

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2161-2165

## ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЕЛИЧИНУ СБРОСОВ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В АМОРФНОМ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© Д.Ю. Федотов, С.А. Сидоров, В.А. Федоров,  
Т.Н. Плужникова, А.Д. Березнер, А.В. Яковлев

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина  
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33  
E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Исследованы процессы релаксации в аморфном и нанокристаллическом сплаве в интервале температур  $-196 \div 80$  °С. Показано, что предварительная релаксация напряжений приводит к уменьшению сброса механического напряжения при электроимпульсном воздействии в образцах, подвергнутых растяжению. Показано, что наблюдаемый эффект обусловлен не только термическим расширением, но и изменением величины обратимой составляющей направленной структурной релаксации.

*Ключевые слова:* направленная структурная релаксация; аморфный сплав; нанокристаллический сплав; механическое напряжение

Исследование электропластического эффекта в кристаллических металлах дало возможность управлять их механическими свойствами за счет увеличения пластичности и уменьшения хрупкости. Экспериментально установлено, что подобный эффект наблюдается при пропускании импульсного электрического тока во время деформации аморфных сплавов на основе кобальта и нанокристаллического сплава на основе железа [1–4]. Пропускание электрического тока плотностью  $\sim 10^9$  А/м<sup>2</sup> 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 [5], возникающая в результате нагрева [6; 7].

Цель работы – установить влияние предварительной релаксации напряжений на величину сброса механической нагрузки, обусловленного воздействием импульсного электрического тока в аморфном и нанокристаллическом сплавах.

В качестве материала для исследования был 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 с размерами  $40 \times 3,54 \times 0,02$  мм.

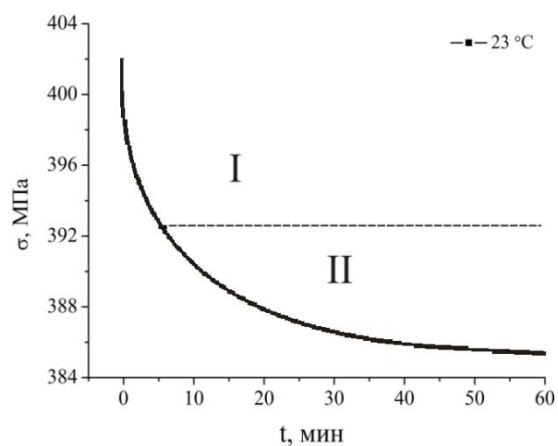
Эксперименты по одноосному растяжению образцов проводили на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565 со скоростью движения траверсы 0,1 мм/мин. Во время деформации образца подавали импульсы тока путем разрядки конденсатора. Плотность тока ( $j$ ), протекающего через образцы, варьировали от  $1 \cdot 10^8$  до  $1 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>. Использовали импульсы с длительностью  $\tau \sim 5$  мс.

Предварительную релаксацию напряжений в образцах осуществляли по следующей методике. Образцы нагружали до механического напряжения 400 МПа. После чего движение траверсы останавливали и предоставляли возможность материалу 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.

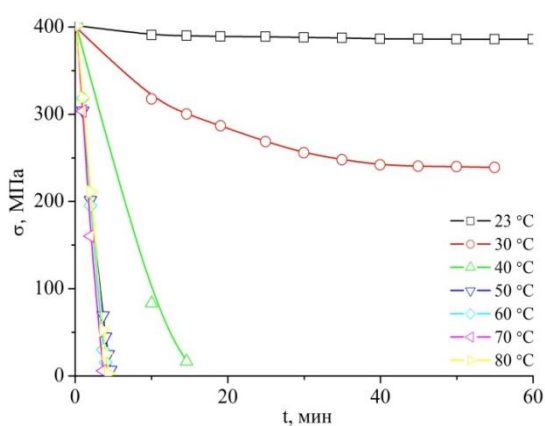
В первой части работы исследовали ход релаксационных процессов в указанных сплавах при температурах  $-196, 0, 23 \dots 80$  °С. Отмечено, что процесс релаксации напряжений при комнатной температуре происходит в две стадии, причем  $\approx 65$  % всего снижения происходит на первой стадии. На второй стадии наблюдается менее интенсивное снижение нагрузки (рис. 1а). При увеличении температуры образца процесс структурной релаксации протекает более интенсивно, что проявляется в увеличении скорости снижения механического напряжения (рис. 1б).

