

**Е.И. Марукович, В.Ф. Бевза, В.П. Груша,
В.А. Красный**

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Приведено описание принципиально нового эффективного высокопроизводительного метода литья трубчатых заготовок направленным затвердеванием без применения стержня. Рассмотрено влияние различных факторов формирования заготовок из серого легированного чугуна с пластинчатым графитом на структуру, свойства и ресурс работы деталей ответственного назначения, дан анализ формирования отливок из высокохромистого чугуна. 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. Показано, что новый метод литья обеспечивает получение заготовок с заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Приведены примеры деталей машин, для которых предложенный метод апробирован и получены положительные результаты: гильзы и поршневые кольца двигателей внутреннего сгорания, тормозные диски машин для свивки корда, червячные колеса и другие. Рассмотрены перспективы применения предлагаемого метода для повышения эксплуатационных свойств деталей горных машин, в частности, деталей: «Втулка» и «Каток» ходовой части горного проходческого комбайна и «Втулка» узла сочленения шагающего экскаватора. Ключевые слова: эксплуатационные свойства, горные машины, легированный чугун, направленное затвердевание, микроструктура, трубчатая заготовка, структурообразование.

Введение

Разработка новых материалов и перспективных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик и срока службы изделий, отвечающих уровню требований современного производства и конкурентоспособности на международных рынках, была и остается актуальной задачей общего и

горного машиностроения. Одним из наиболее распространенных конструкционных материалов является чугун. Существенно повысить качество деталей из чугуна (гильзы цилиндров, поршневые и уплотнительные кольца, червячные колеса, шестерни, втулки различного назначения и др.) и их эксплуатационные свойства можно не только легированием, модифицированием, внешним воздействием на кристаллизующийся расплав и т.п., но также за счет создания оптимальных условий затвердевания металла и управления процессом структурообразования.

Структура и свойства чугуна в значительной степени зависят от интенсивности теплоотвода в период первичной кристаллизации и условий последующего охлаждения. В этой связи режим охлаждения с регулируемой скоростью в определенном интервале температур является эффективным средством управления процессом структурообразования чугуна [1].

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 [2, 3].

Целью настоящей работы является представление принципиально новой схемы литья полых цилиндрических заготовок из легированного чугуна, основанной на однонаправленном теплоотводе при постоянном обильном питании фронта затвердевания перегретым расплавом в течение всего времени формирования отливки в металлической водоохлаждаемой форме, позволяющей получать заготовки с заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Описание принципиальной схемы технологического процесса

Сущность предлагаемого метода 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* 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

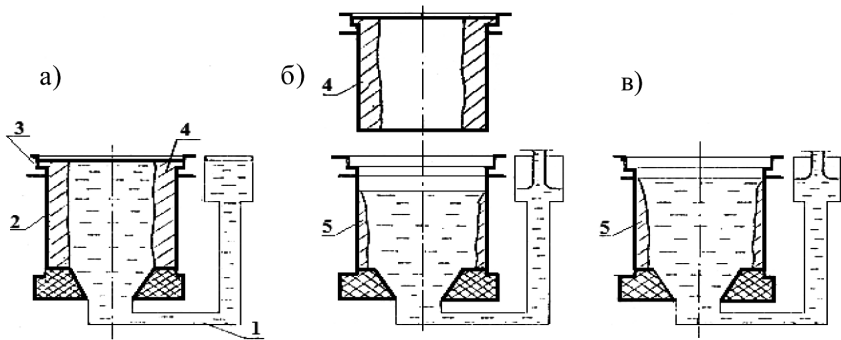


Рис. 1. Принципиальная схема литья полых заготовок без стержня: 1 – литниковая система; 2 – стационарный кристаллизатор; 3 – подвижный кристаллизатор; 4 – сформированная отливка; 5 – формирующаяся отливка

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 разливки, а извлечение отливок осуществляют циклически с заданным периодом, т.е. их получение происходит в непрерывно-циклическом режиме литья (НЦЛ). 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 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 является принципиальным отличием 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 около 1000 °С, а внутренняя имеет температуру солидуса. Это позволяет за счет создания определенного режима охлаждения получать заданную структуру чугуна, а также снизить термические напряжения в отливке.

