

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: ot.del.vch@gmail.com

Ю.Д. Бачинский, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: 909_bach@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Высокопрочный чугун: прогресс технологий, повышение свойств

В статье приводится информация об основных научных результатах и достижениях Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины в получении и производстве высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Указаны основные способы улучшения структурообразования высокопрочного чугуна в тонкостенных отливках. Показана перспективность широкого внедрения и применения деталей из высокопрочного чугуна в промышленности.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, технология, модифицирование, комплексная лигатура, механические свойства, отливка.

В этом году исполняется 70 лет высокопрочному чугуну с шаровидным графитом (ВЧ), открытому в 1948 г. К. Миллисом (США) и Г. Морроу (Великобритания). В том же году чугун с шаровидным графитом был получен в Институте машиноведения и сельскохозяйственной механики Академии наук СССР [1]. Большой вклад в развитие научных основ, создание методов структурообразующей обработки, новых модификаторов, разработку прогрессивных технологий и практику производства отливок из высокопрочного чугуна внесли ученые ФТИМС НАН Украины [2, 3]. Высокопрочный чугун – это уникальный железоуглеродистый литейный сплав, в процессе кристаллизации которого формируется композитный материал, состоящий из металлической матрицы и неметаллической графитной фазы в виде включений шаровидной формы микроскопического размера, равномерно распределенных в структуре металла. Благодаря оптимальному сочетанию физико-химических, литейных свойств с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками, экономичности производства, в настоящее время высокопрочный чугун широко применяется в современных машинах, оборудовании и другой продукции практически во всех отраслях промышленности.

Согласно статистическим данным, в 2016 г. в мире произведено свыше 104 млн т отливок из всех типов сплавов, из которых более 25 % составляют отливки из высокопрочного чугуна, выпуск которых почти в 3 раза превышает выпуск отливок из стали. В США, Германии, Корее, Китае, Японии выпуск отливок из высокопрочного чугуна по отношению к выпуску отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом составляет от 75 % (США) до 60 % (Япония). А во Франции, Великобритании, Испании, Австрии, Португалии, Дании, Финляндии выпуск отливок из высокопрочного чугуна превышает выпуск отливок из серого чугуна в 1,3–2,6 раза [4].

Объемы производства и применения отливок из высокопрочного чугуна в конкретной стране являются своего рода индексом выпуска современной

высокотехнологичной промышленной продукции. Водонапорные трубы из высокопрочного чугуна имеют гарантированный срок эксплуатации 100 лет в любой среде грунтовых вод, а питьевая вода, поступающая по ним к потребителям, сохраняет свои натуральные качества. Они в 8 раз превышают срок службы бесшовных стальных труб и в 20 раз – труб из полимерных материалов. В промышленно развитых странах ЕС, США, Японии водонапорные трубы изготавливают только из высокопрочного чугуна [5]. Современный уровень технического и технологического развития символизируют ветряные электростанции. Сложные задачи при создании этих инновационных технических объектов электрической мощностью от 1,0 до 4,5 МВт и более решают литейщики, так как все корпусные и несущие конструкции – это особо крупные отливки. Основные детали энергосилового установок (до 80 %) изготавливают из ферритного высокопрочного чугуна марки ВЧ400-18. Преобладающая масса отливок от 1 до 40 т при толщине стенок 40–200 мм, а для более мощных станций изготавливаются корпусные отливки массой 40–100 т.

Величина предела усталости высокопрочного чугуна не зависит от размера индивидуальных сфероидов при диаметре от 10 до 100 мкм и пропорциональна модулю Юнга. Установлено, что ниже определенного критического напряжения при отсутствии трещин число циклов нагрузок высокопрочного чугуна стремится, как правило, практически до бесконечности [6]. Из высокопрочного чугуна изготавливают коленчатые валы, ответственные детали ходовой части автомобилей, тяжелых грузовиков, товарных вагонов, железнодорожного полотна, ветровых энергоустановок и другой продукции, где усталостные свойства материала имеют решающее значение. Примеров высокоэффективного применения высокопрочного чугуна достаточно много и в разработках, выполненных ФТИМС НАН Украины [2, 3, 7].

