

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Наримана Айратовича Еникеева

«ГРАНИЦЫ ЗЁРЕН И СВЕРХПРОЧНОСТЬ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела и 01.04.07 – Физика

конденсированного состояния

Актуальность темы. На протяжении последних десятилетий сохраняется неослабевающее внимание исследователей в области механики и физики материалов к ультрамелкозернистым (УМЗ) материалам и их наноструктурным особенностям, которые вызывают изменение механизмов деформации на микроуровне и, как следствие, модификацию их механических свойств. Особый интерес для исследователей представляют границы зёрен. Их влияние на процессы деформирования при уменьшении размера зерна становится определяющим. Установление параметров и состояния границ зёрен и степени их влияния на свойства материалов представляют актуальную задачу физики прочности и пластичности. Более того, границы зёрен и наноструктурные особенности УМЗ материалов чувствительны к способу их получения. Известно несколько принципиальных подходов получения материалов с ультрамелким размером зёрен: синтез из наноразмерных частиц, шаровой размол, электроосаждение, а также методы, связанные с измельчением зёренной структуры под воздействием больших степеней деформации. Автор диссертации исследует материалы, полученные последним способом, т.н. методом интенсивной пластической деформации (ИПД). Такие материалы имеют ряд преимуществ, например, отсутствие пористости, сохранение химического состава при обработке, большие размеры получаемых образцов. В то же время,

разнообразие параметров и реализаций схем ИПД приводит к формированию УМЗ структур, которые заметно отличаются друг от друга. Понять взаимосвязь между параметрами деформации и формируемыми наноструктурами - это весьма актуальная проблема механики деформируемого твёрдого тела. Это в особенности важно, поскольку при достижении больших степеней деформации недостаточно традиционно применяемых подходов, основанных на принципах континуальной механики. Таким образом, диссертация Н.А. Еникеева, посвящённая моделированию и экспериментальному исследованию особенностей границ зёрен УМЗ материалов, полученных с использованием интенсивной пластической деформации, и влияния границ на прочностные свойства, несомненно, является важной и актуальной, а для её успешного выполнения потребовались научные изыскания на стыке физики и механики.

Методики исследования. Задачи, поставленные автором диссертации, потребовали привлечения как ряда прецизионных экспериментальных методов изучения микроструктуры материалов, так и использования совокупности современных теоретических представлений в области моделирования деформационных процессов в материалах в сочетании с собственными разработанными модельными подходами. Так, использование автором данных, полученных такими современными методами, как трёхмерная атомная томография и сканирующая просвечивающая электронная микроскопия, снабжённая кольцевыми темнопольными детекторами электронов, рассеянных на большие углы, позволило получить прямые доказательства образования массивных зернограницных сегрегаций при соответствующих режимах деформации. Автор также широко использует традиционные методы исследования микроструктур (рентгеноструктурный и текстурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия и т.д.), которые служат как для получения исходных данных для численного анализа, так и для проверки модельных результатов. В теоретической части работы автору удалось

объединить ряд концепций, позволяющих моделировать процессы, происходящие при деформировании на разных уровнях. Сюда относятся как хорошо известные методы конечных элементов и модели поликристаллической пластичности, так и микромеханические подходы для учёта влияния процессов деления зёрен. Именно процессы деления зёрен критичны при больших степенях деформации. Применение сочетания этих подходов позволило автору получить качественно новые результаты по цепочке «получение-структура-свойства» УМЗ материалов, а также установить дополнительные механизмы их упрочнения.

Научная новизна. Среди полученных в диссертации новых результатов отмечу следующие, по моему мнению, наиболее важные:

- 1) Разработка концепции многоуровневого моделирования процессов интенсивной пластической деформации на макро- мезо и микроуровнях, где учитывается как влияние технологических параметров наноструктурирования и деформационное поведение поликристаллического материала, так и измельчение микроструктуры материала под действием больших степеней деформации. Полезность этого подхода подтверждается полученным свидетельством о регистрации программного комплекса, разработанного, в частности, с использованием многоуровневого моделирования.
- 2) Отдельный интерес представляет разработанный дисклинационный микромеханический критерий измельчения зёрен в силу несовместности деформации между различным образом ориентированными зёрнами поликристалла.
- 3) Кооперативный характер некристаллографического вращения групп зёрен в деформируемых УМЗ металлах.
- 4) Обнаруженное явление сегрегации примесных атомов в области границ зёрен, которые характеризуются изменённой морфологией и увеличенной концентрацией легирующих элементов по сравнению с крупнозернистыми материалами. Эти сегрегации являются

дополнительным механизмом упрочнения и приводит к приросту предела текучести данных материалов. Этот эффект автор определяет как «сверхпрочность», основываясь на том, что предел текучести в таких материалах превышает значение, предсказанное для данного размера зёрен, исходя из соотношения Холла--Петча. «Сверхпрочность» объясняется затруднением испускания дислокаций границами зёрен за счёт закрепления их неоднородными сегрегациями.

5) Из имеющих явное прикладное значение достижений можно выделить данные, указывающие на повышенную радиационную стойкость УМЗ хромоникелевых сталей, в том числе впервые полученные для случая нейтронного облучения в активной зоне атомного реактора до доз порядка 12-15 сна.

Практическая значимость полученных результатов связана, по моему мнению, в первую очередь с обнаружением повышенной радиационной стабильности сталей, достигнутой за счёт увеличения объёмной доли границ зёрен. Потенциальный интерес для применения представляет также и обнаруженный автором упрочняющий вклад зернограницных сегрегаций, которые образуются при деформационном воздействии в определённом температурном диапазоне, что может открыть путь к модификации подходов формирования высокопрочных состояний в промышленных сплавах. Разработанные модельные подходы представляют ценность с точки зрения выбора оптимальных режимов получения УМЗ материалов деформационными методами.

