

ФОРМИРОВАНИЕ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОГО ЧУГУНА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВОДООХЛАЖДАЕМОЙ ФОРМЕ

Е.И. Марукович, д.т.н, проф., директор, В.Ф. Бевза, к.т.н., зав. лаб., В.П. Груша, к.т.н., с. н.с. ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» (г. Могилев, Беларусь) В.А. Красный, к.т.н., доцент Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург)

Приведено описание принципиально нового эффективного высокопроизводительного метода литья трубчатых заготовок без применения стержня. На примере заготовок детали «диск тормозной» машин свивки корда дан анализ формирования отливок из высокохромистого чугуна, приведены эксплуатационные характеристики деталей.

Существенно повысить качество отливок, физико-механические, специальные и эксплуатационные свойства чугуна можно не только путем оптимизации химического состава, использованием качественных исходных материалов, совершенствованием технологии приготовления расплава и модифицирования, но также за счет создания оптимальных условий кристаллизации металла и управления процессом структурообразования. В связи с этим основной целью настоящей работы является разработка и создание таких условий формирования отливок, которые исключают образование усадочной и газовой пористости и обеспечивают получение плотной мелкодисперсной металлической матрицы.

Одним из наиболее перспективных и эффективных способов решения поставленной задачи является создание технологий, основанных на организации направленного затвердевания металла за счет одностороннего теплоотвода и исключения дефицита жидкой фазы в течение всего времени формирования отливки, в том числе и в момент ее полного затвердевания. Поэтому технологи стараются обеспечить направленность затвердевания отливки за счет применения системы прибылей и холодильников. Однако это не всегда обеспечивает желаемый результат, увеличивает расход металла и снижает выход годного литья.

Схема литья полых заготовок

Метод литья полых цилиндрических заготовок в металлическую водоохлаждаемую форму без применения стержня, в основу которого заложен принцип направленности затвердевания металла,

с успехом используется для производства высококачественных изделий из специальных легированных чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом [1–3]. В предыдущей работе [3] авторами описан новый метод получения заготовок гильз цилиндров из низколегированного чугуна, используемых при ремонте блоков автомобильных двигателей и показавших высокое качество по износостойкости, пористости и других физико-механических характеристик.

Актуальным представляется решение задачи применения нового метода литья для получения заготовок из высоколегированных чугунов со специальными свойствами.

Решение этой задачи связано с развитием и совершенствованием нового метода литья для расширения номенклатуры изделий по материалам и геометрическим параметрам, в частности, определение возможности получения полых заготовок из белого высокохромистого чугуна (БВХЧ) для деталей работающих в условиях сухого трения и абразивного изнашивания.

Сущность усовершенствованного метода литья заключается в следующем. Жидкий металл через сифонную литниковую систему 1 подают в полость водоохлаждаемой формы, состоящей из стационарного 2 и подвижного 3 кристаллизаторов. После заполнения формы делают выдержку для формирования отливки 4 с заданной толщиной стенки (рис. 1, а). Затем отливку 4 подвижным кристаллизатором 3 полностью извлекают из расплава и стационарного кристаллизатора (рис. 1, б). После удаления отливки из подвижного кристаллизатора он опять устанавливается в исходное положение, в форму подают новую порцию расплава и намораживают следующую отливку 5 (рис. 1, в). Цикл повторяется.

Методика исследования и анализ формирования отливок

Экспериментальные исследования и получение образцов проводили на специальной литейной машине ЛЗМ-1 для литья полых заготовок без применения стержня методом направленного затвердевания. Формирование отливок осуществ-

