



УДК 669.714

Поступила 16.05.2016

ОСОБЕННОСТИ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ЛИГАТУРАМИ НА ОСНОВЕ МЕДИ FEATURES OF SPHEROIDIZING MODIFICATION OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH MASTER ALLOYS BASED ON COPPER

А. С. КАЛИНИЧЕНКО, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, Р. Э. ТРУБИЦКИЙ, В. А. СТЕФАНОВИЧ, В. А. СМЕТКИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: akalnichenko@bntu.by, *ОАО «Лидский литейно-механический завод», г. Лида, Гродненская обл., Беларусь, ул. Качана, 4*

A. S. KALINICHENKO, A. G. SLUTSKY, V. A. SHEINERT, R. E. TRUBITSKY, V. A. STEFANOVICH, V. A. SMYETKIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave., E-mail: akalnichenko@bntu.by, *OJSC «Lidsky foudry-mechanical plant», Lida city, Grodno Region, Belarus, 4, Kachana str.*

Актуальным является повышение эффективности процесса модифицирования высокопрочного чугуна, что способствует улучшению его механических и эксплуатационных свойств. Для этих целей в практике используются различные магнийсодержащие лигатуры, в том числе «тяжелые» на основе меди и никеля. Анализ показал, что применение кусковых модификаторов на основе меди недостаточно эффективно из-за длительности растворения. С этой точки зрения интерес представляет скоростное литье, позволяющее производить модифицирующие лигатуры в виде плоских лент-чипсов, которые характеризуются малым временем растворения и низким пироэффектом.

Цель настоящей работы – исследование особенностей структурообразования в чугуне с шаровидным графитом при использовании различных сфероидизирующих лигатур на основе меди. Проведенные исследования показали, что переход от применения брикетированной формы лигатуры на основе меди и магния к «чипс-лигатуре» позволил повысить эффективность процесса модифицирования. Дальнейшее улучшение качества высокопрочного чугуна можно обеспечить за счет применения в «чипс-лигатуре» добавок нанодисперсного порошка оксида иттрия.

The increase of efficiency of modification process for ductile iron is topical, thereby increasing its mechanical and operational properties. For these purposes, in practice, various magnesium containing alloys are used, including «heavy» ones on the basis of Copper and Nickel.

The analysis has shown that the application of bulk inoculating alloys based on copper basis were not effectively due to long dissolution period. From this point of view, the interest is high-speed casting, allowing the production of inoculating alloys in the form of strips – chips that are characterized by a low dissolution time and low piroeffekt.

The aim of this work is to study the features of structure formation in nodular cast iron using different spheroidizing alloys based on copper. Studies have shown that the transition from the use of briquetted form alloys based on copper and magnesium to the «chips-inoculating alloys» allowed increasing the efficiency of the spheroidizing process.

Further improvement in the quality of ductile iron can be achieved by the use in «chip-inoculating alloys» additives of nano-sized yttrium oxide powder.

Ключевые слова. Высокопрочные чугуны, сфероидизация, медно-магниевые лигатуры, «чипс-лигатура».

Keywords. High-strength cast iron, spheroidizing, copper-magnesium alloying alloys, «chips-inoculating alloy».

Высокопрочный чугун (ВЧ) является перспективным конструкционным материалом, поскольку его прочностные свойства превосходят свойства серого чугуна практически в 2 раза [1], что позволяет снизить стоимость изделий благодаря меньшей массе и уменьшить, например, на 30% массу двигателей [2]. При этом актуальным остается вопрос повышения механических и эксплуатационных свойств высокопрочного чугуна, используемого при создании конкурентоспособной продукции в машиностроении, а также разработка эффективных модификаторов [3]. Один из путей решения данной проблемы – использование более эффективных лигатур, обеспечивающих максимальное усвоение магния при минимальном расходе присадки, а также снижение пылегазовых выбросов в процессе сфероидизирующей

