

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию 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 Е. В. Болтынюка посвящена экспериментальному исследованию влияния интенсивной пластической деформации – кручения под давлением – на структуру и механические свойства аморфного металлического сплава  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ , полученного в виде объемных образцов путем быстрого охлаждения расплава в медном тигле. Основная направленность работы состояла в том, чтобы на примере выбранного сплава изучить возможность повышения пластичности таких материалов с помощью отработанных схем пластической деформации до показателей, типичных для металлических наностекло. С помощью оригинальной технологической оснастки получения и подготовки образцов и современных методов экспериментального изучения их структуры и механических свойств, включающих методы рентгеноструктурного анализа, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, измерения плотности образцов с помощью лазерного конфокального микроскопа, наноиндентирования и одноосного растяжения, автор исследует факторы, которые свидетельствуют об изменении структуры и механического поведения объемного металлического стекла (ОМС)  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$  под действием интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) при комнатной и повышенной (150 °С) температурах. Большая часть проведенных таким образом исследований говорит о том, что выбранная стратегия пластификации ОМС может рассматриваться как перспективная. Таковы результаты, свидетельствующие о формировании на стадии ИПДК высокой плотности полос сдвига, об увеличении свободного объема в структуре ОМС, о понижении модуля упругости, о большей однородности пластического течения, об уменьшении размера зон сдвиговой трансформации и энергии активации их образования, об изменениях вида поверхности разрушения. В то же время, из этого ряда выпадают результаты испытаний на одноосное растяжение, которые в данном контексте следует признать скорее отрицательными.

**Актуальность** темы представленной работы не вызывает сомнений. Фундаментальные и прикладные исследования аморфных металлических сплавов и, в частности, ОМС проводятся во всех индустриально развитых странах мира, и объем этих исследований постоянно растет. При этом особый интерес вызывают как структурные изменения, происходящие в ОМС в процессе пластической деформации, так и сами механизмы деформации и разрушения ОМС. Большие перспективы практического применения таких материалов заставляют их разработчиков искать способы повышения их пластичности, и в качестве одного из таких способов рассматривается предварительное пластическое деформирование образцов. Диссертационная работа Е. В. Болтынюка лежит полностью в русле этих исследований. Она нацелена на решение актуальной проблемы отыскания таких режимов ИПДК, которые способны обеспечить повышение пластичности ОМС до величин, характерных для металлических наностекло.

**Научная новизна** представленных автором результатов очевидна. Впервые проведен комплекс сравнительных экспериментальных исследований ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$  в исходном состоянии и подвергнутых ИПДК при комнатной и повышенной температурах, а

также отжигу при 500 °С. Результатом этих исследований стали новые знания о том, что после ИПДК в таком ОМС увеличивается свободный объем, появляется большое количество полос сдвига, классифицированных автором на первичные и вторичные, морфология которых зависит от температуры проведения ИПДК, заметно изменяется механическое поведение образцов. В работе впервые описан характер этих изменений, которые выражаются в изменении кривых деформирования при наноиндентировании, в росте показателя чувствительности материала к скорости деформации, в изменении вида поверхности разрушения при одноосном растяжении образцов. Впервые показано, что применение к ОМС предварительной ИПДК ведет к уменьшению характерного размера зон сдвиговой трансформации и энергии активации их образования.

Полученные Е. В. Болтынюком **результаты и выводы представляются вполне обоснованными и достоверными**. Об этом свидетельствует применение современных и хорошо апробированных методов экспериментального исследования структуры и свойств образцов ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ , воспроизводимость результатов проведенных экспериментов, согласие в ряде случаев полученных результатов с аналогичными результатами других авторов, а также то, что большая часть полученных результатов соответствует существующим представлениям об особенностях механического поведения ОМС. В пользу обоснованности и достоверности выводов работы свидетельствует и ее апробация на международных конференциях и семинарах, и публикация ее результатов в ведущих зарубежных научных журналах.