Ежегодный прирост объема производства, интенсивное развитие берегающих технологий, результаты научных исследований свидетельствуют о том,

что в XXI столетии высокопрочный чугун будет одним из основных литейных конструкционных материалов, и во многих отраслях техники сможет успешно конкурировать с легкими, но менее технологичными и более дорогими, алюминиевыми сплавами.

Действующие несколько десятилетий технологии получения высокопрочного чугуна устарели. Регламентируемые стандартами марки во многих случаях уже не удовлетворяют постоянно растущим требованиям к материалам для создания современной техники. Сегодня мировые лидеры в области технологий высокопрочного чугуна (швейцарская фирма «Georg Fischer», английская фирма «Meehanite» и др.) работают над созданием новых марок высокопрочного чугуна с комбинацией, предусмотренной стандартами, прочности при растяжении σ_B с повышенной в 2–4 раза пластичностью δ (ВЧ500-14; ВЧ600-10; ВЧ700-10; ВЧ800-10). Разрабатываются получаемые изотермической закалкой конструкционные аусферритные высокопрочные чугуны с уникально высокими показателями прочности, пластичности, ударной вязкости, которые хорошо обрабатываются резанием [8, 9].

Сейчас наблюдается переход технологий получения высокопрочного чугуна в ранг высоких наукоемких литейных технологий. Дальнейшее повышение свойств высокопрочного чугуна, создание прогрессивных технологий, обеспечивающих улучшение качества отливок при снижении их стоимости, будет происходить на основе развития научных представлений о строении реальных Fe-C-Si расплавов, их модифицировании, методах управления кристаллизацией, фазовыми превращениями, структурообразованием.

К числу основных направлений деятельности ФТИМС НАН Украины относятся исследования физико-химических и теплообменных процессов в сплавах при выплавке, обработке, кристаллизации и разработка научных основ для технологий получения новых литых материалов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Научные направления в области высокопрочного чугуна:

- изучение межфазного взаимодействия и кинетических режимов растворения модифицирующих реагентов в железоуглеродистых расплавах;
- проведение фундаментальных исследований по созданию экологически чистых процессов обработки железоуглеродистых расплавов в предкристаллизационном периоде новыми и легкоплавкими модификаторами;
- создание новых модификаторов, изучение их влияния на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов, разработка технологий получения отливок с повышенными эксплуатационными характеристиками;
- разработка новых специальных высокопрочных чугунов (ударопрочных, износостойких, теплостойких, коррозионностойких и др.) и технологий их получения.

Целью проводимых работ является создание научных и технологических основ высокоэффективных методов модифицирования высокоуглеродистых расплавов, обеспечивающих увеличение количества

образующихся сферокристаллов графита, предотвращение перехода на метастабильный механизм кристаллизации с образованием нежелательной цементитной фазы, измельчение структуры, повышение технологических, механических, служебных свойств изделий из высокопрочного чугуна и ресурсосбережение.

Прогрессивные методы модифицирования чугуна магниевыми лигатурами базируются на изоляции процесса от воздушной атмосферы путем применения закрытых ковшей или проточных реакторов, обеспечивающих увеличение степени перехода магния и других модифицирующих элементов из лигатуры в чугун, повышение эффективности модифицирующего воздействия на структурообразование, улучшение экологии [10].

Установлено, что повышение эффективности модифицирования в проточных реакторах достигается путем организации межфазного взаимодействия в движущейся жидко-твердой среде, состоящей из расплава чугуна и зерен магниевой лигатуры. В жидко-твердой среде расширяется зона взаимодействия фаз, предельно увеличивается реакционная поверхность, интенсифицируется движение расплава относительно частиц лигатуры. Псевдооживление твердой фазы в поле центробежных сил позволяет дополнительно ускорить межфазные процессы. В таких условиях интенсифицируется теплообмен как за счет ускоренного развития поверхности межфазного взаимодействия, так и за счет турбулизации теплового и концентрационного пограничных слоев.

