



УДК 621.74

Поступила 22.02.2016

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕЙ «ЧИПС»-ЛИГАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОКСИДА ИТТРИЯ, ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

APPLICATION OF SPHEROIDIZING «CHIPS»-MASTER ALLOY ON COPPER BASE CONTAINING NANOSCALE PARTICLES OF YTTRIUM OXIDE FOR HIGH-STRENGTH CAST IRON

А. С. КАЛИНИЧЕНКО, А. Г. СЛУЦКИЙ, В. А. ШЕЙНЕРТ, С. А. ЛЕНКЕВИЧ, А. Н. БЕЛЫЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: akalinichenko@bntu.by

A. S. KALINICHENKO, A. G. SLUTSKY, V. A. SHEINERT, S. A. LENKEVICH, A. N. BELY,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: akalinichenko@bntu.by

Особенностью технологии получения высокопрочных чугунов является применение при внепечной обработке различных лигатур, содержащих в своем составе магний. В практике литейного производства широкое распространение получили сфероидизирующие лигатуры на основе ферросилиция (типа ФСМг) и «тяжелые» лигатуры на основе меди и никеля. При этом актуальным является вопрос повышения их эффективности за счет повышения степени усвоения магния, снижения удельного расхода присадки и минимизация пылегазовых выбросов в процессе сфероидизирующей обработки жидкого чугуна. Один из путей решения данной проблемы – использование лигатур в компактной форме, при которой процесс ее растворения протекает эффективнее, например, быстроохлажденный гранулированный либо «чипс»-модификаторы.

Цель настоящей работы – исследование особенностей получения и применения «чипс»-лигатуры на основе меди и магния с добавками оксида иттрия. При этом использовали принцип механотроники, включающий брикетирование компонентов лигатуры после их перемешивания с последующим высокоскоростным ударно-механическим воздействием и получением пластин толщиной 1–2 мм.

Сфероидизирующая обработка жидкого металла производилась ковшевым методом с использованием «чипс»-лигатуры в количестве 0,8%. Вторичное графитизирующее модифицирование не проводили. Исследования показали, что при сфероидизирующей обработке высокопрочного чугуна разработанной лигатурой процесс взаимодействия магния с жидким расплавом протекает стабильно без существенного пироэффекта и выбросов металла за пределы ковша. При этом формируется структура шаровидного графита правильной формы (ШГф5). Наличие в лигатуре оксида иттрия оказало положительное влияние как на количество включений шаровидного графита, так и склонность высокопрочного чугуна к отбелу. По механическим свойствам полученный сплав соответствует марке ВЧ60.

The peculiarity of the technology of obtaining high-strength cast iron is application in out-furnace treatment various inoculants containing magnesium. In practice of foundry production spheroidizing master alloys based on ferrosilicon (Fe-Si-Mg type) and «heavy» alloying alloys on copper and nickel base are widespread. The urgent issue is to improve their efficiency by increasing the degree of magnesium assimilation, reduction of specific consumption of additives, and minimizing dust and gas emissions during the process of spheroidizing treatment of liquid iron. One method of solving this problem is the use of inoculants in a compact form in which the process of dissolution proceeds more efficiently. For example, rapidly quenched granules or «chip»-inoculants are interesting to apply.

The aim of present work was to study the peculiarities of production and application of «Chips»-inoculants on copper and magnesium base with additions of yttrium oxide. The principle of mechatronics was used, including the briquetting inoculants' components after their mixing with the subsequent high-speed mechanical impact and obtaining plates with a thickness of 1–2 mm.

Spheroidizing treatment of molten metal has been produced by ladle method using «Chips»-inoculants in the amount of 0.8%. Secondary graphitization inoculation was not performed. Studies have shown that when the spheroidizing treatment of ductile iron was performed with inoculants developed, the process of interaction of magnesium with the liquid melt runs steadily without significant pyroeffect and emissions of metal outside of the ladle.

