



Оригинальная статья

УДК 669.15-194

DOI 10.17073/0368-0797-2021-9-685-692



## ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ НА СТРУКТУРУ И ЖАРОСТОЙКОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

О. Ю. Шешуков, В. В. Катаев

■ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос влияния на структуру и жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов ввода в них ферросплавов, содержащих титан и цирконий. Теоретически и опытным путем доказано, что добавка 1,0 % (по массе) титана и 0,1 % (по массе) циркония в низкоуглеродистый железоалюминиевый расплав, содержащий 12 – 14 % (по массе) алюминия, измельчает его структуру, повышая временное сопротивление и жаростойкость. Титан и цирконий, сильные карбидообразующие элементы, при вводе в низкоуглеродистый железоалюминиевый сплав образуют большое количество центров кристаллизации, тем самым влияя на его микроструктуру. Это позволяет получить измельченное и более равноосное зерно по сравнению со сплавом без добавки, что в свою очередь повышает предел прочности обработанного сплава. Кроме того, использование титана в качестве модифицирующей добавки в низкоуглеродистый железоалюминиевый сплав позволяет повысить его жаростойкость, которая превышает в несколько раз жаростойкость известной хромоникелевой стали марки 20Х23Н18. Как итог, на основе исследования влияния модифицирующих добавок титана и циркония на структуру и жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов была разработана новая технология их получения.

**Ключевые слова:** железоалюминиевые сплавы, добавка титана и циркония, титансодержащий ферросплав, микроструктура, временное сопротивление, жаростойкость

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность за сотрудничество и помощь в подготовке данного материала сотрудникам Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук В.П. Ермаковой и В.Г. Смирновой.

**Финансирование:** Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН «Структурные физико-химические и механические свойства алюминиевых и медных сплавов и композитов конструкционного и электротехнического назначения» (№0396-2015-0078) с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

**Для цитирования:** Шешуков О.Ю., Катаев В.В. Влияние титана и циркония на структуру и жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 9. С. 685–692. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-685-692>

Original article

## INFLUENCE OF TITANIUM AND ZIRCONIUM ON STRUCTURE AND HEAT-RESISTANCE OF LOW-CARBON IRON-ALUMINIUM ALLOYS

O. Yu. Sheshukov, V. V. Kataev

■ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

**Abstract.** The paper considers the effect of introducing ferroalloys containing titanium and zirconium on the structure and heat-resistance of low-carbon ferroalloys. Theoretically and experimentally, it has been proven that addition of 1.0 mass. % of titanium and 0.1 mass. % of zirconium to a low-carbon iron-aluminum melt containing 12 – 14 mass. % of aluminum, grinds its structure increasing temporary resistance and heat-melting. Titanium and zirconium are strong carbide-forming elements. When introduced into a low-carbon iron-aluminium alloy, they form a large number of crystallization centers, thus affecting its microstructure, allowing to get shredded and more equal grain compared to an alloy without additive. This in turn increases the strength limit of processed alloy. In addition, the use of titanium as a modifying additive in a low-carbon ferroalloy allows increasing its heat-resistance, which exceeds several times the heat-resistance of famous chrome-nickel steel of 20Kh23N18 grade. As a result, a new technology for obtaining titanium and zirconium was developed based on research of the effect of their modifying additives on the structure and heat-resistance of low-carbon iron-aluminium alloys.

**Keywords:** iron-aluminium alloys, titanium and zirconium additive, titanium-containing ferroalloy, microstructure, temporary resistance, heat-resistance

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to V.P. Ermakova and V.G. Smirnova from the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for cooperation and assistance in preparation of this article.

**Funding:** The work was performed in accordance with the State task of IMET UB RAS “Structural physicochemical and mechanical properties of aluminum and copper alloys and composites for structural and electrical purposes” (No. 0396-2015-0078) using the equipment of the Ural-M Center for Collective Use.

**For citation:** Sheshukov O.Yu., Kataev V.V. Influence of titanium and zirconium on structure and heat-resistance of low-carbon iron-aluminium alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 9, pp. 685–692. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-685-692>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России производится большое количество специальных сталей и сплавов и спрос на них постоянно растет. Сплавы, обладающие высокой коррозионной и жаростойкостью, содержат в своем составе, как правило, дорогостоящие и дефицитные легирующие элементы, такие как хром, никель, титан и другие. Порой экономически не всегда рационально использовать в промышленности такие дорогие сплавы со специальными свойствами. Поэтому существует необходимость уделить внимание недорогим сплавам железа с алюминием, которые обладают хорошими потребительскими качествами.

