

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.74.047

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ф. БЕВЗА, В. П. ГРУША

НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОЕ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Институт технологии металлов НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 20.09.2013)

Введение. 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.

Цель настоящей статьи – разработка и создание таких условий формирования отливок, которые исключают образование усадочной и газовой пористости и обеспечивают получение плотной мелкодисперсной металлической матрицы и благоприятной морфологии графита.

Одним из наиболее перспективных и эффективных способов решения такой задачи является создание технологий, основанных на организации направленного затвердевания металла за счет одностороннего теплоотвода и исключения дефицита жидкой фазы в течение всего цикла 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 не всегда можно получить желаемый результат, так как увеличивается расход металла и снижается выход годного литья.

Принципиальная схема литья. В Институте технологии металлов НАН Беларуси разработан новый метод литья полых цилиндрических заготовок намораживанием без применения стержня, в основу которого положен принцип направленности затвердевания металла [1]. Суть его 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 вновь устанавливается в исходное положение, в форму подают новую порцию расплава и намораживают следующую отливку 5 (рис. 1, в). Цикл повторяется.

При литье по этому методу наружная поверхность отливки ограничивается металлической водоохлаждаемой формой – кристаллизатором, а внутренняя поверхность определяется только фронтом затвердевания и получается непосредственно из расплава. Затвердевание металла в пристеночной зоне кристаллизатора происходит непрерывно в течение всего времени разлива, а извлечение отливок осуществляют циклически с заданным периодом. При этом в осевой зоне кристаллизатора в течение всего времени литья находится жидкий металл, который постоянно обновляется после извлечения каждой отливки за счет порционной подачи перегретого расплава через сифонную литниковую систему из заливочного ковша. Эта масса расплава в центральной зоне кристаллизатора является как бы «прибылью» для кристаллизующейся присте-

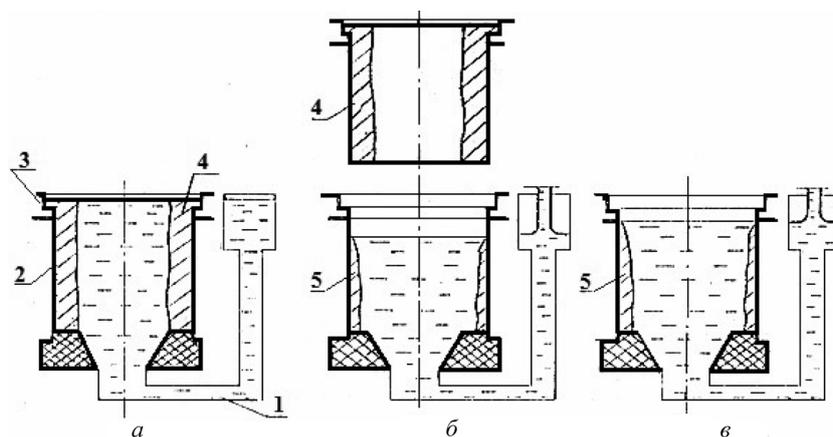


Рис. 1. Этапы формирования отливок (а, б, в) и принципиальная схема литья полых заготовок намораживанием без стержня: 1 – литниковая система; 2 – стационарный кристаллизатор; 3 – подвижный кристаллизатор; 4 – сформированная отливка; 5 – формирующаяся отливка

ночной корки. Сопряжение данной «прибыли» с отливкой в течение всего времени формирования осуществляется не через ограниченное сечение (питатель), а по всему фронту внутренней цилиндрической поверхности затвердевающей отливки. Это является принципиальным отличием нового метода от всех существующих способов по условиям организации фазового перехода металла из жидкого в твердое состояние. Именно эти условия при интенсивном одностороннем теплоотводе обеспечивают высокое качество материала и могут придавать ему новые свойства.

Следует также отметить еще одну особенность нового метода. В момент извлечения из кристаллизатора наружная поверхность отливки имеет температуру 900–1150 °С (в зависимости от типа чугуна и геометрических параметров отливки), а внутренняя поверхность – температуру солидуса. Это позволяет за счет создания определенного режима охлаждения получить заданные структуры чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом, белого высокохромистого чугуна и др., а также снизить термические напряжения в отливке. Указанные операции проводятся либо полностью без применения внешних источников энергии, либо со значительным снижением ее расхода за счет использования первичного тепла самих отливок.