This generates a structure of spheroidal graphite of regular shape (SGf5). The presence in the inoculant of yttrium oxide has a positive impact on the spheroidal graphite counts and the tendency of high-strength cast iron to form «white» cast iron structure. Mechanical properties of the obtained alloy correspond to high-strength cast iron HSC160.

Ключевые слова. Лигатура на основе меди и магния, нанодисперсный порошок оксида иттрия, высокоскоростное ударное воздействие, химический и фазовый состав «Чипс»-лигатуры, высокопрочный чугун, плавка, сфероидизирующая обработка, микроструктура, технологические и механические свойства.

Keywords. Inoculants based on copper and magnesium, nanosized powder of yttrium oxide, high-speed shock impact, chemical and phase composition of «Chips»-inoculants, ductile iron, melting, spheroidizing treatment, microstructure, mechanical and technological properties.

В практике литейного производства укрепился интерес к чугунам с шаровидным графитом (ЧШГ), который характеризуется высокими свойствами и конкурирует с углеродистой сталью [1–3]. Характеристики литых деталей из ЧШГ определяются химическим составом исходного сплава, условиями формирования отливки и технологией сфероидизирующего модифицирования. В первую очередь, свойства ЧШГ зависят от микроструктуры чугуна и количества сфероидального графита [4]. В настоящее время в практике производства высокопрочного чугуна используются «легкие» сфероидизирующие модификаторы на основе ферросилиция (ФСМг5-ФСМг9) и «тяжелые» на основе меди либо никеля, которые могут также содержать Са, Al, Zr, Ba, Sr и Ti [5]. При этом от способа ввода и состава вводимой присадки зависят ее расход, эффективность и стабильность процесса модифицирования. По сравнению с чистым магнием лигатуры позволяют минимизировать пироэффект при ковшевой обработке жидкого чугуна и существенно повысить коэффициент усвоения магния. Компоненты, входящие в составы таких лигатур наряду со сфероидизацией графита за счет магния, оказывают влияние на процессы рафинирования, графитизации и легирования обрабатываемого сплава. В качестве наполнителей используются сплавы на основе ферросилиция либо меди и никеля. Например, «тяжелая» лигатура на основе меди отличается высокой технологичностью, эффективно реагирует с жидким расплавом чугуна, образуя небольшое количество шлака. Однако применение таких лигатур требует проведения дополнительной операции вторичного графитизирующего модифицирования. Поэтому в их составах используются активные элементы (кальций, барий, церий, иттрий и др.). Обладая высоким сродством к сере и кислороду, они связывают их в устойчивые соединения в виде сульфидов и оксидов, тем самым, повышая эффективность воздействия магния на сфероидизацию графита.

Ранее проведенные исследования показали перспективность применения наноразмерных порошков нитрида титана и оксида иттрия в составах быстроохлажденных гранулированных модификаторов-раскислителей на основе алюминия при выплавке углеродистой стали [6] и модификаторов-лигатур на основе олова в виде прутков диаметром 3–5 мм, полученных методом экструзии, для вторичного модифицирования и микролегирования высокопрочного чугуна [7].

В качестве исходных материалов использовали порошки чистой меди и магния, а также наноразмерные порошки оксида иттрия. Ранее выполненные исследования показали, что для обеспечения равномерного распределения оксида иттрия в объеме лигатуры требуется перемешивание исходных компонентов в течение не менее 6 ч с последующим брикетированием с усилием до 50 т [8]. Распределение в брикете на основе меди нанопорошка оксида иттрия после смешивания компонентов в течение 6 ч показано на рис. 1.

Опыты показали, что при внепечной сфероидизирующей обработке высокопрочного чугуна с использованием такой лигатуры эффективность ее растворения жидким расплавом была не достаточно высокой.

