

На правах рукописи



Скрипняк Наталья Владимировна

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛЕГКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ,
МАГНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре механики деформируемого твердого тела.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Баранникова Светлана Александровна

Официальные оппоненты:

Атрошенко Светлана Алексеевна, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория «Физика разрушения», ведущий научный сотрудник

Баяндин Юрий Витальевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория физических основ прочности, научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 22 декабря 2016 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корп. № 10), ауд. 239.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationnn/SkripnjakNV22122016.html>

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пикущак Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Потребность в установлении закономерностей механического поведения конструкционных сплавов, упрочненных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), обусловлена необходимостью повышения прочностных свойств и усталостной долговечности магниевых, титановых и алюминиевых сплавов для создания высокоэффективной техники в аэрокосмической индустрии, транспорте, судостроении и машиностроении.

Поверхностное упрочнение конструкционных металлических материалов позволяет повысить усталостную долговечность. Однако, механические свойства легких сплавов с упрочненными поверхностными слоями и структурой, модифицированной методами ИПД, при динамических воздействиях исследованы недостаточно полно.

В этой связи тема диссертационной работы, связанная с комплексным экспериментальным и теоретическим исследованием закономерностей процессов деформации и разрушения легких конструкционных сплавов с неоднородным распределением размеров зерен, ультрамелкозернистыми (УМЗ) слоистыми структурами в широком диапазоне скоростей деформации, является актуальной.

В диссертации решена задача, отвечающая приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечню критических технологий Российской Федерации, утвержденному Указом Президента РФ от 07.07.2011 г. №988 (Транспортные и космические системы).

Интерес к исследованиям механического поведения легких конструкционных сплавов, упрочненных методами ИПД и интенсивной поверхностной пластической деформации (ИППД), в РФ, ЕС, США, Японии неизменно возрастает в последние годы. Научно-исследовательские проекты по исследованию физико-механических и функциональных свойств поведения легких сплавов, упрочненных методами ИПД, поддерживаются Российским Научным Фондом, Фондом Фундаментальных научных исследований и Министерством образования и науки РФ.

Результаты исследований процессов деформации и разрушения материалов с неоднородными зеренными структурами в широком диапазоне механических воздействий представлены в работах Панина В.Е., Валиева Р.З., Псахье С.Г., Панина С.В., Зуева Л.Б., Баранниковой С.А., Столярова В.В., Александрова А.И., Наймарка О.Б., Макарова П.В., Скрипняка В.А., Романовой В.А., Качанова М.Л., Шилько Е.В. и др. [1-14].

Несмотря на интенсивные исследования закономерности процессов, определяющих механическое поведение легких сплавов со слоистой зеренной структурой и объемным бимодальным распределением зерен по размерам при высокоскоростной деформации и циклическом нагружении, изучены недостаточно полно.

Цель работы заключалась в установлении закономерностей деформации, повреждения и разрушения легких сплавов со слоистыми зеренными структурами и бимодальным распределением зерен по размерам в широком диапазоне скоростей деформации, в развитии многоуровневого подхода для прогнозирования механического поведения ультрамелкозернистых легких сплавов при квазистатических и динамических нагрузках.

Объектом исследования являются закономерности деформации, повреждения и разрушения конструкционных легких сплавов, а также связи между зеренной структурой и закономерностями механического поведения легких сплавов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- определить закономерности деформации, повреждения и разрушения алюминиевых, магниевых, титановых сплавов в диапазоне скоростей деформации от 0.001 до 1000 с^{-1} при растяжении и сжатии с применением комплекса экспериментальных методик. Получить данные о влиянии скорости деформации на предел текучести и сопротивление пластической деформации, предельные деформации до разрушения;

- определить закономерности малоциклового усталостной долговечности легких сплавов на основе алюминия, титана и магния с поверхностными УМЗ слоями;

- разработать физико-математическую модель для описания деформации, повреждения и разрушения легких сплавов с УМЗ поверхностными слоями в широком диапазоне скоростей деформации;

- численно исследовать закономерности деформации, повреждения и разрушения легких сплавов (на основе алюминия, магния, титана) при высокоскоростной деформации, при циклическом растяжении-сжатии.

Научная новизна диссертации заключается в получении новых экспериментальных данных, расширяющих и уточняющих знания о механическом поведении ряда магниевых, титановых и алюминиевых сплавов с поверхностными УМЗ структурами в широком диапазоне скоростей деформации, в развитии подхода многоуровневого моделирования в 3D постановке для прогнозирования влияния УМЗ поверхностных слоев и распределения в объеме зерен по размерам легких сплавов на сопротивление высокоскоростной деформации и усталостное разрушение.

Развита методика испытаний образцов тонколистового проката с поверхностным упрочнением для определения параметров малоциклового усталости.

С помощью численного моделирования впервые изучены закономерности деформации, повреждения и разрушения тонколистового проката алюминиевых, магниевых конструкционных сплавов с УМЗ поверхностными слоями.

На основе результатов численного моделирования впервые были получены:

- закономерности циклической долговечности в малоцикловой области для тонколистового проката алюминиевого сплава 1560, АД -1 в состоянии поставки и после формирования поверхностных слоев с УМЗ структурой;
- установлено влияние слоев с УМЗ структурой на долговечность в малоцикловой области для легких сплавов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертации имеют фундаментальный характер и могут быть использованы при выполнении инженерного и прочностного анализа, при проектировании изделий из легких алюминиевых, магниевых и титановых сплавов с повышенными прочностными свойствами после обработки методами ИПД и ИППД.

Разработанные методики многоуровневого моделирования расширяют возможности исследования процессов деформации и разрушения сплавов с УМЗ структурой, в том числе модели механического поведения сплавов с бимодальной зеренной структурой обеспечивают более полное понимание закономерностей процессов деформации и разрушения в условиях растяжения, сжатия и циклического нагружения и могут использоваться при решении как прикладных, так и научных поисковых задач.

Выводы, следующие из анализа результатов численного моделирования, способствуют более глубокому пониманию закономерностей деформации, повреждения и разрушения легких сплавов с УМЗ поверхностными слоями.

Установленные закономерности влияния поверхностных слоев с УМЗ структурой на малоцикловую усталостную долговечность и предельные характеристики могут быть использованы при разработке технологий поверхностной обработки изделий из легких конструкционных сплавов. Разработанные модели, методика моделирования могут быть использованы для решения широкого круга научных и практических задач механики деформируемого твердого тела для УМЗ легких сплавов.

Полученные экспериментальные данные о закономерностях деформации и разрушения легких сплавов с бимодальными и слоистыми зеренными структурами представляют интерес для применения указанных материалов в инженерной практике.