Жаростойкие хромоникелевые стали в промышленности имеют очень широкую сферу применения. Все конструкции, трубопроводы, узлы и детали машин, работающие в агрессивных средах, а также в условиях высоких температур, изготавливаются именно из такого типа сталей. Однако в России с 2010 по 2020 г. производство хромоникелевых сталей снизилось в 1,2 раза (с 94,1 до 78 тыс. т). Это падение ниже уровня ее производства в 1990 г. почти в 10 раз (810 тыс. т). Производство данного сортамента сталей столкнулось с проблемой дефицита таких дорогостоящих легирующих элементов, как хром и никель, которые вводятся в их состав в количестве 20 – 40 %. Кроме того, потребность в хроме и никеле при производстве таких сталей достаточно велика [1, 2].

Альтернативой хромоникелевым сталям могут служить железоалюминиевые сплавы, которые сегодня широко используются в промышленности в качестве раскислителей. На сегодня известен ряд разработок в данной области [3, 4]. Принимая во внимание тот факт, что они также обладают хорошей коррозионной и жаростойкостью, стойкостью к агрессивным средам, а также меньшим, чем хромоникелевые стали, удельным весом и стоимостью, в промышленности имеется потребность в таких сплавах в качестве конструктивных материалов.

Как известно, предел прочности железоалюминиевых сплавов довольно высок, что нельзя сказать об их пластических свойствах. Это объясняется тем, что в соответствии с диаграммой состояния системы Fe–Al в интервале содержания Al от 10 до 20 % (по массе) образуется соединение  $\text{Fe}_3\text{Al}$ , обладающее атомной структурой типа  $\text{DO}_3$ , которая характеризуется упорядоченностью атомов в твердых растворах [5]. В зависимости от состава в интервале температур от 800 до

1200 °C в этих сплавах могут присутствовать менее упорядоченные структуры типа  $\text{B}_2$ . Структура типа  $\text{DO}_3$  в сплавах  $\text{Fe}_3\text{Al}$  существует только до температуры 552 °C. При превышении этой температуры сплавы могут иметь только структуру  $\text{B}_2$ . Данная температура может быть изменена при введении легирующих добавок (Ti, Mo, Cr, Si и В). В соответствии с диаграммой состояния, двухфазные области, содержащие  $\alpha + \text{Fe}_3\text{Al}$  (ниже 552 °C) и  $\alpha + \text{FeAl}$  (выше 552 °C) существуют в диапазоне состава 10 – 16 % (по массе) Al. Чтобы избежать образования неупорядоченных интерметаллидов  $\text{Fe}_3\text{Al}$ , содержание около 14 % (по массе) Al оптимально. Кроме того, сплавы типа  $\text{Fe}_3\text{Al}$  могут проявлять повышенную жаростойкость при температуре выше 650 °C. Поднять показатель жаростойкости возможно также за счет введения легирующих добавок, которые расширяют температурные границы.

Известны способы повлиять на прочностные свойства данного вида сплавов добавками молибдена, РЗМ и других элементов [6 – 13]. Но все они технологически сложны и материально затратны. Тем не менее, имеется возможность повлиять на свойства сплавов, изменяя их структуру путем ввода в состав небольшого количества специальных модифицирующих добавок, например, титана и циркония.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов была использована индукционная среднечастотная печь ИП-15 мощностью 15 кВт. Выплавку сплавов проводили в алундовых тиглях в печи емкостью около 0,5 кг. Контроль температуры производился инфракрасным термометром марки СЕМ ДТ-8868Н с пределом измерений 1850 °C. В качестве металлической части шихты использовали гранулированный алюминий марки ЧДА и низкоуглеродистую сталь 10880 (Э). Количество шихтовых материалов на плавку рассчитывалось таким образом, чтобы получить в готовом сплаве от 10 до 18 % (по массе) Al.

После достижения расплавом металла необходимой температуры производилась изотермическая выдержка в течение 5 мин, затем металл выливали в прогретую до 200 °C разъемную графитовую изложницу. Для снятия напряжений слитки помещали в камерную электрическую печь сопротивления КО-14 с воздушной атмосферой, выдерживали 1 ч при температуре 1000 °C и охлаждали с печью. Из охлажденных слитков, имеющих вид цилиндрического столбика диаметром 15 мм

и высотой 120 мм, на токарном станке вытачивали образцы для механических испытаний, из которых в дальнейшем были изготовлены микрошлифы для металлографического анализа.

Образцы на растяжение испытаны в соответствии с методикой на универсальной разрывной машине Zwick BT1-FRO050THW.A1K с усилием 50 кН и скоростью перемещения захватов 2 мм/мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работе [14] были исследованы механические и жаростойкие свойства сплавов системы Fe–Al–C. В них рассмотрено влияние на механические свойства сплавов количества так называемой K-фазы Fe<sub>3</sub>(Al, C). Показано, что ее частицы служат центрами кристаллизации, и управляя количеством данной фазы можно повлиять на структуру и свойства сплавов. Таким образом в данной системе, содержащей около 14 % (по массе) Al, при соблюдении определенной технологии выплавки K-фаза способствует измельчению зерна и через структуру повышает пластичность, не ухудшая прочностных свойств сплавов. Улучшенная обрабатываемость слитков позволяет производить токарную обработку.