Ранее выполненные исследования показали, что применение высокоскоростного литья для переработки традиционных модификаторов позволяет резко увеличить эффективность усвоения легирующих

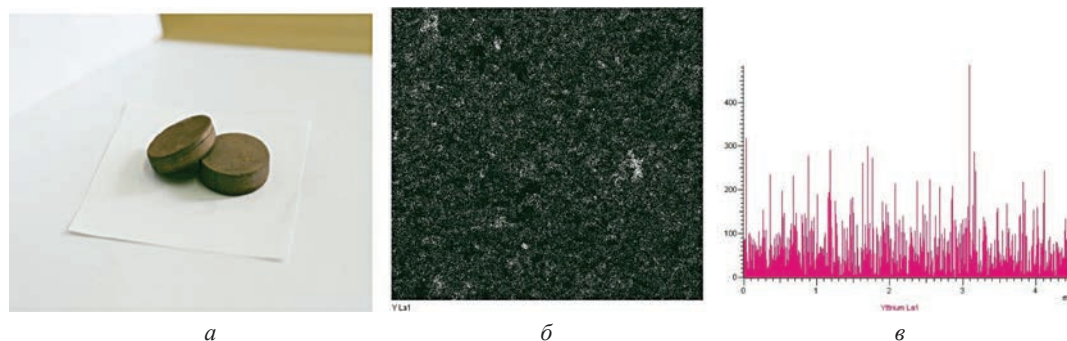


Рис. 1. Общий вид брикетов лигатуры на основе меди (а); характер распределения оксида иттрия по площади (б) и линии (в)

элементов. Получаемый ленточный модификатор (в виде чипсов) имел малую толщину (менее 3 мм), что обеспечивало быстрое его растворение в объеме жидкого чугуна, создание большого количества центров кристаллизации, способствующих формированию мелкокристаллической структуры при отсутствии пылеобразования [9, 10].

С целью повышения эффективности процесса обработки расплава был предложен способ деформации брикетированной лигатуры, направленный на получение пластин толщиной 1,5–2,5 мм. Прокатка брикетов лигатуры через горизонтальные лабораторные валки не дала положительных результатов. Поэтому был использован вариант высокоскоростной ударной деформации брикетов из лигатуры.

Скоростная деформация осуществлялась путем осадки брикетов на вертикальном копре. Рабочее положение вертикального копра заключается в поднятии ударного бойка на высоту H . При срабатывании спускового механизма ударный боек разгоняется с ускорением свободного падения. При свободном падении ударного бойка с высоты H полученная кинетическая энергия передается брикету, расположенному на наковальне, который деформируется методом осадки.

Экспериментальные исследования проводили бойком массой $m = 35$ кг с поднятием его на высоту $H = 5$ м. Учитывая, что падение бойка происходит с ускорением свободного падения $g = 9,81$ м/с², то скорость бойка в момент контакта с брикетом составляла:

$$v_6 = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 5} = 9,9 \text{ м/с.}$$

Следовательно, кинетическая энергия, переданная деформируемому брикету, равна:

$$E_k = \frac{mv_6^2}{2} = \frac{35 \cdot 9,9^2}{2} = 1715 \text{ Дж.}$$

При скоростном ударном воздействии на брикет достигаются повышение пластичности металла и создание благоприятных термомеханических параметров деформирования:

- 1) значительное повышение температуры брикета за счет теплоты, выделяемой вследствие внутреннего трения металлов при деформировании за ничтожно малый промежуток времени;
- 2) уменьшение контактного трения, что исключает дефекты от неравномерной скорости течения металлов в процессе деформации;
- 3) глубина проникновения пластической деформации значительно больше, чем при обычной осадке, что гарантирует хорошую проработку структуры металла [11].

На рис. 2 приведены фотографии, характеризующие стадии получения «чипс»-лигатуры.

С использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU с микроанализатором INCA ENERGY350 были проведены микроструктурные исследования распределения элементов в образцах «чипс»-лигатуры на основе меди и магния (рис. 3, 4).

