

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет»

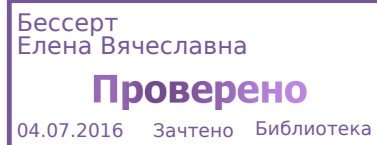
На правах рукописи

Катунцева Наталья Леонидовна

**Математическое моделирование структурных изменений при  
лазерном воздействии на поликристаллические материалы**

Направление подготовки  
22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**



2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет»

**Научный руководитель**

доктор технических наук  
Ким Владимир Алексеевич

**Рецензент**

Защита состоится «29» июня 2016 года в 9 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2

Автореферат разослан 24 июня 2016 г.

Секретарь ГЭК

А.А. Шпилева

Лазерное воздействие на поликристаллические материалы проявляется в первую очередь как мощный тепловой источник, инициирующий развитие высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения, которые определяют кинетику неравновесных структурных превращений. Поверхностные структуры, возникающие при лазерной обработке, характеризуются высокой плотностью дефектов кристаллического строения, связаны с образованием таких химических соединений и структурных вариаций, которые не могут возникать в традиционных металлургических процессах и технологиях термической и деформационной обработок. Такие структуры формируются по синергетическим алгоритмам в неравновесных термодинамических условиях, и им присуще упорядоченность на одних масштабных структурных уровнях и высокая степень неоднородности на других. Особенность строения подобных структур обеспечивает уникальность их физико-механических и функциональных свойств, которые определяют перспективы развития инновационного материаловедения.

Для анализа строения, моделирования и прогнозирования физико-механических свойств упрочненных и модифицированных структур, сформированных в неравновесных условиях взаимодействия материалов с концентрированными потоками энергии, традиционные металлографические показатели не отражают в полной мере их структурную организацию, теряют свою эффективность в первую очередь с информационной точки зрения. Развитие мультифрактальных методов параметризации в значительной мере устраняет многие информационные проблемы описания неравновесных и неоднородных структур материалов и упрощает их моделирование.

В основе мультифрактальной параметризации строения материала лежит представление о его многоуровневой организации, которое можно представить в виде комплексного множества структурных количественных показателей, состоящего из подмножеств разных масштабов. Само множество и подмножества обладают фрактальностью, при этом для описания подмножеств высоких масштабных уровней используются свои

фрактальные показатели, которые в совокупности представляют мультифрактальные параметры.

Для расчета фрактальных и мультифрактальных параметров вводится понятие меры, под которым понимают какую-либо количественную характеристику, отражающую структурное строение или свойство объекта. Тогда исследуемый объект представляется как совокупность мер, объединенных в единое множество и погруженное в какое-либо пространство. Мерность самого пространства и физический смысл каждой координаты определяется природой объекта, но для определения мультифрактальных параметров пространство интерпретируется как геометрическое или евклидовое. Множество мер делится на подмножества, каждое подмножество в свою очередь делится на подмножества более высокого ранга и т.д.

Меры представляются в относительных величинах, с помощью которых можно рассчитывать вероятностные кривые распределения в зависимости от характеристического размера ячеек дробления евклидового пространства. В качестве мер для вычисления фрактальных и мультифрактальных параметров структуры материалов можно использовать количество микроструктурных объектов на единичной площади металлографического шлифа, размер зерен, их площадь и длину периметра границ, уровень темно серого оттенка и т.п.

Из всего вышесказанного следует актуальность, обусловленная необходимостью развития основных аспектов математического моделирования, как одного из основных способов теоретического исследования лазерного воздействия на поликристаллические материалы.

#### **Целью работы является:**

Разработка количественных соотношений между кинетическими и структурными параметрами материала и режимами импульсной лазерной обработки и оптимизация режимов для повышения поверхностной прочности и износостойкости.

**В работе решены следующие задачи исследования:**

1. Изучение и анализ выполненных работ по физике и технологии лазерной обработки металлических материалов.

2. Изучение современных методов исследования структуры и физико-механических свойств материалов.

3. Изучение количественных показателей структурной организации поликристаллических материалов и элементов компьютерной металлографии.

4. Исследование структурных превращений при лазерной обработке металлических материалов с использованием методов компьютерной металлографии.

5. Исследование микротвердости и износостойкости поверхностей, обработанных лазерным воздействием.

6. Разработка математических соотношений между характером изменения микроструктуры материала при импульсном лазерном воздействии.

7. Разработка математической модели лазерной обработки поликристаллических материалов.

8. Оптимизация режимов лазерной обработки по различным критериям оптимизации.

**Научная новизна:** Выполнен анализ структурной организации материала в помощью мультифрактальных спектров.

Выполнен анализ структурных превращений при лазерном упрочнении и локальном легировании.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования:** Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность сданными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с

соблюдением критериев достоверности измерений.

**Практическая ценность:** Разработанные модели и вычислительные алгоритмы предназначены и могут использоваться для исследования различных неравновесных процессов и состояний в конденсированных средах.

**На защиту выносятся следующие положения:** Связь между упорядоченностью и периодичностью структуры с комплексными показателями, вычисляемые по мультифрактальным спектрам.

**Личный вклад автора:** Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, экспериментальные исследования, а также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены лично автором. Электронно-микроскопические исследования и методы металлографического анализа проведены автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем.

Приведенный в работе расчет и анализ мультифрактальных размерностей дает право сделать следующие заключения:

1. Спектр мультифрактальных размерностей, вычисляемый по цифровым изображениям микроструктуры материала, позволяет анализировать с высокой степенью достоверности такие структурные превращения, которые невозможно идентифицировать никакими традиционными методами количественной металлографии. Математическая теория фракталов и мультифракталов раскрывает физическую связь между отдельными компонентами мультифрактального спектра и структурно-энергетическим состоянием материала, как системы количественных мер в евклидовом пространстве.

2. Установлено, что с повышением энергии лазерного воздействия все компоненты спектра мультифрактальных размерностей уменьшаются,

подтверждая, что структуры, сформированные при воздействии на материалы высококонцентрированных потоков энергии, обладают больше свободной энергией или химическим потенциалом. Величина химического потенциала в свою очередь определяет микротвердость и некоторые прочностные свойства материала.

3. Экстремальный характер измерения микротвердости от энергии лазерного воздействия указывает, что на формирования модифицированной поверхностной структуры оказывают влияние, как минимум два конкурирующих процесса: генерация дефектов кристаллического строения и их деградация.

Деградацию упроченной структуры можно выявлять по изменению комплексных мультифрактальных показателей, таких как  $\Delta_{40}$  и  $\alpha_{40}$ , отвечающих за структурную упорядоченность, периодичность и устойчивость. Изменение этих показателей фиксируется значительно раньше, чем количественные металлографические характеристики.

Для многих стало очевидно, что старые, добрые формы евклидовой геометрии сильно проигрывают большинству природных объектов из-за отсутствия в них некоторой нерегулярности, беспорядка и непредсказуемости. Может быть в будущем новые идеи фрактальной геометрии помогут нам изучить многие загадочные явления окружающей природы. В настоящее время фракталы и мультифракталы стремительно вторгаются во многие области физики, биологии, медицины и т.д. Методы обработки изображений и распознавания образов дают возможность применить этот математический аппарат для количественного описания объектов и структур. Язык фрактальной геометрии, в частности, необходим при моделировании свойств поверхности твердых тел.

Польза концепции фракталов со временем становится все более несомненной, и может быть, именно на этом пути нас ждут новые и интересные открытия в будущем.