
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 001.89: 004.93: 621

**АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ
НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ**© 2020 г. В. Ф. Безъязычный¹, И. Н. Паламарь^{1,*}, Н. С. Азиков²¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
Рыбинск, Россия² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: irina.palamar@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Рассматривается подход к решению проблемы анализа изображения сложно формализуемых структур материалов ответственных деталей. Предложены методологические основы автоматизации исследования структуры материала, обеспечивающей оценку заданных эксплуатационных свойств деталей, на основе управляемого создания функциональных систем. Разработаны методы оценки структур материалов, формируемых различными технологическими процессами.

Ключевые слова: методологический подход, автоматизация анализа структуры материала, обработка изображения, модель функциональной структуры, управляемая функциональная система, сложная неопределенная структура

DOI: 10.31857/S0235711920040021

В связи с повышением требований к высокотехнологичным изделиям машиностроения по условиям эксплуатации, таких как высокие температуры, агрессивные среды, статические и динамические нагрузки, необходимо создавать их детали со специальными свойствами поверхностей. Как показывает практика производства, эксплуатации и ремонта ответственных деталей машин перспективными являются наукоемкие технологии создания поверхностей деталей со специальными свойствами. Особое внимание уделяется функциональным материалам, обладающим определенным и возможно задаваемым уровнем физико-химических и механических свойств, обеспечивающим заданные эксплуатационные свойства. Формирование определенных свойств детали (прочность, жаростойкость, циклическая долговечность и т.п.) осуществляется разработкой соответствующих технологических процессов для обработки таких материалов, а также контроля качества их выполнения.

Анализ состояния проблемы. Поскольку исследуемые свойства деталей в значительной степени определяются структурой материала поверхностного слоя, все современные исследования технологий обработки материалов и их поверхностей опираются на анализ изображений структур на макро-, мезо- и микромасштабных уровнях. В работе [1] исследуются методы анализа изображений изломов на основе сегментации с помощью адаптивных моделей скрытого Марковского дерева и многомасштабного Марковского поля. По изображениям оценивается отношение площади усталостной зоны к площади зоны долома, которое считается мерой величины циклических напряжений, обуславливающих разрушение. Однако методами сегментации выделяются только зоны с различной текстурой, а анализ сложной топологии структуры не произво-

дится. В работе [2] рассматривается методика анализа выделения только контурных изображений по линейчатым структурам, предназначенная для выявления и последующей классификации дефектов микроструктур. Связей между сложной структурой и способами ее получения не устанавливается. Несмотря на возможности методов машинного зрения по анализу изображений в различных областях, существуют проблемы по их практическому применению для анализа сложных структур материалов, формируемых различными технологическими процессами по достижению определенных свойств изделий. Анализ структур с учетом особенностей материалов и техпроцессов их обработки выполняется вручную экспертами высокой квалификации.

Важным этапом исследований является установление связей параметров структуры материала с эксплуатационными свойствами деталей. Существующие методы оценки эксплуатационных свойств можно разделить на следующие группы: численные методы, статистические методы, нейронные сети, методы искусственного интеллекта и нечетких множеств, методы машинного обучения. В работе [3] исследованы методы автоматизированного построения моделей прогноза механических свойств сплавов, применение которых в системе анализа изображений структуры материала позволяет проводить комплексную оценку качества сплавов на основе классического метода построения регрессионных моделей. В работе [4] анализ сложных микроструктур выполняется путем классификации на основе дискриминантного подхода с использованием нечеткой меры близости параметров структуры и комплексом физико-механических свойств. В автоматизированных системах анализа сложных микроструктур используется создание баз знаний с продукционным выводом. Например, для установления связей параметров зеренно-фазовой структуры и эксплуатационных характеристик функционального материала выполняется построение метрик, формируемых в виде правил, которые сохраняются в экспертной системе [5]. Данные метрики используются для контроля качества. На основе анализа объема фаз, а также значений параметров: средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна и степень анизотропии зерен, выполнялось оценивание прочности с помощью автоматизированной интеллектуальной системы. Оценка параметров структуры по изображению выполняется с помощью стандартных средств обработки изображений и не связана с особенностями исследуемой структуры.

