

УДК 539.374
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОЛОС В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

© М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов, А.А. Шибков

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

На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки распространяющихся деформационных полос в алюминий-магниево-сплаве АМг6 установлено, что подвижная полоса деформации содержит избыток дислокаций одного механического знака, а основным механизмом распространения фронта локализованной деформации вдоль оси образца является эстафетная передача скольжения в антипараллельном направлении за счет «переизлучения» полосы поверхностью для релаксации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой деформации.

Ключевые слова: прерывистая деформация; деформационная полоса; дислокации; алюминий-магниевый сплав

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие технологически важные металлы и сплавы проявляют прерывистую деформацию, которая выражается в появлении повторяющихся скачков напряжения или деформации при испытании с заданной скоростью деформирования ($\dot{\epsilon}_0 = \text{const}$) или нагружения ($\dot{\sigma}_0 = \text{const}$) соответственно – эффект Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [1]. Макроскопические скачки напряжения или деформации сопровождаются локализацией пластической деформации в полосах. Природа их распространения длительное время являлась предметом дискуссий. В качестве механизмов пространственной связи, обеспечивающей распространение полос вдоль оси растяжения образца, рассматривались следующие: двойное поперечное скольжение [2], концентрация локальных напряжений в полосах деформации [3–4], трехмерные напряжения (фактор Бриджмена) [2; 4], внутренние напряжения, связанные с неоднородностями деформации [5–6], и дальнедействующее скоррелированное движение большого количества дислокаций [4; 7].

Целью настоящей работы является исследование механизма распространения деформационных полос на основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки динамики полос на примере алюминий-магниевого сплава АМг6, демонстрирующего прерывистую деформацию и полосообразование при комнатной температуре.

2. МЕТОДИКА

Материалом исследования является промышленный алюминий-магниевый сплав АМг6 (Al – 6,15 % Mg – 0,65 % Mn – 0,25 % Si – 0,21 % Fe – 0,1 % Cu – 0,12 % Zn). Плоские образцы различной толщины от 100 до 500 мкм в форме двухсторонних лопаток размерами рабочей части 6×3 мм вырезались машинным способом из холоднокатаной полосы вдоль направле-

ния прокатки. Перед испытанием образцы отжигались при 450 °С в течение 1 часа и закаливались на воздухе. После термообработки средний размер зерна составил около 10 мкм. Результаты исследования микроструктуры сплава и комплекс высокоскоростных методов регистрации деформации, нагрузки и схема растяжения в мягкой испытательной машине описаны в [8–9].

Динамику и морфологию распространяющихся полос деформации исследовали *in situ* с помощью видеосъемки в косом освещении со скоростью 5000 кадр/с поверхности деформируемого образца (теневого метод) с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры FASTCAM Mini UX50/100 (Photron). Обработка видеополосы состояла в вычитании с помощью компьютерной программы последовательных во времени кадров видеополосы. Подробно методика нагружения и регистрация деформационных полос описана в [10].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования *in situ* динамики и морфологии деформационных полос в плоских образцах различной толщины w_s от 100 до 500 мкм показывают, что ширина деформационных полос w_b на активной стадии их развития сопоставима с толщиной образца, $w_b \approx 1,5 w_s$. Поэтому с уменьшением толщины образца пропорционально уменьшается ширина полосы, и при толщинах менее 200 мкм начинает проявляться внутренняя структура полосы (регистрируемая теневым методом исследования динамики полос), связанная с ее расщеплением, искривлением траектории и т. д. Изучение явлений, связанных с искривлением полос, представляется важным, так как изгиб образца с движущейся деформационной полосой непосредственно связан с избытком дислокаций одного механического знака в структуре полосы, который может быть оценен из данных высокоскоростной видеосъемки.