Таким образом, основными принципиальными преимуществами нового метода являются:

сочетание интенсивного одностороннего теплоотвода с постоянным избыточным питанием фронта затвердевания перегретым расплавом в течение цикла формирования отливки в кристаллизаторе, определяющее получение плотной мелкодисперсной структуры и исключаящее появление усадочной и газовой пористости, раковин, неметаллических включений и т. п.;

возможность управления процессом структурообразования чугуна вне формы за счет использования первичного тепла отливки, температура которой после извлечения из кристаллизатора всегда выше 900 °С;

отсутствие внутреннего стержня определяет свободную усадку затвердевающей и охлаждающейся отливки и исключает возникновение больших напряжений и брак по горячим трещинам;

высокая производительность процесса литья за счет большой скорости затвердевания металла и получения заготовок мерной длины без операции порезки в условиях непрерывной разливки.

Формирование отливок из чугуна с пластинчатым графитом. Исследования проводили на нелегированном чугуне с пластинчатым графитом, содержащим 3,2–3,4 мас.% С; 1,8–2,3 мас.% Si; 0,6–0,9 мас.% Mn и на высоколегированном хромистом чугуне с содержанием 2,9–3,2 мас.% С; 0,3–0,5 мас.% Si; 0,7–0,9 мас.% Mn; 12–14 мас.% Cr. Экспериментальные образцы отливок в виде полых заготовок трубчатой формы диаметром 70–120 мм, высотой 250 мм получали на установках непрерывно-циклического литья намораживанием в водоохлаждаемые кристаллизаторы со стальной рабочей втулкой. Приготовление расплава осуществляли в индукционной печи с кислой футеровкой. Исследование структуры чугунов проводили с помощью микро- и рентгеноструктурного анализов.

Анализ условий формирования отливки из чугуна с пластинчатым графитом показал, что в начальный момент кристаллизации при непосредственном контакте жидкого металла с рабочей поверхностью кристаллизатора скорость затвердевания чугуна превышает 3 мм/с. Это объясняется большой интенсивностью теплоотвода в этот момент, так как между кристаллизатором и начальной коркой практически отсутствует газовый зазор, а плотность теплового потока q на рабочей поверхности кристаллизатора составляет $(4,5-5,0) \cdot 10^6$ Вт/м². По мере намораживания твердой корки скорость затвердевания уменьшается и на 20-й секунде формирования отливки составляет примерно 0,4 мм/с, что определяется существенным снижением интенсивности теплоотвода ($q \leq 0,5 \cdot 10^6$ Вт/м²) в связи с образованием и ростом величины газового зазора и термического сопротивления нарастающей корки твердого металла.

По мере роста затвердевающего слоя отливки градиент температуры $dT/d\xi$ на фронте кристаллизации и скорость изменения температуры dT/dt уменьшаются (рис. 2, кривые 1 и 2 соответственно). На рис. 2 кривая 2 определяет скорость изменения температуры в слое, примыкающем к поверхности кристаллизации толщиной 1 мм. При намораживании первых 2–3 мм металла скорость изменения температуры составляет примерно 450 К/с. С увеличением толщины стенки до 12 мм ее значение не превышает 10 К/с.

Скорость охлаждения металла определяет размер и характер расположения дендритов. Структура чугуна имеет дисперсное строение. С ростом толщины намерзшей корки размер дендритов ξ увеличивается (рис. 2, кривая 3).

Свойства чугуна определяются не только строением дендритного каркаса, но и плотностью дендритной структуры γ , которая оценивалась отношением площади, занятой дендритами, к площади междендритных участков. В наружной зоне отливки плотность дендритов высока (рис. 2, кривая 4). С переходом в средние слои величина плотности структуры несколько снижается за счет роста в междендритных участках количества эвтектики, однако на внутренней поверхности ее значение больше величины плотности дендритной структуры отливок, изготовленных в песчаной форме.

