

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ НА ВЕЛИЧИНУ СБРОСОВ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЛЕНТОЧНЫХ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ*

Федотов Д.Ю., ассистент кафедры теоретической и экспериментальной
физики (feodorov@tsu.tmb.ru)

Сидоров С.А., научный сотрудник кафедры теоретической и экспериментальной физики

Федоров В.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики

Плужникова Т.Н., к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и экспериментальной
физики (plushnik@mail.ru)

Яковлев А.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры педагогики и образовательных
технологий (DAK-83@mail.ru)

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина
(392000, Россия, Тамбов, ул. Интернациональная, 33)

Аннотация. В работе исследованы процессы релаксации в аморфном и нанокристаллическом сплавах в интервале температур $-196 \div 80$ °С. Установлено, что в аморфном сплаве релаксация напряжений происходит в две стадии. При этом снижение исходного механического напряжения в образце происходит лишь на 5 % за время выдержки не менее 1 часа. Увеличение температуры образца приводит к более интенсивному протеканию релаксации, что проявляется в увеличении скорости снижения механического напряжения. При температуре жидкого азота релаксации напряжений не наблюдается. Установлено, что в нанокристаллическом сплаве релаксационные процессы протекают аналогичным образом, но в нем скорость релаксации значительно меньше. В работе были изучены зависимости остаточного механического напряжения от температуры и времени выдержки. Обнаружено, что в аморфном и нанокристаллическом сплавах наблюдаются области стабилизации остаточных механических напряжений при малых временах выдержки (менее 5 мин) в интервалах температур 50 – 60 и 40 – 50 °С. Увеличение выдержки приводит к монотонному падению остаточных механических напряжений. Нагрев до 40 °С уже приводит к полному снятию механических напряжений в образце спустя 15 мин после начала испытаний. Показано, что предварительная релаксация напряжений в аморфном сплаве приводит к уменьшению величины сброса механического напряжения при электроимпульсном воздействии в образцах, подвергнутых растяжению. В нанокристаллическом сплаве величина сброса практически не изменяется при указанном воздействии. Показано, что наблюдаемый эффект обусловлен не только термическим расширением, но и изменением величины обратимой составляющей направленной структурной релаксации. В ходе работы было установлено, что величина сброса механического напряжения в аморфном сплаве зависит от среды, в которой происходит подача импульса электрического тока. В частности, в среде жидкого азота наблюдается уменьшение величины сброса. В нанокристаллическом сплаве подобного уменьшения не наблюдается.

Ключевые слова: направленная структурная релаксация, аморфный сплав, нанокристаллический сплав, сброс механического напряжения, импульсный электрический ток, термическое расширение, энергия активации, жидкий азот.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-538-543

Современная промышленность предъявляет высокие требования к эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов и сплавов с особыми физико-механическими свойствами. Наряду с улучшением свойств созданных ранее материалов ведутся поиски материалов с принципиально новыми, качественно более высокими эксплуатационными показателями. Такими материалами являются металлические стекла (МС) [1 – 3], которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности и техники [4, 5]. В таких материалах при всех температурах ниже температуры стеклования постоянно протекает

структурная релаксация (СР), которая является масштабным явлением. Происходит переход МС в новое более равновесное состояние, что сопровождается изменением свойств МС и изделий из них. Под действием дестабилизирующих факторов СР может ускоряться. В частности, СР может ускоряться при нагреве аморфных сплавов, связанным с прохождением импульсного электрического тока.

Пропускание импульса электрического тока по металлическому проводнику, находящемуся в нагруженном состоянии, сопровождается электропластическим эффектом. Обнаружен электропластический эффект (ЭПЭ) был в 1969 г. при действии одиночными импульсами тока плотностью примерно 10^5 А/см² и дли-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00432).