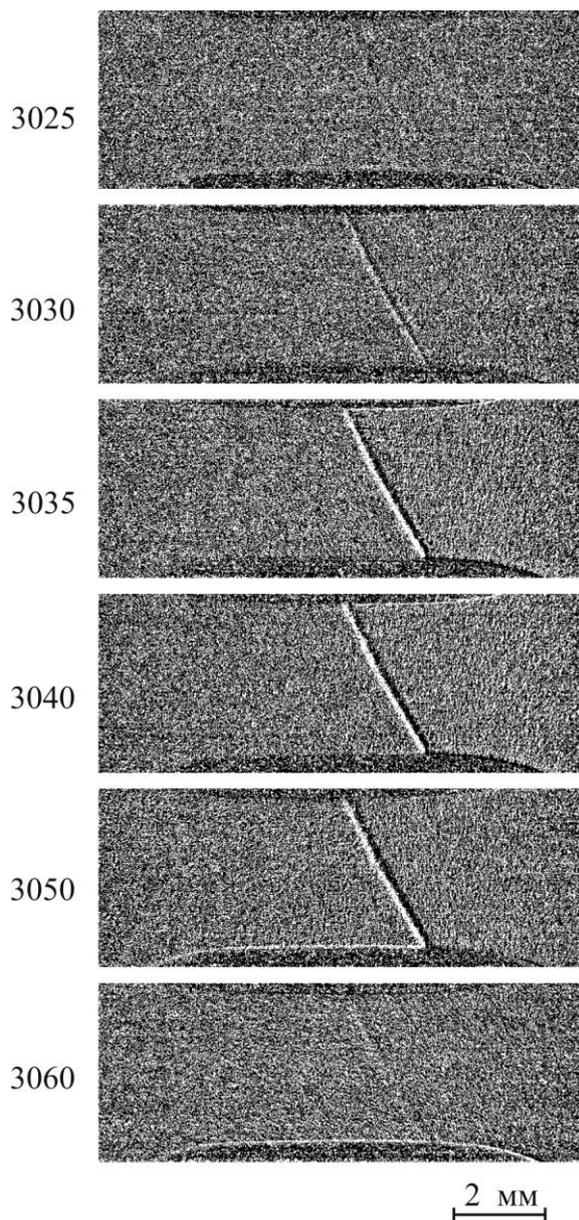


Рис. 1. Фрагмент видеофильма развития искривленной полосы деформации в плоском образце с размерами рабочей части $6 \times 3 \times 0,12$ мм. Скорость видеосъемки 5000 кадр/с

На рис. 1 представлен фрагмент видеофильма зарождения и расширения полосы деформации в плоском образце толщиной 125 мкм, в котором зарегистрирована полоса, меняющая угол распространения поперек образца. После зарождения на боковой поверхности образца полоса сначала распространяется под углом 55° , а затем в центральной части образца угол полосы увеличивается до 60° (рис. 2), так что угол поворота полосы $\Delta\varphi$ составляет около 5° . Поворот направления скольжения связан с избытком дислокаций одного механического знака известным соотношением [11]:

$$\rho_{exc} = \frac{\Delta\varphi}{bd}, \quad (1)$$

где $\rho_{exc} = \rho_+ - \rho_-$ – плотность избытка дислокаций разных механических знаков ρ_+ и ρ_- , b – величина вектора Бюргера, d – в данном случае длина искривленной полосы деформации. Подставляя в формулу (1) типичные данные $\Delta\varphi \approx 5 = 8,72 \cdot 10^{-2}$ рад, $d \approx 4$ мм, $b = 4 \cdot 10^{-8}$ см, получим $\rho_{exc} \approx 5 \cdot 10^6$ см $^{-2}$. При выводе формулы (1) предполагается, что дислокации равномерно распределены в образце. В нашем случае подвижные дислокации сосредоточены в деформационной полосе, поэтому для оценки избыточной плотности дислокаций в полосе полученный результат необходимо умножить на отношение объема образца к объему материала в полосе $k = V/V_b = S/S_b$, где S – площадь фронтальной поверхности образца и S_b – площадь полосы, т. е. площадь, заключенная между границами полосы. Учитывая, что по данным видеосъемки (рис. 1 и 2) ширина полосы составляет около 200 мкм, а длина 4 мм, получим $k \approx 22$, что дает оценку плотности избытка дислокаций одного механического знака в полосе $\rho_b = k\rho_{exc} \approx 10^8$ см $^{-2}$ и суммарной длины дислокаций в зерне внутри активной полосы деформации $L = \rho_b V_{gr} = \rho_b (\bar{d}_{gr})^3 \approx 1$ мм, где V_{gr} и \bar{d}_{gr} – средний объем и средний размер зерна, соответственно. Если принять, что эти дислокации входят в структуру плоского скопления в зерне, то получим оценку числа дислокаций в скоплении $n = L/\bar{d}_{gr} \approx 100$, расположенных на расстоянии 0,1 мкм, что совпадает с типичной структурой внутренних дислокационных скоплений в ГЦК поликристаллах [11].