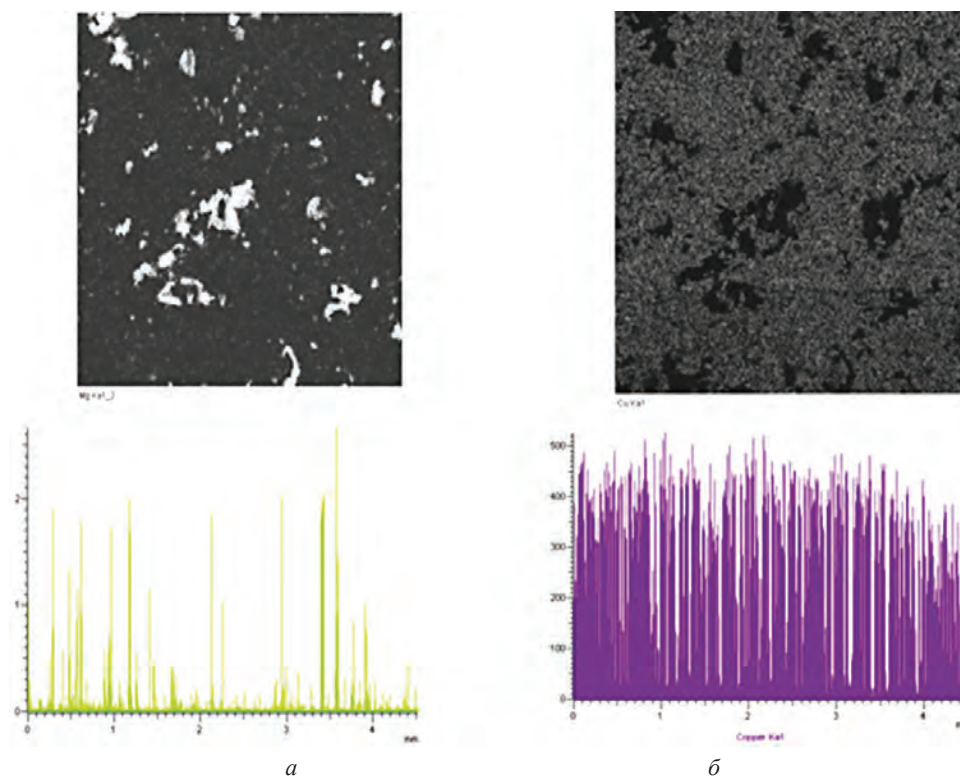


Рис. 1. Характер распределения магния (а) и меди (б) в брикетированной лигатуре (светлое поле – максимум концентрации)

обработки жидкого чугуна. Для этих целей в практике производства ВЧ используются различные магниесодержащие лигатуры, в том числе «тяжелые» на основе меди и никеля.

Исследования процесса растворения лигатур для ВЧ, выполненные по разработанной методике [4], показали, что для каждого его состава существует определенная критическая температура, ниже которой усвоение расплавом чугуна резко снижается. Это служит сдерживающим фактором применения многих комплексных присадок, требующих повышенной температуры растворения. Для улучшения растворимости лигатуры в жидком чугуне был предложен «чипс-процесс» [5, 6], в котором лигатура формировалась в виде тонких лент (чипсов) при скоростной разливке на вращающийся барабан. Замена кусковой лигатуры сферической формы на пластинчатую позволила интенсифицировать процесс его растворения в виду малой толщины чипсов (менее 3 мм).

Кинетика растворения таких модификаторов в чугуне существенно отличается от растворения сферических частиц. Из-за малой толщины пластины быстро прогреваются, что резко сокращает инкубационный период растворения. Например, «чипс-модификатор» на основе ферросилиция обеспечивает при ковшевой обработке более полное усвоение магния (50–60%) по сравнению с классическим сэндвич-процессом. При этом длительность пироэффекта сокращается с 5–10 до 3–5 с и снижается объем выбросов в атмосферу. Таким образом, за счет изменения формы частиц сфероидизирующей лигатуры можно в широких пределах регулировать кинетику ее растворения при внепечной обработке чугуна [4].