Существует разрыв между потенциальными возможностями методов анализа изображений и обработки данных и результатами их применения в промышленности для автоматизации операций.

Постановка задачи и предлагаемый методологический подход. Анализ технологий изготовления деталей показал, что совершенствование их свойств с целью достижения требуемого качества, включает в себя исследование структуры ее функциональных частей, однако связи количественных характеристик структуры с качественным экспертным описанием и параметрами технологических процессов не устанавливается, хотя имеются тенденции по применению моделей искусственного интеллекта для решения отдельных задач. Подлежащие анализу структурные элементы являются неопределенными, что осложняет автоматизацию контроля качества структуры по изображению. Достижение заданных свойств детали осуществляется путем формирования определенной структуры за счет организации соответствующего технологического процесса [6, 7].

В работе [8] рассматривается поверхность детали как система для установления корреляционных связей между параметрами качества поверхности и методами их анализа, режимами технологических операций и эксплуатационными свойствами с целью оптимизации технологического процесса изготовления детали. При решении этих задач возникает ряд трудностей методического, информационного и технологического плана.

В качестве методологической основы для решения поставленной проблемы используются концепции функциональной адаптации и функциональной прозрачности, изложенные в работе [9]. В соответствии с концепцией функциональной адаптации должна обеспечиваться настройка сетевой модели структуры к особенностям функционирования объекта, его изменению в процессе жизненного цикла и влиянию различных внешних факторов через обучение и самоорганизацию структуры. Данные концепции использованы при разработке методов автоматизированной и автоматической обработки данных структуры материала и поверхности с применением теории анализа изображений, сигналов и машинного обучения. В соответствии с аспектами рассмотрения сложной структуры материала предложены понятия функциональной структуры и функциональной системы. Введено понятие функциональной структуры высоконагруженной детали, включающей структуру поверхности, материала поверхностного слоя и основного материала и обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства.

В контексте рассматриваемой проблемной ситуации перейдем от понятия функциональной структуры к понятию функциональной системы, назначением которой является интерпретация и обобщение результатов анализа функциональной структуры, под которой будем понимать совокупность методов, позволяющих организовывать представление и интерпретацию изображения структуры материала в виде функциональной структуры детали. Целевым результатом создания структуры детали являются заданные эксплуатационные свойства детали, а результатом анализа структуры является выявление и оценка структурных элементов материала, влияющих на требуемые характеристики детали. Структура функциональной системы, обеспечивающей формирование функциональной структуры, представлена на рис. 1. Данная модель является базовой для разработки методов, реализующих методологию перехода от растрового представления изображения к представлению формализованных описаний структуры. В центре системы находится функционально прозрачная модель технического состояния структуры материала детали. Исходными данными для формирования модели являются: технология производства или ремонта детали; структурные элементы, определяющие исходное текущее состояние структуры, характерное для выбранной технологии; экспертные знания о параметрах структуры и их связи с эксплуатационными показателями.

Решение проблемы совершенствования технологических процессов, связанных с анализом изображений неопределенной структуры в процессе ее модификации, предлагается на основе методологии анализа функциональной структуры, которая определяет ее функциональные свойства: прочность, жаропрочность, жаростойкость, устойчивость к коррозии и т.п. Рассмотрим примеры разработки функциональных систем анализа структуры по изображению в соответствии с предложенной методологией для технологий монокристаллического литья и дробеструйного упрочнения.

Реализация методов анализа структуры для различных технологических процессов. Монокристаллическое литье. Параметрами, определяющими жаропрочность и жаростойкость сплава, является объем γ' -фазы ($V_{\gamma'}$) и ее морфологические характеристики [10]. Такой анализ является не только сложным и трудоемким, но и требует высокой квалификации оператора. Изображения шлифа монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с различным содержанием γ' -фазы при одинаковом масштабе представлены на рис. 2а, 2б.