Отмечено, что при комнатной температуре в аморфном сплаве на основе кобальта снижение исходного механического напряжения в образце происходит лишь на 5 % при времени выдержки не менее 1 часа, тогда как нагрев до 40 °С 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 часа релаксационных процессов не наблюдали, что подтверждается сохранением величины механического напряжения, приложенного к образцу. После окончания подачи жидкого азота при отогреве образцов наблюда-



а)



б)

**Рис. 1.** а) стадии релаксации механического напряжения при комнатной температуре; б) релаксация напряжений в аморфном сплаве на основе кобальта при различных температурах

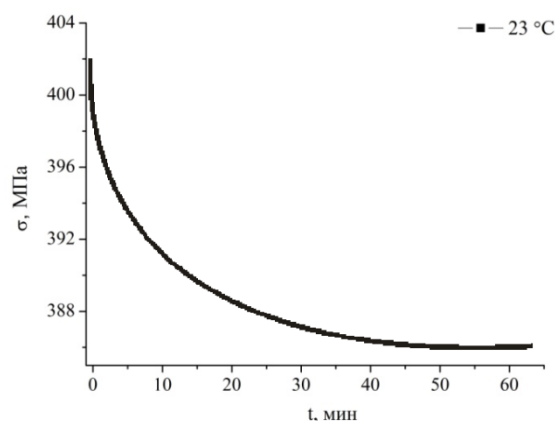
ется постепенное снижение нагрузки, аналогичное снижению в экспериментах при комнатной температуре.

Аналогичным образом происходят релаксационные процессы в нанокристаллическом сплаве. Но при этом скорость релаксационных процессов значительно меньше (рис. 2а, 2б) 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, и при температуре менее 0 °С релаксационное течение блокируется, о чем говорит постоянство величины механической нагрузки с течением времени.

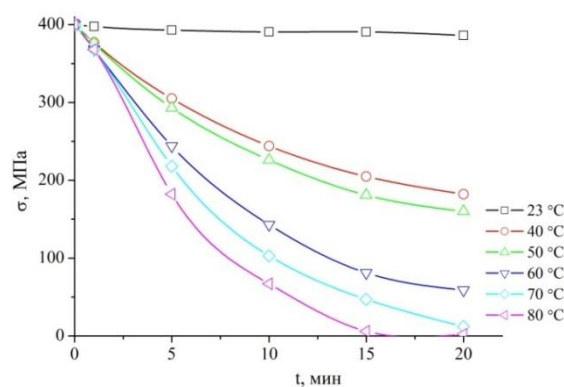
Были получены зависимости остаточного механического напряжения в образцах от температуры и времени испытаний, которые представлены на рис. 3. Видно, что в аморфном сплаве при температуре выше 40 °С наблюдается резкое падение механической нагрузки. Это может быть связано с дополнительным механизмом структурной релаксации, а именно с образованием необратимой составляющей направленной структурной релаксации. Кроме того, в интервале температур 50–60 °С и временах релаксации до 5 мин. обнаружены области стабилизации механического на-

пряжения. С увеличением времени наблюдается монотонное падение механической нагрузки. На аналогичных зависимостях для нанокристаллического сплава при всех временах выдержки присутствует область стабилизации механического напряжения в интервале температур 40–50 °С.

Во второй части работы исследовано влияние предварительной релаксации образцов на величину сброса механического напряжения, обусловленного пропуском импульсного электрического тока. В аморфном и нанокристаллическом сплавах с этой целью через 15 мин. после начала релаксации при комнатной температуре подавался одиночный импульс электрического тока. Сравнение зависимостей величины сброса механического напряжения для образцов в исходном состоянии и после релаксации в течение 15 мин. при одном и том же приложенном напряжении показало, что величина сброса механической нагрузки в образцах аморфного сплава с предварительной релаксации напряжений уменьшилась от 15 до 40 % (рис. 4). В нанокристаллическом сплаве величина сброса практически не изменилась. Следовательно, при одних и тех же геометрических размерах образцов различных сплавов наблюдаемое уменьшение величины сброса механического

