На правах рукописи

Золотарева Светлана Валерьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ УРОВНЯХ

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

Научный руководитель:

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВО «КнАГУ»

Официальные оппоненты: Коротаев

Дмитрий Николаевич, доктор технических профессор наук, кафедры проектное управление «Экономика ФГБОУ строительстве» BO транспортном «Сибирский государственный автомобильнодорожный университет», г. Омск

Дворник Максим Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ФГАОУ ВО ДВФУ), г. Владивосток

Защита состоится «24» мая 2019 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201, корпус 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ BO «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на официальном сайте организации www.knastu.ru. Отзывы на автореферат в подписанные гербовой экземплярах, заверенные двух И организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н Moure

Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Надежность работы деталей машин и оборудования в значительной степени определяется состоянием материала. Структурные изменения при производстве материала, изготовлении из него изделия и его эксплуатации связаны с взаимодействием материала с энергетическими потоками различной природы. В большинстве случаев такое взаимодействие протекает в неравновесных условиях и связано с развитием диссипативных структур. Отличительной особенностью диссипативных структур является высокая плотность активных источников, генерирующих дефекты кристаллического строения и высокая подвижность самих дефектов.

Диссипативные структуры относятся к динамическим и могут существовать только в неравновесных условиях взаимодействия материала с энергетическими потоками. При взаимодействии материала энергетическими диссипативные являются потоками структуры динамическими. После завершения энергетического воздействия диссипативные структуры превращаются в статические, теряя свою функциональность динамическую диссипативную И структурную организацию. Тем не менее, организация динамических диссипативных структур наследственно сохраняется и отражается в микроструктуре в статическом состоянии.

Сигналы акустической эмиссии (АЭ), генерируемые материалом при воздействии на него различными видами энергий, характеризуют динамическую диссипативную функциональность, связанную с динамикой носителей пластической деформации, а показатели, рассчитываемые по изображениям микроструктуры, отражают статическое состояние материала.

В процессе эксплуатации материал подвергается, как правило, деформационно-термическому или контактно-фрикционному воздействию. Этот процесс также носит неравновесный характер и приводит к развитию вторичных диссипативных структур. Динамические диссипативные свойства материала во многом будут зависеть от строения первичной диссипативной структуры.

Установление связи между параметрами, зарегистрированных сигналов, АЭ и количественными показателями изображений микроструктур является актуальной задачей. Решение этой задачи раскрывает механизмы наследственности диссипативных структур и позволяет прогнозировать свойства материала в процессе эксплуатации.

Степень разработанности:

Различным аспектам теории и практики метода АЭ посвящены работы: В.Н. Белова, Г.А. Бигуса, А.Е. Андрейкива, В.М. Баранова, В.С. Бойко, Л.Р. Ботвиной, С.П. Быкова, В.В Болотина, С.И. Буйло, К.Б. Вакара, В.А. Грешникова, О.В. Гусева, Ю.Б. Дробота, В.И. Иванова, Д. Кайзера, Н.В. Лысака, Д.Л. Мерсона, Г.Б. Муравина, В.В. Муравьева, Ё. Накамуры, В.А.Плотникова, Н.А. Семашко, Н.В. Новикова, Л.Н. Степановой,

В.М. Финкеля, К. Оно, Т. Шиотани и др. Авторы отмечают, что современная акустико-эмиссионная аппаратура позволяет выделять сигнал акустической эмиссии из шумовой помехи. Хорошо решена в настоящее время проблема локации источников акустической эмиссии, путем одновременного использования нескольких датчиков. Решается вопрос идентификации источников акустической эмиссии.

При деформации метод АЭ позволяет получать сведения о процессе генерации и эволюции дефектов, прежде всего микромасштабного уровня. Однако макроскопическое поведение материала под нагрузкой является результатом согласованной эволюции внутренней структуры, относящейся к разным масштабным уровням. В трудах отечественных ученых В.И. Владимирова, В.С. Ивановой, Э.В. Козлова, Н.А. Коневой, В.Е. Панина, Л.И. Тушинского и др. отмечено, что для описания процессов пластичности и разрушения, развивающихся на разных масштабных уровнях, необходимо модели, различающиеся своей природе. использовать ПО Требуется учитывать не только смену моделей поведения, но и одновременно использовать несколько взаимосвязанных моделей на разных уровнях.

Развитие количественных методов анализа структур создает основу для математического моделирования структурных превращений, происходящих в материале под внешним воздействием различной природы, их оптимизации и создания новых перспективных материалов и технологий обработки.

Цель работы:

Разработка комплексной методики анализа структурной организации конструкционных сталей на основе алгоритмов количественной обработки изображений микроструктур и параметров акустической эмиссии для описания состояния и поведения сталей при температурных и деформационных воздействиях.

Задачи исследования:

- 1. Разработка новых алгоритмов комплексного анализа структурной организации конструкционных сталей на основе информации, полученной методом АЭ и количественной обработкой изображений микроструктур.
- 2. Установление связи между количественными показателями структурной организации и кинетикой структурных изменений на различных стадиях деформации конструкционных сталей.
- 3. Определение связи между количественными показателями структурной организации и параметрами АЭ, регистрируемыми при деформации конструкционных сталей в различном структурном состоянии, заданном термической обработкой.
- 4. Разработка методики анализа стадийности деформации конструкционных сталей.

Научная новизна работы:

1. Разработаны алгоритмы анализа структурной организации конструкционных сталей на основе комплексного использования метода количественной обработки изображений микроструктур и метода АЭ. Метод

АЭ позволяет выявить стадии деформации, соответствующие микроуровню. Метод количественной обработки изображений микроструктур позволяет различать характер структурных изменений на мезоструктурном уровне деформации.