Для структуры характерно наличие множества фазовых составляющих с различной яркостной компонентой. В способ автоматической сегментации изображения введена локальная корректировка яркости для каждого отдельного элемента структуры [11]. Автоматическое вычисление яркостного среза для каждого отдельно взятого элемента позволяет точно выделить границы, независимо от множества других элементов фазо-

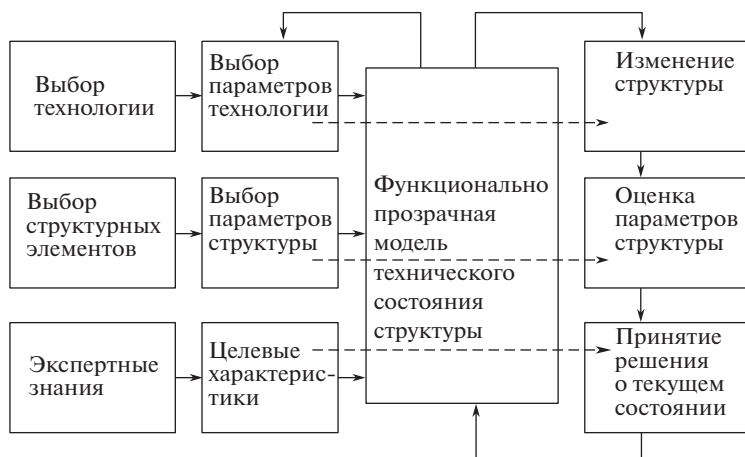


Рис. 1. Схема функционально прозрачной системы технического состояния структуры.

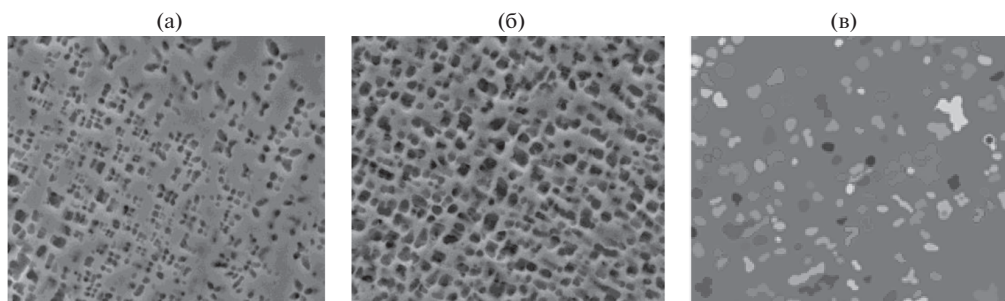


Рис. 2. Примеры шлифов монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с различным объемным содержанием γ' -фазы (а), (б) и результат сегментации (в) изображения шлифа (б).

вых составляющих. Вычисление локального яркостного среза для корректировки границ отдельного элемента происходит по формуле

$$Y' = Y_{\text{back}} - (Y_{\text{back}} - (Y_{\text{avgSeg}} + dY)) \cdot k_d,$$

где Y_{back} – усредненная яркость фона; Y_{avgSeg} – усредненная яркость исследуемого элемента фазовой составляющей; dY – яркостная разница с элементом фазовой составляющей, признанным эталонным для данного шлифа; k_d – коэффициент разницы яркостной составляющей фона от яркости текущего элемента фазовой составляющей.

Данный подход позволяет использовать корректировку совместно с различными способами сегментации. Все области интереса преобразуются таким образом, что появляется эталонная глобальная яркость, вычисленная на основе эталонного элемента. Она отделяет фон от γ' -фазы на всем изображении. С другой стороны, границы для определения γ' -фазы четко выделяются относительно фона, что позволяет без значительных затрат определить с высокой точностью каждый структурный элемент, если требуется проанализировать не только объемное содержание, но и, например, оценить мисфит. Результат сегментации изображения шлифа (рис. 2б) представлен на рис. 2в. Статистическая оценка точности метода по автоматическому определению

объемного содержания γ' -фазы показала величину отклонения 0.46% от экспертной оценки.

