

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.217.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 21.05.2021 г.  
протокол № 3

О присуждении Аглетдинову Эйнару Альбертовичу гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование процесса деформации металлических материалов с применением статистического подхода к анализу временных рядов акустической эмиссии» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния принята к защите 26 февраля 2021 г., протокол № 2 диссертационным советом Д 212.217.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования РФ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Аглетдинов Эйнар Альбертович, 1991 года рождения, в 2014 г. окончил Тольяттинский государственный университет по специальности «физика металлов». Квалификация инженер-физик. В 2016 г. соискатель закончил магистратуру по направлению подготовки 22.04.01 – Материаловедение и технологии материалов. Справка о сроках обучения в аспирантуре и сдаче кандидатских экзаменов № 266 выдана 12 октября 2020 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Тольяттинский государственный университет». Соискатель работает в Научно-исследовательском институте прогрессивных технологий, НИО-2 «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» Минобрнауки РФ в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет» на базе НИО-2 «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» Научно-исследовательского института прогрессивных технологий. Научный руководитель - доктор физико-математических наук, доцент Ясников Игорь Станиславович, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика», ведущий научный сотрудник НИО-2 «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет».

**Официальные оппоненты:**

1. Назаров Айрат Ахметович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук» (ИПСМ РАН), г. Уфа;

2. Барат Вера Александровна, доктор технических наук, доцент кафедры диагностических информационных технологий Института информационных и вычислительных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)), г. Москва;

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет» (ФГБОУ ВО «АлтГУ»), г. Барнаул в своем положительном отзыве, подписанном профессором кафедры общей и экспериментальной физики, д.ф.-м.н., профессором Плотниковым Владимиром Александровичем, и утвержденном проректором по научному и инновационному развитию, д.с.н. Максимовой С.Г., указала, что диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся значимые сведения о процессах пластической деформации металлических материалов, акустической эмиссии, сопровождающей эти процессы, многофакторном подходе при обработке потока сигналов акустической эмиссии, имеющие как научное, так и практическое значение.

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, индексируемых в зарубежных базах данных Scopus и Web of Science, одна из них — в журнале из перечня ведущих периодических изданий, рекомендованного ВАК, 12 тезисов конференций. Также получен 1 патент РФ, зарегистрировано 2 программы для ЭВМ. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Agletdinov, E. A Novel Bayesian Approach to Acoustic Emission Data Analysis / E. Agletdinov, E. Pomponi, D. Merson, A. Vinogradov // *Ultrasonics*. – 2016. – Том 72. – С. 89-94.

2. Данюк, А.В. Влияние энергии дефекта упаковки на акустическую эмиссию в чистых металлах с гранцентрированной кристаллической решеткой / А.В. Данюк, Д.Л. Мерсон, И.С. Ясников, Э.А. Аглетдинов, М.А. Афанасьев, А.Ю. Виноградов // *Письма о материалах*. 2017. Т.7. №4. С.437-441.

3. Agletdinov, E. Mechanical Twinning is a Correlated Dynamic Process / E. Agletdinov, A. Vinogradov, D. Merson // *Scientific Reports* – 2019. - Vol. 9, Article number: 5748.

4. Agletdinov, E. On the long-term correlations in the twinning and dislocation slip dynamics / E. Agletdinov, D. Drozdenko, P. Dobron, A. Vinogradov // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Т. 777. – № 139091.

5. Vinogradov, A. A Phenomenological Model of Twinning-Mediated Strain Hardening / A. Vinogradov, I. Yasnikov, U. Estrin, K. Mathis, E. Agletdinov // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Т. 780. – №. 139194.

6. Agletdinov, E. A New Method of Low Amplitude Signal Detection and its Application in Acoustic Emission / E. Agletdinov, A. Vinogradov, D. Merson // *Applied Science*. – 2020. – Т.10(1). – № 73.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах. Опубликованные работы отражают все основные положения диссертации.

