карбидная смесь (ФКС). Поэтому критерий согласия применяется независимо по каждому из классов, считая количество испытаний $n=25$. Применяя описанный выше алгоритм верификации, получаем $\chi^2_{расч} = 4.58$, а $\chi^2_{табл} (42) = 28.14$, что позволяет принять гипотезу о том, что автоматическая классификация согласована с результатом анализа экспертами с уровнем доверия 0.05. Это подтверждает достоверность получаемых теоретических данных и возможность применения предложенного алгоритма классификации при автоматизации процесса контроля качества материалов со сложной микроструктурой.

В третьей главе рассмотрен алгоритм идентификации численных параметров микроструктуры материала по её фотографии, заданной в цифровом виде. Этот алгоритм разбит на несколько этапов, выполняемых последовательно: 1.Предобработки фотографии шлифа. 2.Определения границ зёрен. 3.Аппроксимации границ зёрен замкнутыми ломаными линиями. 4.Подсчёта численных характеристик найденных зёрен. 5. Определение других параметров микроструктуры.

На этапе предобработки фотография приводится к виду, наиболее пригодному для её автоматизированной обработки. Сюда включается приведение изображения в пространство градаций серого, выравнивание гистограммы и уменьшение шумов. При этом для преобразования цветного изображения в пространство градаций серого применяются стандартные хроматические коэффициенты. Выравнивание гистограммы изображения необходимо для увеличения контрастности между зёрнами и их границами и осуществляется по известному алгоритму, применяемому в кодировании видео. Применяемый фильтр уменьшения шума основан на стандартном алгоритме, который усредняет значение яркости пикселя со значениями яркости его соседей.

На этапе определения границ зёрен происходит преобразование изображения в вид, наиболее удобный для дальнейшей аппроксимации границ зёрен. Результатом является изображение, на котором границы зёрен представлены кривыми линиями шириной в 1 пиксель (при этом на изображении границ возможны разрывы). Разработанный фильтр основан на алгоритме применения матрицы конволюций с ядром размера 3×3 в виде лапласиана. Этот фильтр основан на подсчёте градиента изменения яркости пикселей в малой окрестности текущего пикселя, и результирующая яркость пикселя пропорциональна величине

этого градиента.

Для аппроксимации границ зёрен ломанными кривыми используется разработанный переборный алгоритм, который заключается в обходе всех пикселей изображения по порядку, и при встрече светлого пикселя начинается поиск замкнутой области. Обход границы происходит итерационным методом, на каждом шаге которого происходит поиск следующего пикселя, на который можно осуществить переход. В качестве возможных альтернатив перехода рассматриваются все соседние светлые пиксели. Если среди соседей не находится светлого, то происходит поиск возможных переходов в области, удалённой от текущего на расстояние 2, а затем и 3 пикселя. Таким образом решается проблема с возможными разрывами границ, возникающих на предыдущих шагах алгоритма.

Если же по-прежнему не находится возможного перехода, то формирование границы прекращается, она замыкается, а замыкающая грань многоугольника маркируется соответствующим образом. После завершения аппроксимации границ многоугольниками происходит объединение тех многоугольников, которые граничат друг с другом помеченными гранями ближе, чем определённое расстояние. Таким образом повышается достоверность определения цельного зерна.

При обходе сохраняются координаты пикселей, которые принадлежат границе и которые позднее используются для подсчёта характеристик зеренной структуры. После завершения работы этого шага алгоритма сформирован массив данных, который описывает все найденные зёрна, представляя их в виде многоугольников. Эти многоугольники используются для оценивания численных характеристик зёрен и других параметров микроструктуры, включая средний максимальный и минимальный балл зерна, плотность распределения зёрен, ориентацию и анизотропию зёрен, межпластинчатое расстояние (для перлитных структур), толщину границ между зёрнами.

