

УДК 539.3/6:669.055(075.8)

**Сундус Мохаммед Ахмед, О. В. Акимов, Е. А. Костик,  
А. А. Глотка\*, Н. В. Чечель\***

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков,

\*Запорожский национальный технический университет, Запорожье

## **УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ПЕРЕПЛАВКИ**

*Разработан химический состав сплава на основе железа с эффектом памяти формы с подробным обоснованием выбора каждого элемента. Показано, что переплавка сплава в вакуумной индукционной печи способствовала удалению литейных дефектов, полученных при плавке в индукционной печи и повышению эксплуатационных свойств сплава.*

**Ключевые слова:** сплавы с эффектом памяти формы, химический состав, эксплуатационные свойства.

*Розроблено хімічний склад сплаву на основі заліза з ефектом пам'яті форми з детальним обґрунтуванням вибору кожного елемента. Показано, що переплавлення сплаву у вакуумній індукційній печі сприяло видаленню ливарних дефектів, отриманих при плавці в індукційній печі і підвищенню експлуатаційних властивостей сплаву.*

**Ключові слова:** сплави з ефектом пам'яті форми, хімічний склад, експлуатаційні властивості.

*The chemical composition of the iron-based alloy with shape memory effect with a detailed justification for the selection each of item was developed. It is shown that the melting of alloy in vacuum induction furnace contributed to the removal of casting defects obtained during melting in the induction furnace and increasing the operational properties of the alloy.*

**Keywords:** alloys with shape memory effect, chemical composition, performance properties.

### *Введение*

Одним из направлений развития современной науки является разработка новых сплавов. Исходя из эксплуатационных требований, предъявляемых к деталям, сплав должен обладать теми или иными специальными свойствами. Достаточно большое внимание последнее время уделяется сплавам с эффектом памяти формы. Такие сплавы нашли широкое применение в различных областях техники (спецмашиностроение, приборостроение, авиакосмическая техника, бытовая техника и др.). При этом наибольшее распространение получили сплавы с памятью формы на основе Ti-Ni, применяемые преимущественно в области медицины, благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных свойств [1]. Однако, существует ряд нерешенных вопросов. Прежде всего, это значительная стоимость известных сплавов с эффектом памяти формы, а также недостаточный уровень механических свойств данных сплавов. Поэтому, на сегодняшний день, является актуальным заменить дорогостоящие составляющие химического состава сплава на более доступные с сохранением уникальных эксплуатационных свойств на высоком уровне.

### *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 методов применения таких сплавов могут быть силовые элементы для

бессварного соединения конструкций, трубопроводов высокого напряжения, использование в качестве упругих элементов и т. д. [2].

Существует целый ряд сплавов на основе железа с эффектом памяти формы, также данный эффект проявляется в некоторых известных сталях аустенитного класса. Однако, недостатками известных сплавов являются низкая коррозионная стойкость, например из-за высокого содержания марганца, низкая окалиностойкость, формирование хрупкой фазы, недостаточные показатели прочности и вязкости. Также существенным недостатком данной группы сплавов является невысокая степень восстановления формы. Причиной перечисленных недостатков, главным образом, является химический состав сплава [3]. Все это обусловило необходимость создания сплава на основе железа, который сочетает в себе такие важные свойства, как высокая степень восстановления формы, прочность, вязкость, коррозионная стойкость и окалиностойкость.

### *Цель и задачи исследований*

Целью данной работы является создание сплава на основе железа аустенитного класса, обладающего эффектом памяти формы с высокими значениями эксплуатационных свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать химический состав нового сплава;
- определить способ получения данного сплава;
- изучить эксплуатационные свойства сплава;
- определить наличие аустенита в данном сплаве.