На диссертацию и автореферат поступило 13 отзывов. Все отзывы положительные. В отзывах с замечаниями отмечено, что указанные недостатки не снижают научную и практическую значимость результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Отмечается, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. №842 (с изменениями на 21 апреля 2016 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Тема диссертационной работы и ее содержание полностью соответствуют паспорту специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния, а ее автор Аглетдинов Эйнар Альбертович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

**1. В положительном отзыве ведущей организации** приведены следующие замечания: 1. Автор подчеркивает в первом пункте новизны, что дислокационное скольжение проявляется как процесс, состоящий из случайных и независимых друг от друга элементарных актов. Это слишком категорическое утверждение, противоречащее

современным трактовкам поведения ансамблей на разных стадиях пластической деформации, приведенных в работах Рыбина В.В., Зуева Л.Б. и др. Случайность в поведении дислокационного ансамбля можно констатировать как частный случай. В этой связи при описании пластического отклика деформируемого материала уже нельзя представлять накопление деформации как аддитивный вклад отдельных дислокаций. Мы должны учитывать самоорганизующийся характер дислокационной подсистемы (Малыгин Г.А.), проявляющийся на разных структурных уровнях вплоть до макроскопического – в виде волн пластичности деформируемого материала. 2. В главе 3 автор осуществляет кластеризацию потока сигналов акустической эмиссии, в результате которой обнаруживает 3 кластера, связанных с разными периодами эволюции дефектной структуры деформируемого материала (Mg). Почему в главе 2 не описана процедура кластеризации? Приведенные в главе 1 общие рассуждения на эту тему не дают представления об экспериментальных манипуляциях по кластеризации. 3. Автор, осуществив кластеризацию потока сигналов акустической эмиссии (рис. 2 автореферата и рис.3, 7 диссертации), связывает их с элементарными событиями на соответствующих стадиях пластической деформации (деформационного упрочнения). Но деформационный наклеп обусловлен накоплением дислокаций в структуре деформируемого материала в жесткой схеме нагружения. В соответствующей литературе используется термин для описания таких дислокаций — дислокации незавершенного сдвига. Поэтому говорить об элементарных дислокационных или двойниковых актах можно очень опосредованно, опираясь на данные рис.3.11 и 3.12. 4. Автор анализирует структуру деформационных полос на рис. 3.11 и 3.12, утверждая, что «источники сброса напряжений» независимы и поток сигналов акустической эмиссии подчиняется пуассоновскому распределению. Однако, хорошо известно, что деформационная полоса представляет собой коррелированный выход на границу раздела большого дислокационного ансамбля одной системы скольжения. Как разрешить очевидное противоречие между корреляцией в системе дислокаций и пуассоновским распределением. 5. Что за терминология у автора при описании стадий пластической деформации — «зрелая стадия». Согласно классическому подходу различают следующие стадии деформационного процесса (точнее деформационного наклепа): первая стадия (стадия легкого скольжения), вторая - линейная стадия упрочнения, третья — параболическая стадия. Согласно статьи Козлова Э.В. и Коневой Н.А. вслед за третьей стадией можно выделить и четвертую, когда заметная деформация не сопровождается упрочнением. 6. На рис. 6 автореферата и на рис.3.7, 3.9, 3.14 диссертации автор в качестве доказательства демонстрирует вид зависимости скорости потока акустической эмиссии в виде пуассоновского потока, соответствующего функции  $\lambda(\Delta t) = \exp(-\lambda t)$ . Тогда почему левая часть зависимости на рисунках соответствует пуассоновскому процессу? Где доказательство экспоненциальной зависимости скорости потока акустической эмиссии? Это доказательство можно было осуществить логарифмированием этой зависимости, определением параметров линейной функции и сопоставлением с параметрами пуассоновской функции. 7. В четвертой главе представлена феноменологическая модель деформационного наклепа, учитывающая дислокационное скольжение и двойникование. Однако возникает вопрос о связи этой модели и механизмов акустической эмиссии. Ведь упрочнение связано с повышением плотности решеточных дислокаций и других дефектов. В модели Нацика В.Д., Мерсона Д.Л. акустический сигнал генерируется при выходе дислокаций на границу раздела. 8. На рис. 4.5 (а,б) приведены обобщающие данные по плотности дислокаций, мощности акустической эмиссии, объемной доли двойников в сопоставлении с зависимостью  $\sigma$ - $\epsilon$ . Из этого представления следует вывод, что дислокационные процессы не коррелируют с акустической эмиссией. Не является ли это тем фактом, что генерирование сигналов акустической эмиссии никак не связано с дислокациями, осуществляющими незавершенный сдвиг.