- 2. Установлено, что субзеренные структурные происходящие при деформации углеродистых сталей на микроструктурном уровне практически не изменяют значения показателя плотность границ 12Х18Н10Т наблюдается микроструктурных элементов д. Для стали незначительный рост значений показателя плотность микроструктурных элементов q на микроуровне и значительно снижается на мезоструктурном уровне II относительно значений показателя q уровне І. У всех рассматриваемых мезоструктурном мезоструктурном уровне деформации показатель плотность границ q имеет более высокие значения в сравнении с микроуровнем. Со сменой структурного уровня деформации с мезоуровня I на мезоуровень II рост показателя с замедляется или происходит снижение его значений. Для всех исследуемых сталей микроуровню деформации соответствует стадия высокой активности АЭ, на мезоструктурном уровне активность АЭ низка.
- Для стали 45 установлено влияние структурного состояния, заданного термической обработкой, на характер изменения показателя плотность границ структурных элементов q и проявления АЭ при деформации. Установлено, что активность АЭ с повышением температуры отпуска до t=400°C увеличивается, что связано с высвобождением закрепленных дислокаций, в результате объемных изменений при фазовых превращениях. Обособление цементита при отпуске t = 400°C регистрируется повышением значений показателя плотность границ структурных элементов q. Снижение активности АЭ при деформации образцов с температурой отпуска t = 500°C обосновано уменьшением длины пробега дислокаций в высокодисперсной структуре троостита. Коагуляция цементита снижает значения показателя плотность границ структурных элементов q в сравнении с трооститом стали, отпущенной при t = 400°C.

Практическая значимость работы:

- 1. Разработана методика анализа стадийности деформации конструкционных сталей, основанная на установлении связи между показателем плотность границ структурных элементов q и активностью АЭ, и их комплексном использовании для определения структурных уровней деформации.
- 2. Для сталей Ст3, 20, 45, 12X18H10T получены зависимости количественного показателя структурной организации плотность границ q и активности АЭ от деформации на различных стадиях и установлена их взаимосвязь.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к анализу стадийности пластической деформации конструкционных сталей, позволяющий устанавливать связь

количественного показателя структурной организации плотность границ микроструктурных элементов q с активностью AЭ dN/dt.

- 2. Характер изменения количественного показателя структурной организации плотность границ микроструктурных элементов q и параметров АЭ для стали 45 в различном структурном состоянии, заданном термической обработкой.
- 3. Связь количественного показателя структурной организации плотность границ микроструктурных элементов q с активностью AЭ dN/dt при деформации конструкционных сталей при смене одного структурного уровня деформации другим.

Степень достоверности и обоснованность результатов научных исследований и выводов работы обеспечивается системным подходом к исследованиям, применением современных экспериментально аналитических методов и испытаний на современном оборудовании, данных. Выводы полученных экспериментальных большим объемом современных базируются на достижениях теории металловедения, физической мезомеханики и не противоречат их основным положениям.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.09 - Материаловедение (в машиностроении):

- теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий;
- установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды;
- разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях;
- развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса материалов в машиностроении.

Апробация работы:

Основные положения и результаты работы представлены и обсуждены симпозиумах: конференциях следующих Международный И на междисциплинарный симпозиум «Фракталы и прикладная синергетика (Москва, Международный междисциплинарный (ФиПС-01)» 2001), симпозиум «Фракталы и прикладная синергетика (ФиПС-03)» (Москва, 2003), Международная Научно-техническая конференция «Современное материаловедение и нанотехнологии» (Комсомольск-на-Амуре, Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» (Комсомольск-на-Амуре, 2015), Международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2015).

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ. В том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ и одна публикация, входящая в международную систему цитирования Scopus.

Личный вклад автора состоит в выполнении основного объема исследований. Соискатель принимал участие в планировании и постановке задач, интерпретации научных положений и выводов. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций выполнена при участии соавторов.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 131 странице, содержит 49 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния решаемой в диссертации проблемы и обоснованию задач исследований. Освещены базовые принципы физической мезомеханики, базирующиеся на положении о множественности деформации, распределенных носителей пластической на разных масштабных структурных уровнях и функционирующих по единому синергетическому алгоритму. Суть такого алгоритма заключается в структур, обеспечивающих образовании И развитии диссипативных сопротивление материала внешнему температурно-деформационному воздействию.

Структурные изменения, происходящие в материале на различных стадиях, могут оцениваться по количественным параметрам изображений микроструктур. Для этой цели успешно применяются современные компьютерные металлографические методы исследования.

Акустическая эмиссия является физическим методом оценки кинетики структурных изменений материала и характера распределения разномасштабных концентраторов напряжений. Главное преимущество метода заключается в интегральном анализе сигнала, фиксируемого по всему объему деформируемого тела в реальном масштабе времени, и разложении этого сигнала на его первопричинные источники по энергетике и временной стадийности.

Литературный обзор показал необходимость разработки новых методов получения сведений о механизмах структурной организации в материале, представляющих синергетическую реакцию материала на внешнее температурное или деформационное воздействие на основе сочетания оптических методов, исследующих статичное строение материала в определенный момент времени и физических методов исследования структурных изменений в реальном времени.

Во второй главе дано обоснование и содержание общих вопросов методики исследования, используемой в диссертационной работе.

Исследования проводились на следующих материалах: сталь обыкновенного качества Ст3, качественные стали 20 и 45, легированная сталь 12X18H10T.

При исследовании образцов в условиях статического растяжения использовалась универсальная испытательная машина INSTRON-3382. Для регистрации АЭ процессе механических испытаний растяжением В использовались акустико-эмиссионные комплексы: **AEPro** микроструктуры металлографических Исследования проведены на микроскопах «Микро-200» и «Nikon». Термическая обработка образцов выполнялась в муфельной печи СНОЛ 1300/6,5.

Методической основой является комплексный подход к изучению механизмов пластической деформации с использованием современных методов неразрушающего и разрушающего контроля - метода количественной обработки изображений микроструктур с определением количественных показателей микроструктуры, акустико-эмиссионного метода анализа структурной деградации при деформации, метода анализа диаграмм растяжения.

Метод анализа диаграмм растияжения позволил получить данные об особенностях деформации материалов на различных стадиях деформации.

Методом акустической эмиссии были проведены исследования кинетики структурных изменений и эволюции развивающихся дефектов в процессе пластической деформации и разрушения. При этом регистрировались следующие параметры: интегральное накопление AЭ N, суммарная AЭ Σ N, активность AЭ dN/dt, суммарная энергия AЭ Σ E.

Методом количественной обработки изображений микроструктур определялись количественные структурные показатели. Использовалась программа регистрации и анализа изображений Image.Pro.Plus.5.1. Для выделения структурных уровней деформации в качестве информативного параметра был принят количественный показатель структурной организации плотность границы микроструктурного объекта q

$$\mathbf{q_i} = \frac{\mathbf{P_i}}{\mathbf{F_i}} \tag{1}$$

где P_i — периметр микроструктурного объекта; F_i — площадь микроструктурного объекта.

