

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ

© 2012 г. С. А. Бакай, О. И. Волчок, П. И. Стоев, Н. В. Камышанченко*, Е. С. Кунгурцев*

ННЦ “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, Украина

**Белгородский государственный университет, Белгород, Россия*

E-mail: sensarg@rambler.ru

Поступила в редакцию 17.08.2011 г.

Методом акустической эмиссии при одноосном сжатии исследовано влияние предварительного ультразвукового воздействия на механические свойства и особенности структуры объемных металлических стекол на основе циркония. Результаты исследований интерпретировались в рамках поликластерной модели структуры аморфных металлических сплавов. Анализ полученных данных позволил обосновать механизм изменения структуры и прочности металлических стекол в результате знакопеременного механического нагружения с ультразвуковой частотой 20 кГц.

Ключевые слова: объемные металлические стекла, акустическая эмиссия, ультразвуковое воздействие, эффект Кайзера.

ВВЕДЕНИЕ

Объемные металлические стекла (ОМС) являются новым перспективным классом конструкционных материалов, обладающим уникальным сочетанием электро-физических и механических свойств. Они нашли применение в таких областях, как электроника, машиностроение, авиастроение, спортивная индустрия и др. [1]. Экспериментальные исследования показали, что ОМС обладают поликластерной структурой, причем поликластеры состоят из локально регулярных кластеров атомов, средний размер которых составляет ~10 нм [2, 3]. Благодаря этому поликластеры характеризуются высокой плотностью границ раздела в виде межкластерных границ, плотность которых составляет ~10⁶ см⁻¹. Такие границы имеют локально разупорядоченную структуру и подобно границам раздела в кристаллических материалах (границы зерен, субзерен, двойников, фаз и др.) могут быть областями селективного поглощения энергии механических колебаний при ультразвуковом воздействии (УЗВ). Прямые исследования межкластерных границ в ОМС является проблемной и сложной задачей. Поэтому для исследований структурных изменений в ОМС, связанных с ультразвуковой обработкой, в настоящей работе используется метод акустической эмиссии (АЭ), который позволяет выявить процессы скольжения и динамику дислокаций в материале [4, 5]. Следует отметить, что дислокации в ОМС существуют, однако их отличие от общепринятых в кристаллических материалах связано с отсутстви-

ем трансляционной инвариантности структуры [6, 7]. В граничных слоях при сдвиговых нагрузках, превышающих прочность границ, образуются дислокации Вольтера. Такие дислокации в связи с неупорядоченностью структуры не могут скользить и размножаться, подобно дислокациям в кристаллах, а могут лишь переползать в слоях межкластерных границ под действием внешней нагрузки и фиксироваться при снятии таковой. В поликластерной структуре основными источниками АЭ являются неравномерные сдвиги (проскальзывания) по межкластерным границам.

Ранее было установлено, что специфика поглощения колебательной энергии при УЗВ границами раздела в металлах и сплавах наглядно проявляется на материалах с остаточными двойниковыми прослойками. Было показано [8–13], что микродеформации при УЗВ локализуются на некогерентных границах и вершинах двойников, что приводит к перераспределению дислокаций и релаксации напряжений в этих местах, являющихся местами пиковых напряжений. В результате УЗВ таких процессов имеет место ряд эффектов, например, подавления хладноломкости, термической стабилизации структуры из-за изменения соотношения развития полигонизации и рекристаллизации и др. Можно предположить, что в ОМС под действием УЗВ будут, прежде всего, происходить неупругие перестройки в граничных слоях, что должно привести к изменению их механических свойств. Следует отметить, что до настоящего времени исследования влияния УЗВ на механическое поведение и структуру ОМС не

проводились. Целью настоящей работы было исследование влияния предварительного УЗВ на структуру и физико-механические свойства ОМС $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$, $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$.

МЕТОДИКА

В работе использовались образцы из сплавов на основе циркония: $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ и $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ (диаметр 3 мм, высота 4 мм), которые вырезались электроискровым методом из объемных стержней. Стержни были изготовлены в Институте твердого тела и материаловедения г. Дрезден (Германия) путем плавки брусков из сплавов и отливки полученного расплава в медные формы в атмосфере аргона.

