Санкт-Петербургский государственный университет Механика и математическое моделирование Механика деформируемого твёрдого тела

Рерих Степан Иванович

Твёрдость циркониевых стекол, полученных методом интенсивной пластической деформации кручением

Бакалаврская работа

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор Р.З. Валиев

Рецензент:

Доктор физико-математических наук Д.В. Гундеров

Санкт-Петербург

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mechanics and mathematical modelling

Deformable body mechanics

Stepan Rerikh

Hardness of Zr-based bulk metallic glasses produced by high-pressure torsion

Bachelor's Thesis

Scientific supervisor:

Doctor of Physics and Mathematics, Professor R.Z. Valiev

Reviewer:

Doctor of Physics and Mathematics D.V. Gunderov

Saint-Petersburg

2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1 Обзор литературы	6
1.1 Аморфное и кристаллическое строение вещества	6
1.2 Методы интенсивной пластической деформации	9
1.3 Измерение твёрдости	13
Глава 2 Цель и методики исследования	16
2.1 Цель исследования	16
2.2 Объект и методики исследования	18
Глава 3 Экспериментальные результаты	22
Заключение	26
Обзор литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наноструктурирование стало одним из наиболее актуальных направлений В материаловедении. Наноструктурирование различных материалов позволяет получить повышенные и уникальные свойства, привлекательные для различных функциональных применений. Существует два подхода к получению наноструктурных материалов: подход «снизу вверх» и «сверху вниз». Первый подход заключается в формировании структур из отдельных атомов или компактировании наноразмерных порошков. Суть второго подхода, подхода «сверху вниз»—это измельчение зёрен методами интенсивной пластической деформации (ИПД) или взрывной обработки. За последние пару десятилетий методы ИПД получили широкое распространение, поскольку они открывают новые возможности для создания различных технологий по изготовлению наноструктурных металлов и сплавов для различных уникальных применений. Методы ИПД позволяют получать новые и необычные свойства для широкого ряда металлов и сплавов. К таким свойствам относятся как высокая прочность и пластичность, рекордная усталостная прочность, так и мультифункциональное поведение, когда материал обладает повышенными функциональными (электрическими, магнитными и др.) и механическими свойствами. Одним из методов ИПД пластическая деформация кручением интенсивная (ИПДК). является Обрабатываемый образец помещается между двух наковален Бриджмена и подвергается одновременному сжатию и кручению. Как указано выше, подобная обработка приводит к модификации структуры и свойств обрабатываемого материала.

Аморфные металлические сплавы представляют класс материалов, не обладающих кристаллической структурой. Данные материалы обладают повышенной прочностью, упругим удлинением, коррозийной стойкостью по сравнению с кристаллическими аналогами того же химического состава.

Однако широкое практическое применение аморфных сплавов ограничено их хрупкостью. При комнатной температуре аморфные сплавы почти не показывают пластичности на растяжение, деформирование осуществляется формированием высоко локализованных полос сдвига. Формирование первых же полос сдвига приводит к хрупкому разрушению. В связи с этим в последние несколько лет активно изучается влияние предварительного пластического деформирования на структуру и механические свойства аморфных сплавов. В частности, было показано, что многоцикловая прокатка (МП) может приводить к повышению пластичности аморфных материалов за счёт формирования высокой плотности полос сдвига. Аналогичным образом, ИПДК представляет большой интерес как метод обработки аморфных материалов с целью модификации структуры и, соответственно, свойств за счёт большой степени деформаций, вводимых в материал без его разрушения. Предполагается создать в деформируемом материале структуру, состоящую из аморфных кластеров нанометровых размеров, разделённых полосами сдвига – границами с повышенным свободным объёмом, тем самым улучшив свойства исходных аморфных сплавов.

Исходя вышесказанного, исследование влияния ИПДК ИЗ модификацию структуры и свойств аморфных сплавов имеет большой теоретический и практический интерес. Для решения этого фундаментального вопроса необходимо провести комплексные исследования. Как будет описано «Обзор литературы», измерение микротвердости зарекомендовавшим себя методом аттестации как однородности структуры, так и изменения механических свойств материала после кручения. Основное внимание в данной работе уделено измерению микротвердости аморфного $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$, подвергнутого ИПДК при различных температурах.

