

УДК 539.3/6:669.055(075.8)

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО ТВЕРДЕНИЯ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

АХМЕД СУНДУС МОХАММЕД, О. В. АКИМОВ, Е. А. КОСТИК*

Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА
*email: eklitus@gmail.com

АННОТАЦИЯ Целью данной работы является разработка нового дисперсионно-твердеющего сплава на основе железа. Исследования микроструктуры исследуемого сплава на основе железа подтвердили наличие дисперсных частиц. Наибольшее их скопление наблюдается по границам субзерен и зерен. В теле зерна наличие дисперсных частиц сводится к минимуму. С увеличением количества дисперсных частиц существенно меняется соотношение содержания железа и хрома, что связано с выделением карбидов хрома в процессе старения стали. Содержание химических элементов в исследуемой стали значительно изменяется в зависимости от их расположения. В теле зерна преобладает железная матрица и содержание таких легирующих элементов, как марганец и никель.

Ключевые слова: дисперсионное твердение; сплав на основе железа; старение; структура; химический состав

THE STUDY OF DISPERSION HARDENING OF THE IRON-BASED ALLOY

SUNDUS MOHAMMED AHMED, O. AKIMOV, K. KOSTYK*

Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The process of decomposition of supersaturated solid solutions and the allocation of excess phases occupy a special place among other phase transformations, as these processes occur during the final operations of heat treatment, forming the special properties of alloys. The aim of this work is to develop a new dispersion-hardened alloy based on iron. Material for study is the new dispersion-hardened alloy based on iron, which melting was carried out in a vacuum induction furnace. As received steel, the maximum hardening is observed after aging at 800 °C. Study of the microstructure confirmed the presence of dispersed particles. Their greatest accumulation observed in the boundaries of subgrains and grains, which is associated with a high degree of defectiveness of the crystal structure of these areas of the alloy. In the body of the grain the presence of the dispersed particles is minimized. The elemental composition of high-alloy austenitic heat resisting steels determined by energy dispersive registration line intensities of characteristic x-rays of the specimen, resulting from the irradiation of the microvolume of the sample in electron probe Spectragamescasino th at with the increase in the number of dispersed particles changes substantially the ratio of the content of iron and chromium, which is associated with the precipitation of chromium carbides during the aging process began. The content of chemical elements in the investigated steels varies considerably depending on their location. This is due to the accumulation of alloying elements and their chemical compounds in the dispersion particles. In the body of the grain is substantially dominated by the iron matrix and the content of such alloying elements as manganese and nickel.

Keywords: dispersion hardening; the iron-based alloy; aging; structure; chemical composition

Введение

Процессы распада пересыщенных твердых растворов и выделения избыточных фаз занимают особое место среди других фазовых превращений, поскольку именно эти процессы происходят во время заключительных операций термической обработки, формирующих особые свойства сплавов [1].

Состояние пересыщенного твердого раствора достигается обычно быстрым охлаждением, а именно закалкой сплава от температур, при которых компоненты сплава образуют твердый раствор [2].

Распад твердого раствора происходит в области температур устойчивого гетерогенного состояния, одновременно обеспечивающей достаточную диффузионную подвижность атомов компонентов сплава. Процессы распада дают возможность получать состояния сплавов с уникальными свойствами [3-5].

Большой интерес представляет процесс упрочнения – дисперсионное твердение. Особенность процессов распада твердых растворов во многих сплавах – разнообразие продуктов распада и структурных состояний [6].

Таким образом, разработка новых дисперсионно-твердеющих сплавов на основе железа и их изучение является актуальным вопросом.

Анализ литературных данных

Основные структурные изменения при старении сводятся к фазным этапам распада пересыщенного твердого раствора, полученного в результате закалки сплава.

Так как распад пересыщенного раствора является диффузионным процессом, то степень распада, тип выделений из раствора, их дисперсность, форма и другие структурные характеристики зависят

от температуры и продолжительности старения и, конечно, от природы сплава, его химического состава по основным компонентам [7-9].