Достоверность полученных в диссертации результатов, положений и выводов сомнений не вызывает. Она обеспечивается использованием комплекса экспериментальных исследований, выполненных с привлечением ряда зарекомендовавших себя современных методик и физически обоснованными модельными подходами. Достигнутые результаты и выполненные численные оценки находятся в удовлетворительном согласии с

существующими и полученными опытными данными. Опубликованные в высокорейтинговых научных изданиях работы, основанные на проведённых исследованиях, цитируются отечественными и зарубежными авторами.

Сделанные в диссертации выводы обоснованы и соответствуют как задачам исследования, так и полученным результатам.

Отмечу следующие недостатки, обнаруженные при внимательном изучении работы:

1. В работах последних лет, посвящённых интенсивной пластической деформации, показано, что после определённой степени деформации наступает стационарное состояние (так например, для меди при КВД – это 1-1,5 оборота плунжера), в котором структура и свойства материала более не меняются при дальнейшем росте степени деформации. Из работы неясно, в какой мере обнаруженные сегрегации на границах зёрен являются стационарными.

2. Также недавно было обнаружено, что при ИПД твёрдых растворов наблюдается конкуренция между одновременными процессами образования преципитатов (т.е. распада твёрдого раствора) и их растворения. При этом в стационарном состоянии наступает динамическое равновесие между этими процессами. Богатые экспериментальные данные работы могли бы послужить материалом для анализа такого динамического равновесия. К сожалению, этот аспект не нашёл отражения в работе.

3. Автором показано, что зернограничная сегрегация может быть как положительной (обогащение границ примесью), так и отрицательной (обеднение границ по сравнению с объёмом, см. например Рис. 4.5). К сожалению, автор не уделяет достаточного внимания причинам такого различия.

4. В изученных автором сплавах (например, в сплавах на основе алюминия) интенсивная пластическая деформация (например, кручение под высоким давлением)

может приводить и к образованию тонких (2-4 нм) равновесных зернограничных прослоек второй фазы. Такие прослойки, с одной стороны, сильно изменяют механические свойства материала. Такие прослойки видны, например, на рис. 4.7. Они свидетельствуют или о признаках полного смачивания границ зёрен второй твёрдой фазой (см. например *Acta Mater.* **52** (2004) 4537) или о т.н. псевдонеполном смачивании границ (*Scripta Mater.* **70** (2014) 59). Это обстоятельство уместно было бы хотя бы коротко обсудить в диссертации.

5. Ну и, наконец, мелкие замечания по тексту и оформлению диссертации, в целом очень аккуратно подготовленной. Латинские символы в отечественной полиграфической культуре принято всегда набирать курсивом. Названия химических элементов в повествовательном тексте принято давать полностью (например «сплавы меди»), а не в виде химического символа («сплавы Cu»). Не везде надписи на рисунках переведены на русский язык (см., например, рис. 6.1 или 6.2).

Сделанные замечания несколько не могут изменить общей положительной оценки диссертации Н.А. Еникеева, работа производит очень хорошее впечатление, и новизной идей, и новизной результатов. Наиболее интересные из них были отмечены выше, и они, безусловно, вносят **весомый вклад** как в физику больших пластических деформаций, физику упрочнения металлов и сплавов, формирования и релаксации дефектов решетки, так и в физику конденсированного состояния и механику деформируемого твёрдого тела в целом.

Рекомендации по использованию работы. Как было указано выше, результаты работы позволяют целенаправленно влиять на свойства УМЗ материалов, полученных интенсивной пластической деформацией. Этим определяется их значимость для науки и практики: они могут быть использованы как при решении исследовательских задач, так и в практической работе многих организаций, для которых важно учитывать влияние

тонкой структуры материала после больших пластических на механические и функциональные свойства материалов. В их числе институты РАН: ИФТТ, ИПСМ, ИМЕТ, ИОНХ, ИПМаш, ИПМех, ИМФ УРО РАН, ИФПМ СО РАН; отраслевые: ЦНИИЧерМет, ВИАМ, ВИЛС; образовательные: МИСиС, СпбГУ, СпбГТУ, БелГУ, факультет наук о материалах МГУ, ННГУ, ТГУ и другие.

Апробация работы представлена докладами (в том числе приглашёнными) на десятках международных и национальных конференциях, а также отражена 52 публикациями, достаточно полно отражающими содержание работы. Личный вклад Н.А. Еникеева также не вызывает сомнений – во многих публикациях он является ответственным автором.

Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.

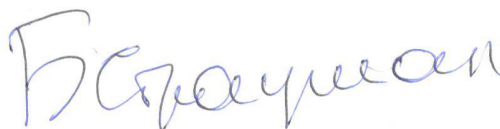
По совокупности перечисленных ранее признаков считаю, что диссертация Н.А. Еникеева представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, и отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук (см. п. II. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней), соответствует паспорту специальности Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (п.1. «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», п.4. «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ»), а также паспорту смежной

специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» (п.1. «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», п.2. «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой», п.9. «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях»). Считаю, что Н.А. Еникеев заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Официальный оппонент,

Заведующий Лабораторией поверхностей раздела в металлах Федерального государственного учреждения науки Институт физики твердого тела РАН, профессор,
д.ф-м.н.

9 декабря 2016 г.



Борис Борисович Страумал

Адрес: ИФТТ РАН, ул. Ак. Осипьяна, 2. 142432 г. Черноголовка

Раб. Тел. +7 49652 28300. E-mail: straumal@issp.ac.ru

Подпись Б.Б. Страумала заверяю

Федерального государственного учреждения науки Институт физики твердого тела РАН,

д.ф-м.н.



Г.Е. Абросимова