

ЛИТЬЕ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНА МЕТОДОМ ПРИСТЕНОЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

*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)
Б.И. Богданов к.т.н., с.н.с, ген. директор,
ООО «Моторесурс» (Санкт-Петербург)
В.А. Красный, к.т.н., доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург)*

Дано описание и преимущества принципиально нового эффективного метода литья полых цилиндрических заготовок без применения стержня. Проведен анализ формирования отливок из чугуна с пластинчатым графитом при высокой интенсивности теплоотвода. Показано, что метод пристеночной кристаллизации обеспечивает получение заготовок гильз цилиндров с плотной мелкодисперсной структурой, заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Приведена характеристика гильз цилиндров различных производителей

Полые цилиндрические заготовки из чугуна для гильз цилиндров, поршневых и уплотнительных колец, различные втулки для пар трения традиционно отливают в песчано-глинистые или стержневые формы, облицованный кокиль или центробежным способом. Однако качество деталей и ресурс их работы не всегда удовлетворяют все возрастающим современным требованиям. Основным недостатком существующих методов является то, что они не обеспечивают необходимых условий для получения бездефектных отливок. Дело в том, что в форме затвердевает все количество залитого расплава. При этом образуется, как минимум, два фронта затвердевания движущихся к тепловому центру отливки. В месте стыка фронтов, в связи с усадкой металла, создается дефицит жидкой фазы при затвердевании последних порций расплава, что приводит к образованию усадочных раковин и пористости. Это существенно снижает прочностные характеристики детали и часто принципиально недопустимо. Поэтому технологи всегда стараются обеспечить направленность затвердевания металла за счет применения прибулей и холодильников. Однако это не всегда обеспечивает желаемый результат, увеличивает расход металла и снижает выход годного литья [1].

Целью настоящей работы является представление принципиально новой схемы литья полых цилиндрических заготовок из чугуна, основанной на однонаправленном теплоотводе при постоянном обильном питании фронта затвердевания перегретым расплавом в течение всего времени формирования отливки в металлической водоохлаждаемой форме, а также разработка литейно-термической технологии получения полых заготовок гильз цилиндров из низколегированного серого чугуна в непрерывно-циклическом режиме.

Принципиальная схема литья и механизм формирования отливки

В институте технологии металлов НАН Беларуси разработан новый метод литья полых цилиндрических заготовок без применения стержня (рис. 1), в основу которого заложен принцип направленности затвердевания металла [2–4]. Жидкий металл через сифоновую литниковую систему 1 и соединительный стакан 2 подают в стальной водоохлаждаемый кристаллизатор, состоящий из стационарной 3 и подвижной 4 частей, до его заполнения на высоту, равную высоте получаемой отливки 5. Затем подачу металла прекращают и делают выдержку для намораживания стенки заготовки необходимой толщины. Затвердевшую корку 5, составляющую тело отливки, извлекают захватами 4 вверх из расплава и стационарного кристаллизатора 3 на величину, превышающую его высоту. Одновременно с началом извлечения заготовки расплав, находящийся в ее осевой части, попадает на освобождающиеся участки рабочей втулки кристаллизатора 3 и начинается намораживание следующей отливки.

В это время в кристаллизатор через сифонную литниковую систему, обеспечивающую плавное заполнение, подают новую порцию расплава объемом, равным объему извлеченной отливки, возвращают подвижную часть кристаллизатора в исходное положение и вновь заполняют его до заданного уровня. Цикл повторяется.

Таким образом, при литье по этому методу наружная поверхность отливки ограничивается