Кроме того, на структуру состаренного сплава влияют примеси, температура нагрева и скорость охлаждения при закалке, пластическая деформация перед закалкой и после заковки (перед старением), продолжительность вылеживания закаленного сплава при комнатной температуре перед искусственным старением и многие другие факторы.

Зависимость структуры состаренного сплава от большого числа факторов и многостадийность процесса распада пересыщенного твердого раствора в сочетании с высокой дисперсностью выделений, особенно на начальных этапах распада, весьма осложняют изучение структурных изменений при старении [10].

Кроме того, полезные данные получают, изучая изменение механических и физических свойств, особенно электросопротивления, при старении. Это изучение свойств позволяет делать предположения, а в отдельных случаях и выводы о характере и последовательности структурных изменений, прежде всего на ранних стадиях распада раствора, когда возможности прямых структурных методов ограничены [8-10].

Цель работы

Целью данной работы является разработка нового дисперсионно-твердеющего сплава на основе железа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить структуру полученного сплава после старения;
- исследовать распределение химических элементов в разработанном сплаве на основе железа.

Материал и методика исследования

Материалом для исследования является новый дисперсионно-твердеющий сплав на основе железа, плавка которого была проведена в вакуумной индукционной печи типа ОКБ-862. Полученный сплав является высоколегированной аустенитной жаропрочной сталью, химический состав указан в табл. 1.

Механические испытания были проведены при комнатной температуре согласно ГОСТ 1497-84 на универсальной машине, соответствующей ГОСТ 28840-90. Испытаниям подвергались стандартные образцы для испытаний на одноосное растяжение при комнатной температуре, длина образцов составляла 100 мм. Значения прочностных характеристик сплава после заковки при температуре 1180 °С и старении 800 °С длительностью 10 часов с последующим охлаждением на воздухе приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Химический состав полученного сплава

Элемент	Содержание, %	Погрешность, %
Mn	5,50	± 0,03
Si	1,35	± 0,014
C	0,50	± 0,024
Cr	16,20	± 0,011
Ni	5,95	± 0,02
Co	1,80	± 0,04
Cu	1,85	± 0,017
V	1,10	± 0,017
Nb	0,50	± 0,042
Mo	0,85	± 0,05
P	0,045	± 0,006
S	0,010	± 0,0024
Fe	64,35	± 0,07

Таблица 2 – Механические характеристики сплава

σ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %
720	1140	30	34

Микроструктуру полученной стали исследовали методом на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И.

Обсуждение результатов

Легирование оказывает влияние на получаемые характеристики прочности стали при всех способах ее упрочнения, причем в каждом способе сказываются свои особенности этого влияния. Легирование исследуемой стали определенными элементами создает предпосылку для ее упрочнения либо непосредственно, либо (главным образом) за счет дисперсионного твердения, и в то же время способствует получению новых ценных свойств.

Основной недостаток дисперсионного твердения заключается в резком понижении характеристик пластичности и увеличении склонности к хрупкому разрушению. Дисперсионное твердение может быть использовано наиболее эффективно в сочетании с другими обработками, а именно:

1. В комбинации с наклепом. Наклеп, усиливая эффект дисперсионного твердения в направлении повышения прочности, в то же время приводит к измельчению зерна феррита, что уменьшает склонность стали к хрупкому разрушению. Такая комбинированная обработка может быть использована, например, для получения высокопрочного тонколистового материала, в котором наклеп легко достигается путем холодной прокатки или подкатки.

2. В сочетании с аустенитно-мартенситным превращением, в частности, как средство

дополнительного упрочнения сорбитной основной массы, в которой феррит имеет очень мелкое зерно. Последняя может быть получена либо в результате обычной мартенситной закалки и последующего отпуска, либо в результате нормализации стали со средним или несколько пониженным содержанием углерода. В обоих случаях при отпуске одновременно реализуется и эффект дисперсионного твердения.