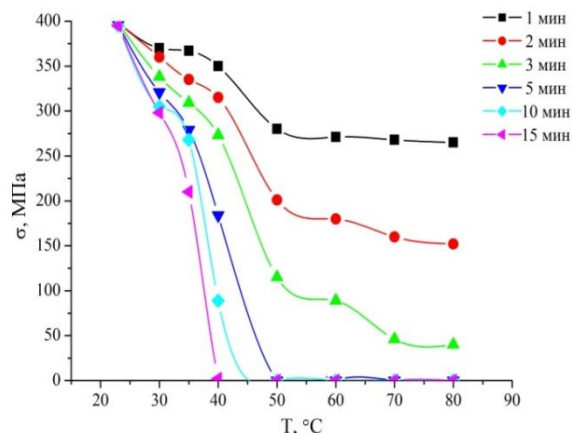


а)

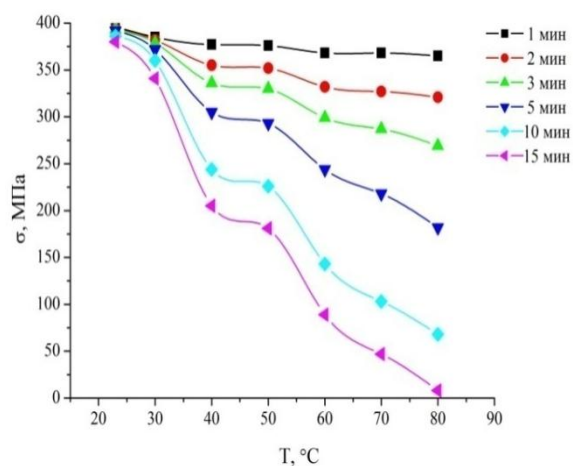


б)

**Рис. 2.** а) стадии релаксации механического напряжения при комнатной температуре; б) релаксация напряжений в нанокристаллическом сплаве на основе железа при различных температурах

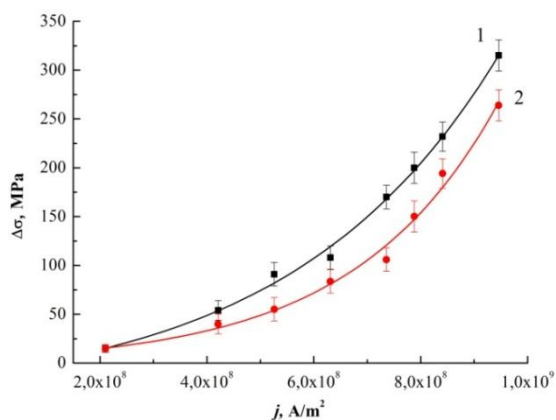


а)



б)

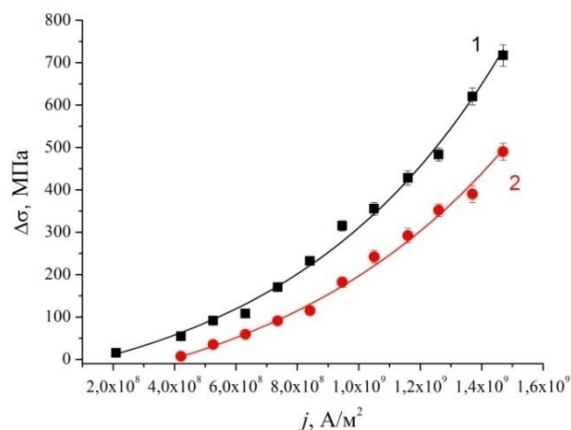
**Рис. 3.** Зависимость величины остаточного механического напряжения в аморфном сплаве на основе кобальта (а) и в нанокристаллическом сплаве на основе железа (б) от температуры и времени релаксации



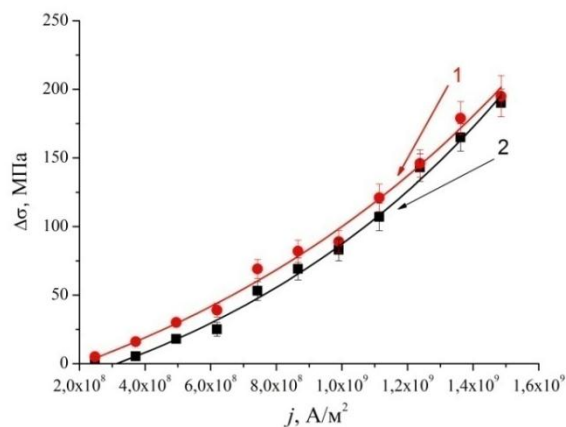
**Рис. 4.** Зависимости величины сброса механического напряжения от плотности импульсного тока для аморфного сплава на основе кобальта: 1 – исходное состояние; 2 – после релаксации в течение 15 мин.