третьей представлены результаты исследований главе деформационных процессов конструкционных сталей при растяжении, выполненные по предлагаемой комплексной методике, включающей анализ сигналов акустической эмиссии и компьютерную обработку изображений акустической микроструктур. Источниками эмиссии являются микроструктуры, генерирующие различные дефекты кристаллического строения при пластической деформации, характеризующиеся высоким содержанием свободной энергии, которая частично выделяется в виде упругой акустической волны. Эти же микроструктуры, обладая повышенной величиной свободной энергией, подвергаются более активному травлению при подготовке металлографических шлифов. Следовательно, структуры, генерирующие акустические сигналы, и структуры, активно подвергаемые травлению, образуют единую группу, которая на изображениях микроструктур представляется в виде темных объектов.

Исследования показали, что стадийность динамики структурной организации материала при деформации выявляется в характере проявления акустической эмиссии и изменения количественного показателя структурной организации плотность границ q. Основные стадии этого процесса фиксируются однозначно, но при этом имеются отличительные особенности по продолжительности отдельных стадий, которые раскрывают более глубинные закономерности деформационного процесса.

Обобщенная зависимость акустической эмиссии от степени деформации при одноосном растяжении образцов представляет следующее. В области упругих деформаций активность акустической эмиссии не большая и связана главным образом с единичными концентраторами напряжений микромасштабного уровня, вокруг которых наводятся поля упругих напряжений. При общем уровне напряжений меньших предела текучести вблизи концентратора образуются напряжения, превышающие его, и происходит микролокальная пластическая деформация, приводящая к генерации акустических сигналов.

При достижении напряжений предела текучести наблюдается высокая активность акустической эмиссии, связанная с пластической деформацией, лавинообразным развитием дислокаций и их относительно свободным скольжением в пределах одного кристаллита. При этом сама геометрия границ пока остается неизменной.

С ростом напряжений условия свободного скольжения дислокаций завершаются, стадия текучести сменяется стадией деформационного упрочнения. На которой плотность дислокаций повышается, и они начинают тормозить друг друга. Сокращение длины свободного пробега дислокаций, и, как следствие, снижение энергии излучаемых ими упругих волн приводит к снижению активности АЭ.

С повышением степени деформации диссипативная дислокаций достигает предельного уровня, и формируются вторичные обеспечивающие структуры, диссипативные максимальную сопротивляемость материала внешнему деформационному воздействию. процесс выходит на мезоструктурный Деформационный определяется динамикой развития границ. Для количественного описания деформационных процессов структурных изменений количественный показатель структурной организации плотность границ q, так как он является наиболее чувствительным к смене структурного уровня деформации.

На мезоуровне часть дислокаций выходит к границам зерен, вызывая микролокальное смещение. Повышение развитости фрагментация структуры, характерные ДЛЯ мезоструктурного деформации I, приводят к росту показателя плотности границ q. На мезоструктурном уровне II дальнейшая эволюция структуры определяется коллективным движением мезоструктурных фрагментов. Мезофрагменты имеют меньшую развитость общей границы раздела, обеспечивающую их подвижность. Рост количественного показателя структурной организации о прекращается (или происходит снижение значений). На макроуровне деформации (стадия предразрушения) величина плотности границ q немного повышается. Что вероятней всего связано с изменением структуры границ за счет увеличивающейся разориентации структурных элементов, приводящей в дальнейшем к разрыву.

Выявленные закономерности проявления акустической эмиссии и изменения количественного показателя плотности границ q на различных структурных уровнях деформации имеют отличительные черты в зависимости от структурных особенностей рассматриваемого материала.

Для малоуглеродистых сталей с крупнозернистой равновесной структурой характерна внутризеренная деформация. При растяжении **стали Ст3** по диаграмме нагружения σ = $f(\epsilon)$ и графику деформационного упрочнения $d\sigma/d\epsilon$ = $f(\epsilon)$ можно выделить три стадии деформации, характерные для материалов, деформирующихся без площадки текучести (рисунок 1а). І стадия — стадия упругости и начала пластического деформирования, ІІ стадия — деформационного упрочнения, ІІІ — стадия макролокализации деформации.

Кинетика накопления повреждений, регистрируемая методом АЭ, стали Ст3, с выделением четырех стадий представлена на рисунке 1б. АЭ при деформации стали Ст3 регистрируется в течение всего процесса деформации с разным уровнем активности.

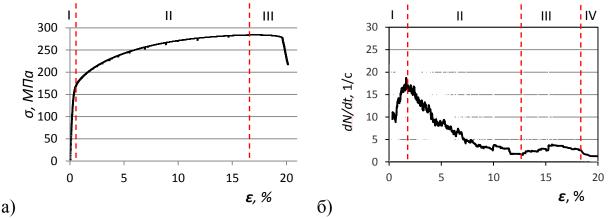


Рисунок 1 - Диаграмма нагружения (a) и график активности AЭ dN/dt (б) при деформации образца стали Cт3

Высокая активность АЭ dN/dt на стадии упругости, связывается с микропластической деформацией в отдельных локальных областях и приповерхностных зонах материала. Рост активности акустической эмиссии

dN/dt увеличением степени деформации указывает массовое движение дислокаций, имеющих максимальную длину свободного пробега в структуре стали Ст3, где основным элементом деформации являются крупные зерна феррита. Повышение плотности дислокаций при увеличении степени деформации приводит к уменьшению длины свободного пробега и к постепенному снижению регистрируемой АЭ. Регистрируемое стадии IIIнебольшое увеличение на акустической эмиссии dN/dt IV (рисунок 1б), вероятней всего, вызвано изменением механизма деформации в результате фрагментации структуры. Снижение активности АЭ dN/dt стадии IV связывается с локализацией деформации.

Анализ характера изменения количественного показателя структурной плотность границ определяемого организации зерен q, количественной обработки изображений (рисунок 2), активности AЭ dN/dt от степени деформации позволил выявить границы масштабных структурных уровней деформации. На микроуровне (до ε = происходит активное размножение И движение дислокаций, (рисунок регистрируемое методом АЭ lб), которое фиксируется используемым количественным показателем метода количественной обработки изображений микроструктур плотность границ q (величина плотности границ зерен q почти не изменяется (рисунок 2), так как основные пластической деформации функционируют преимущественно внутри зерен и форма зерен не изменяется.

