

**STABILITY OF STRUCTURE AND FUNCTIONAL PROPERTIES
FERRITIC-MARTENSITIC STEEL AFTER COMBINED PROCESSING**

*Aleksandra Anatolyevna Frik^a, Marina Aleksandrovna Nikitina,
Rinat Kadykhanovich Islamgaliev*

Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi str. 32, Ufa, 450076, Russia

^a frikaleksandra@gmail.com

ABSTRACT

The ferritic-martensitic steel of the EI-961SH, subjected to complex processing, including standard heat treatment, cold rolling to a degree of 50% and re-quenching from a temperature of 850 °C, was studied. Rolling leads to the formation of a band structure, particles are located along the boundaries of the bands. As a result of the re-quenching of the rolled state, the structure of the batch martensite was formed. At the same time, the reinforcing carbide particles of Cr₂₃C₆ were preserved in the structure, and the volume of globular carbides also increased. This state of crushed grains with carbide particles provided high mechanical properties. The thermal stability of the obtained state at the operating temperature is investigated.

KEYWORDS

Rolling; steel; structure; carbides; deformation; heat treatment; compression; micro-hardness; strength; ductility.

**СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ
ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ**

*Александра Анатольевна Фрик^а, Марина Александровна Никитина,
Ринат Кадыханович Исламгалиев*

Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^a frikaleksandra@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Исследована ферритно-мартенситная сталь марки ЭИ-961Ш, подвергнутая комплексной обработке, включающей стандартную термическую обработку, холодную прокатку до степени 50% и перекалку с температуры 850 °C. Прокатка приводит к формированию полосовой структуры, вдоль границ полос расположены частицы. В результате перекалки прокатанного состояния сформирована структура пакетного мартенсита. При этом упрочняющие карбидные частицы Cr₂₃C₆ сохранились в структуре, а также увеличилась доля глобулярных

карбидов. Данное состояние измельченных зерен с карбидными частицами обеспечило высокие механические свойства. Исследована термическая стабильность полученного состояния при температуре эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Прокатка; сталь; структура; карбиды; деформация; термообработка; обжатие; микротвердость; прочность; пластичность.

Введение

В процессе холодной прокатки ($T_{пр} < 0,3T_{пл}$) увеличиваются прочностные характеристики и твердость металла [1, 2]. При высокой пластической деформации металла происходят изменения: образуется вытянутая бимодальная структура с поворотом зерна в направлении обработки. Вместе с изменением формы зерен происходят изменения пространственных ориентиров их кристаллической решетки [4–6].

Известно, что холодная прокатка металлов (при температуре ниже 30% от температуры плавления) приводит к значительным изменениям в их структуре [7–9]. Такие изменения, как удлинение и вытягивание зерен металла в направлении обработки, а также изменение ориентации их кристаллической решетки, вызывают увеличение прочностных характеристик, таких как предел текучести, предел прочности и твердость, однако при этом снижается пластичность. Одним из методов, позволяющих исследовать эти изменения, является комбинированная обработка, включающая в себя прокатку и перезакалку металла.

В представленной работе были проведены исследования структурных и функциональных характеристик ферритно-мартенситной стали ЭИ-961Ш, которая была

подвергнута комбинированной обработке, включающей в себя прокатку и перезакалку, а также отжиг при повышенных температурах. В ходе исследований были оценены параметры микроструктуры металла и его свойства при различных температурных режимах. Важным аспектом работы было изучение термической стабильности структуры металла при повышенных температурах, поскольку максимальной рабочей температурой для изделий из этой стали является 600 °С. Для этого были проведены длительные отжиги при этой температуре, что позволило получить достоверные данные о термической стабильности структуры стали после прокатки и перезакалки.

Таким образом, данная работа является важным вкладом в понимание эффектов холодной прокатки и перезакалки на структурные и функциональные характеристики металла, а также его термическую стабильность при повышенных температурах.

1. Материал и методики исследования

Объект изучения – ферритно-мартенситная сталь ЭИ-961Ш (табл. 1). В качестве стандартной термообработки для данной стали используется закалка с температуры 1050 °С в масло, а также последующий высокотемпературный отпуск [3].