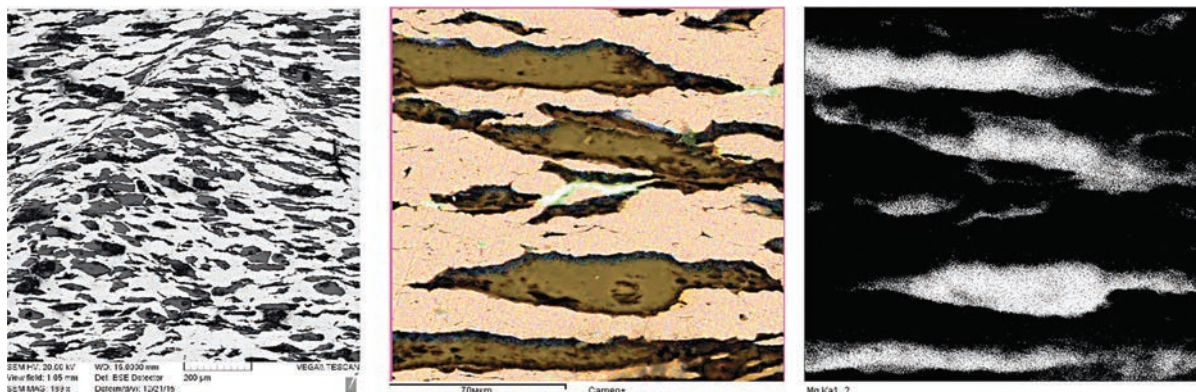
Микроструктура образца показывает сильную деформацию структурных составляющих. Все структурные составляющие имеют продолговатую форму и их толщина не превышает 50 мкм. Иттрий достаточно равномерно распределен по площади образца, хотя его содержание выше в меди.

Анализ межфазной границы показывает отсутствие взаимодействия между медью и магнием, хотя и отмечается незначительная диффузия атомов меди в магний.

На рис. 5 приведены точки на границе раздела фаз, в которых определялся химический состав, а также выполнялся рентгеноструктурный анализ.



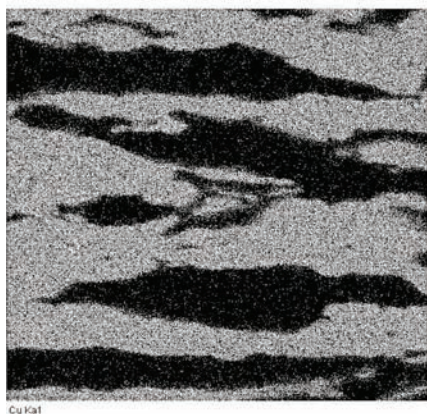
Рис. 2. Исходный брикет лигатуры (а); наковальня для высокоскоростной ударной деформации (б); полученная «чипс»-лигатура (в)