**2. В положительном отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Назарова Айрата Ахметовича** приведены следующие замечания: Замечания к работе в основном относятся к стилю изложения, к некоторым формулировкам, и к оформлению. 1. В выводах и результатах четвертой главы отмечается, что разработанная феноменологическая модель «учитывает структурные характеристики материала и точно восстанавливает деформационное поведение магния и его сплавов». Слово «точно» в данном случае представляется не вполне уместным поскольку речь не идет о математически точном описании кривой деформирования и остальных зависимостей. В частности, рассчитанная зависимость объемной доли двойников от деформации количественно значительно отличается от экспериментально наблюдаемой, чему в диссертации есть вполне разумное объяснение. Вместе с тем, модель (терка описывает все основные особенности деформационного процесса п структурных изменений. 2. Одним из важнейших элементов развиваемой модели деформационного упрочнения является третий член уравнения (4.10), определяющий скорость изменения плотности дислокаций за счет взаимодействия с двойниковыми границами. Обоснование вида и знака этого члена в тексте, следующем за уравнением, представляется несколько путанным и неполным. Первоначально говорится в поддержку положительного знака – то есть, накопления дислокаций за счет границ, но в итоге делается вывод, что двойниковые границы приводят к снижению плотности дислокаций. В действительности, вклад границ в накопление, как следует из уравнений, учитывается их влиянием на среднюю длину пробега дислокаций, а отрицательный знак перед третьим членом вполне ожидаем. Что касается вида зависимости, можно было бы ожидать, что скорость убывания плотности дислокаций пропорциональна не производной по времени объемной доли двойников, а самой этой величине, поскольку скорость поглощения дислокаций должна быть пропорциональна текущей плотности двойниковых границ. Поэтому в этой части требуется большее обоснование выбранной зависимости, в этом пункте также использован неудачный термин «динамическое восстановление дислокаций» понимание которого может быть двусмысленным. По-видимому, это связано с неудачным переводом термина «dynamic recovery» «динамический возврат». 3. На рис. 4.5 совмещены изображения зависимостей от степени деформации нескольких величин, полученных расчетом и экспериментально, теоретические кривые приведены кривыми одного и того же цвета, что создает затруднения в «чтении» этих графиков. 4. Для лучшей демонстрации возможностей модели было бы гораздо интереснее не оптимизировать все параметры модели для всех рассмотренных состояний материалов, а рассчитать независимые от структурного и текстурного состояния параметры оптимизацией для одного состояния и попытаться рассчитать уже с этими параметрами кривые деформации и сопутствующие кривые для другого состояния.

**3. В положительном отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Барат Веры Александровны** приведены следующие замечания: 1. Метод  $\phi$ -параметра, описанный во второй главе (стр.42-53), основан на оценке изменения функции спектральной плотности мощности и не является специфичным методом обнаружения импульсных сигналов. В то время, как при верификации метод оценивается только по количеству выявленных и пропущенных импульсов, при этом спектральная плотность мощности не приводится и не анализируется. 2. При описании алгоритма используется большое количество настроечных параметров, выбор значений которых существенно влияет на результат (например, уровень  $\phi$ -параметра, на основании которого происходит обнаружение события акустической эмиссии), однако в тексте работы отсутствует методика выбора ключевых параметров алгоритма. Рекомендуется провести процедуру оптимизации настроечных параметров алгоритма. 3. В главе 1 методы спектрального анализа данных описаны слишком подробно в то время, как алгоритм обнаружения критических точек процесса на основе байесовской логики, требует более детального описания, так как в его основе лежит неканоническая формулировка теоремы Байеса. 4.

