

ОТЗЫВ

официального оппонента Бориса Борисовича Страумала на диссертационную работу Василия Владимировича Астанина на тему «Трансформация структуры объёмного металлического стекла Vit105 при кручении под высоким давлением», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 2.6.6. – Нанотехнологии и наноматериалы.

Актуальность темы исследования

Аморфные сплавы представляют большой интерес для фундаментальных и прикладных исследований. В сравнении с кристаллическими аналогами того же химического состава они проявляют повышенные механические свойства – более высокая прочность, большее упругое удлинение, меньший упругий модуль. Однако широкое практическое применение аморфных сплавов ограничено их хрупкостью, так как при комнатной температуре деформирование аморфных сплавов происходит путём формирования и прохождения полос сдвига, а формирование первой же полосы приводит к хрупкому разрушению образца. В последние годы было показано, что предварительное пластическое деформирование аморфных сплавов методами осадки, прокатки и др. может приводить к появлению пластичности у аморфных сплавов за счёт формирования системы полос сдвига. Каждая из предварительно сформированных полос сдвига вносит свой вклад в общую деформацию образца и препятствует катастрофическому прохождению полос сдвига при деформировании. В связи с этим представляет большой интерес воздействие на аморфные сплавы методами интенсивной пластической деформации, которая позволяет вносить большие степени деформации в обрабатываемый материал без его разрушения. На данный момент известно множество работ, посвященных изучению влияния кручения под высоким давлением (КВД) на аморфные сплавы, однако, как анализ трансформации структуры, так и механических свойств, остается сложной задачей. Тем не менее, закономерности действия КВД на аморфные сплавы, в частности на перспективное объёмное металлической стекло Vit105 на основе Zr исследованы недостаточно, кроме того, недостаточно изучен и не раскрыт механизм пластической деформации. Таким образом, целью исследования является разработка феноменологической модели пластической деформации объёмного металлического стекла на основе атомистического моделирования и установление особенностей трансформации структуры и изменения механических свойств сплава Vit105 при кручении под высоким давлением.

Общая характеристика работы

Представленная диссертационная работа изложена на 140 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения, содержит 75 рисунков и 15 таблиц. Список цитируемой литературы включает 185 наименований.

ВХОД. №	4241-13
«24»	11 2012г.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, сведения о личном вкладе автора, приводится список публикаций автора по теме диссертации и сведения об апробации работы.

В первой главе содержится аналитический обзор научной литературы по теме исследования, описаны особенности аморфной структуры, механизмы деформирования и механические свойства аморфных сплавов, а также концепция стеклообразования и методы получения аморфных сплавов; приведены примеры их практического применения. Представлены данные литературы по влиянию предварительного пластического деформирования на структуру и свойства аморфных сплавов.

Во второй главе изложена цель работы и методики исследования. Описаны принципы и режимы обработки аморфных сплавов методом КВД. Для структурных исследований использовались методы рентгеноструктурного анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии. Исследование механических свойств осуществлялось методами испытаний на растяжение, а также измерениями микротвердости с последующим анализом отпечатка методом сканирующей зондовой микроскопии. Атомистическое моделирование осуществлялось методом молекулярной динамики.

В третьей главе рассмотрена феноменология зарождения и развития полос сдвига, а кроме того создана атомистическая модель на основе принципов молекулярной динамики, проведено моделирование деформации аморфного материала, и на основе полученных результатов выдвинута модель продвижения полос сдвига с задействованием сдвиговой трансформации, с той отличительной особенностью, что элементарный сдвиг осуществляется за счёт ротационной моды — кооперированного вихревого перемещения атомов в пределах зоны сдвиговой трансформации, причем отдельные вихри в свою очередь складываются в полосу сдвига, обеспечивающую сдвиг одной части материала относительно другой.

В четвертой главе проведён анализ структурных параметров объёмного металлического стекла Vit105, подвергнутого КВД. С применением разносторонних физических методов исследования установлено, что при КВД сплава Vit105 сохраняется полностью аморфная структура, однако происходит выделение неупорядоченных кластеров, выявляемых методом просвечивающей электронной микроскопии, с характерным размером $6,3 \pm 1,3$ нм. Изменение свободного объёма, оценённое по смещению пика и увеличению радиуса первой координационной сферы, составляет порядка 0,8%, причём большая часть его прироста, 0,5% обеспечивается начальным этапом деформации, до $n = 1$.

В пятой главе содержит данные механических свойств по испытаниям на растяжение сплава Vit105, подвергнутого КВД, а также методом микроиндентирования. Показано, что металлическое стекло в исходном

состоянии и после КВД деформируется хрупко при растяжении, предел прочности для КВД состояния ниже в сравнении с исходным, что может быть объяснено наличием несплошностей или трещин. Установлено, что на начальных этапах КВД ($n = 0,8$ и $n = 1$), микропластичность сплава Vit105 повышается, параметр пластичности увеличивается с 94 ± 14 до 157 ± 15 нм.

По результатам проведённого исследования сделаны общие выводы.