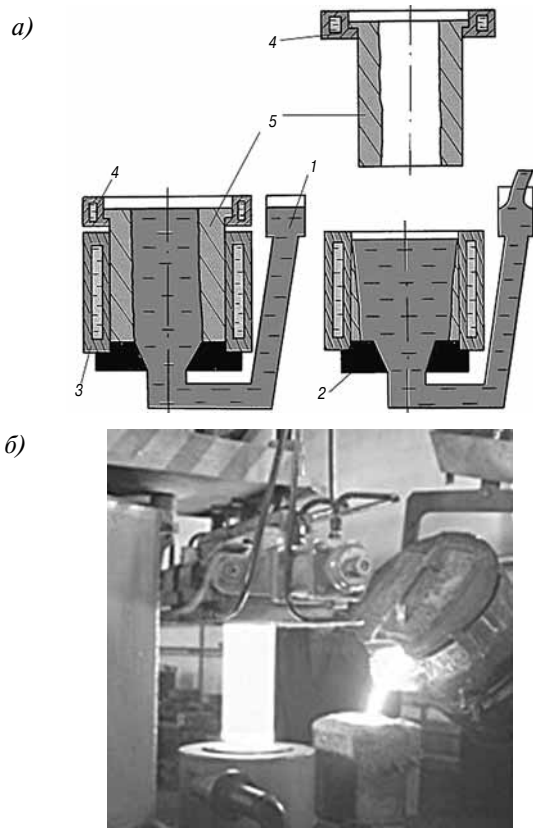


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и процесс непрерывно-циклического литья полых заготовок без стержня (б): 1 — металлопровод; 2 — соединительный стакан; 3 — стационарная часть кристаллизатора; 4 — подвижная часть кристаллизатора (захваты); 5 — отливка

металлической водоохлаждаемой формой — кристаллизатором, а внутренняя определяется только фронтом затвердевания и получается непосредственно из расплава. Затвердевание металла в пристеночной зоне кристаллизатора происходит непрерывно в течение всего времени разливки, а извлечение отливок осуществляют циклически с заданным периодом, т. е. их получение происходит в непрерывно-циклическом режиме литья (НЦЛ). Причем в каждом цикле затвердевает только периферийная часть объема жидкого металла, участвующего в формировании данной отливки. Следовательно, толщина корочки, получающаяся к концу затвердевания отливки, всегда меньше радиуса внутренней полости кристаллизатора. При этом жидкий металл, находящийся в осевой зоне кристаллизатора, 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 пристеночной корки. Причем сопряжение этой «прибыли» с отливкой в течение всего времени

формирования осуществляется не через ограниченное сечение (питатель), а по всему фронту внутренней цилиндрической поверхности затвердевающей отливки. Это принципиальное отличие нового метода от всех существующих по условиям организации фазового перехода металла из жидкого состояния в твердое. Именно эти условия при интенсивном одностороннем теплоотводе обеспечивают высокое качество материала и могут придавать ему новые свойства.

При НЦЛ, как и при любом другом виде литья, качество заготовок, в первую очередь, определяется характером теплоотвода от затвердевающей отливки и условиями ее взаимодействия с формой. Это взаимодействие начинается с момента контакта жидкого металла с рабочей поверхностью кристаллизатора. В месте контакта начинается и последовательно протекает затвердевание корочки металла в радиальном направлении в глубь расплава. При этом дендриты в структуре отливок растут нормально, т. е. перпендикулярно поверхности теплоотвода и наружной поверхности формирующейся отливки. Именно такое расположение структурных составляющих обеспечивает максимально высокую износостойкость рабочей поверхности деталей типа тел вращения.

Этому методу присуща еще одна важная особенность. В момент извлечения из кристаллизатора и расплава отливка имеет высокую температуру: на внутренней поверхности — температуру солидуса, на наружной — 900–1000 °С. Это дает возможность управлять процессом структурообразования чугуна в зоне вторичного охлаждения за счет использования первичного тепла отливки путем регулирования интенсивности теплоотвода от нее.

Таким образом, принципиально новыми преимуществами описанной схемы литья и условий формирования отливок по сравнению со всеми существующими методами являются:

- сочетание интенсивного одностороннего теплоотвода с постоянным избыточным питанием фронта затвердевания перегретым расплавом в течение всего времени 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 $A_{с3}$;

- 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.

Исследование затвердевания отливки, структура и свойства

Анализ условий формирования отливки из серого низколегированного чугуна показал, что в момент контакта жидкого металла с рабочей поверхностью кристаллизатора и затвердевания начальной пристеночной корки толщиной около $\xi = 3$ мм плотность теплового потока (q) на этой поверхности находится в пределах $(25-20) \cdot 10^5$ Вт/м². Затвердевание наружной зоны при этих условиях происходит со скоростью $(3-2)$ мм/с (рис. 2). По мере нарастания корки q уменьшается и при $\xi = 10$ мм составляет около $6,0 \cdot 10^5$ Вт/м², а скорость затвердевания снижается до $0,7$ мм/с. При затвердевании последующих слоев q падает до $(5-3) \cdot 10^5$ Вт/м², а скорость затвердевания до $(0,6-0,3)$ мм/с.