Вызывает сомнение универсальность предложенного в п.2.3 алгоритма обнаружения критических точек, так как при исследовании процессов пластической деформации он применен лишь в одном случае из трех.

**4. Отзыв** главного научного сотрудника ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» РАН, д.ф.-м.н., профессора Бетехтина Владимира Ивановича и старшего научного сотрудника ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» РАН к.ф.-м.н. Нарыковой Марии Владимировны. Замечания: 1. Недостаточно обоснован выбор, как материала для исследований в виде сплава ВТ20 с покрытием  $ZrO_2$ , так и схемы его испытаний царапанием. 2. В автореферате слабо говорится о связи феноменологической модели деформационного материала с параметрами акустической эмиссии.

**5. Отзыв** заведующего кафедрой физики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова» д.ф.-м.н., профессора Гафнера Юрия Яковлевича. Замечаний нет.

**6. Отзыв** зав. кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля ФГБОУ ВО «СибГИУ» д.ф.-м.н., профессора Громова Виктора Евгеньевича и доцента кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля ФГБОУ ВО «СибГИУ» к.т.н., доцента Невского Сергея Андреевича. Основное замечание: автор не приводит коэффициент достоверности аппроксимации между эмпирическими и расчетными данными Рис. 7 и 8), хотя отмечает высокую степень соответствия модели эксперименту.

**7. Отзыв** профессора кафедры металловедения и физики прочности НИТУ «МИСиС», д. т. н., профессора Кудри Александра Ивановича. Замечания: 1. Автор совершенно справедливо ссылается на имеющиеся трудности с выделением сигнала АЭ от элементарного акта пластической деформации, в этой связи из текста диссертации не вполне понятно, какие физические принципы были положены в основу сконструированного искусственного потока эмиссии (стр. 8)

**8. Отзыв** ведущего инженера ФГУП «Крыловский государственный научный центр», к.ф.-м.н. Нефедьева Юрия Евгеньевича. Замечаний нет.

**9. Отзыв** ведущего профессора Факультета Нанoeлектроники Университета ИТМО д.ф.-м.н. Романова Алексея Евгеньевича. Замечания: Две упомянутые на странице 7 разработанные программы для ЭВМ никак не обозначены в списке трудов автора диссертации.

**10. Отзыв** заведующего кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов», ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», д. т. н., доцента Башкова Олега Викторовича. Основное замечание: характер изменения исследуемых параметров АЭ может измениться при изменении скорости деформации. Было бы правильнее привести связь анализируемых параметров с параметрами нагружения (деформация, напряжение).

**11. Отзыв** заведующего лабораторией физических основ прочности «ИМСС УрО РАН», д.ф.-м.н., профессора Наймарка Олега Борисовича и старшего научного сотрудника лаборатории физических основ прочности «ИМСС УрО РАН», к.ф.-м.н., Уварова Сергея Витальевича. Замечание состоит в дискуссионности вывода о том, что дислокационное скольжение проявляется как процесс, состоящий из случайных и независимых друг от друга элементарных актов.

**12. Отзыв** профессора кафедры теории упругости ФГБОУ ВО «СПбГУ», д.ф.-м.н. Волкова Александра Евгеньевича. Замечания: 1. Построение системы уравнений выглядит непоследовательным: в формулы (5), (7) входит средний размер зерна, а затем в формулу (10) – любой из размеров, распределенных по закону (9). Не хватает пояснения к формуле (10): почему зависимость первой степени. 2. Не объясняется, почему двойниковая граница вносит вклад в аннигиляцию (аннигиляция – это взаимодействие с дислокацией другого знака) дислокаций, и почему не происходит наследование дислокаций двойником. 3. Чтобы перейти от формул (8) – (10) к (11)

необходимо произвести усреднение по размерам зерен, о чем в автореферате не говорится.

