

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

**А.Г. СЛУЦКИЙ**, канд.техн. наук, **В.А. ШЕЙНЕРТ**,  
**И.А. КАСПЕРОВИЧ**, **П.Д. ХОРОЛЬСКИЙ**

Белорусский национальный технический университет

*В работе выполнен анализ основных факторов, определяющих физико-механические характеристики высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Показана решающая роль выбора исходного химического состава чугуна, способа его сфероидизирующей обработки, типа и состава лигатуры, в том числе и для вторичного модифицирования, а также режима термической обработки.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, плавка, сфероидизирующая обработка, вторичное модифицирование, термическая обработка.

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCING CAST IRON WITH BALL GRAPHITE

**A.G. SLUTSKY**, Ph. D in Technical Science, **V.A. SHEYNERT**,  
**I.A. KASPEROVICH**, **P.D. KHOROLSKY**

Belarusian National Technical University

*The paper analyzes the main factors that determine the physical and mechanical characteristics of ductile cast iron. The decisive role of the choice of the initial chemical composition of cast iron, the method of its spheroidizing treatment, the type and composition of the master alloy, including for secondary modification, as well as the heat treatment mode, is shown.*

**Keywords:** ductile iron, melting, spheroidizing treatment, secondary modification, heat treatment.

Согласно данным, представленным в работе [1], в структуре производимого в Беларуси литья по видам материалов согласно Программе развития литейного производства Республики на период до 2030 года наибольшую долю выпуска литья занимает серый чугун невысоких марок (65 %), затем следует стальное литье (15 %)

и только третье место занимает высокопрочный чугун с шаровидным графитом (10 %). Следует отметить, что в развитых странах доля выпуска литья из чугуна с шаровидным графитом в несколько раз выше.

В настоящее время в Республике Беларусь объемы производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом расширяются. При этом производятся отливки из невысоких марок сплава ВЧ45-ВЧ50. Актуальным является внедрение технологии получения более высоких марок ЧШГ для отливок ответственного назначения. Для этого необходимо использовать синтетические чугуны, плавку которых осуществляют с использованием чистого стального лома, металлических отходов и карбюризаторов. С целью снижения воздействия наследственности в качестве шихты необходимо применять рафинированные чугуны и синтез-плавку исходного высокоуглеродистого сплава.

Используемые модификаторы являются основным фактором, определяющим эффективность обработки чугуна на шаровидный графит. По типу модификаторы для производства ЧШГ делятся на сфероидизирующие и графитизирующие, применение которых неразрывно связано в одном технологическом процессе. Наиболее широко представлены литые модификаторы, которые изготавливаются на основе кремния или металлов (Ni, Cu, Al, Fe, Mn). Особую группу по геометрическим параметрам представляют пластинчатые «Чипс»-модификаторы, изготовленные различными способами.

Ранее выполненные исследования [2, 3] показали реальную возможность получения «тяжелой» лигатуры на основе порошков меди и магния с использованием дополнительного механического воздействия (прокатка в пластины различной толщины, прессование в брикеты с последующей высокоскоростной ударной деформацией («чипс»-лигатура). Проведенные заводские испытания такой лигатуры показали реальную возможность получения ЧШГ повышенной прочности.

Важным фактором является способ модифицирования исходного чугуна, который определяет не только физические свойства и марку получаемого сплава чугуна, но и является ключевым моментом всего производства высокопрочного чугуна. В группе ковшевых технологий можно выделить автоклавные процессы обработки расплава чистым магнием под внешним избыточным газовым давлением

и вариант, представленный конвертором Фишера, в котором реакция идет под избыточным давлением паров магния. Несмотря на высокую эффективность обработки (высокие марки, дешевизна модификатора, малый расход), такие способы в настоящее время не применяются из-за аппаратурной сложности, длительности, плохой технологической гибкости и непроизводительности.

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 [4], 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 ВЧ 70 в литом состоянии и ВЧ 80 после нормализации. Сфероидизирующая ковшевая обработка такого расплава лигатурой Si–Cu–Mg–PЗМ при расходе 1,27 % позволяет получать в отливках механические свойства и микроструктуру, соответствующую маркам ВЧ 80 в литом состоянии и ВЧ 100 после нормализации. Применение таких лигатур обеспечило получение отливки «Вал коленчатый» с требуемым уровнем механических свойств и необходимой структурой чугуна [4].

Группа технологий внутриформенного модифицирования представлена, в основном, способом обработки в выносной реакционной камере с последующей заливкой в литейную форму для изготовления крупных отливок весом до нескольких тонн и классическим «Инмолд – процессом», в котором сфероидизирующая обработка расплава происходит в реакционной камере литейной формы и совмещена с процессом заполнения ее полости. Такие технологические процессы абсолютно бездымны и могут быть полностью автоматизированы, дают высокую повторяемость и стабильность результатов, применимы как в массовом (конвейерном) производстве, так и в мелкосерийном. Вместе с тем они требуют высокого качества модификаторов, проведения сложных расчетов при вы-

боре технологии формы, в отдельности для индивидуальной отливки, а также имеют пониженный выход годного.

