

Исследование инварианной аномалии в многослойных материалах на основе сталей

© М.Д. Сафонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследования анизотропии термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР), которая была обнаружена в многослойном металлическом материале на основе сталей 08кп и 08Х18, синтезированном методом горячей пакетной прокатки. Установлено, что многослойный материал имеет аномально низкие значения ТКЛР в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки. Для объяснения этого явления была предложена гипотеза о взаимосвязи нормальных и касательных напряжений, возникающих на межслойных границах такого материала. Гипотезу подтверждает факт значительного влияния, оказываемого напряжениями сжатия в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки, со стороны стали 08Х18, имеющей более высокие значения ТКЛР, на сталь 08кп, претерпевающую переход $\alpha \rightarrow \gamma$ в процессе нагрева. Показано, что объемный эффект перехода $\alpha \rightarrow \gamma$, зафиксированный в процессе нагрева монолитного образца стали 08кп, многократно возрастает в случае, когда эта сталь находится в составе многослойного композита.

Ключевые слова: горячая пакетная прокатка, многослойный металлический материал, направление прокатки, дилатометрический анализ, термический коэффициент линейного расширения

Введение. Для создания перспективных образцов современной техники требуется использовать новые материалы, которые могут адаптироваться к внешним воздействиям, приводящим к резкому изменению характеристик материала. Эти изменения «вынуждают» материал и конструкцию в целом в динамическом режиме подстраиваться к внешним условиям и регулировать собственный отклик для получения оптимальных эксплуатационных характеристик изделия. Такие материалы можно условно подразделить на «активные» и «пассивные». Первые реагируют при поступлении внешнего сигнала из центра управления [1, 2]. Адаптивная реакция вторых появляется в результате самостоятельного изменения характеристик от внешних воздействий, т. е. «пассивные» материалы, обладая нелинейными деформационными или тепловыми характеристиками, также могут адаптивно реагировать на изменение внешних условий. Такое поведение, свойственное в основном композиционным материалам, является результатом взаимодействия локальных микроскопических

полей упругих напряжений, что не встречается в материалах с однородной структурой.

Изучением теоретических аспектов создания композиционных материалов с адаптивным поведением занимались многие исследователи. В результате были обнаружены интересные эффекты в композитах, а также удалось активизировать работу по поиску материалов с отрицательными значениями коэффициента Пуассона и термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) [3–7].

Анализ результатов многочисленных исследований показывает, что инвариантный эффект (отрицательное значение ТКЛР) является многогранным, часто встречающимся в природе явлением [8]. Яркий пример — хорошо изученное соединение ZrW_2O_8 , имеющее отрицательные значения ТКЛР изотропного характера во всем температурном интервале своего существования [9]. Применение пластической деформации, приводящей к формированию текстуры, позволило обнаружить инвариантную аномалию в цветных сплавах на основе титана и меди при условии протекания в них мартенситного превращения [10, 11].

Результаты последних исследований подтверждают получение в перспективе конструкционных материалов, которые могут обладать отрицательными значениями ТКЛР. Основой для их получения служат текстурованные материалы, включая стали, претерпевающие мартенситное превращение [12].

Известны математические модели, в соответствии с которыми ТКЛР может иметь отрицательные значения в материалах со слоистым строением на основе бинарных (иридий + инвар) либо тройных (иридий + вольфрам + инвар) композиций металлов. Основным критерий при выборе материалов — существенное отличие значений модуля нормальной упругости E и значений ТКЛР, которое для материалов создаваемой композиции может достигать 4–5 раз [6, 7].

Однако технологические аспекты, связанные с совместимостью материалов с такими параметрами, межслойной диффузией легирующих элементов, способами создания неразрывной связи между слоями, вследствие которых и стало возможным проявление указанного эффекта, рассмотрены не были. Цель настоящей работы — реализация разработанных подходов к высокотехнологичным конструкционным металлическим материалам с многослойным строением, полученным на основе сталей [13–15].