тельностью примерно 10^{-4} с при деформации кристаллов цинка растяжением и сжатием [6]. Такой эффект проявлялся в скачкообразных удлинениях образцов при прохождении по ним каждого импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и без дилатации образцов. Возникло предположение, что в основе нового эффекта лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые помимо джоулевого эффекта способны оказывать особое специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести. Электропластическое воздействие включает в себя как действие «электронного ветра», так и вибрации решетки под влиянием пинч-эффекта [7]. Исследование ЭПЭ в кристаллических металлах дало возможность управлять их механическими свойствами за счет увеличения пластичности и уменьшения хрупкости. Описанный эффект в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах практически не исследован. В настоящее время известны аморфные состояния для многих металлических систем [8 – 14]. Экспериментально установлено, что подобный эффект наблюдается при пропускании импульсного электрического тока во время деформации аморфных металлических сплавов на основе кобальта и нанокристаллического сплава на основе железа [15 – 19]. Пропускание электрического тока плотностью приблизительно 10^9 А/м² сопровождается обратимым сбросом механического напряжения, что предположительно связано не только с термическим расширением, но и, по-видимому, с другим механизмом, в основе которого лежит направленная структурная релаксация [20], возникающая в результате нагрева. В работе [16] было высказано предположение, что в начальной стадии направленная структурная релаксация может носить обратимый характер.

Цель настоящей работы – установить влияние предварительной релаксации напряжений на величину сброс

са механической нагрузки, обусловленного воздействием импульсного электрического тока в аморфном и нанокристаллическом сплавах.

В качестве материала для исследования выбран ленточный аморфный металлический сплав на основе кобальта ($\text{Co}_{78,65}\text{Fe}_{4,03}\text{Ni}_{4,73}\text{Si}_{7,22}\text{Mn}_{1,88}\text{B}_2\text{Cr}_{1,49}$) и нанокристаллический сплав на основе железа ($\text{Fe}_{80,22}\text{Si}_{8,25}\text{Nb}_{10,09}\text{Cu}_{1,44}$), полученные методом спиннингования. Использовали образцы одинаковой геометрии размерами $80 \times 3,54 \times 0,02$ мм.

Эксперименты по одноосному растяжению образцов проводили на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565 со скоростью движения траверсы 0,1 мм/мин. Во время деформации образца подавали импульсы тока путем разрядки конденсатора. Плотность тока (j), протекающего через образцы, варьировали в пределах от 10^8 до 10^9 А/м². Использовали импульсы с длительностью τ приблизительно 5 мс.

Предварительную релаксацию напряжений в образцах осуществляли по следующей методике. Образцы нагружали до механического напряжения 400 МПа. После этого движение траверсы останавливали и предоставляли возможность образцу свободно релаксировать. В ходе всего эксперимента непрерывно производили запись показаний датчика силы. При исследовании влияния температурных режимов на процесс структурной релаксации нагрев образца не превышал верхней границы рекомендуемых эксплуатационных температур для данных сплавов 80 °С.

В первой части работы исследовали ход релаксационных процессов в указанных сплавах при температурах -196 , 0 и $23 \div 80$ °С. Процесс релаксации напряжений при комнатной температуре проходит в две стадии: стадия ускоренной релаксации (I); стадия замедленной релаксации (II) (рис. 1, а). При этом снижение исходного механического напряжения в образце происходит лишь на 5 % за время выдержки не менее 1 ч. При увеличении температуры образца процесс структурной релаксации протекает более интенсивно, что проявляется