Результаты работы получены при поддержке программы стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП 1916.2015.2) НИР: «Моделирование физико-механических свойств конструкционных материалов для ядерных реакторов IV поколения», проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г., мероприятие 1.3.2 «Компьютерное моделирование деформации и разрушения наноматериалов при механических воздействиях на основе многоуровневого подхода», в рамках ГК № 14.132.21.1700 от 01.10.2012 г.; проекта ФЦП

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., соглашение № 14.В37.21.0441 Минобрнауки РФ; НИР в рамках ГК ФГАОУ ВО ТГУ №2014.223 (код проекта 1943), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., ГК № П666 от 19 мая 2010 г. (2010–2013 гг.) «Влияние структурированного поверхностного слоя на прочностные характеристики легких сплавов при динамических воздействиях».

Методы исследования. Для получения экспериментальных данных о механическом поведении образцов магниевых, алюминиевых и титановых сплавов после ИППД в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с $^{-1}$ применялись методы испытаний в условиях одноосного растяжения, сжатия и продавливания, а также испытаний на малоцикловую усталость в режиме осевого растяжения-сжатия. Испытания проведены на сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20 и оригинальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона и одновременной высокоскоростной фоторегистратцией процесса деформации с использованием камер FASTCAM SA5 model 775K-M1 и Phantom V710 производства компании Vision Research, Inc. (AMETEK Material Analyses Division).

Для исследования микроструктуры образцов применялись методы оптической и электронной сканирующей микроскопии. Для исследования зеренной структуры применялся электронный сканирующий микроскоп JSM 7500F (JEOL, Япония) с микроанализатором EDS и оптический металлографический микроскоп Olympus GX-71 Zeiss с анализатором изображений «Image Scope Color M» и цифровой камерой DP70.

Для теоретического прогнозирования механического поведения материалов с поверхностными УМЗ слоями и бимодальным распределением зерен по размерам применялись методы численного моделирования и многоуровневого компьютерного моделирования с использованием оригинальных компьютерных программ, имеющих государственную регистрацию (Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2011618386 от 06 ноября 2015 г.), а также лицензионного программного комплекса AUTODYN из состава ANSYS-11 (End-User-Certification 11-3-04 от 19.07.2007). Для решения краевых задач динамики использованы метод конечных разностей и модифицированный метод сглаженных частиц (SPH).

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель механического поведения легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам, позволяющая описывать процессы деформации, повреждения и разрушения в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с $^{-1}$.

2. Результаты экспериментальных исследований закономерностей деформации и разрушения легких сплавов с кубической гранецентрированной

и гексагональной плотноупакованной решетками (АД-1, алюминиевого сплава 1560 (АМг-6), МА2-1, ВТ5-1) в условиях квазистатического и высокоскоростного растяжения, сжатия, циклического знакопеременного нагружения в малоцикловой области. Установлено, что повышение сопротивления деформированию, пределов прочности при растяжении у сплавов с УМЗ поверхностными слоями в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} сочетается с повышением предельной деформации до разрушения.

3. Результаты экспериментальных и численных исследований закономерностей деформации и разрушения легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам, позволившие определить зависимости параметров деформационного упрочнения и предельной деформации до разрушения при высокоскоростном растяжении от параметров структуры поверхностных ультрамелкозернистых упрочненных слоев в листовом прокате легких сплавов.

4. Результаты экспериментальных исследований и установленные закономерности усталостной долговечности проката легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам. Обнаружено, что зависимости ($\Delta\sigma/2 - \log N_f$) в области малоциклового нагружения (до $N_f < 10^4$) сплавов магния МА2-1, МА8-1 и алюминия 1560, обработанных методами интенсивной поверхностной пластической деформации, могут быть аппроксимированы линейными функциями. Для исследованных сплавов формирование слоев с ультрамелкозернистой структурой приводит к повышению числа циклов до разрушения N_f при фиксированных амплитудах напряжений $\Delta\sigma/2$ по сравнению со сплавами с поликристаллической структурой. Повышение малоцикловой долговечности легких сплавов с ультрамелкозернистыми слоями связано с отклонением траектории формирующихся усталостных трещин и распространением их вдоль упрочненных слоев.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечивается применением апробированных экспериментальных методик, сертифицированного оборудования, математической корректностью постановок задач, применением апробированных численных методов решения, согласием полученных результатов с экспериментальными результатами и опубликованными данными других исследователей.

Апробация результатов работы. Основные результаты и положения диссертационной работы прошли апробацию на следующих конференциях: 19 The European Conference on Fracture (ECF19), Kazan, Russia, August 26–31, 2012; XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18–22 февраля 2013 г.; XV Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны, г. Саров, Россия, 18–22 марта 2013; Международная конференция «Математические и

информационные технологии, MIT-2013» (X конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»), Врнячка Баня, Сербия; 5–8 сентября 2013 г. Будва, Черногория, 9–14 сентября 2013; VIII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 22–25 апреля 2013 г.; 143rd TMS-2014 Annual Meeting & Exhibition, San Diego, USA, February 16–20 2014; 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, July 20–25, 2014, The 10th International Conference on New Models and Hydro codes for Shock Processes in Condensed Matter, Pardubice Czech Republic, EU, July 27th – August 1st, 2014, International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2014, TPU, Tomsk, Russia, October 16–18, 2014, The 6th International Conference on Computational Methods, July 14–17, 2015, Auckland, New Zealand, 19th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Tampa, USA, June 14–19, 2015, XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 августа 2015, 6th International Conference on Computational Methods – ICCM(2015), Auckland, July 14–17, New Zealand, 2015, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete Island, Greece, 5–10 June 2016, 145 Annual Meeting and Exhibition TMS2016, Nashville, Tennessee, USA, 14–18 February, 2016.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 32 работы, в том числе 8 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в российском журнале, переводная версия которого индексируется Web of Science), 1 статья в зарубежном научном журнале, 23 публикации в сборниках материалов Зимней школы по механике сплошных сред, всероссийских и международных научных и научно-технических конференций, из них 2 статьи в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, и 3 статьи в сборниках материалов зарубежных конференций. Общий объем публикаций – 8.56 п.л., личный вклад автора – 4.12 п.л. В опубликованных работах достаточно полно изложены материалы диссертации.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном выполнении экспериментальных исследований, разработке моделей и программ, выполнении расчетов, обработке, анализе результатов, публикации результатов, приведенных в диссертации. Постановка задач и обсуждение результатов их решения выполнены автором совместно с научным руководителем.

Объем и структура работы. Кандидатская диссертация состоит из введения, трех разделов и заключения, списка литературы, изложенных на 156 страницах машинописного текста, включая 98 рисунков, 5 таблиц. Список литературы включает 189 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе обсуждаются вопросы, связанные с проведением экспериментальных исследований закономерностей деформации и разрушения алюминиевых, магниевых и титановых сплавов (АД-1, алюминиевого сплава 1560 (АМг-6), МА2-1, ВТ5-1) в условиях квазистатического и высокоскоростного растяжения, сжатия, циклического знакопеременного нагружения в малоцикловой области. Исследованы сплавы в поликристаллическом состоянии (состоянии поставки) и с модифицированной структурой на поверхности образцов.

