

Исследование влияния режимов термической обработки на микроструктуру и свойства чугуна с шаровидным графитом

Студенты: гр.10405120 Гулецкий Н.А., 10405119 Федорович Д.С., Бусел А.А.,
10405221 Даничев А.О.

Научные руководители – Слуцкий А.Г. Шейнерт В.А.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск

Большинство отливок из высокопрочного чугуна изготавливаются литьем в песчаные формы с умеренным темпом охлаждения, что позволяет 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 и подбора соответствующей термообработки.

Практически весь объём литья из высокопрочного чугуна проходит цикл термической обработки, что связано с особенностями его кристаллизации после сфероидизирующего модифицирования на шаровидный графит.

В практике производства ЧШГ применяют различные виды термической обработки, включая низкотемпературный и высокотемпературный отжиг для снятия термических напряжений, ферритизации матрицы и дополнительной графитизации, разложения структурно-свободных карбидов. Нормализация с различным темпом охлаждения (спокойный воздух, обдув, аэрозоли и т.д.) проводится для получения перлитной структуры и является обязательной операцией для таких ответственных литых деталей как коленчатые валы двигателей, компрессоров. Объёмная закалка отливок из ЧШГ позволяет получать матрицу чугуна, состоящую из мартенсита, бейнита, остаточного аустенита и их смесей. Отдельным вариантом объёмной 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) [1].

Для получения бейнитно-ферритной структуры проводят многостадийную термическую обработку. 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 режиму: аустенитизация – температура – 850–950°С, время выдержки – несколько минут; изотермическая закалка – температура закалочной ванны 400°С, время выдержки – 30 мин. Морфологическими особенностями строения полученных чугунов является микрооболочки бейнита, окружающие графитовые включения при общем доминировании ферритной матрицы. Такая структура обеспечивает чугунам высокие показатели ударной вязкости, пластичности, прочности, износостойкости и других служебных свойств [2,3].

Целью настоящей работы является исследование влияния режимов термической обработки чугуна с шаровидным графитом на микроструктуру и механические свойства.

Опытная плавка чугуна проводилась на индукционной печи ИСТ-0.06 с кислой футеровкой. За основу был выбран состав высокопрочного чугуна, содержащий 3,5 % углерода, 2,4 % кремния, 0,8 % марганца, 0,02 % серы, 0,8 % никеля, 0,35 % меди, 0,03 % олова [4]. В качестве шихты использовали низкосернистый стальной конверсионный лом и динамную сталь. Для науглераживания применяли измельченные огарки электродов ДСП фракцией 2–5мм. Недостающее количество кремния компенсировалось добавками ферросилиция ФС75. Расчетное количество меди и олова вводилось в чугун после его расплавления. Сфероидизирующую обработку осуществляли ковшевым методом с использованием никель-магниевого лигатуры величина добавки которой составляла 1 % от веса жидкого чугуна. Для вторичного модифицирования использовали гранулированный модификатор, на основе алюминия с РЗМ

в количестве 0,1 % к весу жидкого металла. После завершения процесса сфероидизации, полученный высокопрочный чугун разливали по литейным формам и изготовили образцы для исследований.

Твердость исследуемых образцов определялась на прессе Бринелля при нагрузке 3000 кг и диаметре шарика 10 мм согласно ГОСТ 9012–59. Измерение твердости термообработанных образцов осуществляли по Роквеллу в соответствии с ГОСТ 9013–59. Приготовление шлифов для металлографического анализа осуществлялось на шлифовально-полировальном станке LaboPol-1. Исследование микроструктуры чугуна осуществляли на лабораторном металлографическом комплексе механико-технологического факультета.

Обобщенные результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1- Влияние режима ТО на микроструктуру и твердость высокопрочного чугуна.