Специфические тепловые условия затвердевания металла способствуют формированию нескольких структурных зон по толщине стенки отливки. Кристаллизация чугуна доэвтектического состава начинается с образования дендритов аустенита. При затвердевании в эвтектическом интервале температур наружная зона отливки формируется по метастабильной системе с образованием ледебуритной эвтектики, в которой

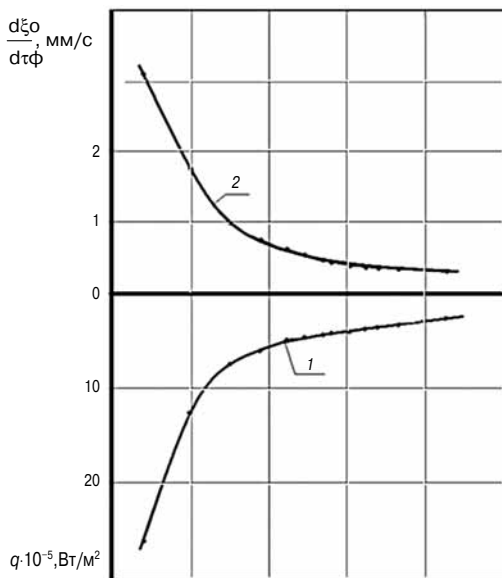


Рис. 2. Изменение удельного теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора (1) и скорости затвердевания чугуна (2) в процессе формирования пристеночной корки отливки

углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Условия формирования наружной зоны определяют наличие в ней графита переохлаждения, имеющего междендритное (ПГр8) расположение с размером включений ПГд15–ПГд25. Внутренняя зона отливки формируется с образованием аустенитно-графитной эвтектики, средняя имеет переходную структуру. Величина равномерно распределенных графитовых включений в этих зонах составляет ПГд45–ПГд90, а металлическая матрица характеризуется перлитной структурой. Дисперсность перлита (ПД 0,5 ... ПД1,0). Мелкозернистая фосфидная эвтектика расположена в виде разорванной сетки ФЭр2, ФЭп2000 (рис. 3).

Следует указать, что для деталей, у которых наружная поверхность является рабочей (поршневые и уплотнительные кольца, шестерни, червячные колеса и т. п.), структура отливок с точечными и мелкодисперсными включениями графита переохлаждения междендритного расположения является дефектной и должна уходить в припуск на механическую обработку. Толщина зоны с дефектной структурой со стороны наружной поверхности отливки может составлять $(2,5-3,5)$ мм. Поэтому эту зону необходимо исключить либо свести к минимуму.

Для устранения или минимизации дефектной зоны необходимо применять меры, связанные с повышением эффективности процесса модифицирования, нейтрализацией вредных примесей и увеличением скорости затвердевания отливки [5]. При НЦЛ скорость затвердевания чугуна достаточно высока. Поэтому решение этой задачи было осуществлено за счет двойного инокулирования жидкого чугуна: в индукционной печи путем засыпки графита ГЛС-3 на мениск расплава за 3–5 минут до вылива из печи и в ковше — укладка модификатора на дно перед заполнением жидким металлом. Кроме того, был применен смесевой модификатор (ФС75+ФС65Ba4+ГЛС-3) и разработана методика периодического долива нормированных порций модифицированного расплава в разливочный ковш в течение всей кампании разливки, что обеспечило оптимальный термовременной интервал действия модификатора.

Известно, что модификаторы с активными элементами, в том числе и с барием, значительно эффективнее, чем ФС75, способствуют графитизации чугуна и снижают его склонность к отбелу [6]. При вводе в исходный расплав чугуна кремнистых модификаторов, содержащих такие активные элементы, как кальций, стронций, барий, РЗМ, последние вступают в реакцию с компонентами чугуна и образуют оксиды, сульфиды и карбиды.

