

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

А. Г. СЛУЦКИЙ, канд.техн. наук, **В. А. ШЕЙНЕРТ**,
И. Л. КУЛИНИЧ, **Н. А. ГУЛЕЦКИЙ**, **Д. С. ФЕДОРОВИЧ**
Белорусский национальный технический университет

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса получения чугуна с шаровидным графитом повышенной прочности. Подобран состав базового чугуна, дополнительно содержащий медь и олово, и проведена опытная плавка чугуна в индукционной тигельной печи с последующим ковшевым сфероидизирующим модифицированием никель-магниевого лигатурой. Изготовлена опытная партия отливок, подобран режим термической обработки, включая графитизирующий отжиг, последующую закалку в масло и низкотемпературный отпуск. Это позволило обеспечить высокие механические характеристики в полученном чугуне с шаровидным графитом.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, плавка, никель-магниевого лигатура, ковшевое модифицирование, термическая обработка, опытные отливки.

PECULIARITIES OF OBTAINING CAST IRON WITH INCREASED STRENGTH NODULAR GRAPHITE

A. G. SLUTSKY, Ph. D. in Technical Science, **V. A. SHEYNERT**,
I. L. KULINICH, **N. A. HULETSKI**, **D. S. FEDOROVICH**
Belarusian National Technical University

The paper presents the results of experimental studies of the process of producing cast iron with increased strength nodular graphite. The composition of the base cast iron additionally containing copper and tin was selected, and experimental melting of cast iron in an induction crucible furnace was carried out, followed by ladle spheroidizing modification with a nickel-magnesium master alloy. An experimental batch of castings was made, the heat treatment mode was selected, including graphitizing annealing, subsequent oil quenching and low-temperature tempering. This made it possible to provide high mechanical characteristics in the obtained in nodular cast iron.

Keywords: ductile iron, melting, nickel-magnesium ligature, bucket modification, heat treatment, experimental castings.

Объемы производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом 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 сфероидизирующей 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, распределение, 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. Согласно данным, приведенным в работе [1], технология ковшевого модифицирования высокопрочного чугуна на ОАО «АВТОВАЗ» состоит из сфероидизирующего и первичного графитизирующего модифицирования в ковше, а также вторичного графитизирующего модифицирования в заливочной чаше литейной формы. Это позволило при минимальном расходе Ni–Cu–Mg–PЗМ лигатуры получить в отливках структуру и механические свойства, соответствующие маркам ВЧ70 в литом состоянии и ВЧ80 после нормализации.

В целом можно отметить, что подавляющее большинство отливок из ЧШГ изготавливаются литьем в песчаные и керамические формы с умеренным темпом охлаждения отливки, которые позволяют получить феррито-перлитную основу в структуре. Для получения в отливках из ЧШГ специальных структур, таких как мартен-

ситная, бейнитная необходимо обеспечить сложный тепловой режим формы, а также проведение соответствующей термообработки.

Целью настоящей работы являлось исследование технологических особенностей получения чугуна с шаровидным графитом повышенной прочности методом ковшевого модифицирования никель-магниевого лигатурой.

При выполнении исследований применялись индукционная плавильная печь, комплекс оборудования для термической обработки, анализа химического состава, микроструктуры, технологических и механических свойств высокопрочного чугуна.

В лабораторных условиях по методике, разработанной авторами, была изготовлена партия «тяжелой» никель-магниевого лигатуры [2, 3]. В качестве основных материалов использовали металлический магниевый сплав МЛ5 и никель, сплав МЦ60. Опытная плавка чугуна проводилась на индукционной печи ИСТ-0,06 с кислой футеровкой. За основу был выбран состав высокопрочного чугуна, заимствованный из работы [4], содержащий 3,7 % углерода, 2,4 % кремния, 0,8 % марганца, 0,02 % серы, 0,8 % никеля, 0,35 % меди, 0,035 % олова. В качестве основной шихты использовали низкосернистый стальной конверсионный лом и электротехническую сталь. Для науглераживания применяли измельченные огарки электродов ДСП фракцией 2–5 мм. Недостающее количество кремния компенсировалось добавками ферросилиция ФС75 в сочетании с чистым кремнием марки КР1. Расчетное количество меди и олова вводилось в чугун после расплавления и отливалась технологическая проба, по излому которой оценивали величину отбела. Затем на зеркало металла ввели вторую часть кремния в виде ферросилиция ФС75 и после полного его растворения и перегрева чугуна произвели замеры температуры, которая составила перед выпуском 1480–1500 °С. Сфероидизирующую обработку чугуна осуществляли ковшевым методом с использованием переходной крышки «Tandish cover» (рисунок 1).

Особенностью данного способа модифицирования является использование специальной крышки (2), устанавливаемой герметично на основной ковш (1), что позволило практически исключить выбросы жидкого чугуна в процессе его взаимодействия с магниевой лигатурой, а также гарантированно направлять струю жидкого металла через центральную часть ковша к сфероидизирующей лигатуре.