Материалы и методы исследования. С учетом изложенного выше в качестве модельной была выбрана композиция, состоящая из сталей 08кп и 08Х18. Первичные композитные заготовки состояли из 100 чередующихся листов толщиной по 0,5 мм (по 50 листов каждой марки стали). Согласно разработанному ранее экспериментальному технологическому маршруту [16], включающему в себя мерную от-

резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета и последующее пластическое деформирование методом горячей прокатки при температуре 1000 °С, был получен многослойный металлический материал в виде заготовок полосового сортамента шириной 100 мм и толщиной 10 мм. Эти заготовки после первого технологического цикла были обработаны прокаткой до толщины 2 мм, зачищены, собраны в пакет и в соответствии с описанным выше технологическим маршрутом были направлены на второй цикл изготовления — обработку горячей пакетной прокаткой до толщины 10 мм.

Для проведения дилатометрических исследований от горячекатаной заготовки были отрезаны образцы одинаковой длины по 10 мм, соответствующей толщине проката. Образцы отрезались в трех направлениях: 1) вдоль направления прокатки (RD); 2) в плоскости прокатки (TD); 3) в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки (ND). Таким образом, образцы для исследования имели одинаковые размеры, но разную структуру: после первого цикла это были стослойные образцы с толщиной единичного слоя 100 мкм; после второго цикла, когда число слоев составило около 1500, толщина слоя не превышала 5 мкм.

Измерения были выполнены на дилатометре DIL-402С фирмы Netzsch (Германия) с держателем и толкателем из корунда, в диапазоне значений температуры 20...1200 °С при нагреве и охлаждении печи со скоростью 5 град/мин в атмосфере технически чистого аргона. Температура измерена платино-платинородиевой термопарой (тип S), расположенной в непосредственной близости от образца, с погрешностью не более 5 °С. Учитывая, что длина образцов не превышала 10 мм, для тарировки прибора и получения базовой линии дилатометра использован эталон из сплава пирокс длиной 10 мм и диаметром 6 мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенное дилатометрическое исследование показало (рис. 1), что образцы исследуемого многослойного материала имеют аномалию теплового расширения dL/L_0 в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки ND, что обусловлено протеканием перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ в стали 08кп. Одновременно с этим в плоскости листового материала в направлениях RD и TD дилатометрическая кривая с незначительными отклонениями совпадает с трендом термического расширения стали 08X18. Изменение относительного удлинения, обусловленное переходом $\alpha \rightarrow \gamma$ в стали 08кп, отчетливо фиксируется на дилатометрической кривой в направлении ND (см. рис. 1). При этом на дилатометрических кривых, соответствующих направлениям RD и TD, этот переход менее заметен.

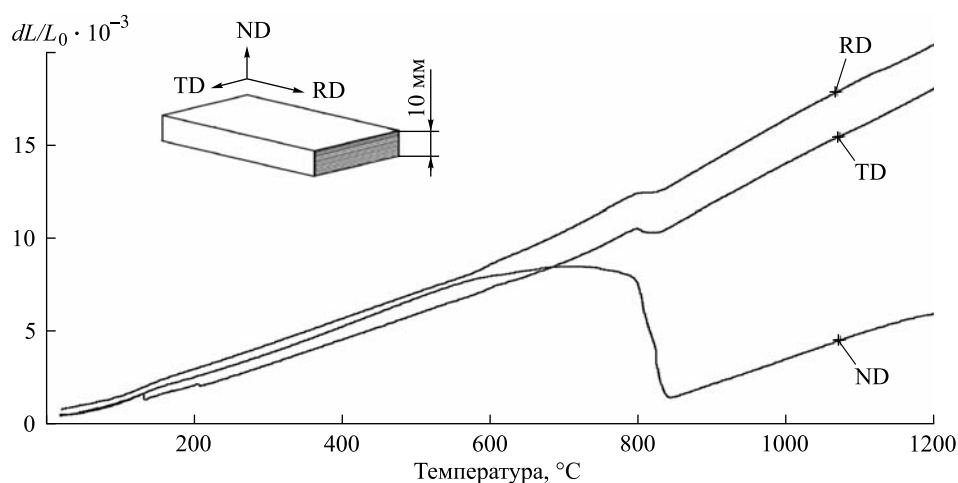


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения образца многослойного материала сталь 08X18 + сталь 08кп в направлениях RD, TD и ND при нагреве (образец толщиной 10 мм, число слоев 100)