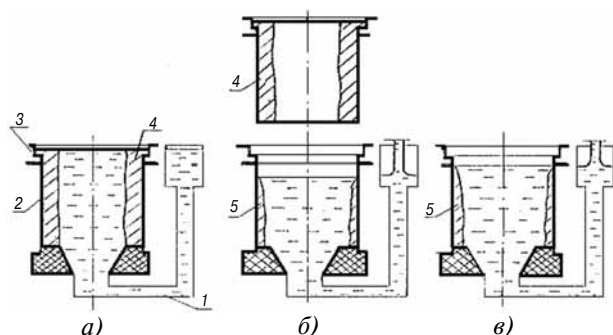


Рис. 1. Принципиальная схема литья полых заготовок намораживанием без стержня:

1 — литниковая система; 2 — стационарный кристаллизатор; 3 — подвижный кристаллизатор; 4 — сформированная отливка; 5 — формирующаяся отливка

вляли в кристаллизаторе со стальной рабочей втулкой. После извлечения из кристаллизатора отливки охлаждали с различной скоростью: на воздухе, в экранирующей камере, с выдержкой в печи сопротивления при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением на воздухе.

Исследование режимов закалки образцов проводили с использованием печи SNOL 30/1100 с программным управлением изменения температуры. Контроль температуры образцов осуществляли при помощи термопары ХА с записью показаний на приборе КСП4.

Микроструктуру образцов исследовали на микроскопе «Neophot-2» и «Carl Zeiss AxioTech 100 varion». Твердость чугуна определяли на приборах ТБ моделей ТШ-м и ТК-14-250. Химический анализ чугуна проводили на спектральной установке «Spectrolab M5» и на спектрографе ДСФ-8 с использованием микрофотометра МФ4 и спектрального анализатора УСА-1.

Для изготовления деталей, работающих в условиях сухого трения и интенсивного абразивного изнашивания, конструкторы довольно часто применяют дорогостоящие высоколегированные марки сталей. Например, на Белорусском металлургическом заводе (РУП БМЗ) в машинах для свивки корда используется деталь «диск тормозной», изготавливаемая из сталей Х12М, ШХ15, 18ХГТ и др. Эта деталь представляет собой фигурное кольцо с максимальным наружным диаметром 108 мм, внутренним — 81 мм. Ее изготовление из стального проката сплошного круглого сечения достаточно материалоемко и требует значительных энерго- и трудозатрат. При этом ресурс ее работы колеблется в пределах от трех до шести месяцев. Кроме того, дефицитность материала и отсутствие отечественного производителя создают дополнительные трудности.

Диск тормозной работает в паре с колодками из полимерного материала (политетрафторэтилена)

в условиях сухого трения. Качество свивки металлокорда и производительность канатного оборудования во многом определяется свойствами материала диска тормозного, поэтому особенно жесткие требования предъявляются к свойствам материала этой детали по твердости, износостойкости, шероховатости, т. е. к качеству полировки.

При разработке технологии литья методом направленного затвердевания в качестве базового сплава был выбран экономнолегированный безникелевый чугун с содержанием хрома 12–14 %. Важную роль в обеспечении износостойкости хромистых чугунов доэвтектического состава играют морфология и дисперсность ячеистой структуры эвтектики, в состав которой входит большая часть карбидов Me_7C_3 . Существенное значение имеет и структура металлической основы [4]. В этих чугунах основными элементами, которые влияют на формирование структуры, прокаливаемость и износостойкость, являются углерод и хром. Известно, что закаливаемость чугуна повышается с увеличением значения Cr/C . Чугуны с низким отношением Cr/C обычно легируют Mo , V , Cu , Ni и Mn [5]. При проведении исследований колебания этого параметра находились в пределах 3,7–4,8. Для улучшения прокаливаемости базовый сплав легировали молибденом и ванадием в десятых долях процентов (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав БВХЧ

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	P
Содержание, %	2,9–3,2	0,3–0,5	0,7–0,9	12,0–14,0	0,03–0,06	0,03–0,06	0,4–0,6	0,7–0,9	До 0,2

Наряду с химическим составом существенное влияние на структуру чугуна оказывают условия затвердевания металла. Одним из способов изменения морфологии карбидной фазы является кристаллизация при повышенной скорости охлаждения. Эффективное изменение среднего размера карбидов достигается при увеличении скорости охлаждения отливки более 10 К/мин (0,17 К/с). Снижение этой скорости приводит не только к укрупнению карбидов, но и к увеличению как размеров дендритов первичного аустенита в доэвтектических чугунах, так и расстояния между карбидами в эвтектике [6]. Повышенная скорость охлаждения отливок в процессе затвердевания является необходимым условием получения мелкодисперсной структуры чугуна и соответственно высоких эксплуатационных характеристик деталей.