Таблица 1. Химический состав стали ЭИ-961Ш, ат.%

Table 1. Chemical composition of steel, wt.%.

V	W	Si	Mn	Cu	Mo	Ni	S	C	P	Cr
0,18–0,30	1,6–2,0	до 0,6	до 0,6	до 0,3	0,35–0,5	1,5–1,8	до 0,025	0,10–0,16	до 0,03	10,5–12

Деформацию проводили на стане плоской прокатки. Для проведения механической обработки были вырезаны пластины размером $28 \times 14,5 \times 85$ мм методом электроэрозионной резки.

Пластины подвергали прокатке при $v = 1,5$ м/мин с обжатием 6% до получения образцов с $h = 4,3$ мм. В качестве упрочняющего фактора применялась перезакалка с температуры выше фазового превращения феррит/аустенит (850 °С).

Микроструктуру охарактеризовали с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100. Тонкие полоски для исследования методом ПЭМ были вырезаны из тонких срезов образцов. Затем толщина образцов была механически уменьшена до $0,15$ мм, далее проводили электрополировку для перфорации двойными струями с использованием электролитов на основе бутилового спирта. Поверхности разрушения изучали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390 (РЭМ) с ускоряющим напряжением 30 кВ. Микротвердость

измеряли на автоматическом микротвердомере Durascan.

2. Результаты исследования

Результаты исследования микроструктуры после проведения СТО представлены на рис. 1. В результате закалки образуется структура пакетного мартенсита с высокой плотностью дислокаций (рис.1, *a*). Высокотемпературный отпуск способствовал формированию карбидных частиц по всему объему материала (рис. 1, *б*). На изображениях микроструктуры (рис. 1, *б*) наблюдается различная морфология частиц: крупные частицы – карбиды типа $M_{23}C_6$, а мелкие частицы – МХ.

При увеличении степени деформации металла происходят изменения: образуется вытянутая бимодальная структура с поворотом зерна в направлении обработки. При достижении степени деформации происходит изменение положения грубых карбидов в структуре металла, частицы преимущественно располагаются вдоль границ зерен (рис. 2).

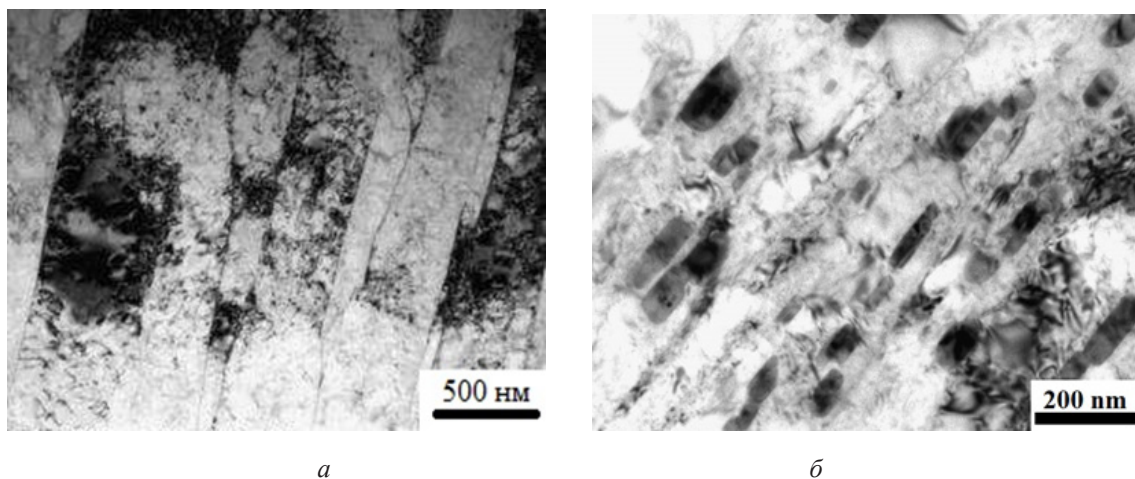


Рис. 1. Микроструктура стали ЭИ-961Ш после стандартной закалки (*a*) и отпуска (*б*)

Fig. 1. Microstructure of steel after oil quenching (*a*) and tempering (*б*)