Выполненный в работе [17] анализ температурной зависимости ТКЛР многослойного материала, полученного из сталей 08X18H10 и 08кп, показал следующее: ход дилатометрических кривых в температурном интервале перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ в направлениях RD и TD отражает сложные процессы, происходящие на границе раздела сталей с различными значениями ТКЛР. Это позволяет утверждать, что наблюдается сложная взаимосвязь нормальных и касательных напряжений на межслойных границах в исследуемом материале.

Данную гипотезу подтверждает необычно сильное влияние, которое оказывают нормальные напряжения сжатия, возникающие в направлении, перпендикулярном плоскости проката ND со стороны стали с более высокими значениями ТКЛР, на ту составляющую многослойного материала, которая претерпевает переход $\alpha \rightarrow \gamma$ в процессе нагрева. Учитывая, что такой переход при нагреве стали 08кп происходит с уменьшением параметров кристаллической решетки, наблюдается усиление этого сжатия вследствие наложения сжимающих напряжений со стороны слоев стали 08X18. Этот эффект более нагляден при сравнении дилатометрических кривых нагрева образца монолитной стали 08кп и композиции многослойного материала сталь 08X18 + сталь 08кп (рис. 2). Визуально разность абсолютной величины объемной аномалии перехода $\alpha \rightarrow \gamma$, построенная в одном масштабе, составляет приблизительно 300 %.

Такое же сильное воздействие, но уже растягивающее, со стороны слоев стали 08X18 возникающие напряжения оказывают на слои

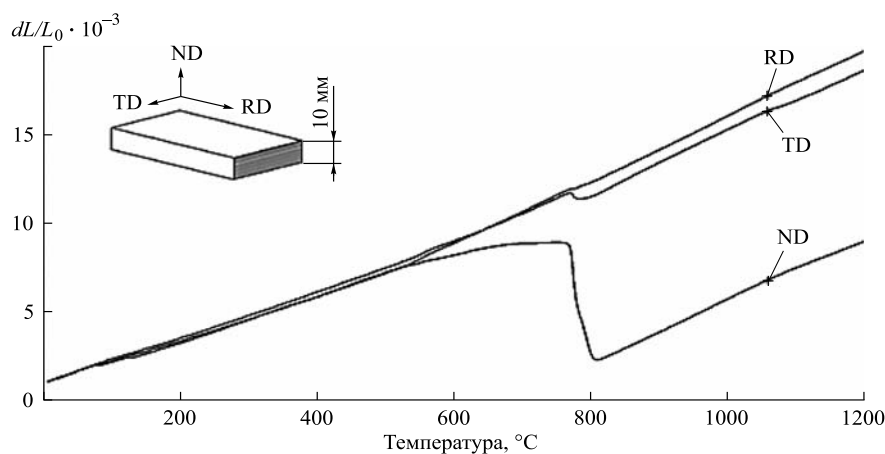


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения многослойного материала сталь 08X18 + сталь 08кп в направлениях RD, TD и ND при нагреве (второй технологический цикл)

Такое поведение многослойного материала может быть связано с диффузионным перераспределением легирующих элементов и в первую очередь хрома как наиболее подвижного элемента замещения. Проведенные ранее исследования показали [18], что к окончанию второго технологического цикла обработки средняя концентрация хрома в слоях многослойных материалов выравнивается и составляет 9 %. Анализ dilatометрической кривой нагрева и охлаждения позволяет сделать вывод о том, что такое изменение произошло непосредственно при завершении первого технологического цикла. Об этом свидетельствует снижение температуры перехода $\gamma \rightarrow \alpha$ по сравнению с температурой перехода 911 °C стали 08кп (рис. 5).