Для структурной механической модификации сплавов на поверхности изделий с целью формирования ультрамелкозернистых (УМЗ) слоев использован метод интенсивной поверхностной пластической деформации (ИППД) с использованием вольфрамового инструмента с плоской головкой при частотах воздействия от 16 до 25 кГц. Подбирались и воспроизводились режимы обработки по длительности, усилиям прижима и частотам воздействия инструмента, позволяющие формировать поверхностные слои с УМЗ структурой.

Испытания на растяжение образцов сплавов с постоянной скоростью деформации в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} проведены на сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20. Программное обеспечение VHS High Rate обеспечивает проведение испытаний, построение диаграмм и сохранение данных для высокоскоростных испытаний до 20 м/с. Сертифицированный датчик обеспечивает измерение усилий с точностью 0,15 % в диапазоне от -50 до 50 кН. Регистрация перемещения подвижного захвата осуществлялась непрерывно с временным разрешением 0,001 с и пространственным разрешением 0,0005 мм. Для испытаний применялись плоские образцы, изготовленные механическим методом из тонколистового проката титановых сплавов ВТ-6, ВТ5-1, алюминиевых сплавов 1560, АД-1, магниевых сплавов МА2-1, МА8-1.

На рис. 1 показаны экспериментальные диаграммы деформирования образцов сплавов при растяжении образцов в состоянии поставки и с УМЗ поверхностными слоями.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что формирование поверхностных УМЗ слоев толщиной до 200 мкм приводит к увеличению напряжения пластического течения в исследованных сплавах на $10 \div 20 \%$. Повышение предела текучести и предела прочности сплавов ВТ5-1, МА2-1 в тонколистовых образцах с УМЗ поверхностными слоями сопровождается возрастанием предельной деформации до разрушения на $\sim 10\text{--}15 \%$ соответственно.

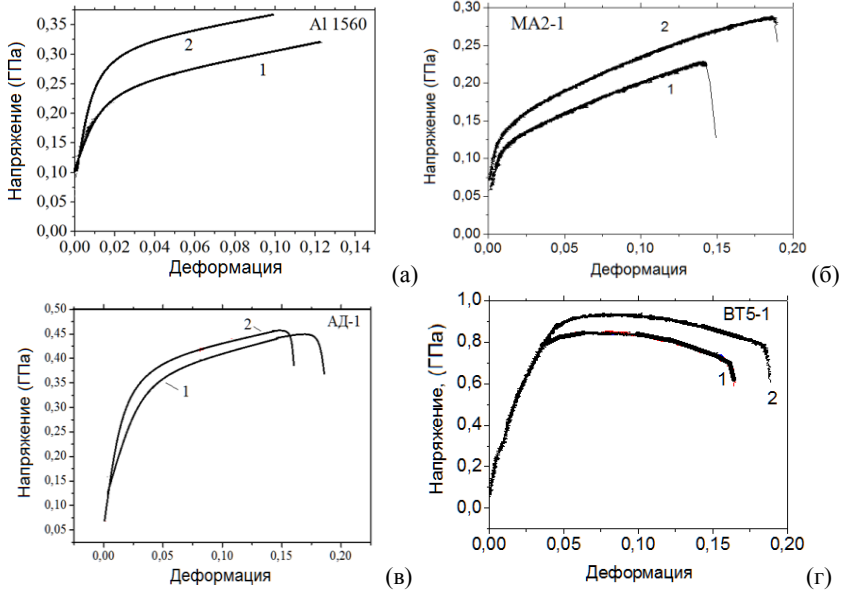


Рисунок 1 – Диаграммы напряжение – деформация при растяжении образцов: (а) – алюминиевого сплава 1560, (б) – магниевого сплава МА2-1, (в) – алюминиевого сплава АД-1, (г) – титанового сплава ВТ-5-1. Линия 1 – состояние поставки, линия 2 – с поверхностными ультрамелкозернистыми слоями. Скорость деформации $\sim 0.008 \text{ c}^{-1}$

На рис. 2 показаны экспериментальные диаграммы напряжение – деформация при высокоскоростном растяжении образцов сплавов с УМЗ слоями. Результаты свидетельствуют об увеличении предельной деформации до разрушения при высокоскоростном растяжении образцов сплавов с поверхностными УМЗ слоями по сравнению со сплавами в состоянии поставки.

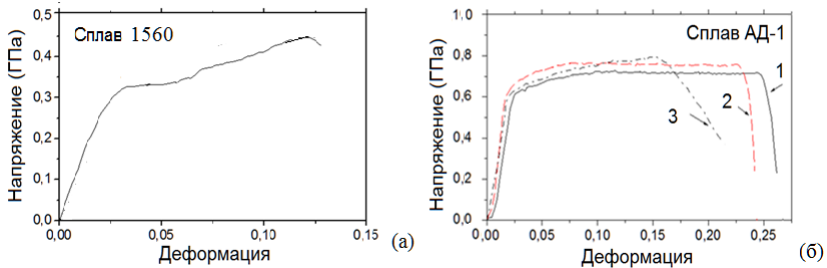


Рисунок 2 – Диаграммы напряжение – деформация при высокоскоростном растяжении образцов с УМЗ поверхностными слоями: (а) сплава 1560 со скоростью деформации 610 c^{-1} , (б) сплава АД-1 со скоростью деформации 500 c^{-1} (линия 3 в состоянии поставки)

Исследование закономерностей деформации и разрушения при квазистатическом осевом сжатии образцов сплавов с УМЗ поверхностными сло-

ями и в состоянии поставки выполнялось в соответствии с ГОСТ 25.503-97 и стандартом ASTM E9 – 09. Испытания проводились на призматических образцах III типа с размерами основания 5 мм и высотой 12 мм. Образцы изготавливались из проката круглого сечения диаметром 60 мм. Испытания на квазистатическое сжатие образцов сплавов при скоростях деформации от 10^{-3} до 10 с^{-1} были выполнены на сервогидравлическом стенде Инстрон 8800 - VHS 40/50-20.

Испытания образцов при динамическом сжатии в диапазоне скоростей от 100 до 1000 с^{-1} были выполнены на оригинальной установке с разрезным стержнем Гопкинсона. На рис. 3 показаны диаграммы деформирования образцов сплава МА2-1 при сжатии со скоростями деформации от 0.001 до 3500 с^{-1} .

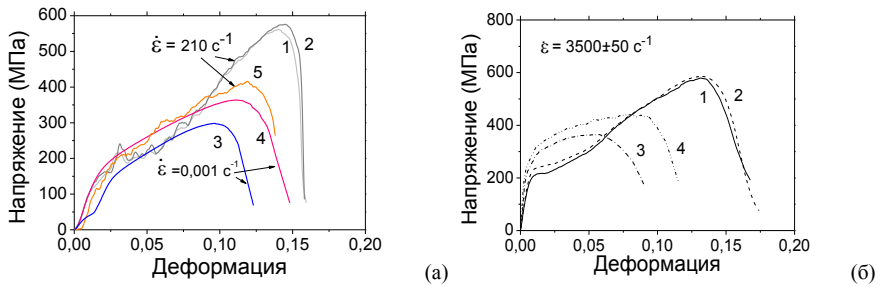


Рисунок 3 – Истинное напряжение – истинная деформация сплава МА2-1: (а) – линии 1,2,3 для состояния поставки, линии 4, 5 для образцов поверхностными УМЗ слоями; (б) – линии 1,2 для состояния поставки, линии 3, 4 для образцов поверхностными УМЗ слоями

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в образцах с поверхностными УМЗ слоями сопротивление высокоскоростному пластическому течению на начальных стадиях деформации образцов выше, чем для сплавов в состоянии поставки.