В низкоуглеродистых сплавах системы Fe–Al K-фаза отсутствует. В работах [15, 16] исследовано влияние содержания алюминия в железоалюминиевом сплаве на его временное сопротивление. Испытания на разрывной машине показали, что средняя величина временного сопротивления  $\sigma_b$  для сплава, содержащего более 10 % (по массе) Al, составляет не более 100 – 150 МПа. Введение в расплав алюмосодержащей части алюминия в гранулированном виде, либо в виде сечки алюминия в количестве, позволяющем получать в готовом сплаве, % (по массе): 12 – 16 Al, 0,05 – 0,1 С и 0,9 – 1,2 Ti, обеспечивает показатель временного сопротивления  $\sigma_b$  сплава на уровне 300 МПа.

Результаты измерений временного сопротивления исследуемых образцов низкоуглеродистых жаростойких железоалюминиевых сплавов в зависимости от содержания в них алюминия определялись опытным путем и приведены на рис. 1. Из полученной зависимости следует, что прочность выше 200 МПа соответствует содержанию алюминия на уровне 12 – 14 % (по массе).

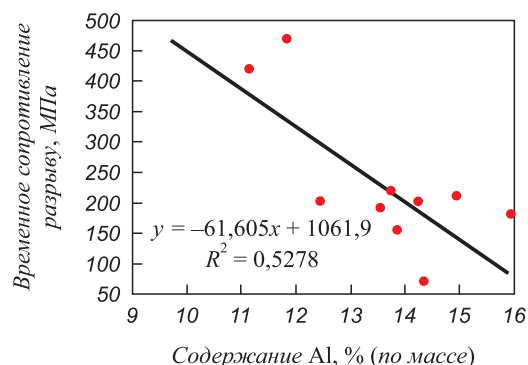


Рис. 1. Влияние содержания алюминия на временное сопротивление Fe–Al сплава

Fig. 1. Effect of aluminium content on temporary resistance of Fe–Al alloy

В работе [17] авторами было показано влияние добавок титана и циркония на зеренную структуру литых железоалюминиевых сплавов, содержащих 12 % (по массе) Al.

Выбор в качестве модифицирующих добавок титана и циркония основан на том, что они, будучи сильными карбидообразующими элементами, образуют в расплаве прочные дисперсные карбиды, которые, в свою очередь, являются центрами кристаллизации [18]. Этим объясняется более мелкая зеренная микроструктура литых железоалюминиевых сплавов с добавками титана и циркония в отличие сплавов без добавок. Так, для определения влияния на структуру, а, следовательно, и прочностные свойства Fe–Al сплавов небольших добавок титана и циркония были исследованы добавки модификаторов, химический состав которых приведен в табл. 1.

В табл. 2 приведен средний химический состав серии полученных железоалюминиевых сплавов как без модифицирования, так и после модифицирования титаном, цирконием и совместно титаном и цирконием.

Далее была исследована микроструктура немодифицированного и модифицированных железоалюминиевых сплавов в соответствии с табл. 2. Для указанных четырех сплавов их микроструктура приведена на рис. 2.

Из анализа микроструктур немодифицированного и модифицированных железоалюминиевых спла-

Таблица 1

### Химический состав исследованных модификаторов

Table 1. Chemical composition of the studied modifiers

| Модификатор | Состав, % (по массе) |      |    |      |     |    |      |      |    |    |    |
|-------------|----------------------|------|----|------|-----|----|------|------|----|----|----|
|             | C                    | Zr   | Mg | Al   | Si  | Ca | Ti   | Fe   | Ba | La | Ce |
| ФТi30       | 0,1                  | –    | –  | 11,8 | 5,2 | –  | 30,1 | ост. | –  | –  | –  |
| Цирконий    | –                    | 99,8 | –  | –    | –   | –  | –    | –    | –  | –  | –  |

Химический состав железоалюминиевых сплавов после модифицирования

Table 2. Chemical composition of iron-aluminium alloys after modification

| Сплав | Тип модификатора | Содержание, % (по массе) |      |     |     |     |    |    |    |      |
|-------|------------------|--------------------------|------|-----|-----|-----|----|----|----|------|
|       |                  | C                        | Al   | Ti  | Zr  | Si  | Ce | La | Ba | Fe   |
| 1     | Без модификатора | 0,01                     | 11,8 | –   | –   | 0,2 | –  | –  | –  | ост. |
| 2     | Zr               | 0,01                     | 11,5 | –   | 0,3 | 0,3 | –  | –  | –  |      |
| 3     | ФТi30            | 0,01                     | 13,7 | 1,2 | 0,1 | 0,6 | –  | –  | –  |      |
| 4     | ФТi30 + Zr       | 0,01                     | 12,9 | 1,1 | 0,3 | 0,4 | –  | –  | –  |      |

