

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

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

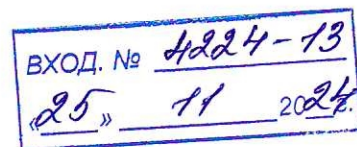
### **Актуальность работы**

Большинство объёмных металлических стёкол (ОМС) синтезируют достаточно простым и распространённым методом закалки из расплава на охлаждающую поверхность или в медную изложницу. Создание новых композиций с повышенной вязкостью в расплавленном виде позволяет получать массивные образцы многокомпонентных сплавов в аморфном состоянии при скорости охлаждения  $< 100$  К/с гораздо большего размера (шарики, стержни, слитки). Они могут обладать уникальным сочетанием свойств (повышенная прочность, ненулевая пластичность, коррозионная стойкость и высокий уровень магнитных характеристик). Несмотря на существенный прогресс в изучении эволюции структуры и свойств, много вопросов остаются нерешёнными, в частности, неомогенный характер пластической деформации, охрупчивание при достижении определённых температур и сроков службы, ограниченные размеры и качество поверхности, непростой выбор комбинаций стеклообразующих компонентов, отсутствие единой и непротиворечивой структурной модели, трудности в прогнозировании свойств. Низкая пластичность МС при растяжении ограничивает их применение в ответственных изделиях, а задача повышения пластичности требует понимания механизмов их деформации. Воздействовать на пластические свойства МС и вносить преобразования в структуру возможно используя потенциал интенсивной пластической деформации. В связи с этим, тематика и спектр проведённых исследований, выполненных в представленной диссертации В.В. Астанина, весьма актуальны, так как направлены на разработку феноменологической модели пластической деформации ОМС на основе атомистического моделирования и установление особенностей трансформации структуры и изменения механических свойств сплава Vit105 при кручении под высоким давлением (КВД).

### **Структура и краткое содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списков условных сокращений и аббревиатур, рисунков и таблиц, а также одного приложения.

**Введение** включает в себя актуальность работы; краткое изложение степени разработанности темы исследований; цель и задачи; научную новизну; теоретическую и практическую значимость; информацию о методологии и методах исследования; положения, выносимые на защиту; достоверность полученных результатов; сведения об апробации результатов, связях работы с научными программами и темами; личный вклад автора; данные о публикациях, объёме и структуре работы.



**В первой главе** представлен аналитический обзор работ зарубежных и российских авторов по изучению разупорядоченного аморфного состояния, эволюции структуры и отклика свойств металлических стёкол, особенностях их деформации и разрушения, в том числе при КВД, методах получения и перспективах применения.

**Во второй главе** подробно изложена методика эксперимента. Приведены сведения: на каких образцах проводились исследования; как осуществлялась пробоподготовка; при каких режимах было реализовано термическое и деформационное воздействие. Раскрыты методические аспекты экспериментального изучения структуры и свойств ОМС Vit105, а также атомистического моделирования.

**В третьей главе** обсуждаются экспериментальные данные, касающиеся построения физической модели ОМС Vit105 с использованием методов молекулярной динамики, выяснения природы элементарных носителей деформации и механизма продвижения полос сдвига в ОМС.

**В четвёртой главе** диссертантом изучено влияние КВД на структуру ОМС Vit105. Комплексное привлечение ПЭМ, СЭМ, РСА, ДСК, люминесцентного метода неразрушающего контроля позволило детализированно аттестовать образцы как в исходном состоянии, так и после обработки КВД при разном числе оборотов.

**Пятая глава** посвящена исследованиям механического поведения ОМС. Представлены экспериментальные данные после испытаний на растяжение, изучен характер разрушения, определены углы излома, установлены закономерности изменений критерия пластичности и твёрдости образцов с ростом степени деформации при КВД.

**В заключении** представлено 4 вывода по диссертации.

**Список цитируемой литературы** включает 185 источников.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе получен ряд новых и важных с научной точки зрения результатов. К наиболее весомым и оригинальным следует отнести:

- разработанную с помощью атомистического моделирования модель развития деформации в полосе сдвига (ПС) за счёт зарождения и распространения ротационных вихрей. Она дополняет и углубляет знания о строении ПС, механизмах их формирования с учётом химического и топологического ближнего порядка и вклада свободного объёма. Феноменологическая модель находится в согласовании с ранее развитой моделью зон сдвиговой трансформации (A. Argon), объясняет ряд особенностей ПС (их возможное объединение, перевивы, изменение траектории при продвижении в ОМС).

