

### Отзыв официального оппонента

о диссертации Болтынюка Евгения Вадимовича «Механическое поведение аморфных сплавов со структурой, модифицированной интенсивной пластической деформацией», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Болтынюка Е.В. посвящена решению **актуальной** проблемы - установлению закономерностей и систематическому изучению механизмов деформирования и механических свойств объемных металлических стекол (ОМС), а также изучению влияния структуры ОМС на механические свойства для определения путей повышения пластичности материалов этого класса. Работа направлена на выявление основных факторов, определяющих процесс деформации ОМС, получению двухфазной композитной структуры - наностекла, и исследованию ее механических свойств. В качестве объекта исследования был использован ОМС состава  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ .

Главным в диссертационной работе является поиск новых возможностей формирования структуры в ОМС и определение ее корреляции со свойствами. Диссертантом разработан новый способ формирования такой структуры, обеспечивающий формирование в образце равномерно распределенных полос сдвига при интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК). Диссертантом показано, что интенсивная пластическая деформация подавляет или значительно понижает локализацию деформации при последующем деформировании, что приводит к более однородному деформированию и способствует повышению пластичности материала. Проведенные исследования позволяют прогнозировать процессы разрушения, расширяя, таким образом, область применения аморфных сплавов, ограниченную на сегодняшний день низкой пластичностью данных материалов. Это один из важнейших результатов работы, имеющий **научное и практическое значение**.

Изложению полученных диссертантом результатов предшествует краткий обзор состояния проблемы, в котором очерчен основной круг нерешенных задач. В нем рассмотрены имеющиеся данные по структуре ОМС и ее изменению при деформации. Диссертант, с моей точки зрения, правильно расставил акценты и верно сформулировал те направления работы, которые необходимы для создания реалистической картины обсуждаемой проблемы.

При выполнении работы им были использованы основные прямые методы анализа структуры и свойств: методы рентгенографии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, прямого измерения плотности исходных и деформированных с образцов, измерения механических свойств при различных условиях нагружения и др. Особо хотелось бы отметить эксперименты по непосредственному измерению плотности образцов с использованием уникальной методики, позволяющей с большой точностью определять плотность образцов (с точностью до 0.5%). Диссертация выполнена на очень высоком методическом уровне, эксперименты проводились с использованием самого современного оборудования. Одни и те же объекты исследовались разными методами. Все это создало основу для получения **достоверных** и воспроизводимых результатов, обеспечивающих высокую **надежность** сделанных в работе выводов.

В целом, диссертантом получено множество **новых** интересных и **важных результатов**. Среди них можно выделить несколько. Первая группа результатов относится к определению влияния ИПДК на структуру ОМС. Показано, что ИПДК приводит как к смещению диффузных рентгеновских максимумов, так и увеличению их полуширины. На основании этих результатов получены размеры первой координационной сферы и ее оценена эволюция при деформации. Эти результаты согласуются с данными, полученными при измерении плотности образцов.

Определены морфологические характеристики полос сдвига. Показано, что по морфологии полосы сдвига можно разделить на первичные и вторичные, определены их толщины и взаимное расположение. Первичные – единичные, хорошо различимые полосы, и вторичные – полосы меньшей толщины, собирающиеся в группы. Принципиальным представляется также обнаруженная неравномерность в распределении полос сдвига по сечению деформированных образцов. Экспериментально обнаружено, что наибольшая степень деформации приповерхностных областей приводит к формированию в них большей плотности более тонких полос сдвига. Такое неравномерное распределение полос сдвига при ИПДК имеет большое значение не только для исследуемого объекта, но очень существенно для случаев формирования наноструктуры при деформации аморфных сплавов, при которых образование нанокристаллов связывают с полосами сдвига.

На основе проведенных экспериментов по наноиндентированию:

- проведен расчёт размеров зон сдвиговой трансформации в исходном ОМС и после ИПДК; ИПДК при комнатной температуре и температуре 150°C приводит к уменьшению размеров зон сдвиговой трансформации от 4.22 нм<sup>3</sup> в исходном состоянии до 1.79 и 2.77 нм<sup>3</sup>, соответственно;

- показано, что ИПДК понижает локализацию деформации при деформировании, что приводит к более однородному деформированию при последующем индентировании.