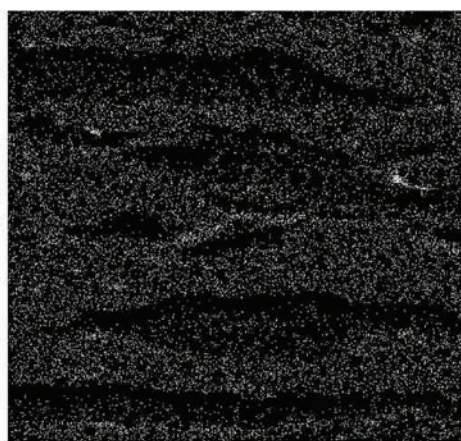
Общий вид

Анализируемый участок

Магний



Медь



Иттрий

Рис. 3. Распределение элементов по площади

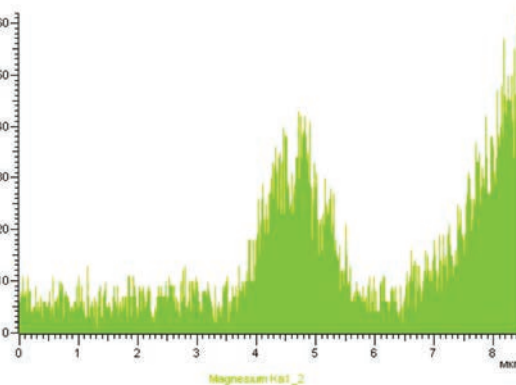
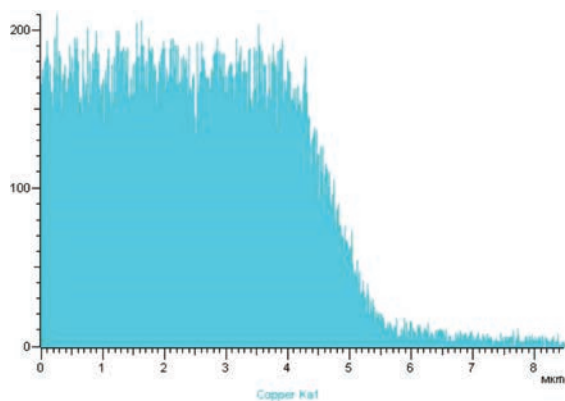
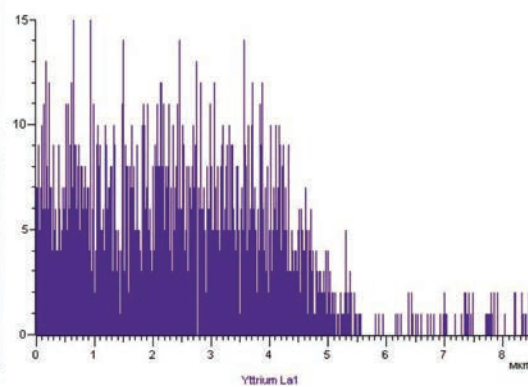
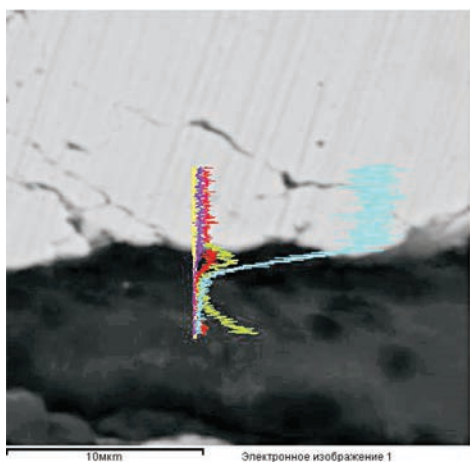


Рис. 4. Распределение элементов по линии на границе фаз (магний-медь)

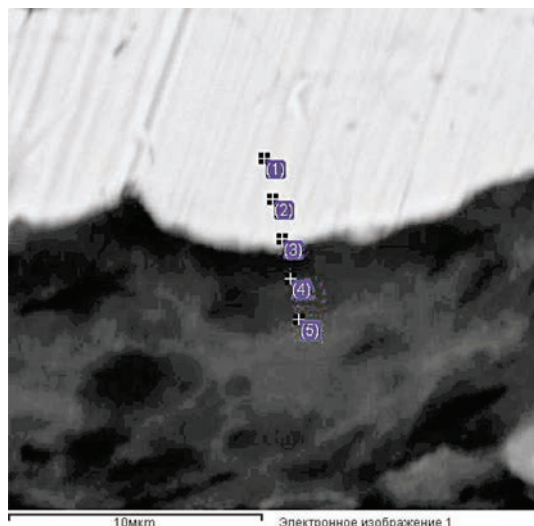


Рис. 5. Расположение точек для проведения химико-структурного анализа «чипс»-лигатуры