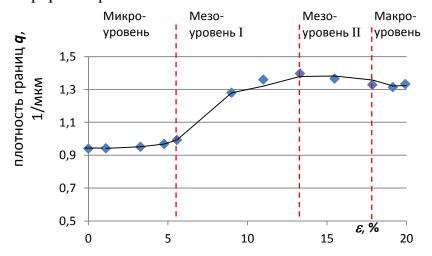


Рисунок 2 - Зависимость показателя плотности границ q стали Cт3 от степени деформации

С повышением степени деформации формируется мезоскопический структурный уровень деформации. На мезоуровне I ($\epsilon = 5,5...13,3\%$) значения показателя плотность границ q возрастают за счет выхода части подвижных внутризеренных дислокаций к границам, повышая их локальную кривизну и протяженность, и образования в зернах дислокационной субструктуры. На изображениях микроструктуры стали Ct3 выявляется значительное количество точечных образований, объединенных в колонии с разной

степенью упорядоченности. Можно предположить, что большая часть точечных структур, наведенных пластической деформацией, представляет собой пересечение дислокаций с плоскостью металлографического шлифа. Увеличение плотности дефектов на данном структурном уровне снижает активность сигналов АЭ dN/dt.

На мезоуровне II (ε =13,3-17,8%) значения плотности границ зерен изменяются незначительно. В структуре стали формируются структурные блоки (мезофрагменты), представляющие собой совокупность нескольких зерен, объединенных по степени родства кристаллографических ориентаций. Степень развитости когерентных границ раздела в структурных блоках ниже, чем у отдельных зерен не входящих в мезообразование, и это отражается на величине плотности границ микрообъектов д. Повышение подвижности приводит к возрастанию уровня излучаемой источниками АЭ. Наблюдается незначительный рост активности АЭ dN/dt $\varepsilon = 12,6 - 18,1\%$ (рисунок 16). Ha стадии макролокализации при деформации є > 17,8% (макроуровень) снижение показателя плотность границ q прекращается. Что вероятней всего связано с изменением структуры границ за счет увеличивающейся разориентации структурных элементов, приводящей к разрыву.

Таким образом, наблюдается связь выявленной кинетики структурных изменений при деформации стали Ст3, регистрируемой методом АЭ, и характера изменения плотности границ q на всех структурных уровнях. Стадийность изменения плотности границ зерен q в зависимости от степени деформации демонстрирует эволюцию диссипативных структур, являющихся источниками акустической эмиссии. Комплексный анализ характера изменения плотности границ зерен q и активности АЭ dN/dt от степени деформации позволяет выявить основной носитель, механизм деформации, а также границы структурных уровней: микроуровня, мезоструктурного уровня I, мезоструктурного уровня II и макроуровня.

Для **стали 20** также наблюдается согласованность изменения параметров АЭ и показателя плотности границ q в зависимости от степени деформации и имеет качественное сходство со сталью Ст3.

По графику деформационного упрочнения do/de стали 20 выделяется 4 стадии деформации характерные для материалов, деформирующихся с площадкой текучести (рисунок 3a). Кинетика накопления повреждений, регистрируемых методом AЭ, отражает характер структурных изменений деформации стали 20 (рисунок 3б).

Пик активности AЭ dN/dt (максимальный для деформационного процесса образца стали 20 в целом) на стадии II соответствует стадии скольжения и связывается с коллективным движением дислокаций. Деформационное упрочнение на стадии III сопровождается значительным снижением активности АЭ в результате сокращения длины свободного пробега дислокаций и их быстрого накопления в изначально менее однородной структуре стали 20, чем сталь Ст3.

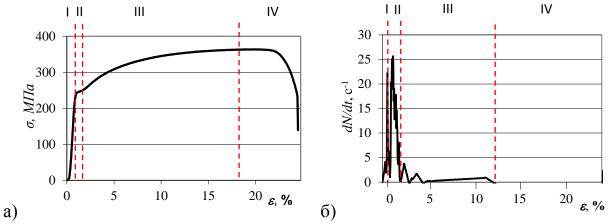


Рисунок 3 - Диаграмма нагружения (a) и график активности АЭ dN/dt (б) при деформации образца стали 20

анализом зависимости Совместным ОТ степени деформации активности AЭ dN/dt и характера изменения значений плотности границ q, количественной обработки изображений определяемым методом микроструктур, выделены границы структурных уровней деформации. В области малых деформаций до $\varepsilon = 4.7\%$ пластическая деформация практически не повлияла на форму зерен. В результате показатель плотность границ q увеличивается незначительно в сравнении с исходным состоянием (рисунок 4). Такой характер микроструктурных изменений, при высокой активности источниками АЭ, позволяет отнести данную стадию к микроуровню деформации.

Дальнейшее повышение степени деформации приводит к увеличению плотности дефектов. Значения показателя плотность границ q увеличиваются за счет повышения развитости границ и изменения формы зерна. Рост значений плотности границ q, сопровождающийся низким уровнем активности AЭ, соответствует деформации на мезоструктурном уровне I ($\varepsilon = 4.7\% - 11.1\%$).

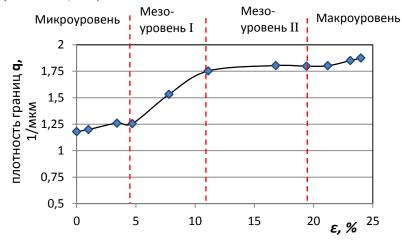


Рисунок 4 - Зависимость показателя плотности границ q стали 20 от степени деформации

При деформации $\varepsilon = 11,1\%$ характер изменения значений показателя структурной организации плотность границ q от степени деформации

меняется. Рост плотности границ q прекращается и далее до $\varepsilon = 19.4\%$ значения д практически не изменяются. Данный характер изменения позволяет сделать вывод о переходе деформации значений мезоструктурный уровень II. В результате коллективного зернограничного скольжения форма зерен меняется, они вытягиваются, в структуре границ появляются прямолинейные участки. Мезофрагменты, формирующиеся на этом структурном уровне, объединяют несколько зерен, связанных между собой повышенной когерентностью кристаллографической ориентации. Что в совокупности не увеличивает показатель плотности границ q. На макроуровне $\varepsilon > 19.4\%$ (стадия предразрушения) величина плотности границ д незначительно повышается за счет увеличивающейся разориентации фрагментированной структуры.

