

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Скрипняк Натальи Владимировны на тему «Механическое поведение легких алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, модифицированных методами интенсивной пластической деформации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 -Механика деформируемого твердого тела

Актуальность избранной темы

В настоящее время в различных областях техники широко используются легкие конструкционные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, обладающие высокими удельными механическими свойствами. Для повышения механических свойств легких сплавов широко применяются технологии интенсивной пластической деформации, позволяющие сформировать на поверхности или в объеме металлов и сплавов ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру.

Рациональное проектирование конструкций требует применения физико-математических моделей, адекватно описывающих поведение сплавов с учетом зеренной структуры. Особую важность имеют результаты прогноза прочности и усталостной долговечности конструкций авиакосмической техники, скоростных судов и деталей приборов. Поскольку элементы конструкций испытывают динамические и вибрационные нагрузки, для решения динамических краевых задач, связанных с описанием деформирования и разрушения структурированных легких сплавов, востребованы эффективные численные алгоритмы.

Тема исследований диссертационной работы представляет не только интерес для понимания особенностей поведения сплавов с УМЗ структурой в условиях квазистатического и динамического нагружения, но и имеет важное прикладное значение. Этим обусловлена несомненная актуальность диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Научные результаты диссертационной работы хорошо обоснованы, так как опираются на экспериментальные данные, полученные на современном сертифицированном испытательном оборудовании по методикам, соответствующим стандартам ГОСТ и ASTM, а также строгие математические методы и подходы, принятые в механике деформируемого твердого тела. Теоретические результаты и разработанная физико-математическая модель не противоречат положениям механики деформируемого твердого тела, результатам экспериментальных и теоретических работ других авторов, опубликованных в ведущих реферируемых изданиях, и не вызывают сомнений.

Достоверность и научная новизна исследований диссертационной работы

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается математической корректностью постановок задач и подтверждается хорошим согласием результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными других авторов. Полученные в расчетах параметры (значений напряжения течения, предельной деформации ϵ_f для скоростей деформации в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 с⁻¹) согласуются с экспериментальными данными в пределах 5 %. Модель адекватно описывает процесс деформирования в зоне пластической вытяжки, где скорость деформации изменяется в пределах двух порядков. Предложенная модель позволяет описывать закономерности пластического течения и разрушения алюминиевых, магниевых и титановых сплавов с УМЗ структурой в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с⁻¹.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих результатах, полученных автором:

- В разработанной физико-математической модели механического поведения легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации, позволяющей расширить

диапазон скоростей деформации (до 10^3 с^{-1}) для адекватного описания процессов деформации, повреждения и разрушения.

- Установленных закономерностях деформации и разрушения сплавов (АД-1, алюминиевого сплава 1560 (АМг-6), МА2-1, ВТ5-1) в условиях квазистатического и высокоскоростного растяжения, сжатия, циклического знакопеременного нагружения в малоциклово́й области. На основании полученных экспериментальных данных показано, что повышение сопротивления деформированию, пределов прочности при растяжении у сплавов с УМЗ поверхностными слоями в практически важном диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} сочетается с повышением предельной деформации до разрушения.
- Установленных зависимостях параметров деформационного упрочнения и предельной деформации до разрушения при высокоскоростном растяжении от параметров структуры поверхностных ультрамелкозернистых упрочненных слоев в листовом прокате легких сплавов.
- Установленных закономерностях малоциклово́й усталостной долговечности проката легких сплавов, обработанных методами интенсивной пластической деформации и имеющих бимодальные распределения зерен по размерам. Обнаружено, что зависимости среднее напряжение цикла от логарифма числа циклов до разрушения в области малоциклового нагружения сплавов магния МА2-1, МА8-1 и алюминия 1560 (АМг-6), обработанных методами интенсивной поверхностной пластической деформации, могут быть аппроксимированы линейными функциями. Показано, что повышение малоциклово́й долговечности легких сплавов с УМЗ поверхностными слоями связано с отклонением траектории формирующихся усталостных трещин и распространением их вдоль упрочненных слоев.

Значимость результатов диссертационной работы для науки и практики

Полученные диссертантом результаты расширяют и уточняют представления о закономерностях пластической деформации легких сплавов с неоднородным распределением зерен по размерам, сформированном при модификации сплавов методами интенсивной пластической деформации.

