

## **Отзыв**

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

Диссертационная работа Васильева Е.В. посвящена исследованию особенностей механического поведения и механизмов деформации магниевых сплавов – двойникования и дислокационного скольжения – при различных условиях нагружения.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время в научном мире проводится большое количество работ по изучению магния и его сплавов. Ключевой проблемой, которой посвящено существенное количество работ, является понимание механизмов пластической деформации - дислокационного скольжения и двойникования. При всем многообразии проводимых мировым научным сообществом исследований, существуют значительные пробелы в понимании особенностей механического поведения, в частности, в связи с микроструктурными особенностями тех или иных сплавов. Отсутствует ясное понимание факторов, определяющих циклическую выносливость в различных режимах испытания. Многие фундаментальные характеристики деформации, в частности, скорость образования двойника и кинетика их накопления, принимаются без достаточного подтверждения экспериментальными данными. Совсем мало разработанными остаются вопросы моделирования деформационного поведения. Таким образом, исследование фундаментальных процессов, протекающих в магнии и его сплавах, остается актуальной задачей для понимания механизмов деформации и усталости магния и металлов с ГПУ решеткой в целом. Следует также отметить необходимость разработки перспективных методов получения сплавов с ультрамелкозернистой структурой, которые позволят повысить эксплуатационные свойства реальных промышленных изделий.

В связи с этим работа Васильева Е.В. с одной стороны имеет большое практическое значение ввиду получения сплава ZK60 с комплексом выдающихся механических характеристик, а с другой - является большим шагом вперед в понимании работы двойникования и дислокационного

скольжения в материалах с ГЦК структурой. Таким образом, несомненно, работа является актуальным и своевременным исследованием.

### **Структура и основное содержание диссертации**

Диссертационная работа Васильева Е.В. изложена на 125 стр., состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников, включающего 160 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность изучения магниевых сплавов, сформулированы цели и задачи исследования, а также научные положения, выносимые на защиту. Описаны новизна и практическая значимость результатов работы, дана информация о числе публикаций, структуре и объеме диссертации, отражен личный вклад автора, указаны научные конференции и семинары, на которых обсуждались результаты работы.

**В первой главе** приведен обзор литературных источников в области магния и его сплавов, в том числе способы получения мелкозернистой структуры; рассмотрены основные механизмы пластической деформации; показано, что метод акустической эмиссии имеет большой потенциал для изучения процессов дислокационного скольжения и двойникования. Сделаны выводы о перспективных направлениях исследований и разработки магниевых сплавов.

**Во второй главе** обосновывается выбор материалов для исследования и приводятся методики испытаний. В качестве основных материалов использовался чистый магний и сплавы ZK30 (Mg-2,6Zn-0,01Zr) и ZK60 (Mg-5,8Zn-0,8Zr). Для сплавов ZK60 и ZK30 проводилась различная термомеханическая обработка, после которой изучалась структура и механические свойства образцов при статическом и циклическом нагружении. Для изучения механизмов деформации проводились (1) фрактографические исследования и (2) специальные испытания с одновременным механическим нагружением, видеосъемкой изменения микроструктуры и записью сигналов акустической эмиссии.

**В третьей главе** описаны результаты исследования микроструктуры и механических характеристик магниевых сплавов при статических и циклических испытаниях в зависимости от условий обработки. Показано, что измельчение структуры магниевых сплавов при помощи всесторонней изотермическойковки и равноканального углового прессования позволяет получить комплекс механических характеристик на уровне: предел прочности

$\sigma_B=325$  МПа, относительно удлинение  $\varepsilon=40\%$ , предел выносливости 120 МПа (на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов).

**В четвертой главе** диссертационной работы проведено изучение поверхностей излома после циклических испытаний. Показано, что наличие крупных интерметаллидов и легкое двойникование в крупном зерне способствуют развитию хрупкого характера разрушения и снижению усталостных характеристик.

**В пятой главе** проведен анализ механизмов, ответственных за накопление деформации в условиях механического нагружения. Показано, что акустическая эмиссия в деталях отражает работу дислокационного скольжения и двойникования при механическом нагружении магния. Сделан вывод о том, что асимметрия деформационного поведения магниевого сплава ZK30 обусловлена активацией различных механизмов – дислокационного скольжения и двойникования – при сжатии и растяжении, что ведет к формированию положительного среднего напряжения цикла и снижению усталостных характеристик. Кроме того, была экспериментально установлена скорость движения двойниковой вершины при зарождении и росте двойника.

**В шестой главе** представляется разработанная модель кинетики двойникования, отличительной особенностью которой является то, что (1) она учитывает микроструктурные параметры конкретного материала и (2) опирается на тот факт, что двойникование является процессом, зависящим от напряжения, а не деформации. Для проверки результатов моделирования применена оригинальная методика определения объемной доли двойников по данным видеосъемки изменения микроструктуры. Также было установлено, что зависимость амплитуды сигнала АЭ от длины двойника имеет линейный характер, а распределение амплитуд сигналов качественно воспроизводит распределение размеров зерен.

**В заключении** приводятся выводы по приведенным в диссертационной работе исследованиям.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в том, что в ней впервые:

1. Путем совмещения различных методов наблюдения в процессе одного испытания были установлены особенности деформационного поведения и работы механизмов деформации для чистого магния и сплавов Mg-Zn-Zr при различных условиях нагружения.

2. Установлен нижний предел скорости образования двойника, который находится на уровне 100 м/с, и скорости роста двойника -  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  м/с.