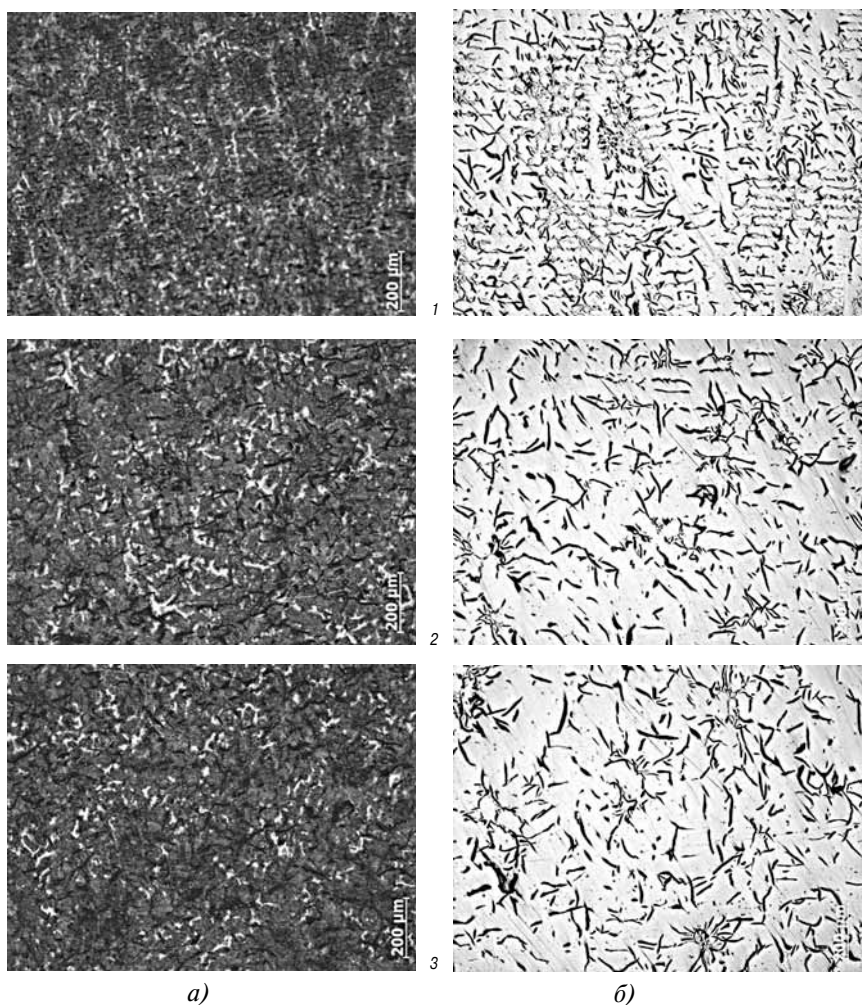


Рис. 3. Структура наружной (1), средней (2) и внутренней (3) зон по толщине стенки отливки:

а — металлическая матрица; *б* — распределение и форма графитовых включений

Термодинамический анализ реакций взаимодействия бария при температурах расплава показывает наибольшее сродство бария к кислороду, затем к сере и далее к углероду. При введении модифицирующей Si-присадки с активными элементами в расплав чугуна частицы лигатуры, как и ферросилиция, растворяясь, создают вокруг себя локальные зоны повышенной концентрации Si, в которых растворимость углерода снижается и повышается его активность к выделению из раствора в виде графита. При этом активные элементы, входящие в состав комплексных модификаторов, имея повышенное сродство к кислороду, связывают последний в этой локальной зоне и в виде оксидных неметаллических включений всплывают в шлак.

В результате в локальной зоне вокруг растворившейся частицы модификатора создается область повышенного содержания Si (до 25 %) и пониженного — кислорода, которые в совокупности обеспечивают рост активности углерода, очищение границ раздела фаз от поверхностно

активного кислорода и тем самым создают благоприятные условия для выделения графита и роста его включений [7].

Следует отметить еще один аспект новой технологии, связанный с наследственностью структуры и свойств литых сплавов. Как уже указывалось, при НЦЛ формирование отливки в кристаллизаторе происходит в условиях скоростной кристаллизации. Заложенные при такой кристаллизации фазово-структурные особенности строения металла, ответственные за формирование механических свойств, не только наследуются и в определенной мере сохраняются при последующих переплавах, но могут быть усилены целенаправленным изменением температурно-временных условий кристаллизации [8]. В связи с этим собственный возврат производства (кусковой и дисперсный-стружка), используемый при шихтовке для последующей переплавки, оказывает модифицирующее воздействие на расплав и способствует повышению механических свойств отливок

Как уже указывалось, на конечную структуру чугуна значительное влияние оказывает режим вторичного охлаждения. Например, при литье заготовок наружным диаметром 105 мм и массой около 9 кг, в момент извлечения из кристаллизатора ее наружная поверхность имеет температуру 950–980 °С, а внутренняя — температуру солидуса. Вне кристаллизатора, вследствие уменьшения интенсивности теплоотвода, происходит перераспределение температуры по толщине стенки, и температура наружной поверхности отливки повышается до 1020–1050 °С. В результате появляется возможность в достаточно широких пределах изменять интенсивность отвода тепла от отливки и соответственно оказывать влияние на процессы структурообразования. Например, для разложения цементита отливку в течение 120–150 с выдерживают при высокой температуре. Это осуществляют за счет первичного тепла без применения внешних источников энергии путем максимально возможного снижения скорости охлаждения на первой стадии (0,1–0,5 К/с) в интервале температур 1000–800 °С. Дальнейшее

охлаждение отливки на воздухе вполне обеспечивает полную перлитизацию металлической матрицы (рис. 3, а).