**Научная значимость** работы высока. Результаты проведенных экспериментальных исследований формируют большой массив новой научной информации о влиянии предварительной ИПДК на структуру и механическое поведение ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$  и свидетельствуют в пользу избранной стратегии повышения пластичности ОМС с помощью ИПДК. В целом, результаты работы Е. В. Болтынюка могут служить научной основой для развертывания дальнейших исследований в этом направлении, в частности, по оптимизации режимов ИПДК, по выбору подходящих по составу аморфных сплавов и по усовершенствованию технологии получения и обработки образцов.

Поскольку области применения аморфных сплавов включают в себя медицину, микроэлектронику, спортивное снаряжение и военную технику, проведенные в работе Е. В. Болтынюка исследования, нацеленные на преодоление их хрупкости, имеют большое **практическое значение**.

В целом, данная диссертация представляет собой законченное экспериментальное исследование, объединенное единым замыслом и построенное логично и естественно. Она содержит достаточно полный и ясный обзор литературы, который имеет собственную научную ценность и может быть опубликован в виде отдельной обзорной статьи.

В то же время, по работе можно сделать ряд критических замечаний:

1. Первое замечание касается п. 4.3, посвященного определению размера зон сдвиговой трансформации в ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ . Поскольку большую часть этого раздела составляет изложение теоретической работы Джонсона и Сэмвера [163], было бы правильно поместить эту часть в обзорную главу 1, чтобы четко разграничить чужие теоретические результаты и полученные на их основе оригинальные численные оценки автора. Заметим, что содержание работы [163] изложено здесь довольно путано и содержит неясные места и ошибки в формулах. Например, в первом равенстве формулы (1) функция

$[1 - \cos(\pi\gamma / 2\gamma_c)]$ , помещенная автором в знаменатель дроби, должна быть в числителе. В выражении для величины  $\Gamma$  (стр. 94, 10-я строка снизу) под экспонентой стоит величина с размерностью энтропии. Используются необъясненные англоязычные термины «fold catastrophe» и «fold ratio», а также аббревиатура МСВ (стр. 97), которая встречается еще в нескольких местах диссертации, но нигде не расшифровывается.

2. При описании в п.п. 2.3.6 и 5.1 результатов механических испытаний на одноосное растяжение ничего не сказано ни о количестве испытанных образцов, ни о разбросе экспериментальных данных. Из приведенных на рис. 5.1 диаграмм и данных табл. 5.1 создается впечатление о том, что были испытаны только три образца, по одному на каждое из изучаемых состояний ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$  (исходное и подвергнутые ИПДК при 20 и 150 °С). Учитывая сохранившуюся хрупкость образцов при резком снижении разрушающего напряжения (примерно в 5,6 раза после ИПДК при 20 °С и на 12% после ИПДК при 150 °С), было бы естественно набрать необходимую статистику результатов таких испытаний, чтобы сделать обоснованное заключение по этому разделу работы. Представленные на сегодня данные идут вразрез как с результатами других разделов работы, так и с общим заключением о перспективности применения ИПДК для улучшения механических свойств ОМС.
3. Выглядит странным, что в главе 2, посвященной описанию использованных экспериментальных методик, в качестве иллюстраций приводятся данные, полученные для совершенно других материалов, не имеющих никакого отношения к изучаемому в данной работе ОМС  $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ . Например, на рис. 2.3 приведен снимок образца  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , на рис. 2.4 – рентгенограмма аморфного сплава PdSi, на рис. 2.6 – калориметрические данные для аморфного сплава  $Al_{45-x}La_{55}Ni_x$ , на рис. 2.8 – диаграмма растяжения стального (!) образца. Было бы гораздо естественнее привести данные если не для того же сплава, который изучался в работе, то, по крайней мере, для аморфного циркониевого сплава близкого состава.
4. Необходимо отметить небрежное и невнимательное обращение автора с русским языком. Так, в тексте диссертации, помимо опечаток и пропусков слов, часто встречаются неудачные, малопонятные и просто ошибочные выражения, такие, например, как «Плотность материала определяется как соотношение объема к массе» (стр. 63), «уширение аморфного сплава» (говоря об уширении брэгговских пиков, стр. 70), «планарные исследования структуры» (стр. 74), «аморфная дифракция» (стр. 74), «стержень диаметром 5 мм и высотой 2,5 мм» (стр. 79) и т. д. Обсуждая отношение ординаты к абсциссе или производную к кривой, автор систематически опускает слово «тангенс», оперируя понятием «угол наклона кривой» (стр. 67, 71, 88 в диссертации, стр. 8 в автореферате). Часто неоправданно используется англоязычная терминология, например, «X-лучи» вместо рентгеновских лучей (стр. 60), «EDX» вместо энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (стр. 72-73). В ряде случаев углы измеряются в градусах Цельсия (стр. 60 в диссертации, стр. 9 в автореферате). Непонятно, что означает повторяющаяся буква К в строке табл. 3.2 (стр. 73), где перечисляются химические элементы: ОК, AlK, FeK, DyK, CuK, ZrK. Большой фрагмент текста в п. 2.3.1 на стр. 58-59 дословно повторяет фрагмент текста в п. 1.2.4 на стр. 48-49.