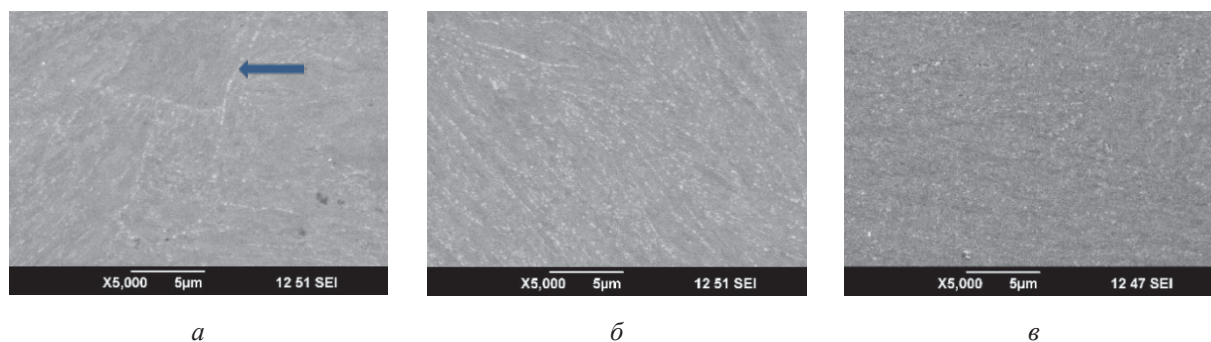


Рис. 2. Эволюция структуры стали ЭИ-961Ш при холодной деформации: *a* – 30%; *б* – 50%; *в* – 70%; *стрелкой* отмечено направление прокатки

Fig. 2. Evolution of the structure of steel EI-961SH under cold deformation: *a* – 30%; *б* – 50%; *в* – 70%; *the arrow* indicates the direction of rolling

ПЭМ изображения (рис. 3, *a*) характеризуются формированием полос со средней шириной пластин 200 ± 20 нм после прокатки. Также в структуре полос наблюдаются карбидные частицы. В результате перезакалки формируется более равноосная структура. Как можно увидеть из фотографий микроструктуры (рис. 3, *б*), перезакалка способствует изменению как размера частиц, так и их морфологии.

Изображения структуры, полученные в растровом электронном микроскопе для образцов, полученных прокаткой и перезакалкой представлены на рис. 4. После прокатки и перезакалки структура стали характеризуется зернами размеров 5 мкм для 30% и 2 мкм для 50%. При этом упрочняющие карбидные частицы Cr_{23}C_6 сохраняются в структуре, а также увеличивается доля глобулярных карбидов.

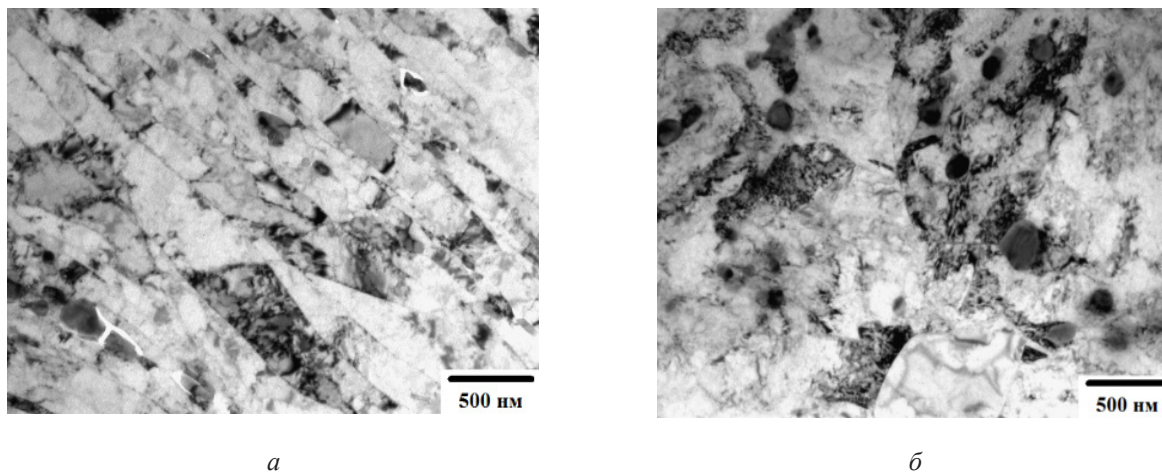


Рис. 3. Структура образцов, подвергнутых холодной прокатке: *a* – прокатка до деформации 70%; *б* – прокатка до деформации 70% и дополнительная перезакалка