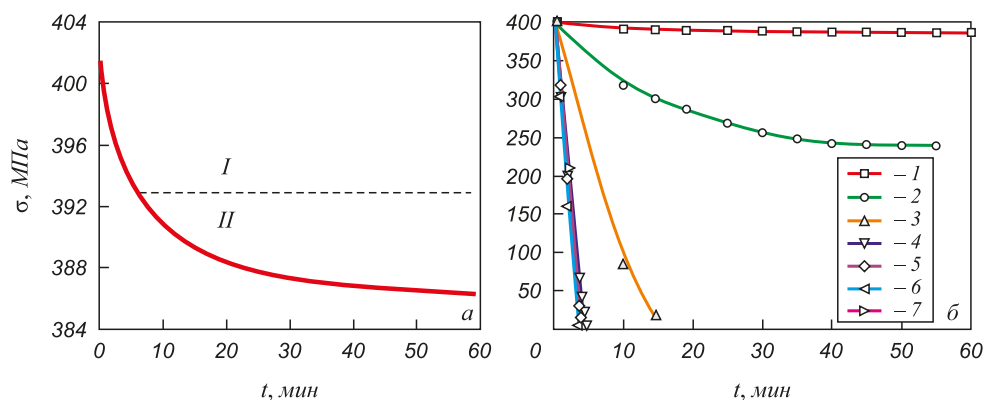


Рис. 1. Релаксация напряжений в аморфном сплаве на основе кобальта при комнатной температуре 23 °С (а) и при температурах 23 °С (I), 30 °С (2), 40 °С (3), 50 °С (4), 60 °С (5), 70 °С (6) и 80 °С (7) (б)

Fig. 1. Relaxation of stresses in an amorphous cobalt-based alloy at room temperature of 23 °С (а) and at temperatures of 23 °С (I), 30 °С (2), 40 °С (3), 50 °С (4), 60 °С (5), 70 °С (6) and 80 °С (7) (б)

в увеличении скорости снижения механического напряжения (рис. 1, б).

Нагрев до 40 °С уже приводит к полному снятию механических напряжений в образце спустя 15 мин после начала испытаний.

В экспериментах, проведенных при температуре жидкого азота в аморфном сплаве в течение 1 ч, релаксации напряжений не наблюдали. После окончания подачи жидкого азота наблюдается постепенное снижение нагрузки, аналогичное снижению в экспериментах при комнатной температуре.

Аналогичным образом происходят релаксационные процессы в нанокристаллическом сплаве. Но при этом скорость релаксационных процессов значительно меньше (рис. 2) относительно скорости релаксации в аморфном сплаве при одинаковых условиях испытаний и при одинаковых геометрических размерах образцов. Понижение температуры образцов, по-видимому, постепенно замедляет процесс релаксации, при температуре менее 0 °С релаксационное течение блокируется, о чем свидетельствует постоянство величины механической нагрузки с течением времени.

На рис. 3 представлены зависимости остаточного механического напряжения в образцах от температуры и времени испытаний. В аморфном сплаве в интервале температур 50 – 60 °С и времени релаксации менее 5 мин наблюдаются области стабилизации остаточных механических напряжений. С увеличением времени выдержки происходит монотонное падение остаточных механических напряжений. На аналогичных зависимостях для нанокристаллического сплава при различном времени выдержки также присутствует область стабилизации остаточных механических напряжений в интервале температур 40 – 50 °С. Подобное может быть связано с изменением модуля нормальной упругости и стабилизацией свойств за счет частичного снятия закалочных напряжений.

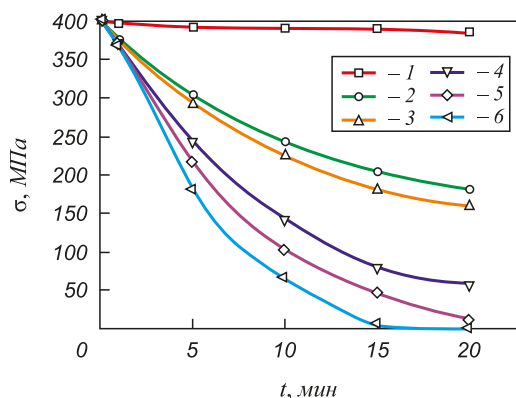


Рис. 2. Релаксация напряжений в нанокристаллическом сплаве на основе железа при различных температурах (обозначения те же, что и на рис. 1)

Fig. 2. Relaxation of stresses in nanocrystalline iron-based alloy at different temperatures (notation is the same as in Fig. 1)