Рисунок 1 – Схема (а), общий вид ковша (б) и переходной крышки (в) для сфероидизирующего модифицирования ЧШГ (Tandish cover):
 1 – ковш; 2 – переходная крышка; 3 – реакционная камера с лигатурой;
 4 – стальная высечка; 5 – перегородка; 6 – графитизирующий модификатор;
 7 – слой дисперсного карбюризатора; 8 – жидкий чугун;

Количество вводимой лигатуры для сфероидизирующей обработки чугуна в первую очередь зависит от концентрации серы в исходном расплаве. При этом остаточное содержание магния в ЧШГ должно находиться в пределах 0,035–0,06 %. Известно [4], что стабильный шаровидный графит в отливках получается при соблюдении соотношения $Mg_{\text{ост}} / S_{\text{ост}} \geq 3$. Для высоких марок ЧШГ исходная концентрация серы должна быть не выше 0,02 %. Расчетное количество никель-магниевого лигатуры, определяемое по формуле (1) [4], составило 0,95 % к весу жидкого чугуна

$$N = \frac{0,76 \cdot S_{\text{исх.}} + Mg_{\text{ост}}}{\zeta \cdot Mg_{\text{лиг}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где N – количество лигатуры, %; $Mg_{\text{ост}}$ – остаточное содержание магния ($\approx 0,07$ %); ζ – коэффициент усвоения лигатуры (0,6); $Mg_{\text{лиг}}$ – содержание магния в лигатуре (15 %).

Принятая величина добавки никель-магниевого лигатуры составляла 1 % от веса жидкого чугуна. Для вторичного модифицирования использовали гранулированный модификатор на основе алюминия с РЗМ (МИГ) в количестве 0,1 % к весу жидкого металла. После завершения процесса сфероидизации полученный высоко-

прочный чугун разливали по литейным формам для получения опытных отливок и образцов для исследования химического состава, микроструктуры и механических свойств, как в литом состоянии, так и после термической обработки по различным режимам (рисунок 2).

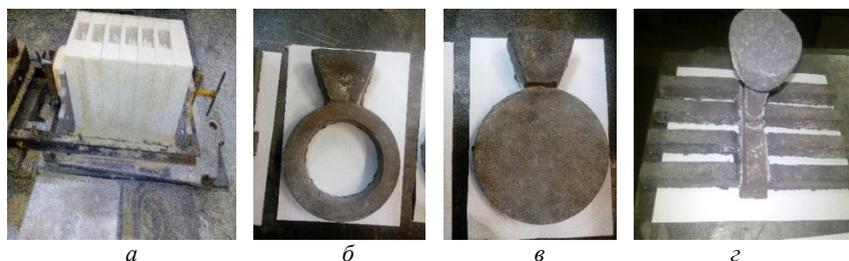


Рисунок 2 – Литейная форма (а), опытные отливки (б, в) и образцы (з)

В таблице 1 представлены результаты химического анализа исходного чугуна до и после сфероидизирующей обработки, которые свидетельствуют о совпадении с расчетными данными по основным элементам.

Таблица 1 – Влияние добавок никель-магниевого лигатуры на химический состав чугуна

| Наименование сплава | Химический состав, % | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| | C | Si | Mn | S | P | Ni | Cu | Mg | Sn |
| Исходный чугун | 3,65 | 2,06 | 0,36 | 0,021 | 0,031 | 0,05 | 0,51 | 0,01 | 0,04 |
| Высокопрочный чугун | 3,51 | 2,11 | 0,37 | 0,003 | 0,043 | 0,77 | 0,47 | 0,056 | 0,05 |

Анализ результатов, представленных в таблице 1, свидетельствует, что концентрация никеля составила 0,77 % , остаточного магния – 0,056 %. Предварительно добавленные в исходный чугун медь и олово практически остались на прежнем уровне.

Термообработка отливок из ЧШГ является действенным фактором влияния на микроструктуру сплава с целью получения заданных характеристик готовых изделий. В практике производства вы-

сокопрочного чугуна применяют различные виды термической обработки. Подавляющее количество отливок из высокопрочного чугуна невысоких марок (до ВЧ50) подвергают низкотемпературному отжигу для снятия термических напряжений, ферритизации матрицы и дополнительной графитизации. Высокотемпературный отжиг проводят для разложения структурно-свободных карбидов, которые резко снижают механические свойства и обрабатываемость отливок. Такая обработка проводится также для белых высокопрочных чугунов с целью графитизации. Нормализация с различным темпом охлаждения (спокойный воздух, обдув, аэрозоли и т. д.) проводится для получения перлитной структуры основы чугунов. Объемная закалка отливок из ЧШГ позволяет получать матрицу чугуна, состоящую из продуктов мартенситного превращения: мартенсита, бейнита, остаточного аустенита и их смесей. Отдельным вариантом объемной закалки является изотермическая закалка отливок в высокотемпературных средах (250–500 °С), как правило, соляных или свинцовых ваннах. Такой режим применяется для чугунов высоких марок (ВЧ70–ВЧ100).