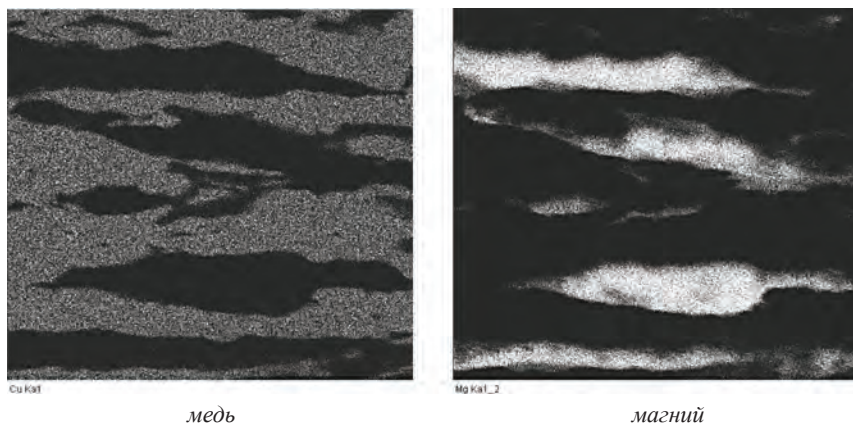
Целью настоящей работы является исследование особенностей структурообразования в чугуне с шаровидным графитом при использовании различных сфероидизирующих лигатур на основе меди.

В качестве объекта изучения использовали базовую лигатуру, содержащую порошок меди и магния в виде брикетов, а также пластин, изготовленных методом высокоскоростной ударной деформации. Кроме того, была исследована и опытная «чипс-лигатура», содержащая нанодисперсный порошок оксида иттрия [7].

С помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU с микроанализатором INCA ENERGY350 были проведены микроструктурные исследования распределения элементов в образцах брикетированной лигатуры на основе меди и магния. Полученные результаты приведены на рис. 1.

Из рисунка видно, что компоненты в исследуемом образце брикетированной лигатуры распределены равномерно по объему.

На рис. 2 показано распределение меди и магния, а также форма структурных составляющих в аналогичной по составу лигатуре, но подвергнутой высокоскоростной ударной деформации («чипс-лигатура»).



медь

магний

Рис. 2. Характер распределения меди и магния по площади образца «чипс-лигатуры» (светлое поле – максимум концентрации)