Научная новизна

В качестве наиболее важных научных результатов, полученных в диссертационной работе, можно отметить следующее. Установленные закономерности формирования полос сдвига при кручении под высоким давлением объёмного металлического стекла Vit105 показывают связь режимов пластической деформации и картины полос сдвига, отличающиеся тем, что их морфология и характеристики охарактеризованы на наномасштабном уровне. На основе проведённого атомистического моделирования структуры объёмного металлического стекла Vit105 и процесса его пластической деформации разработана феноменологическая модель пластической деформации объёмного металлического стекла Vit105, отличающаяся тем, что такое физическое явление, как образование полосы сдвига, объясняется формированием ротационных вихрей нанометрового масштаба с участием свободного объёма. Установлены закономерности трансформации структуры и свойств объёмного металлического стекла Vit105 под воздействием кручения под высоким давлением, отличающиеся тем, что структура сохраняется аморфной с выделением атомных кластеров размером $6,3 \pm 1,3$ нм, а микропластичность сплава растёт на начальных этапах кручения под высоким давлением и снижается на последующих.

Теоретическая и практическая значимость работы

С помощью разработанного метода исследования картины полос сдвига удалось расширить понимание механизмов зарождения, движения и взаимодействия полос сдвига, показать, что при кручении под высоким давлением металлического стекла Vit105 образуется высокая плотность полос сдвига, а также была уточнена степень деформации, достигаемая при КВД металлического стекла Vit105. Разработанная феноменологическая модель пластической деформации объёмного металлического стекла Vit105 за счёт формирования полосы сдвига шириной 5 ± 1 нм из ротационных вихрей размером $3,1 \pm 0,9$ нм позволяет лучше объяснить особенности деформационного поведения металлических стёкол. На основе полученных данных о структуре и её трансформации при кручении под высоким давлением металлического стекла Vit105 определена оптимальная степень сдвиговой деформации металлического стекла $\gamma = 0,3$, при которой рост свободного объёма на сопровождается ростом микропластичности, а указанная степень деформации может быть достигнута технологичными видами деформационной обработки.

Достоверность результатов и выводов

Научные выводы диссертации основаны на анализе достоверных экспериментальных данных, полученных при помощи современных исследовательских методов. Результаты исследования сопоставлены с существующими моделями и данными других авторов и были представлены в научной среде на конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК и системы цитирования Web of Science и Scopus.

Замечания по диссертационной работе

К диссертационной работе Астанина В.В. имеются следующие замечания:

1. Как правило, при кручении под высоким давлением после некоторого количества оборотов плунжера наступает стационарное состояние, в котором процессы образования новых дефектов динамически уравниваются их релаксацией (аннигиляцией). Этот вопрос перехода в стационарное состояние при КВД изученных автором сплавов недостаточно обсуждается в работе.
2. В третьей главе автором описывается (см. например рис. 3.21) сепарация атомов меди и циркония вдоль полосы сдвига. Это означает, другими словами, что аморфный твёрдый раствор цирконий-медь-никель-алюминий-титан распадается при КВД с выделением отдельных компонентов. Процессы распада твёрдого раствора при КВД кристаллических сплавов неплохо изучены. Мне представляется, что в диссертации недостаточно освещён этот вопрос, в частности, почему из твёрдого раствора выделяются именно медь и цирконий.
3. Сепарация атомов меди и циркония объясняется с помощью ротационных вихрей. Этот процесс отличается от объёмной диффузии путём индивидуальных перескоков атомов через энергетический барьер. Тем не менее, автору стоило бы оценить величину эквивалентного коэффициента объёмной диффузии, которая соответствует наблюдаемому переносу атомов меди и циркония на расстояние около 20 нанометров. Сравнение данных такой оценки с результатами по распаду кристаллических твёрдых растворов могло бы приблизить автора к пониманию того, является ли наблюдаемый массоперенос диффузионным или конвекционным.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость и общую оценку диссертационной работы, которая выполнена на высоком научно-техническом уровне, и представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 10 научно-технических конференциях, а также опубликованы в 15 научных статьях, в том числе 3 – из перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, и 5 – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и/или Scopus.

Основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы достаточно полно отражены в автореферате. Опубликованные работы соответствуют

тематике проведённого исследования и данным, представленным в диссертации.

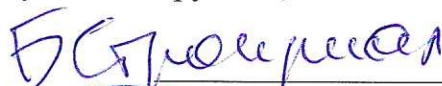
Соответствие диссертационной работы указанной специальности

Диссертационная работа Василия Владимировича Астанина по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (отрасль науки – физико-математические) по п. 2. «Структурные, морфологические и механические свойства наноматериалов и композитных структур на их основе»; п. 9 «Моделирование свойств, физических явлений и технологических процессов в наноматериалах и композитных структурах.».

Заключение

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), а её автор, Астанин Василий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент Страумал Борис Борисович
Заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, старший научный сотрудник,



Борис Борисович Страумал

Подпись Б.Б. Страумала заверяю
Ученый секретарь ИФТТ РАН,
к.ф.-м.н.



Алексей Николаевич Терещенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
142432 г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2
e-mail: straumal@issp.ac.ru
<http://www.issp.ac.ru/>
тел. 8(496)52 219-82

Дата составления отзыва «14» ноября 2024 года

Я, Страумал Борис Борисович, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.