

УДК 669.131.7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ НОЖЕЙ ХАРВЕСТЕРНОЙ ГОЛОВКИ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНО ЧУГУНА

В. А. ШЕЙНЕРТ, А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **И. Л. КУЛИНИЧ**,
Белорусский национальный технический университет
А. И. ПОКРОВСКИЙ, канд. техн. наук, **А. Н. ГЛУШАКОВ**,
А. А. СИДОРЕНКО, К. А. СОТОВ
Физико-технический институт НАН Беларуси

В работе представлены результаты промышленных испытаний технологии получения чугуна с шаровидным графитом для отливок ответственного назначения. Применительно к литой детали «Нож харвестерной головки» производства ОАО «Амкодор» был подобран состав базового чугуна, содержащий молибден, никель, медь и олово и проведены опытные плавки чугуна в индукционной тигельной печи ИСТ-016 с последующим ковшевым сфероидизирующим модифицированием тяжелой медь-никель-магниевого лигатурой. Изготовлена опытная партия отливок, проведены исследования химического состава, микроструктуры и прочностных свойств полученного чугуна в литом состоянии. Установлено, что сфероидизирующее модифицирование чугуна медь-никель-магниевого лигатурой с использованием специального ковша с переходной крышкой за счет повышения степени усвоения магния позволяет получать в структуре шаровидный графит при минимальном расходе лигатуры. При этом устраняется пирроэффект, снижается объем пылегазовых выбросов и шлакообразование. За счет дополнительного легирования чугуна молибденом, медью и оловом в литом состоянии получена перлитная металлическая основа, что обеспечило механические свойства на уровне марки ВЧ70. Изготовлена опытная партия отливок, которая прошла термическую обработку по специальному режиму и передана заказчику для эксплуатационных испытаний.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, плавка, ковшевое модифицирование, опытные отливки, термическая обработка, микроструктура, механические свойства.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR CASTING HARVESTER HEAD KNIVES FROM HIGH-STRENGTH CAST IRON

V. A. SHEINERT, A. G. SLUTSKY, Ph. D in Technical Science,
I. L. KULINICH,

Belarusian National Technical University

A. I. POKROVSKY, Ph. D in Technical Science, A. N. GLUSHAKOV,
A. A. SIDORENKO, K. A. SOTOV

Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

The paper presents the results of industrial tests of the technology for producing cast iron with nodular graphite for critical castings. In relation to the cast part "Harvester Head Knife" produced by Amkodor OJSC, the composition of the base cast iron was selected, containing molybdenum, nickel, copper and tin, and experimental melting of the cast iron was carried out in an IST-016 induction crucible furnace, followed by ladle spheroidizing modification with a heavy copper-nickel-magnesium alloy. A pilot batch of castings was produced, and studies of the chemical composition, microstructure and strength properties of the resulting cast iron were carried out. It has been established that the spheroidizing modification of cast iron with a copper-nickel-magnesium master alloy using a special ladle with a transition lid, due to an increase in the degree of magnesium absorption, makes it possible to obtain spheroidal graphite in the structure with minimal alloy consumption. This eliminates the pyroeffect, reduces the volume of dust and gas emissions and slag formation. Due to additional alloying of cast iron with molybdenum, copper, and tin in the cast state, a pearlitic metal base was obtained, which provided mechanical properties at the level of the VC70 grade. A pilot batch of castings was produced, which underwent heat treatment according to a special regime and was handed over to the customer for operational testing.

Keywords: *high-strength cast iron, melting, ladle modification, experimental castings, heat treatment, microstructure, mechanical properties.*

Объемы производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) расширяются. При этом актуальным является внедрение технологии получения более высоких марок ЧШГ для отливок ответственного назначения. Для этого рекомендуется использовать синтетические чугуны, плавку которых осуществляют на чистых стальных ломах, в том числе конверсионных

отходах машиностроения и карбюризаторах, что гарантированно обеспечивает минимальную концентрацию серы и тем самым стабилизирует процесс сфероидизации графита.

Основным фактором, определяющим эффективность такой обработки чугуна, является состав применяемой магнийсодержащей лигатуры. Наиболее широко используются литые лигатуры на основе кремния, меди, никеля. При этом важным моментом является тип лигатуры, количество и способ ее ввода в жидкий чугун, что определяет необходимую металлическую основу сплава, форму распределения, размер и количество шаровидного графита, обеспечивая тем самым требуемую марку получаемого чугуна.

Самыми распространенными способами ковшевого модифицирования ЧШГ являются варианты «сэндвич-процесса», когда порция модификатора закладывается в ковш перед заливкой исходного чугуна. Для получения в отливках из ЧШГ микроструктур, таких как мартенситная или бейнитная, необходимо обеспечить специальный тепловой режим формы, а также проведение соответствующей термообработки.