Глава 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 АМОРФНОЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Металлы и их сплавы традиционно считаются кристаллическими по своей природе, обладающими периодической структурой. Все атомы расположены регулярно, составляют кристаллическую решётку. Решётка состоит из элементарных ячеек, одинаковых по форме и содержанию. Зная расположение одного атома в пространстве и параметры элементарной ячейки, представляется возможным определить положение любого атома кристаллической решётки (Рис. 1а). Более того, концепция кристаллической решётки подразумевает, что каждый атом имеет одинаковое окружение – расстояния до ближайших атомов и число ближайших соседей. Подобная упорядоченность во взаимном расположении атомов, распространяющаяся на больших расстояниях, называется дальним порядком. Однако в 1960 году произошла революция в представлении о металлах, когда Полом Дювезом [1] были получены некристаллические пленки Au₇₅Si₂₅. Плёнки толщиной в 10 им, полученные путём закалки капель расплава, не обладали периодической структурой, были аморфными (Рис. 1б). Отсутствие периодичности подразумевает невозможность однозначного аморфной структуры по аналогии с кристаллическими материалами, атомы структуры расположены случайно.

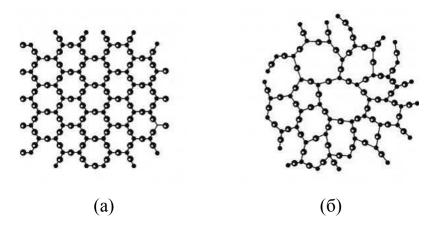


Рисунок 1-Кристаллическое (а) и аморфное (б) строение вещества

Открытие Дювеза послужило началом изучения нового структурного состояния металлов-аморфного. За более чем 50-летнюю историю наметился прогресс в исследовании аморфных сплавов-изучении значительный структурных, механических свойств. В частности, объёмные металлические стекла (ОМС) представляют собой значительный успех данных исследований. Стёкла получают последовательным охлаждением расплава [2]. понижением температуры до температуры кристаллизации/плавления (T_m) свободный объём расплава уменьшается (Рис. 2). При дальнейшем охлаждении с обычными скоростями происходит кристаллизация материала, сопровождающаяся резким падением свободного объёма. Если же скорость охлаждения достаточно высока, то при T_m кристаллизация не наблюдается, расплав переходит В состояние переохлажденной жидкости. переохлажденной жидкости не наблюдается резкого падения свободного объёма при T_m , охлаждение сопровождается постепенным его уменьшением. Вязкость же при этом возрастает. При определённой температуре, температуре стеклования (T_g), вязкость станет настолько большой, что переохлажденная жидкость перейдёт в твёрдое состояние, сохранив при этом аморфную структуру.

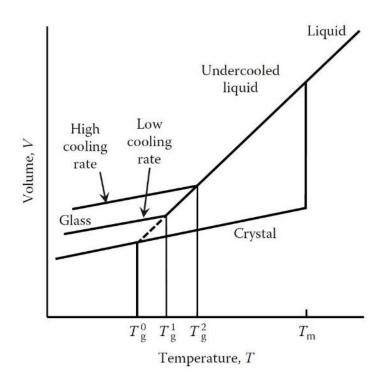


Рисунок 2—Зависимость удельного объёма от температуры при образовании кристаллического и аморфного состояния материала [2]

1.2 МЕТОДЫ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Размер зерна играет определяющую роль в механическом поведении кристаллических материалов. Так соотношение Холла-Петча устанавливает связь между пределом текучести, σ_y , и размером зерна, d, кристаллических материалов

$$\sigma_{y} = \sigma_0 + k_{y} d^{-1/2},$$

где σ_0 —некое напряжение трения, необходимое для скольжения дислокаций в монокристалле, k_v —постоянная Холла-Петча.

Как видно из данного соотношения, с уменьшением размера зерна прочность материала возрастает. Наряду с увеличением прочности материалы способны демонстрировать уникальные физические свойства. В связи с этим в последние несколько десятилетий получили развитие методы, связанные с уменьшением размера зерна.

Существует два подхода к получению материалов с уменьшенным размером зерна [3]. Первый подход, так называемый «снизу вверх», заключается в компактировании наноразмерных порошков, полученных такими методами, как газовая конденсация в атмосфере инертного газа, плазмохимический метод, аэрозольный и химический синтез, измельчение порошков в шаровой мельнице и др. Некоторые из этих методов были успешно применены для получения объёмных наноструктурированных материалов. Однако до сих пор не решены проблемы, связанные с сохранением некоторой остаточной пористости при компактировании и загрязнением примесями в процессе изготовления.