Ориентация зерна отождествляется с направлением прямой, проходящей через наиболее удалённую от геометрического центра точку на границе зерна и его геометрический центр. Размер зерна считается по двум направлениям, одно из которых соответствует направлению ориентации зерна, а второе считается ортогональным первому направлению. Для нахождения численных значений размера используется ограничивающий прямоугольник, описанный вокруг зерна и ориентированный по направлению зерна. Анизотропия зерна считается как среднее значение отношения величины зерна вдоль его направления и поперёк. Плотность распределения зёрен считается как отношение суммарной площади зёрен на фотографии к суммарной площади этой фотографии. При анализе неметаллических включений их параметры определяются по яркостным характеристикам. Площадь зёрен определяется волновым методом.

Результат работы алгоритма нагляднее всего виден при анализе балла зерна среднеуглеродистой стали. Результат определения зёрен отображён на рис.2.

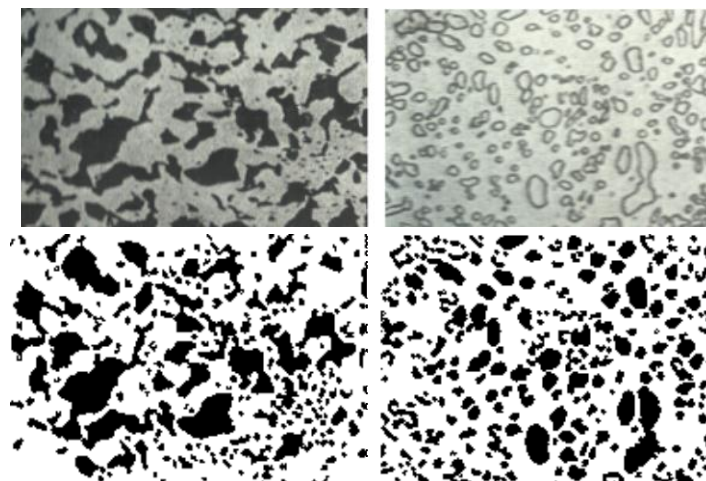


Рис. 2. Входные фотографии микрошлифов (сверху) и зёрна, идентифицированные алгоритмом (снизу)

В качестве примера результата обработки численных параметров зёрен, на рис. 3 приведена гистограмма распределения средних размеров зёрен на рассматриваемом шлифе среднеуглеродистой стали.

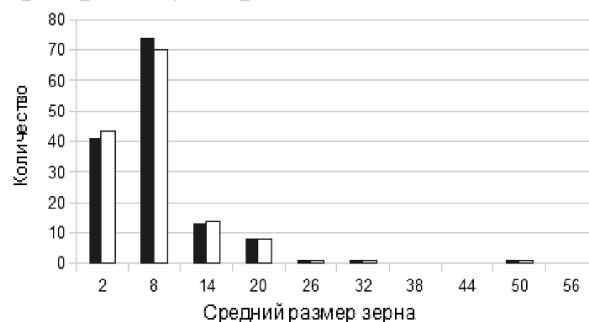


Рис. 3. Гистограмма распределения средних размеров зёрен на шлифе среднеуглеродистой стали (чёрный цвет – данные, полученные расчетным методом, белый – экспертным)

Как видно из представленной гистограммы, данные, полученные расчетным путём коррелируют с данными, полученными экспертным путём. При этом средняя погрешность лежит в пределах 5%, что делает возможным применение разработанного алгоритма на практике.

В четвёртой главе рассмотрена задача разработки средств интеллектуальной поддержки автоматизации процесса контроля качества при производстве функциональных материалов, включающая:

- определение вида и степени неоднородности микроструктуры по заданному набору фотографий микрошлифов, взятых из различных областей исследуемого материала;
- определение численных характеристик этих структур;
- определение набора макросвойств материала, используя результаты первых двух этапов и базы знаний, содержащей знания о том, какие структуры соответствуют заданным эксплуатационным свойствам.

Общий алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений при

автоматизированном контроле представлен на рис. 4. Классификация микроструктур происходит по двухуровневому алгоритму, причем вторая стадия классификации заключается в повышении достоверности результата автоматической классификации за счёт фильтрации заведомо невозможных вариантов (пример: малая область мартенсита окружена ФКС). После классификации фазовой структуры материала происходит идентификация параметров зёрненной структуры. Далее алгоритм контроля производит перебор данных по экспериментам, которым алгоритм был обучен, и сравнивает анализируемый функциональный материал с каждым из них. Если комплексные оценки качества микроструктуры шлифа оказались близки к эталонным, то качество анализируемого материала считается соответствующим заданным требованиям и делается вывод результата. Инициализация механизма логического вывода (МЛВ) происходит на основе анализируемого шлифа и сравниваемого эксперимента.