Целью испытаний являлось получение опытной партии отливок из высокопрочного чугуна марки ВЧ70 в литом состоянии для последующей термической обработки на аустенито-бейнитную структуру. Чугуны с такой структурой широко распространены за рубежом. Сочетание бейнита и остаточного аустенита позволяет получать достаточно высокие показатели механических свойств, например, предела прочности при растяжении на уровне 1300 МПа и относительного удлинения до 10 %. В Беларуси ведутся лишь экспериментальные работы по их освоению [1; 2].

Ниже представлены результаты промышленных испытаний технологии получения чугуна с шаровидным графитом для отливок ответственного назначения. Ранее выполненные исследования [3; 4] показали реальную возможность получения высоких марок ЧШГ за счет сфероидизирующей обработки жидкого расплава тяжелыми магнийсодержащими лигатурами.

Опытная плавка чугуна проводилась в лаборатории высоких давлений и специальных сплавов Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси на индукционной печи ИСТ-016 с кислой футеровкой. За основу был выбран состав высокопрочного чугуна взамен сталей 25ХНМ, 20ХН2М, содержащий

3,4–3,6 % углерода; 2,0–2,1 % кремния; не более 0,4 % марганца, 0,7–0,9 % молибдена 0,7–0,9 % никеля; 0,8–1,0 % меди; не более 0,1 % хрома, 0,15–0,25 % олова; не более 0,01 % серы, 0,04–0,06 % магния.

В качестве основной шихты использовали рафинированный перелый доменный чугун ПЛ1, содержащий 4,39 % углерода, 1,07 % кремния, 0,087 % марганца, 0,007 % серы, 0,029 % фосфора, сталь Ст1 (кп, пс, сп), содержащая 0,1 % углерода, 0,35 % марганца, 0,1 % кремния. Расчет вели на 3,6 % углерода, а в качестве легирующих присадок использовали лом меди, чистое олово, гранулированный никель, ферросплавы молибдена и кремния.

Вначале в печь загружали расчетное количество перелыого чугуна, стального лома и ферромолибдена, а после расплавления основной шихты и перегрева на зеркало вводились ферросилиций, часть меди и олово. Склонность чугуна к отбелу контролировалась по клиновой пробе, отлитой на стальную плиту. Выпуск чугуна из печи производился при достижении температуры перегрева 1480–1500 °С, которая измерялась термопарой ВР5/20.

Модифицирующая обработка расплава исходного чугуна производилась в специальном ковше емкостью 180 кг при соотношении высоты и диаметра 1,5 / 1, оборудованного переходной крышкой «Tandish cover-процесс», общий вид которого приведен на рисунке 1. Особенностью данного способа модифицирования является использование специальной крышки, устанавливаемой герметично на основной ковш, что позволило практически исключить выбросы жидкого чугуна в процессе его взаимодействия с магниевой лигатурой, а также гарантированно направлять струю жидкого металла в центральную часть ковша к сфероидизирующей лигатуре.

Для формирования шаровидного графита использовалась литая «тяжелая» лигатура, содержащая 13–15 % магния, 42–45 % меди и 42–45 % никеля, фракцией 3–8 мм, изготовленная в литейной лаборатории НИПИ БНТУ по методике, описанной в работах [5]. Расход лигатуры составил 1 % от массы жидкого чугуна.



a



б

Рисунок 1 – Специальный ковш (*a*) и переходная крышка (*б*) для сфероидизирующей обработки ЧШГ

С целью снижения степени переохлаждения ЧШГ и исключения появления цементитной фазы в структуре производилась вторичная графитизирующая обработка чугуна модификатором ФСБа-5 фракцией 0,5–2 мм в количестве 0,3 % от веса расплава. Модификаторы укладывались в нижний карман на дне ковша в следующей последовательности: магнийсодержащая лигатура, пригруз из стальной высечки массой 1 % от обрабатываемого металла, графитизирующий модификатор.

Наблюдения показали, что задержка начала реакции взаимодействия магнийсодержащей лигатуры с жидким чугуном составила 5 с, при этом процесс проходил бурно, но без дымовыделения и пиррозэффекта. После завершения процесса сфероидизации была произведена заливка форм и получены опытные отливки «Нож харвестерной головки» и образцы для исследований химического состава, микроструктуры и механических свойств (рисунок 2).



a



б

Рисунок 2 – Литейная форма (*a*) и опытная отливка «Нож харвестерной головки» (*б*) из высокопрочного чугуна

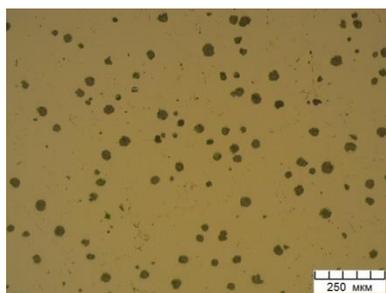
В таблице 1 представлены результаты химического анализа исходного чугуна (до модифицирования) и после сфероидизирующей обработки.