Второй подход, «сверху вниз», заключается в измельчении изначально более крупного зерна методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [4] или взрывной обработки. Известно, что путём введения

значительных деформаций в обрабатываемый материал, например, холодной прокаткой, можно сильно измельчить структуру последнего. Однако полученные структуры имеют ячеистый вид с границами с малоугловыми разориетировками. Методы же ИПД позволяют существенно уменьшить размер зерна вплоть до наноуровня, получить структуры зерённого типа с высокой плотностью большеугловых границ [5]. Следующие особенности качественно отличают ИПД от традиционных методов механообработки материалов. Высокие степени деформации, приводящие к значительному измельчению и модификации структуры. Особенности оснастки позволяют сохранить изначальную форму образцов после обработки, а большое гидростатическое давления в ходе обработки препятствуют свободному течению и разрушению материла. Деформация и дефекты распределяются однородно по всему объёму обрабатываемого материала. Указанные особенности позволяют избежать недостатков, присущих подходу «снизу вверх»: остаточная пористость, загрязнение материала примесями, небольшие размеры образцов, ограничивающие возможные области применения материалов с уменьшенным размером зерна. Три метода интенсивной пластической деформации, получившее наибольшее распространение: многоцикловая прокатка, равноканальное угловое прессование (РКУП), интенсивная пластическая деформация кручением. Обратим внимание на методе ИПДК, позволяющим достичь наибольших степеней деформирования.

В 1943 году Бриджменом была опубликована статья по созданию установки для совместного кручения и сжатия под высоким давлением [6]. С помощью новой установки было исследовано поведение твёрдых тел при высоких приложенных давлениях.

Конструкция установки для ИПДК представлена на Рис. 3 [7]. Образец в форме диска располагается между двух наковален и подвергается сжатию под давлением Р в несколько ГПа при комнатной или повышенной температуре.

Далее при вращении нижней наковальни происходит деформирование образцы сдвигом за счёт сил поверхностного трения между наковальней и образцом. Как указано выше, деформирования образца происходит в условиях гидростатического сжатия под действием проложенного давления и давления со стороны внешних слоёв образца, что позволяет сохранить целостность образца и его дискообразную форму.

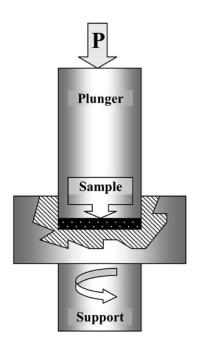


Рисунок 3-Схема установки ИПДК [7]

Для оценки степени деформации при ИПДК применяются различные соотношения. Возможно применение следующего уравнения для расчета логарифмической степени деформации

$$\varepsilon = \ln(\frac{\varphi r}{h}),$$

где φ –угол вращения наковален, r–радиус образца, а h–его толщина.

Данная формула аналогична соотношению, используемому для оценки истинных степеней деформации образцов при растяжении. Однако в случае ИПДК она не имеет никакого физического смысла в отличие от случая

растяжения. Т.к. при кручении происходит сдвиговое деформирование образца, то для расчёта степени сдвиговой деформации при ИПДК часто используют формулу, применяемую в случае обычного деформирования кручением для оценки степени сдвиговой деформации на расстоянии r от оси дискообразного образца

$$\varepsilon_{\rm C} = \frac{2\pi rN}{h}$$
,

где N–число оборотов, а h–толщина образца.

Исходя из последнего уравнения, значение деформации при ИПДК линейно возрастает от нуля (в центре образца) до наибольшего значения (на краю образца). А, следовательно, структуры, полученные методом ИПДК, быть экстремально неоднородны. Однако должны многочисленные экспериментальные данные показывают, что методом ИПДК возможно Для получение достаточно однородных структур. оценки степени однородности структуры по радиусу образца после кручения возможно применение методов просвечивающей электронной микроскопии. Однако наиболее простой и информативный метод – измерение микротвёрдости, например, по Виккерсу. Широкое распространение этот метод приобрёл благодаря работе [7], где был применён для оценки степени однородности по радиусу. Было показано, что значение твёрдость принимает наименьшее значение в центре образца и постепенно растёт к краю. Однако увеличение степени деформации приводит к уменьшению разницы в значениях твёрдости в центральной и краевой областях, что свидетельствует о более однородном деформировании.