напряжения можно объяснить уменьшением в аморфном сплаве величины обратимой составляющей структурной релаксации, которая в нанокристаллическом сплаве либо отсутствует, либо настолько мала, что ее изменение не сказывается на общей величине сброса.

Были проведены эксперименты, в которых деформация и подача импульсного электрического тока на образец происходили в среде жидкого азота в исходном состоянии и после предварительной релаксации в течение 15 мин. Установлено, что в аморфном сплаве величина сброса механического напряжения уменьшилась на  $\approx 40\%$  по сравнению со сбросом, возникающим при пропускании импульсного тока при комнатной температуре (рис. 5а). Образование сброса при данных условиях можно объяснить только термическим расширением образца. А релаксационные процессы, которые инициируются пропусканием импульсного тока, блокируются за счет низкой температуры. В нанокристаллическом сплаве величина сбросов не изменяется при пропускании тока в среде жидкого азота (рис. 5б).



а)



б)

**Рис. 5.** Зависимость величины сброса механического напряжения от плотности тока для аморфного сплава на основе кобальта а) и нанокристаллического сплава на основе железа б): 1 – для образцов в исходном состоянии; 2 – для образцов в среде жидкого азота

Таким образом, величина сброса механического напряжения, обусловленная воздействием импульсного электрического тока, в аморфном сплаве может быть объяснена термическим расширением и обратимой направленной структурной релаксацией [5]. Предварительная релаксация образцов аморфных сплавов уменьшает величину обратимого сброса. Предварительная релаксация снижает уровень закалочных напряжений, и для дальнейшего протекания релаксации нужны более высокие значения энергии активации, которые при заданных условиях эксперимента практически не достижимы. Следовательно, повысив активационный барьер структурной релаксации в аморфном сплаве, сброс механического напряжения в аморфном и нанокристаллическом сплавах будет обусловлен только термическим расширением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров С.А., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Кириллов А.М., Яковлев А.В., Черникова А.А. Исследование процессов деформации аморфных сплавов в условиях импульсного электрического тока // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 1. С. 135-138.

2. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А. Влияние импульсного электрического тока на ход зависимостей механическое напряжение – деформация в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 60-65.
3. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А. Влияние агрессивных сред на деформацию аморфных и нанокристаллических сплавов, обусловленную воздействием импульсного электрического тока // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 59-62.
4. Федоров В.А., Сидоров С.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 (117). С. 10-13.
5. Косилов А.Т., Хоник В.А. Направленная структурная релаксация и гомогенное течение свежезакаленных металлических стекол // Известия РАН. Серия физическая. 1993. Т. 57. С. 192-198.
6. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. 416 с.
7. Камышанченко Н.В., Неклюдов И.М., Бакай А.С., Красильников В.В. Введение в основы физики аморфного и стеклообразного состояния твердых тел. Белгород: ИПК НИУ «БелГУ», 2012. 320 с.

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

Поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

Федотов Дмитрий Юрьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Сидоров Сергей Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Плужникова Татьяна Николаевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: pluzhnik@mail.ru

Березнер Арсений Дмитриевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра теоретической и экспериментальной физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Яковлев Алексей Владимирович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры методики преподавания естественнонаучных дисциплин, e-mail: DAK-83@mail.ru

UDC 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2161-2165

### THE INFLUENCE OF RELAXATION PROCESSES ON VALUE OF THE DISCHARGE OF MECHANICAL STRESS IN AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE ALLOYS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRIC PULSE

© D.Y. Fedotov, S.A. Sidorov, V.A. Fedorov,  
T.N. Pluzhnikova, A.D., Berzner, A.V. Yakovlev  
Tambov State University named after G.R. Derzhavin  
33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000  
E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Relaxation processes in amorphous and nanocrystalline alloy have been investigated at temperature interval – 196÷80 °С. It has been shown that preliminary relaxation of stress leads to decrease of mechanical stress in tensile specimens at electro-impulse impact. It has been shown that observed effect is specified with not only thermal dilatation, but change of reversible value of directed structural relaxation.