В исследованиях применяли прямоточный и центробежный проточные реакторы (рис. 1). В прямоточном реакторе происходит гравитационная сегрегация. Крупные частицы ферросилиций-магниевой лигатуры ФСМг, плотность которых в два раза меньше плотности жидкого чугуна, отделяются от реакционного слоя и под действием архимедовой силы всплывают в верхнюю часть реактора. В центробежном реакторе целенаправленно используется сочетание

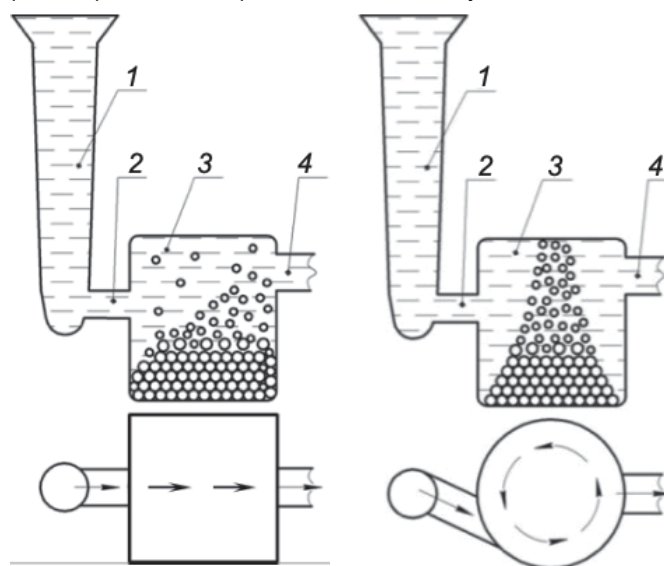


Рис. 1. Схемы модифицирования расплава в прямоточном (а) или центробежном (б) реакторе: 1 – стояк с заливочной воронкой; 2 – входной канал; 3 – реактор; 4 – выходной канал

гравитационной и центробежной сегрегации жидкой и твердой фаз. В условиях центробежного движения более легкие частицы лигатуры сепарируются в центральной части реактора вдоль оси вращения. Интенсивное перемешивание твердой фазы способствует выравниванию температур и концентраций в объеме реактора и ускоряет ход теплообменных процессов.

Создание в центробежном проточном реакторе объемного характера межфазного взаимодействия обеспечивает высокий уровень насыщения расплава чугуна магнием в начальный момент заливки (рис. 2). Следовательно, первые порции расплава с высоким Mg идут в отливки, а последние с низким Mg заполняют литниковую систему. По сравнению с проточным, модифицирование в центробежном реакторе позволяет повысить степень перехода магния из ли-

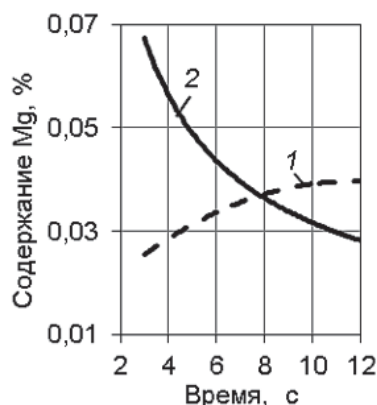


Рис. 2. Кинетика перехода магния с лигатуры ФСМг7 в чугун при использовании проточного (1) или центробежного (2) реактора

гатуры в металл отливок на 55–60 %.

Внутриформенное модифицирование, по сравнению с ковшовым, увеличивает в 3–4 раза плотность распределения в структуре включений шаровидного графита (рис. 3) при соответствующем уменьшении их размера.

Образование измельченной структуры способствует уменьшению межкристаллитной ликвации, увеличивает количество феррита в металлической основе, обеспечивает более оптимальное соотношение показателей прочности и пластичности, позволяет производить тонкостенные отливки с требуемым высоким уровнем свойств без проведения обязательного (для ковшового модифицирования) энергоемкого высокотемпературного графитизирующего отжига, что обеспечивает значительную экономию энергоресурсов.

На основе результатов, полученных при исследовании гидродинамики и теплообмена процесса внутриформенного модифицирования, разработаны параметры высокоэффективной ресурсосберегающей технологии производства отливок из высокопрочного чугуна (рис. 4), обеспечивающей значительные преимущества, по сравнению с традиционными технологиями, основанными на ковшевых методах модифицирования:

– расход магниевых лигатур снижается в 2–2,5 раза;

– радикально улучшается экология в результате отсутствия пироэффекта и выделения дыма из оксида магния;

– ликвидируется проблема потери эффекта модифицирования;

– кардинально улучшаются условия получения тонкостенных отливок без отбела;

– уменьшается объемная усадка высокопрочного чугуна, что способствует повышению выхода годного литья;

– увеличивается количество феррита в металлической основе, и повышается пластичность высокопрочного чугуна в литом состоянии.