УЗВ на образцы ОМС осуществлялось на установке, подробно описанной в [12]. Образцы прижимались к концу концентратора ультразвуковых (УЗ) колебаний с нагрузкой 8 кг/мм², что обеспечивало надежный акустический контакт. Амплитуда УЗ колебаний контролировалась виброметром UVM-4M с точностью до 0.1 мкм. Для сплава $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ амплитуда УЗ колебаний — 7 мкм, продолжительность озвучивания составляла 5 и 7 мин. Для сплава $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ амплитуда УЗ колебаний — 10 мкм, продолжительность озвучивания составляла от 2 до 7 мин. УЗВ осуществлялось с частотой $f = 19.5$ кГц при комнатной температуре в импульсном режиме (продолжительность импульса 5 с).

Исследования методом АЭ проводились при одноосном сжатии образцов до и после УЗВ при комнатной температуре. Для этого использовалась аппаратура, состоящая из универсальной испытательной машины и многоканального акустического комплекса М400. Датчик АЭ был изготовлен из пьезокерамики цирконата-титаната свинца и имел резонансную частоту 180 кГц. Скорость сжатия образцов составляла 10^{-3} с⁻¹. Параметры АЭ регистрировались синхронно с регистрацией механических характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости суммы импульсов АЭ от деформации исходного образца ОМС $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ и образцов после предварительного УЗВ. На вставке представлена зависимость предела прочности этого материала от времени УЗВ. Видно, что с увеличением времени УЗВ в образцах ОМС наблюдается подавление АЭ и уменьшение прочности материала. Для части образцов ОМС исходных и прошедших предварительное УЗВ нагружение и фиксация при этом параметров АЭ осуществлялось таким образом, чтобы выявить возможную реализацию эффекта Кайзера [4, 5]. Проведенные измерения па-