Описанный метод с успехом используется для производства высококачественных изделий из низколегированных чугунов с пластинчатым графитом. Структура отливок из чугуна перлитного класса в максимальной степени соответствует требованиям, предъявляемым к машиностроительным деталям ответственного назначения. Материал отливок имеет высокую дисперсность металлической основы и благоприятное строение графитовой фазы. Прочностные характеристики чугуна на 25–30 % выше по сравнению с аналогом, получаемым в облицованном кокиле, а эксплуатационные свойства изделий на 15–20 % выше, чем при литье заготовок другими методами. Полномасштабные стендовые испытания гильз цилиндров разных производителей показали, что гильзы, полученные методом намораживания, в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к форсированным дизелям: их прочностные показатели превышают аналогичные характеристики серийных гильз [2].

Таким образом, метод литья намораживанием обеспечивает получение полых заготовок типа втулок с плотной мелкодисперсной структурой, заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими свойствами чугуна. При этом производительность процесса получения заготовок с толщиной стенки 12–13 мм составляет около 120 шт./ч.

Формирование отливок из хромистого чугуна. В настоящее время актуальной является задача расширения номенклатуры изделий по геометрическим параметрам и материалам, получаемых методом намораживания. В частности, большой интерес представляет получение заготовок из легированных чугунов для деталей, работающих

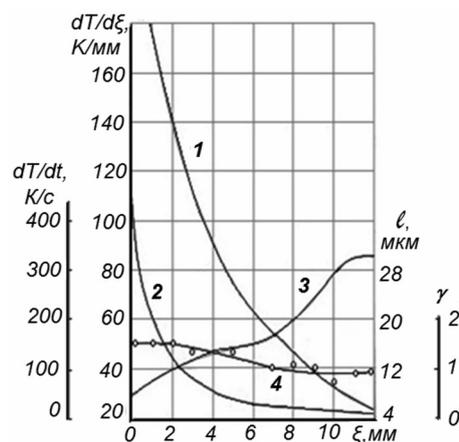


Рис. 2. Зависимость градиента температуры $dT/d\xi$ (1), скорости изменения температуры dT/dt (2), расстояния между осями второго порядка l (3) и плотности дендритной структуры γ (4) от толщины намерзшей корки металла

в условиях сухого трения и абразивного изнашивания. Для последних часто применяются дорогостоящие высоколегированные марки сталей. Например, в машинах для свивки металлокорда используется деталь «диск тормозной», которая представляет собой фигурное кольцо наружным диаметром 108 мм, внутренним диаметром 81 мм. Данная деталь во многом определяет качество свивки и производительность канатного оборудования. Ее изготавливают из легированных сталей ШХ15, 18ХГТ, Х12М и др. Диск тормозной работает в паре с колодками из полимерного материала (политетрафторэтилена) в условиях сухого трения. Ресурс работы колеблется в пределах 3–6 мес. Выход деталей из строя определяется изнашиванием рабочей поверхности и уменьшением ее размера за пределы допустимого.

При разработке технологии литья заготовок методом намораживания в качестве базового сплава выбран экономнолегированный безникелевый чугун с содержанием хрома 12–14 мас.%. 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 [3]. В этих чугунах 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 [4]. 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) [5].

Таблица 1. Химический состав хромистого чугуна

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	P
Содержание, мас.%	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 существенно влияют на структуру чугуна условия затвердевания металла. Эффективное изменение среднего размера карбидов достигается при увеличении скорости охлаждения отливки более 10 К/мин (0,17 К/с). Снижение данного параметра 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.