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 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, а также 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.

Методика исследований и обсуждение результатов

Экспериментальные исследования и получение образцов проводили на специальной литейной машине ЛЗМ-1 для литья полых заготовок без применения стержня методом направленного затвердевания. Формирование отливок осуществляли в кристаллизаторе со стальной рабочей втулкой.

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.

Анализ условий формирования отливки из серого низколегированного чугуна показал, что в момент контакта жидкого металла с рабочей поверхностью кристаллизатора и затверде-

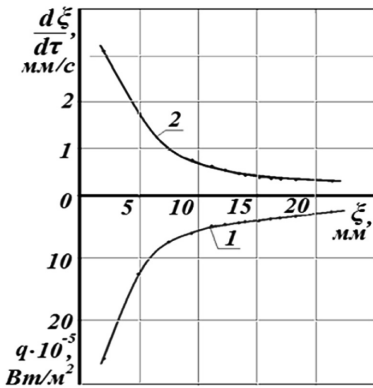


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока на рабочей поверхности кристаллизатора (1) и скорости затвердевания чугуна (2) в процессе формирования пристеночной корки отливки

Величина равномерно распределенных графитовых включений в этих зонах составляет ПГд45 – ПГд90, а металлическая матрица характеризуется перлитной структурой. Дисперсность перлита (ПД 0,3...ПД1,0). Мелкозернистая фосфидная эвтектика расположена в виде разорванной сетки ФЭр2, ФЭп2000.

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 [4]. 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.

Результаты успешного применения данного метода для изготовления деталей ответственного назначения освещены в ряде публикаций [5–8]. В работе [5] отмечается, что применение

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.

Специфические тепловые условия затвердевания металла в наружной зоне отливки определяют возможность наличия в ней графита переохлаждения, имеющего междендритное (ПГр8) расположение с размером включений ПГд15 – ПГд25. Внутренняя зона отливки формируется с образованием аустенитно-графитной эв-

поршневых колец тепловозных дизелей (рис. 3, а) из низколегированного чугуна с пластинчатым графитом (СЧХН), полученного методом направленного затвердевания, позволило существенно снизить брак по литейным дефектам, получить высокую дисперсность макро- и микроструктуры, повысить износостойкость поршневых колец. Эксплуатационные испытания, проведенные на тепловозных дизелях 10Д100 и двигателях дизель-поездов, показали, что износостойкость поршневых колец, изготовленных по новой технологии, на 15–20% выше колец серийного производства. Степень снижения упругости для них в 1,3 раза меньше, чем у аналогичных колец серийного производства. Более высокие характеристики колец получены за счет формирования дисперсной матрицы (ПД 0,3–0,5) и оптимальной морфологии графита.

Структура отливок из низколегированного чугуна перлитного класса, получаемых методом направленного затвердевания, в максимальной степени соответствует требованиям, предъявляемым к машиностроительным деталям ответственного назначения, в том числе к гильзам цилиндров (рис. 3, б). Прочностные характеристики чугуна на 25–30% выше по сравнению с аналогом, получаемым при литье в облицованный кокиль, а эксплуатационные свойства изделий на 15–20% выше, чем при литье другими методами. Стендовые испытания гильз цилиндров разных производителей показали, что гильзы, полученные по методу направленного затвердевания, в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к форсированным дизелям — их прочностные показатели превышают аналогичные характеристики серийных гильз, в том числе фирмы «Ичин» Чехия [6].

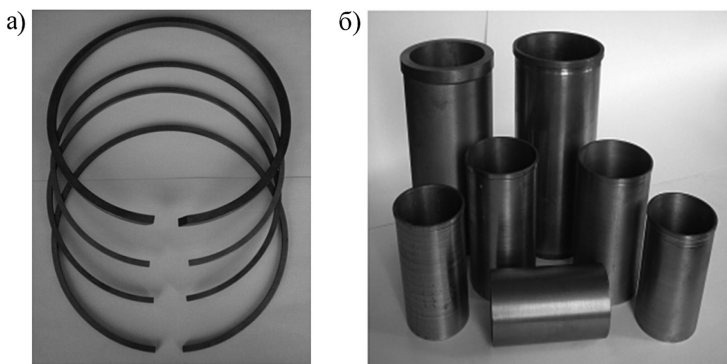


Рис. 3. Поршневые кольца (а) и гильзы цилиндров (б) из серого специального чугуна

Уникальные результаты были получены при литье заготовок из белого высокохромистого чугуна (БВХЧ) с карбидами тригонального типа (Me_7C_3).