Комплексный анализ характера изменения плотности границ зерен q и активности AЭ dN/dt при растяжении **стали 45** выявил ранний переход процесса деформации на мезоструктурный уровень I, а также рост значений плотности границ q на микроуровне.

Основная генерация сигналов АЭ при деформации стали 45 (стадия I (рисунок 5б)) происходит на стадиях, соответствующих стадиям упругости, начала пластической деформации и стадии скольжения (рисунок 5а). Существенной является оценка в зоне пластической деформации, так как высокая активность АЭ на стадии упругости связана с микротекучестью в областях материала. Вначале деформационного локальных стадии упрочнения, активность AЭ dN/dt снижается практически до нуля (рисунок 5б), ввиду снижения энергии излучения сигналов АЭ. При $\varepsilon = 6.0\%$ - 9% наблюдается всплеск активности АЭ dN/dt (стадия III (рисунок 5б)). Далее активность АЭ незначительна, но регистрируется вплоть до разрушения образца.

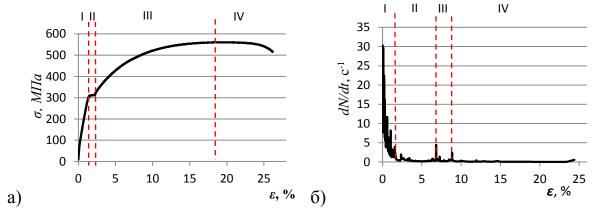


Рисунок 5 - Диаграмма нагружения (a) и график активности АЭ dN/dt (б) при деформации образца стали 45

Стадийный характер деформации, выявленный на графике зависимости от степени деформации активности АЭ dN/dt, хорошо согласуется с графиком изменения плотности границ q (рисунок 6). Рост значений показателя плотности границ q стали 45 наблюдается на начальных стадиях деформации. До $\varepsilon = 1,55\%$ повышение незначительно. При высокой

активности AЭ dN/dt, связанной с генерацией дислокаций различными источниками, функционирующими внутри зерен и на их границах, можно характеризовать данную стадию как микроуровень деформации. При выходе дислокаций внутризеренных границам локальная кривизна К деформации, протяженность границ возрастает. Сокращение стадии соответствующей микроструктурному уровню, связывается с уменьшением длины свободного пробега дислокаций в структуре стали 45 с меньшим содержанием пластичной ферритной фазы в сравнении со сталью 20.

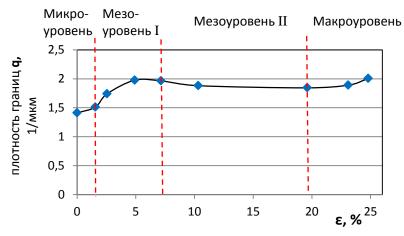


Рисунок 6 - Зависимость показателя плотности границ q стали 45 от степени деформации

Движение дислокаций в отдельных зернах характерно лишь для начальных стадий деформирования. С повышением степени пластической деформации в материале формируется мезоструктура. Начиная со степени деформации, соответствующей стадии текучести, наблюдается значительное увеличение значений плотности границ q (рисунок 6). Повышение значений q при степени деформации $\varepsilon = 1,55\% - 7,1\%$, при низкой активности АЭ dN/dt соответствует деформации стали 45 на мезоуровне I.

Снижение значений плотности границ q при деформации $\varepsilon > 7,1\%$ свидетельствует о переходе деформации на мезоуровень II, где в движение вовлекаются не отдельные структурные элементы, а структурные блоки, подвижность, которых обеспечивается меньшей развитостью границ. Сменой механизма и основного носителя деформации на мезофрагменты объясняется повышение активности AЭ dN/dt при $\varepsilon = 6\%$ - 9 % (рисунок 5б). На стадии предразрушения $\varepsilon > 19,6\%$ (макроуровень) разориентированность фрагментированной структуры стали 45 повышает величину плотности границ q. Образующиеся микропоры и микротрещины являются началом и источником процесса разрушения.

Структура легированной 12X18H10T стали отражает деформационные и термические процессы технологической обработки связанные с закалкой и прокаткой материала, исходного листового материала. Структурные неоднородности, образованные при технологической обработке 12X18H10T, ПО стали своей природе представляют собой область скопления концентраторов напряжений микрои мезомасштабных уровней, формирующих диссипативные источники.

Плотность дефектов кристаллического строения стали 12X18H10T и характер их распределения прямым образом отражаются на кинетике структурных изменений при деформации. Период высокой активности АЭ dN/dt сокращается до $\varepsilon = 1,2\%$ (рисунок 7). Под действием приложенной внешней нагрузки происходит разблокировка и отрыв дислокаций ранее закрепленных предыдущим деформированием, связанным с предысторией изготовления стали. И далее, вплоть до разрушения, деформация протекает с равной степенью низкой активности АЭ dN/dt.

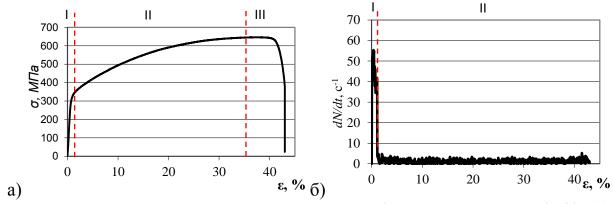


Рисунок 7 - Диаграмма нагружения (a) и график активности АЭ dN/dt (б) при деформации образца стали 12X18H10T

Характерно, обший что рост показателя плотности границ микроструктурных объектов q стали 12X18H10T при деформации небольшой (от $q = 0.78 \text{ мкм}^{-1}$ до $q = 0.81 \text{ мкм}^{-1}$) и происходит только до $\epsilon =$ 0,8 %. Высокая активность АЭ dN/dt при этих степенях деформации деформационного процесса позволяет выделить ЭТУ стадию микроуровень (рисунок 8). Уже при $\epsilon \sim 1\%$ наблюдается достижение критической плотности дефектов, необходимой для перехода на следующий структурный уровень деформации. Активность АЭ dN/dt резко снижается. Что указывает на то, что процесс массового движения дислокаций завершается, строение первичной диссипативной структуры влияет на динамические диссипативные свойства материала.