Очевидно, сделанная оценка избыточной плотности дислокаций в полосе является нижней оценкой суммарной плотности дислокаций разных механических знаков, которая дает вклад в деформацию материала в полосе. Нижнюю оценку скорости пластической деформации в

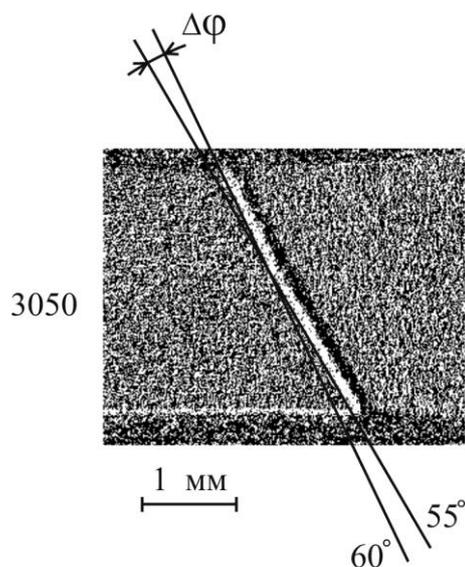


Рис. 2. Измерение угла поворота направления роста полосы деформации (кадр 3050 из рис. 1)

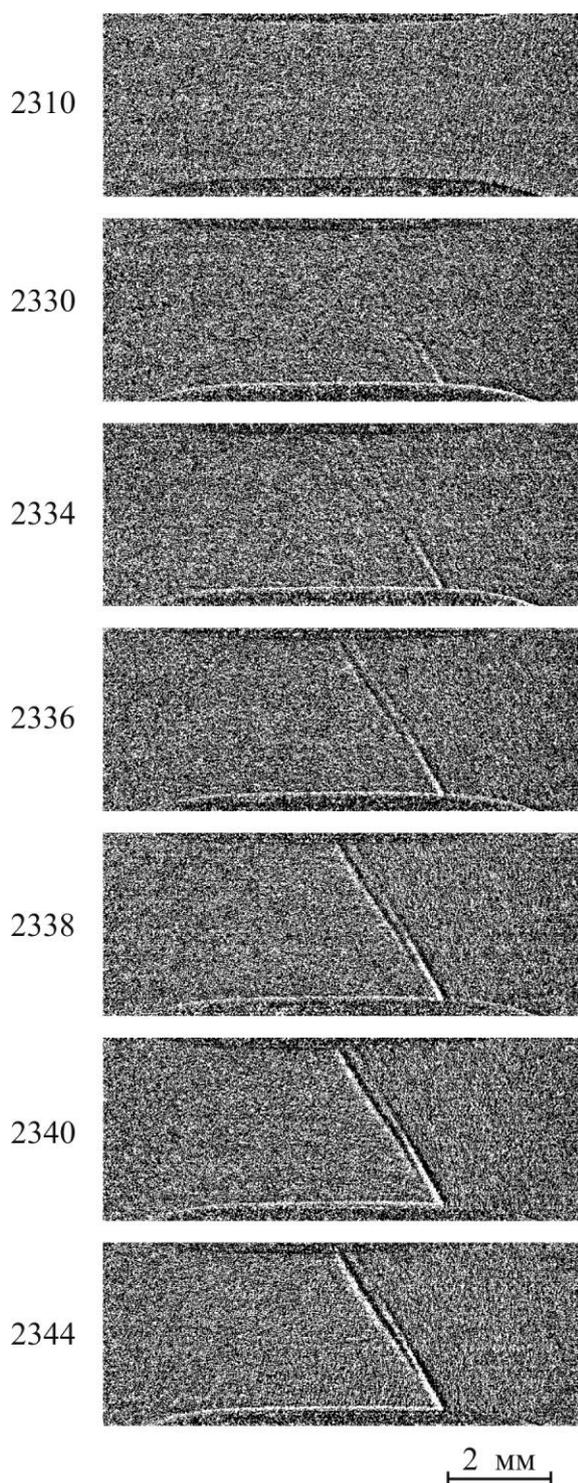


Рис. 3. Фрагмент видеофильма, демонстрирующего «переизлучение» полосы поверхностью, когда вторичная полоса распространяется антипараллельно первичной полосе. Скорость видеосъемки 5000 кадр/с