При этом величина предела прочности и значения предельной деформации до разрушения в образцах с поверхностными УМЗ слоями ниже, чем для сплавов в состоянии поставки.

Испытания на малоцикловую усталость проведены на сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20 на образцах, изготовленных из тонколистового проката алюминиевого сплава 1560, титанового сплава ВТ5-1, магниевое сплава МА8 -1 в состоянии поставки и с УМЗ поверхностными слоями. Исследования выполнены на образцах толщиной 1,5 мм – для алюминиевого сплава 1560, 1,3 мм – для титанового сплава ВТ5-1, 1.95 мм – для магниевое сплава МА8-1.

На рис. 4 показаны экспериментальные диаграммы малоциклового усталостной долговечности образцов сплавов 1560 и ВТ5-1 в состоянии поставки и с УМЗ поверхностными слоями.

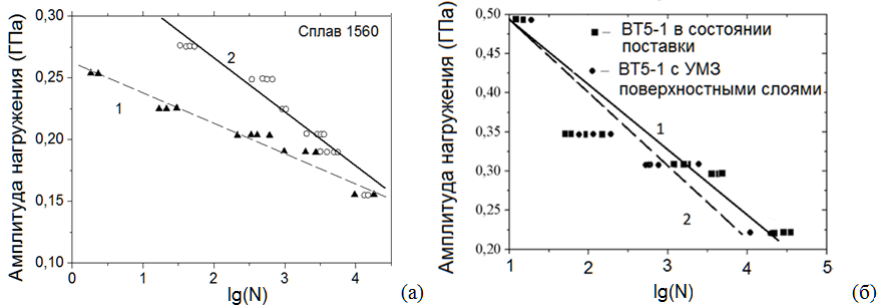


Рисунок 4 – Диаграмма амплитуда напряжения – логарифм числа циклов до разрушения (а) алюминиевого сплава 1560, (б) – титанового сплава VT5-1. Линии 1 – в состоянии поставки, линии 2 – с УМЗ поверхностными слоями

На рис. 5 показаны усталостные трещины в сплаве МА8-1, ориентированные параллельно УМЗ поверхностным слоям.

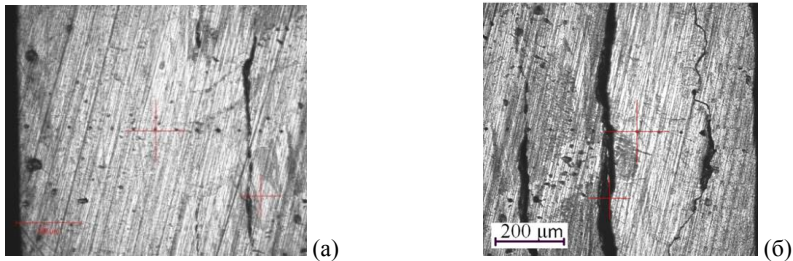


Рисунок 5 – Усталостные трещины в сечении образца сплава МА8-1 после 480 циклов нагружения с амплитудой 229 МПа

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении усталостной долговечности образцов исследованных легких сплавов с УМЗ поверхностными слоями. Проведенный анализ микроструктуры образцов после циклического нагружения показал, что наличие поверхностных слоев с УМЗ структурой приводит к изменению направления распространения усталостных микротрещин и формированию поверхностей разрушения с высокой степенью шероховатости.

Во втором разделе диссертации приведено описание разработанной модели механического поведения легких сплавов с УМЗ структурой при квазистатическом и динамическом нагружениях, результаты численного моделирования закономерностей деформации и разрушения при высокоскоростном продавливании пластин из алюминиевого сплава 1560 и титанового сплава VT5-1 полусферическим индентером.

Механическое поведение в разработанной модели описывается системой уравнений, включающей уравнения сохранения массы, импульса и энергии, нелинейное определяющее уравнение, эволюционные уравнения для параметров модели, учитывающих структуру и возникновение микрповреждений, пор и

микротрещин. Определяющее уравнение использовано в форме, учитывающей поврежденность в объеме материальной частицы среды:

$$\sigma_{ij} = (-p^c \delta_{ij} + S_{ij}^c)(1-D), \quad (1)$$

где D – параметр поврежденности, p^c , S_{ij}^c – давление и компоненты девиатора тензора напряжений в конденсированной фазе, соответственно, δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение состояния для давления использовалось в форме Ми-Грюнайзена. Компоненты девиатора тензора напряжений находятся из решения уравнения:

$$dS_{ij}^c / dt = 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij}^e - (1/3)\dot{\epsilon}_{kk}\delta_{ij}), \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига, $\dot{\epsilon}_{ij}^e, \dot{\epsilon}_{kk}$ – компоненты тензора скорости упругой и объемной деформации, соответственно.

Приращения неупругой деформации находятся из решения уравнения:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \partial g / \partial \sigma_{ij}, \quad (3)$$

где λ – малый множитель, $g = [(3/2)S_{ij}S_{ij}]^{1/2} - \sigma_s$, σ_s – сдвиговая прочность в материальной точке сплошной или поврежденной среды.

Сдвиговая прочность в точке поврежденной среды определяются:

$$\sigma_s = \sigma_s^c - D(\sigma_s^c - \sigma_f), \quad (4)$$

где σ_s^c – величина сдвиговой прочности конденсированной фазы в материальной точке, σ_f – сдвиговая прочность фаз с повреждениями на более низком уровне, зависящая от давления, скорости деформации.

Для крупнокристаллических сплавов σ_s^c описывалось соотношением:

$$\sigma_s^c = [A + B(\epsilon_{eq}^p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_{eq} / \dot{\epsilon}_0)](1 - \theta^{D_T}), \quad (5)$$

где σ_s^c – напряжение течения, $\epsilon_{eq}^p = [(2/3)\epsilon_{ij}^p\epsilon_{ij}^p]^{1/2}$, $\dot{\epsilon}_{eq} = [(2/3)\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}]^{1/2}$ – интенсивность скорости деформации, $\theta = (T - T_r)/(T_m - T)$, T – температура по абсолютной шкале, $T_r = 295$ K, T_m – температура плавления, $\dot{\epsilon}_0 = 1,0$ с⁻¹, n , A , B , C , D_T – коэффициенты материала.