Экономия от внедрения разработанных технологий достигается за счет снижения расхода магниевой лигатуры, увеличения выхода годного литья, повышения качества, ликвидации операции энергоемкого графитизирующего отжига, улучшения обрабатываемости резанием, повышения ресурса работы изделий.

Из модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна в литом состоянии не всегда можно получить отливки с преобладающей толщиной стенок менее 5 мм. Для отливок с толщиной стенок от 1,5 до 3 мм требуется проведение термической обработки для устранения образующегося в их структуре цемента (отбела). При малой металлоемкости тонкостенных отливок, а, следовательно, и литейных форм для их получения, минимальное время заливки может составлять 4–6 с, в результате чего в чугун из традиционных FeSiMg лигатур переходит недостаточно магния для образования графита шаровидной формы и кремния или других подобных по действию модифицирующих элементов, препятствующих образованию отбела. Это свидетельствует о недостаточно высокой скорости растворения таких лигатур в расплаве чугуна в начальный период межфазного взаимодействия. Поэтому возникла необходимость разработки быстрорастворимых лигатур, снижающих до технологически приемлемой инерционность процесса до момента начала эффективного модифицирования.

В составе FeSiMg лигатур наиболее тугоплавкими ($t_{\text{пл}} \sim 1400^\circ\text{C}$) являются фазы кремния и FeSi. С учетом градиентов концентраций насыщение фазы кремния железом для образования фазы FeSi_2 ($t_{\text{пл}} \sim 1220^\circ\text{C}$) происходит значительно быстрее, чем насыщение железом фазы FeSi для образования фазы Fe_2Si ($t_{\text{пл}} \sim 1210^\circ\text{C}$). Сравнительное исследование скорости плавления двух магниевых лигатур, отличающихся составом тугоплавких фаз (Si или FeSi), показало, что лигатура, в которой тугоплавкая фаза представлена кремнием, в начальном периоде межфазного взаимодействия плавится в 1,8 раза быстрее, чем лигатура с тугоплавкой фазой FeSi (рис. 5). Это объясняется действием механизма диффузионного плавления фазы Si, которая, в результате встречного диффузионного переноса лигатуры кремния в чугун и железа чугуна в лигатуру, значительно быстрее переходит в левоит FeSi_2 , чем фаза FeSi – в Fe_2Si [11].

На основании этого сделан вывод, что применение лигатур с фазой Si, по сравнению с лигатурами с фазой FeSi, обеспечивает значительное преимущество в результате повышения эффективности мо-