Общим достоинством дисперсионного твердения как средства упрочнения стали по сравнению с обычной закалкой и отпуском является меньшая зависимость механических свойств от размеров сечения обрабатываемой заготовки. Это относится особенно к тем случаям, когда скорость разложения твердого раствора (упрочняющего элемента в железе) мала. В качестве упрочняющей фазы можно использовать стойкие карбиды, позволяющие получить существенное дополнительное упрочнение при отпуске.

В полученной стали максимальное твердение наблюдается после старения при 800 °С. Исследования микроструктуры (рис. 1) подтвердили наличие дисперсных частиц. Как и ожидалось, их наибольшее скопление наблюдается по границам субзерен (рис. 1, точка 1) и зерен (рис. 1, точка 2), что связано с высокой степенью дефектности кристаллического строения данных участков сплава. В теле зерна (рис. 1, точка 3) наличие дисперсных частиц сводится к минимуму, что характерно для всех дисперсионно-твердеющих сплавов.

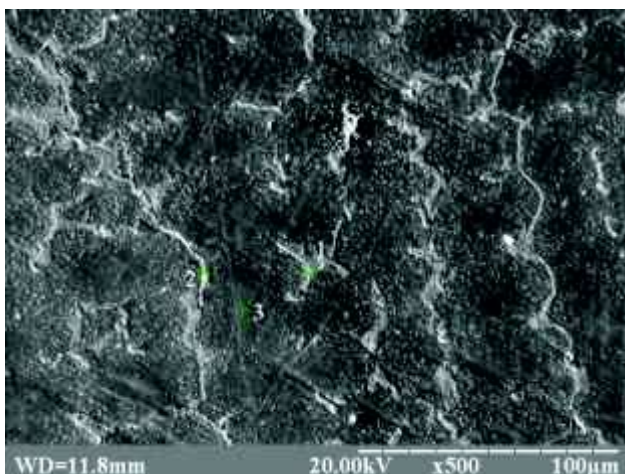


Рис. 1 – Электронная микроскопия исследуемой высоколегированной аустенитной жаропрочной стали

Элементный состав высоколегированной аустенитной жаропрочной стали определен энергодисперсионной регистрацией интенсивности линий характеристического рентгеновского излучения образца, возникающего в результате облучения микрообъема образца электронным зондом (рис. 2). Спектрограммы получены и для всех исследуемых точек, указанных на рис. 1. Анализ полученного

элементного состава представлен в виде круговых диаграмм на рис. 3.