- с использованием внушительного арсенала структурных методов подробно изучена эволюция структуры на всех этапах деформационной обработки ОМС Vit105. Несмотря на рост степени больших пластических деформаций при КВД (до 10 оборотов) установлено, что аморфная структура

исследованного ОМС сохраняется, но с выделением неупорядоченных кластеров размером  $6,3 \pm 1,3$  нм и увеличением свободного объёма. Обнаружена тенденция к снижению микротвёрдости на начальных стадиях КВД ( $n = 1$  оборот), другими словами, определённый пластифицирующий эффект.

### **Практическая, теоретическая значимость**

Проведённые исследования вносят вклад в понимание причин преобразования структуры ОМС в условиях деформационной обработки при КВД. Это позволяет осуществлять более осознанный подход к оптимизации уровня их механических свойств.

Полученные результаты демонстрируют перспективы использования обработки кручением под высоким давлением при комнатной температуре для углубления знаний и более детального изучения пластической деформации ОМС, так как они могут выдерживать деформацию за счёт активации системы полос сдвига без разрушения.

Данные диссертационного исследования могут быть полезны для научных организаций и научно-производственных предприятий при разработке составов, технологий обработки ОМС.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и достоверность полученных результатов.**

Научные положения, выносимые на защиту, и основные выводы работы физически обоснованы с использованием адекватной интерпретации полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов оригинальных исследований с имеющимися в современной литературе модельными представлениями и экспериментальными данными других авторов. Представленные в диссертации результаты исследований прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях; признаны отечественным и зарубежным научным сообществом; профинансированы научными грантами.

Результаты диссертации опубликованы и апробированы в полной мере. **Уровень публикаций** высокий и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Среди публикаций имеются статьи как в престижных российских журналах из перечня ВАК, так и в высокорейтинговых международных журналах из баз данных WoS, Scopus.

**Содержание автореферата** в целом отражает полученные в диссертационной работе Астанина В.В. результаты и сформулированные общие выводы, и полностью **соответствует содержанию диссертации.**

Диссертация по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и полученным результатам **соответствует** следующим **пунктам паспорта специальности 2.6.6 «Нанотехнологии и наноматериалы» (отрасль науки – физико-математические):** 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.

### Замечания и рекомендации

1. Во введении, как и в разделе «Материал исследований», не раскрыто, по каким же критериям именно сплав Vit105 был выбран при постановке конкретных задач диссертационной работы. Что в нём особенного, кроме того, что он один из самых распространенных типов ОМС и широко изучаемых?

2. В литературном обзоре отсутствуют ссылки на работы крупной научной группы из Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина, возглавляемой д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАНУ В.Н. Варюхиным, которая также активно занимается КВД аморфных сплавов, изучением их структурных особенностей и свойств. Диссертанту следовало бы ознакомиться с публикациями учёных из этой научной школы – Ткача В.И., Метлова Л.С., Свиридовой Е.А. и др.

3. В п. 3 научной новизны (стр. 7), в п. 3 теоретической и практической значимости (стр. 8), в параграфах 5.2.2., 5.3 и в п. 4 заключения фигурирует свойство – микропластичность. Однако непонятно почему это свойство с приставкой «МИКРО» имеет размерность НАНОметры. В диссертации при проведении измерений по классическому микроиндентированию пирамидкой Виккерса получается выход на «НАНОуровень» и на линейный размер – нанометры (157+15 нм) свойства МИКРОпластичности. Вызывают недоумение такие формулировки и сомнения в корректности критерия микропластичности, по которому проводились расчёты. В приведенной расчётной формуле на стр. 57 параметр пластичности  $\Delta_h$  зависит от твёрдости ( $HV$ ), а учёта, например, упругой составляющей в деформацию материала (модуля Юнга  $E$ ) нет.