*Key words:* directional structural relaxation; amorphous alloy; nanocrystalline alloy; mechanical stress

## REFERENCES

1. Sidorov S.A., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Kirillov A.M., Yakovlev A.V., Chernikova A.A. Issledovanie protsessov deformatsii amorfnykh splavov v usloviyakh impul'snogo elektricheskogo toka [Study of process of deformation of amorphous alloys under pulsed electric current]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 135-138. (In Russian).
2. Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Sidorov S.A. Vliyanie impul'snogo elektricheskogo toka na khod zavisimostey mekhanicheskoe napryazhenie – deformatsiya v amorfnykh i nanokristallicheskiykh metallicheskiykh splavakh [The effect of pulsed electric current on the dependence mechanical stress – deformation in amorphous and nanocrystalline metallic alloys]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya – Izvestia. Ferrous Metallurgy*, 2013, no. 12, pp. 60-65. (In Russian).
3. Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Sidorov S.A. Vliyanie agressivnykh sred na deformatsiyu amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavov, obuslovlennuyu vozdeystviem impul'snogo elektricheskogo toka [The influence of aggressive media on the deformation of amorphous and nanocrystalline alloys from exposure to pulsed electric current]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya – Izvestia. Ferrous Metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 59-62. (In Russian).
4. Fedorov V.A., Sidorov S.A., Druchinina O.A. Vliyanie impul'snogo elektricheskogo toka na mekhanicheskie svoystva navodorozhennykh metallicheskiykh stekol na osnove kobal'ta i zheleza [Influence of pulse electric current on mechanical properties hydrogenated metallic glasses based on cobalt and iron]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya – International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2013, no. 1 (117), pp. 10-13. (In Russian).
5. Kosilov A.T., Khonik V.A. Napravlennaya strukturnaya relaksatsiya i gomogennoe techenie svezhezakalennykh metallicheskiykh stekol [Directional structural relaxation and homogeneous flow of freshly quenched metallic glasses]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 1993, vol. 57, pp. 192-198. (In Russian).
6. Glezer A.M., Permyakova I.E., Gromov V.E., Kovalenko V.V. *Mekhanicheskoe povedenie amorfnykh splavov* [Mechanics of amorphous alloys]. Novokuznetsk, Siberian State Industrial University Publ., 2006. 416 p. (In Russian).
7. Kamyshanchenko N.V., Neklyudov I.M., Bakay A.S., Krasil'nikov V.V. *Vvedenie v osnovy fiziki amorfnoy i stekloobraznoy sostoyaniya tverdykh tel* [Introduction in physics basis of amorphous and glass state of hard bodies]. Belgorod, Institute of Continuous Education of Belgorod National Research University Publ., 2012. 320 p. (In Russian).

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of Russian Fund of Fundamental Research (grant no. 16-31-00432).

Received 24 May 2016

Fedorov Dmitriy Yurevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Sidorov Sergey Anatolevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Fedorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Pluzhnikova Tatyana Nikolaevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: plushnik@mail.ru

Berezner Arseniy Dmitrievich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Yakovlev Aleksey Vladimirovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Methodology of Teaching Natural Sciences Department, e-mail: DAK-83@mail.ru

## Информация для цитирования:

Федотов Д.Ю., Сидоров С.А., Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Березнер А.Д., Яковлев А.В. Влияние релаксационных процессов на величину сбросов механического напряжения в аморфном и нанокристаллическом сплавах при электроимпульсном воздействии // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2161-2165. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2161-2165

Fedorov D.Y., Sidorov S.A., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N., Berezner A.D., Yakovlev A.V. Vliyanie relaksatsionnykh protsessov na velichinu sbrosov mekhanicheskogo napryazheniya v amorfnoy i nanokristallicheskom splavakh pri elektroimpul'snom vozdeystvii [The influence of relaxation processes on value of the discharge of mechanical stress in amorphous and nanocrystalline alloys under the influence of electric pulse]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2161-2165. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-6-2161-2165 (In Russian).