Во второй части работы исследовано влияние предварительной релаксации образцов на величину сброса механического напряжения, обусловленного пропуском импульсного электрического тока во время нагружения. В аморфном и нанокристаллическом сплавах с этой целью через 15 мин после начала релаксации при комнатной температуре подавали одиночный импульс электрического тока. Сравнение величин сброса механического напряжения для образцов в исходном состоянии и после релаксации в течение 15 мин при одной и той же приложенной нагрузке показало, что в образцах аморфного сплава, подвергнутых предварительной релаксации напряжений, величина сброса механической нагрузки уменьшилась и в зависимости от плотности тока составила 15 – 40 % (рис. 4). В нанокристаллическом сплаве величина сброса практически не изменилась. Таким образом, при одних и тех же геометрических размерах образцов различных сплавов наблюдаемое уменьшение величины сброса механического напряжения в аморфных сплавах вероятнее всего связано с предварительной структурной релаксацией, которая в нанокристаллическом сплаве либо отсутствует, либо настолько мала, что ее изменение не сказывается на общей величине сброса.

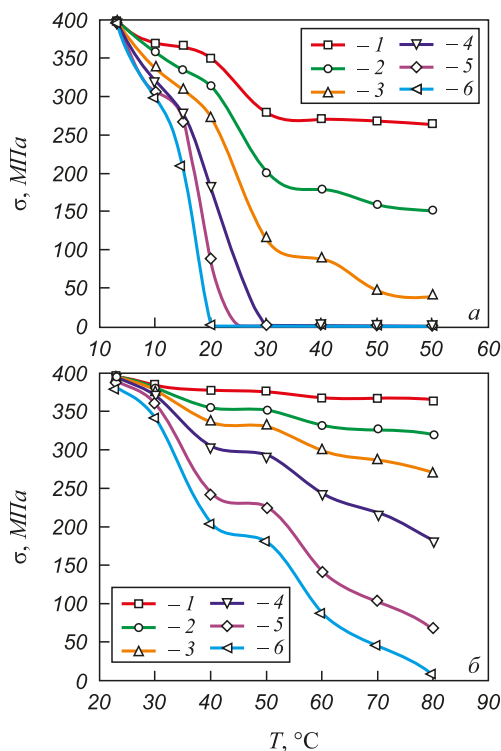


Рис. 3. Зависимость остаточного механического напряжения в аморфном сплаве на основе кобальта (а) и в нанокристаллическом сплаве на основе железа (б) от температуры и времени релаксации, мин: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 5; 5 – 10; 6 – 15

Fig. 3. Dependence of residual mechanical stress in amorphous alloy on cobalt base (a) and in nanocrystalline iron-based alloy (б) on temperature and relaxation time at min: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 5; 5 – 10; 6 – 15

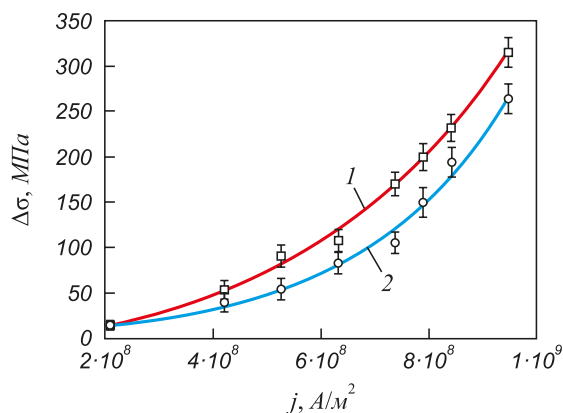


Рис. 4. Зависимости величины сброса механического напряжения от плотности импульса тока для аморфного сплава на основе кобальта в исходном состоянии (1) и после релаксации в течение 15 мин (2)

Fig. 4. Dependences of value of mechanical stress relieving on current pulse density for amorphous cobalt-based alloy in the initial state (1) and after relaxation for 15 min (2)