### *Обсуждение результатов*

Поставленная задача решается тем, что сплав на основе железа с эффектом памяти формы содержит: марганец, кремний, азот, углерод, хром, никель, кобальт, а также он дополнительно содержит медь, ванадий, ниобий, молибден. Дополнительное легирование сплава кремнием приводит к уменьшению энергии дефекта упаковки аустенита и повышает его предел текучести, что положительно сказывается на свойствах памяти формы. Кроме этого, добавки кремния повышают коррозионную стойкость и окалиностойкость материала. Углерод является аустенитообразующим элементом и добавляется к сплавам с целью создания перед их деформацией аустенитной структуры. Кроме того, он укрепляет как аустенит, так и мартенсит, что также положительно влияет на свойства памяти формы. Марганец добавляется к сплаву как аустенитообразующий, а также как элемент, что повышает растворимость примесей внедрения в сплавах, которые в свою очередь являются аустенитообразующими, и, таким образом, обеспечивает аустенитное состояние сплава перед деформацией. Суть легирования хромом заключается в уменьшении энергии дефекта упаковки аустенита и улучшении коррозионной стойкости сплавов. Никель является очень сильным аустенитообразующим элементом и добавляется с целью создания аустенитной фазы, а также для улучшения коррозионной и окалиностойкости сплавов. Кобальт также способствует образованию аустенитной фазы и, кроме этого, улучшает горячую обрабатываемость сплавов. Легирование медью имеет цель создания условий для формирования аустенитной структуры сплавов и улучшения их коррозионной стойкости. Молибден уменьшает энергию дефекта упаковки аустенита и тем самым способствует формированию мартенсита при деформировании, а также улучшает окалиностойкость сплава. Ванадий и ниобий добавляются для повышения предела текучести сплавов и улучшения растворимости элементов внедрения в жидкой фазе сплавов. Одновременно их наличие в сплавах позволяет регулировать содержание углерода в твердом растворе методами термической обработки.

Таким образом, полученный сплав с обоснованным химическим составом является высоколегированной аустенитной жаропрочной сталью с карбидным упрочнением. Наибольшее содержание легирующего элемента – хрома (~16 %), поэтому данный сплав на основе железа также можно называть хромистой сталью.

Плавка сплава в индукционной печи типа ИТПЭ-0.06/0.1 ТГ 1 привела к появлению в сплаве литейных дефектов, которые в свою очередь негативно отразились на значениях эксплуатационных свойств [4]. Для устранения дефектов литья разработанного сплава в виде пор и для улучшения его свойств проводили переплавку данного сплава в вакуумной индукционной печи типа ОКБ-862, плавка – под вакуумом  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Раскисление для уменьшения содержания вредных примесей проводили алюминием. После плавки получали отливку высокого качества.

После переплавки был проверен химический состав сплава. В табл. 1 приведены химические составы сплавов при обычной индукционной плавке и после плавки в вакууме.

**Таблица 1. Химический состав полученного сплава**

Элемент	Обычная плавка, %	Вакуумная плавка, %	Погрешность, %
Mn	6,37	5,50	± 0,03
Si	1,35	1,35	± 0,014
C	0,53	0,50	±0,024
Cr	16,53	16,20	± 0,011
Ni	6,1	5,95	± 0,02
Co	1,92	1,80	±0,04
Cu	1,94	1,85	±0,017
V	1,13	1,10	±0,017
Nb	0,67	0,50	±0,042
Mo	0,91	0,85	± 0,05
P	0,05	0,045	± 0,006
S	0,012	0,010	± 0,0024
Fe	62,55	64,35	±0,07

Полученный сплав подвергали следующей термической обработке: отжиг при температуре 900 °С различной длительности в зависимости от размеров образцов; закалка при температуре 1180 °С (одноступенчатый подогрев при 800 °С в течение 10 минут непосредственно перед закалкой, закалка при 1180 °С различной длительности в зависимости от размеров образцов, охлаждение на воздухе) и старение по двум режимам: температура 1000 °С длительностью 1 час с последующим охлаждением на воздухе; температура 800 °С длительностью 10 часов с последующим охлаждением на воздухе.

Для первого режима старения характерно наличие большого количества карбидов ванадия, тогда как второму режиму соответствует преобладание карбидов хрома.

Механические испытания были проведены при комнатной температуре согласно ГОСТ 1497-84 на универсальной машине соответствующей ГОСТ 28840-90. Испытаниям подвергали стандартные образцы на одноосное растяжение при комнатной температуре, длина образцов составляла 100 мм. Для каждого режима термической обработки для определения механических характеристик исследовали 10 образцов.

Изменения значений прочностных характеристик сплава в зависимости от режимов термической обработки приведены в табл. 2.

Таким образом, режим термической обработки № 2 позволяет получить большие

Таблица 2. Механические характеристики сплава

Номер режима обработки сплава	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1	700	1110	20	24
2	720	1140	30	34

значения показателей прочности и пластичности, что связано с более интенсивным дисперсионным твердением сплава.