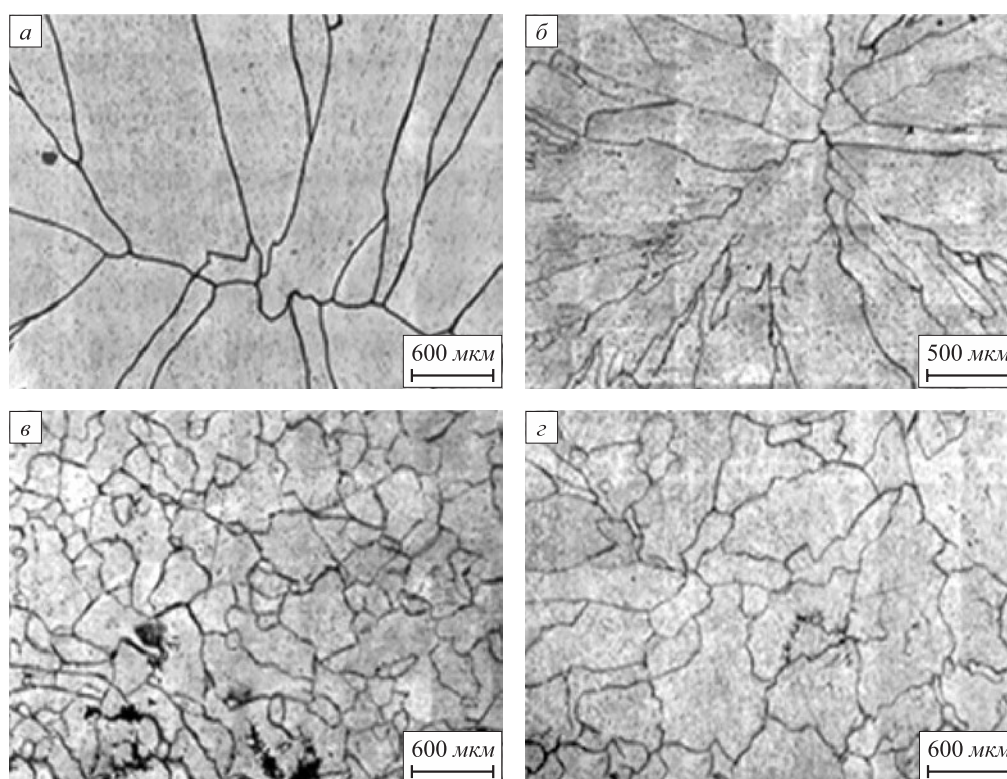


Рис. 2. Микроструктура немодифицированного и модифицированных железоалюминиевых сплавов:  
а – сплав 1; б – сплав 2; в – сплав 3; г – сплав 4

Fig. 2. Microstructure of unmodified and modified iron-aluminum alloys:  
а – alloy 1; б – alloy 2; в – alloy 3; г – alloy 4

вов видно, что у модифицированного титаном сплава (сплав 3) зерно более мелкодисперсно и равноосно. Это позволило сделать предположение, что модифицирование титаном улучшает не только микроструктуру, но и прочностные свойства низкоуглеродистого железоалюминиевого сплава.

Таким образом, введение в железистую основу алюминия и титансодержащей лигатуры под слой легкоплавкого шлака позволяет получить измельченную плотную и однородную микроструктуру сплава и соответственно улучшить его прочностные свойства. Это подтверждено определением механических свойств шести образцов сплава, выплавленного по

разработанной авторами технологии, подробно описанной в работе [19]. На данный способ получения жаростойкого низкоуглеродистого железоалюминиевого сплава авторами 25.11.2020 г. подана в Федеральный институт промышленной собственности заявка № 2020138808.

В соответствии с новой технологией после расплавления шихтовых составляющих под слоем шлака, представляющего из себя смесь оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ , производилась доводка расплава до температуры  $1580^\circ\text{C}$  и изотермическая выдержка металла в течение 5 – 10 мин и последующая разливка металла. Разливка проводилась в песчаную форму в виде

пластин размером 15×150×200 мм, одну из которых впоследствии способом гидроабразивной резки разрезали на полоски размером 15×15×150 мм для токарной обработки образцов для механических испытаний. Изготовленные образцы сплава в количестве 6 шт. протачивались до необходимых по ГОСТ 1497-84 размеров. Химический состав полученного сплава приведен в табл. 3.