Наряду с химическим составом существенное влияние на структуру чугуна оказывают условия затвердевания металла. Известно, что эффективное изменение среднего размера карбидов достигается при увеличении скорости охлаждения отливки более 10 К/мин (0,17 К/с) [9]. 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. Повышенная скорость охлаждения отливок в процессе затвердевания является необходимым условием получения мелкодисперсной структуры чугуна и соответственно высоких эксплуатационных характеристик деталей.

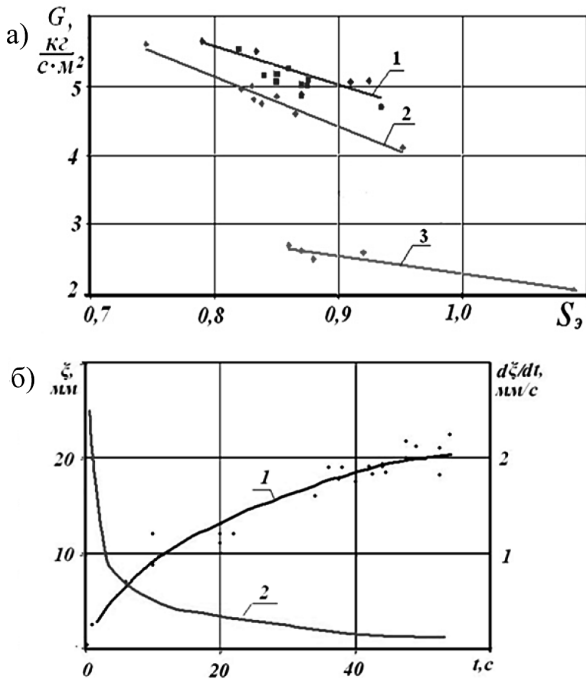


Рис. 4. Зависимость удельного темпа намораживания от степени эвтектичности чугуна (а): 1 – СЧ Ø100 мм; 2 – СЧ Ø157 мм; 3 – БВХЧ Ø114 мм; кинетика изменения толщины стенки отливки (1) и скорости затвердевания (2) белого высокохромистого чугуна (б)

При литье БВХЧ 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 [10]. Эти особенности определяют заметное уменьшение интенсивности теплоотвода от наружной поверхности затвердевающей отливки, что соответственно приводит к снижению массовой (рис. 4, а) и линейной (рис. 4, б) скорости затвердевания металла.

Варьируя интенсивностью теплоотвода, величиной углеродного эквивалента, режимом охлаждения и другими параметрами процесса в структуре отливок получали от 18 до 70% карбидов с различной направленностью: от полностью разориентированных до расположенных перпендикулярно к поверхности теплоотвода. Последние как раз и обеспечивают максимальную износостойкость при абразивном изнашивании в случае, когда их главные оси расположены перпендикулярно рабочей поверхности. При этом содержание хрома в чугуне составляло 12–14%, что на 4–5% ниже, чем при литье другими методами. Для проведения механической обработки лезвийным инструментом осуществляли отжиг отливок с использованием первичного тепла, а получение заданной твердости детали достигалось закалкой. Например, закалка деталей массой до 0,5 кг осуществлялась путем нагрева до 950 °С, выдержкой 15 мин с последующим охлаждением на воздухе. В результате твердость детали составила 62–64 HRC. Структура детали после закалки представляет собой мелкодисперсные карбиды, равномерно распределенные в мартенситной металлической матрице (рис. 5).

