

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН А.А. Левченко



“27 апреля” 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Пархоменко Марка Сергеевича** на тему **“Эволюция структуры и свойств металлических стекол на основе циркония при интенсивной пластической деформации”**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертация М.С. Пархоменко “Эволюция структуры и свойств металлических стекол на основе циркония при интенсивной пластической деформации” выполнена в лаборатории “Перспективные энергоэффективные материалы” Федерального государственного автономного учреждения высшего образования “Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС” Министерства образования и науки Российской Федерации. Данная работа направлена на исследование аморфных сплавов системы Zr-Cu-Al-Fe, в литом и деформированном при помощи интенсивной пластической деформации кручением состояниях. Целью данной работы является установление закономерностей влияния интенсивной пластической деформации на микроструктуру и свойства металлических стекол на основе циркония, а также, на процессы кристаллизации данных металлических стекол при нагреве.

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства

Диссертационная работа Пархоменко Марка Сергеевича посвящена поиску закономерностей изменения структуры, механических свойств и процессов кристаллизации при дальнейшем нагреве аморфных сплавов (металлических стекол) на основе циркония под действием интенсивной пластической деформации кручением. Металлические стекла (МС) – достаточно новый класс металлических материалов, который, благодаря однородной структуре, отсутствию дальнего порядка, и как следствие, дефектов кристаллического строения обладают широким комплексом привлекательных технологических и эксплуатационных свойств, таких как высокая прочность и твердость, высокая коррозионная стойкость, высокое электросопротивление, при этом их свойства стабильны в большом интервале температур. Однако применение в качестве конструкционных и функциональных материалов данной группы сплавов ограничено существенным недостатком – почти полным отсутствием пластичности, что приводит к их хрупкому разрушению и существенно ограничивает возможности деформационной обработки. Термообработку к металлическим стеклам так же применяют редко – большинство металлических стекол охрупчиваются при нагревании.

Перспективным методом обработки аморфных металлических стекол является интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) и ее разновидность – аккумулирующая пластическая деформация (АК-ИПДК). Данные обработки оказывают значительное воздействие на структуру аморфной фазы, индуцируют фазовое расслоение, и нанокристаллизацию, что оказывает существенное и, в ряде случаев, благоприятное влияние на прочностные свойства данных материалов. На сегодняшний момент не существует единой картины взаимосвязи между режимами ИПДК – структурой – свойствами МС. Именно поэтому, получение новых данных о структуре МС и ее эволюции при ИПД, установление взаимосвязи между режимами ИПДК – структурой – свойствами МС является актуальным.

Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В данной работе представлены закономерности изменения структуры металлических стекол с высокой стеклообразующей способностью ($Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al_{10}Fe_5$) и с низкой стеклообразующей способностью ($Zr_{42.5}Cu_{42.5}Al_{10}Fe_5$) при ИПД. Получено большое количество новых результатов. Среди них можно выделить следующие.

Показано, что области химической неоднородности, образовавшиеся вследствие сегрегации атомов с различным атомным радиусом, являются областями для дальнейшего зарождения в них нанокристаллов.

Установлено, что при ИПД структура аморфных металлических стекол системы Zr-Cu-Al-Fe трансформируется в три этапа: 1 - разделение исходной аморфной матрицы на области бедные и богатые медью/цирконием, 2 - образование нанокристаллов в этих областях, 3 - рост сформированных кристаллов и дальнейший распад остаточной аморфной матрицы на области с различным соотношением циркония/меди.

Показано, что разные компоненты интенсивной пластической деформации кручением (осадка и кручение) оказывают различный эффект на структуру металлических стекол. В сплаве, обладающим первичным механизмом кристаллизации, размеры нанокристаллов зависят от количества непрерывных оборотов бойков наковальни, индуцируя их рост нанокристаллов до 20 нанометров. Образовавшиеся нанокристаллы в структуре сплава, характеризующегося эвтектическим механизмом кристаллизации, не растут при увеличении количества оборотов наковальни. Данные результаты принципиально важны для разработки технологических схем обработки металлических стекол при помощи интенсивной пластической деформации кручением.

Показано и исследовано изменение типа кристаллизационного процесса при нагреве после применения деформации. Установлено, что в деформированных образцах сплава $Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al_{10}Fe_5$ кристаллизация аморфной фазы происходит непосредственно в стабильное состояние, в то время как в закаленном состоянии наблюдается процесс кристаллизации через метастабильные фазы. Этот результат представляется особенно важным. Аналогичная последовательность образования кристаллических фаз обнаружена также при ИПДК двойного сплава $Zr_{73}Cu_{27}$.

Данные результаты являются важными для понимания процессов кристаллизации аморфных металлических стекол, создания аморфно-кристаллических композитов и использования металлических стекол при повышенных температурах.

В работе также получены данные и проанализировано влияние структуры материалов после интенсивной пластической деформации на микротвердость материалов.

Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейшего развития исследований в этой области и позволяют разрабатывать новые режимы обработок аморфных металлических стекол для получения необходимого фазового состава, микроструктуры и свойств. Показано, что ИПДК вызывает нанокристаллизацию сплавов изменяет процессы кристаллизации сплавов при последующем нагреве и оказывает сильное воздействие на микротвердость металлических стекол. Также показана

принципиальная возможность получать объемные материалы в аморфном состоянии при помощи ИПДК из металлических стекол с низкой стеклообразующей способностью.