Режим ТО	Твёрдость	Металлическая основа, %		Графит			
		перлит	феррит, цементит, мартенсит	форма	распределение	диаметр, мкм	количество, %
Литое состояние	312–321НВ	П90	Ц10	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд 25–45	ШГ6
Нормализация 950 °С, выдержка 2ч. охл. на воздухе	311–321НВ	П100	Ц1	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд25–45	ШГ10
Отжиг (950 °С, выдержка 2ч. охл. с печью)	235–241НВ	П96	Ф4,Ц1	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд – 45	ШГ10
Отжиг 950 °С выдержка 2ч, закалка от 850 °С в воду	53–60 HRC трещина	-	м	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд – 45	ШГ10
Отжиг 950 °С выдержка 2ч, закалка от 850 °С в масло	49–58 HRC трещина	-	м	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд – 45	ШГ10
Отжиг 950 °С выдержка 2ч, закалка от 800 °С в масло	51–53 HRC	-	м	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд – 45	ШГ10
Закалка от 800 °С в масло литого образца	54–59 HRC	-	м,ц10	ШГф4–5	ШГр1–3	ШГд25–45	ШГ6

Анализ полученных результатов показал, что в литом состоянии твердость ЧШГ высокая и составляет 312–321 НВ, при этом металлическая основа состоит из 90 % перлита и 10 % цементита. Графит правильной шаровидной формы, практически равномерно распределен и имеет размеры 25–45 мкм, а общее его количество составляет 6 %. После нормализации по режиму (нагрев до температуры 950 °С, выдержка 2 часа и охлаждение на воздухе) структура металлической основы состояла из перлита и незначительного количества (1 %) цементитной фазы, а твердость чугуна практически не изменилась по сравнению с литым состоянием.

Высокотемпературный графитизирующий отжиг позволил существенно 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. В качестве примера на рисунке 1 представлены фотографии микроструктур высокопрочного чугуна в литом состоянии (а) и после графитизирующего отжига.