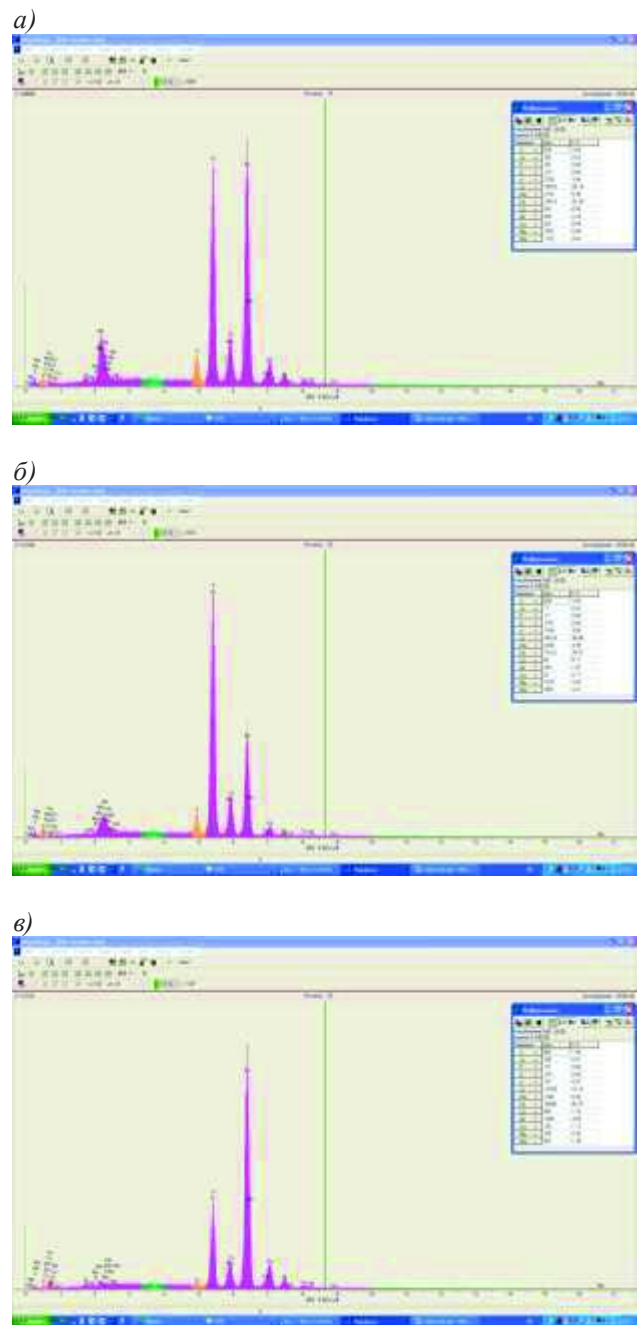


Рис. 2 – Интенсивность линий характеристического рентгеновского излучения: а) – в точке 1; б) – в точке 2; в) – в точке 3

Распределение химических элементов по границам субзерен, по границам зерен и в теле зерна в полученной стали показано на рис. 4.

С увеличением количества дисперсных частиц существенно меняется соотношение содержания железа и хрома, что связано с выделением карбидов хрома в процессе старения стали (рис. 5).

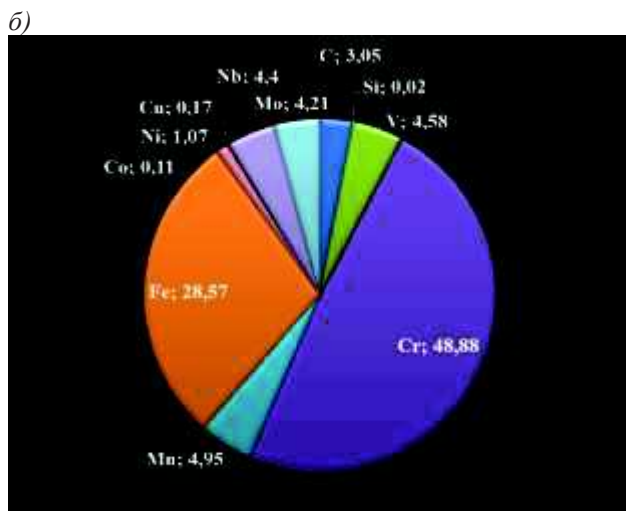
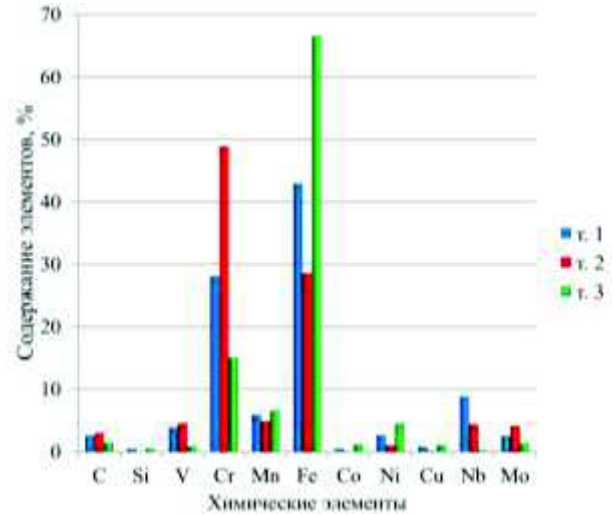
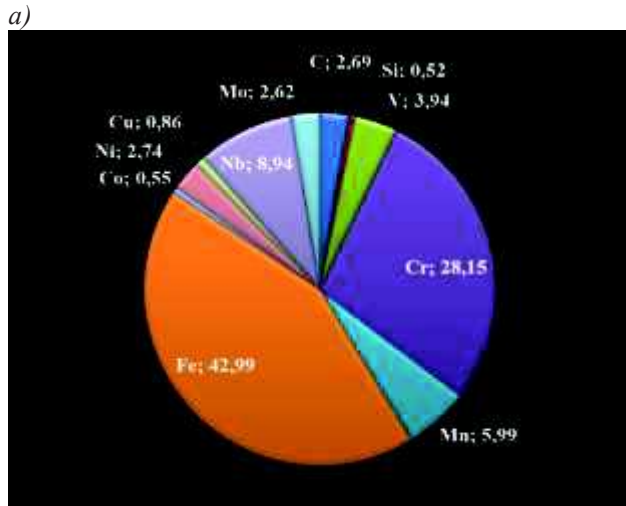