Дробеструйное упрочнение. В процессе дробеструйного упрочнения поверхности детали происходит формирование характерного рельефа поверхности, особенности которого определяют качество полученного поверхностного слоя. Визуальный и вербальный анализ качества дробеструйной обработки поверхности проводится как при изучении влияния параметров обработки, так и при контрольных операциях в процессе производства. В зависимости от цели обработки применяется классификация или описание особенностей поверхности. Классификация в основном бинарная по виду “приемлемо – неприемлемо”, что позволяет получить приблизительную оценку качества поверхности. Более точную характеристику рельефа можно получить, применяя специальную терминологию. На основе анализа технологии были выделены характеристики, описывающие особенности получаемой поверхности в результате применения различных параметров технологического процесса: микрорельеф равномерный/неравномерный; микрорельеф регулярный/нерегулярный; выступы (риски) острые и быстро утолщаются по глубине; улучшение микрорельефа (увеличение радиусов впадин) за счет отсутствия рисок; надрезы, глубокие риски; выступы скругляются по большому радиусу; складки; степень покрытия.

Однако такой анализ является качественным и не позволяет оценить степень влияния определенных особенностей микрорельефа на эксплуатационные показатели. Приведенные характеристики не имеют формализованного описания. Для получения параметров структуры материала необходимо выделить характерные структурные элементы на изображении, найти их числовые оценки и получить описание структуры, пригодное для автоматизации получения экспертного заключения о качестве поверхности.

В результате физических процессов, связанных с дробеструйной обработкой, исследуемые изображения обработанной поверхности имеют гетерогенную сегментную структуру, характеризуемую наличием сегментов, выделяемых по яркости, текстуре и контурам, и их устойчивыми сочетаниями. Исходными данными для анализа является множество пикселей изображения. Предварительно выполняются операции улучшения изображения (цветовая коррекция, сглаживание и т.п.). В процессе сегментации пиксели группируются в топологически связанные однородные сегменты в соответствии с предикатом гомогенности H . Для гетерогенной сегментной структуры предикат гомогенности сегмента S_i можно представить, как совокупность взвешенных предикатов по частным факторам гомогенности

$$H(S_i) = (v_f H_f | f = 1, \dots, F),$$

где v_f – весовой коэффициент значимости частного фактора гомогенности f ; F – количество факторов гомогенности.

Каждый фактор гомогенности f , формирующий частный предикат гомогенности H_f , характеризует сегменты изображения по одному из информационных признаков: яркости (цвету), текстуре и контурам.

Для оценки качества обработки поверхности необходимо скомбинировать методы обработки изображений для обнаружения смысловых структурных элементов и подобрать параметры, обеспечивающие эффективное выделение яркостных, текстурных и контурных составляющих. Учитывая то что, зрение опирается на контурную информацию, к исходному изображению применяется фильтр Габора, импульсная переходная характеристика которого определяется в виде гармонической функции, помноженной на Гауссиан.

Для анализа поверхности металла в работе [12] выделены следующие характеристики: количество больших сегментов; средний угол наклона сегментов; разнонаправленные/однонаправленные сегменты; максимум вероятности элементов матрицы

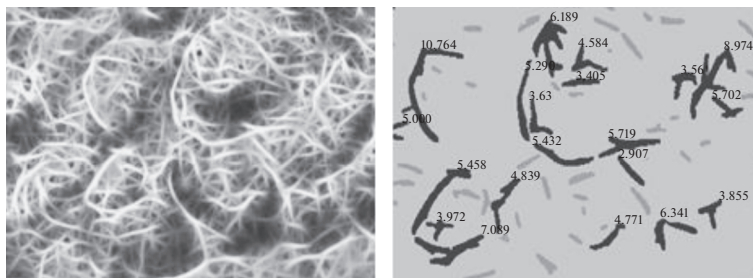


Рис. 3. Результат обработки и оценки параметров элементов структуры: результат выделения контуров (слева), результат сегментации (справа).

совместной встречаемости; момент порядка k разности элементов матрицы совместной встречаемости; обратный момент разности элементов k -го порядка матрицы совместной встречаемости; однородность по матрице совместной встречаемости; энтропия по матрице совместной встречаемости. Результат обработки изображения структуры представлен на рис. 3. Выделенные сегменты дифференцируются на три группы по площади, вычисляемой автоматически по изображению. Контур и особенности текстуры выделены фильтром Габора.