полосе $\dot{\epsilon}_b$ сделаем, приняв, что скорость дислокаций не превышает скорость вершины полосы v_{tb}

$$\dot{\epsilon}_b \approx b\rho_b v_{tb}. \quad (2)$$

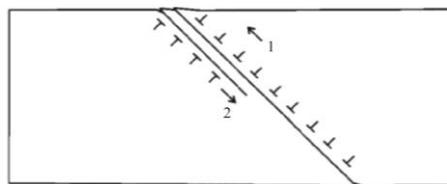


Рис. 4. Схема эстафетной передачи сдвига, обусловленной релаксацией изгибающего момента: 1 – первичная полоса; 2 – вторичная полоса, распространяющаяся антипараллельно первичной

Подставляя $\rho_b \approx 10^8 \text{ см}^{-2}$, $b = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ и типичное значение скорости вершины полосы $v_{tb} \sim 1\text{--}10 \text{ м/с}$ при напряжениях 200–300 МПа, получим оценку скорости пластической деформации в полосе $\dot{\epsilon}_b \sim (4\text{--}40) \text{ с}^{-1}$. Отметим, что столь высокие локальные (в пространстве и во времени) скорости деформации характерны для ударных испытаний.

Зарождение и развитие полосы деформации сопровождается скачком разгрузки механической системы машина–образец. После остановки полосы ее неподвижные дислокации становятся стопорами движению дислокаций и дают вклад в тейлоровское упрочнение материала:

$$\Delta\sigma = \alpha m b G \sqrt{\rho_b}, \quad (3)$$

где m – фактор Тейлора (для ГЦК поликристаллов $m = 3,08$ [12]), α – постоянная междислокационного взаимодействия, определяющая сопротивление сдвига, которая зависит от дислокационной структуры; для сплавов системы Al-Mg с содержанием магния 3–6 % $\alpha = 0,36\text{--}0,45$ [13], $G = 28 \text{ ГПа}$ – модуль сдвига. Подставляя в формулу (2) плотность дислокаций $\rho_b \approx 10^8 \text{ см}^{-2}$, получим $\Delta\sigma \approx 14 \text{ МПа}$, что совпадает с величиной скачка напряжения 10–20 МПа.

Таким образом, полоса деформации, распространяющаяся поперек образца в плоскости максимальных касательных напряжений, содержит избыток дислокаций одного механического знака плотностью $\rho_b \approx 10^8 \text{ см}^{-2}$, который вызывает появление изгибающего момента. Этот изгибающий момент может быть скомпенсирован за счет зарождения и распространения деформационной полосы с избытком противоположного механического знака. На рис. 3 представлен фрагмент видеофильма, демонстрирующий такой механизм.

Первичная полоса зарождается на боковой поверхности (кадр 2332, нижняя часть снимка) и распространяется под углом около 57° со скоростью $\sim 1 \text{ м/с}$. Ширина полосы к моменту выхода на противоположную боковую поверхность составляет около 200 мкм. По мере приближения к противоположной боковой поверхности полоса деформации своим дальнедействующим упругим полем (характерным для дислокационных ансамблей с избытком дислокаций одного знака – механических зарядов) запускает дислокационный источник, который генерирует деформационную полосу в антипараллельном направлении. Вторичная полоса содержит избыток дислокаций противоположного знака (поскольку движется в противоположную сторону

при том же приложенном напряжении) и компенсирует изгибающий момент, созданный распространением первичной полосы. Схема этого процесса представлена на рис. 4.