Структура получаемых методом пристеночной кристаллизации отливок из низколегированного 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 при литье в облицованный кокиль, а эксплуатационные свойства готовых изделий на 15–20 % выше, чем при литье заготовок другими методами. Проведенные специалистами Минского моторного завода (ММЗ) полномасштабные стендовые испытания гильз цилиндров разных производителей показали, что гильзы, полученные НЦЛ, в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к форсированным дизелям — их прочностные показатели превышают аналогичные характеристики серийных гильз, в том числе фирмы «Ичин», Чехия (таблица [9]).

Характеристика заготовок гильз цилиндров различных производителей

	ИТМ НАН Беларуси	ОАО «Мотордеталь»	«Ичин», Чехия
Среднее давление разрушения, МПа	48,8	33,1	42,0
σ_b , МПа	327–360	260–280	280–310
Расход топлива, г/кВт·ч	225,2	—	222,9
Расход масла, %	0,32	—	0,36
Давление картерных газов, Па	250	—	280
Расход картерных газов, л/мин	55	—	59
Средний износ, мкм	0–21,3	—	0–31,3

Заключение

Таким образом, метод пристеночной кристаллизации обеспечивает получение заготовок гильз цилиндров 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. в час.

Опыт использования заготовок из низколегированного чугуна для производства гильз цилиндров, используемых при ремонте блоков широкого круга автомобильных двигателей как отечественного, так и иностранного производства (с диаметром цилиндра от 65 до 100 мм), показал

их высокое качество как по износостойкости, пористости, так и по другим физико-механическим характеристикам.

Новый метод литья уже с успехом применяется при производстве полых цилиндрических заготовок различного назначения из низколегированного чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом. Хорошие результаты получены также при литье заготовок из белого высокохромистого чугуна для деталей, работающих в условиях сухого трения, абразивного и гидроабразивного износа. Большой интерес представляет развитие метода в направлении разработки технологий литья заготовок из высоколегированных чугунов (сплавов) для деталей, работающих в экстремальных условиях: при повышенных и отрицательных температурах, в агрессивных средах и т. п.

Литература

1. Бевза В.Ф. Литье заготовок для гильзования блока цилиндров двигателей автомобилей / В.Ф. Бевза, Б.И. Богданов, В.А. Красный, В.С. Мазько // Литье и металлургия. — 2000. — № 4. — С. 34–36.
2. Марукович Е.И. Реализация концепции пристеночной кристаллизации для получения высококачественных полых цилиндрических заготовок из чугуна / Е.И. Марукович, В.Ф. Бевза, В.П. Груша // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин. Сб. научн. тр. VI МНТК. — Новополоцк, 2007. — С. 33–35.
3. Марукович Е.И. Теоретические и технологические основы литья полых заготовок направленным затвердеванием / Е.И. Марукович, В.Ф. Бевза, А.М. Бодяко, В.П. Груша // Сб. Технологии литья и металлургии. Минск : Навука, 2010. — С. 27–43.
4. Marukovich Y.I. Fundamentally New Effective Prozess of Casting of Hollow Cylindrical Billets of Cast Iron by the Metod of Directional Solidification / Y.I. Marukovich, U.F. Beuza // Key Engineering Materials. — 2011. — Vol. 457. — P. 465–469.
5. Андреев В.В. Особенности формирования и морфология графито-аустенитных эвтектик в чугунах / В.В. Андреев // Литейное производство. — 2006. — № 4. — С. 15–17.
6. Усманов Р.Г. Сравнительные исследования эффективности графитизирующих модификаторов с различным содержанием бария / Р.Г. Усманов, И.В. Рябчиков и др. // Литейное производство. — 2006. — № 4. — С. 21–22.
7. Андреев В.В. Роль активных элементов в повышении эффективности графитизирующих модификаторов / В.В. Андреев, Л.С. Капустина // Литейное производство. — 2006. — № 4. — С. 18–20.
8. Кондратюк С.Е. Наследственность структуры и свойств стали С.Е. Кондратюк // Литейное производство. — 2008. — № 9. — С. 6–10.
9. Получение гильз цилиндров для дизельных двигателей литьем намораживанием / А.М. Бодяко, В.Ф. Бевза, С.В. Галагаев и др. // Металлургия машиностроения. — 2006. — № 3. — С. 30–34.