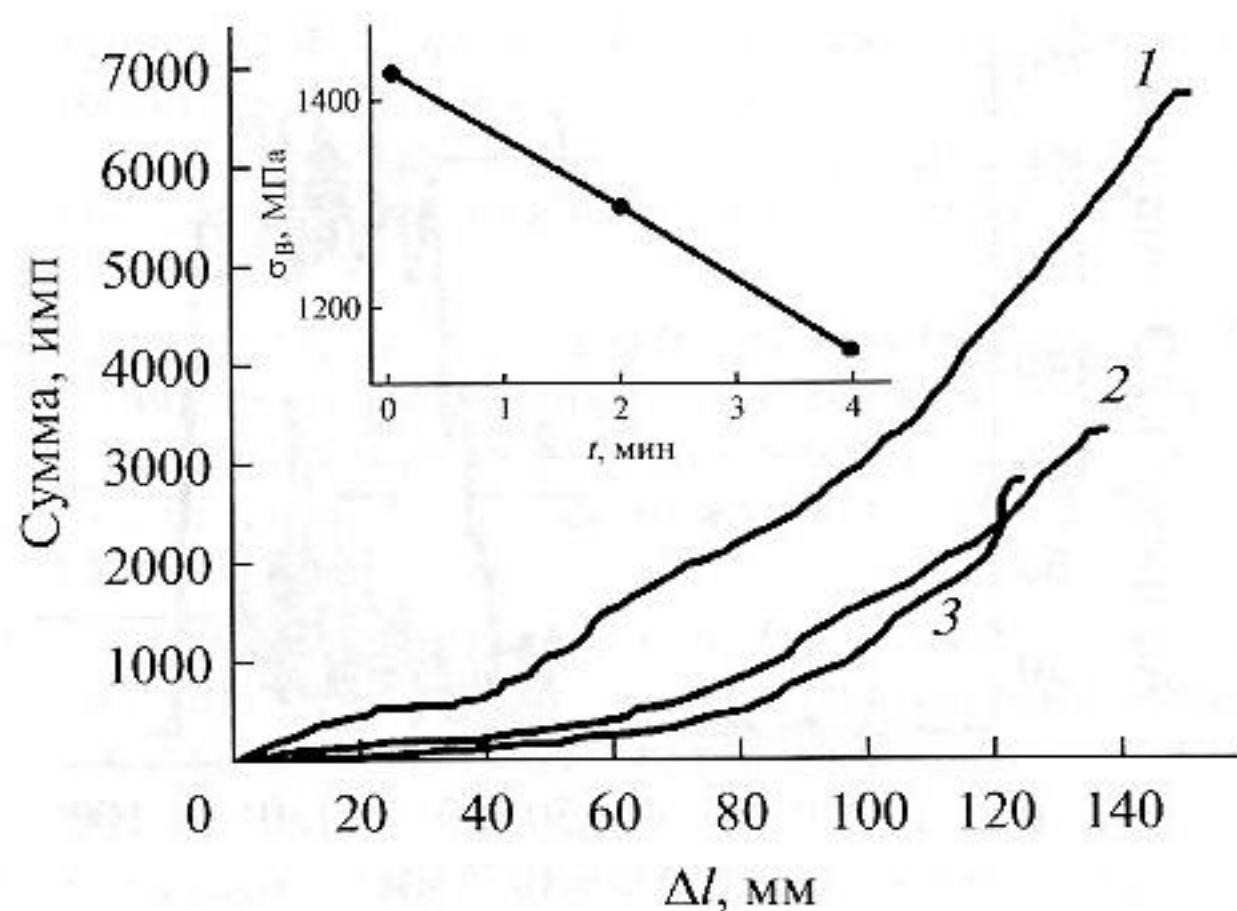


Рис. 1. Зависимость суммы импульсов АЭ от деформации сжатием (Δl — величина перемещения захватов в мм) для сплава $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$: исходный образец (1) и образцы, прошедшие УЗВ в течение 2 мин (2) и 4 мин (3). На вставке: зависимость предела прочности образцов ОМС из сплава $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ от времени предварительного УЗВ (t).

раметров АЭ при нагружении показали, что в сплаве $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ эффект Кайзера наблюдается. Поскольку в кристаллических материалах этот эффект связывают с процессами неравномерного скольжения дислокаций, двойникованием, скольжением по границам и др., то в поликластерном ОМС он может быть связан только лишь с проскальзыванием по межкластерным границам и распространением зародившихся граничных дислокаций в соседние кластеры.

Более подробные исследования были сделаны на образцах из сплава $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$. Для реализации эффекта Кайзера каждый из образцов ОМС $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ аналогично сплаву $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ подвергался двум нагружениям. При каждом первом нагружении регистрировалась активность АЭ, нагрузка останавливалась в области упругой деформации, а далее образец разгружался и повторно нагружался. Установлено, что при повторных нагружении образцов ОМС АЭ появлялась при превышении максимальной нагрузки, достигнутой при первом нагружении (рис. 2). Таким образом, и на образцах ОМС $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ до и после УЗВ наблюдается эффект Кайзера. Важно отметить, что после УЗВ существенно изменяются параметры АЭ (активности АЭ и сумма импульсов): имеет место подавление активности АЭ и снижение суммы импульсов (рис. 2 и 3). Наблюдаемый эффект возрастает с ростом экспозиции предварительного УЗВ.

На рис. 3 представлены зависимости суммы импульсов АЭ от деформации исходного образца ОМС $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ и образцов после УЗВ