На универсальной разрывной машине определено временное сопротивление шести опытных образцов по стандартной методике [20]. Результаты испытаний приведены на рис. 3. Шесть кривых – это шесть зависимостей удлинения испытуемых образцов от уровня приложенной к ним стандартной силы. Анализ данных показал, что величина временного сопротивления всех образцов в основном составляет 200 – 300 МПа.

Помимо влияния на микроструктуру и прочностные свойства, далее авторами было проведено исследование воздействия описанных выше добавок на жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов.

Ранее авторами было показано [16], что вводом специально подготовленных лигатур, а также титана и циркония, можно повысить жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов из-за образования на их поверхности оксидных пленок

Таблица 3

Химический состав нового сплава

Table 3. Chemical composition of the resulting alloy

| Материал                             | Al    | C     | Si   | Ti   | Mn   |
|--------------------------------------|-------|-------|------|------|------|
| Жаростойкий железо-алюминиевый сплав | 13,40 | 0,012 | 0,35 | 0,96 | 0,15 |

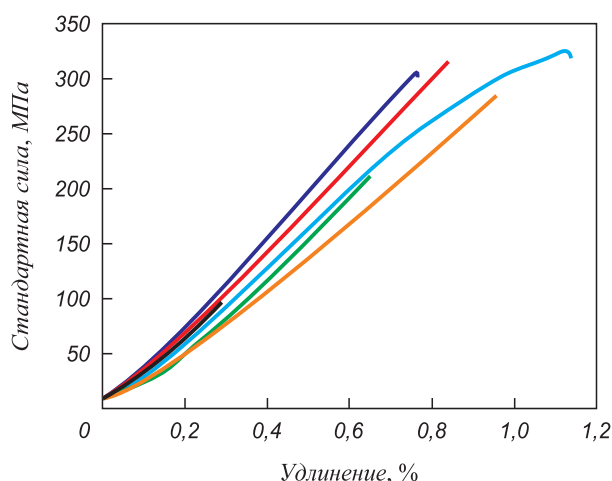


Рис. 3. Результаты механических испытаний выплавленных образцов нового сплава

Fig. 3. Results of mechanical tests of smelted samples from the new alloy

сложного состава. Опытным путем определен показатель жаростойкости четырех низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов, модифицированных титаном и цирконием в разных вариантах. Их химический состав для исследования на жаростойкость приведен в табл. 4.

Исследование жаростойкости опытных сплавов проводилось по ГОСТ 6130-71 [21] путем нагрева образцов металла до температуры 1000 °С со взвешиванием их после выемки из печи и охлаждения до комнатной температуры через каждые 50 ч до суммарной продолжительности 200 ч. Результаты приведены на рис. 4.

Сравнение показателей жаростойкости Fe–Al сплавов и известного жаростойкого сплава 20Х23Н18 показало, что увеличение его массы (по справочным данным [22]) и немодифицированного железоалюминиевого сплава, содержащего 13,8 % (по массе) Al, при окислении при 1000 °С в течение 200 ч практически не отличается и составляет 0,02 мг/(см<sup>2</sup>·ч).

Все другие модифицированные Fe–Al сплавы имеют показатель жаростойкости даже выше, чем у сплава

Таблица 4

Химический состав исследованных на жаростойкость сплавов

Table 4. Chemical composition of the alloys tested on heat-resistance

| Модификатор      | Номер сплава | C    | Si  | Al   | Ti   | Zr   |
|------------------|--------------|------|-----|------|------|------|
| Без модификатора | 20           | 0,02 | 0,4 | 13,8 | –    | –    |
| ФТi30            | 21           | 0,08 | 0,4 | 13,3 | 0,87 | –    |
| Zr               | 22           | 0,09 | 0,3 | 14,6 | –    | 0,22 |
| ФТi30 + Zr       | 23           | 0,20 | 0,3 | 13,9 | 0,90 | 0,20 |

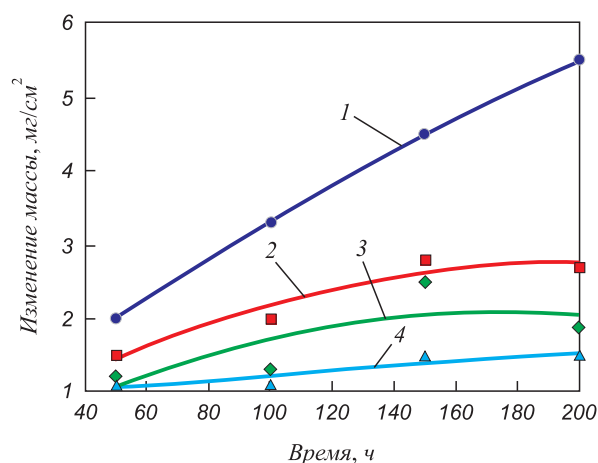


Рис. 4. Показатели жаростойкости сплавов 20 (1), 21 (2), 22 (3), 23 (4)

