



УДК 621.74.047

Поступила 24.03.2014

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ф. БЕВЗА, В. П. ГРУША, Институт технологии металлов НАН Беларуси

## НЕПРЕРЫВНО–ЦИКЛИЧЕСКОЕ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

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. Дана техническая характеристика литейного оборудования.

The description of the principally new effective highly-productive method of molding of tubular metalblocks without core application is provided. Analysis of formation of billets castings from high-chromium cast iron on the example of slugs of the detail “brake disk” of the cord twist machine is given, operational characteristics of the details are provided. The technical description of the foundry equipment is given.

### 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. В связи с этим основной идеей настоящей работы является 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 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.

### Принципиальная схема литья

В Институте технологии металлов НАН Беларуси разработан новый метод литья полых цилин-

дрических заготовок намораживанием без применения стержня, в основу которого заложен принцип направленности затвердевания металла [1]. Сущность 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 опять 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 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

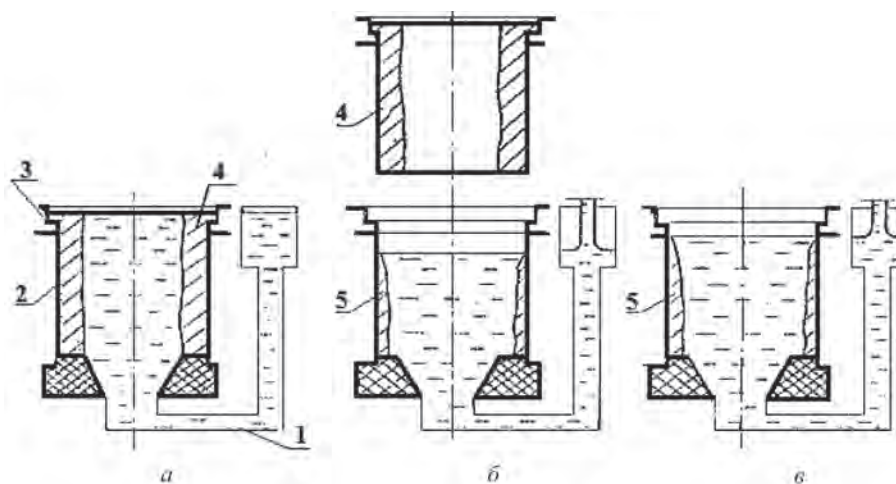


Рис. 1. Принципиальная схема литья полых заготовок намораживанием без стержня: 1 – литниковая система; 2 – стационарный кристаллизатор; 3 – подвижный кристаллизатор; 4 – сформированная отливка; 5 – формирующаяся отливка

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.

Следует подчеркнуть также еще одну особенность нового метода. В момент извлечения из кристаллизатора наружная поверхность отливки составляет 900–1150 °С (в зависимости от типа чугуна и геометрических параметров отливки), а внутренняя имеет температуру солидуса. Это позволяет за счет создания определенного режима охлаждения получать заданную структуру чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом, белого высокохромистого чугуна и др., а также снизить термические напряжения в отливке. Причем 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 всего времени формирования отливки в кристаллизаторе, определяющее получение плотной мелкодисперсной структуры и исключающее появ-

ление 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, содержащем 3,2–3,4 % С; 1,8–2,3 % Si; 0,6–0,9 % Mn и на высоколегированном хромистом чугуне с содержанием 2,9–3,2 % С; 0,3–0,5 % Si; 0,7–0,9 % Mn; 12–14 % 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 анализа.

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 затвердева-

ния 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/м<sup>2</sup>. По мере намораживания твердой корки скорость затвердевания падает и на 20-й секунде формирования отливки составляет ~ 0,4 мм/с. Это определяется существенным снижением интенсивности теплоотвода ( $q \leq 0,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) к этому моменту в связи с образованием и ростом газового зазора и увеличением 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). На рис. 2 кривая 2 определяет скорость изменения температуры в слое, примыкающем к поверхности кристаллизации толщиной 1 мм. При намораживании первых 2–3-х мм металла скорость изменения температуры составляет ~ 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 корочки размеры дендритов ( $\xi$ ) увеличиваются (рис. 2, кривая 3).

Свойства чугуна определяются не только строением дендритного каркаса, но и плотностью дендритной структуры ( $\gamma$ ), которая оценивалась отношением площади, занятой дендритами, к площади междендритных участков. В наружной зоне отливки плотность дендритов высокая (рис. 2, кривая 4). С переходом в средние слои плотность структуры

несколько падает за счет увеличения в междендритных участках количества эвтектики, но и на внутренней поверхности она больше 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 облицованный кокиль, 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 в условиях сухого трения и абразивного изнашивания. Для деталей, работающих в таких условиях, 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 – 81 мм. Эта деталь во многом определяет качество свивки и производительность канатного оборудования. Изготавливают ее из легированных сталей ШХ15, 18ХГТ, Х12М и др. Диск тормозной работает в паре с колодками из полимерного материала (политетрафторэтилена) в условиях сухого трения.