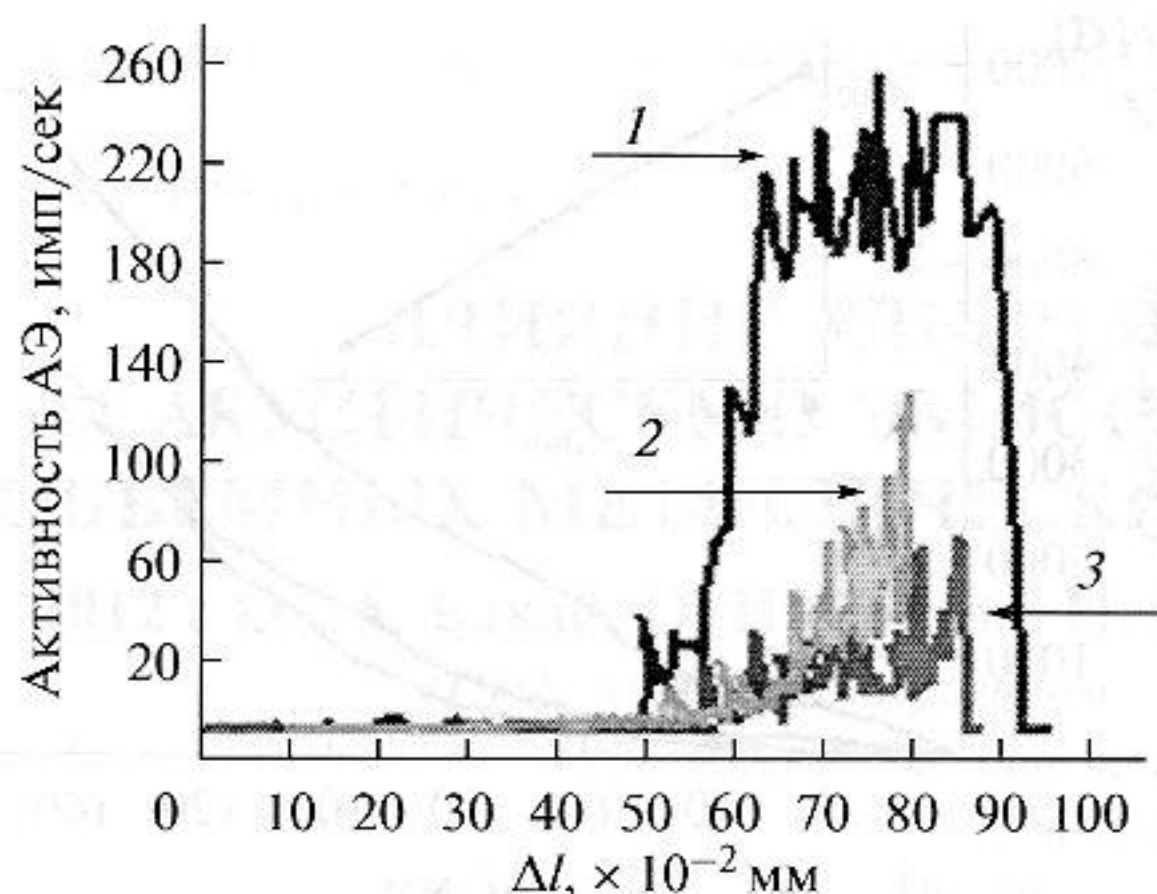


Рис. 2. Зависимость активности АЭ ОМС из сплава $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ от деформации сжатием: (1) — образец в исходном состоянии; (2) — после УЗВ в течение 6 мин; (3) — после УЗВ в течение 7 мин.

разной продолжительности. Видно, что после предварительного УЗВ имеет место существенное подавление АЭ, которое увеличивается по мере роста времени предварительного УЗВ.

Полученные результаты находят объяснение в рамках представлений модели поликластерной структуры ОМС [12, 13]. Циклическое нагружение при УЗВ активизирует знакопеременные проскальзывания по межкластерным границам ОМС, что приводит к структурным изменениям последних. Реструктуризация границ кластеров такова, что приводит к их “размягчению”, существенному снижению активности АЭ и разупрочнению материала. Как показано в [6, 14], скольжение по межкластерным границам в ОМС происходит, когда сдвиговая нагрузка превышает некоторое критическое значение

$$\sigma_s^* \approx \bar{\sigma}_s/2,$$

где $\bar{\sigma}_s$ — среднее значение локальной критической сдвиговой нагрузки в граничном слое. Прочность поликластера с “сильными” межкластерными границами соответствует прочности границ

$$\sigma_{ultimate} = \sigma_s^*.$$

Если границы “слабые” и

$$\sigma_s^* < \sigma_d(l_{bound}) = \frac{\sigma_{theor}}{1 + \left(\frac{l_{bound}}{2a}\right)^{1/2}},$$

то тогда $\sigma_{ultimate}$ не зависит от σ_s^*

$$\sigma_{ultimate} = \sigma_d(l_{bound}).$$

Здесь a — межатомное расстояние, σ_{theor} — теоретическая прочность, зависящая от структуры границы, l_{bound} — размер границы, $\sigma_{theor} \sim G_{shear}/10\pi$; G_{shear} — модуль сдвига кластера, который больше,