При литье намораживанием скорость затвердевания чугуна зависит от химического состава (степени эвтектичности S_3), интенсивности теплоотвода, геометрических параметров отливки, режима разливки, температурных параметров расплава. По литейным и физическим свойствам хромистый чугун значительно отличается от серого (СЧ) и высокопрочного чугунов. При литье в металлическую форму его линейная усадка близка к усадке углеродистой стали и составляет

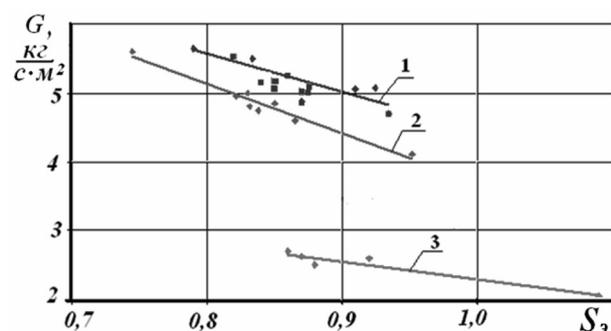


Рис. 3. Зависимость удельного темпа намораживания от степени эвтектичности чугуна: 1 – СЧ диаметром 100 мм; 2 – СЧ диаметром 157 мм; 3 – хромистый чугун диаметром 114 мм

2,3–2,7 %. Теплопроводность находится в пределах 12–15 Вт/(м·К), жидкотекучесть на 40 % меньше, чем у серого чугуна [2]. Данные особенности определяют заметное уменьшение интенсивности теплоотвода от наружной поверхности затвердевающей отливки, что соответственно приводит к снижению скорости затвердевания металла (рис. 3). Поэтому по сравнению с литьем серого чугуна требуется некоторое увеличение времени формирования отливки в кристаллизаторе для получения заданной толщины стенки, что может привести к перемерзанию литникового канала и прекращению процесса литья.

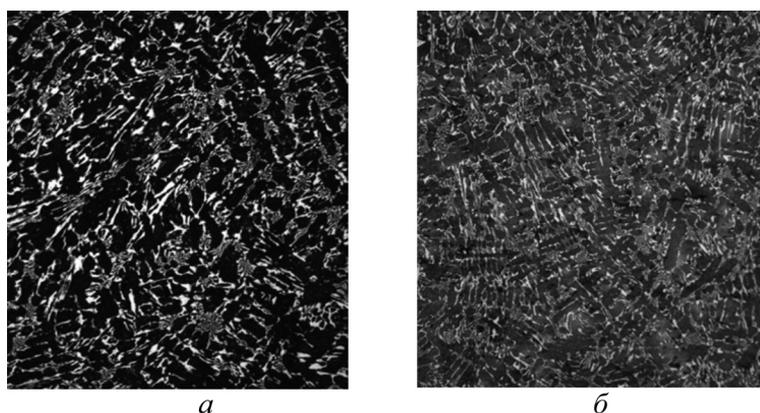


Рис. 4. Структура рабочей зоны заготовки в литом состоянии ($\times 100$): *a* – литье в стержневую форму; *б* – литье намораживанием

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

Следует отметить, что несмотря на уменьшение интенсивности теплоотвода от затвердевающей отливки при получении заготовок из хромистого чугуна среднее значение скорости ее охлаждения в условиях литья намораживанием намного больше, чем при других методах, и составляет более 4 К/с.

Высокая скорость и направленность затвердевания способствуют ориентации карбидных включений в направлении теплоотвода и обеспечивают 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 HRC, что создает трудности при механической обработке.

Проблема улучшения обрабатываемости отливок из белых хромистых чугунов резанием имеет место при любом методе их получения. Основным способом ее решения является поиск оптимальных режимов термообработки для снижения твердости материала. Как правило, это довольно энергоемкая и длительная операция.

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

Т а б л и ц а 2. Режимы отжига заготовок из хромистого чугуна

Режим отжига	Температура загружаемой в печь отливки, °С	Температура отжига, °С	Время выдержки, ч	Средняя скорость охлаждения в интервале 980–650 °С, К/ч	HRC
1	25	980	6	Не более 150	33–35
2	Около 1 000	980	4	Не более 80	30–32
3	Около 1 000	980	3	Не более 50	29–31

В реальных условиях при получении опытных партий изделий отжиг осуществлялся в едином технологическом цикле с процессом литья отливок методом намораживания. Суть этой операции заключалась в том, что после извлечения из кристаллизатора каждой отливки, температура которой составляла около 1000 °С, ее сразу помещали в печь, предварительно разогретую до 970–990 °С. После окончания разливки печь закрывали и отливки выдерживали при 980 °С около 3 ч. Затем их охлаждали с печью до 650 °С со скоростью около 50 К/ч, после чего печь открывали и отливки охлаждали до комнатной температуры.