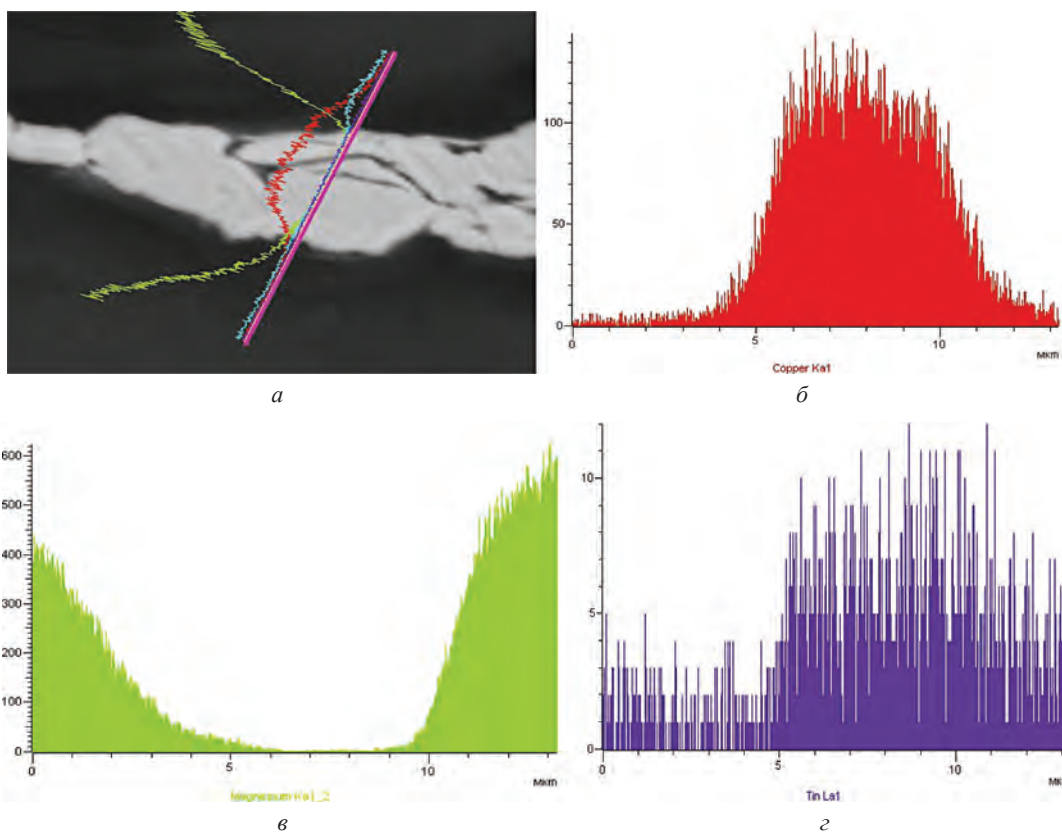


Рис. 3. Анализируемое сечение (а) и распределения меди (б), магния (в), иттрия (г) по сечению образца «чипс-лигатуры»

Из рисунка видно, что микроструктура образца характеризуется сильно деформированными структурными составляющими, которые имеют вытянутую форму с толщиной, не превышающей 20 мкм в поперечном сечении.

Характер распределения составляющих элементов по сечению образца «чипс-лигатуры» существенно отличается от брикетированного варианта (рис. 3).

Установлено, что оксид иттрия сосредоточен преимущественно в медной части лигатуры (белая область) и в незначительных количествах присутствует в магнии. Аналогичные исследования, проведенные на образцах брикетированной лигатуры, показали несколько иную картину (рис. 4). Из рисунка видно, что итрий распределен равномерно по объему как в медной, так и в магниевой компонентах лигатуры.

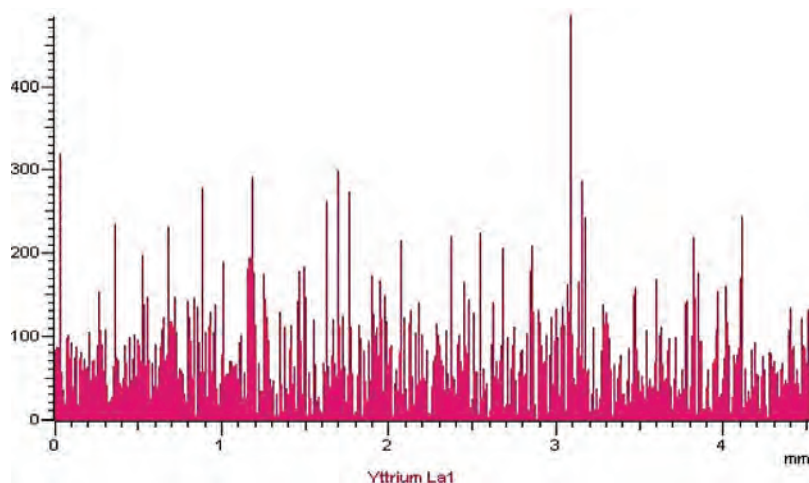


Рис. 4. Характер усредненного распределения иттрия в брикетированной лигатуре на основе меди и магния