Fig. 4. Heat-resistance of 20 (1), 21 (2), 22 (3), 23 (4) alloys

Таблица 5

**Показатели жаростойкости стали 20X23N18  
и нового сплава**

**Table 5. Heat-resistance indicators of 20Kh23N18 steel  
and of the new alloy**

| Сплав                        | Темпера-<br>тура<br>окисле-<br>ния, °С | Увеличение<br>массы,<br>мг/(см <sup>2</sup> ·ч) | Уменьшение<br>массы,<br>мг/(см <sup>2</sup> ·ч) |
|------------------------------|--|---|---|
| 20X23N18<br>(ГОСТ 5632-2014) | 1000                                   | 0,020   | –   |
| Жаростойкий<br>сплав         | 1000                                   | 0,006   | –   |

20X23N18. Причем в сплавах с более высоким содержанием алюминия, % (по массе): сплав 23 – 13,9 и сплав 22 – 14,6 жаростойкость несколько выше, чем у сплава, содержащего 13,3 % (по массе) Al (сплав 21).

Наивысшую жаростойкость (0,006 мг/(см<sup>2</sup>·ч)) показал Fe–Al сплав 23 с 13,9 % (по массе) Al, который был легирован титаном совместно с цирконием. Сплавы 22 и 23 имеют сопоставимую жаростойкость. Принимая во внимание стоимость использованных модификаторов, практическую значимость имеет получение сплава 22, модифицированного титаном.

В табл. 5 приведены сравнительные показатели жаростойкости по справочным данным для стали 20X23N18 и нового сплава при 1000 °С.

**Выводы**

Путем ввода в низкоуглеродистый железоалюминиевый сплав добавки титана можно повлиять на его микроструктуру, получив измельченное и более равноосное зерно по сравнению со сплавом без добавки, что в свою очередь повышает предел прочности обработанного сплава.

Использование титана в качестве модифицирующей добавки в низкоуглеродистый железоалюминиевый сплав позволяет повысить его жаростойкость, превышающую жаростойкость известной хромоникелевой стали марки 20X23N18.

Исследования показали, что использование циркония как отдельно, так и совместно с титаном в качестве модифицирующей добавки в низкоуглеродистый железоалюминиевый сплав еще в большей степени позволяет повысить его жаростойкость. Но с практической и экономической точек зрения предпочтительнее использование титана.

На основе исследования влияния модифицирующих добавок титана и циркония на структуру и жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов разработана новая технология их получения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

**REFERENCES**

1. Чернобровкин В.П. Сырьевая безопасность черной металлургии России. Челябинск, 2011. 81 с.
2. Мюльгес К. От атома до автомобиля // Черные металлы. 2015. № 8. С. 53–55.
3. Пат. 2487950 RU. Способ получения алюминиевого чугуна с компактными включениями графита / Бикулов Р.А., Сафонов Н.Н.; заявл. 13.04.2012; опубл. 20.07.2013. Бюл. № 20.
4. Пат. 2590772 RU. Способ получения алюминиевого чугуна / В.В. Катаев, О.Ю. Шешуков, В.П. Ермакова, В.Г. Смирнова, Л.А. Маршук; заявл. 09.04.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.
5. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. Диаграммы состояния двойных многокомпонентных систем на основе железа. М.: Металлургия, 1986. 189 с.
6. La P.Q., Lu X.F., Yang Y., Wei Y.P., Zhao Y., Cheng C.J. Effect of Mo on microstructure and mechanical properties of bulk nanocrystalline Fe<sub>3</sub>Al materials prepared by aluminothermy reaction // Materials Science and Technology. 2011. Vol. 27. No. 8. P. 1303–1308. <https://doi.org/10.1179/026708310X12738371693094>
7. Shankar Rao V., Raja V.S., Baligidad R.G. Effect of carbon on the long-term oxidation behavior of Fe<sub>3</sub>Al iron aluminides // Oxidation of Metals. 2002. Vol. 57. No. 5/6. P. 449–470. <http://doi.org/10.1023/A:1015348320981>
8. Sun Y.F., Lv Y.Z., Zhang Y., Zhao J.Y., Wu Y. Microstructural and properties evolution of austenitic heat resistant steel after addition of aluminium // Materials Science and Technology. 2013. Vol. 29. No. 5. P. 511–516. <http://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000177>
9. Li C.A., Xiong J., Sun L., Liao Z., Peng M.C. Effect of Si content in hot dipping aluminium bath on Al–Fe bonding layer of aluminium