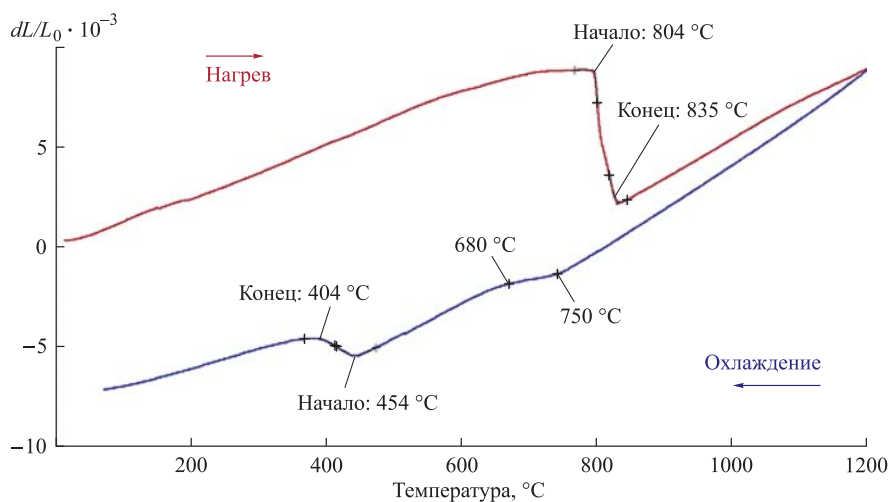


Рис. 5. Температурные интервалы начала и окончания перехода $\gamma \rightarrow \alpha$ в образце многослойного материала сталь 08X18 + сталь 08кп при нагреве и охлаждении в направлении ND (первый технологический цикл)

Анализ значений ТКЛР при температуре 20...1100 °С показывает существенное уменьшение абсолютных значений ТКЛР в направлениях RD по сравнению со значениями этого коэффициента в направлениях ND и TD (таблица). Инварная аномалия в направлении ND достигает минимального значения в образцах, которые прошли два технологических цикла. Абсолютные значения ТКЛР достигают минимума ($1,1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) к моменту окончания перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ (850 °С), затем возрастают до значения $2,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (1100 °С).

Значения ТКЛР $\alpha \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$, многослойного материала
(сталь 08X18 + сталь 08кп)

Температура, °С	Направление		
	RD	TD	ND
200	11,9/11,4	8,8/11,2	10,6/11,0
300	12,4/11,8	9,6/11,8	11,4/11,4
400	12,8/12,2	10,7/12,4	12,2/12,2
500	13,1/12,5	11,4/12,8	12,9/12,6
600	13,4/13,1	11,8/13,3	12,8/12,7
700	14,1/14,0	12,2/13,7	11,8/12,2
800	15,0/14,8	13,0/14,3	9,3/10,9
850	—	—	2,3/1,1
900	15,2/15,1	13,0/14,1	3,4/1,9
1000	16,0/15,7	13,9/14,7	5,1/3,1
1100	16,5/16,1	14,5/15,1	6,4/2,6

Примечание. В числителе указаны значения ТКЛР для толщины заготовки 10 мм, числа слоев 100, толщины одного слоя 100 мкм, в знаменателе — для толщины заготовки 10 мм, числа слоев 1500, толщины единичного слоя 5 мкм.

В результате проведенных исследований установлено, что формирование многослойной структуры может оказать влияние на значения ТКЛР в направлении, нормальном к плоскости прокатки (ND). Однако уменьшение абсолютных значений ТКЛР объясняется благоприятным сочетанием условий нагрева, а именно, совпадением знака сжимающих напряжений стали 08X18 с направлением изменения параметров решетки стали 08кп. При этом важен факт значительной анизотропии температурной зависимости ТКЛР многослойного материала, что позволяет сделать предположение о его избирательном, адаптивном поведении при использовании в узлах и устройствах, которым требуется термическая компенсация в процессе эксплуатации.

Заключение. Температурный коэффициент линейного расширения многослойного материала, синтезированного из сталей 08X18 и 08кп, имеет анизотропный характер, зависящий от направления проводимого измерения.

Установлено, что межслойные напряжения могут многократно влиять на объемные изменения, возникающие в сталях при переходе $\alpha \rightarrow \gamma$.