Напряжение течения для сплавов с УМЗ структурой описывалось соотношением:

$$\sigma_{0.2} = [\sigma_0(1 - C_{01}\theta) + K_{HP}(1 - C_{02}\theta)d_g^{-1/2}] \exp[(m_0 + C_m d_g^{-1/2}) \ln(\dot{\epsilon}_{eq} / \dot{\epsilon}_0)], \quad (6)$$

где $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести, σ_0 , C_{01} , C_{02} , m_0 , C_m – параметры материала, d_g – средний размер зерна.

В (7) учтено, что в легких сплавах с УМЗ структурой деформационное упрочнение проявляется слабо и σ_s^c близко к величине $\sigma_{0.2}$. Параметр скоростной чувствительности напряжения течения УМЗ сплавов определяется соотношением

$$m = d(\ln \sigma_s) / d \ln(\dot{\epsilon}_{eq} / \dot{\epsilon}_0) \Big|_{T, \epsilon_{eq}^p} = m_0 + C_m d_g^{-1/2}, \quad (7)$$

где σ_s – напряжение течения, m_0 , C_m – параметры материала, $\dot{\epsilon}_0 = 1,0$ с⁻¹.

Динамика разрушения легких сплавов, обусловленная накоплением повреждений при пластическом течении, учитывалась с помощью параметра поврежденности D :

$$D = \int_{\varepsilon_p}^{\varepsilon_{eq}^p} (1/\varepsilon_f) d\varepsilon_{eq}^p, \quad (8)$$

где ε_f – предельная степень пластической деформации до разрушения в условиях растяжения.

Критерий локального разрушения в этом случае может быть записан в виде

$$D = 1. \quad (9)$$

Разрушение деформируемого тела определяется образованием пространственного кластера разрушенных материальных частиц.

$$\varepsilon_{f \text{ static}} = \varepsilon_{f0} [1 + D_{ef} d_g^{-1/2}] / (1 - \theta), \quad (10)$$

где $\varepsilon_{f \text{ static}}$ – предельная степень пластической деформации растяжения перед разрушением, d_g – средний размер зерна, ε_{f0} , D_{ef} – структурно-чувствительные параметры материала.

Величина предельной степени деформации до разрушения при высокоскоростной деформации определялась из соотношения:

$$\varepsilon_{f \text{ static}} / \varepsilon_{f \text{ dynamic}} = [1 + C_{ef} \ln(\dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0)] / (1 - \theta), \quad (11)$$

где $\varepsilon_{f \text{ dynamic}}$ – предельная степень пластической деформации при высокоскоростном растяжении, $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ c}^{-1}$, C_{ef} – параметр материала, $\theta = (T - T_r) / (T_m - T_r)$.

Зависимости расчетных значений предельной степени деформации до разрушения от логарифма нормированной скорости деформации для УМЗ алюминиевых сплавов в сопоставлении с экспериментальными данными показаны на рис. 6.

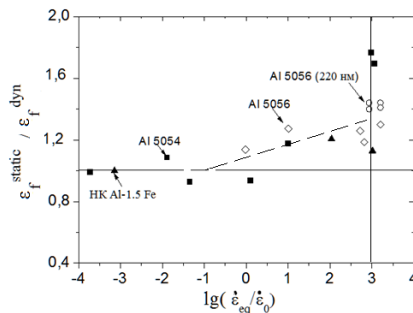


Рисунок 6 – Зависимость нормированной предельной деформации УМЗ алюминиевых сплавов от логарифма нормированной скорости деформации при растяжении

Проведено сопоставление результатов вычислительных экспериментов с использованием разработанной модели с экспериментальными данными,

полученными при продавливании пластин из сплавов 1560 и BT5-1 полусферическим индентером диаметром 20 мм со скоростью от 0,01 до 15 м/с. Испытания проводились на сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20 в соответствии с ГОСТ 1497-84, ГОСТ 10510-80, стандартом ASTM E643-09 на дисках диаметром 60 мм из сплава 1560 толщиной 1,5 мм, BT5-1 толщиной 1,45 мм. Полученные в расчетах значения предельной деформации ε_f согласуются с экспериментальными данными в пределах 5 %. Отметим, что модель адекватно описывает процесс деформации в зоне пластической вытяжки, где скорость деформации изменяется в пределах двух порядков.

Предложенная модель позволяет описывать закономерности пластического течения и разрушения легких сплавов в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с $^{-1}$.

В третьем разделе диссертации приведены результаты численного исследования влияния толщины ультрамелкозернистых поверхностных слоев на сопротивление пластическому течению поликристаллических легких сплавов при высокоскоростном растяжении, влияния бимодального распределения зерен на сопротивление высокоскоростной деформации и разрушение легких сплавов, а также процессов деформации и разрушения УМЗ легких сплавов в условиях знакопеременного циклического нагружения.

Модель, учитывающая влияние структурных факторов на сопротивление пластическому течению в широком диапазоне скоростей деформации и температур, включает систему уравнений сохранения массы, импульса, энергии, определяющее уравнение, кинетическое уравнение для параметра поврежденности, соотношение для оценки температуры при высокоскоростной деформации, кинетическое уравнение для определения приращения компонент тензора пластической деформации, критерии пластичности и разрушения, граничные и начальные условия.

Критерий пластического течения был использован в форме:

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_s^2. \quad (12)$$

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + C_5 (\varepsilon_{eq}^p)^{n_1} + C_6 d_g^{-1/2} + C_2 \exp\{-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_{eq-0})\},$$

где C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 – постоянные материала, $\dot{\varepsilon}_{eq} = \sqrt{(2/3)\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$, $\dot{\varepsilon}_{eq} = 1,0$ с $^{-1}$,

$\varepsilon_{eq}^p = \int_0^t [(2/3) \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p]^{1/2} dt$, T – температура по абсолютной шкале, d_g – средний размер зерен в объеме материальной частицы.

Локальный параметр поврежденности D определялся соотношением:

$$D = \int_0^{t_f} (\dot{\varepsilon}_{eq}^n / \varepsilon_f^n) dt, \quad (13)$$

где $\dot{\varepsilon}_{eq}^n = [(2/3)\dot{\varepsilon}_{ij}^n \dot{\varepsilon}_{ij}^n]^{1/2}$, ε_f^n – пороговая величина интенсивности неупругой деформации, t_f – время до локального разрушения.

Для расчета порогового значения неупругой деформации использовалось соотношение, учитывающее распределение зерен по размерам в объеме материала:

$$\varepsilon_f^n (d_g) / \varepsilon_f^{CG} = A_2 + (A_1 + A_2) / (1 + \exp[(x - x_0) / \bar{x}]),$$

$$\varepsilon_f^{CG} = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}, \quad (14)$$

где ε_f^{CG} – деформация до разрушения в крупнозернистом материале, x соответствует $d_g^{-1/2}$, A_1 , A_2 , x_0 , $\bar{x}$ – материальные постоянные, $T^* = \sigma_{sp}/P_{HEL}$, $P^* = p/P_{HEL}$, P_{HEL} – давление, соответствующее амплитуде упругого предвестника, D_1 , D_2 – постоянные материала.