На первом этапе провели предварительные исследования твердости и микроструктуры полученного чугуна на образцах в литом состоянии и после термической обработки, включая нормализацию (нагрев до температуры 950 °С, выдержка 2 ч и последующее охлаждение под вентилятором) и графитизирующий отжиг (нагрев до 950 °С, выдержка 2 ч и охлаждение с печью), которые представлены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показал, что твердость чугуна в литом состоянии достаточно высокая и составила 309–321 НВ и после нормализации практически не изменилась. При этом литая структура состоит из перлита и до 10 % цементитной фазы, а графит имеет шаровидную форму с размером включений 25–35 мкм. Графитизирующий отжиг позволил снизить твердость чугуна до 235–341 НВ за счет распада цементитной фазы и появления незначительного количества феррита. Кроме того, в структуре увеличился размер включений и общее количество графитной фазы.

Таблица 2 – Микроструктура и твердость высокопрочного чугуна в литом состоянии и после термообработки

| Режим ТО | Твердость НВ | Металлическая основа, % | | Графит | | | |
|-----------------------|--------------|-------------------------|------------------|--------|---------------|------------|-----------|
| | | перлит | Феррит, цементит | форма | распределение | длина, мкм | кол-во, % |
| Литое состояние | 309–321 | П100 | Ц–10 | ШГф4–5 | ШГр1–3 | ШГд25–45 | ШГ6 |
| Нормализация | 311–321 | П100 | Ц–1 | ШГф4–5 | ШГр1–3 | ШГд25–45 | ШГ10 |
| Графитизирующий отжиг | 235–241 | П92 | Ф8Ц1 | ШГф4–5 | ШГр1–3 | ШГд–45 | ШГ10 |

С учетом требований, предъявляемым к опытным отливкам по износостойкости, провели дополнительную отработку различных режимов термической обработки образцов ЧШГ, включая графитизирующий отжиг, нормализацию, закалку и низкий отпуск.

Установлено, что отжиг чугуна при температуре 950 °С с последующей закалкой от температуры 900 °С как в воду, так и в масло, обеспечил высокую твердость (58 HRC и 53 HRC соответственно), но на образцах были обнаружены трещины. Микроструктура представляла собой плотный мартенсит с незначительным количеством остаточного аустенита и включения шаровидного графита размером 25 мкм. Снижение температуры нагрева чугуна под закалку в масло до 850 °С позволило исключить возникновение трещин, при этом твердость чугуна снизилась до 53 HRC.

На основании полученных результатов был рекомендован следующий режим термической обработки опытных отливок из ЧШГ: графитизирующий отжиг при температуре 950 °С, выдержка в течение 2 ч и охлаждение с печью для разложения структурно свободного цементита и проведения механической обработки отливок. Затем готовые детали подвергали объемной закалке в масло по режиму: нагрев до температуры 850 °С, выдержка 0,3 ч. В дальнейшем отливки обработали холодом для исключения из структуры остаточного аустенита при температуре –25 °С в течение 10 ч. На завершающем этапе провели низкотемпературный отпуск при температуре 200 °С в течение 2-х ч. Окончательная твердость на литых

деталей «Диск» и «Кольцо» составила соответственно 58–59 HRC и 53–54 HRC. Данные литые детали из ЧШГ переданы для проведения эксплуатационных испытаний.

Список литературы

1. **Российская Ассоциация Литейщиков** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2968/8460>. – Дата доступа: 06.04.2021.

2. **Особенности сфероидизирующего модифицирования высокопрочного чугуна лигатурами на основе меди** / А. С. Калиниченко [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2. – С. 110–115.

3. **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.

4. **Булдыгин, С. В.** Термодинамические параметры растворения магния в чугунах и модификаторах чугуна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / С. В. Булдыгин; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2011. – 20 с.

5. **БелТехноЛит** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lityo.by/modifikatori-dlya-chuguna/modifikatori-zarubezhnich-proizvoditeley>. – Дата доступа: 14.04.2021.

References

1. <http://www.ruscasting.ru>.

2. ***Osobennosti sferoidiziruyushchego modifitsirovaniya vysokoprochnogo chuguna ligaturami na osnove medi*** [Features of spheroidizing modification of high-strength cast iron with copper-based ligatures] / A. S. Kalinichenko [et al.] // *Lit'e I metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2016. – No. 2. – P. 110–115.

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

4. Buldygin, S. V. *Termodinamicheskie parametry rastvoreniya magniya v chugunah i modifikatorah chuguna* [Thermodynamic parameters of magnesium dissolution in cast iron and cast iron modifiers]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 02.00.04 / S. V. Buldygin; South Ural State University. – Chelyabinsk, 2011. – 20 p.

5. <http://www.lityo.by>.

Поступила 12.10.2022

Received 12.10.2022