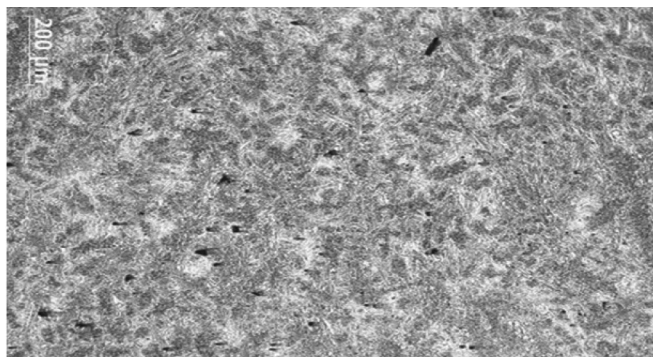


Рис. 5. Структура рабочей зоны детали после закалки

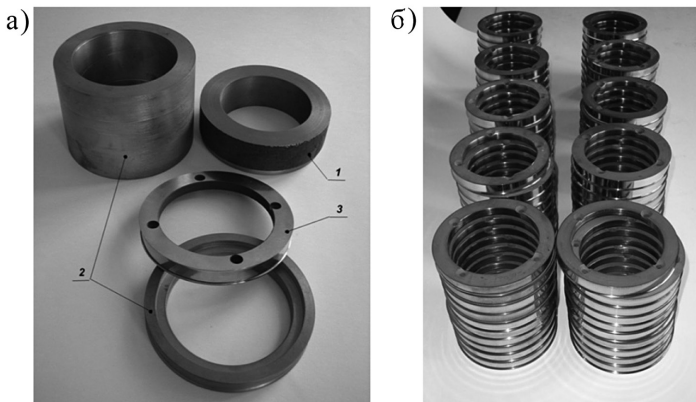


Рис. 6. Обработанная отливка (1), заготовки (2) и деталь «диск тормозной» (3) из БВХЧ (а) и опытно-промышленная партия дисков тормозных (б)

Практическое использование указанные результаты нашли при изготовлении детали «диск тормозной» (рис. 6), устанавливаемой в машинах для свивки корда сталепроволочного производства [7].

Применение детали «диск тормозной» из специального высокохромистого чугуна, получаемого методом направленного затвердевания, обеспечило увеличение ресурса работы в несколько раз по сравнению с деталями из легированных конструкционных сталей. Контроль износостойкости дисков показал, что за 3 месяца эксплуатации износа на рабочей поверхности дисков не наблюдалось. Кроме того было установлено повышение качества свивки и увеличение производительности канатного оборудования.

При производстве полиэтилентерефталата одной из быстроизнашивающихся деталей является червячное колесо редуктора ГУД2334А привода дозирующих насосов прядильных машин фирмы UNDE. В базовой комплектации эти редуктора оснащались червячными колесами из сплавов на основе меди. Промышленные испытания редукторов с бронзовыми червячными колесами и экспериментальными колесами из чугунных заготовок, полученных методом направленного затвердевания, показали неоспоримое преимущество последних.

Анализ результатов промышленных испытаний показал, что средний ресурс работы редукторов с чугунными червячными колесами в 1,88 и 2,12 раза выше, чем ресурс редукторов с бронзовыми колесами соответственно из БрА9Ж4 улучшенной и БрО10Н1Ф1 [8].

Перспективы и опыт применения предлагаемого метода для повышения эксплуатационных свойств деталей горных машин

Жесткие условия эксплуатации (ударные нагрузки, воздействие химически активных сред и абразива, повышенная влажность) приводят к интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию основных узлов горнодобывающего оборудования. Значительное количество деталей, используемых для производства и ремонта ходовой части проходческих роторных комбайнов, представляют собой полые цилиндрические тела вращения.

При этом условия работы диктуют различные требования к материалу детали, так, к примеру, твердость «втулки» из чугуна с шаровидным графитом должна выдерживаться в пределах 210–260 НВ, $\sigma_b \geq 500$ МПа; деталь «каток» из серого чугуна должна иметь твердость после термической обработки 35–42 HRC, $\sigma_b \geq 350$ МПа. Еще одним примером использования полых цилиндрических заготовок является буртовая втулка узла сочленения шагающего экскаватора (драглайна) типа МЗШ, используемого для открытой добычи полезных ископаемых. Втулки изготавливались методом направленного затвердевания из чугуна перлитного класса марки АЧВ-1 с шаровидной формой графита взамен бронзы Бр.Б2.