На основании результатов исследования сформулирована гипотеза, объясняющая обнаруженное явление взаимодействием нормальных и касательных напряжений на межслойных границах многослойного материала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шалин Р.Е., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Морозов Г.А. Адаптирующиеся (интеллектуальные) материалы и проблемы их создания. *Межотраслевой науч.-техн. сб. «Технология». Сер. Конструкции из композиционных материалов*. Москва, ВИМИ, 1995, вып. 2, с. 43–48.
- [2] Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния. *Авиационные материалы и технологии*, 2012, № 5, с. 242–253.
- [3] Bensoussan A., Lions J.-L., Papanicolaou G.C. *Asymptotic Analysis for Periodic Structures*. Amsterdam, North Holland Pub. Co., 1978.
- [4] Sanchez-Palencia E. *Nonhomogeneous Media and Vibration Theory. Lecture Notes in Physics 127*. Berlin, Springer, 1980.
- [5] Almgren R.F. An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio. *J. Elasticity*, 1985, vol. 15, pp. 427–430.
- [6] Колпаков А.Г., Ракин С.И. К задаче синтеза композиционного материала одномерного строения с заданными характеристиками. *Прикладная механика и техническая физика*, 1986, № 6, с. 143–150.
- [7] Колпаков А.Г., Ракин С.И. Деформационные характеристики слоистых композитов при нелинейных деформациях. *Прикладная механика и техническая физика*, 2004, № 5, с. 157–166.
- [8] Хоменко О.А. Происхождение и особенности инварных аномалий физических свойств. Fe–Ni сплавы с ГЦК-решеткой. *Физика металлов и металловедение*, 2007, том 104, № 2, с. 155–165.
- [9] Mary T.A., Evans J.S.O., Vogt T., Sleight A.W. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW_2O_8 . *Science*, vol. 272, issue 5258, pp. 90–92. DOI: 10.1126/science.272.5258.90
- [10] Wang Y., Gao J., Wu H., Yang S., Ding X., Wang D., Ren X., Wang Y.Z., Song X. Strain glass transition in a multifunctional β -type Ti alloy, *Sci. Rep.* 4, 3995 (2014).
- [11] Kainuma R., Wang J.J., Omori T., Sutou Y., Ishida, K. Invar-type effect induced by cold-rolling deformation in shape memory alloys. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, no. 80 (23), pp. 4348–4350.
- [12] Monroe J.A., Gehring D., Karaman I., Arroyave R., Brown D.W., Clausen B. Tailored thermal expansion alloys. *Acta Mater.*, 2016, no. 102, pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.09.012
- [13] Колокольцев В.М., ред. *Инновационные металлические материалы*. Магнитогорск, Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016, 371 с.
- [14] Табатчигова Т.И., Плохих А.И., Яковлев И.Л., Ключева С.Ю. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом

- горячей пакетной прокатки. *Физика металлов и металловедение*, 2013, т. 114, № 7, с. 633–646.
- [15] Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л., Плохих А.И., Дельгадо Рейна С.Ю. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки. *Физика металлов и металловедение*, 2014, т. 115, № 4, с. 431–442. DOI: 10.7868/S0015323014040159
- [16] Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № S, специальный выпуск «Наноинженерия», с. 44–52.
- [17] Плохих А.И., Колесников А.Г., Сафонов М.Д. Высокотемпературный псевдоинварный эффект в многослойных материалах на основе сталей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 2017, т. 19, № 2, с. 7–20. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.01
- [18] Плохих А.И., Власова Д.В., Ховова О.М., Полянский В.М. Исследование влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html>

Статья поступила в редакцию 31.05.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сафонов М.Д. Исследование инварной аномалии в многослойных материалах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1775>

Сафонов Михаил Дмитриевич — аспирант кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: MSafonov@bmstu.ru