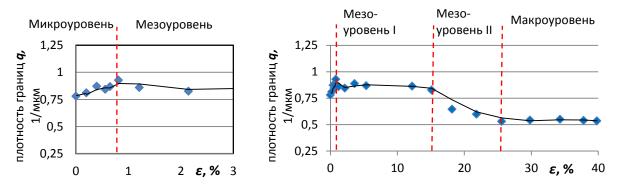


Рисунок 8 - Зависимость показателя плотности границ q стали 12X18H10T от степени деформации

Протяженность деформации стали 12X18H10T стадии на микроструктурном уровне сравнению с углеродистыми ПО сталями значительно сокращается. В мелкозернистой структуре высокой

плотностью концентраторов напряжений пластическая деформация в основном реализуется через зернограничное скольжение.

На мезоуровне I (ε =0,8 % - 15,11 %) значения показателя плотность границ q не изменяются, так как с одновременным накоплением дефектной структуры происходит формирование мезофрагментов, границы раздела которых имеют низкие значения плотности границ q.

При ε = 15,11 % наступает переход деформации на мезоструктурный уровень II, на котором структурная динамика происходит за счет коллективного движения мезофрагментов. Основной диссипативный процесс локализуется по границам раздела структурных блоков за счет поворотно-трансляционного перемещения. Коллективное зернограничное движение на мезоуровне II ($\varepsilon = 15,11 \% - 25,5 \%$) протекает с образованием фрагментированной структуры, что обеспечивает высокую пластичность стали 12Х18Н10Т при достаточно высоком коэффициенте упрочнения. Фрагментация структуры приводит к снижению значений показателя плотность границ микроструктурных объектов q. На макроструктурном уровне ($\epsilon > 25,5\%$) пластическое деформирование стали 12X18H10T при ротационно-трансляционном перемещении мезофрагментов сопровождается повышением их разориентации. На макроуровне сохраняется постоянный низкий уровень величины плотности границ q фрагментированной значительная разориентировка которой является началом структуры, процесса разрушения.

Представленные результаты выявляют ряд закономерностей. Для всех исследуемых сталей стадия высокой активности АЭ соответствует микроструктурному уровню деформации. На микроструктурном уровне деформации образцов сталей Ст3, 20 и 45 количественный структурный показатель плотность границ микроструктурных объектов q практически не изменяется. Это объясняется наличием только субзеренных структурных изменений для данных сталей на микроструктурном уровне. Для стали 12X18H10T на микроуровне наблюдается незначительный рост значений показателя плотность границ микроструктурных объектов q в связи с наличием мелкозернистой неоднородной структуры, полученной при изготовлении исходного материала.

У всех рассматриваемых сталей показатель плотность границ q на мезоструктурном уровне имеет более высокие значения в сравнении с микроуровнем. Со сменой структурного уровня деформации с мезоуровня I на мезоуровень II рост показателя q замедляется или происходит снижение его значений. Для стали 12X18H10T показатель плотность границ q на мезоструктурном уровне II значительно снижается относительно значений показателя q на мезоструктурном уровне I.

Комплексное использование метода АЭ и метода количественной обработки изображений микроструктур позволяет выявить ряд особенностей проявления различных механизмов деформации на разных структурных

уровнях, а также пронаблюдать их согласованное действие в процессе деформации.

В четвертой главе приведены результаты комплексного анализа структурного состояния стали 45, базирующегося на показателе плотность границ микроструктурных объектов q и параметрах акустической эмиссии, в условиях различных видов и режимов термической обработки.

Структурные превращения термического характера связаны с развитием и миграцией границ зерен или раздела фаз, обладающих повышенной величиной свободной энергии. В силу этого, изменения структурного состояния материала отражаются и показателем плотности границ q, и характером проявления акустической эмиссии.

Распределение показателя плотности границ микроструктурных объектов q отражает структурно-энергетическое состояние материала. На рисунке 9 показано распределение плотности границ q образцов стали 45 в отожженном состоянии, после закалки в воду и в масло. Микроструктура отожженного состояния характеризуется выраженным бимодальным распределением плотности границ, при этом первый максимум в области малых значений q относится к крупным зернам (феррита и перлита), а второй максимум в области больших значений q – к мелким зернам.

После закалки в воду бимодальный характер распределения сохраняется. Такой характер распределения показателя плотности границ q отражает кинетику образования мартенсита с развитыми двойниковыми границами, где проявление первого максимума связано с присутствием в структуре остаточного крупнозеренного аустенита.

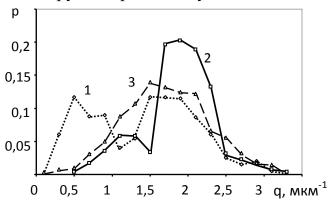


Рисунок 9 - Распределение показателя плотности границ зерен q образцов стали 45, имеющих различное структурное состояние в зависимости от вида термической обработки:

1 – отжиг; 2 – закалка в воду; 3 – закалка в масло

Распределение показателя плотность границ q после закалки в масло близко к нормальному закону. Микроструктура представляется более однородной. Диапазон рассеивания q после закалки в масло принимает большие значения, а математическое ожидание q — меньшее, по сравнению с закалкой в воде, косвенно подтверждая, что в этом случае формируется более устойчивая и равновесная структура.

Комплексный анализ плотности границ микроструктурных объектов q, параметров AЭ (суммарный счет ΣN и суммарная энергия ΣE), зарегистрированных при деформации образцов, и показателей механических свойств стали 45 выявляет особенности изменения структурного состояния при фазовых переходах в условиях различных режимов термической обработки.

Акустическая эмиссия при деформации образцов с температурой отпуска $t=200^{\circ}\mathrm{C}$ невысока за счет микроискажений кристаллической решетки при выделении ϵ – карбидов при превращении мартенсита закалки в отпущенный мартенсит (рисунок 10).

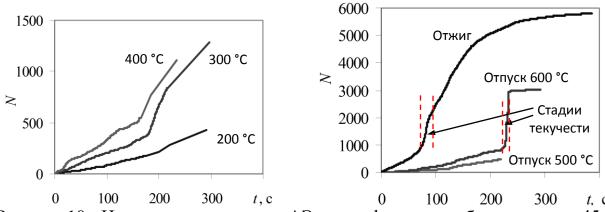


Рисунок 10 - Изменение активности АЭ при деформации образцов стали 45 в зависимости от температуры отпуска

Рост активности АЭ с увеличением температуры отпуска до $t=400\,^{\circ}\mathrm{C}$ вызван снижением внутренних напряжений в локальных областях искажения кристаллической решетки в результате объемных изменений:

- в интервале температур отпуска $t = 200^{\circ}\text{C}$ -300°C при превращении аустенита в отпущенный мартенсит;
- при обособлении карбида и сжатии стали в результате выделения углерода при $t = 300^{\circ}\text{C}$ 400°C .