Fig. 3. Structure of samples subjected to cold rolling: *a* – rolling up to 70% deformation; *б* – rolling up to 70% deformation and re-quenching

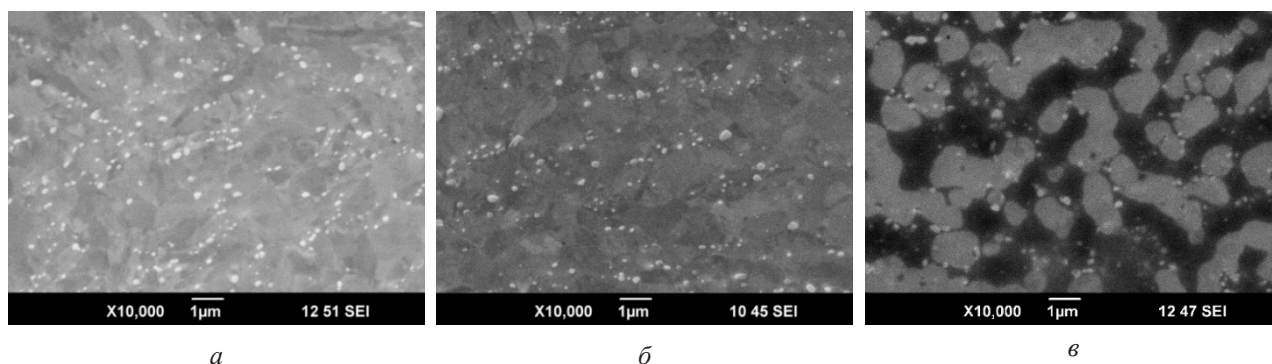


Рис. 4. Влияние переотжига на структуру стали ЭИ-961Ш после холодной прокатки на: *a* – 30 %; *б* – 50%; *в* – 70%. Изображение РЭМ во вторичных электронах

Fig. 4. The effect of re-tempering on the structure of steel EI-961SH after cold rolling by: *a* – 30%; *б* – 50%; *в* – 70%. SEM image in secondary electrons

Полосовая структура, сформированная в результате холодной прокатки на 50%, сохраняется после длительного отжига при температуре 600 °С в течение 100 часов. Как видно из рис. 5, ширина полос варьирует в диапазоне 100–350 нм, на темнопольном изображении (рис. 5, *б*) характерно строчное расположение карбидных частиц вдоль этих полос.

После длительного отжига при температуре 600 °С в течение 100 часов в струк-

туре образцов ХП50%+ПЗ отсутствуют наблюдаемые после переотжига многочисленные нано-двойники (рис. 6). Структура по-прежнему остается преимущественно полосовой, однако наблюдаются равноосные зерна, свободные от дислокаций со средним размером 1,5–2 мкм, свидетельствующие о начале процессов рекристаллизации. Размер частиц вторых фаз 100–150 нм, расположены как по границам зерен, так и в теле зерна.