Рис. 4 – Распределение химических элементов по границам субзерен (т. 1), по границам зерен (т. 2), в теле зерна (т. 3) в полученной стали

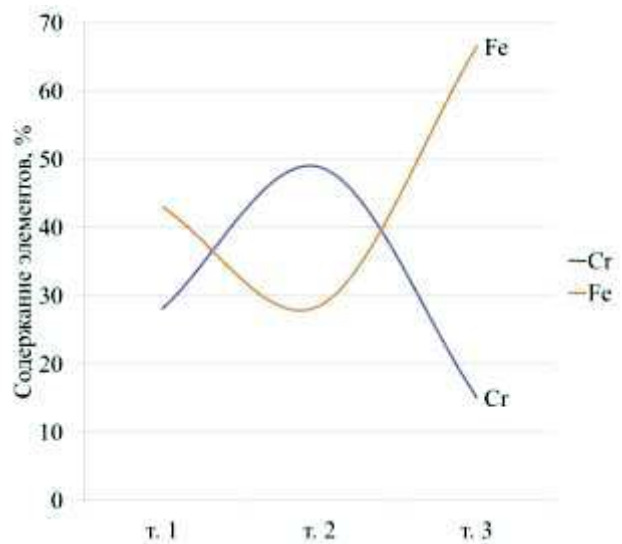


Рис. 5 – Изменение содержания железа и хрома в исследуемой стали в зависимости от их расположения

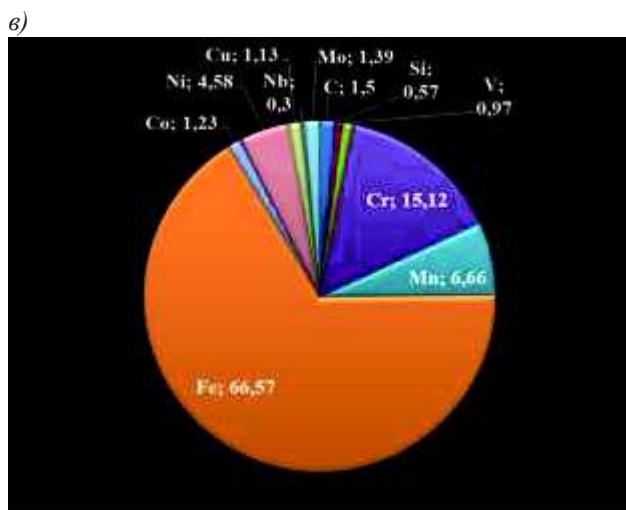


Рис. 3 – Содержание химических элементов в полученной стали, %: а) – в точке 1; б) – в точке 2; в) – в точке 3

Содержание химических элементов в исследуемой стали существенно изменяется в зависимости от их расположения. Это связано со скоплением легирующих элементов и их химических соединений в дисперсионных частицах. В теле зерна существенно преобладает железная матрица (рис. 5) и содержание таких легирующих элементов, как марганец и никель (рис. 6).