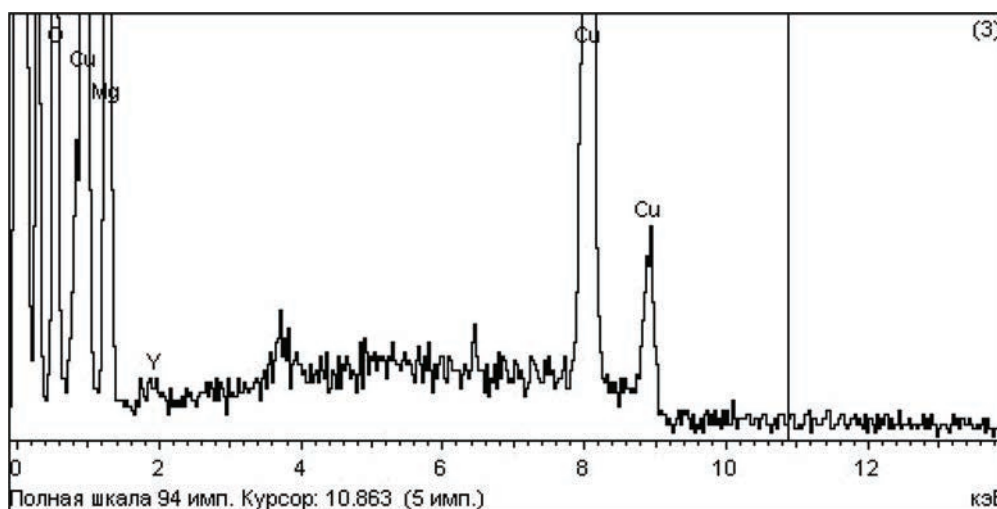


Рис. 6. Рентгенограмма распределения элементов в характерных точках

Подтверждено присутствие оксида иттрия, который находится в виде равноосных включений размером около 50–200 нм. Иногда наблюдаются агрегаты различной формы с размером до 900 нм. В таблице представлены результаты элементного состава в исследуемых точках.

Элементный состав в точках, показанных на рис. 6

Спектр	В стат.	O	Mg	Si	Cu	Y	Итого
(1)	Да	2,49	1,75		95,86	-0,10	100,00
(2)	Да	2,52	1,47		96,21	-0,19	100,00
(3)	Да	12,45	23,36		64,40	-0,21	100,00
(4)	Да	14,22	55,20		30,58		100,00
(5)	Да	26,65	62,25	3,12	7,98		100,00
Макс.		26,65	62,25	3,12	96,21	-0,10	
Мин.		2,49	1,47	3,12	7,98	-0,21	

Выводы

На основании анализа эффективности растворения модифицирующих добавок предложен способ, направленный на уменьшение времени растворения модификатора и измельчения его структурных составляющих, заключающийся в применении высокоскоростной ударной деформации предварительно сформированных брикетов из порошковых компонентов модификатора. Анализ проведенных исследований показал, что структурные составляющие подвергались значительной деформации и приобрели вытянутую форму. При этом толщина фазовых составляющих не превышала 50 мкм. Несомненно, измене-

ние размера структурных составляющих и уменьшение толщины брикетов до величины порядка 1,5 мм должно способствовать более быстрому растворению модифицирующих добавок, благодаря чему должна повыситься эффективность процесса модифицирования.

Литература

1. Schissler J. M., Brenot P., Chobaut J. P. Abrasive wear resistance of austempered ductile iron at room temperature // *Metallurgical Science and Technology*, 1987. Vol. 5 (31). P. 71–77.
2. Kaczowski M., Krzyńska A. Mechanical properties and structure of austempered ductile iron –ADI // *Archives of Foundry Engineering*. 2007. Vol. 7 (1). P. 161–166.
3. Lekakh S. N. High Strength Ductile Iron Produced by Engineered Cooling: Process Concept // *International Journal of Metalcasting*. 2015. Vol. 9 (2). P. 21–29.
4. Kenawy M. A., Abdel-Fattah A. M., Okasha N., EL-Gazery M. Mechanical and Structural Properties of Ductile Cast Iron // *Egypt. J. Sol.*, 2001. Vol. 24. No. 2. P. 151–159.
5. Bočkus S., Žaldarys G. Production of Ductile Iron Castings with Different Matrix Structure // *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010. Vol. 16. No. 4. P. 307–310.
6. Слущкий А. Г., Калиниченко А. С., Шейнерт В. А., Ткаченко Г. А. Быстроохлажденный комплексный модификатор-раскислитель для внепечной обработки литейной стали // *Литье и металлургия*. 2010. № 2. С. 115–118.
7. Калиниченко А. С., Слущкий А. Г., Шейнерт В. А. и др. Перспективы использования наноразмерных порошков для получения модифицирующих лигатур // *Литье и металлургия*. 2015. № 1. С. 115–118.
8. Слущкий А. Г., Калиниченко А. С., Зык Н. В., Медведев Д. И., Сметкин В. А., Кривопуст А. А. Пути повышения эффективности модификаторов-раскислителей // *Металлургия: Респуб. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч. Минск: БНТУ, 2013. Вып. 34. Ч. 1. С. 62–71.*
9. Калиниченко А. С., Шейнерт В. А., Леках С. Н., Худокормов Д. Н. «Чипс-процесс» модифицирования чугуна // *Литейное производство*. 1991. № 2. С. 5–6.
10. Sverdlin A., Lekakh S., Kalinichednko A., Sheinert V. «Chips»-Process for Cast Iron Inoculation // *Foundry Management & Technology*. 1994. May. P. 31–34.
11. Согришин, Ю. П., Гришин Л. Г., Воробьев В. М. Штамповка на высокоскоростных молотах. М.: Машиностроение, 1978. 164 с.