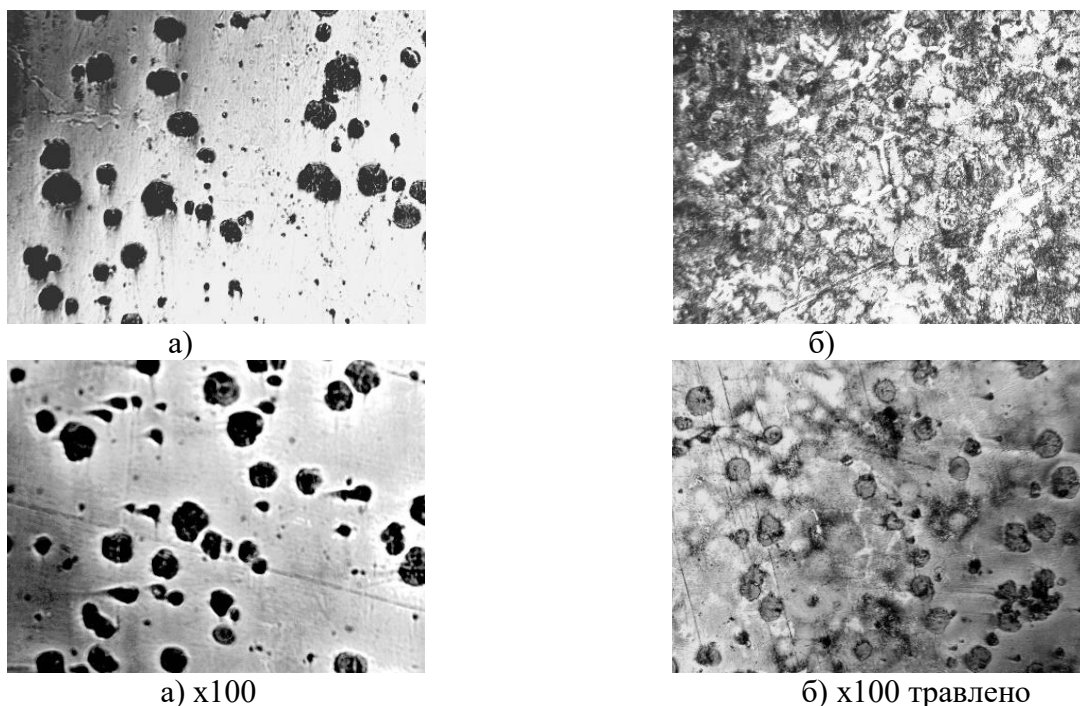


Рисунок 1– Микроструктура ЧШГ в литом состоянии (а) и после графитизирующего отжига (б)

На следующем этапе работы провели исследования микроструктуры и твердости закаленных образцов ЧШГ. Термообработка осуществлялась по следующим режимам. Нагрев до температуры 950 °С, выдержка 2 часа последующее охлаждение в течении 30 минут до температуры 850 °С и закалка как в воде, так и в масле. Установлено что твердость чугуна после закалки в воду составила 53–60 HRC, в масло этот показатель оказался несколько ниже 49–58 HRC. Металлографический анализ показал, что металлическая основа ЧШГ состоит из мартенсита и незначительного количества остаточного аустенита. Форма, распределение, размер и количество графитной фазы практически остались без изменения. Но вместе с тем в обоих образцах ЧШГ закаленных в воду и масло в структуре обнаружены трещины (рисунок 2).

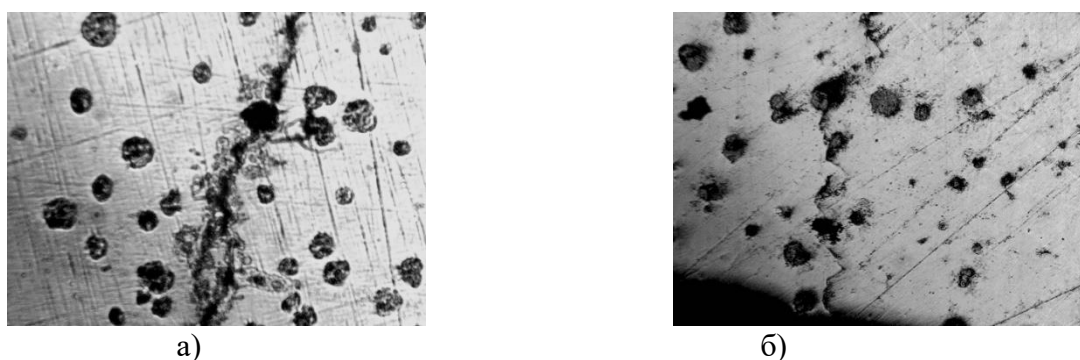
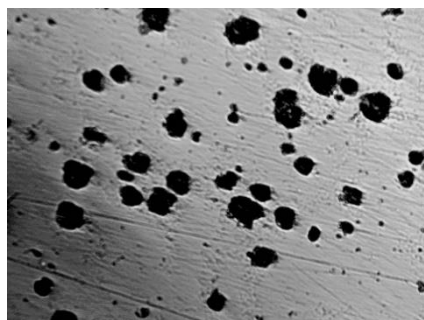
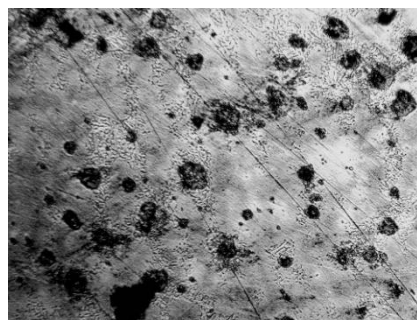


Рисунок 2– Трещины в ЧШГ после закалки (а) в масло, (б) в воду.

