

Сундус Мохаммед Ахмед, О. В. Акимов, Е. А. Костик

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

## Особенности эксплуатационных свойств сплава на основе железа с эффектом памяти формы

*Целью данной работы является разработка нового сплава на основе железа с эффектом памяти формы, который содержит: железо, марганец, кремний, углерод, хром, никель, кобальт, медь, ванадий, ниобий, молибден, серу и фосфор. В работе рассмотрены окислительная стойкость и коррозионная стойкость сплава. Результаты исследований показали, что степень восстановления формы предложенного сплава составляет до 95%.*

**Ключевые слова:** сплав на основе железа, эффект памяти формы, окислительная стойкость, коррозионная стойкость.

**В**ведение. Одним из специальных свойств сплавов является эффект памяти формы, который широко применяют в различных областях техники, таких как спецмашиностроение, приборостроение, авиакосмическая техника, бытовая техника и др. [1]. При этом наибольшую популярность получили сплавы на основе Ti-Ni, которые применяют преимущественно в области медицины, благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных свойств [2]. Однако данный сплав достаточно дорогой и его применение в такой области, как машиностроение экономически не целесообразно. В связи с этим актуальными являются исследования, посвященные поиску и разработке новых сплавов с эффектом памяти формы, причем наибольший интерес для металлургии и машиностроения представляют сплавы на основе железа [3]. При разработке соответствующих сплавов необходимо учитывать соотношение высоких механических и эксплуатационных свойств с достаточными значениями коэффициента, характеризующего эффект памяти формы.

*Анализ литературных данных.* Анализ литературных данных показал, что наиболее дешевой группой сплавов с эффектом памяти формы являются сплавы на основе железа аустенитного класса. Одним из применений таких сплавов может быть использование в качестве силовых элементов для бесшовного соединения конструкций, трубопроводов высокого давления, использование в качестве упругих элементов и т. д. [4-6].

Существует целый ряд сплавов на основе железа с эффектом памяти формы, также данный эффект проявляется в некоторых известных сталях аустенитного класса [7]. Однако недостатками известных сплавов являются низкая коррозионная стойкость, например, из-за высокого содержания марганца, низкая окислительная стойкость, формирование хрупкой фазы, недостаточные показатели прочности и вязкости. Также основным недостатком данной группы сплавов – невысокая степень восстановления формы. Причиной перечисленных недостатков, главным образом, является химический состав сплава.

Сталь 4X15N7Г7Ф2МС [8] является жаропрочной высоколегированной сталью аустенитного класса,

которую используют в промышленности для изготовления лопаток газовых турбин, крепежных деталей, работающих при температуре 650 °С ограниченное время. Однако недостаток данной стали – недостаточное количество дисперсионно-твердеющих частиц, что влияет на прочность стали и низкие значения коэффициента эффекта памяти формы.

В частности, работа [9] посвящена сплаву на основе железа с эффектом памяти формы, недостатками этого сплава является низкая степень восстановления формы, а также невысокие механические свойства. Это обусловлено тем, что отсутствуют такие важные легирующие элементы, как медь, ванадий, ниобий, молибден. Также этот сплав имеет достаточно низкие коррозионную и окислительную стойкость, что негативно влияет на дальнейшую эксплуатацию изделия. Схожее обстоятельство отмечено в работе [10]. Еще один недостаток сплава – технологическая сложность и дороговизна получения. К тому же, в этой работе не указано наличие термической обработки.

Таким образом, результаты анализа литературных данных позволяют сделать вывод о том, что актуальным является создание сплава на основе железа, который сочетает в себе такие важные свойства, как высокая степень восстановления формы, прочность, вязкость, коррозионная стойкость и окислительная стойкость.

*Цель и задачи исследований.* Целью данной работы является разработка нового сплава на основе железа с эффектом памяти формы. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать механические и эксплуатационные свойства полученного сплава;
- определить степень восстановления формы полученного сплава.

*Обсуждение результатов.* Материалом для исследования является новый сплав на основе железа с эффектом памяти формы, который содержит: железо, марганец, кремний, углерод, хром, никель, кобальт, медь, ванадий, ниобий, молибден, серу и фосфор (весов. %): марганец – от 4 до 20; кремний – от 1,0 до 4,5; углерод – от 0,1 до 1,0; хром – от 10,0 до

25,0; никель – от 1,0 до 10,0; кобальт – от 1,0 до 10,0; медь – от 1,0 до 4,0; ванадий – от 0,5 до 2,0; ниобий – от 0,3 до 1,5; молибден – от 0,5 до 2,0; сера до 0,01; фосфор до 0,045; железо – остальное.

