

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Васильева Евгения Викторовича
«Кинетические особенности механизмов деформации магниевых сплавов при статическом и динамическом нагружении», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность диссертационной работы

Важнейшим научным направлением современного материаловедения является создание сплавов с комплексом оптимальных свойств. По этой причине диссертационная работа Васильева Е.В., безусловно, актуальна и своевременна. Во-первых, рассмотренные в ней сплавы на основе магния находят все большее применение на практике в силу своей легкости, высокой удельной прочности и биосовместимости, но, с другой стороны, эти сплавы малопластичны, отличаются низкой усталостной прочностью и асимметрией деформационного поведения. Следует отметить, что изучение структуры и свойств магниевых сплавов проводится во всем мире (об этом также упоминается в тексте диссертации): активно обсуждаются особенности различных механизмов деформации в ГПУ-решетке и их взаимосвязь в тех или иных условиях, рассматривается влияние структуры и текстуры на деформируемость образцов, разрабатываются методики интенсивного воздействия для ослабления базисной текстуры, ведется поиск новых подходов к описанию деформационных процессов.

Работы Васильева Е.В. **актуальна**, поскольку в процессе исследования им применены современные методы деформационного воздействия (которые привели к формированию в сплаве ZK60 однородной мелкозернистой структуры с широким диапазоном механических свойств), разработана оригинальная методика анализа видеоданных и использован метод акустической эмиссии (АЭ) для визуализации процессов двойникования и деформационного скольжения (фактически, это позволило наблюдать деформационные процессы в магнии методом *in situ*), и предложена феноменологическая модель кинетики изменения объемной доли двойников. Используемые в диссертации методы и подходы могут быть использованы в дальнейшем для разработки и прогнозирования свойств новых сплавов, а также при изучении деформационных механизмов в различных материалах.

Благодаря применению широкого спектра экспериментальных методик, автору удается убедительно разделить основные механизмы деформации магния (двойникование и деформационное скольжение) и установить связь между амплитудой сигналов АЭ и объемной долей двойников. Весь набор полученных данных формирует непротиворечивую картину процессов, происходящих в деформируемом магниевом образце, которая в целом хорошо согласуется с существующими представлениями в данной области. Таким

образом, не вызывает сомнений **обоснованность** выдвигаемых в диссертации научных положений, выводов и моделей.

Использованный в диссертационной работе комплекс экспериментальных методик включает не только общепринятые исследования с привлечением сканирующей электронной микроскопии и EBSD-анализа, механических испытаний по схеме одноосного растяжения-сжатия и усталостных испытаний. В работе также использована достаточно редкая методика изучения микроструктуры с использованием конфокальной микроскопии, что позволило диссертанту получить 3D-изображение поверхности образцов. Кроме того, в диссертации для изучения деформационных механизмов активно использована методика АЭ – исключительно редкий и очень «тонкий» инструмент, применение которого предполагает наличие не только оборудования, но и оригинальных подходов к анализу получаемых данных. Корректность поставленных задач, совокупность всех использованных методик и рассмотрение во взаимосвязи всего объема полученных данных обеспечивает **достоверность** приведенных в диссертации результатов.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа Васильева Е.В. состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка литературы из 160 источников и, кроме того, 2 приложений. Работа изложена на 125 страницах, включает 66 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор, в котором подробно рассмотрены результаты современных исследований структуры и свойств магниевых сплавов. Здесь следует отметить большую работу, которую провел диссертант при изложении своих результатов: текст хорошо структурирован, главы логично разбиты и состоят из небольших параграфов, в которых рассмотрены те или иные аспекты. В частности, первая глава состоит из трех подразделов, в которых поочередно рассмотрены ключевые проблемы, возникающие у исследователей при изучении магния: способы повышения механических свойств; механизмы пластической деформации в сплавах с ГПУ-решеткой; а также возможности применения метода АЭ для анализа деформационных процессов. Как результат, в выводах по этой главе показано, что физические и механические свойства магниевых сплавов тесно взаимосвязаны и должны исследоваться одновременно. Кроме того, особый акцент сделан на важности изучения и понимания фундаментальных механизмов деформации – дислокационного скольжения и двойникования, а также их совместной реализации в процессе нагружения. Далее, при изложении своих результатов, диссертант будет неоднократно возвращаться к этой мысли. В целом, литературный обзор свидетельствует о высокой

квалификации Васильева Е.В. в области проблем, связанных не только с изучением структуры, текстуры, механических свойств и деформационного поведения магниевых сплавов. Кроме того, диссертант продемонстрировал глубокое понимание особенностей метода АЭ и описал его применимость в качестве инструмента исследования механизмов деформации, показав возможность их классификации путем разделения АЭ сигнала.