1.3 ИЗМЕРЕНИЕ ТВЁРДОСТИ

Твёрдость—свойство материала оказывать сопротивление упругой и пластической деформации или разрушению при внедрении в поверхностный слой материала другого, более твёрдого и не получающего остаточной деформации тела—индентора.

По широте применения испытания на твёрдость, особенно при комнатной температуре, конкурируют с наиболее распространенными испытаниями на статическое растяжение. Это объясняется простотой и высокой производительностью, отсутствием разрушения образца, возможностью оценки свойств отдельных структурных составляющих и тонких слоев на малой площади, легко устанавливаемой связью результатов определения твёрдости с данными других испытаний [8].

Существующие методы измерения твёрдости отличаются друг от друга по форме применяемого индентора, условиям приложения нагрузки и способу расчёта чисел твёрдости. Наиболее известные из них, это твёрдости по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу. В наше время распространены методы определения твёрдости, в которых используется вдавливание индентора на малых скоростях нормально поверхности образца.

Остановимся на твёрдости по Виккерсу, как наиболее распространенном Выбранный метод измерения регламентирован простом методе. ГОСТ 9450 – 76. Определение микротвердости (твёрдости в микроскопически малых объемах) позволяет исследовать отдельные структурные составляющие сплавов, тонких покрытий, а также мелкие образцы. В качестве индентора используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136°. Эта пирамида плавно вдавливается образец В при нагрузках 0,05 – 5 Н (Рис. 4).

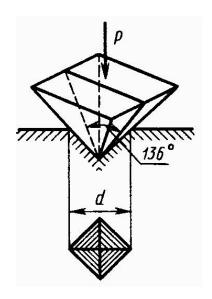


Рисунок 4-Схема определения твёрдости по Виккерсу

Число микротвёрдости (HV) представляет собой частное от деления нагрузки P на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка S

$$HV = \frac{P}{S}$$

Для четырёхгранной пирамиды с углом между противоположными гранями при вершине 136° площадь

$$S = \frac{d^2}{2\sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,854}.$$

Тогда

$$HV = \frac{1,854F}{d^2}$$

где d—среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, в мм [9].

По ГОСТу число микротвёрдости $(\frac{\kappa rc}{MM^2})$ записывают без единиц измерения с указанием нагрузки в кгс, например, 120HV0,01 (120–число микротвёрдости, 0,01–нагрузка) [10].

Глава 2 ЦЕЛЬ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как было сказано ранее, аморфные сплавы обладают уникальными свойствами: повышенной прочностью, упругим удлинением, коррозийной стойкостью ПО сравнению с кристаллическими аналогами того химического состава. Однако их деформирование при комнатной температуре проходит за счёт формирования высоко локализованных полос сдвига [11]. Формирование первых же полос сдвига привод к хрупкому разрушению существенно ограничивает возможное практическое применение аморфных материалов. За последние несколько лет стало активно изучаться влияние предварительного пластического деформирования на структуру и свойства аморфных сплавов. Было показано, что предварительная обработка методом МП может приводить к повышению пластичности [12]. В связи с этим ИПДК представляет большой интерес как метод модификации структуры с целью улучшения свойств аморфных материалов. На данный момент отсутствует комплексное описание изменения структуры и свойств аморфных сплавов после ИПДК. Существуют предпосылки к увеличению пластичности за счёт формирования высокой плотности полос сдвига [13]. Предполагается создание методом ИПДК структур с улучшенными свойствами, состоящих из наноразмерных аморфных кластеров, разделённых полосами сдвига – границами с повышенным свободным объёмом. На начальном этапе исследований определение микротвердости представляет значительную информацию как об однородности или неоднородности структуры, так и об изменении механических свойств после кручения. Цель данной работы-изучение влияния ИПДК на однородность структуры и механические свойства $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$, подвергнутого ИПДК при различных температурах, путём измерения микротвёрдости.

2.2 ОБЪЕКТ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований был выбрано OMC $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$. Исходные прутки диаметром 5мм и длиной 50 мм был получен путём литья расплава в медный тигель (Рис. 5а).