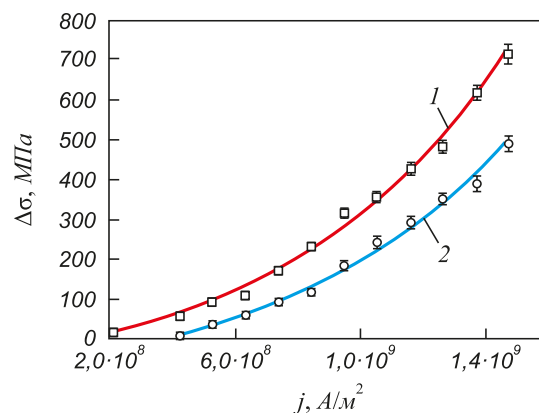


Рис. 5. Зависимость величины сброса механического напряжения от плотности тока для аморфного сплава на основе кобальта для образцов в исходном состоянии (1) и для образцов в среде жидкого азота (2)

Fig. 5. Dependence of mechanical stress relieving value on current density for amorphous cobalt-based alloy in the initial state (1) and for samples in liquid nitrogen medium (2)

Были проведены эксперименты, в которых деформация и подача импульсного электрического тока на образец происходили в среде жидкого азота при температуре (T) 77 К в исходном состоянии и после предварительной релаксации в течение 15 мин. Установлено, что в аморфном сплаве величина сброса механического напряжения уменьшилась примерно на 40 % по сравнению со сбросом, возникающим при пропускании импульсного тока при комнатной температуре (рис. 5). Образование сброса при таких условиях можно объяснить только термическим расширением образца. Релаксационные процессы, которые инициируются пропусканием импульсного тока, блокируются за счет низкой температуры, так как образцы при пропускании электрического тока нагреваются до 107 – 117 К. В нанокристаллическом сплаве величина сбросов не изменяется при пропускании тока в среде жидкого азота.

Выводы. Величина сброса механического напряжения, обусловленная воздействием импульсного электрического тока, в аморфном сплаве может быть объяснена не только термическим расширением, но и существованием с большой вероятностью на начальной стадии механического нагружения обратной направленной структурной релаксации. Предварительная релаксация образцов аморфных сплавов уменьшает величину обратимого сброса. Для дальнейшего протекания релаксации нужны более высокие значения энергии активации, которые при заданных условиях эксперимента не достижимы. Следовательно, при повышении активационного барьера структурной релаксации в аморфном сплаве сброс механического напряжения в аморфном и нанокристаллическом сплавах будет обусловлен только термическим расширением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Suryanarayana C., Inoue A. Bulk metallic glasses. – Taylor and Francis Group, 2011. – 548 p.
2. Schroers J. Processing of bulk metallic glass // *Advanced Materials*. 2010. No. 22. P. 1566 – 1597.
3. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses // *Materials Science*. 2016. Vol. 3. No. 3. P. 1022 – 1053.
4. Механическое поведение аморфных сплавов / А.М. Глезер, И.Е. Пермякова, В.Е. Громов, В.В. Коваленко. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. – 416 с.
5. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments // *Acta Materialia*. 2016. No. 109. P. 375 – 393.
6. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Недра, 1996. – 293 с.
7. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства) / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – М.: Изд-во РХД, АНО ИКИ, 2004. Т. I. – 590 с.; Т. II. – 467 с.
8. Sarac B. Microstructure-Property Optimization in Metallic Glasses. – Springer, 2015. – 89 p.
9. Аморфные металлические сплавы: сб. науч. тр. / Под ред. Ф.Е. Люборского. – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
10. Demidenko V.S., Naumov I.I., Kozlov I.V. etc. Structural instability in metals and alloys // *Russian Physics Journal*. 1998. Vol. 41. No. 8. P. 743 – 753.
11. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
12. Qiao J.C., Wang Q., Crespo D. etc. Secondary relaxation and dynamic heterogeneity in metallic glasses: A brief review // *Chin. Phys*. 2017. Vol. 26. No. 1. P. 016402 – 016412.
13. Сидоров С.А., Федоров В.А., Плужникова Т.Н. и др. Исследование процессов деформации аморфных сплавов в условиях импульсного электрического тока // *Вестник Тамбовского государственного университета. Серия: естественные и технические науки*. 2012. Т. 17. № 1. С. 135 – 138.
14. Verdusco J.A. Fatigue fracture morphologies of some Fe-based amorphous alloy wires // *Materials Letters*. 2003. Vol. 57. P. 1029 – 1033.
15. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А. Влияние импульсного электрического тока на ход зависимостей механических