На рис. 8 показаны результаты прогнозов изменения пластичности УМЗ сплавов в зависимости от средних размеров зерен, полученные с использованием (15).

Модель применялась для численного исследования влияния толщины УМЗ слоев на предельные деформации сплавов и сопротивление пластическому течению в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} .

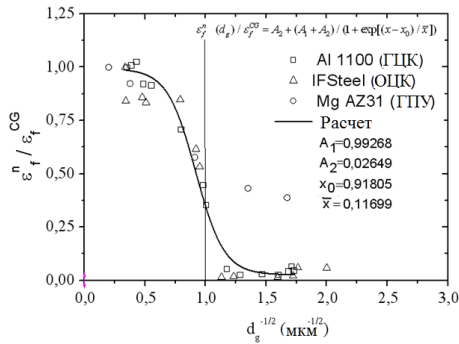


Рисунок 8 – Нормированные значения предельной деформации при растяжении от $d_g^{-1/2}$

На рис. 9 показаны зависимости предельных деформаций при растяжении от скорости деформации для образцов: (а) – магниевого сплава МА8-1 (аналог AZ91D), (б) – алюминиевого сплава 1560. Линии 1 соответствуют образцам с размерами зерна 40 мкм, линии 2 соответствуют образцам с поверхностными УМЗ слоями.

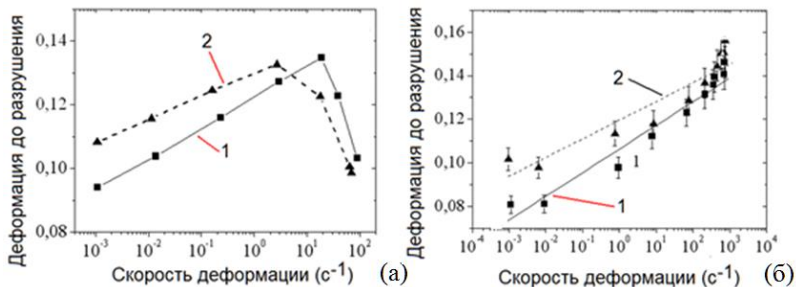


Рисунок 9 – Зависимости предельных деформаций растяжения до разрушения от скорости деформации

На рис. 10 (а) показаны экспериментальные диаграммы деформирования (линии 1,2) образцов сплава МА2 -1, расчетные диаграммы (линии 3-6) для образцов с УМЗ поверхностными слоями. Линия 1 соответствует образцу сплава в состоянии поставки. Линии 3 и 2 соответствуют расчетным и экспериментальным диаграммам при толщине УМЗ слоя 100 мкм, размерах зерна в образце (40 мкм) и субмикроструктурном слое – 400 нм. Линии 4, 5, 6 соответствуют толщинами УМЗ слоя 150, 250, 500 мкм. На рис. 10 (б) показаны расчетные диаграммы деформации образцов сплава МА2-1 толщиной 2 и 4 мм с УМЗ поверхностными слоями толщиной 150 мкм при скоростях деформации 10^3 , 10^2 , 10^1 , $0,1$ с $^{-1}$.

Влияние поверхностного слоя на сопротивление макроскопическому пластическому течению с ростом толщины пластин уменьшается. Применение модели позволяет получить хорошее качественное и количественное согласие закономерностей деформации образцов сплавов с УМЗ поверхностными слоями.

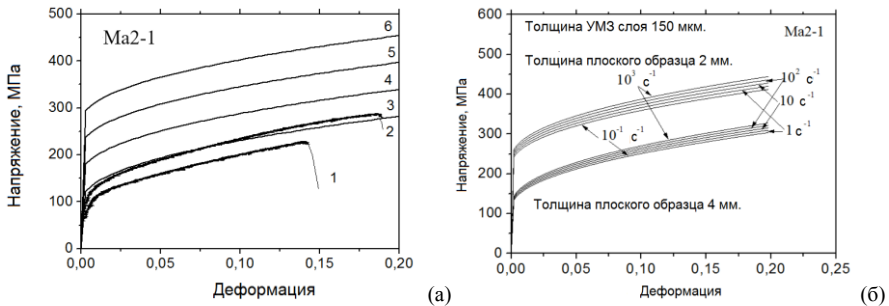


Рисунок 10 (а) – Напряжение – деформация образцов сплава МА2-1 с УМЗ поверхностными слоями толщиной 0, 100, 150, 250, 500 мкм при растяжении, (б) – расчетные диаграммы деформации образцов сплава МА2-1 с УМЗ поверхностными слоями при скорости деформации 10^3 , 10^2 , 10^1 , $0,1$ с $^{-1}$

Методом численного моделирования исследованы закономерности деформации, повреждения и разрушения легких сплавов с бимодальным распределением зерен по размерам. Установлено, что при динамическом сжатии зарождение повреждений происходит локально в объеме УМЗ материала вблизи границ крупных зерен. На рисунке 11(а) показаны зависимости предельной деформации от удельного объема крупных зерен в сплавах с бимодальным распределением размеров зерен. Экспериментальные данные показаны заполненными символами. На рис.11(б) линия 1 получена для крупнозернистого магниевого сплава AZ31 (аналог МА2-1).

Линия 2 получена для сплава МА2-1 с бимодальной зеренной структурой при относительном объеме крупных зерен 70 %. Линия 3 получена для сплава МА2-1 с бимодальной зеренной структурой при удельном объеме крупных зерен ~ 10 %. Линия 4 получена для сплава 1560 с бимодальной зеренной структурой при относительном объеме крупных зерен 30 %. Линия 5

демонстрирует снижение динамической пластичности алюминиевого сплава с бимодальной зеренной структурой при удельном объеме крупных зерен $\sim 10\%$.

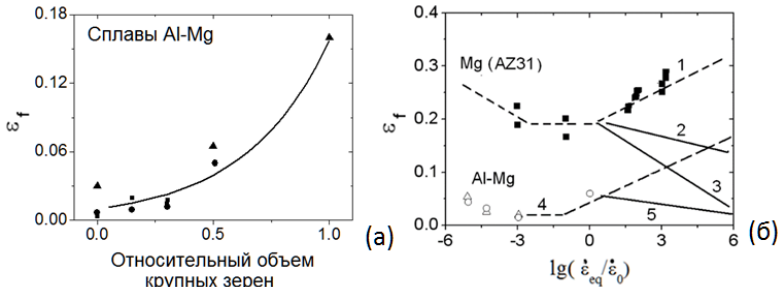


Рисунок 11 (а) – зависимость деформации до разрушения от удельного объема крупных зерен в алюминиевом сплаве с бимодальным распределением размеров зерен; (б) – зависимость деформации до разрушения от десятичного логарифма нормированной скорости деформации в алюминиевом и магниевом сплавах

Разработанная модель и результаты численного моделирования могут быть использованы для оценки динамической прочности и пластичности легких сплавов, обрабатываемых методами интенсивной пластической деформации.

Методом численного моделирования исследованы закономерности деформации и разрушения легких сплавов с УМЗ структурой в условиях циклического нагружения. Получено хорошее согласие усталостной долговечности алюминиевых сплавов с поликристаллической и УМЗ структурой с экспериментальными данными.