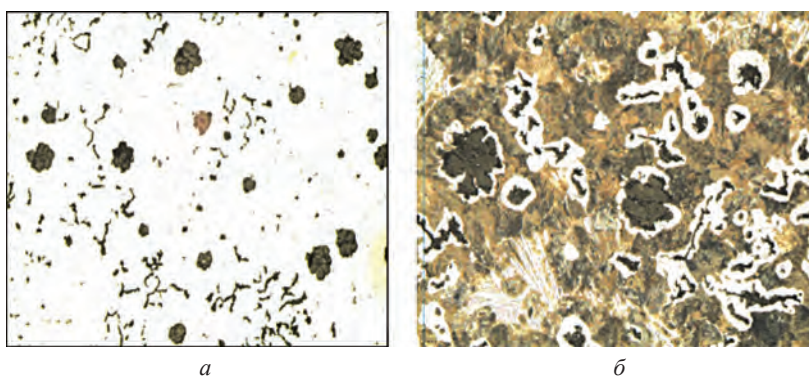


Рис. 5. Структура графита (а) и металлической основы (б) ВЧ, обработанного лигатурой на основе меди и магния в виде брикетов. а – $\times 100$; б – $\times 200$, травлено

На следующем этапе работы были проведены сравнительные испытания лигатур при внепечной обработке чугуна с шаровидным графитом. Плавку чугуна осуществляли в индукционной тигельной печи ИСТ-006. В качестве основных шихтовых материалов использовали рафинированный доменный передельный чугун, стальной лом, что обеспечило получение в исходном расплаве минимальной концентрации серы. Для сфероидизирующей обработки чугуна применяли три варианта «тяжелой» лигатуры на основе меди и магния в виде брикетов диаметром 25 мм и толщиной 5 мм, пластин толщиной 1–2 мм, а также «чипс-лигатуру», содержащей дополнительно нанодисперсные частицы оксида иттрия. Присадки в количестве 0,8% вводили в ковш перед выпуском жидкого чугуна. После завершения обработки высокопрочный чугун разливали по литейным формам. Из полученных заготовок изготавливали образцы для изучения химического состава, механических свойств и микроструктуры. Результаты измерений приведены в таблице.

Результаты химического анализа и механические свойства высокопрочного чугуна

| Вариант модифицирования | Химический состав, % | | | | | | Твердость НВ | Предел прочности σ_b , МПа |
|---|----------------------|------|-------|-------|------|-------|--------------|-----------------------------------|
| | C | Si | P | S | Cu | Mg | | |
| Брикеты (Cu-Mg) | 3,57 | 2,23 | 0,028 | 0,011 | 0,32 | 0,011 | 241 | 390 |
| «Чипс-лигатура» (Cu-Mg) | 3,63 | 2,14 | 0,038 | 0,012 | 0,51 | 0,019 | 266 | 456 |
| «Чипс-лигатура» (Cu-Mg- Y ₂ O ₃) | 3,61 | 2,18 | 0,025 | 0,014 | 0,53 | 0,021 | 229 | 673 |

Установлено, что при обработке чугуна «тяжелой» лигатурой в виде брикетов процесс сфероидизации полностью не произошел по причине неэффективного растворения присадки и, в конечном итоге, ее частичным ошлаковыванием. Это подтверждается невысоким содержанием в чугуне меди и остаточного магния. Твердость полученного чугуна составила 241НВ, а прочность – 390 МПа. Металлографический анализ показал, что структура графита наряду с шаровидной формой имеет порядка 30% включений вермикулярного графита (рис. 5).