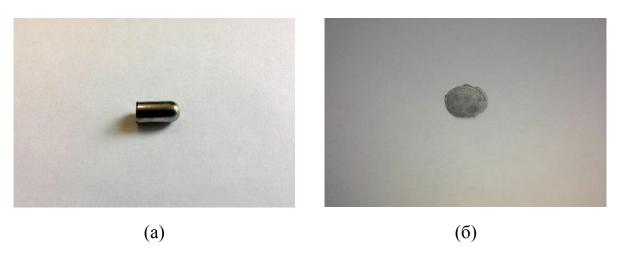


Рисунок 5-Исходное ОМС Zr₆₂Cu₂₂Al₁₀Fe₅Dy₁ (a), ОМС Zr₆₂Cu₂₂Al₁₀Fe₅Dy₁ после ИПДК (б)

Для осуществления ИПДК исходные прутки были нарезаны на электроэрозионном станке на диски толщиной в 2 мм. Кручение проходило под давлением 6 ГПа со скоростью 1 оборот в минуту на 5 оборотов при комнатной температуре и температуре 150°С. В результате ИПДК были получены образцы толщиной 0.2–0.3 мм и диаметром 10 мм (Рис. 5б).

С целью подготовить поверхность образцов для микроиндентирования, образцы были залиты в эпоксидный компаунд. Исходный ОМС стержень заливался так, что исследуемой поверхностью являлся круг (Рис. 6а). Образцы же после ИПДК были разрезаны пополам на электроэрозионном станке в радиальном направлении и залиты таким образом, что поверхностью индентирования стала внутренняя область диска (Рис. 6б). Затем поверхность

образцов была механически отполирована на серии алмазных абразивов зернистостью 9, 3, 1 µм, финишная полировка осуществлялась на коллоидной суспензии зернистостью 50 нм.

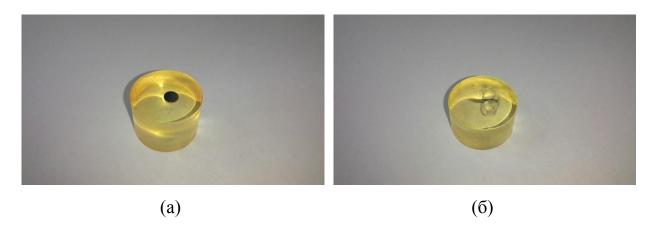


Рисунок 6–Вид образцов после полировки: (а) исходный ОМС $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$; (б) образец $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ после ИПДК

Микроиндентирование проводилось при комнатной температуре на испытательной машине Shimadzu HMV–G Series Micro Vickers Hardness Tester (Рис. 7) по ГОСТу 9450–76 на измерение микротвердости по Виккерсу.



Рисунок 7-Микротвердомер Shimadzu HMV-G Series Micro Vickers Hardness Tester

Для определения нагрузки индентирования была проведена серия испытаний на исходном ОМС образце с различными нагрузками. График зависимости величины микротвёрдости от приложенной нагрузки представлен на Рис. 8а. По полученным данным видно, что кривая зависимости выходит на насыщении при значении нагрузки 490 мН. При дальнейшем увеличении прикладываемой нагрузки значения микротвёрдости не изменяются, однако при этом увеличивается размер отпечатка (Рис. 8б). Поэтому, исходя из малых размеров исследуемых образцов, оптимальным значением нагрузки индентирования было принято значение 490 мН.

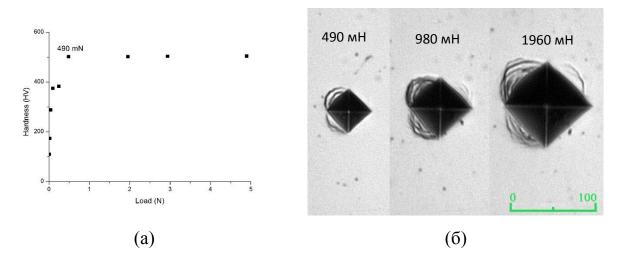


Рисунок 8–График зависимости микротвёрдости от величины приложенной нагрузки (а). Размеры отпечатков при индентировании при нагрузках в 490 мH, 980 мH, 1960 мH (б)

Индентирование исходного Zr₆₂Cu₂₂Al₁₀Fe₅Dy₁ ОМС проходило по четырём различным радиусам. Расстояние между отпечатками составляло 250 µм. Как известно, при ИПДК области диска, прилегающие к бойкам, не испытывают деформации кручением [14]. Толщина этой недеформированной области зависит как от химического состава обрабатываемого материала, так и от режимов кручения. В нашем случае по данным микроскопии ширина недеформированной области составила примерно 50 µм. Принимая во

внимание тот факт, что образцы после кручения имели несколько изогнутую форму, индентирование проходило по узлам сетки так, что вертикальное расстояние между двумя соседними узлами составляло 50 µм, а горизонтальное–250 µм. Величина нагрузки индентирования для всех исследуемых состояний составила 490 мН.

Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью модификации структуры и механических свойств ОМС $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ было подвергнуто ИПДК при различных температурах. Изменение свойств оценивалось путём измерения микротвердости. Изначально была измерена микротвердость исходного ОМС. На Рис. 9 представлена как схема индентирования образца, так значения твёрдости по Виккерсу. Среднее значение твёрдости ОМС $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ составило 506 ± 6.2 .

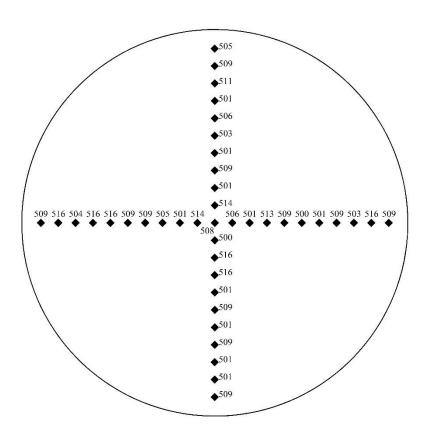


Рисунок 9—Схема измерения и значения микротвёрдости исходного $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1\,OMC$

Ha Рис. 10 представлены данные микротвёрдости образца, подвергнутого ИПДК при комнатной температуре. Данные были обработаны в программе для лучшего визуального представления распределения значений твёрдости по поверхности исследуемого образца. Значения твёрдости лежат в интервале 447-453. Зависимости значений твёрдости по радиусу или толщине образцы не наблюдается. Кручение при комнатной температуре при указанных режимах привело к формированию однородной как по радиусу, так и толщине структуры. Среднее же значение твёрдости при этом понизилось до 451±2. Понижение твёрдости можно связать с размягчением материала, вызванным увеличением свободного объёма. Т.е. ИПДК при комнатной температуре свободного объёма OMC приводит К увеличению $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$, что наблюдалось ранее для некоторых аморфных сплавов [15].

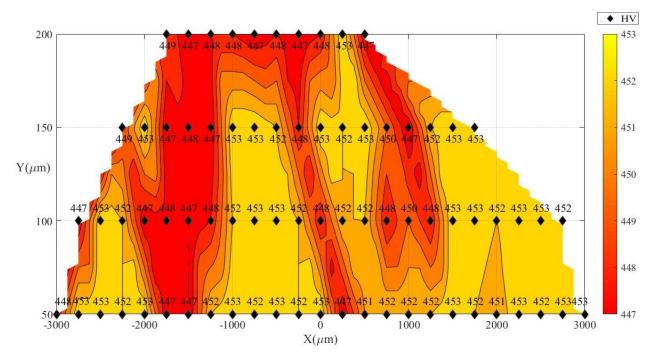


Рисунок 10—Схема измерения и значения микротвёрдости $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ ОМС, подвергнутого ИПДК при комнатной температуре

На Рис. 11 представлены данные микротвёрдости образца, подвергнутого ИПДК при температуре 150°С. Значения твёрдости лежат в интервале от 498 до 514. Как и в случае ИПДК при комнатной температуре, зависимости значений твёрдости по радиусу или толщине образцы не наблюдается. Кручение привело к формированию однородной структуры. Среднее значение твёрдости составляет 505±7. С учётом среднеквадратичного отклонения полученное значение находится на одном уровне с твёрдостью исходного ОМС.