3. Разработана феноменологическая модель кинетики двойникования, которая учитывает структурные характеристики материала и позволяет определять объемную долю двойников как функцию от приложенного напряжения.

4. Впервые экспериментально установлена линейная зависимость амплитуды сигнала АЭ от длины образующегося двойника и корреляция между распределениями амплитуд сигналов и размеров зерен.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработан алгоритм обработки видеоданных, который может применяться для количественного анализа процесса двойникования.

2. Получен сплав ZK60 с характеристиками: временное сопротивление 325 МПа, относительное удлинение 40% и предел выносливости 120 МПа, сочетание которых является превосходным показателем для данного сплава.

3. Установленные особенности деформационного поведения чистого магния и его сплавов и разработанная феноменологическая модель накопления двойников могут быть использованы для разработки и прогнозирования свойств новых сплавов с повышенными механическими характеристиками.

4. Используемая в работе методика кластерного анализа сигналов акустической эмиссии для идентификации процессов дислокационного скольжения и двойникования в магниевых сплавах может быть применима для изучения кинетики механизмов деформирования и в других материалах.

**Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации,** кроме указанных в замечаниях, обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, их физической обоснованностью, большим объемом экспериментальных данных, полученных с применением современных методов исследований. Результаты исследований хорошо согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям. Полученные результаты прошли апробацию на 9 конференциях и опубликованы в 20 работах, из них 3 - в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, 6 - в научных журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science.

**Личный вклад** автора не вызывает сомнений, во многих публикациях его имя возглавляет список авторов.

## Замечания по диссертационной работе

1. При анализе эволюции структуры сплава после ИПД автор рассуждает о наличии вторых фаз и их влиянии на механические свойства, однако в тексте отсутствует количественная оценка размеров и объемной доли этой фазы. Также отсутствуют результаты исследований тонкой структуры методом просвечивающей микроскопии, которые могут обеспечить качественную оценку. Почему при анализе среднего размера зерна и результатов механических испытаний автор не приводит значения погрешности измерения?

2. В тексте работы автор использует термин горячая экструзия, однако в разделе 2 «Материалы и методы» о данном методе обработки не упоминается. Из текста следует, что автор приравнивает между собой термины «горячая экструзия» и «горячее прессование». В чем, по мнению автора, различие и сходство между этими методами с точки зрения напряженно-деформированного состояния и типа формирующейся структуры?

3. Результаты испытаний сплавов ZK60 и ZK30 на растяжение свидетельствуют о различном уровне прочности и пластичности сплавов после горячего прессования, прокатки и гомогенизации. Однако автор не объясняет причины подобного различия в свойствах образцов. Почему, по мнению автора, после горячего прессования сплава ZK60 повышается как прочность, так и пластичность, по сравнению с литым состоянием. С чем автор связывает существенное повышение пластичности ZK30 после гомогенизации.

4. В работе имеются противоречащие друг другу данные, в частности, на рисунке 27 (стр.47) предел выносливости образцов ZK MIF 400C X равен 110 МПа, то же самое состояние в таблице 4 имеет предел выносливости 80 МПа. С чем связано подобное различие?

5. В тексте диссертационной работы подписи ко многим рисункам представлены на английском языке, что усложняет восприятие текста.

6. Работа выполнена недостаточно системно. Например, наибольшее количество методов термомеханической обработки применяется для сплава ZK60, для исследования механизмов деформации используется сплав ZK30 и чистый магний, а для проверки результатов моделирования снова используется сплав ZK60. В целом, выбор материалов обоснован, но хотелось бы увидеть комплекс исследований, который включал в себя получение мелкозернистого материала, исследование микроструктуры и механических характеристик, сопряженное с анализом механизмов деформации и моделированием на примере хотя бы одного сплава.

7. Метод АЭ позиционируется как более простая альтернатива металлографическим методам исследования структуры. Это вызывает некоторые сомнения. Во-первых, АЭ требует применения комплекса довольно сложной аппаратуры. Во-вторых, для получения количественных результатов по объемной доли двойников требуется тщательная калибровка метода с применением металлографических методов анализа структуры. В-третьих, возникает вопрос о применимости единой калибровки для различных сплавов. Иными словами, если для каждого последующего исследуемого сплава необходимо проводить трудоемкую процедуру калибровки, то это сводит на «нет» все достоинства простоты метода.

Отмеченные недостатки не снижают очевидных достоинств диссертационной работы Васильева Е.В.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Работа написана грамотно, хорошо оформлена. Основные научные результаты диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и доложены на международных и всероссийских конференциях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Е.В. Васильева выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании полученных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, вносящее существенный вклад в развитие знаний о механизмах пластической деформации при различных видах нагружения магния и его сплавов. Диссертационное исследование Е.В. Васильева соответствует п.п. 1 и 7 паспорта специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния и соответствует требованиям п. П.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник Института физики перспективных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», кандидат технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 10.04.2009 г.

Ольга Борисовна Кулясова

Адрес: 450008, Россия, Приволжский  
федеральный округ, Республика  
Башкортостан, г. Уфа,  
ул. К. Маркса, д. 12  
тел. +79174444198  
E-mail: elokbox@mail.ru

Подпись Кулясовой О.Б. удостоверяю



Подпись	<i>Кулясовой О.Б.</i>
Удостоверяю «	<i>д.в.</i> 11 20 18 г.
Начальник отдела документационного обеспечения и архива	<i>Алиф-Тилекова А.М.</i>