Во второй главе исключительно подробно (в четырех разделах) описаны исследованные в диссертации материалы и использованные при этом исследовательские методики. Поскольку анализ полученных результатов требовал обработки большого объема данных, диссертант специально остановился на методических тонкостях и разработанных алгоритмах. В целом, высокая оснащенность современным, в том числе уникальным оборудованием, безусловно, является доказательством надежности и достоверности полученных в работе экспериментальных результатов.

В третьей главе описаны результаты исследований микроструктуры и механических характеристик магниевых сплавов ZK30 и ZK60 при статических и циклических испытаниях. В качестве способов интенсивного воздействия выбраны: литье во вращающиеся валки, всесторонняя изотермическая ковка (ВИК), равноканальное угловое прессование (РКУП), а также комбинация ВИК+РКУП. Проведено сопоставление микроструктуры, сформировавшейся в материале после различных термомеханических воздействий, с результатами малоциклового и многоциклового усталости. Механические свойства полученных образцов оказались достаточно высокими. Более того, авторы убедительно доказывают, что достигнутая в ходе экспериментов повышенная пластичность позволяет добиться еще более высоких прочностных свойств и усталостных характеристик с помощью дальнейшей холодной или теплой деформации.

В четвертой главе представлены результаты анализа усталостных изломов на крупнозернистых и мелкозернистых образцах сплава ZK60. Особый интерес в данной главе представляет раздел 2, в котором изложены результаты исследования изломов с использованием конфокального микроскопа. Эта методика позволяет четко разделить образцы на два типа: однородные по высоте рельефа и с большим перепадом высот. Представленные изображения дают наглядное представление о морфологии и рельефе поверхности и поэтому хорошо дополняют результаты, полученные традиционной методикой анализа изломов с использованием СЭМ.

В пятой главе описаны особенности деформационных механизмов в чистом магнии и сплаве ZK30 при циклических нагружениях в зависимости от начального цикла (растяжение или сжатие). Основные результаты в этой главе получены с использованием двух нетрадиционных методик: путем анализа сигналов АЭ и прямым наблюдением методом высокоскоростной видеосъемки (скорость записи составляла 120 тысяч кадров в секунду). Диссертант подробно остановился на анализе полученных результатов: кадры видеоряда сопоставлены с соответствующими данными АЭ, которые разбиты на кластеры в зависимости от энергии и частоты сигнала. Установлено, что

АЭ, являясь непрямым методом исследования, четко отображает смену деформационных механизмов двойникование \leftrightarrow дислокационное скольжение, происходящую в магниевом сплаве при переходе от сжатия к растяжению (и наоборот). Третий раздел данной главы посвящен выяснению единственного, на важного вопроса: определению скорости зарождения и роста двойника в магнии. Имеющиеся в распоряжении диссертанта высокоскоростные методики наблюдения позволили установить бимодальный характер распределения скорости движения двойниковой вершины: зарождение двойника происходит со скоростями на уровне 100 м/с, а рост – на несколько порядков медленнее: 10^{-4} – 10^{-3} м/с.

В шестой главе представлена модель кинетики двойникования, описывающая деформационное поведение с точки зрения количественной оценки накопления двойников. Особенностью предложенной модели является ее привязка к полученным в диссертации результатам. В целом, разработанная модель не противоречит эксперименту, предсказывая сильную зависимость объемной доли двойников от микроструктуры материала: среднего размера зерна и распределения зерен по размерам.