5. Можно сделать также ряд замечаний по оформлению диссертации. **Во-первых**, многие рисунки (рис. 1.6, 1.8, 1.9, 1.11-1.13, 1.19, 2.4, 2.6, 2.7) слишком мелки и нечетки для чтения бумажного варианта диссертации, на некоторых рисунках либо отсутствуют масштабные метки (рис. 2.1, 2.3, 3.12), либо они практически неразличимы (рис. 2.5, 3.7, 3.12, 5.2, 5.3). **Во-вторых**, подписи к некоторым рисункам либо недостаточно подробны (рис. 2.5, 2.7), либо не соответствуют изображению на рисунке (рис. 1.3, 3.14). Например, совершенно никак не прокомментированы снимки, иллюстрирующие процесс изготовления образцов на рис. 2.5 и метод измерения высоты мениска лазерным конфокальным микроскопом на рис. 2.7. На рис. 1.3(а) дана температурная зависимость теплоемкости, а в подписи к рисунку и в тексте (стр. 20) речь идет о коэффициенте теплового расширения. В подписи к рис. 4.1 отсутствует ссылка на источник – статью Джонсона и Сэмвера [163]. **В-третьих**, обозначения диаграмм растяжения на рис. 5.1 не соответствуют ни данным в табл. 5.1 в диссертации, ни обозначениям этих же диаграмм на рис. 5 в автореферате. **В-четвертых**, рисунки 3.3-3.5 следовало бы объединить в один для большей наглядности представленных результатов. То же самое справедливо для рисунков 3.14-3.16.

Сделанные замечания, конечно, никак не затрагивают основных результатов диссертации и не снижают ее общей высокой оценки. Работа Е. В. Болтынюка имеет несомненную высокую научную и практическую ценность. Материал диссертации достаточно полно отражен в опубликованных автором работах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Е. В. Болтынюка «Механическое поведение аморфных сплавов со структурой, модифицированной интенсивной пластической деформацией» удовлетворяет всем критериям, установленным Положением «О присуждении ученых степеней», а ее автор, Е. В. Болтынюк, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Главный научный сотрудник,  
зав. лабораторией механики наноматериалов  
и теории дефектов ИПМаш РАН,  
доктор физ.-мат. наук

  
29.05.2018

М. Ю. Гуткин

Гуткин Михаил Юрьевич

Моховая ул., д. 22, кв. 83, Санкт-Петербург, 191028

Тел.: 8-921-322-01-56

E-mail: [m.y.gutkin@gmail.com](mailto:m.y.gutkin@gmail.com)

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки  
Институт Проблем Машиноведения РАН (ИПМаш РАН)  
Главный научный сотрудник, зав. лабораторией механики  
наноматериалов и теории дефектов