Достоверность и обоснованность результатов научных исследований

Достоверность полученных научных результатов в диссертации обеспечивается использованием комплекса взаимодополняющих экспериментальных методов, расчетами и тщательным анализом собранных данных. Результаты исследования были опубликованы в 13 научных статьях, в изданиях входящих в базу РИНЦ, из которых 5 так же входят в международные базы Web of Science и Scopus. Кроме того, работа была представлена на различных отечественных и международных конференциях. Все научные положения, вынесенная на защиту, обоснованы эмпирическими данными и представляют собой выводы с научным основанием. Автореферат диссертации полноценно отражает структуру, содержание и основные результаты, представленные в диссертационной работе

Значимость для науки и производства, полученных автором диссертации результатов, сопоставление полученных результатов с уровнем современной науки

В настоящее время применение деформационной обработки к аморфным металлическим сплавам, такой как интенсивная пластическая деформация кручением, или аккумулирующая пластическая деформация кручением – один из наиболее перспективных способов улучшать технологические и функциональные характеристики металлических стекол. Кроме того, благодаря данным видам обработок можно получать объемные образцы. Данный факт очень важен в контексте аморфных металлов, так как благодаря необходимости использовать колоссальные скорости охлаждения для подавления процессов диффузии и образования кристаллических решеток, получение объемных образцов очень затруднительно. Наиболее распространенная получаемая форма аморфного металла – тонкая лента, полученная методом спинингования расплава. В то же время, ИПДК и АК-ИПДК позволяет получать объемные заготовки, из которых, впоследствии, возможно получать необходимые современной промышленности детали МЭМС, различные актуаторы и микродетали. В этой связи понимание структурных изменений, происходящих во время процесса ИПДК и дальнейшее влияние этих изменений на свойства полученных изделий крайне важно. Кроме того, благодаря установленным в диссертационной работе Пархоменко М.С. закономерностям между размерами нанокристаллов, образующихся в структуре и режимами деформационных обработок становится возможным контролировать и предсказывать структуру образца. Так же, в работе показана возможность влияния при помощи ИПДК и АК-ИПДК на микроструктуру, температуры фазовых переходов и механические свойства данных материалов. Было продемонстрировано, что интенсивная пластическая деформация индуцирует появление в структуре областей химической неоднородности, с последующим образованием в данных областях нанокристаллов размером 2-5 нм, что существенно повышает микротвердость. В сплаве $Zr_{42.5}Cu_{42.5}Al_{10}Fe_5$ применение ИПДК на 0.5 оборотов наковальни обеспечивает скачкообразное повышение микротвердости с 555 ± 14 до 616 ± 24 HV0.1. В сплаве $Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al_{10}Fe_5$ ИПДК 0.5+2 оборота наковальни обеспечивает скачкообразное повышение микротвердости с 436 ± 11 до 484 ± 11 HV0.1, что крайне важно для использования металлических стекол в качестве функциональных материалов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

В работе получен ряд результатов, которые представляют интерес для специалистов и организаций, которые занимаются исследованиями процессов деформации и прочностных свойств металлических стекол, разработкой и получением функциональных материалов. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в ряде научных организаций и предприятий России и ближнего зарубежья: ИМЕТ им. Байкова РАН, ИФТТ им.

Осипьяна, МГУ, НИТУ МИСИС, УГАТУ, ИТА НАН Республики Белоруссии, Совтест АТЕ, РАМЭМС и других.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Работа называется «Эволюция структуры и свойств металлических стекол на основе циркония при интенсивной пластической деформации». Однако в работе рассматривается только одно свойство – микротвердость. Возможно, автор работы рассматривал термическую или термомеханическую стабильность исследуемых материалов тоже как свойства?

2. В выводе 2 написано, что «Показано, что после интенсивной пластической деформации сплавы $Zr_{42.5}Cu_{42.5}Al_{10}Fe_5$, $Zr_{62.5}Cu_{22.5}Al_{10}Fe_5$ остаются аморфными, однако, в структуре присутствуют равномерно распределенные нанокристаллы». Здесь одно утверждение противоречит другому. Поскольку в сплаве присутствует кристаллическая фаза (в виде нанокристаллов), то в данном случае лучше бы писать о том, что сплавы после ИПДК остаются в основном аморфными или являются частично кристаллическими.

3. В диссертации не написано, как и с каких мест деформированных образцов готовились электронно-микроскопические фольги. При использованном методе ИПДК деформация по радиусу распределяется неравномерно, поэтому указание положения мест расположения исследуемых областей относительно оси вращения имеет важное значение.

Указанные замечания не снижают общего высокого научного уровня и ценности работы диссертанта.

Диссертационная работа построена по традиционной схеме и состоит из введения, пяти глав, выводов и охватывает 107 страниц, включая 61 рисунок, 14 таблиц и список использованных источников с 116 наименованиями отечественных и зарубежных авторов. Автореферат и публикации автора, включая 5 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, верно отражают содержание диссертационной работы.

Считаем, что диссертационная работа «Эволюция структуры и свойств аморфных сплавов на основе циркония под действием интенсивной пластической деформации», по объему проведенных исследований, качеству их проведения, достоверности полученных результатов, научной и практической значимости полностью соответствует установленным квалификационным требованиям раздела 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС и требованиям паспорта специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», а ее автор Пархоменко Марк Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв, диссертация и автореферат Пархоменко М.С. рассмотрены на семинаре «Кристаллические структуры и фазовые превращения при нормальном и высоких давлениях» Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской Академии наук (ИФТТ РАН), 23.04.2025 г., протокол № 157.

Отзыв на диссертацию М.С.Пархоменко рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета ИФТТ РАН.

Отзыв составил Аронин Александр Семенович,
главный научный сотрудник Лаборатории структурных
исследований ИФТТ РАН, доктор физико-математических наук,
специальность «Физика конденсированного состояния».