Поэтому на начальной стадии исследований основная задача заключалась в разработке технических решений по осуществлению стабильного процесса литья заготовок заданной номенклатуры

(с толщиной стенки ~ 20 мм) методом направленного затвердевания. Дело в том, что БВХЧ по литейным и физическим свойствам значительно отличается от серого и высокопрочного чугуна. При литье в металлическую форму его линейная усадка близка к усадке углеродистой стали и составляет 2,3–2,7 %. Теплопроводность находится в пределах 12–15 Вт/м·К, жидкотекучесть более чем на 40 % меньше, чем серого чугуна [6]. Эти особенности определяют заметное уменьшение интенсивности теплоотвода от наружной поверхности затвердевающей отливки, что соответственно приводит к снижению массовой (рис. 2) и линейной (рис. 3) скорости затвердевания металла. Поэтому по сравнению с литьем серого чугуна требуется значительное увеличение времени формирования отливки в кристаллизаторе для получения заданной толщины стенки, что может приводить к перемерзанию литникового канала и прекращению процесса литья.

Разработанная специальная конструкция технологической оснастки и определение оптимальных режимов литья обеспечили стабильное ведение процесса и получение отливок с заданными геометрическими параметрами.

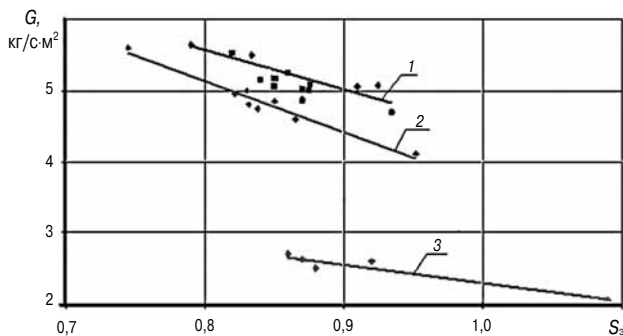


Рис. 2. Зависимость удельного темпа намораживания от степени эвтектичности чугуна:
1 — СЧ Ø100 мм; 2 — СЧ Ø157 мм; 3 — БВХЧ Ø114 мм

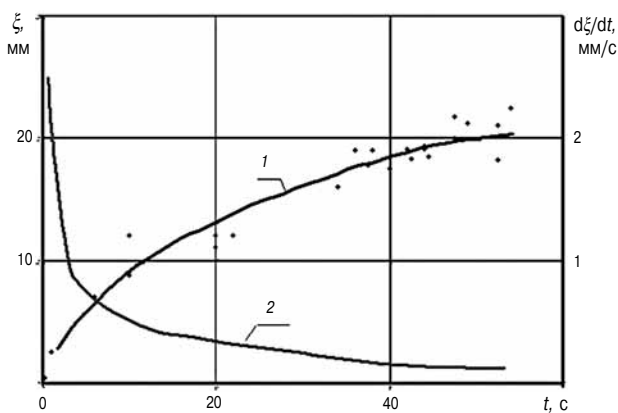


Рис. 3. Кинетика изменения толщины стенки отливки (1) и скорости затвердевания (2) белого высокохромистого чугуна