**13. Отзыв** заместителя директора – главного конструктора учреждения науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», к.т.н. Кинжагулова Игоря Юрьевича. Замечание: из текста автореферата не ясно, каким образом в предложенной феноменологической модели деформационного упрочнения и моделях, положенных в основу статистического подхода, учитываются расстояние и особенности среды распространения сигнала АЭ от источника до преобразователя АЭ.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность работы.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны** новые статистические подходы к анализу сигналов акустической эмиссии, включая метод детектирования, основанный на параметре эволюции источников; метод обнаружения критических переходов в сигналах АЭ, основанный на байесовской статистике; метод анализа потока событий на основе элементов теории точечных процессов;

**повышена** чувствительность и расширены возможности метода акустической эмиссии в прикладных задачах физического материаловедения;

**предложена**, обоснована и верифицирована феноменологическая модель деформационного упрочнения на основе взаимодействия механизмов дислокационного скольжения и механического двойникования;

**доказана** высокая эффективность предложенного в работе метода детектирования, обеспечивающего втрое большее число верно идентифицированных событий по сравнению с пороговым методом.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**установлено**, что в отличие от дислокационного скольжения, механическое двойникование относится к коррелированным процессам с памятью о прошлом. При этом наблюдаемые корреляции могут быть адекватно описаны моделью самовозбуждающегося процесса.

**Применительно к проблеме диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** подходы, детально разработанные в теории кинетики дефектного ансамбля, теории анализа случайных процессов, элементов теории точечных процессов и байесовского анализа;

**раскрыты** отличия в статистических особенностях дислокационной и двойниковой подсистем в твердом теле;

**изложены** основные модельные подходы к совместному анализу дефектных подсистем разных классов в твердом теле;

**изучено** влияние эволюции двойниковой подсистемы на особенности формы зависимостей нагружения и деформационного упрочнения;

**проведена модернизация** методов анализа сигналов акустической эмиссии с целью повышения чувствительности метода акустической эмиссии при анализе дефектной кинетики в твердых телах.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**представлены** методы статистического анализа сигналов АЭ, которые могут найти широкое применение при решении различных исследовательских задач физического материаловедения, а также в практике трактовки результатов неразрушающего контроля

(получен патент на изобретение № 2674709 “Способ акустико-эмиссионной диагностики динамического промышленного оборудования”);

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**результаты** получены на сертифицированном оборудовании с использованием современных аттестованных методов и методик, в том числе оптической и электронной микроскопии, механических испытаний на растяжение, сжатие и царапание, рентгеноструктурного анализа и метода нейтронной дифракции;

**теория** соответствует основным положениям разделов физики конденсированного состояния и физического материаловедения;

**идея базируется** на анализе практики и обобщении передового опыта в области анализа сигналов акустической эмиссии при деформировании металлов, результатах исследования процесса деформации металлических материалов и обеспечиваемых дефектами кристаллического строения механизмов деформации;

**установлено**, что результаты исследования не противоречат результатам, полученным другими авторами, на других материалах и с использованием иных методов исследования;

**использованы** современные взаимодополняющие методы исследования и обработки экспериментальных данных.

**Личный вклад соискателя состоит:** в разработке и апробации новых статистических методов анализа сигналов акустической эмиссии, обработке и интерпретации экспериментальных данных, написании и отладке программ. Автором была разработана и реализована методика сравнения алгоритмов детектирования сигналов АЭ. Автором была выполнена большая часть всех процедур обработки сигналов АЭ и интерпретации полученных результатов, была разработана, реализована и применена методика решения и оптимизации системы уравнений феноменологической модели и ее верификации на экспериментальных данных. Автор работы лично представил результаты проведенных исследований на международных конференциях в виде устных презентаций. Обсуждение и анализ результатов проводилась автором совместно с научным руководителем и научным коллективом.

На заседании 21.05.2021 года диссертационный совет принял решение присудить Аглетдинову Эйнару Альбертовичу ученую степень кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния за решение научной задачи создания новых методов анализа сигналов, позволяющих повысить достоверность и эффективность идентификации элементарных механизмов пластической деформации.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на защиту – 0, проголосовали: за присуждение ученой степени – 21, против – 0, воздержались – 0.

Председатель  
диссертационного совета

Ненашев Максим Владимирович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Майдан Дмитрий Александрович

21 мая 2021 г.