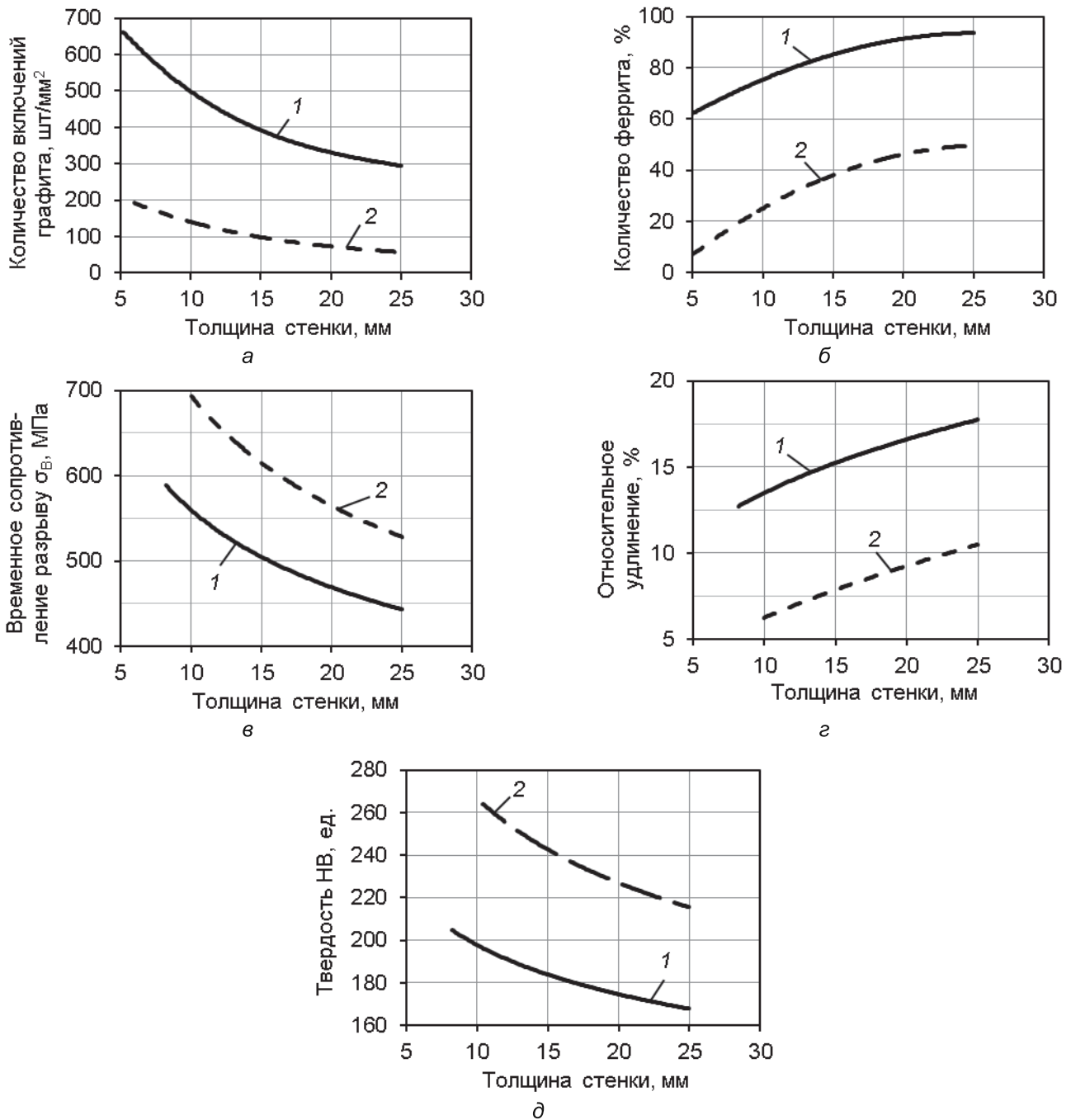


Рис. 3. Параметры структуры и механические свойства высокопрочных чугунов, полученных внутриформенным (1) или ковшовым (2) модифицированием, в зависимости от толщины стенки отливки: а – количество включений шаровидного графита; б – количество феррита; в – временное сопротивление разрыву; г – относительное удлинение; д – твердость про Бриннелю

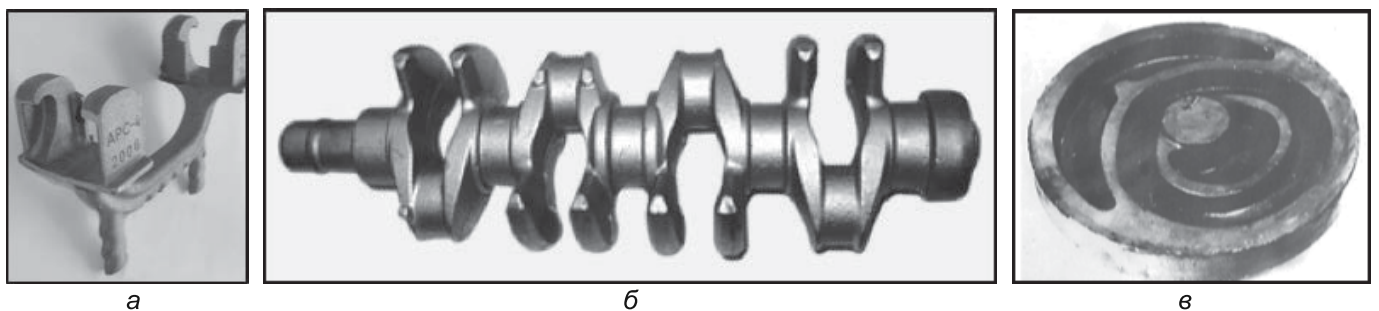


Рис. 4. Примеры отливок из высокопрочного чугуна, полученного внутриформенным модифицированием: а – анкер из ВЧ400-15; б – коленчатый вал из ВЧ750-3; в – шестерня-кулачок из ВЧ500-7