Установлено, что сплав обладает достаточными механическими характеристиками, подробно описанными в работе [11]. Визуальное исследование окалиностойкости заключалась в нагреве образцов до температур 600-1000 °С с шагом 50 °С на открытом воздухе и последующего осмотра поверхности. Результаты исследований показали, что при нагревании образцов в данном диапазоне температур окисления поверхности не наблюдалось.

Эксперимент на коррозионную стойкость сплава проводили весовым методом в 10%-ом растворе серной кислоты. В ходе проведения эксперимента на коррозионную стойкость сплава обнаружено, что сплав – коррозионностойкий и не склонен к изменению массы при выдержке в 10%-ом растворе серной кислоты.

Исследования микроструктуры подтвердили наличие дисперсионного твердения в сплаве после режимов старения, причем после второго режима обработки карбидных включений больше, чем после первого.

Также был произведен количественный фазовый анализ на наличие в сплаве остаточного аустенита с помощью рентгеновского аппарата ДРОН-3. Дифрактограмма сплава после закалки при температуре 1180 °С и охлаждения на воздухе показала всплеск, соответствующий  $\gamma$ -Fe, следовательно, содержание в сплаве аустенита остаточного – 100%. Для утонения образцов проводили горячую прокатку. Прокатка проходила в три этапа:

1. Нагрев до 500 °С и перековка в кузнице до толщины около 30 мм.

2. Нагрев до 800 °С, прокатка до толщины 2,7 мм.

3. Нагрев до 1190 °С, прокатка до толщины 2,0-2,1 мм.

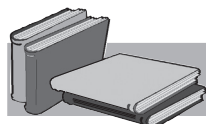
Свойства восстановления формы измерялись путем испытаний на растяжение образцов толщиной 2,0-2,1 мм и длиной 30 мм. Образцы были деформированы на 5% при комнатной температуре, а после этого – нагреты выше температуры обратного мартенситного превращения. Результаты исследований показали, что степень восстановления формы предложенного сплава составляет до 95%.

Таким образом, предложенный сплав имеет высокую степень восстановления формы при сохранении таких важных свойств, как прочность, вязкость, коррозионная и окалиностойкость.

## Выводы

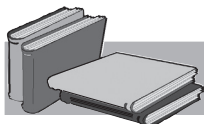
Установлено, что разработанный сплав на основе железа с эффектом памяти формы обладает достаточными механическими характеристиками. Результаты исследований показали, что при нагревании образцов в диапазоне температур 600-1000 °С окисления поверхности не наблюдалось.

В ходе проведения эксперимента на коррозионную стойкость сплава обнаружено, что сплав – коррозионностойкий и не склонен к изменению массы при выдержке в 10%-ом растворе серной кислоты. Установлено, что степень восстановления формы предложенного сплава составляет до 95% при сохранении таких важных свойств, как прочность, вязкость, коррозионная и окалиностойкость.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Huang S., Martin Leary, Tamer Attalla, Probst K, Subic A.* Optimisation of Ni-Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis // *Materials & Design*. – 2012. – № 35. – P. 655-663. DOI:10.1016/j.matdes.2011.09.043.
2. *Акимов О. В., Сундус М. Н.* Сплавы с эффектом памяти формы. История появления и развития, физика процесса их уникальных свойств // *Вісник Національного технічного університету*. – 2015. – № 14. – С. 42-49.
3. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.]; под ред. Х. Фунакубо. – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.
4. *Акимов О. В., Сундус Мохаммед Нури.* Влияние термической обработки на свойства нового сплава на основе железа // *ВЕЖПТ*. – 2015. – № 11 (78) С. 35-40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56370.
5. *Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A.* A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities // *Materials & Design*. – 2014. – № 56. – P. 1078-1113. DOI:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
6. *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). – P. 1-19. DOI:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
7. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: Стандартинформ. Введ. 01.01.2015. Изм. 18.07.2016. 49 с.
8. Пат. № 1617035 СССР. МПК7 C22C 38/14. Сплав на основе железа с эффектом памяти формы / Корорин В. В.; Гунько Л. П.; заявитель патентообладатель Институт металлофизики АН УССР. – № 4646348/31-02; заяв. 03.02.1989; опубл. 30.12.1990, Бюл. № 48.
9. Пат. 29209 Україна, МПК C22C 38/04. Сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми / Яковенко П. Г., Гаврилюк В. Г., Главацька Н. І., Уллакко Карі Мартті; № u98010516; заяв. 30.01.1998; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5.
10. *Ахмед С. М., Акимов О. В., Костик Е. А.* Исследование дисперсионного твердения сплава на основе железа // *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.