1. Chernobrovkin V.P. Raw Security of the Russian Steel Industry. Chelyabinsk: 2011, 81 p. (In Russ.).
2. Myul'ges K. From an atom to a car. *Chernye metalli*. 2015, no. 8, pp. 53–55. (In Russ.).
3. Bikulov R.A., Safronov N.N. Method of obtaining aluminium cast iron with compact graphite inclusions. Patent RF no. 2487950. *Byulleten' izobretenii*. 2013, no. 20. (In Russ.).
4. Kataev V.V., Sheshukov O.Y., Ermakova V.P., Smirnova V.G., Marshuk L.A. Method of obtaining aluminium cast iron. Patent RF no 2590772. MPK C21C 1/10. *Byulleten' izobretenii*. 2016, no. 19. (In Russ.).
5. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisova S.P. State Diagrams of Double Multicomponent Iron-Based Systems. Moscow: Metallurgiya, 1986, 189 p. (In Russ.).
6. La P.Q., Lu X.F., Yang Y., Wei Y.P., Zhao Y., Cheng C.J. Effect of Mo on microstructure and mechanical properties of bulk nanocrystalline Fe<sub>3</sub>Al materials prepared by aluminothermy reaction. *Materials Science and Technology*. 2011, vol. 27, no. 8, pp. 1303–1308. <https://doi.org/10.1179/026708310X12738371693094>
7. Shankar Rao V., Raja V.S., Baligidad R.G. Effect of carbon on the long-term oxidation behavior of Fe<sub>3</sub>Al iron aluminides. *Oxidation of Metals*. 2002, vol. 57, no. 5–6, pp. 449–470. <http://doi.org/10.1023/A:1015348320981>
8. Sun Y.F., Lv Y.Z., Zhang Y., Zhao J.Y., Wu Y. Microstructural and properties evolution of austenitic heat resistant steel after addition of aluminium. *Materials Science and Technology*. 2013, vol. 29, no. 5, pp. 511–516. <http://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000177>
9. Li C.A., Xiong J., Sun L., Liao Z., Peng M.C. Effect of Si content in hot dipping aluminium bath on Al–Fe bonding layer of aluminium