- кое напряжение – деформация в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 62 – 64.
16. Плужникова Т.Н., Федоров В.А., Сидоров С.А., Яковлев А.В. Влияние агрессивных сред на деформацию аморфных и нанокристаллических сплавов, обусловленную воздействием импульсного электрического тока // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 59 – 62.
 17. Сидоров С.А., Федоров В.А., Дручинина О.А. Влияние импульсного электрического тока на механические свойства наводороженных металлических стекол на основе кобальта и железа // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 1-1 (117). С. 10 – 13.
 18. Stolyarov V.V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys // *Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 31. No. 13a. P. 1536 – 1540.
 19. Yiu P., Hsueh C.H., Shek C.H. Electroplastic forming in a Fe-based metallic glass ribbon // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 658. P. 795 – 799.
 20. Косилов А.Т., Хоник В.А. Направленная структурная релаксация и гомогенное течение свежезакаленных металлических стекол // Известия РАН. Серия физическая. 1993. Т. 57. № 12. С. 192 – 198.

Поступила 10 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 7, pp. 538–543.

INFLUENCE OF RELAXATION PROCESSES ON MECHANICAL STRESS SHIFTS IN AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE RIBBON ALLOYS AT ELECTROPULSE EXPOSURE

D. Yu. Fedotov, S. A. Sidorov, V. A. Fedorov, T. N. Pluzhnikova, A. V. Yakovlev

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russia

Abstract. Relaxation processes in amorphous and nanocrystalline alloys in temperature range of $-196 \div 80$ °C have been studied. It was established that in amorphous alloy stress relaxation occurs in two stages. At the same time, decrease in initial mechanical stress in the sample by 5 % only occurs during the holding time of at least 1 hour. An increase in temperature of the sample leads to more intensive relaxation, which is manifested in an increase in rate of mechanical stress decrease. At the temperature of liquid nitrogen, stress relaxation is not observed. It has been established that in nanocrystalline alloy relaxation processes proceed in a similar manner, but relaxation rate is much lower. Dependences of residual mechanical stress on temperature and holding time were studied. It was found that in amorphous and nanocrystalline alloys, areas of stabilization of residual mechanical stresses are observed at small holding time (less than 5 min) in temperature ranges of 50 – 60 and 40 – 50 °C. Increase in holding time leads to monotonous fall in residual mechanical stresses. Heating up to 40 °C results in complete relaxation of mechanical stresses in the sample 15 minutes after the start of the testing. It is shown that preliminary relaxation of stresses in amorphous alloy leads to decrease in value of mechanical stress relieving during electropulse impact in samples subjected to stretching. In nanocrystalline alloy, value of relieving remains practically unchanged under the indicated impact. It is also shown that the observed effect occurs due not only to thermal expansion, but also to change in the value of reversible component of directed structural relaxation. In the course of work it was established that value of mechanical stress relieving in amorphous alloy depends on medium in which electric current impulse is supplied. In particular, in liquid nitrogen medium, decrease in value of relieving is observed. Such a decrease is not observed in nanocrystalline alloy.

Keywords: directed structural relaxation, amorphous alloy, nanocrystalline alloy, mechanical stress relieving, impulse electric current, thermal expansion, activation energy, liquid nitrogen.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-538-543