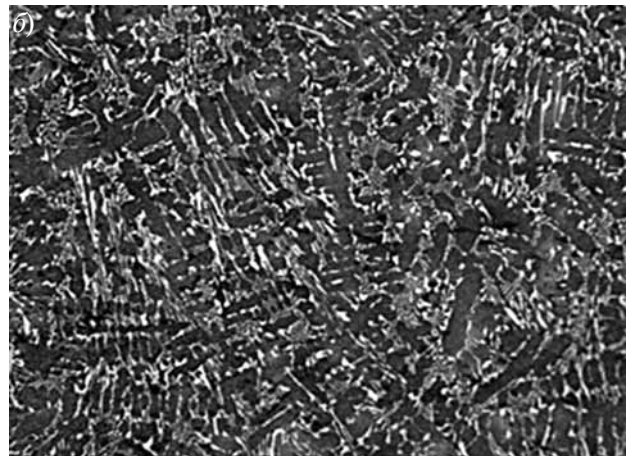
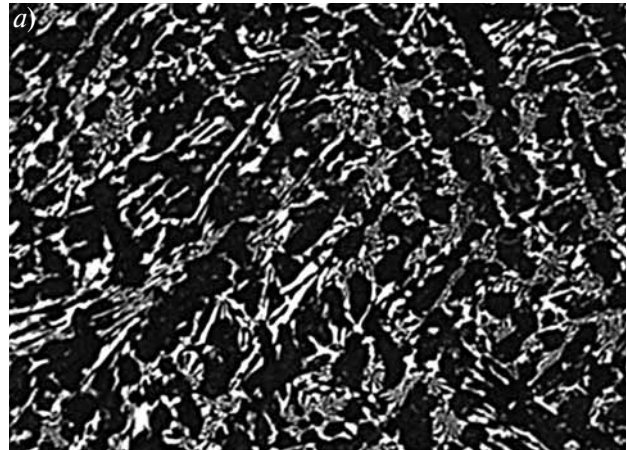


Рис. 4. Структура рабочей зоны заготовки в литом состоянии (×100):
а — стержневая форма; б — НЦЛН

Следует отметить, что несмотря на уменьшение интенсивности теплоотвода от затвердевающей отливки при литье БВХЧ по сравнению с литьем серого чугуна среднее значение скорости охлаждения отливки в условиях направленного затвердевания намного больше, чем при других методах литья и составляет более 4 К/с.

Высокая скорость и направленность затвердевания способствует ориентации карбидных включений в направлении теплоотвода и обеспечивает получение более мелкодисперсной структуры по сравнению с литьем чугуна такого же химического состава другими методами, например, в стержневую форму (рис. 4).

Термообработка хромистого чугуна

Твердость отливок в литом состоянии при охлаждении на воздухе после извлечения из кристаллизатора составляет 45–48 единиц HRC, что создает трудности при механической обработке.

Проблема улучшения обрабатываемости отливок из белых хромистых чугунов резанием имеет место при любом методе их получения. Основным средством ее решения является поиск оптимальных режимов термообработки (ТО)

для снижения твердости материала. Как правило, это довольно энергоемкая и длительная операция.

При литье заготовок из БВХЧ методом направленного затвердевания также необходимо было решить задачу снижения твердости отливок. Установлено, что выдержка образцов в течение ~ 3-х часов при температуре 980 °С и последующее их охлаждение в интервале температур 980–650 °С со скоростью около 50 К/ч обеспечивает снижение твердости до 29–32 HRC (табл. 2).

В реальных условиях, при получении опытных партий изделий (350 шт.), отжиг осуществлялся в едином технологическом цикле с процессом литья отливок методом направленного затвердевания в непрерывно-циклическом режиме. Сущность этой операции заключалась в том, что после извлечения из кристаллизатора каждой отливки, получаемой в процессе разлива, ее сразу помещали в печь, предварительно разогретую до 970–990 °С. При этом температура отливки составляла более 1000 °С. После окончания разлива печь закрывали и отливки выдерживали при температуре 980 °С около 3-х часов. Затем их охлаждали с печью до температуры 650 °С со скоростью около 50 К/ч, после чего печь открывали и охлаждали отливки до комнатной температуры.