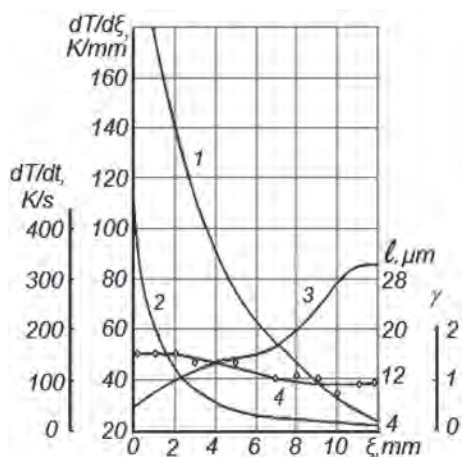


Рис. 2. Зависимость градиента температуры  $dT/d\xi$  (1), скорости изменения температуры  $dT/dt$  (2), расстояния между осями второго порядка  $l$  (3) и плотности дендритной структуры  $\gamma$  (4) от толщины намерзшей корочки металла

Ресурс работы колеблется в пределах 3–6 мес. Выход из строя определяется изнашиванием рабочей поверхности и уменьшением ее размера за пределы допустимого.

При разработке технологии литья заготовок методом намораживания 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 [3]. В этих чугунах основными элементами, которые влияют на формирование структуры, прокаливаемость и износостойкость, являются углерод и хром. Известно, что закаляемость 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].

Наряду с химическим составом существенное влияние на структуру чугуна оказывают условия затвердевания металла. 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.

При литье намораживанием скорость затвердевания чугуна зависит от химического состава (степени эвтектичности  $S_3$ ), интенсивности теплоотвода от геометрических параметров отливки, режима разливки, температурных параметров расплава. По литейным и физическим свойствам хромистый чугун значительно отличается от серого и высокопрочного. 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), жидкотекуче-

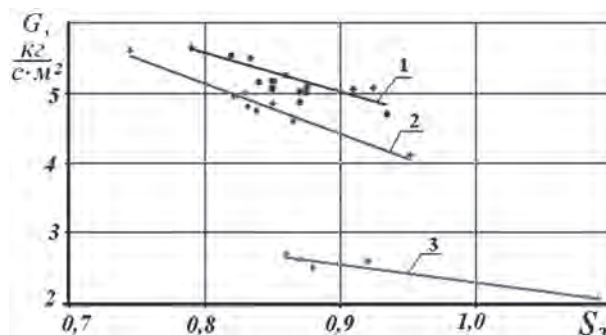


Рис. 3. Зависимость удельного темпа намораживания от степени эвтектичности чугуна: 1 – СЧ диаметром 100 мм; 2 – диаметром 157 мм; 3 – хромистый чугун диаметром 114 мм

сть более чем на 40 % меньше, чем серого чугуна [2]. Эти 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 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.

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

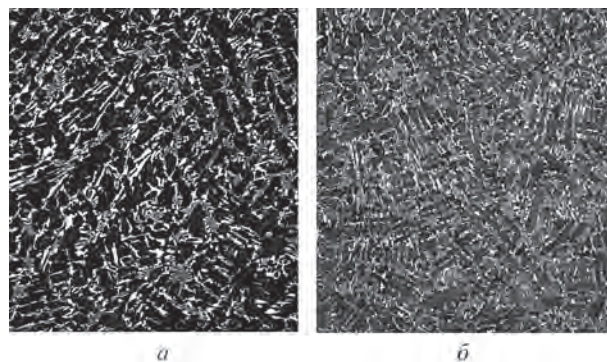


Рис. 4. Структура рабочей зоны заготовки в литом состоянии: а – литье в стержневую форму; б – литье намораживанием. ×100

Таблица 1. Химический состав хромистого чугуна

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

больше, чем при других методах и составляет более 4 К/с.

Высокая скорость и направленность затвердевания способствуют 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 ед. HRC, что создает трудности при механической обработке.