Полученные результаты расширяют теоретические основы и возможности численного исследования процессов деформирования важного класса сплавов с высокими удельными механическими характеристиками. Развитый подход к двухуровневому численному моделированию механического поведения легких сплавов с учетом слоистых УМЗ структур, зеренных структур с бимодальным распределением зерен в объеме в условиях динамического нагружения расширяет возможности использования компьютерного моделирования для прогноза механических свойств структурированных сплавов. Разработанные алгоритмы могут быть использованы для решения задач гармонического анализа и усталостной долговечности элементов конструкций из легких сплавов с поверхностными УМЗ структурами.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы как при проектировании узлов и элементов конструкций из легких сплавов с УМЗ структурой, так и выработке рекомендаций при отработке технологий модификации легких сплавов методами интенсивной пластической деформации. Предложенные диссертантом модель и ее численная реализация могут применяться инженерами-проектировщиками для прогнозирования прочности и усталостной долговечности деталей и узлов конструкций из легких сплавов.

В целом значимость диссертации для практики заключается в возможности получения научно обоснованных прогнозов усталостной долговечности, предельной деформации и сопротивления пластической деформации легких сплавов с УМЗ структурой в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с^{-1} при проведении инженерного анализа проектируемых легких конструкций.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные соискателем новые результаты, выводы и рекомендации могут быть применены для прогноза НДС конструкций из легких сплавов с модифицированной зеренной структурой в машиностроении, приборостроении, авиастроении и других отраслях. В частности, полученные результаты по влиянию поверхностных ультрамелкозернистых слоев на усталостную долговеч-

ность и сопротивление высокоскоростной деформации могут найти широкое применение при производстве легких конструкций авиакосмической техники.

Результаты диссертации Н.В. Скрипняк могут представлять интерес для научных коллективов в учреждениях РАН и вузах, таких как: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, ИПМех РАН, ИФПМ СО РАН, ИПМ СО РАН, Института механики УрО РАН, ИМСС УрО РАН, ИМАШ УрО РАН, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Санкт-Петербургского государственного университета, Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева, Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Национального исследовательского Томского политехнического университета и ряда других российских организаций.

Структура и объем диссертации

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.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы актуальность темы исследования, цели и задачи исследования, новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, краткий обзор методов исследования, сведения об апробации результатов на международных и всероссийских научных конференциях, сведения о связи диссертации с Федеральными целевыми программами Минобрнауки.

Первый раздел посвящен вопросам, связанным с проведением экспериментальных исследований закономерностей деформации и разрушения алюминиевых, магниевых и титановых сплавов (АД-1, алюминий-сплав 1560 (АМг-6), МА2-1, ВТ5-1) в условиях квазистатического и высокоскоростного растяжения, сжатия, циклического знакопеременного нагружения в малоцикловой области.

Представлены результаты экспериментальных исследований механического поведения образцов сплавов в поликристаллическом состоянии (состоянии поставки) и с модифицированной структурой на поверхности образцов в условиях квазистатического нагружения, высокоскоростной деформации, циклического нагружения в малоцикловой области.

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

Второй раздел диссертации посвящен моделированию механического поведения легких сплавов с УМЗ структурой при квазистатическом и динамическом нагружениях.

Разработанная физико-математическая модель учитывает влияние структурных факторов на сопротивление пластическому течению в широком диапазоне скоростей деформации и температур. Модель разработана в рамках механики деформируемого твердого тела, включает систему уравнений сохранения массы, импульса, энергии, определяющие уравнения, 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.

Представлены результаты численного моделирования закономерностей деформации и разрушения при высокоскоростном продавливании пластин из алюминиевого сплава 1560 (АМг-6) и титанового сплава ВТ5-1 полусферическим индентером. Проведено сопоставление результатов вычислительных экспериментов с использованием разработанной модели с экспериментальными данными, полученными при продавливании пластин из сплавов 1560 (АМг-6) и ВТ5-1 полусферическим индентером диаметром 20 мм со скоростью от 0,01 до 15 м/с.