Разработанный метод и режим ТО отливок с использованием первичного тепла позволил существенно сократить энергозатраты и продолжительность отжига. При этом снижение твердости чугуна до 29–31 HRC позволило производить механическую обработку лезвийным инструментом с твердосплавными пластинами типа ВК8 с удовлетворительной производительностью и высоким качеством обработанных поверхностей.

Для получения необходимой твердости (≥ 57 HRC) и определения рациональных режимов ТО деталей после механической обработки провели исследования по выявлению взаимосвязи температуры, времени выдержки и скорости охлаждения с твердостью чугуна. Закалку проводили от температуры 1030, 1000, 980 и 950 °С при времени выдержки 120, 60, 30, 15 мин с изменением скорости охлаждения от 37 до 15 К/с (рис. 5). Установлено, что закалка от температуры 950 °С и времени выдержки 15 мин при индивидуальном охлаждении деталей на

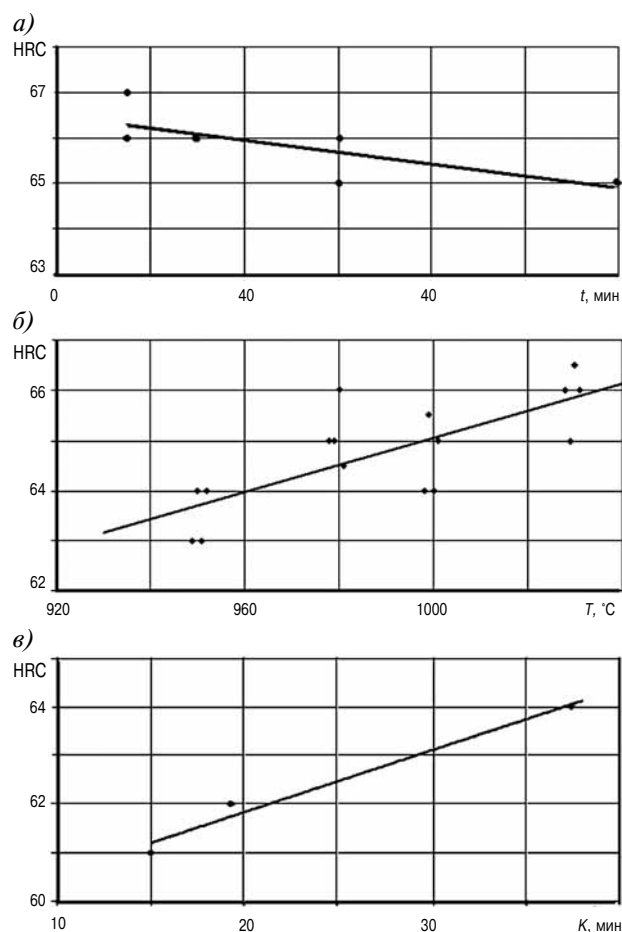


Рис. 5. Зависимость твердости БВХЧ:

a — от времени выдержки при температуре закалки 1030 °С; *б* — от температуры закалки (время выдержки при температуре закалки — 15 мин); *в* — от скорости охлаждения

воздухе в естественных условиях обеспечивает получение твердости в пределах 62–64 HRC. Разница в значениях твердости по периметру и толщине стенки детали не превышает 2 HRC.

Структура детали после закалки представляет собой мелкодисперсные карбиды равномерно распределенные в мартенситной металлической матрице (рис. 6). После отпуска с выдержкой в течение 1 часа при температуре 250 °С твердость чугуна снижается на 1–2 единицы по шкале HRC. В связи с тем что деталь работает в условиях сухого трения без ударных нагрузок, опытно-промышленные партии дисков тормозных отпуску не подвергали.