## REFERENCES

1. Huang S., Leary M., Atalla T., Probst K., Subic A. (2012). Optimisation of Ni-Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer, vol. 35, pp. 655-663. DOI:10.1016/j.matdes.2011.09.043 [in English].
2. Akimov O. V., Sundus M. N. (2015). Splavy s efektom pamiati formy. Istoriia poiavleniia i razvitiia, fizika protsessa ikh unikal'nykh svoistv [Alloys with shape memory effect. The history of the emergence and development and the physics of their unique properties]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu, no. 14 (1123), pp. 42-49 [in Russian].
3. K. Ootsuka et al. (1990). Splavy s efektom pamiati formy [Alloys with shape memory effect]. Pod red. Kh. Funakubo. Moscow: Metallurgiiia, 224 p. [in Russian].
4. Akimov O. V., Sundus M. N. (2015). Vliianie termicheskoi obrabotki na svoistva novogo splava na osnove zheleza [The effect of heat treatment on the properties of the new iron-base alloy]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, no. 11 (78). pp. 35-40. DOI:10.15587/1729-4061.2015.56370 [in Russian].
5. Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A. (2014). A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities, no. 56, pp. 1078-1113. DOI:10.1016/j.matdes.2013.11.084 [in English].
6. Barbarino S., Saavedra Flores E. I., Ajaj R. M., Dayyani I., Friswell M. I. (2014). A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft, no. 23 (063001), pp. 1-19. DOI:10.1088/0964-1726/23/6/063001 [in English].
7. GOST 5632-2014. Legirovannyye nerzhavieushchie stali i splavy korrozionnostoikie, zharostoikie i zharoprochnyye. Marki [The alloyed stainless steels and alloys corrosion resistant, heat-resistant and refractory. Brands]. Introduction: 01.01.2015, Moscow: Standartinform, 49 p. [in English].
8. Patent of USSR, no. 1617035, MPK C22C 38/14. Splav na osnove zheleza s efektom pamiati formy [Alloy on the basis of iron with a form memory effect]. Kororin V. V., Gunko L. P.; assignee: Ukrainian Academy of Sciences Institute of Metal, no. 4646348/31-02; filed 03.02.1989; published 30.12.1990, Bull. no. 48 [in Russian].
9. Patent of Ukraine 29209, MPK C22C 38/04. Splav na osnovi zaliza z efektom pam'iaty formy. [Alloy on the base of iron with the effect of shape memory]. Yakovenko P. G., Gavryliuk V. G., Glavat'ska N. I., Ullakko K. M., no. u98010516; zaiavl. 30.01.1998; opubl. 16.10.2000, Bull. no. 5 [in Ukrainian].
10. Akhmed S. M., Akimov O. V., Kostyk E. A. (2016). Issledovanie dispersionnogo tverdeniia splava na osnove zheleza [The study of dispersion hardening of the iron-based alloy]. Vestnik NTU KhPI, Seriya: Novye resheniia v sovremennykh tekhnologiiakh, Kharkov: NTU KhPI, no. 42 (1214), pp. 11-16. DOI:10.20998/2413-4295.2016.42.02 [in Russian].

### Анотація

Сундус Мохаммед Ахмед, Акімов О. В., Костик К. О.

Особливості експлуатаційних властивостей сплаву на основі заліза з ефектом пам'яті форми

Метою даної роботи є розробка нового сплаву на основі заліза з ефектом пам'яті форми, який містить: залізо, марганець, кремній, вуглець, хром, нікель, кобальт, мідь, ванадій, ніобій, молібден, сірку і фосфор. Розглянуто окислювальну стійкість і корозійну стійкість сплаву. Результати досліджень показали, що ступінь відновлення форми запропонованого сплаву становить до 95%.

### Ключові слова

Сплав на основі заліза, ефект пам'яті форми, окислювальна стійкість, корозійна стійкість.

### Summary

Ahmed Sundus Mohammed, Akimov O., Kostyk K.

Features of the operational properties of the iron-based alloy with a shape memory effect

The aim of this work is to develop a new iron-based alloy with shape memory effect, which contains: iron, manganese, silicon, carbon, chromium, nickel, cobalt, copper, vanadium, niobium, molybdenum, sulfur, and phosphorus. The paper considers scale resistance and corrosion resistance of the alloy. The results showed that the degree of shape recovery of the proposed alloy is 95%.

### Keywords

Iron-based alloy, shape memory effect, scale resistance, corrosion resistance.

Поступила 20.03.17