Investigating an invar anomaly in multilayered steels

© M.D. Safonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents the results of investigating linear thermal expansion coefficient (LTEC) anisotropy in a multilayered metallic material synthesised out of the 08kp and 08Kh18 steels by means of hot pack rolling. We detected anomalously low LTEC values in the direction perpendicular to the rolling plane (ND) of the multilayered material. In order to explain this phenomenon, we propose a hypothesis stating that normal and tangential stresses occurring at the inter-layer boundaries in such a material are linked. The fact that compression stresses caused by the 08Kh18 steel (featuring higher LTEC values) in the direction perpendicular to the rolling plane (ND) greatly affect the 08kp steel, which undergoes the $\alpha \rightarrow \gamma$ transition during heating, supports our hypothesis. We show that a change in volume for the $\alpha \rightarrow \gamma$ transition recorded during heating the 08kp steel greatly increases when this steel forms a part of a multilayered composite.

Keywords: hot pack rolling, multilayered metallic material, rolling direction, dilatometric analysis, linear thermal expansion coefficient

REFERENCES

- [1] Shalin R.E., Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Morozov G.A. Adaptiruyushchiesya (intellektualnye) materialy i problemy ikh sozdaniya [Adaptive (intelligent) materials and issues pertaining to their development]. *Mezhotraslevoy nauch.-tekhn. sb. Tekhnologiya. Ser. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Inter-industry scientific and technological proc. Technolgy. Ser. Composite material structures]. Moscow, All-Russian Research Institute for Inter-Industry Information Publ., 1995, no. 2, pp. 43–48.
- [2] Gulyaev I.N., Gunyaev G.M., Raskutin A.E. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2012, no. 5, pp. 242–253.
- [3] Bensoussan A., Lions J.-L., Papanicolaou G.C. *Asymptotic Analysis for Periodic Structures*. Amsterdam, North Holland Pub. Co., 1978.
- [4] Sanchez-Palencia E. *Nonhomogeneous Media and Vibration Theory. Lecture Notes in Physics 127*. Berlin, Springer, 1980.
- [5] Almgren R.F. *J. Elasticity*, 1985, vol. 15, pp. 427–430.
- [6] Kolpakov A.G., Rakin S.I. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1986, no. 6, pp. 143–150.
- [7] Kolpakov A.G., Rakin S.I. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, no. 5, pp. 157–166.
- [8] Khomenko O.A. *Fizika metallov i metallovedenie — Physics of Metals and Metallography*, 2007, vol. 104, no. 2, pp. 155–165.
- [9] Mary T.A., Evans J.S.O., Vogt T., Sleight A.W. *Science*, vol. 272, no. 5258, pp. 90–92. DOI: 10.1126/science.272.5258.90
- [10] Wang Y., Gao J., Wu H., Yang S., Ding X., Wang D., Ren X., Wang Y.Z., Song X., Gao J. *Sci. Rep.*, 4, 3995 (2014).
- [11] Kainuma R., Wang J. J., Omori T., Sutou Y., Ishida K. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, no. 80 (23), pp. 4348–4350.
- [12] Monroe J.A., Gehring D., Karaman I., Arroyave R., Brown D.W., Clausen B. *Acta Mater.*, 2016, no. 102, pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.09.012

- [13] Kolokoltsev V.M., ed. *Innovatsionnye metallicheskie materialy* [Innovative metallic materials]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2016, 371 p.
- [14] Tabatchikova T.I., Plokhikh A.I., Yakovlev I.L., Klyueva S.Yu. *Fizika metallov i metallovedenie — Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 7, pp. 633–646.
- [15] Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Plokhikh A.I., Delgado Reyna S.Yu. *Fizika metallov i metallovedenie - Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 4, pp. 431–442. DOI: 10.7868/S0015323014040159
- [16] Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*, 2010, no. S, Spetsialnyy Vypusk Nanoingzheneriya [Special Nanoengineering Edition], pp. 44–52.
- [17] Plokhikh A.I., Kolesnikov A.G., Safonov M.D. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie — Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 7–20. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.01
- [18] Plokhikh A.I., Vlasova D.V., Khovova O.M., Polyanskiy V.M. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie — Science and Education: Scientific Edition*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html>

Safonov M.D., post-graduate student, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: MSafonov@bmstu.ru