Третий раздел диссертации посвящен численному исследованию влияния толщины ультрамелкозернистых поверхностных слоев на сопротивление пластическому течению поликристаллических легких сплавов при высокоскоростном растяжении. Представлены результаты численных исследований влияния бимодального распределения зерен на сопротивление высокоскоростной

деформации и разрушение легких сплавов. Приведены результаты численного моделирования знакопеременного циклического нагружения ультрамелкозернистых легких сплавов.

Содержание автореферата корректно отражает содержание диссертации.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы

Диссертационная работа не лишена недостатков:

1) Полученные в работе экспериментальные данные и результаты численного моделирования (на рис. 1.16, 1.20, 3.11, 3.13, 3.15) свидетельствуют о формировании на мезоскопическом уровне полос локализации пластической деформации. Развитие мезоскопических полос локализации деформации приводит к зарождению повреждений и разрушению. Представляется важным вопрос о влиянии параметров зеренных структур и поверхностных ультрамелкозернистых слоев на формирование полос локализации. Диссертация выиграла бы, если бы этот вопрос был обсужден в диссертации.

2) В первом разделе на стр. 21 указывается, что для слоя толщиной 10 мкм имеется широкое распределение зерен по размерам, но границы не указаны. Далее в работе были определены параметры зеренных структур в образцах сплавов, модифицированных методами интенсивной пластической деформации (рис. 3.1, 3.29), однако не указано для каких объемов материала проводились исследования. Выбор геометрических параметров модельного объема важен для получения прогноза механических параметров (макропараметров). Следовало бы более подробно изложить методику выбора размеров модельных объемов и указать характерный размер.

3) На стр. 25, в перечислении марок сплавов необходимо было указать оба аналога (российский и зарубежный). Далее по тексту возникает путаница на стр. 93 в фразе "... образца алюминиевого сплава Al 7075 (аналог сплава 1560) ...", так как аналогом сплава 7075 является российский сплав В95. В тоже время, в выводах по диссертационной работе аналог алюминиевого сплава 1560 указан верно АМг-6.

4) Построение определяющих соотношений твердого деформированного тела для случая больших неупругих деформаций требует обоснования выбираемых объективных производных для тензорных мер напряжений и деформаций, которые в свою очередь дополнительно должны удовлетворять условию энергетической сопряженности. Часто для описания динамического деформирования изотропных материалов используется квазилинейная связь производной Яумана от тензора напряжений Коши (σ^J) с упругой частью тензора деформации скорости (d^e) в форме гипопругого закона, но у данного подхода имеются недостатки [Аннин Б. Д., Коробейников С. Н. Допустимые формы упругих законов деформирования в определяющих соотношениях упруго-пластичности // Сиб. ж. инд. мат., 1998, т.1, №1], в частности материал, недостигший предела текучести на замкнутых циклических нагружениях, будет давать диссипацию, а также могут появляться нефизические осцилляции напряжений при определенных видах нагружения. Поэтому необходимы дополнительные теоретические исследования при использовании конкретных объективных производных от тензорных переменных, характеризующих напряженно-деформированное состояние.

5) По тексту диссертации имеются незначительные опечатки, например: в уравнении для баланса массы (2.20) пропущен знак минус; в третьем уравнении (3.4) для производной Яумана D/Dt вместо ϵ_{ik} должен быть α_{ik} ; на стр. 46 в последнем абзаце амплитуда должна быть указана в ГПа.

Указанные замечания не снижают высокий уровень оценки представленной соискателем диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, включая 8 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, 2 статьи в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, и 3 статьи в сборниках материалов зарубежных конференций.

Таким образом, диссертация Скрипняк Натальи Владимировны «Механическое поведение легких алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, модифицированных методами интенсивной пластической деформации» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. N 842, к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени.

Официальный оппонент
научный сотрудник лаборатории физических
основ прочности
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения
Российской академии наук
кандидат физико-математических наук,
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1,
рабочий телефон: 8-(342)-237-84-61
E-mail: buv@icmm.ru
www.icmm.ru
«01» декабря 2016 г.

Баяндин Юрий Витальевич

Я, Баяндин Юрий Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Скрипняк Натальи Владимировны, и их дальнейшей обработкой.

Подпись кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Ю.В. Баяндина подтверждаю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН



Н.А. Юрлова