REFERENCES

1. Suryanarayana C., Inoue A. *Bulk metallic glasses*. Taylor and Francis Group, 2011, 548 p.
2. Schroers J. Processing of bulk metallic glass. *Advanced Materials*. 2010, no. 22, pp. 1566–1597.
3. Nair B., Priyadarshini G. Process, structure, property and applications of metallic glasses. *Materials Science*. 2016, vol. 3, no. 3, pp. 1022–1053.
4. Glezer A.M., Permyakova I.E., Gromov V.E., Kovalenko V.V. *Mekhanicheskoe povedenie amorfnykh splavov* [Mechanic behavior of amorphous alloys]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2006, 416 p. (In Russ.).
5. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments. *Acta Materialia*. 2016, no. 109, pp. 375–393.
6. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellermaer V.Ya. *Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i splavov* [Electrostimulated plasticity of metals and alloys]. Moscow: Nedra, 1996, 293 p. (In Russ.).
7. Troitskii O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologii, struktura i svoystva)* [Physical fundamentals and technologies of processing of modern materials (theory, technology, structure and properties)]. Moscow: Izd-vo RKhD, ANO IKI, 2004, vol. I, 590 p.; vol. II, 467 p. (In Russ.).
8. Sarac B. *Microstructure-property optimization in metallic glasses*. Springer, 2015, 89 p.
9. *Amorfnye metallicheskie splavy: sb. nauch. tr.* [Amorphous metallic alloys: collection of sci. works]. Lyuborskii F.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1987, 584 p. (In Russ.).
10. Demidenko V.S., Naumov I.I., Kozlov I.V., Kul'kova S.E., Lotkov A.I., Potekaev A.I. Structural instability in metals and alloys. *Russian Physics Journal*. 1998, vol. 41, no. 8, pp. 743–753.
11. *Amorphous Metals*. Eds. Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. London: Butterworths, 1983. (Russ.ed.: Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. *Amorfnye metally*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 328 p.)
12. Qiao J.C., Wang Q., Crespo D., Wang Y., Pelletier J.M. Secondary relaxation and dynamic heterogeneity in metallic glasses: A brief review. *Chin. Phys*. 2017, vol. 26, no. 1, pp. 016402–016412.
13. Sidorov S.A., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Kirillov A.M., Yakovlev A.V., Chernikova A.A. Investigation of deformation processes in amorphous alloys under pulse electric current. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2012, vol. 17, no. 1, pp. 135–138. (In Russ.).
14. Verduzco J.A. Fatigue fracture morphologies of some Fe-based amorphous alloy wires. *Materials Letters*. 2003, vol. 57, pp. 1029–1033.
15. Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Sidorov S.A. The effect of pulsed electric current on the dependence mechanical stress – deformation in amorphous and nanocrystalline metallic alloys. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 62–64. (In Russ.).
16. Pluzhnikova T.N., Fedorov V.A., Sidorov S.A., Yakovlev A.V. The influence of aggressive media on the deformation of amorphous and

- nanocrystalline alloys from exposure to pulsed electric current. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 59–62. (In Russ.).
17. Sidorov S.A., Fedorov V.A., Druchinina O.A. Effect of pulse electric current on mechanical properties of hydrogenated metal glasses on the base of cobalt and iron. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2013, no. 1-1 (117), pp. 10–13. (In Russ.).
 18. Stolyarov V.V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys. *Materials Science and Technology*. 2015, vol. 31, no. 13a, pp. 1536–1540.
 19. Yiu P., Hsueh C.H., Shek C.H. Electroplastic forming in a Fe-based metallic glass ribbon. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 658, pp. 795–799.
 20. Kosilov A.T., Khonik V.A. Directed structural relaxation and homogeneous flow of recently quenched metal glasses. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 1993, vol. 57, no. 12, pp. 192–198. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant no. 16-31-00432).
- Information about the authors:**
- D.Yu. Fedotov**, Assistant of the Chair of Theoretical and Experimental Physics (feodorov@tsu.tmb.ru)
- S.A. Sidorov**, Research Associate of the Chair of Theoretical and Experimental Physics
- V.A. Fedorov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor of the Chair of Theoretical and Experimental Physics
- T.N. Pluzhnikova**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor of the Chair of Theoretical and Experimental Physics (plushnik@mail.ru)
- A.V. Yakovlev**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist Professor of the Chair of Pedagogy and Educational Technologies (DAK-83@mail.ru)

Received March 10, 2017