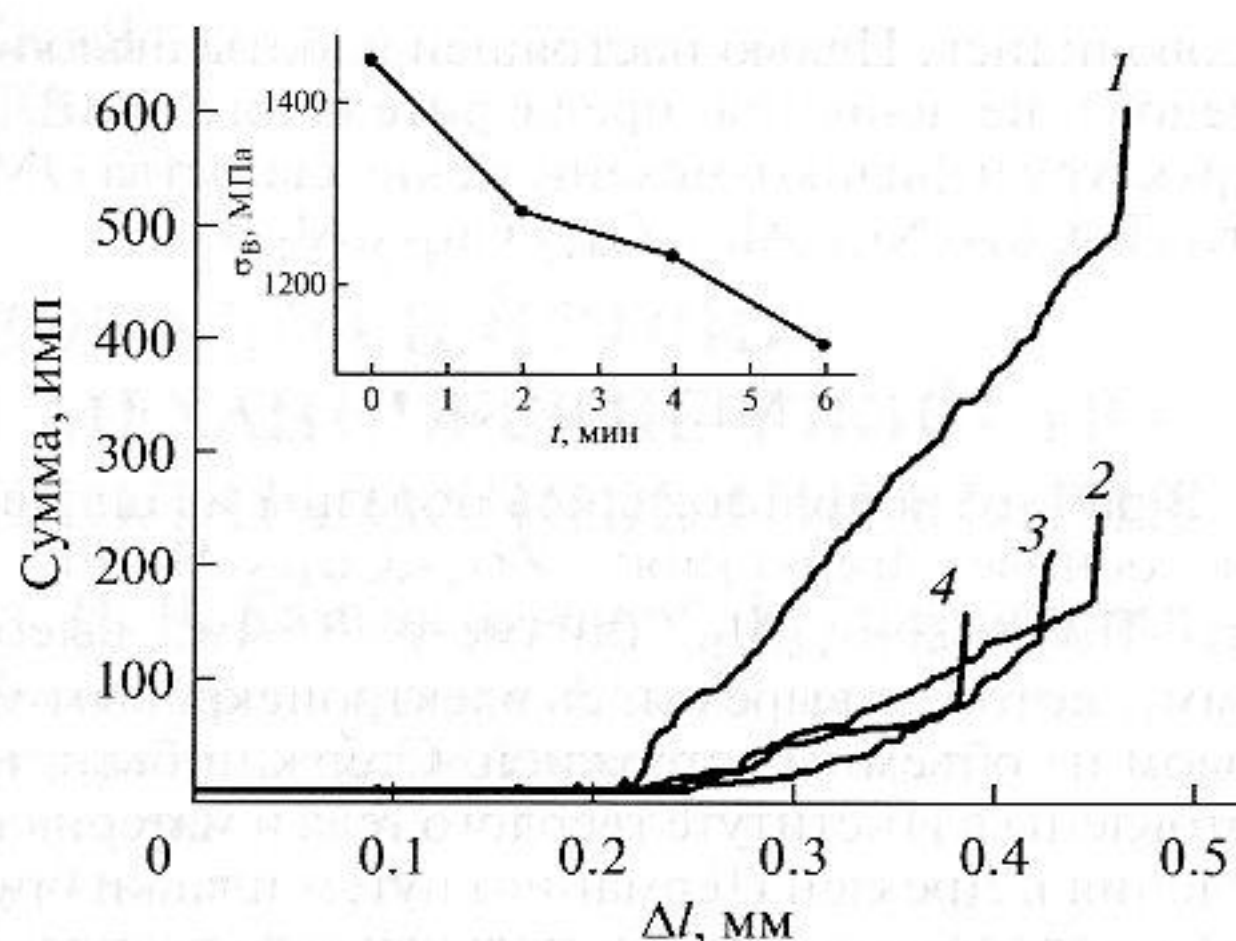


Рис. 3. Зависимости суммы импульсов АЭ от деформации ОМС $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$: (1) — исходного образца; (2) — после УЗВ в течение 2 мин; (3) после УЗВ в течение 4 мин; (4) после УЗВ в течение 6 мин. На вставке: зависимость предела прочности образцов ОМС $Zr_{46.25}Cu_{45.25}Al_{7.5}Er_1$ от времени предварительного УЗВ.