References

1. Schissler J. M., Brenot P., Chobaut J. P. Abrasive wear resistance of austempered ductile iron at room temperature. *Metallurgical Science and Technology*, 1987, vol. 5 (31), pp. 71–77.
2. Kaczowski M., Krzyńska A. Mechanical properties and structure of austempered ductile iron –ADI. *Archives of Foundry Engineering*. 2007, vol. 7 (1), pp. 161–166.
3. Lekakh S. N. High Strength Ductile Iron Produced by Engineered Cooling: Process Concept. *International Journal of Metalcasting*. 2015, vol. 9 (2), pp. 21–29.
4. Kenawy M. A., Abdel-Fattah A. M., Okasha N., EL-Gazery M. Mechanical and Structural Properties of Ductile Cast Iron. *Egypt. J. Sol.* 2001, vol. 24, no. 2, pp. 151–159.
5. Bočkus S., Žaldarys G. Production of Ductile Iron Castings with Different Matrix Structure. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010, vol. 16, no. 4, pp. 307–310.
6. Slutsky A. G., Kalinichenko A. S., Sheinert V. A., Tkachenko G. A. Bystrookhlazhdennyi kompleksnyi modifikator-raskislitel'kz vnepechnoi obrabotki stali [Rapidly quenched complex inoculant-sourer for out-furnace treatment of cast steel]. *Lit'ei metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 2, pp. 115–118.
7. Kalinichenko A. S., Slutsky A. G., Sheinert V. A., Borodulya V. A., Rabinovich O. S., Zyk N. V. Perspektivy ispolzovaniya nanorazmernykh poroshkov dlya polucheniya modifitsiruyushchikh ligatur [Perspectives of nanopowders application for manufacturing of modifying alloying alloys]. *Lit'ei metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 115–118.
8. Slutsky A. G., Kalinichenko A. S., Zyk N. V., Medvedev D. I., Smetkin V. A., Krivopust A. A. Puti povysheniya effektivnosti modifikatorov-raskislitelei [Methods to increase effectiveness of modifiers-sourers]. *Metallurgiya = Metallurgy*. Minsk, BNTU Publ., 2013, vol. 34, ph. 1, pp. 62–71.
9. Kalinichenko A. S., Sheinert V. A., Lekakh S. N., Khudokormov D. N. «Chips-protses» modifitsirovaniya chuguna [«Chips-process» for modification of cast iron]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry*, 1991, no. 2, pp. 5–6.
10. Sverdlin A., Lekakh S., Kalinichednko A., Sheinert V. «Chips»-Process for Cast Iron Inoculation. *Foundry Management & Technology*, 1994, may, pp. 31–34.
11. Sogrishin Yu. P., Grishin L. G., Vorobyov V. M. Shtampovka na bysokoskorostnykh molotakh [Die-forging with high-speed hammers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 164 p.