Таблица 2

Режимы отжига заготовок из БВХЧ

Режим отжига	Температура загружаемой в печь отливки, °С	Температура отжига, °С	Время выдержки, ч	Средняя скорость охлаждения в интервале 980–650 °С, К/ч	Твердость, HRC
1	25	980	6	Не более 150	33–35
2	Около 1000	980	4	Не более 80	30–32
3	Около 1000	980	3	Не более 50	29–31

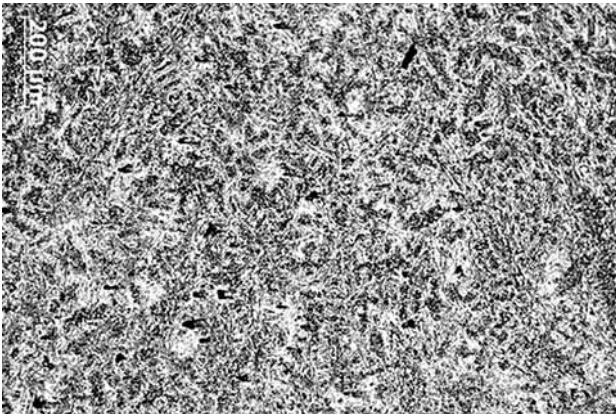


Рис. 6. Структура рабочей зоны детали после закалки

По результатам эксплуатации опытно-промышленных партий дисков тормозных на РУП БМЗ были проведены технологические исследования и сравнение технологических параметров работы дисков, изготовленных из специального чугуна по новой технологии, и серийных из стали Х12М, для выявления соотношения цена—качество. Оценивались следующие показатели: стабильность натяжения тонкой проволоки; коэффициент трения на поверхности тормозного диска и тормозного механизма в целом; качество свивки; производительность канатного оборудования, характеристики деталей по износостойкости, твердости, шероховатости рабочей поверхности.

Установлено, что все показатели соответствуют проектной документации и оцениваются по высшим баллам. Особо отмечается высокая износостойкость опытных дисков. Контроль этого параметра за период непрерывной работы в течение более трех месяцев показал, что износа на рабочей поверхности тормозных дисков не наблюдалось.

Выводы

Определены исходные данные для разработки литейно-термической технологии получения по-

лых заготовок из БВХЧ методом направленного затвердевания. Разработан ресурсосберегающий метод отжига отливок с использованием их первичного тепла в едином неразрывном технологическом цикле «литье—термическая обработка».

Затвердевание БВХЧ в условиях высокой скорости охлаждения отливки обеспечивает получение дисперсной карбидной эвтектики в литом состоянии. Мелкодисперсная структура чугуна сохраняется и после высокотемпературной термической обработки. Решающая роль в наследовании чугуном положительного эффекта направленного затвердевания расплава состоит в формировании плотной структуры и более дисперсной карбидной эвтектики с благоприятной морфологией карбидов, что определяет высокую износостойкость чугуна и эксплуатационные характеристики деталей.

Литература

1. Современные литейные технологии: монография / Н.К. Толочко [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2009. — 359 с.
2. *Marukovich Y.I., Beuza U.F.* Fundamentally New Effective Process of Casting of Hollow Cylindrical Billets of Cast Iron by the Method of Directional Solidification // *Key Engineering Materials*. — 2011. — Vol. 457. — P. 465–469.
3. *Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Богданов Б.И., Красный В.А.* Литье полых цилиндрических заготовок из чугуна методом пристеночной кристаллизации // *Двигателестроение*. — 2013. — № 3 (253). — С. 23–27.
4. *Савина Л.Г., Барышев Е.Е., Филиппов М.А.* Влияние высокотемпературной обработки расплава на формирование структуры и износостойкость белого хромистого чугуна // *Известия вузов. Черная металлургия*. — 2008. — № 2. — С. 45–47.
5. *Шебашинов М.П., Болдырев Е.В.* Влияние термообработки на структуру и свойства белого чугуна // *Литейное производство*. — 1987. — № 2. — С. 8.
6. Чугун: Справочн. изд./под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. — М. : Металлургия, 1991. — 576 с.