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

При литье заготовок методом намораживания также необходимо было решить задачу снижения твердости отливок. Установлено, что выдержка образцов в течение ~ 3 ч 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 отжиг осуществлялся в едином технологическом цикле с процессом литья отливок методом намораживания. Сущность 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 разлива печь закрывали и отливки выдерживали при температуре 980 °С около 3 ч. 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 литья и режим ТО отливок с использованием первичного тепла позволил существенно сократить энергозатраты и продолжительность отжига. При этом снижение твердо-

сти чугуна до 29–31 HRC позволило производить механическую обработку лезвийным инструментом с твердосплавными пластинами типа ВК8

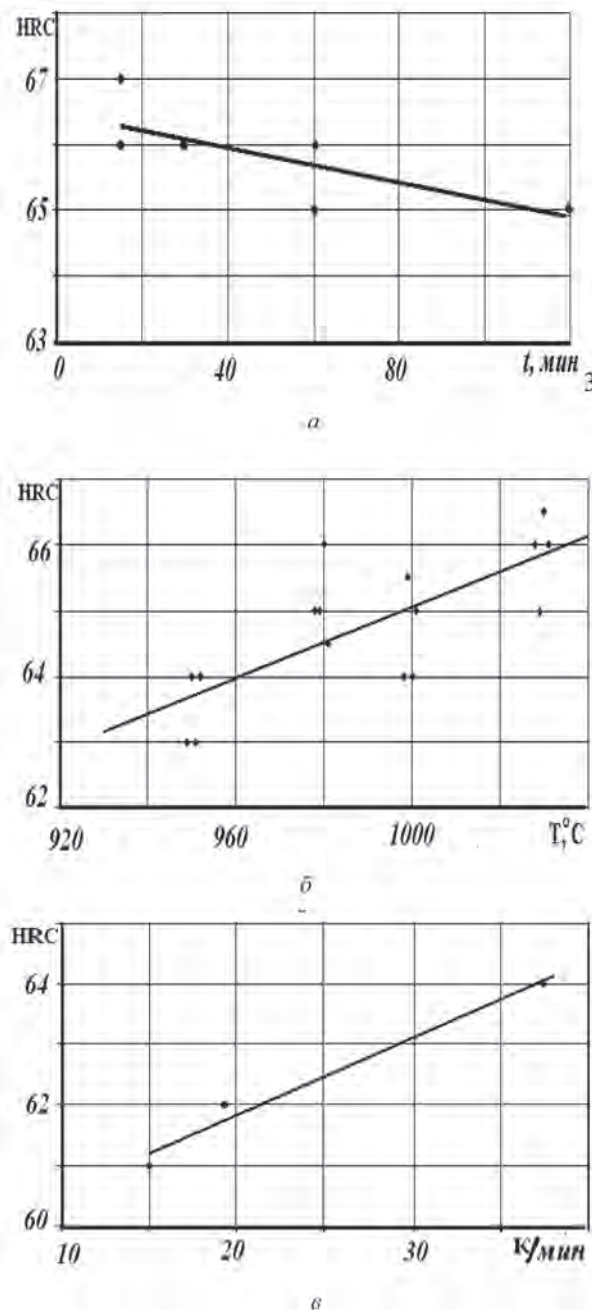


Рис. 5. Зависимость твердости хромистого чугуна от времени выдержки при температуре закалки 1030 °С (а); от температуры закалки (время выдержки при температуре закалки – 15 мин) (б); от скорости охлаждения (в)

Таблица 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	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

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 температуры 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 (рис. 5). Разница значений твердости по периметру детали не превышает 2 ед.

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 ед. 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.

По результатам эксплуатации опытно-промышленных партий дисков тормозных были проведены технологические исследования и сравнение технологических параметров работы дисков, изготовленных из специального чугуна по новой технологии, и серийных из стали X12M. Оценивали 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, мм:	
наружный диаметр .....	70–220
высота .....	100–250
толщина стенки .....	10–30
Производительность, шт/ч .....	60–180
Расход оборотный охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч .....	20
Привод .....	Пневматический
Рабочее давление воздуха, МПа ....	0,5
Расход воздуха, нм <sup>3</sup> /ч .....	100
Система управления .....	Электрическая
Масса, кг .....	1 500
Габаритные размеры машины, мм ...	1000×1500×2000

### Выводы

1. 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.

2. 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».

3. 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. 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.
2. Бодяко А. М. 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.

3. С а в и н а Л. Г. Влияние высокотемпературной обработки расплава на формирование структуры и износостойкость белого хромистого чугуна / Л. Г. Савина, Е. Е. Барышев, М. А. Филиппов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 2. С. 45–47.
4. Ш е б а т и н о в М. П. Влияние термообработки на структуру и свойства белого чугуна / М. П. Шебастинов, Е. В. Болдырев // Литейное производство. 1987. № 2. С. 8.
5. Пат. № 13451 Республика Беларусь, С22С. Износостойкий чугун / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко, В. Ф. Бевза, В. П. Груша; Заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси». 2009.01.29. Офиц. бюлл. 2010. № 4. С. 111.
6. Чугун:Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.