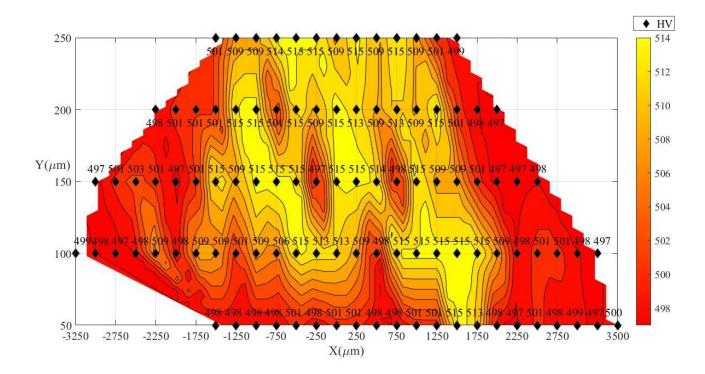


Рисунок 11—Схема измерения и значения микротвёрдости $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ ОМС, подвергнутого ИПДК при температуре 150°С

Известно, что термическая обработка аморфных материалов в зависимости от температуры приводит либо к частичной, либо к полной аннигиляции свободного объёма [16]. С другой стороны, ИПДК ведёт к увеличению свободного объёма аморфных сплавов. Судя по всему, при ИПДК обработке при 150°С происходит комбинированное воздействие как уменьшения, так и увеличения свободного объёма. Несмотря на то, что

твёрдость образца после ИПДК при 150° С в пределах погрешности равна твердости исходного $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ ОМС, в образце возможно перераспределение свободного объёма. Т.е. при равенстве значений твердости исходного состояния и состояния, подвергнутого ИПДК при 150° С, структура обработанного образца будет отличаться от структуры исходного.

Полученные данные большой экспериментальные представляют интерес для понимания механизма модификации структуры и свойств аморфных сплавов методами интенсивной пластической деформации. Наблюдаемые структурные изменения могут быть объяснены эволюцией и свободного объёма. Полученный перераспределением результат, заключающийся В однородности структуры аморфных образцов, обработанных ИПДК, требует дальнейшего теоретического исследования, однако уже сейчас представляет интерес с точки зрения практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было исследовано влияние интенсивной пластической деформации кручением на структуру и свойства $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ объёмного металлического стекла. Было показано, что:

- ИПДК при комнатной и повышенной температурах приводит к формированию однородной по радиусу и толщине структуры.
- Кручение при комнатной температуре приводит к понижению твёрдости. Уменьшение значений твердости связано с повышением свободного объёма образца при ИПДК обработке.
- После ИПДК при 150° С твёрдость $Zr_{62}Cu_{22}Al_{10}Fe_5Dy_1$ не изменилась. При кручении при повышенных температурах реализуются два взаимно обратных процесса—уменьшение свободного объёма ОМС вследствие температурной обработки и повышение свободного объёма за счёт интенсивной пластической деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Duwez P., Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys (1960) 869–870.
- [2] Suryanarayana C., Inoue A, Bulk Metallic Glasses (2011).
- [3] Валиев Р.З., Александров И.В., Объемные наноструктурные металлические материалы (2007).
- [4] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation (1999).
- [5] Alexander P. Zhilyaev, Terence G. Langdon, Using high-pressure torsion for metal processing. Fundamentals and applications (2008).
- [6] Bridgman PW. J Appl Phys 1943;14:273.
- [7] Zhilyaev AP, Nurislamova GV, Kim BK, Baró MD, Szpunar JA, Langdon TG. Acta Mater 2003;51:753.
- [8] Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю., Специальные материалы в машиностроении (2004).
- [9] Алексюк М.М. Механические испытания материалов при высоких температурах, (1980) 68.
- [10] Актуальные вопросы физики микровдавливания, под ред. Ю.С. Боярской: Штиинца, (1989) 195.
- [11] Zadorozhnyy V.Yu., Inoue A., Louzguine-Luzgin D.V., Mater. Sci. Eng. A 551 (2012) 82–86.
- [12] Yokoyama, Y., Yamano, K., Fukaura, K., Sunada, H., Inoue, A. Mater. Trans. 42 (2001) 623–632.
- [13] Wang X.D., Cao Q.P., Jiang J.Z., Franz H., Schroers J., Valiev R.Z., Ivanisenko Y., Gleiter H., Fecht H.-J., Scr. Mater. 64 (2011) 81–84.
- [14] Hohenwarter A., Bachmaier A., Gludovatza B., Scheriau S., Pippan R., Technical parameters affecting grain refinement by high pressure torsion (2009).

- [15] Meng F., Tsuchiya K., Seiichiro I., Yokoyama Y., Appl. Phys. Lett. 101 (2012).
- [16] D.K. Misra, Sohn S.W., Kim W.T., Kim D.H., Intermetal. 17 (2009) 11–16.