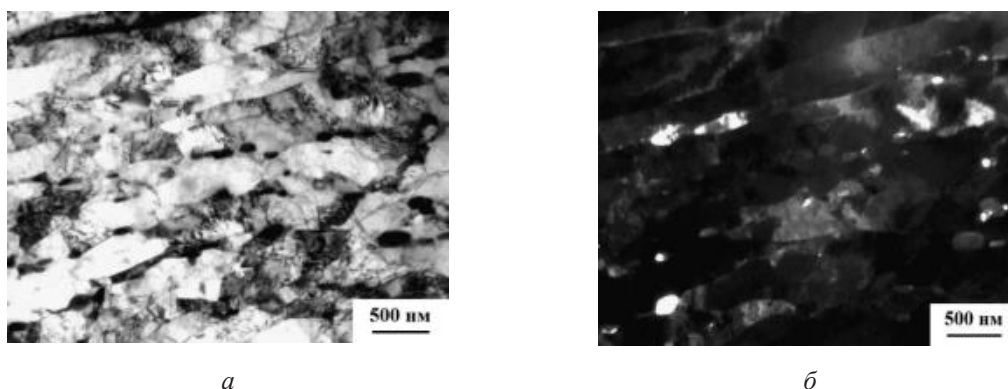


Рис. 5. Структура образцов стали ЭИ-961Ш после ХП50% и дополнительного отжига при температуре 600 °С в течение 100 часов: *a* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение

Fig. 5. Structure of steel samples EI-961SH after CR 50% and additional annealing at a temperature of 600 °С for 100 hours: *a* – bright-field image; *б* – dark-field image

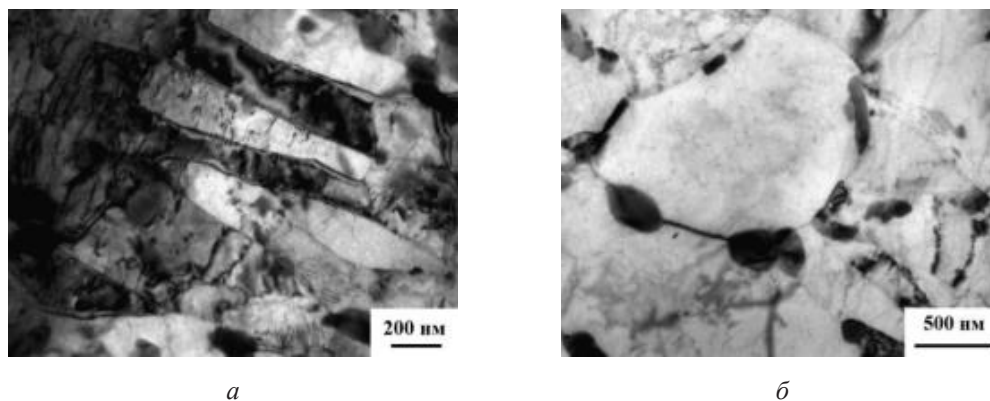


Рис. 6. Структура образцов стали ЭИ-961Ш после ХП50%+ПЗ, подвергнутых отжигу при температуре 600 °С в течение 100 часов:
а, б – светлопольное изображение

Fig. 6. Structure of steel samples EI-961SH after CR 50%+RQ, annealed at a temperature of 600 °C for 100 hours:
а, б – bright-field image

Измерения микротвердости после длительных отжигов при температуре 600 °С соответствуют представленным результатам

структурных исследований. Изменения значений микротвердости во всех образцах происходит в пределах погрешности (рис. 7).