Научная ценность и практическая значимость работы Васильева Е.В. заключается в том, что в ней впервые с помощью самых современных и даже уникальных методов проведено комплексное исследование структуры, текстуры, прочностных свойств и усталостных характеристик образцов магниевых сплавов в различных структурных состояниях. Установленные особенности деформационного поведения магниевых сплавов и разработанная феноменологическая модель накопления двойников могут быть использованы для прогнозирования свойств и разработки сплавов с повышенными механическими характеристиками. В качестве научной новизны следует также отметить широкое применение нетрадиционных методов исследования: эволюция поверхности образца в процессе деформации, снятая высокоскоростной видеосъемкой, сопоставлена с амплитудой и частотой сигнала АЭ.

В целом, содержание диссертации и основные выводы соответствуют поставленной цели и задачам исследования.

По работе имеются следующие **замечания и вопросы**:

1. Некоторые заключения, к которым приходит диссертант в процессе своего исследования, полностью соответствуют известным представлениям о формировании структуры и свойств магниевых сплавов (влияние размера зерна на пластичность, уменьшение объемной доли двойников при измельчении зерна). Написать об этом вполне достаточно в тексте диссертации, но выносить в выводы – излишне. В этой связи выводы к Главе 4 выглядят не до конца продуманными: собственные достижения в них прописаны слабо. Те же претензии к выводу №9 в «Основных выводах» - он практически не несет новой информации.

2. Диссертант – далеко не первый исследователь, кто применил такие методы деформационного воздействия, как ВИК и РКУП, для измельчения зерна и формирования более однородной структуры в магниевых сплавах. Однако, в диссертации уделено мало внимания сравнению структуры и свойств образцов, полученных в работе после тех или иных интенсивных воздействий, с литературными данными.
3. Эксперименты в гл.5 проведены на образцах с достаточно крупным зерном. Как известно, крупнозернистый чистый магний имеет анизотропную (столбчатую) структуру. Таким образом, от того, как был вырезан образец для исследований, будут сильно зависеть критическое напряжение сдвига, соотношение двойникования и дислокационного скольжения и, вероятно, в целом результаты по циклическому нагружению. Однако, текстура исходного образца в работе не рассмотрена.
4. В работе показано, что метод АЭ – надежный инструмент выявления различных деформационных механизмов. Было бы интересно провести сравнительные эксперименты и использовать мелкозернистые образцы, полученные в результате ВИК, для исследования методом АЭ. Это также помогло бы более четко связать отдельные результаты работы в единое целое.
5. В тексте диссертации также имеются некоторые недостатки: отсутствуют ссылки на Рис.1 и Рис.17; на стр.37 «относительно низкой гомологической температурой для магния» называется 250°C , а через несколько строк 300°C уже называется «высокой (для магния) гомологической температурой»; на стр.12 указывается, что магний имеет ГПУ решетку с соотношением осей $c/a \sim 1,633$, а уже на стр.16 дано другое значение: $c/a = 1,624$; иногда используются неудачные обороты «детвиннинг - уменьшение (количества?) двойников» на ст.70, «развитие тонких деформационных процессов» (стр.81); заголовок гл.5 «Кинетика механизмов деформации» вряд ли можно считать удачным.

Сделанные критические замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой проведено серьезное научное исследование, состоящее из трех больших блоков: собственно исследование структуры магниевых сплавов, разработка алгоритма обработки большого массива видеоданных и представление феноменологической модели кинетики двойникования. Результаты, полученные в каждом из этих блоков, хорошо дополняют друг друга, обосновывая сделанные выводы. Работа имеет научное и практическое значение, а предложенный подход: совместное использование высокоскоростной съемки и данных АЭ – может быть использован в

дальнейшем при выполнении металловедческих и прикладных исследований как в научных, так и в образовательных организациях.

Основное содержание диссертации отражено в 20 работах, 9 из которых опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в систему цитирования WoS и Scopus и рекомендованы ВАК РФ.

Диссертационная работа Васильева Евгения Викторовича «Кинетические особенности механизмов деформации магниевых сплавов при статическом и динамическом нагружении» по актуальности, достоверности, научно-исследовательскому уровню, научной новизне и значимости результатов, безусловно, соответствует п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией прочности,
главный научный сотрудник
ФГБУН Институт физики металлов,
доктор технических наук

Водков Алексей Юрьевич
19.11.2018

Тел.: (343) 374-40-54

E-mail: volkov@imp.uran.ru

Адрес: 620108 Екатеринбург, ул.С.Ковалевской 18