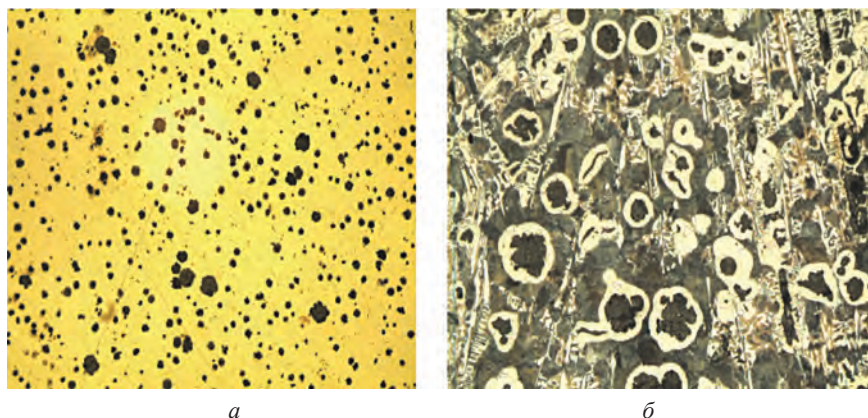


Рис. 6. Структура графита (*а*) и металлической основы (*б*) ВЧ, обработанного «чипс –лигатурой» на основе меди и магния. *а* – $\times 100$; *б* – $\times 200$, травлено

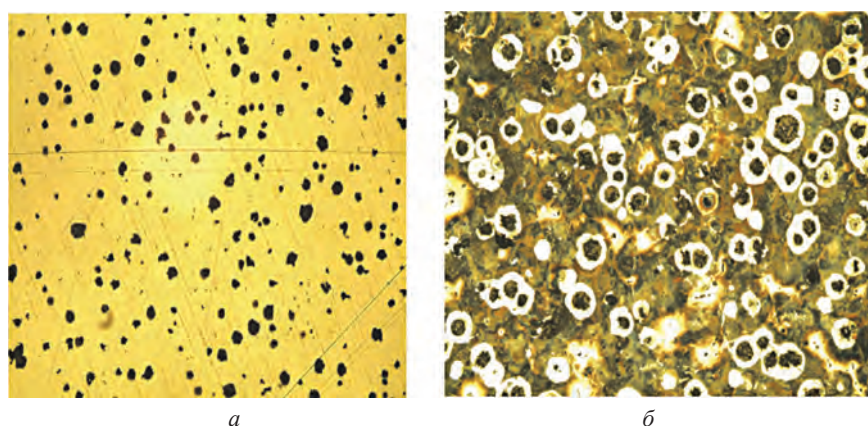


Рис. 7. Структура графита (*а*) и металлической основы (*б*) ВЧ, модифицированного «чипс- лигатурой» на основе меди и магния, содержащей в своем составе оксид иттрия. *а* – $\times 100$; *б* – $\times 200$, травлено

Добавки лигатуры на основе меди и магния в виде пластин оказали заметное влияние на структуру и свойства высокопрочного чугуна. За счет более эффективного растворения присадки в чугуне повысилась концентрация меди и остаточного магния. При этом практически весь графит приобрел исключительно шаровидную форму (рис. 6, *а*).

Известно, что высокопрочные чугуны имеют склонность к переохлаждению и при определенных условиях в структуре может появиться цементитная фаза. В нашем случае после сфероидизирующей обработки высокопрочного чугуна вторичное графитизирующее модифицирование не проводили. В структуре металлической матрицы обнаружены включения эвтектического цементита, который хорошо виден на рис. 6, *б*. Это, в свою очередь отразилось на механических свойствах высокопрочного чугуна и особенно на твердости, которая составила 266НВ.

Добавки в состав «чипс-лигатуры» нанодисперсных частиц оксида иттрия оказали заметное влияние на характер формирования как графитной фазы, так и металлической основы сплава. В структуре улучшилась и стабилизировалась шаровидная форма графита (рис. 7, *а*). Металлическая основа сплава состоит из перлита и 20% феррита, при этом отсутствует цементитная фаза (рис. 7, *б*). Наличие в составе лигатуры оксида иттрия оказало не только графитизирующее воздействие на обработанный чугун, но и улучшило форму шаровидных включений графита в отливке. Все это обеспечило высокие механические свойства высокопрочного чугуна при оптимальной твердости.

Таким образом, сфероидизирующее модифицирование высокопрочного чугуна «чипс-лигатурой» на основе меди и магния, содержащей оксид иттрия, позволяет изменить характер распределения и форму шаровидного графита, исключить операцию вторичного графитизирующего модифицирования, повысить механические и улучшить технологические свойства сплава.