чем средний (макроскопический) модуль сдвига поликластера. Величина σ_{theor} зависит от структуры границы. Поскольку $\sigma_{ultimate}$ чувствительна к УЗВ, то исследованные сплавы принадлежат к семейству ОМС с “сильными” границами. Существенная зависимость АЭ от времени УЗ воздействия позволяет считать, что $\bar{\sigma}_s$ уменьшается в результате УЗВ. Такое “размягчение” границ обуславливает снижение активности АЭ в ОМС.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в ОМС реализуется эффект Кайзера, что свидетельствует о существовании стабильных протяженных дефектов в этих материалах.

2. Наблюдаемое снижение после УЗВ прочности ОМС и активности АЭ свидетельствует о том, что их сопротивление пластической деформации определяется прочностью межкластерных границ, которые реструктурируются и “размягчаются” под действием ультразвукового механического нагружения.

Авторы выражают благодарность А.С. Бакаю и И.М. Неклюдову за полезное обсуждение результатов исследований.

Исследования выполнены в рамках проекта № 1.1.1.48 Государственной целевой научно-технической программы “Нанотехнологии и наноматериалы” НАН Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inoue A. Bulk amorphous alloys, practical characteristics and applications // *Material Sci. Found Trans. Tech. Publ.* 1999. V. 6. P. 373–382.
2. Bakai A.S., Kul'ko V.V., Mikhailovskij I.M., Rabukhin V.B., Velikodnaya O.A. // *J. Non-Cryst. Solids.* 1994. V. 182. P. 315–320.
3. Бакай А.С., Михайловский И.М., Мазилова Т.И., Вандерка Н. // *Физика низких температур.* 2002. Т. 28. № 4. С. 400–405.
4. Гиндин И.А., Волчок О.И., Неклюдов И.М. Влияние ультразвукового облучения на развитие процесса двойникования в кадмии // *Физика твердого тела.* 1972. Т. 14. № 11. С. 3245–3247.
5. Гиндин И.А., Волчок О.И., Неклюдов И.М., Оковит В.С. Влияние ультразвуковых колебаний на диссипативные свойства границ двойников в кадмии // *Физика твердого тела.* 1973. Т. 15. С. 1922–1923.
6. Гиндин И.А., Неклюдов И.М., Волчок О.И., Малик Г.Н. Двойникование кадмия под действием ультразвуковых колебаний при 77 и 300 К // *Физика и химия обработки материалов.* 1974. № 6. С. 136–138.
7. Гиндин И.А., Волчок О.И., Неклюдов И.М. Релаксация внутренних напряжений в кремнистом железе под действием ультразвуковых колебаний // *Физика твердого тела.* 1975. Т. 17. № 3. С. 655–657.
8. Гиндин И.А., Чиркина Л.А., Волчок О.И., Донде А.Л. Влияние ультразвукового воздействия на рекристаллизацию ванадия, деформированного двойникованием // *Физика твердого тела.* 1984. Т. 26. № 6. С. 1834–1836.
9. Аксенов В.К., Борисова И.Ф., Волчок О.И., Донде А.Л. Влияние ультразвукового воздействия на термическое разупрочнение деформированного циркония // *Украинский физический журнал.* 1989. Т. 34. № 9. С. 1415–1417.
10. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 6–18.
11. Грешиников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Стандарты, 1976. 276 с.
12. Bakai A.S., Bakai S.A., Malik G.N., Gorbatenko V.M., Netesov V.M., Emlyaninov V.A. The ultrasonic mechanical test facility for research of impact ultrasonic vibrations on mechanical properties of materials // *Problems of Atomic Science and Technology.* 2005. № 4. P. 104–107.
13. Бакай А.С. Поликластерные аморфные тела. М.: Энергоатомиздат, 1987. 192 с.
14. Bakai A.S. The Polycluster Concept of Amorphous Solids / In *Glassy Metals III* (Ed. by H. Beck and H.-J. Guentherodt) Springer, Heidelberg, 1994. P. 209–255.