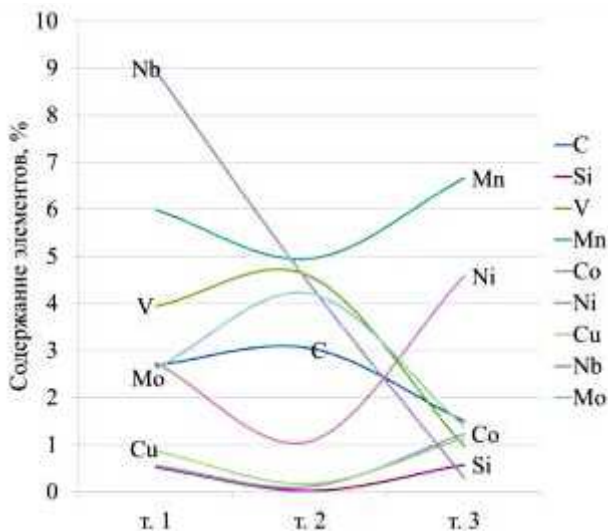


Рис. 6 – Изменение содержания химических элементов в исследуемой стали в зависимости от их расположения

Выводы

1. Исследования микроструктуры исследуемого сплава на основе железа подтвердили наличие дисперсных частиц. Наибольшее их скопление наблюдается по границам субзерен и зерен. В теле зерна наличие дисперсных частиц сводится к минимуму.

2. С увеличением количества дисперсных частиц существенно меняется соотношение содержания железа и хрома, что связано с выделением карбидов хрома в процессе старения стали.

3. Содержание химических элементов в исследуемой стали существенно изменяется в зависимости от их расположения.

4. В теле зерна существенно преобладает железная матрица и содержание таких легирующих элементов, как марганец и никель.

Список литературы

- 1 **Акимов, О. В.** Сплавы с эффектом памяти формы. История появления и развития, физика процесса их уникальных свойств / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Вісник Національного технічного університету*. – 2015. – № 14. – С. 42–49.
- 2 **Barbarino, S.** A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft / **S. Barbarino, E. I. Saavedra Flores, R. M. Ajaj, I. Dayyani, M. I. Friswell** // *Smart Mater. Struct.* – 2014. – № 23 (063001). – P. 1–19. – doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
- 3 **Акимов, О. В.** Влияние термической обработки на свойства нового сплава на основе железа / **О. В. Акимов, С. М. Нури Ахмед** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 6. – № 11 (78). – С. 35–40. – doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.
- 4 **Jani, J. M.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities / **J. M. Jani, M. Leary, A.**