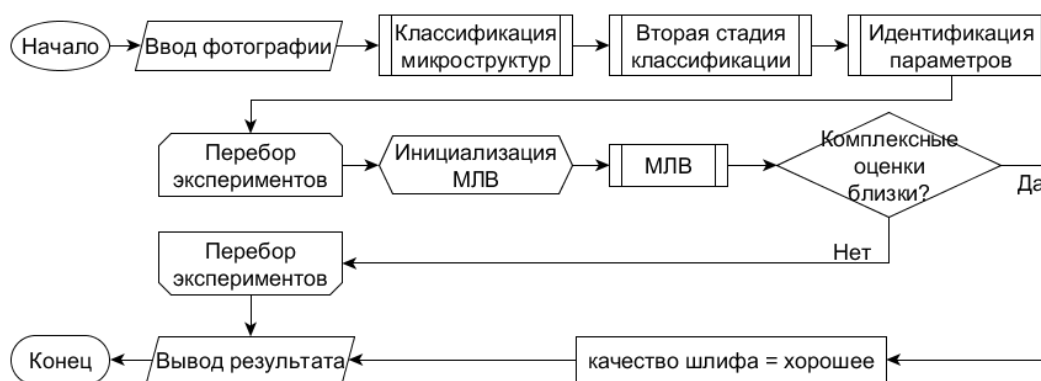


Рис. 4. Общий алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений при контроле микроструктуры функционального материала

Предложенный алгоритм поддержки принятия решений реализован в виде исследовательского прототипа интеллектуальной информационной системы контроля качества функциональных материалов, основанной на знаниях. Следует отметить, что в рамках поставленной задачи использование базы знаний является возможным, так как свойства материала в заданном диапазоне однозначно определяются его мезо- и микроструктурами.

Для представления и обработки знаний в памяти компьютера в рамках разработанного исследовательского прототипа автоматизированной системы контроля качества функциональных материалов применялась продукционная модель, достаточно широко используемая в интеллектуальных системах управления. При этом использовался прямой механизм логического вывода и компонент объяснения, построенный по стандартной схеме и позволяющий осуществлять обмен информацией между компьютером и экспертом. Этот выбор обусловливается тем, что он соответствует процессу рассуждения самого эксперта, что упрощает создание и поддержку базы знаний, а также позволяет осуществлять автоматический контроль непротиворечивости на этапах формирования и пополнения базы знаний. При этом обычно требуемые знания

получают в производственных или исследовательских лабораториях при разработке технологических процессов изготовления того или иного функционального материала.

Помимо самих правил из базы знаний механизм логического вывода использует результат анализа шлифа алгоритмами классификации микроструктур и определения численных характеристик, которые сохраняют результат анализа в рабочей памяти механизма логического вывода.

Разработанный алгоритм автоматизации процесса контроля качества был реализован в виде программного комплекса. Были разработаны структурные, функциональные диаграммы, а также диаграммы классов этого программного комплекса. Структурная схема программного комплекса отображена на рис. 5.

Взаимодействие компонентов классификации микроструктур, идентификации свойств микроструктуры и СППР осуществляется через рабочую память программного комплекса. Таким образом, при подаче фотографии на вход автоматизированной системы вначале производится анализ фотографии компонентами классификации и идентификации параметров изучаемой микроструктуры. После этого управление передаётся механизму логического вывода, который, используя результат анализа фазового состава и зеренной структуры материала, а также правила из базы знаний, формирует заключение о степени соответствия микроструктуры произведенного материала, качество которого подлежит оценке, эталонной микроструктуре, заданной разработчиком материала, а также о физико-механических свойствах материала.