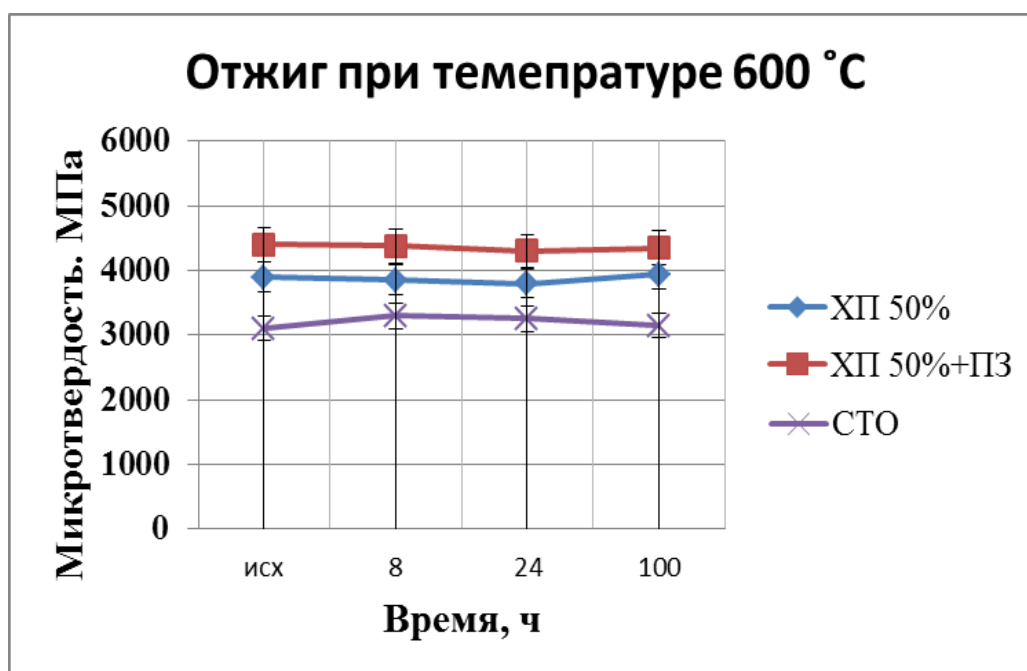


Рис. 7. Зависимость микротвердости образцов стали ЭИ-961Ш, от отжига при температуре 600 °С

Fig. 7. Dependence of microhardness of steel samples EI-961SH, on annealing at a temperature of 600 °C

Заключение

Согласно результатам исследования стабильности структуры ЭИ-961Ш после комплексной обработки можно сделать вывод о том, что длительные отжиги при температуре 600 °С приводят к некоторым микроструктурным изменениям. В образцах подвергнутых дополнительному деформационно-индуцированному мартенситному превращению (ХП50%+ПЗ) после 100 часов происходит уменьшение количества нанодвойников. В них начинающиеся процессы рекристаллизации, приводящие к формированию равноосных зерен, свободных от дислокаций. Размер и характер распределения частиц вторых фаз во всех состояниях остаются практически неизменным.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 0838-2020-0006 «Фундаментальные исследования новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».

This work was supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, project No. 0838-2020-0006 Fundamental study of new principles for the creation of promising electromechanical energy converters with characteristics above the world level, with increased efficiency and minimum specific indicators, using new highly efficient electrotechnical materials.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахова Я. Э., Янушкевич Ж. Ч., Беляков А. Н. Влияние холодной прокатки на структуру и механические свойства аустенитной коррозионностойкой стали 10X18H8ДЗБР // *Металлы*. 2012. № 5. С. 38–45.
2. Однобокова М. В., Беляков А. Н. Влияние холодной прокатки и последующего отжига на микроструктуру и микротекстуру аустенитных коррозионностойких сталей // *Деформация и разрушение материалов*. 2018. № 9. С. 23–32.
3. Kumpmann A., Guenther B., Kunze H.-D. Thermal stability of ultrafine-grained metals and alloys // *Materials Science and Engineering A*. 1993. V. 168, Iss. 2. P. 165–169. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90722-Q.
4. Lian J., Valiev R. Z., Baudalet B. On the enhanced grain growth in ultrafine grained metals // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. V. 43, No. 11. P. 4165–4170. DOI: 10.1016/0956-7151(95)00087-c.
5. Hidalgo J., Santofimia M. J., Effect of Prior Austenite Grain Size Refinement by Thermal Cycling on the Microstructural Features of As-Quenched Lath Martensite // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. V. 47. P. 5288-5301. DOI: 10.1007/s11661-016-3525-4.
6. Yaddu H. K., Shaw B. A., Sommers M. A. J. Effect of thermal cycling on martensitic transformation and mechanical strengthening of stainless steels – A phase-field study // *Mat. Sci. Eng. A*. 2017. V. 690. P. 1-5. DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.085.
7. Altenberger I., Scholtes B., Martin U., Oettel H. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304 // *Mater. Sci. Eng. A*. 1999. V. 264, Iss. 1-2. P. 1–16. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)01121-6.
8. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*. 2000. V. 45. P. 103–189. DOI: 10.1016/S0079-6425%2899%2900007-9.
9. Nikitina M., Islamgaliev R., Ganeev A., Sitdikov V. Microstructure and Fatigue of Ultrafine-Grained Ferritic/Martensitic Steel // *Adv. Eng. Mater.* 2020. V. 22, No. 10. Article number 2000034. DOI: 10.1002/adem.202000034.