- 5 **Subic, M. A. Gibson** // *Materials & Design*. – 2014. – № 56. – P. 1078–1113. – doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- 6 **Huang, S.** Optimisation of Ni–Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis / **S. Huang, Martin Leary, Tamer Attalla, K. Probst, A. Subic** // *Materials & Design*. – 2012. – № 35. – P. 655–663. – doi:10.1016/j.matdes.2011.09.043.
- 7 **Miyazaki, S.** Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys / **S. Miyazaki, H. Y. Kim, H. Hosoda** // *Mat Sci Eng a-Struct*. – 2006. – № 438. – P. 18–24. – doi:10.1016/j.msea.2006.02.054.
- 8 **Mereau, T. M.** Nitinol compression staples for bone fixation in foot surgery / **T. M. Mereau, T. C. Ford** // *Journal of the American Podiatric Medical Association*. – 2006. – № 96 (2). – P. 6–102. – doi:10.7547/0960102.
- 9 Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. (PDF). [Web] Retrieved on 2011-12-04: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>.
- 10 **Hartl, D. J.** Aerospace applications of shape memory alloys / **D. J. Hartl, D. C. Lagoudas** // *P I Mech Eng G-J Aer*. – 2007. – № 221 (G4). – P. 535–552. – doi:10.1243/09544100jaero211.
- 11 **Dilibal, S.** On the Volume Change in Co-Ni-Al during Pseudoelasticity / **S. Dilibal, H. Sehitoğlu, R. Hamilton, H. J. Maier, Y. Chumlyakov** // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – № 528. – P. 2875–2881.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Akimov, O. V., Nuri Ahmed S. M.** Splavy s efektom pamyati formy. Istoriya poyavleniya i razvitiya, fizika protsesa ih unikalnykh svoystv. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu*, 2015, 14, 42–49.
- 2 **Barbarino, S., Saavedra Flores, E. I., Ajaj, R. M., Dayyani, I., Friswell, M. I.** A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart Mater. Struct.*, 2014, 23(063001), 1–19, doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
- 3 **Akimov, O. V., Nuri Ahmed, S. M.** Vliyanie termicheskoy obrabotki na svoystva novogo splava na osnove zheleza. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, 6(11 (78)), 35–40, doi:10.15587/1729-4061.2015.56370.
- 4 **Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Materials & Design*, 2014, 56, 1078–1113, doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- 5 **Huang, S., Martin Leary, Tamer Attalla, K. Probst, A. Subic** Optimisation of Ni–Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis. *Materials & Design*, 2012, 35, 655–663, doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.043.
- 6 **Miyazaki, S., Kim, H. Y., Hosoda, H.** Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys. *Mat Sci Eng a-Struct*, 2006, 438, 18–24, doi:10.1016/j.msea.2006.02.054.
- 7 **Mereau, T. M., Ford, T. C.** Nitinol compression staples for bone fixation in foot surgery. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2006, 96 (2), 6–102. doi: 10.7547/0960102.
- 8 Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. (PDF). Retrieved on 2011-12-04: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>

- 9 **Hartl, D. J., Lagoudas, D. C.** Aerospace applications of shape memory alloys. *PI Mech Eng G-J Aer*, 2007, **221** (G4), 535–552, doi:10.1243/09544100jaero211.
- 10 **Dilibal, S., Sehitoglu, H., Hamilton, R., Maier, H. J., Chumlyakov, Y.** On the Volume Change in Co-Ni-Al during Pseudoelasticity. *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**, 2875–2881, doi:10.1016/j.msea.2010.12.056.

Сведения об авторах (About authors)

Ахмед Сундус Мохаммед – аспирант, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Ahmed Sundus Mohammed – PhD student, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Акимов Олег Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Oleg Akimov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Костик Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: eklitus@gmail.com.

Kateryna Kostyk – PhD of Technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: eklitus@gmail.com.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ахмед, С. М. Исследование дисперсионного твердения сплава на основе железа / **С. М. Ахмед, О. В. Акимов, Е. А. Костик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 11-16. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.02.

Please cite this article as:

Ahmed Sundus Mohammed, Akimov, O., Kostyk, K. The study of dispersion hardening of the iron-based alloy. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 11–16, doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.02.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ахмед, С. М. Дослідження дисперсійного твердіння сплаву на основі заліза / **С. М. Ахмед, О. В. Акімов, К. О. Костик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 11-16. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.02.

АНОТАЦІЯ Метою даної роботи є розробка нового дисперсійно-тверднучого сплаву на основі заліза. Дослідження мікроструктури досліджуваного сплаву на основі заліза підтвердили наявність дисперсних частинок. Найбільше їх скопчення спостерігається по границях субзен і зерен. У тілі зерна наявність дисперсних частинок зводиться до мінімуму. Із збільшенням кількості дисперсних частинок істотно змінюється співвідношення вмісту заліза і хрому, що пов'язано з виділенням карбідів хрому в процесі старіння сталі. Вміст хімічних елементів у досліджуваній сталі суттєво змінюється залежно від їх розташування. У тілі зерна переважає залізна матриця і зміст таких легувальних елементів, як марганець і нікель.

Ключові слова: дисперсійне твердіння; сплав на основі заліза; старіння; структура; хімічний склад.

Поступила (received) 11.12.2016