Режим кристаллизации залитого в форму модифицированного расплава оказывает на структуру и свойства ЧШГ особенно сильное влияние вследствие некоторых особенностей таких чугунов, в частности, повышенной объемной и линейной усадки, высокой склонности к переохлаждению и соответственно к отбелу, в ряде случаев повышенного предусадочного расширения, что осложняет получение отливок при литье в кокили (в том числе облицованные), достижение высокой размерной точности и усложняет режим питания отливок.

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 аустенитная, мартенситная, бейнитная, необходима организация сложного теплового режима формы в различные периоды охлаждения за счет подбора режима теплоотвода или сложной термообработки.

Термообработка отливок из ЧШГ наряду с вышеперечисленными, является действенным фактором влияния на микроструктуру сплава с целью получения заданных характеристик готовых изделий. Практически весь объем литья из высокопрочного чугуна проходит цикл термической обработки, что связано с особенностями кристаллизации чугуна, модифицированного на шаровидный графит. В практике производства высокопрочного чугуна применяют различные виды термической обработки. Подавляющее количество отливок из высокопрочного чугуна невысоких марок 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 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 и является обязательной операцией для ответственных (нагруженных) деталей, например, коленчатых валов двигате-

лей, компрессоров. Объемная закалка отливок из ЧШГ позволяет получать матрицу чугуна, состоящую из продуктов мартенситного превращения: мартесита, бейнита, остаточного аустенита и их смесей. Отдельным вариантом объемной закалки является изотермическая закалка отливок в высокотемпературных средах (250–500 °С), как правило, в соляных или свинцовых ваннах. Такой режим применяется для чугунов высоких марок (ВЧ70–ВЧ100). Например, для обеспечения высоких показателей прочности, пластичности и ударной вязкости ЧШГ его подвергают многостадийной термической обработке, включающей: ступенчатую аустенитизацию с нагревом до 820–830 °С с выдержкой 0,5 ч и последующим нагревом до 870–900 °С с выдержкой 0,5–1,5 ч; регулируемое охлаждение заготовки до температуры ниже 500 °С; термоциклирование в интервале 270–390 °С в течение 1,5–3 ч с последующим охлаждением на воздухе [5]. Недостатками способа являются использование многостадийного, длительного и сложного процесса термической обработки, а также невозможность его применения для деталей сложной конфигурации с различной толщиной стенки по сечениям.

Для получения бейнитно-ферритной структуры проводят многостадийную термическую обработку [6]. Первоначально исходный чугун подвергают ступенчатому ферритизирующему отжигу с выдержкой в течение 5 ч при температуре 950 °С, охлаждением с печью до 720 °С и выдержкой при этой температуре в течение 15 ч и последующим охлаждением на воздухе. После этого чугун подвергают изотермической закалке по следующему режиму: аустенитизация при температуре 850–950 °С (время выдержки – несколько минут); изотермическая закалка при температуре закалочной ванны 400 °С (время выдержки – 30 мин). Морфологическими особенностями строения полученных чугунов является микроболочки бейнита, окружающие графитовые включения при общем доминировании ферритной матрицы. Такая структура обеспечивает чугунам высокие показатели ударной вязкости, пластичности, прочности, износостойкости и других служебных свойств.

## Список литературы

1. **Покровский, А.И.** Аусферритный (бейнитный) чугуны: Гармонизация международного стандарта ISO 17804 применительно к условиям Беларуси / А.И. Покровский, Б.Б. Хина, О.А. Толкачева // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 56–72.
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. **Российская Ассоциация Литейщиков** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2968/8460>. – Дата доступа: 06.04.2021.
5. **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.
6. **БелТехноЛит** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lityo.by/modifikatori-dlya-chuguna/modifikatori-zarubezhnich-proizvoditeley>. – Дата доступа: 14.04.2021.

## References

1. **Pokrovsky, A.I.** *Ausferritnyj (bejnitnyj) chugun: Garmonizaciya mezhdunarodnogo standarta ISO 17804 primenitel'no k usloviyam Belarusi* [Pusferritic (bainitic) cast iron: Harmonization of the international standard ISO 17804 in relation to the conditions of Belarus] / A.I. Pokrovsky, B.B. Khina, O.A. Tolkacheva // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 1. – P. 56–72.
2. **Osobennosti sferoidiziruyushchego modifitsirovaniya vysokoprochnogo chuguna ligaturami na osnove medi** [Features of spheroidizing inoculation 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. Slutsky [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2020. – No. 2. – P. 15–21.

**4. <http://www.ruscastings.ru>.**

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

**6. <http://www.lityo.by>.**

*Поступила 04.10.2021*

*Received 04.10.2021*