Наиболее интенсивно снятие внутренних напряжений при отпуске происходит в интервале t=300 - 400° C, что подтверждается увеличением угла наклона графиков активности АЭ (рисунок 10).

Активность АЭ при отпуске $t=500\,^{\circ}\mathrm{C}$ невысока. Подвижность дефектов в высокодисперсной структуре тростита отпуска снижена так, как генерация акустических сигналов зависит не только от степени накопления, но и характера распределения концентраторов напряжений в структуре. При $t=600\,^{\circ}\mathrm{C}$ укрупнение более крупных цементитных частиц и растворение более мелких в сорбите отпуска приводят к резкому росту суммарного счета АЭ Σ N на стадии текучести.

На графиках зависимости механических свойств от температуры отпуска стали 45 наблюдается немонотонное снижение значений предела прочности $\sigma_{\rm B}$ и твердости НRСэ с повышением температуры отпуска (рисунок 11 а, б). Такой характер изменения механических свойств коррелирует с характером изменений параметров АЭ (рисунок 11 в, г).

Изменение фазового состава стали 45 на феррито-цементитные смеси при отпуске $t > 400\,^{\circ}\text{C}\,$ меняет характер проявления АЭ и показателя плотности границ микроструктурных объектов q (рисунок 12).

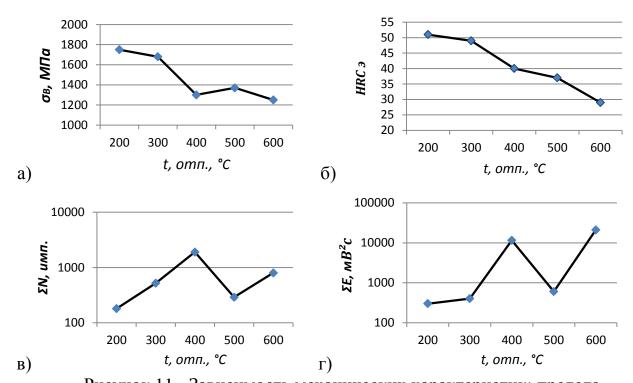


Рисунок 11 - Зависимость механических характеристик: предела прочности $\sigma_{\rm B}$ (a) и твердости HRCэ (б), и значений параметров АЭ: суммарного счета ΣN (в) и суммарной энергии ΣE (г) от температуры отпуска стали 45

Суммарный счет ΣN и энергия ΣE сигналов $A \ni$ в интервале температур отпуска $t = 200^{\circ}C$ - $400^{\circ}C$ увеличиваются с последующим спадом при $t = 500^{\circ}C$. Релаксация внутренних напряжений в кристаллической решетке при выделении углерода в результате фазовых превращений приводит к резкому снижению предела прочности стали 45 при температуре t = 400 °C. Высвобождение закрепленных в процессе закалки дислокаций и повышение подвижности дефектов в стали увеличивает значения параметров $A \ni \Sigma N$, ΣE при отпуске при t = 400 °C (рисунок 11 в, г). Появление дополнительных границ раздела фаз в структуре стали в результате выделения цементита при t = 400 °C обуславливает высокие значения показателя плотность границ q (рисунок 12).

Выделение твердой цементитной фазы приводит к выравниванию графиков изменения показателей механических свойств стали 45 в диапазоне 400-500°С (рисунок 11 а, б). Высокая степень дисперсности структуры тростита отпуска, сформированной при $t=500^{\circ}$ С сокращает длину пробега дислокаций. Значения параметров суммарного счета ΣN и энергии ΣE сигналов AЭ при деформации образцов значительно снижаются.

C укрупнением при температуре отпуска $t=600\,^{\circ}C$ цементитных частиц, приобретающих зернистую, округлую форму, происходит

уменьшение развитости границ и увеличение площади микроструктурных объектов. Это приводит к снижению значений показателя структурной организации плотность границ q при высокотемпературном отпуске (рисунок 12). Пластичность стали 45 при t = 600 °C повышается (рисунок 11 а, б). Восстановление подвижности дислокаций приводит к росту значений параметров АЭ Σ N, Σ E (рисунок 11 в, г).

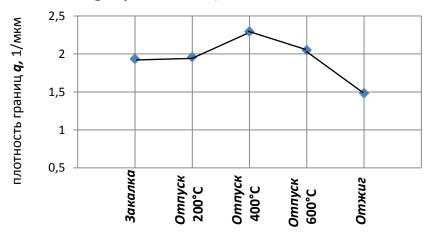


Рисунок 12 - Характер изменения показателя плотность границ q для различных видов термической обработки стали 45

Особенностью отображения микроструктуры закаленной стали является то, что без специального травления границы зерен аустенита не проявляются, а видимые на изображении линейные объекты представляют прямолинейных собой границы двойников. Несмотря на наличие двойниковых границ раздела, значение показателя плотности границ мартенсита достаточно велико (рисунок 12), за счет выявляемых на изображении микроструктуры скоплений концентраторов напряжений мезомасштабного уровня.

Значения показателя плотности границ микроструктурных объектов q образующегося при температуре отпуска t = 200°C отпущенного мартенсита практически не изменяются В сравнении co мартенситом (рисунок 12). Так как фазовые превращения происходят мартенситных пластин и игольчатый характер структуры сохраняется, кристаллы, выделившихся є-карбидов, когерентно связаны с поверхностью α-пересыщенного твердого раствора.

В период активной фазы разложения мартенсита изменение значений плотности границ микроструктурных объектов возрастающий характер, а при температуре свыше 400°C снижается (рисунок 12). В сорбитной структуре, несмотря на проявление зеренных границ, сохраняются. двойников Поэтому ДЛЯ количественного структурного анализа на основе показателя плотности границ с мартенсит и имеющих зеренной организации, необходимо другие структуры, не объединять в одну группу, в которой оценку структурной организации материала необходимо рассматривать с позиции изменения концентраторов напряжений и двойников.