Таблица 1 – Результаты химического анализа исходного чугуна (до модифицирования) и после сфероидизирующей обработки

Наименование сплава	Химический состав, %									
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Mg ост.	Sn	Mo
Исходный чугун	3,65	1,83	0,36	0,011	0,025	0,48	1,32	0,011	0,20	0,58
Высокопрочный чугун	3,59	2,52	0,30	0,009	0,027	0,88	1,72	0,12	0,19	0,57

Установлено, что полученный чугун практически по всем элементам соответствует заданному составу, при этом остаточное содержание магния и серы составило 0,12 % и 0,009 % соответственно.

На рисунке 3 приведены результаты металлографических исследований литой структуры чугуна в опытных отливках.



×100
a



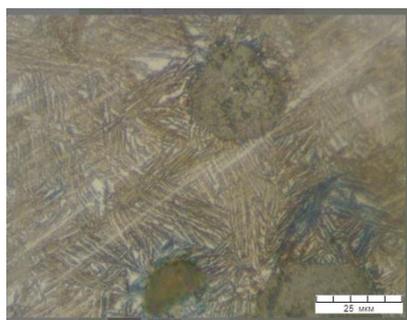
×200
б

Рисунок 3 – Микроструктура чугуна в опытной отливке (литое состояние):
a – без травления, ×100; *б* – с травлением, ×200

Исследованиями микроструктуры установлено, что металлическая основа полученного чугуна практически полностью состоит из

перлита, а графит имеет правильную шаровидную форму с диаметром включений 25–45 мкм. Распределение – преимущественно равномерное, количество включений графита составляет 6 % от площади шлифа. По механическим характеристикам на разрывную прочность сплав соответствует марке высокопрочного чугуна ВЧ70.

На втором этапе работы сотрудниками ФТИ НАН Беларуси была проведена термическая обработка опытных отливок по специальному режиму (нагрев и выдержка при 920–950 °С, изотермическая закалка в соляной ванне при 300–350 °С с различными выдержками длительностью от 1 до 4 ч) с целью дальнейшего повышения механических свойств. Исследования показали, что такая термическая обработка позволила получить микроструктуру высокопрочного чугуна в виде бейнита с незначительным количеством остаточного аустенита (рисунок 4).



×500 травлено

Рисунок 4 – Микроструктура чугуна в опытной отливке после изотермической закалки

Твердость полученных образцов составляла 37–41 HRC, а прочностные характеристики материала были следующими: предел прочности при растяжении 850–900 МПа, ударная вязкость 9,5–10,1 Дж/см.

Таким образом, в результате промышленных испытаний технологии получены отливки из чугуна с шаровидным графитом с пределом прочности в литом состоянии 700 МПа, а после изотермической закалки – 900 МПа. Отливки переданы ОАО «Амкодор» для

механической обработки деталей и проведения стендовых и эксплуатационных испытаний на лесозаготовительной технике.

Список литературы

1. **Покровский, А. И.** Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес / А. И. Покровский, Л. Р. Дудецкая // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2 (79). – С. 126–134.
2. **Покровский, А. И.** Концепция создания экономно-легированных аусферритных (бейнитных) высокопрочных чугунов / А. И. Покровский // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 4. – С. 29–37.
3. **Особенности** сфероидизирующего модифицирования высокопрочного чугуна лигатурами на основе меди / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2. – С. 110–115.
4. **Технологические** особенности получения чугуна с шаровидным графитом с использованием быстроохлажденной медь-магниевого лигатуры / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 2. – С. 15–21.
5. **Особенности** получения чугуна с шаровидным графитом повышенной прочности / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 43. – С. 125–133.

References

1. **Pokrovsky, A. I.** *Ispol'zovanie vysokoprochnogo bejnitnogo chuguna dlya izgotovleniya zubchatyh koles* [Use of high-strength bainitic cast iron for the manufacture of gears] / A. I. Pokrovsky, L. R. Dudsckaya // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2015. – No. 2. – P. 126–134.
2. **Pokrovsky, A. I.** *Koncepciya sozdaniya ekonomno-legirovannyh ausferritnyh (bejnitnyh) vysokoprochnyh chugunov* [The concept of creating economically alloyed ausferritic (bainitic) high-strength cast irons] / A. I. Pokrovsky // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2022. – No. 4. – P. 29–37.
3. **Osobennosti sferoidiziruyushchego modifitsirovaniya vysokoprochnogo chuguna ligaturami na osnove medi** [Features of spheroid-

dizing modification of high-strength cast iron with copper-based alloys] / A. G. Slutsky [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2016. – No. 2. – P. 110–115.

4. *Tekhnologicheskie osobennosti polucheniya chuguna s sharovidnym grafitom s ispol'zovaniem bystroohlazhdennoj med'-magnievoj ligatury* [Technological features of producing cast iron with nodular graphite using quickly cooled copper-magnesium alloy] / A. G. Slutsky [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2020. – No. 2. – P. 15–21.

5. *Osobennosti polucheniya chuguna s sharovidnym grafitom povyshennoj prochnosti* [Features of producing cast iron with nodular graphite of increased strength] / A. G. Slutsky [et al.] // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhyvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2023. – Vol. 43. – P. 125–133.

Поступила 18.10.2023
Received 18.10.2023