В физическом металловедении есть определение пластичности – это склонность материала подвергаться остаточным деформациям под нагрузкой. При этом в результате пластической деформации необратимо меняются размеры и формы образца. На практике пластичность характеризуется относительным удлинением до разрушения (при растяжении) или относительным поперечным сужением до разрушения и измеряется в процентах (%). В случае тонких, хрупких материалов, при возникновении сложностей при проведении классического определения пластичности на растяжение существует зарекомендовавшая себя методика инструментального наноиндентирования [1-5], при котором записываются кривые «нагрузка  $P$  – глубина внедрения индентора  $h$ ». В этом случае расчёт пластичности может определяться по формуле:  $\delta = \frac{A_p}{A_t} = 1 - \frac{A_e}{A_t}$ , где  $A_p$ ,  $A_e$ ,  $A_t$  – соответственно, работа затрачиваемая на пластическую, упругую и общую деформацию, при внедрении индентора, причем  $A_t = A_p + A_e$ . Работы рассчитываются по площадям под графиками при нагружении-разгрузке с автоматизированной фиксацией нанотвёрдости и модуля упругости. Данный индекс пластичности  $\delta$  признан учёными, широко используется и имеет физический смысл.

Кроме того, есть апробированная методика оценки трещиностойкости (её можно использовать как некий показатель пластичности) МС при индентировании, в которой идёт учёт размера трещин, модуля упругости и твёрдости МС [6].

#### Ссылки:

1. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationship between hardness, elastic modulus and work of indentation // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. N 5. P. 614-616.
2. Cheng Y.-T., Cheng C.-M. Scaling approach to conical indentation in elastic-plastic solids with work-hardening // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 84. N 3. P. 1284-1291.
3. Sakai M. The Meyer hardness; a measure for plasticity // *J. Mater. Res.* 1999. V. 14. N 9. P. 3630-3639.
4. Sakai M., Shimuzu S., Ishikawa T. The indentation load-depth curve of ceramics // *J. Mater. Res.* 1999. V. 14. N 4. P. 1471-1484.
5. Milman Y.V. Plasticity characteristic obtained by indentation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. Art. N 074013. P. 1-9.
6. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Манаенков С.Е. Пластифицирующий эффект при переходе из аморфного состояния сплавов в нанокристаллическое // *ДАН.* 2008. Т. 418. № 2. С. 181-183.

В связи с этим вопрос: что помешало в работе воспользоваться возможностями динамического индентирования для общепринятого определения пластичности исследованного ОМС?

4. Глава 5 имеет название «Влияние КВД на свойства металлического стекла Vit105». Но по факту, речь в главе идёт лишь о механическом поведении, поскольку проведены только испытания на растяжение и индентирование. Другие физические свойства – магнитные, упругие, коррозионные и проч. не изучались. В связи с этим целесообразнее было назвать главу конкретнее: «Влияние КВД на механические свойства металлического стекла Vit105».

5. В работе есть недочёты в оформлении:
- а) в списке литературы есть публикации с неполным набором выходных данных, например, в ссылках [7], [34], [49], [121], [166] отсутствуют том, номер, страницы журналов.
  - б) встречаются опечатки, например, на стр. 88 и стр. 96 вместо номера таблиц «11» и «14» стоят «??».
  - в) на рисунках 3.13а; 3.14; 3.15; 4.9 отсутствует масштабная линейка.
  - г) присутствуют неудачные фразеологические обороты, например, «...характеристики охарактеризованы...» на стр. 7.

Данные замечания не являются критическими, не оказывают влияние на общее положительное впечатление от диссертационной работы, основные её выводы и положения, выносимые на защиту.

## Заключение

Следует отметить, что диссертация Астанина В.В. «Трансформация структуры объёмного металлического стекла Vit105 при кручении под высоким давлением» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложена разработанная феноменологическая модель пластической деформации ОМС на основе атомистического моделирования, а также решена научная задача по установлению особенностей структурообразования и модификации свойств ОМС системы Zr-Cu-Ni-Al-Ti при КВД, что вносит определённый вклад в изучение физики аморфного состояния, и понимания механизмов гетерогенной пластической деформации ОМС.

Считаю, что по актуальности, научной новизне, высокому экспериментальному и теоретическому уровню, совокупности результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), а её автор, Василий Владимирович Астанин, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6 «Нанотехнологии и наноматериалы».

### **Официальный оппонент:**

Пермякова Инга Евгеньевна  
доктор физико-математических наук  
(специальность 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»),  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории физикохимии и механики металлических материалов  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
(ИМЕТ РАН)


Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Раб.тел.: 7(499)135-44-14

E-mail: inga\_perm@mail.ru

« 15 » ноября 2024 г.

Подпись Пермяковой Инги Евгеньевны заверяю

Учёный секретарь ИМЕТ РАН,  Фомина Ольга Николаевна  
кандидат технических наук

Я, Пермякова Инга Евгеньевна, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.