Разработанная модель может использоваться для описания циклического нагружения элементов конструкций в малоцикловой области. Модель позволяет описывать закономерности циклического упрочнения и разупрочнения сплавов в малоцикловой области нагружения в изотермических условиях. Модель учитывает влияние распределения зерен по размерам в диапазоне от 100 мкм до 100 нанометров на механическое поведение сплавов.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработана физико-математическая модель механического поведения легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам, позволяющая описывать процессы деформации, повреждения и разрушения в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} .

2. Получены результаты комплексных экспериментальных и численных исследований закономерностей деформации и разрушения легких сплавов с кубической гранецентрированной и гексагональной плотноупакованной решетками (АД-1, алюминиевого сплава 1560 (АМг-6), МА2-1, ВТ5-1) в условиях квазистатического и высокоскоростного растяжения, сжатия, цикличе-

ского знакопеременного нагружения в малоцикловой области. Установлено, что повышение сопротивления деформированию, пределов прочности при растяжении у сплавов с ультрамелкозернистыми поверхностными слоями в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} сочетается с повышением предельной деформации до разрушения.

3. В результате экспериментальных и численных исследований установлены закономерности деформации и разрушения легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам. Определены зависимости параметров деформационного упрочнения и предельной деформации до разрушения при высокоскоростном растяжении от параметров структуры поверхностных ультрамелкозернистых упрочненных слоев в листовом прокате легких сплавов.

4. В результате экспериментальных исследований определены закономерности усталостной долговечности проката легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам. Обнаружено, что зависимости $(\Delta\sigma/2 - \log_{10} N_f)$ в области малоциклового нагружения (до $N_f < 10^4$) сплавов магния МА2-1, МА8-1 и алюминия 1560, обработанных методами интенсивной поверхностной пластической деформации, могут быть аппроксимированы линейными функциями. Для исследованных сплавов формирование слоев с ультрамелкозернистой структурой приводит к повышению числа циклов до разрушения N_f при фиксированных амплитудах напряжений $\Delta\sigma/2$ по сравнению со сплавами с поликристаллической структурой. Повышение малоцикловой долговечности легких сплавов с ультрамелкозернистыми слоями связано с отклонением траектории формирующихся усталостных трещин и распространением их вдоль упрочненных слоев.

Список трудов по теме диссертационного исследования:

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Скрипняк В. А. Динамическая прочность ультрамелкозернистых сплавов при интенсивных импульсных воздействиях / В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк**, А. А. Козулин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 12/2. – С. 255–257. – 0,19 / 0,07 п.л.

2. Скрипняк Е. Г. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение алюминиевых и магниевых сплавов при динамических воздействиях / Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк**, А. А. Козулин, В. А. Скрипняк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 12/2. – С. 235–242. – 0,81 / 0,3 п.л.

3. Скрипняк В. А. Механическое поведение ультрамелкозернистых сплавов при высоких скоростях деформации / В. А. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк** // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 2496–2498. – 0,15 / 0,13 п.л.

4. **Скрипняк Н. В.** Динамика разрушения алюминий-магниевого сплава АМг6 [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования (электронный научный журнал). – 2013. – № 6. – С. 647–655. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-razrusheniya-alyuminiy-magnievogo-splava-amg6> (дата обращения 26.08.2016). – 0,5 п.л.

5. Скрипняк В. А. Влияние зеренной структуры материалов на усталостную долговечность в малоцикловой области / В. А. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк**, В. В. Скрипняк, А. А. Козулин, Е. Г. Скрипняк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 83–85. – 0,19 / 0,06 п.л.

6. **Скрипняк Н. В.** Влияние структурированных поверхностных слоев на физические механизмы циклической долговечности легких сплавов / Н. В. Скрипняк, В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, В. В. Скрипняк, И. К. Ваганова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 89–91. – 0,19 / 0,06 п.л.

7. **Скрипняк Н. В.** Механическое поведение субмикроструктурных сплавов алюминия и магния в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^2 с $^{-1}$ / Н. В. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, В. А. Скрипняк, В. В. Скрипняк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 92–94. – 0,19 / 0,07 п.л.

8. **Скрипняк Н. В.** Особенности разрушения алюминий-магниевого сплава АМг6 при высокоскоростной деформации // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 96–101. – 0,38 п.л.

в переводной версии журнала, индексируемой Web of Sciences:

Skiprnyak N. V. The features of fracture behavior of an aluminum-magnesium alloy AMg- 6 under high-rate straining // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, is. 5. – P. 691–697. – DOI: 10.1007/s11182-015-0552-3.

Web of Sciences u Scopus:

9. Skripnyak V. A. Fracture of light alloys with structured surface layers under dynamic loadings / V. A. Skripnyak, E. G. Skripnyak, **N. V. Skripnyak**, L.W. Meyer, N. Herzig // 19th European Conference on Fracture (ECF19) : Proceedings. Kazan, Russia, August 26–31, 2012. – Kazan, 2012. – 497 proc. – 8 p. – 0,81 / 0,3 п.л.

10. **Skiprnyak N. V.** Failure mechanisms of light alloys with a bimodal grain size distribution / N. V. Skripnyak, E. G. Skripnyak, V. A. Skripnyak, V. V. Skripnyak, I. K. Vaganova // World Congress on Computational Mechanics (WCCM2014). 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V). 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI) : Ebook Congreso Mundial. Barcelona, Spain, July 20–25, 2014. – Barcelona, 2014. – T. IV. – P. 3915–3925. – 0,63 / 0,20 п.л.

Публикации в других научных изданиях:

11. Скрипняк В. А. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение сплавов алюминия и магния при динамических воздействиях / В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк**, А. А. Козулин // XIII Харитоновские чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : труды международной конференции. Саров, 14–18 марта 2011 г. – Саров, 2011. – С. 404–408. – 0,13 / 0,06 п.л.

12. **Скрипняк Н. В.** Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение сплавов алюминия и магния при динамических воздействиях // XXXVII Гагаринские научные чтения : труды Международной молодежной научной конференции. Москва, 05–08 апреля 2011 г. – М., 2011. – Т. 1. – С. 228–230. – 0,19 п.л.

13. Скрипняк Е. Г. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение сплавов алюминия и магния при динамических воздействиях / Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк**, А. А. Козулин, В. А. Скрипняк // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы седьмой Всероссийской научной конференции, посвященной 50-летию полета Ю. А. Гагарина и 90-летию со дня рождения основателя и первого директора НИИ ПММ ТГУ А. Д. Колмакова. Томск, 12–14 апреля 2011 г. – Томск, 2011. – С. 269–270. – 0,13 / 0,05 п.л.

14. **Скрипняк Н. В.** Исследование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение сплавов при высокоскоростной деформации // Успехи химической физики : сборник тезисов докладов на всероссийской молодежной конференции. Черноголовка, 21–23 июня 2011 г. – Черноголовка, 2011. – С. 146–147. – 0,06 п.л.