Полученные в работе данные свидетельствуют о влиянии предварительной ИПДК на процесс последующего разрушения при растяжении. Авторы связали эти изменения с влиянием эволюции структуры аморфного сплава при ИПДК и, в частности, образования многочисленных полос сдвига. Результаты, представленные в главе 3, являлись необходимой базой для понимания процессов деформации ОМС, описанных в главе 5. Изменения структуры в процессе предложенной обработки оказывают положительное влияние на пластичность сплава. Полученные результаты демонстрируют потенциал повышения пластичности аморфных сплавов за счёт модификации их структуры методом ИПДК. **Практическая значимость** такого результата неоспорима, так как повышение пластичности ОМС является одной из основных задач в данной области. Решение данной проблемы позволит существенно расширить область применения ОМС в качестве конструкционных материалов.

В целом, высоко оценивая диссертацию Е.В. Болтынюка, считаю необходимым сделать следующие замечания.

1. В диссертации на с.70 написано, что при деформации «Увеличение свободного объёма может происходить как от увеличения межатомных расстояний в аморфной матрице, так и от формирования в структуре полос сдвига с увеличенным свободным объёмом» и с этим трудно спорить. Но на с.72 говорится, что все «понижение плотности  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$  ОМС при ИПДК связано с формированием множественных полос сдвига». Из текста диссертации не понятно, как выделили ту часть изменения плотности, которая соответствует именно полосам сдвига. Нет оценок количества материала в полосах сдвига, и, соответственно, плотности аморфной фазы в полосах. В тоже время в литературе есть данные о плотности аморфного сплава в полосах сдвига. По разным данным концентрация свободного объёма в полосах оценивается от 5 до 20 %. Тогда объём материала в полосах сдвига при измеренных изменениях плотности должен составлять десятки процентов. Исходя из приведенных данных по размерам и расположению полос в

образце после ИПДК (учитывая, что в центре образца их количество существенно уменьшается), это значение представляется малореалистичным.

2. Не обсуждается различие контраста при СЭМ исследованиях поперечного сечения образца после ИПДК в разных детекторах. С помощью детектора обратно-рассеянных (отраженных) электронов (BSE) обнаружена четкая граница между центральной частью образца и приповерхностными областями, в то время как на изображениях, полученных с помощью детектора “in-lens”, образец выглядит однородным. Известно, что детектор “in-lens” предназначен для исследования с высоким разрешением топографии поверхности, а детектор BSE позволяет фиксировать фазовый контраст. В этой связи очень жаль, что в диссертации нет никакого обсуждения этого результата. Интересно бы провести дополнительные эксперименты или хотя бы высказать какие-либо предположения о природе такой вариации контраста и ее связи со структурой образца.

3. Во многих местах диссертации для описания рентгеновских пиков используется термин уширение. На с.70 например, написано, что «увеличение уширения аморфного сплава» свидетельствует о повышении свободного объема. Уширение по сравнению с чем? Уширение чего? Не расшифровывается должным образом сокращение FWHM (с.69 и др.). Или это все-таки не уширение, а полуширина (или ширина) рентгеновского пика?

4. Хотя в диссертации приводятся данные про FWHM, не ясно, как они получены. Нет разложений рентгеновских пиков на составляющие для систем, соответствующих наностеклу. Увеличение полуширины автор связывает только с образованием областей с повышенной концентрацией свободного объема, не рассматривая никакие альтернативные механизмы фазового расслоения.

Присутствуют также опечатки, но их немного, и в целом диссертация написана логично, хорошим и понятным языком.

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в ведущих научных журналах и докладывались на национальных и международных научных конференциях. Диссертация Болтынюка Евгения Вадимовича «Механическое поведение аморфных сплавов со структурой, модифицированной интенсивной

пластической деформацией» является законченной научно-квалифицированной работой. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации, которое соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Полагаю, что диссертация Болтынюка Е. В. «Механическое поведение аморфных сплавов со структурой, модифицированной интенсивной пластической деформацией», полностью соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждение искомой ученой степени по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности  
01.04.07 «Физика конденсированного состояния», профессор,  
заведующий лабораторией структурных исследований  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Институт физики твердого тела Российской  
академии наук

Тел.: 8 (496)522-46-89

E-mail: [aronin@issp.ac.ru](mailto:aronin@issp.ac.ru)

Адрес: 142432, Черноголовка Московской области, ул. Академика Осипьяна, д. 2, ИФТТ  
РАН

Аронин Александр Семенович  
15 мая 2018 г.

Подпись Аронина А.С. заверяю  
Ученый секретарь ИФТТ РАН д.ф. м.н.



Абросимова Галина Евгеньевна