Разработанный метод литья и режим термообработка отливок с использованием первичного тепла позволили существенно сократить энергозатраты и продолжительность отжига. При этом снижение твердости чугуна до 29–31 HRC способствовало проведению механической обработки лезвийным инструментом с твердосплавными пластинами типа BK8 с удовлетворительной производительностью и высоким качеством обработанных поверхностей.

Для получения необходимой твердости чугуна в деталях (62–64 HRC) производили их закалку с охлаждением на воздухе. Исследования и анализ влияния времени выдержки, температуры и скорости охлаждения детали на твердость чугуна показали, что закалка от 950 °С и выдержка при этой температуре в течение 15 мин при индивидуальном охлаждении деталей на воздухе в естественных условиях обеспечивают получение твердости в заданных пределах. Разница значений твердости по периметру детали не превышает 2 HRC.

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

По результатам эксплуатации опытно-промышленных партий дисков тормозных проведены технологические исследования и сравнение технологических параметров работы дисков, изготовленных из специального чугуна по новой технологии, и серийных дисков из стали X12M. 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 3 мес показал, что износа на рабочей поверхности тормозных дисков не наблюдалось.

Для реализации нового метода литья полых заготовок был создан комплекс специального оборудования и технологической оснастки. Литейная машина с возвратно-вращательным перемещением рабочего органа имеет следующие технические характеристики: размеры отливок: наружный диаметр 70–220 мм, высота 100–250 мм, толщина стенки 10–30 мм; производительность 60–180 шт./ч; расход оборотной охлаждающей воды 20 м³/ч; привод пневматический; рабочее давление воздуха 0,5 МПа; расход воздуха 100 нм³/ч; электрическая система управления; масса 1500 кг; габаритные размеры машины 1000×1500×2000 мм.

Заключение. Определены тепловые условия формирования отливок из чугуна с пластинчатым графитом при интенсивном одностороннем теплоотводе. Показано, что литье трубчатых заготовок методом намораживания обеспечивает получение отливок с плотной мелкодисперсной структурой, заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими свойствами. При этом производительность получения заготовок с толщиной стенки 12–13 мм составляет более 120 шт./ч.

Установлены исходные данные для разработки литейно-термической технологии получения заготовок из хромистого чугуна методом намораживания. Разработан ресурсосберегающий метод отжига отливок с использованием их первичного тепла в едином неразрывном технологическом цикле литье – термическая обработка.

Затвердевание хромистого чугуна в условиях литья намораживанием при 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 положительного эффекта кристаллизации чугуна в условиях высокой интенсивности теплоотвода и постоянного избыточного питания фронта затвердевания жидкой фазой 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. *Marukovich Y. I., Beuza U. F.* // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 457. P. 465–469.
2. *Бодяко А. М., Бевза В. Ф., Галагаев С. В.* и др. // Металлургия машиностроения. 2006. № 3. С. 30.
3. *Савина Л. Г., Барышев Е. Е., Филиппов М. А.* // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 2. С. 45–47.
4. *Шебастинов М. П., Болдырев Е. В.* // Литейное производство. 1987. № 2. С. 8.
5. *Марукович Е. И., Карпенко М. И., Бевза В. Ф., Груша В. П.* Пат. 13451 РБ, С22С Износостойкий чугун.; Заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси». 2009.01.29. Офиц. бюлл. 2010. № 4. С. 111.
6. Чугун: Справочн. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова М., 1991.

Y. I. MARUKOVICH, U. F. BEUZA, V. P. GRUSHA

CONTINUOUS-ITERATIVE CASTING BY THE FREEZING-UP METHOD

Summary

Description of the principally new and efficient high-performance casting method for production of tube billets without application of a core is adduced. Analysis of formation of billets produced out of high-chromium cast iron is given through the example of «brake disk» billet for cord twisting machines. Performance characteristics of parts are presented. Technical characteristics of the casting equipment are specified.