Визуальное исследование окалинстойкости заключалось в нагреве образцов до температур 600-1000 °С с шагом 50 °С на открытом воздухе и дальнейшем осмотре поверхности.

Результаты исследований показали, что при нагреве образцов в данном диапазоне температур окисление поверхности не наблюдали.

Эксперимент на коррозионную стойкость сплава проводили весовым методом в 10 %-ом растворе серной кислоты [5]. В ходе проведения эксперимента на коррозионную стойкость сплава обнаружено, что сплав коррозионностойкий и не подвержен изменению массы при выдержке в этом растворе.

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

Также был сделан количественный фазовый анализ на наличие в сплаве остаточного аустенита с помощью рентгеновского аппарата ДРОН-3 согласно стандартной методики [6, 7]. Дифрактограмма сплава после закалки при температуре 1180°С и охлаждении на воздухе показала всплеск, соответствующий  $\gamma$ -Fe, следовательно, содержание в сплаве аустенита остаточного – 100 %.

#### Выводы:

- Разработан химический состав сплава с подробным обоснованием выбора каждого элемента.
- Переплавка сплава в вакуумной индукционной печи типа ОКБ-862 способствовала удалению литейных дефектов, полученных при плавке в индукционной печи типа ИТПЭ-0.06/0.1 ТГ1, и повышению эксплуатационных свойств сплава.
- Определены механические свойства сплава. Показано, что сплав обладает высокой коррозионной стойкостью и окалинстойкостью.
- Рентгеноструктурным анализом подтвержден аустенитный класс данного сплава.



#### Список литературы

1. S. Huang, 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. – 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. Сахненко М. Д., Ведь М. Б., Ярошок Т. П. Основи теорії корозії та захисту металів : навч. посіб. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2005. – 240 с. Manisekaran, T., Kamaraj, M., Sharrif, S. M., Joshi, S. V. Slurry erosion studies on surface modified 13Cr-4Ni steels: Effect of angle of impingement and particle size // Journal of materials engineering and performance. – 2007. – Т. 16. – №. 5. – С. 567-572.
6. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ /– [2-е изд.]. – М. : Металлургия, 1970.– 368 с.
7. ASTM Card File (Diffraction Data Cards and Alphabetical and Grouped Numerical Index of X-ray Diffraction Date). – Philadelphia : Ed. ASTM. – 1969.



## References

1. Huang S., Leary Martin, Attalla Tamer, Probst K., Subic A. (2012). Optimisation of Ni–Ti shape memory alloy response time by transient heat transfer analysis. Materials & Design, № 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 pamiaty formy. Istoriia poiavleniia i razvitiia, fizika protsesa ikh unikalnykh svoistv. [Alloys with shape memory effect. The history of the emergence and development of the physics of the process of their unique properties]. Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu, № 14, pp. 4249. [in Russian].
3. Oocuka K. et al. (1990). Splavy s efektom pamiaty formy. [Alloys with shape memory]. (Ed. Kh. Funakubo). Moscow: Metallurgiiia, 224 p. [in Russian].
4. Akimov O. V., Sundus Mohammed Nuri. (2015). Vliianie termicheskoi obrabotki na svoistva novogo splava na osnove zheleza. [Effect of heat treatment on the properties of the new iron-based alloy]. VEZhPT, № 11 (78), pp.3540. DOI: 10.15587/17294061.2015.56370. [in Russian].
5. Sahnenko M. D., Ved' M. B., Yaroshok T. P. (2005). Osnovi teorii korozii ta zakhystu metaliv: navch. posib. [Basics of theory corrosion and protection of metals]. Kharkiv : NTU “HPI”, 240 p. [in Ukrainian].
6. Manisekaran T., Kamarai M., Sharrif S. M., Joshi S. V. (2007). Slurry erosion studies on surface modified 13Cr4Ni steels: Effect of angle of impingement and particle size. Journal of materials engineering and performance. Vol. 16, №. 5, pp. 567572. [in English].
7. Gorelik S. S., Rastorguev L. N., Skakov Yu. A. (1970). Rentgenograficheskii i elektronnoopticheskii analiz. [X-ray and electron-optical analysis]. (2d Ed.). Moscow: Metallurgiiia, 368 p. [in Russian].
8. ASTM Card File Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of X-ray diffraction date. Philadelphia: Ed. ASTM, 1969. [in English].

Поступила 18.09.2016