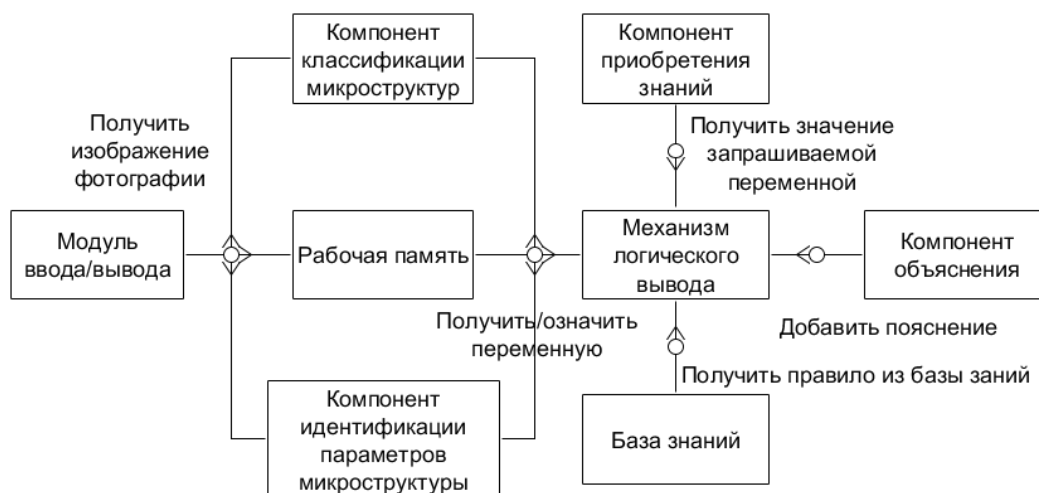


Рис. 5. Структурная схема разработанного программного обеспечения автоматизированного контроля качества функциональных материалов

Для определения свойств материала, помимо правил классического вида в базе знаний хранятся правила, которые позволяют:

- оперировать с диапазонными значениями (то есть посылка правила может проверять принадлежность значения определённому диапазону);
- производить интерполяцию значений (то есть заключение правила может означать значение атрибута результату проведения интерполяции между двумя или несколькими величинами).

Следует отметить, что при проведении интерполяции считается, что все параметры микроструктуры (или иные значения атрибутов, по которым происходит интерполирование) равнозначны. Интерполяция может происходить как линейная, так и по полиному заданного порядка.

Каждое физико-механическое свойство материала с точки зрения базы знаний является выводимой переменной. Таким образом, для определения всего комплекса свойств материала происходит запуск механизма логического вывода по каждому из возможных свойств.

При выводе определённого физико-механического свойства рассуждение ведётся по следующему сценарию: сперва определяется комплекс микропараметров, в наибольшей степени влияющий на макросвойство. После этого происходит интерполяция заложенных на этапе построения базы знаний результатов экспериментов на значение определённого комплекса микропараметров.

Применение разработанной системы автоматизированного контроля рассмотрено на примере процесса закалки стали 80P для получения высокопрочной арматуры (состоит из одного цикла закалки, комплекс характеристик зависит от скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения). Фотографии микрошлифов были получены в лаборатории металлографии НИИ Наносталей Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Таблица 1

№	Твёрдость (эксперимент), HV ₃₀	Твёрдость (расчёт), HV ₃₀	Расхо- жение, %	Ударная вязкость (эксперимент) (Дж/см ²)	Ударная вязкость (расчёт) (Дж/см ²)	Расхо- же- ние, %
1	345	342	1	39.1	40.6	4%
2	407	403	1	47.4	48.8	3%
3	412	415	1	55.7	57.1	3%
4	436	420	3.8	58.5	59.9	2%
5	469	450	4.2	64.0	65.4	2%
6	554	550	1	55.7	57.16	2%
7	517	495	4.4	50.1	51.64	3%

Результаты сравнения расчетных свойств материала с экспериментально полученными макросвойствами представлены в табл.1. Как видно из этой таблицы, результаты расчета с использованием автоматизированной системы хорошо коррелируют с экспериментальными данными, при этом погрешность не превышает 5%, что делает возможным применение разработанных средств на практике.

В заключении приведены основные результаты исследований и сформулированы основные выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ методов и средств контроля качества выпускаемой продукции при изготовлении функциональных материалов. Установлено, что теоретическая база идентификации макросвойств материалов на основе обработки данных и классификации микроструктур разработана не в полной мере и требует существенной доработки, включая совершенствование алгоритмов распознавания образов и интеллектуальной поддержки принятия решений.