Изготовление полых заготовок (рис. 7) приведенных деталей методом направленного затвердевания без применения стержня обеспечило получение мелкокристаллической плотной структуры чугуна без пористости и других литейных дефектов и выполнение всех нормативных требований по качеству изделий. В результате опытные партии деталей с успехом

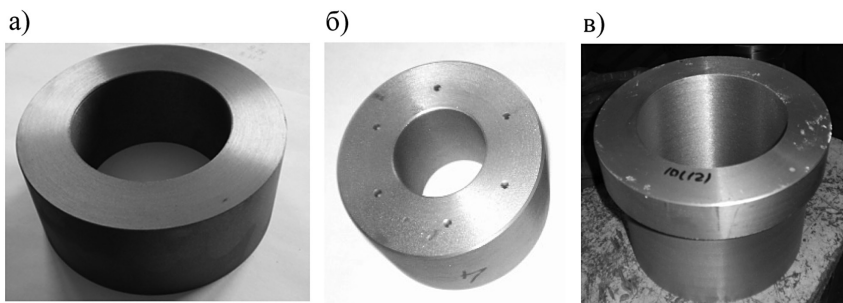


Рис. 7. Заготовки деталей горнодобывающего оборудования «Втулка» (а); «Каток» (б) и «Втулка буртовая» (в)

эксплуатируются в промышленных условиях. Рекламаций по качеству изделий не поступало.

Выводы

1. Создание оптимальных условий затвердевания и охлаждения отливок на макро- и микроуровне придает чугуны новые повышенные механические и эксплуатационные характеристики, ставит его в разряд высокоэффективных конструкционных материалов и значительно расширяет область его применения.

2. Метод направленного затвердевания обеспечивает получение заготовок из чугуна с плотной мелкодисперсной структурой, заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими свойствами. Это существенно повышает эксплуатационные характеристики деталей и ресурс их работы.

3. Новый метод литья уже применяется при производстве полых цилиндрических заготовок различного назначения из белого высокохромистого чугуна и из низколегированного чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом. В ряде случаев такие заготовки с успехом заменяют сплавы на основе меди и легированные стали.

4. Начальный опыт использования деталей, полученных по новой технологии для производства и ремонта горного оборудования показал положительные результаты. Это дает основания для более широкого применения новой эффективной технологии в горном машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бевза В. Ф., Богданов Б. И., Красный В. А., Мазько В. С. Литье заготовок для гильзования блока цилиндров двигателей автомобилей // Литье и металлургия. — 2000. — № 4. — С. 34–36.

2. Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Бодяко А. М., Груша В. П. Теоретические и технологические основы литья полых заготовок направленным затвердеванием / Технологии литья и металлургии. — Минск Беларусь. Навука, 2010. — С. 27–43.

3. Marukovich Y. I., Beuza U. F. Fundamentally New Effective Prozess of Casting of Hollow Cylindrical Billets of Cast Iron by the Metod of Directional Solidification // Key Engineering Materials. — 2011. — Vol. 457. — P. 465–469.

4. Кондратюк С. Е. Наследственность структуры и свойств стали // Литейное производство. — 2008. — № 9. — С. 6–10.

5. Сапожников С. А., Асташкевич Б. М. Структура и свойства чугунных поршневых колец, изготовленных методом непрерыв-

но-циклического литья // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2003. – № 3. – С. 13–16.

6. *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.

7. *Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Груша В. П., Красный В. А.* Формирование отливок из высокохромистого чугуна в металлической водоохлаждаемой форме // *Двигателестроение.* – 2014. – № 1 (255). – С. 41–45.

8. *Марукович Е. И., Бевза В. Ф., Груша В. П., Красный В. А.* Повышение качества деталей из чугунов путем совершенствования процесса структурообразования // *Двигателестроение.* – 2015. – № 1 (259). – С. 35–40.

9. *Чугун: справочн. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова.* – М.: *Металлургия*, 1991. – 576 с.