По мере развития вторичной полосы расстояние от первичной полосы сокращается от ~400 до ~250 мкм на дистанции около 4 мм (рис. 3, кадры 2336–2344), что можно объяснить притяжением дислокаций противоположных знаков, принадлежащих вторичной и первичной полосам. Очевидно, аннигиляция этих дислокаций маловероятна, так как характерное расстояние между ними в десятки раз превышает средний размер зерна и, следовательно, вероятность взаимодействия подвижных дислокаций с «непрозрачными» границами зерен (с неблагоприятным фактором Шмида) очень велика.

Таким образом, с помощью экспериментов *in situ* установлено, что основным макроскопическим механизмом расширения деформационных полос является эстафетная передача скольжения в антипараллельном направлении за счет генерирования поверхностным источником дислокаций вторичной полосы, содержащей избыток дислокаций противоположного знака, для релаксации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. 2. 432 с.
2. Hahner P. Modelling the spatiotemporal aspects of the Portevin–Le Chatelier effect // *Mat. Sci. Eng.* 1993. V. A164. P. 23–34.
3. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities // *Continuum models for materials with microstructure* / ed. by H.-B. Mühlhaus. N. Y.: Wiley & Sons, 1995. P. 395–450.

4. Hahner P., Ziegenbein A., Rizzi E., Neuhauser H. Spatiotemporal analysis of Portevin–Le Chatelier deformation bands: Theory, simulation, and experiment // *Phys. Rev. B.* 2002. V. 65. № 13. P. 134109.
5. Lebedkin M., Dunin-Barkovsky L., Brechet Y., Kubin L., Estrin Y. Kinetics and statistics of jerky flow: experiments and computer simulations // *Mat. Sci. Eng.* 1997. V. A 234–236. P. 115–118.
6. Криштал М.М. Взаимосвязь неустойчивости и неоднородности пластической деформации: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Тольятти: Тольят. гос. ун-т, 2002. 331 с.
7. Hahner P. On the physics of the Portevin–Le Chatelier effect. Part 2: from microscopic to macroscopic behavior // *Mat. Sci. Eng.* 1996. V. A 207. № 2. P. 216–223.
8. Шибков А.А., Золотов А.Е. Актуальные проблемы механики деформируемых твердых тел. Нелинейная динамика неустойчивой пластической деформации металлов. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2010. 187 с.
9. Шибков А.А., Золотов А.Е., Шуклинов А.В. Структурно-чувствительные эффекты прерывистой деформации промышленных сплавов Al–Mg. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2011. 173 с.
10. Шибков А.А., Гасанов М.Ф., Золотов А.Е. Прерывистая ползучесть и локализация пластической деформации. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2016. 158 с.
11. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: МИСиС, 1997. 527 с.
12. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава AlMg6 // *Физика твердого тела.* 2010. Т. 52. № 11. С. 2223–2231.
13. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнено-металлических материалов. Структура и методы исследования // *Перспективные материалы* / под ред. Д.Л. Мерсона. Тамбов: ТГУ; Москва: МИСиС, 2006. С. 267–320.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (№ 3.8515.2017\БЧ).

Поступила в редакцию 22 июня 2017 г.

Гасанов Михаил Фахрадинович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, инженер кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Золотов Александр Евгеньевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Шибков Александр Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Для цитирования: Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Шибков А.А. Экспериментальное исследование механизма распространения деформационных полос в алюминиевом сплаве // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1081–1085. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085

For citation: Gasanov M.F., Zolotov A.E., Shibkov A.A. Eksperimental'noe issledovanie mekhanizma rasprostraneniya deformatsionnykh polos v alyuminievom splave [Experimental study of the deformation band propagation mechanism in aluminum alloy]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1081–1085. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085 (In Russian, Abstr. in Engl.).

UDC 539.374

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1081-1085

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION BAND PROPAGATION MECHANISM IN ALUMINUM ALLOY

© M.F. Gasanov, A.E. Zolotov, A.A. Shibkov

Tambov State University named after G.R. Derzhavin

33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

On the base of high-speed videotaping of the propagating deformation bands in the aluminum-magnesium AlMg6 alloy is revealed, that the mobile deformation band includes an excess of dislocation of the one mechanical sign, and the main mechanism of propagation of the localized strain front is the relay-race translation of slip in antiparallel direction by “re-radiation” of band by surface in order to relaxation of bending moment which is created by primary deformation band.