2. Разработан гибридный 2-хуровневый алгоритм классификации микроструктур на шлифах металлов и сплавов, базирующийся на признаковых и структурных методах интеллектуального анализа образов и отличающийся меньшей чувствительностью к шумам, поворотам и масштабам изучаемого микрошлифа, что обеспечивает заданную точность. На основе статистических данных показано, что при заданной точности разработанный алгоритм позволяет классифицировать микроструктуру в среднем в десять раз быстрее опытного эксперта-металловеда, что позволяет снизить влияние человеческого фактора и повысить производительность труда при процессе контроля качества материалов.

3. Разработан алгоритм идентификации параметров зеренной структуры материала, позволяющий определять границы зерен и вычислять их основные характеристики. На основе построенной базы знаний, связывающей параметры микрошлифа материала с его физико-механическими свойствами, разработан механизм логического вывода, позволяющий решать задачу идентификации эксплуатационных характеристик функционального материала.

4. Разработаны функциональная, архитектурная и структурная схемы исследовательского прототипа автоматизированной системы контроля физико-механических свойств металлов и сплавов, а также создано программное обеспечение, реализующее предложенные алгоритмы контроля макросвойств металлов и сплавов по их микроструктурам. Проведенные испытания исследовательского прототипа автоматизированной системы контроля на примере процесса закалки стали 80P для получения высокопрочной арматуры показали высокое совпадение с экспериментальными данными, что доказывает возможность ее применения в производственных условиях. По комплексному показателю эффективности за счет повышения скорости обработки данных при обеспечении гарантированной точности получаемого результата анализа микроструктур разработанные средства контроля качества превосходят известные человеко-машинные системы в среднем на 15%, что позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели исследования.

Основные публикации по теме диссертационной работы

В рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Шарыбин С.И., Клюев А.В., Столбов В.Ю. Сравнение методов распознавания образов в задачах поиска характерных зерновых микроструктур на фотографиях шлифов металлов и сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – №9. – С. 49-53.

2. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. Идентификация параметров сложной зерновой структуры металлов и сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2013. - № 3. - С. 34-38.
3. S. I. Sharybin; A. V. Klyuev; V. Yu. Stolbov. Complex grain structure of metals and alloys // Steel in Translation. 2013 (v.43, #5). pp. 245-248.
4. Шарыбин С.И. Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Барышников М.П. Разработка интеллектуальной системы распознавания сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов // Нейрокомпьютеры, разработка, применение. - 2014. - №12. – С. 50-56.

Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015615776 «Исследовательский прототип программного комплекса по автоматизации процессов контроля качества при создании функциональных материалов («SteelAnalyzer»))» / С.И. Шарыбин, В.Ю. Столбов. Заяв. 22.05.2015. М.: Роспатент, 2015.

В других изданиях

6. Шарыбин С.И., Ключев А.В. Идентификация параметров сложной зерновой структуры металлов и сплавов // Материалы Всероссийской конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» – С. Петербург: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 499-502.
7. Шарыбин С.И. Автоматизация процессов анализа и классификации сложных мезоструктур металлов и сплавов // Материалы 10-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» Т3. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2013. С. 322-226
8. Шарыбин С.И. Система поддержки принятия решений при анализе зёренных структур металлов и сплавов // Материалы 1-й Всероссийской конференции молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления», Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013.
9. Шарыбин С.И., Столбов В.Ю. Система распознавания сложных мезоструктур металлов и сплавов // Материалы XII всероссийского совещания по проблемам управления, Москва: ИПУ РАН, 2014. С. 8489-8497.
10. Шарыбин С.И., Столбов В.Ю. Автоматизация процесса контроля качества продукции при создании функциональных материалов // Материалы 11-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» Т3. – Арзамас: Изд-во НГТУ, 2014. С. 886-898.
11. Шарыбин С.И., Столбов В.Ю. Об одном подходе к решению задачи анализа и классификации сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов // Прикладная математика и вопросы управления. - 2015. - №1. - С.89 -99.