- piston with reinforced cast iron ring // *Materials Science and Technology*. 2012. Vol. 28. No. 8. P. 953–958.  
<http://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000034>
10. Schneider A., Sauthoff G. Iron aluminium alloys with strengthening carbides and intermetallic phases for high- temperature applications // *Steel Research International*. 2004. Vol. 75. No. 1. P. 55–61.  
<https://doi.org/10.1002/srin.200405927>
  11. Prakash U. Intermetallic matrix composites based on iron aluminides // *Intermetallic Matrix Composites*. 2018. P. 21–35.  
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-85709-346-2.00002-9>
  12. Prakash U., Buckley R., Jones H., Sellars C. Structure and properties of intermetallics based on the Fe–Al system // *ISIJ International*. 1991. Vol. 31. No. 10. P. 1113–1126.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.1113>
  13. Shivkumar K., Baligidad R.G., Sankar M., Satya Prasad V.V. Effect of melting process and aluminium content on the microstructure and mechanical properties of Fe–Al alloys // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 10. P. 1483–1487.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1483>
  14. Sheshukov O.Y., Ermakova V.P., Marshuk L.A., Smirnova V.G., Kataev V.V. Connections of the microstructure of the Fe–Al (25–33 % wt.) with its composition and cooling rate from the liquid state // *Advances in Materials Research*. 2013. Vol. 602–604. P. 594–597.
  15. Шешуков О.Ю., Ермакова В.П., Смирнова В.Г., Катаев В.В., Овчинникова Л.А., Лапин М.В., Долматов А.В. Влияние содержания алюминия на структуру и механические свойства сплавов на основе системы Fe–Al // *Рациональное природопользование и передовые технологии материалов*. Ежегодное научно-практическое издание. Институт металлургии УрО РАН. ЦКП «Урал-М». Екатеринбург: Эзапринт, 2015. С. 83–85.
  16. Шешуков О.Ю., Ермакова В.П., Маршук Л.А., Смирнова В.Г., Катаев В.В. К вопросу повышения жаростойкости материалов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1–2. С. 593–596.
  17. Смирнова В.Г., Ермакова В.П., Катаев В.В., Маршук Л.А., Некрасов И.В., Шешуков О.Ю. Способ изменения структуры литых Fe–Al сплавов путем ввода титансодержащих модификаторов // *Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: «ФЕРРОСПЛАВЫ»*. Екатеринбург: ООО «Альфа Принт», 2018. С. 297–303.
  18. Некрасов И.В., Смирнова В.Г., Ермакова В.П., Мельчаков С.Ю., Катаев В.В., Маршук Л.А., Шешуков О.Ю. Влияние модификаторов, содержащих Ti и Zr, на зеренную структуру литых Fe – 12 % Al сплавов // *Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: Материалы V Дальневосточной конференции с международным участием*. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2018. С. 140–143.
  19. Катаев В.В. Разработка технологии получения железоалюминиевых сплавов: Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2020. 138 с.
  20. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР, 32 с.
  21. ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости. М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР, 13 с.
  22. Конструкционные материалы: Справочник / Под редакцией Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
  - piston with reinforced cast iron ring. *Materials Science and Technology*. 2012, vol. 28, no. 8, pp. 953–958.  
<http://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000034>
  10. Schneider A., Sauthoff G. Iron aluminium alloys with strengthening carbides and intermetallic phases for high- temperature applications. *Steel Research International*. 2004, vol. 75, no. 1, pp. 55–61.  
<https://doi.org/10.1002/srin.200405927>
  11. Prakash U. Intermetallic matrix composites based on iron aluminides. *Intermetallic Matrix Composites*. 2018, pp. 21–35.  
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-85709-346-2.00002-9>
  12. Prakash U., Buckley R., Jones H., Sellars C. Structure and properties of intermetallics based on the Fe–Al system. *ISIJ International*. 1991, vol. 31, no. 10, pp. 1113–1126.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.1113>
  13. Shivkumar K., Baligidad R.G., Sankar M., Satya Prasad V.V. Effect of melting process and aluminium content on the microstructure and mechanical properties of Fe–Al alloys. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 10, pp. 1483–1487.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1483>
  14. Sheshukov O.Y., Ermakova V.P., Marshuk L.A., Smirnova V.G., Kataev V.V. Sonnections of the microstructure of the Fe–Al (25–33 % wt.) with its composition and cooling rate from the liquid state. *Advances in Materials Research*. 2013, vol. 602–604, pp. 594–597.
  15. Sheshukov O.Yu., Ermakova V.P., Smirnova V.G., Kataev V.V., Ovchinnikova L.A., Lapin M.V., Dolmatov A.V. Effect of aluminium content on structure and mechanical properties of Fe–Al-based alloys. In: *Environmental Management and Cutting-Edge Materials Technologies. Annual Sci. and Pract. Guide*. Yekaterinburg: Ezaprint, 2015, pp. 83–85. (In Russ.).
  16. Sheshukov O.Yu., Ermakova V.P., Marshuk L.A., Smirnova V.G., Kataev V.V. On increasing the heat resistance of materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2012, vol. 14, no. 1–2, pp. 593–596. (In Russ.).
  17. Smirnova V.G., Ermakova V.P., Kataev V.V., Marshuk L.A., Nekrasov I.V., Sheshukov O.Yu. How to change the structure of cast Fe–Al alloys by addition of titanium-containing modifiers. In: “*FERROSPRAY*”: *Prospects of Development of Metallurgy and Engineering using Completed Fundamental Research and Completed Scientific-Research Design Works. Materials of the Sci. and Pract. Conf. with Int. Participation and Elements of the School of Young Scientists*. Yekaterinburg: Al’fa Print, 2018, pp. 297–303. (In Russ.).
  18. Nekrasov I.V., Smirnova V.G., Ermakova V.P., Mel’chakov S.Yu., Kataev V.V., Marshuk L.A., Sheshukov O.Yu. Effect of modifiers containing Ti and Zr on grain structure of cast Fe – 12 % Al alloys. In: *Fundamental and Applied Tasks of Deformable Solid Mechanics and Advanced Technologies in Mechanical Engineering: Materials of the 5<sup>th</sup> Far-Eastern Conf. with Int. Participation*. Komsomolsk-on-Amur: KnASU, 2018, pp. 140–143. (In Russ.).
  19. Kataev V.V. *Development of technology for obtaining iron-aluminium alloys: Cand. Tech. Sci. Diss.* Yekaterinburg, 2020, 138 p.
  20. *GOST 1497-84. Metals. Stretching testing methods*. Moscow: Gosudarstvennyi komitet standartov soveta ministrov SSSR, 32 p. (In Russ.).
  21. *GOST 6130-71. Metals. Methods for heat-resistance determining*. Moscow: Gosudarstvennyi komitet standartov soveta ministrov SSSR, 13 p. (In Russ.).
  22. *Construction Materials: Directory*. Arzamasov B.N. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 688 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Олег Юрьевич Шешуков**, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов, Институт металлургии УрО РАН

**E-mail:** o.j.sheshukov@urfu.ru

**Владимир Викторович Катаев**, к.т.н., научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН

**E-mail:** kataev.5959@mail.ru

**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** o.j.sheshukov@urfu.ru

**Vladimir V. Kataev**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** kataev.5959@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021

После доработки 04.07.2021

Принята к публикации 28.08.2021

Received 29.03.2021

Revised 04.07.2021

Accepted 28.08.2021