15. Скрипняк В. А. Деформация и разрушение объемных наноструктурных материалов при ударно-волновых воздействиях. Компьютерное моделирование на мезоскопических уровнях / В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк** // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов : материалы конференции. Томск, 05–09 сентября 2011 г. – Томск, 2011. – С. 467. – 0,25 / 0,1 п.л.

16. Скрипняк В. А. Механическое поведение сплавов с наноструктурированным поверхностным слоем при высоких скоростях деформации / В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, **Н. В. Скрипняк** // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2011) : материалы IV международной конференции. Москва, 25–28 октября 2011 г. – С. 496–498. – 0,19 / 0,08 п.л.

17. Жармухамбетова А. М. Изучение фрактальных размерностей поверхностей разрушения магниевых сплавов / А. М. Жармухамбетова, А. А. Козулин, **Н. В. Скрипняк** // Физические методы в естественных науках : материалы 50-й юбилейной международной научной студенческой

конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск, 13–19 апреля 2012 г. – С. 44–45. – 0,06 / 0,04 п.л.

18. **Скрипняк Н. В.** Исследования прочностных характеристик ультрамелкозернистых магниевых сплавов при осевом сжатии / Н. В. Скрипняк, В. А. Скрипняк, А. А. Козулин // Актуальные проблемы прочности : тезисы докладов 52-й международной научной конференции. Уфа, 04–08 июня 2012 г. – Уфа, 2012. – С. 168. – 0,06 / 0,04 п.л.

19. Скрипняк В. А. Механическое поведение легких сплавов при высоких скоростях деформации / В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, Л. В. Майер, Н. Херциг, **Н. В. Скрипняк** // Shock Waves in Condensed Matter : Proceedings International Conference. Kiev, September 16–21, 2012. – С. 192–196. – 0,31 / 0,06 п.л.

20. Скрипняк В. В. Циклическая долговечность магниевого сплава с наноструктурированными поверхностными слоями / В. В. Скрипняк, А. М. Жармухамбетова, **Н. В. Скрипняк** // Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2012) : материалы Всероссийской конференции молодых ученых. Новосибирск, 29 ноября – 02 декабря 2012 г. – Новосибирск, 2012. – С. 145–148. – 0,25 / 0,13 п.л.

21. Жармухамбетова А. М. Фрактальные размерности поверхностей усталостного разрушения легких сплавов с наноструктурированными поверхностными слоями / А. М. Жармухамбетова, **Н. В. Скрипняк**, В. В. Скрипняк, И. К. Ваганова // Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2012) : материалы Всероссийской конференции молодых ученых. Новосибирск, 29 ноября – 02 декабря 2012 г. – Новосибирск, 2012. – С. 84–89. – 0,25 / 0,1 п.л.

22. Скрипняк В. В. Многоуровневое моделирование процессов деформации и разрушения в структурированных конденсированных системах / В. В. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, С. В. Чахлов, В. А. Скрипняк, И. К. Ваганова, **Н. В. Скрипняк** // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред : сборник тезисов международной конференции. Пермь, 18–22 февраля 2013 г. – Пермь, 2013. – С. 311. – 0,06 / 0,02 п.л.

23. **Скрипняк Н. В.** Влияние структуры легких сплавов на малоцикловую усталость / Н. В. Скрипняк, А. А. Козулин, В. А. Скрипняк, Е. Г. Скрипняк, В. А. Красновейкин // XV Харитоновские чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны : материалы международной конференции. Саров, 18–22 марта 2013 г. – Саров, 2013. – С. 474–477. – 0,33 / 0,14 п.л.

24. **Скрипняк Н. В.** Особенности усталостного разрушения легких сплавов с наноструктурированными поверхностными слоями / Н. В. Скрипняк, А. М. Жармухамбетова, В. В. Скрипняк, И. К. Ваганова // Высокие технологии в современной науке и технике : материалы II Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 27–29 марта 2013 г. – Томск, 2013. – С. 229–233. – 0,06 / 0,03 п.л.

25. **Скрипняк Н. В.** Влияние наноструктурированного поверхностного слоя на циклическую долговечность магниевого сплава / Н. В. Скрипняк,

А. М. Жармухамбетова, В. В. Скрипняк // Высокие технологии в современной науке и технике : материалы II Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 27–29 марта 2013 г. – Томск, 2013. – С. 233–236. – 0,06 / 0,03 п.л.

26. **Скрипняк Н. В.** Влияние ультрамелкозернистой структуры на механическое поведение легких сплавов при динамическом нагружении // Успехи химической физики : материалы II Всероссийской молодежной конференции. Черноголовка, 19–24 мая 2013 г. – Черноголовка, 2013. – С. 199. – 0,06 п.л.

27. Жармухамбетова А.М. Влияние наноструктурированных поверхностных слоев на циклическую долговечность легких сплавов / А. М. Жармухамбетова, **Н. В. Скрипняк** // Успехи химической физики : материалы II Всероссийской молодежной конференции. Черноголовка, 19–24 мая 2013 г. – Черноголовка, 2013. – С. 227. – 0,06 / 0,03 п.л.

28. **Скрипняк Н. В.** Влияние зеренной структуры легких сплавов на усталостную долговечность // Инновации в материаловедении : сборник тезисов Всероссийской молодежной научной конференции. Москва, 03–05 июня 2013 г. – Москва, 2013. – С. 303. – 0,06 п.л.

29. Skripnyak E. G. Computer simulation of mechanical behaviour of ultrafine-grained alloys at high strain rates / E. G. Skripnyak, **N. V. Skripnyak**, V. A. Skripnyak, V. V. Skripnyak, I. K. Vaganova // MIT-2013 : zbornik radova konferencije. Vrnjačkoj Banji, Septembra 05–09, 2013; Bečićima, Septembra 10–14, 2013. – Belgrad, 2014. – P. 137. – 0,06 / 0,02 п.л.

30. **Skripnyak N. V.** Low cyclic fatigue of light alloys with a bimodal grain size distribution / N. V. Skripnyak, V. A. Skripnyak // Theory for Accelerated Materials Design : New Tool for Materials Science dedicated to the opening of Interdisciplinary Materials Modeling and Development Laboratory at NUST «MISIS» : book of abstracts. – Moscow, December 01–02, 2014. – P. 460. – 0,06 п.л.

31. Skripnyak V. A. Mechanical behavior of light alloys with bimodal grain size distribution / V. A. Skripnyak, E. G. Skripnyak, **N. V. Skripnyak** // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 205–213. – DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.205. – 0,56 / 0,19 п.л.

32. Skripnyak N. V. Fracture of thin metal sheets with distribution of grain sizes in the layers / N. V. Skripnyak, V. V. Skripnyak, V. A. Skripnyak // 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2016) : Proceedings. Crete Island, Greece, June 05–10, 2016. – E 11099 proc. – 11 p. – 1,27 / 0,5 п.л.

Подписано в печать 20.10.2016 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 27-10/16
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а