Отжиг приводит к уменьшению твердости и предела прочности. Акустическая эмиссия на стадии текучести и деформационного упрочнения образцов в отожженном состоянии имеет максимальную активность в сравнении с другим структурным состоянием стал22 45 (рисунок 10). Структура стали 45 при отжиге характеризуется наиболее высокой степенью равновесности, что косвенно подтверждается низким значением плотности границ q (рисунок 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Разработан комплексный подход к анализу структурной организации конструкционных сталей на основе метода количественной обработки изображений микроструктур и метода АЭ при деформационном или термическом воздействии. Комбинированное использование данных методов позволяет выделять стадии, соответствующие микро-, мезо- и макроструктурным уровням деформации конструкционных сталей.
- 2. Установлено, что метод АЭ и метод количественной обработки изображений микроструктур имеют разную информативность при анализе деформационных процессов на различных структурных уровнях деформации. Метод АЭ позволяет регистрировать эволюцию структуры на микроуровне и по снижению активности АЭ определять переход на последующий мезоуровень. Метод количественной обработки изображений микроструктур фиксирует структурные изменения на микроуровне, и с высокой информативностью позволяет различать характер деформации на мезоуровне.
- 3. Установлены отличительные особенности в характере проявления АЭ и изменения показателя плотность границ структурных элементов q при деформации исследуемых сталей на различных структурных уровнях:
 - субзеренные структурные изменения, происходящие при деформации углеродистых сталей практически не изменяют значения показателя плотность границ микроструктурных элементов q. Для стали 12X18H10T на микроуровне наблюдается незначительный рост значений показателя плотность границ микроструктурных элементов q. Для всех исследуемых сталей микроструктурному уровню деформации соответствует стадия высокой активности АЭ;
 - на мезоструктурном уровне деформации у всех рассматриваемых сталей показатель плотность границ q имеет более высокие значения в сравнении с микроуровнем. Со сменой структурного уровня деформации с мезоуровня I на мезоуровень II рост показателя q замедляется или происходит снижение его значений. Активность АЭ на мезоструктурном уровне низка;
 - для высоколегированной стали 12X18H10T показатель плотность границ микроструктурных элементов q на мезоструктурном уровне II

значительно снижается относительно значений показателя на мезоструктурном уровне I.

- 4. Для стали 45 установлено влияние структурного состояния, заданного термической обработкой, на характер проявления АЭ и изменения показателя плотность границ структурных элементов q при деформации:
 - активность АЭ с повышением температуры отпуска до t = 400°C высвобождением закрепленных увеличивается, что связано объемных при фазовых дислокаций, результате изменений превращениях. Обособление цементита при отпуске t = 400°C регистрируется повышением значений показателя плотность границ структурных элементов д;
 - снижение значений энергии и активности АЭ при деформации образцов с температурой отпуска $t=500^{\circ}\mathrm{C}$ обосновано уменьшением длины пробега дислокаций в высокодисперсной структуре троостита. Коагуляция цементита снижает значения показателя плотность границ структурных элементов q в сравнении с трооститом стали, отпущенной при $t=400^{\circ}\mathrm{C}$;
 - увеличение значений энергии и активности АЭ, при деформации образцов с температурой отпуска $t=600^{\circ}\mathrm{C}$, связано с укрупнением феррито-цементитных частиц сорбита. Уменьшение дисперсности структуры снижает значения показателя плотность границ структурных элементов q.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации, входящие в международную систему цитирования Scopus:

1. Khon, H. Modeling the Propagation of Elastic Ultrasonic Waves in Isotropic and Anisotropic Materials When Excited by Various Sources / H. Khon, O.V. Bashkov, S.V. Zolotareva, D. B. Solovev // Materials Science Forum, Vol. 945, pp 926-931, 2019.

Публикации в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ:

- 1. Панин, С.В. Комбинированное исследование особенностей деформации плоских образцов и образцов с надрезом на микро- и мезоуровнях методами акустической эмиссии и построения карт деформации поверхности / С.В. Панин, О.В. Башков, Н.А. Семашко, В.Е. Панин, С.В. Золотарева // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. спец. выпуск ч. 2. С. 303 306.
- 2. Ким, В.А. Влияние пластической деформации на зеренную структуру конструкционной стали / В.А. Ким, О.В. Башков, С.В. Золотарева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80.- №3. С.33-37.
- 3. Ким, В.А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В.А. Ким, И.В. Белова, С. В. Золотарева

// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2014. — Т. 80.- №3. — C.43-46..

Другие публикации:

- 1. Ким, В.А. Статистическая оценка количественной металлографии / В.А. Ким, О.В. Башков, С. В. Золотарева, А.А. Попкова, Ю.В. Ван-ди // Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 2010г. Комсомольск-на-Амуре: «КнАГТУ», 2010. Т.1.— С. 245-249.
- 2. Ким, В.А. Статистическая оценка количественной металлографии / В.А. Ким, Р.В. Евдокимова, С.В. Золотарева, А.А. Попкова, М. Йошида // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета.-2013. №II-1(14). С. 76-82.
- 3. Ким, В.А. Оценка точности количественных показателей структурной организации поликристаллических материалов / В.А. Ким, С.В. Золотарева, И.В. Белова // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 2013г. Комсомольск-на-Амуре: «КнАГТУ», 2013.- Ч. 1. С. 160-163.
- 4. Ким, В.А. Количественные показатели структурной организации материала, как основа компьютерной металлографии / В.А. Ким, О.В. Башков, А.А. Попкова, С.В. Золотарева // Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы: материалы междунар. симпозиума, Комсомольск-на-Амуре, 2015г. Комсомольск-на-Амуре: «КнАГТУ», 2015. С. 54-57.
- 5. Ким, В.А. Статистическая оценка количественной металлографии при пластической деформации / В.А. Ким, С.В. Золотарева // Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы: материалы междунар. симпозиума, Комсомольск-на-Амуре, 2015г. Комсомольск-на-Амуре: «КнАГТУ», 2015. С. 174-176.
- 6. Семашко, А.Н. Соотношение фрактальных и акустических параметров в процессе деформации алюминиевого сплава Д16 / Н.А. Семашко, Ю.Г. Кабалдин, О.В. Башков, А.Г. Готчальк, С.В. Золотарева // Фракталы и прикладная синергетика (ФиПС-01): Тезисы междунар. междисциплинарного симпозиума.—Москва.— 26-30 ноября 2001.—С. 100—101.

Подписано в печать 25.03.2019. Формат 60х84 1/16. Бумага писчая. Ризограф RISO EZ 570E. Усл. печ. 1,40 л. Уч. изд. 1,30 л. Тираж 100 экз. Заказ 29613.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.