Выводы

Проведенные исследования показали, что переход от применения брикетированной формы лигатуры на основе меди и магния к «чипс-лигатуре» позволил повысить эффективность процесса модифициро-

вания. Дальнейшее улучшение качества высокопрочного чугуна возможно обеспечить за счет применения в «чипс-лигатуре» добавок нанодисперсного порошка оксида иттрия. В этом случае при внепечной обработке высокопрочного чугуна возможно стабилизировать процесс сфероидизации графитной фазы, исключить операцию вторичного модифицирования, обеспечить высокие механические свойства сплава.

Литература

1. **Rosseljong D.** Cast Iron vs. Ductile Iron Housing Material // EDOC1-12-004. <http://www.sumitomodrive.com/uploads/product/files/file-1283.pdf> Дата доступа 12.05.2016.
2. **Demirel C.** The application of high-strength cast irons (ADI – austempered ductile iron) in high-performance diesel engines – part 2 / C. Demirel, T. Behr, K. Weisskopf, R. Bösch, C. Gündisch // Foundry Trade Journal. November 2006. pp. 286–288.
3. **The process of high strength grey cast iron.** <http://www.slideshare.net/allenjo/the-process-of-high-strength-grey-cast-iron>. Дата доступа 12.05.2016.
4. **Леках С. Н.** Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Леках, Н. И. Бестужев. Мн.: Наука и техника, 1992. 269 с.
5. **Калиниченко А. С.** «Чипс-процесс» модифицирования чугуна / А. С. Калиниченко, В. А. Шейнерт, С. Н. Леках, Д. Н. Худокормов // Литейное производство. 1991. № 2. С. 5–6.
6. **Sverdlin A.** «Chips»-Process for Cast Iron Inoculation / A. Sverdlin, S. Lekakh, A. Kalinichenko, V. Sheinert // Foundry Management & Technology. 1994. May. pp. 31–34.
7. **Калиниченко А. С.** Использование сфероидизирующей «Чипс»-лигатуры на основе меди, содержащей наноразмерные частицы оксида иттрия, для высокопрочного чугуна / А. С. Калиниченко, А. Г. Слущкий, В. А. Шейнерт, С. А. Ленкевич, А. Н. Белый // Литье и металлургия. 2016. № 1. С. 130–135.

References

1. **Rosseljong D.** Cast Iron vs. Ductile Iron Housing Material // EDOC1–12–004. <http://www.sumitomodrive.com/uploads/product/files/file-1283.pdf>.
2. **Demirel C., Behr T., Weisskopf K., Bösch R., Gündisch C.** The application of high-strength cast irons (ADI – austempered ductile iron) in high-performance diesel engines – part 2. Foundry Trade Journal. November 2006, pp. 286–288.
3. **The process of high strength grey cast iron.** <http://www.slideshare.net/allenjo/the-process-of-high-strength-grey-cast-iron>.
4. **Lekakh S. N., Bestuzhev N. I.** *Vnechnaya obrabotka vysokokachestvennyh chugunov v machinostroenii* [Ladle refining of high-grade cast iron in machinery]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1992. 269 p.
5. **Kalinichenko A. S., Sheinert V. A., Lekakh S. N., Khudokormov D. N.** «Chips-protses» modifitsirovaniya chuguna [«Chips-process» for modification of cast iron]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 1991, no. 2, pp. 5–6.
6. **Sverdlin A., Lekakh S., Kalinichenko A., Sheinert V.** «Chips»-Process for Cast Iron Inoculation. *Foundry Management & Technology*. 1994, May. pp. 31–34.
7. **Kalinichenko A. S., Slutsky A. G., Sheinert V. A., Lenkevich S. A., Bely A. N.** Ispol'zovanie sferoidizirugushey «Chips»-ligatury na osnove medi, sodержashey nanorazmernye chastitsy oksida ittriya, dlya vysokoprochnogo chuguna [Application of spheroidizing «Chips»-master alloy on copper base containing nanoscale particles of Yttrium oxide for high-strength cast iron]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 1, pp. 130–135.