Рассматривая только большие сегменты, формирующие основной рисунок текстуры, находим для каждого сегмента угол наклона, определяемый по описывающему прямоугольнику, и считаем количество больших сегментов. Вычисляем математическое ожидание углов наклона сегментов. Далее вычисляем дисперсию углов, используя величины угла наклона сегмента и его математического ожидания, на основе чего принимается решение, являются ли выделенные сегменты однонаправленными или разнонаправленными.

Вербальные описания образцов, полученные на основе вычисленных значений параметров по изображению, согласуются с результатами описания качества обработки отдельных зон деталей, выполненных экспертами на производстве путем визуального осмотра в соответствии с существующими методиками сопоставления с образцами.

Как показали эксперименты, анализ изображений поверхности материала детали позволяет автоматически оценивать качество дробеструйной обработки с вычислением показателей, соответствующих вербальным оценкам. В связи с этим результаты работы можно использовать для автоматизации процесса оценки качества поверхности металла после дробеструйной обработки и подбора параметров техпроцесса.

Были исследованы также методы обработки: ионно-плазменная обработка, обработка давлением и другие. Разработанные модели и методы обеспечивают решение трудно формализуемых задач анализа структуры, получение их числовых и вербальных оценок, формирование классификаторов характерных изображений с аннотациями, что позволяет связать вид структуры поверхности со значениями эксплуатационных показателей.

Выводы. Предложенная модель представления данных, на которой основаны разработанные методы анализа вариантных структур материалов, обеспечивает адаптацию как к растровым данным, отражающим особенности структур в конкретном технологическом процессе, так и адаптацию модели для оценки параметров структуры, что повышает эффективность анализа для решения задач широкого класса. Разработанная обобщенная модель функциональной системы на основе предложенных концепций функциональной адаптации и функциональной прозрачности, позволяет реализовать целенаправленное изменение параметров технологического процесса для до-

стижения требуемых эксплуатационных показателей высоконагруженных деталей ГТД, определяемых соответствующей структурой материала.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жизняков А.Л., Садыков С.С. Автоматическая сегментация металлографических снимков / Труды международного симпозиума “Надежность и качество”, 2010. Т. 1. С. 109.
2. Орлов А.А., Антонов Л.В. Методика анализа микро- и наномасштабных снимков промышленных изделий, ее реализация и применение // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2012. № 4 (22). С. 79.
3. Чубов А.А. Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур: Дис. ... канд. техн. наук 05.13.06.
4. Ключев А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Об одном подходе к решению задачи дискриминантного анализа микроструктур функциональных материалов по комплексу физико-механических характеристик // Прикладная математика и вопросы управления. 2016. № 4. С. 63.
5. 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.
6. Marquez-Herrera A., Fernandez-Munoz J.L., Zapata-Torres M. et al. Fe2B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance. // Surface and Coatings Technology. 2014. V. 254. P. 433.
7. Bayati, M.R. Surface alloying of carbon steels from electrolytic plasma [Text] / M.R. Bayati, R. Molaei, K. Janghorban // Metal Science and Heat Treatment. 2011. V. 53. P. 91.
8. Мухин В.С. Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД. М.: Наука, 2005. 296 с.
9. Паламарь И.Н. Совершенствование технологических процессов изготовления высоконагруженных деталей ГТД на основе анализа функциональной структуры // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 336.
10. Epishin A. X-ray reflections from the γ/γ' - microstructure of nickel-base superalloys: effect of the plane tilting / A. Epishin, U. Brückner, T. Link, B. Fedelich // Intern. J. Mater. Research (formerly Z. Metallkd.). 2010 V. 101 № 5. P. 589.
11. Паламарь И.Н. Автоматический анализ структурно-фазового состава монокристаллического жаропрочного никелевого сплава по изображению шлифа / И.Н. Паламарь, К.А. Рыбаков // Международный технологический форум “Инновации. Технологии. Производство”: Сборник материалов научно-технической конференции к 100-летию со дня рождения главного конструктора П.А. Колесова. Рыбинск, 2015. Т. 1. С. 54.
12. Паламарь И.Н. Формализация вербальных оценок качества дробеструйной обработки на основе анализа изображений поверхности металла / И.Н. Паламарь, М.Л. Первов // Упрочняющие технологии и покрытия. Москва. 2019. Т. 15. № 2. С. 65.