В связи с этим был скорректирован режим ТО за счет снижения температуры закалки до 800 °С, что позволило в дальнейшем исключить образование трещин в чугуне. Металлическая основа сплава представляет структуру закалки в виде мартенсита, а шаровидный графит имеет размер 25–45 мкм, при этом твердость чугуна составила 51–53 HRC. Микроструктура чугуна приведена на рисунке 3.



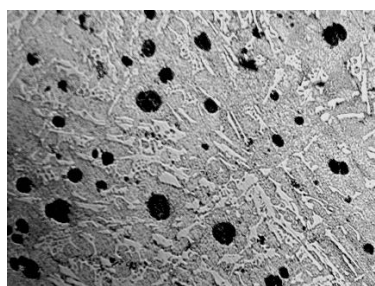
X100



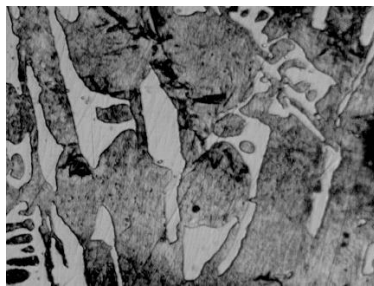
x100 травлено

Рисунок 3– Микроструктура ЧШГ после отжига (950 °С, выдержка 2 ч.) и закалки от 800 °С в масле.

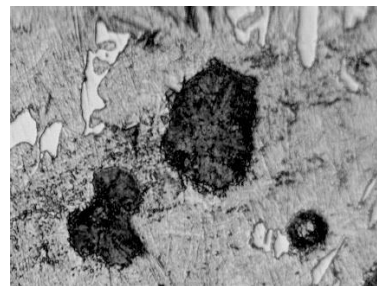
Термообработка ЧШГ по аналогичному режиму, но из литого состояния привела к повышению твердости до 54–59 HRC за счет наличия в структуре, наряду с мартенситом, значительного количества карбидной фазы, которая не смогла претерпеть превращение ввиду отсутствия выдержки чугуна перед закалкой. На рисунке 4 приведены фотографии микроструктуры ЧШГ при различном увеличении. Видно, что размер и количество шаровидного графита меньше, что также связано с отсутствием перед закалкой предварительного высокотемпературного отжига (рисунок 4).



X100



x500 травлено



x500 травлено

Рисунок 4– Микроструктура ЧШГ после закалки от 800 °С в масле из литого состояния.

На основании полученных результатов был рекомендован и реализован следующий режим термической обработки опытных отливок из ЧШГ. Графитизирующий отжиг при температуре 950 °С, выдержка в течении 2 часов и охлаждение с печью с целью проведения механической обработки отливок. Затем готовые детали подвергались объемной закалке в масло по режиму нагрев до температуры 800 °С, выдержка 0,3 часа. В дальнейшем отливки обрабатывали холодом для исключения из структуры остаточного аустенита при температуре –25 °С в течении 10 часов. На завершающем этапе провели низкотемпературный отпуск при температуре 200 °С в течение двух часов и опытные детали из ЧШГ переданы для проведения эксплуатационных испытаний.

Список использованных источников

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

2. Касперович, И.А. Анализ основных факторов, определяющих свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / И.А. Касперович, Е.А. Малышко, А.Г. Слуцкий, В.А. Шейнерт // Новые материалы и технологии их обработки: материалы XXII Респ. студ. научн.-техн. конф., Минск, 21-22 апреля 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т : ред. кол.: И.А Иванов [и др.]. – Минск, 2021. – С. 14-18.

3. Слуцкий, А.Г. Технологические особенности получения чугуна с шаровидным графитом / А.Г. Слуцкий, В.А. Шейнерт, И.А. Касперович, П.Д. Хорольский // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов* в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42 с.173-180.

4. Слуцкий, А.Г. Технологические особенности получения чугуна с шаровидным графитом / А.Г. Слуцкий, В.А. Шейнерт, И.Л. Кулинич, Н.А. Гулецкий, Д.С. Федорович // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов* в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 43 (в печати).