10. *Бодяко А. М., Бевза В. Ф., Галагаев С. В.* Непрерывно-циклическое литье намораживанием – эффективная технология получения высококачественных заготовок // *Литье и металлургия.* – 2005. – № 3 (35). – С. 20–27. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Марукович Евгений Игнатьевич*¹ – доктор технических наук, профессор, академик, e-mail: intehmet@mogilev.unibel.by,

*Бевза Владимир Федорович*¹ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, e-mail: sncl@yandex.ru,

*Груша Владимир Петрович*¹ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: sncl@yandex.ru,

Красный Виктор Адольфович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vikras1955@yandex.ru,

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,

¹ Институт технологии металлов

Национальной академии наук Беларуси.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 10, pp. 48–60.

UDC 669.13:
621.787.4

E.I. Marukovich, V.F. Bevza, V.P. Grusha, V.A. Krasnyy
IMPROVING THE OPERATIONAL PROPERTIES
OF THE CRITICAL PARTS OF MINING MACHINES
FROM ALLOY CAST IRON

Description of the principally new and efficient high-performance casting method for production of tubular billets directional solidification without application of a core is adduced.

The effect of different factors in the formation of billets from low-alloy gray cast iron with lamellar graphite on the structure, properties and service life of critical parts of the assignment, an analysis of formation of billets produced out of high-chromium. The decisive role in the inheritance of iron positive effect directional solidification alloy is the formation of a dense structure and more dispersed carbide eutectic carbides with a favorable morphology that defines the high wear resistance of cast iron. It is shown that the new method provides a casting blank with a given phase composition and improved physical and mechanical properties and performance. Examples of machine parts for which the proposed method is tested and positive results: the liner and piston rings of internal combustion engines, brake discs for cord twisting machines, worm wheels and others. The prospects of the proposed method to improve the operational properties of details of mining machinery, such as parts, «Bush» and «Roller» chassis mountain tunnel boring machine and the «Bush» node junction walking excavator.

Key words: the operational properties, mining machines, alloy cast iron, directional solidification, microstructure, tubular billet, structure formation.

AUTHORS

*Marukovich E.I.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician,

e-mail: intehmet@mogilev.unibel.by,

*Bevza V.F.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

Head of Laboratory, e-mail: sncl@yandex.ru,

*Grusha V.P.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: sncl@yandex.ru,

Krasnyy V.A., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

e-mail: vikras1955@yandex.ru,

¹ Institute of Technology of Metals, National Academy of Sciences of Belarus, 212030, Mogilev, Republic of Belarus.

REFERENCES

1. Bevza V.F., Bogdanov B.I., Krasnyy V.A., Maz'ko V.S. *Lit'e i metallurgiya*. 2000, no 4, pp. 34–36.
2. Marukovich E. I., Bevza V. F., Bodyako A. M., Grusha V. P. *Tekhnologii lit'ya i metallurgii* (Technology of casting and metallurgy), Minsk Belarus. Navuka, 2010, pp. 27–43.
3. Marukovich Y.I., Bevza U. F. Fundamentally New Effective Proccess of Casting of Hollow Cylindrical Billets of Cast Iron by the Metod of Directional Solidification. *Key Engineering Materials*. 2011. Vol. 457. P. 465–469.
4. Kondratyuk S. E. *Liteynoe proizvodstvo*. 2008, no 9, pp. 6–10.
5. Sapozhnikov S.A., Astashkevich B. M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2003, no 3, pp. 13–16.
6. Marukovich E. I., Bevza V. F., Grusha V. P., Bogdanov B. I., Krasnyy V. A. *Dvigatellestroenie*. 2013, no 3 (253), pp. 23–27.
7. Marukovich E. I., Bevza V. F., Grusha V. P., Krasnyy V. A. *Dvigatellestroenie*. 2014, no 1 (255), pp. 41–45.
8. Marukovich E. I., Bevza V. F., Grusha V. P., Krasnyy V. A. *Dvigatellestroenie*. 2015, no 1 (259), pp. 35–40.
9. *Chugun: spravocnoe izdanie*. Pod red. A. D. Shermana i A. A. Zhukova (Iron: referenc edition, Sherman A. D., Zhukov A. A. (Eds.)), Moscow, Metallurgiya, 1991, 576 p.
10. Bodyako A. M., Bevza V. F., Galagaev S. V. *Lit'e i metallurgiya*. 2005, no 3 (35), pp. 20–27.