Keywords: jerky flow; deformation band; dislocation; aluminum-magnesium alloy

REFERENCES

1. Bell Dzh.F. *Eksperimental'nye osnovy mekhaniki deformiruemykh tverdykh tel* [Experimental Basis of Deformable Solids Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pt. 2, 432 p. (In Russian).
2. Hahner P. Modelling the spatiotemporal aspects of the Portevin–Le Chatelier effect. *Mat. Sci. Eng.*, 1993, vol. A164, pp. 23-34.
3. Estrin Y., Kubin L.P. Spatial coupling and propagative plastic instabilities. In: Muhlhaus H.-B. (ed.). *Continuum models for materials with microstructure*. New York, Wiley & Sons, 1995, pp. 395-450.
4. Hahner P., Ziegenbein A., Rizzi E., Neuhauser H. Spatiotemporal analysis of Portevin–Le Chatelier deformation bands: Theory, simulation and experiment. *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 65, no. 13, pp. 134109.
5. Lebedkin M., Dumin-Barkovsky L., Brechet Y., Kubin L., Estrin Y. Kinetics and statistics of jerky flow: experiments and computer simulations. *Mat. Sci. Eng.*, 1997, vol. A 234-236, pp. 115-118.
6. Krishtal M.M. *Vzaimosvyaz' neustoychivosti i neodnorodnosti plasticheskoy deformatsii. Diss. ... d-ra fiz.-mat. nauk* [The Connection of Unstability and Inhomogeneity of Plastically Deformation. Dr. phys.-math. sci. diss.]. Tolyatti, Togliatti State University Publ., 2002, 331 p. (In Russian).
7. Hahner P. On the physics of the Portevin-Le Chatelier effect. Part 2: from microscopic to macroscopic behavior. *Mat. Sci. Eng.*, 1996, vol. A 207, no. 2, pp. 216-223.
8. Shibkov A.A., Zolotov A.E. *Aktual'nye problemy mekhaniki deformiruemykh tverdykh tel. Nelineynaya dinamika neustoychivoy plasticheskoy deformatsii metallov* [Current Issues of Deformable Solids Mechanics. Nonlinear Dynamics of Unstable Plastic Deformation of Metals]. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2010, 187 p. (In Russian).
9. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Shuklinov A.V. *Struktorno-chuvstvitel'nye efekty preryvistoy deformatsii promyshlennykh splavov Al-Mg* [Structural-Sensitive Effects of Jerky Deformation of Industrial Alloys Al-Mg]. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2011, 173 p. (In Russian).
10. Shibkov A.A., Gasanov M.F., Zolotov A.E. *Preryvistaya polzuchest' i lokalizatsiya plasticheskoy deformatsii* [Serrated Creep and Plastically Deformation Localization]. Tambov, Publishing House of Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 2016, 158 p. (In Russian).
11. Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Ch. 2. Deformatsiya* [The Durability of Alloys. Chapter 2 Deformation]. Moscow, MISiS Publ., 1997, 527 p. (In Russian).
12. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A. Akusticheskiy predvestnik neustoychivoy plasticheskoy deformatsii alyuminiy-magnievogo splava AMg6 [Acoustic precursor of unstable plastic deformation in the aluminum-magnesium alloy AMg6]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 2223-2231. (In Russian).
13. Koneva N.A., Kozlov E.V. Dislokatsionnaya struktura i fizicheskie mekhanizmy uprochnenno metallicheskiykh materialov. Struktura i metody issledovaniya [Dislocation Structure and Physical Mechanism of Reinforced Metal Materials. Structure and Methods of Research]. In: Merson D.L. (ed.). *Perspektivnye materialy* [Prospective Materials]. Tambov, Tambov State University named after G.R. Derzhavin Publ., Moscow, MISiS Publ., 2006, pp. 267-320. (In Russian).

ACKNOWLEDGEMENTS: The study is carried out within the framework of state assign of the Ministry of Education and Science of Russia (no. 3.8515.2017\БЧ).

Received 22 June 2017

Gasanov Mikhail Fakhreddinovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Engineer of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Zolotov Aleksander Evgenyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Associate Professor of Theoretical and Experimental Physics Department, e-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

Shibkov Aleksander Anatolyevich, 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: shibkov@tsu.tmb.ru