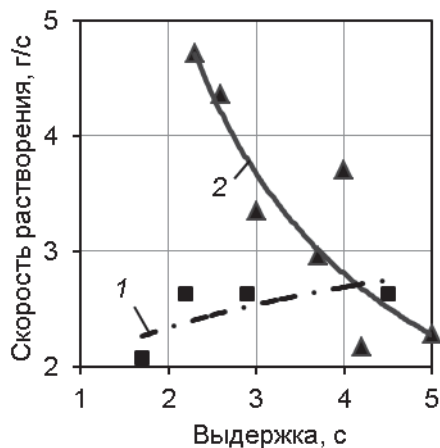


Рис. 5. Влияние выдержки образца в жидком чугуна с температурой 1400 °С на массовую скорость растворения FeSiMg лигатур с фазой FeSi (1) или Si (2)

дифицирования в начальном периоде межфазного взаимодействия, что позволило создать малоинерционные процессы внутриформенного модифицирования.

Разработана и реализована концепция сочетания модифицирующей обработки расплава в предкристаллизационном периоде с последующей фиксацией эффекта модифицирования быстрой кристаллизацией. Установлено, что в результате минимизации промежутка времени между модифицированием и кристаллизацией в сочетании со скоростью охлаждения 15–10 °С/с, характерной для толщин стенок отливок 2–3 мм, количество образуемых при кристаллизации включений шаровидного графита увеличивается более чем в 5 раз (до 1200–1800 шт/мм²), устраняется метастабильный механизм кристаллизации, формируется измельченная аустенитно-графитная глобулярная эвтектика, увеличивается в 2–3 раза количество феррита в металлической основе (рис. 6), повышаются в 1,5–2,0 раза пластические свойства литого материала. Такая структура обеспечивает значительное повышение механических и эксплуатационных характеристик тонкостенных изделий из высокопрочного чугуна.

Для получения тонкостенных отливок с перлитной металлической основой рекомендуется легировать высокопрочный чугун медью, которая является графитизирующим элементом. В результате легирования медью незначительно уменьшается количество

включений шаровидного графита (рис. 7), не образуется цементит и обеспечивается получение высокопрочного чугуна перлитного класса.

В результате модифицирования в предкристаллизационном периоде, по сравнению с традиционным ковшовым модифицированием, в структуре высокопрочного чугуна отливок массой 3,8 кг с толщиной стенки 10 мм плотность распределения шаровидного графита увеличивается в 4–5 раз (до 530–580 шт/мм²), а степень ферритизации металлической основы – в 1,8–2,0 раза (до 80–95 % феррита), что обеспечивает получение следующих механических свойств: $\sigma_B = 500–570$ МПа, $\delta = 10–17$ %, $HV = 1700–2000$ МПа. По показателю прочности полученный высокопрочный чугун соответствует стандартной марке ВЧ 500-7, но характеризуется увеличенным в 1,6 раза минимальным относительным удлинением, меньшей твердостью и суженным в 2,5 раза диапазоном ее колебания, что обеспечивает значительное улучшение обрабатываемости резанием. Легирование медью, в сочетании с термической обработкой (нормализацией), позволяет получить очень высокий уровень механических свойств тонкостенных изделий из модифицированного в предкристаллизационном периоде высокопрочного чугуна: $\sigma_B = 900–950$ МПа, $\sigma_{0,2} = 700–750$ МПа, $\delta = 6–10$ %, $HV = 2700–2950$ МПа.

Таким образом, технологическая реализация принципа модифицирования в предкристаллизационном периоде открывает новые возможности для создания высококачественного производства из высокопрочного чугуна качественных тонкостенных отливок с повышенным комплексом технологических, механических и специальных свойств.

Применение предприятиями Украины новых марок специальных высокопрочных чугунов с повышенными технологическими, механическими, эксплуатационными характеристиками и разработанных технологий их производства будет способствовать развитию оборонной, машиностроительной, сельскохозяйственной, горнодобывающей, энергетической, транспортной и других отраслей промышленности и обеспечит разработку новых поколений современной техники, повышение наукоемкости, конкурентоспособности выпускаемой продукции, создание новых рабочих мест, увеличение экспорта.

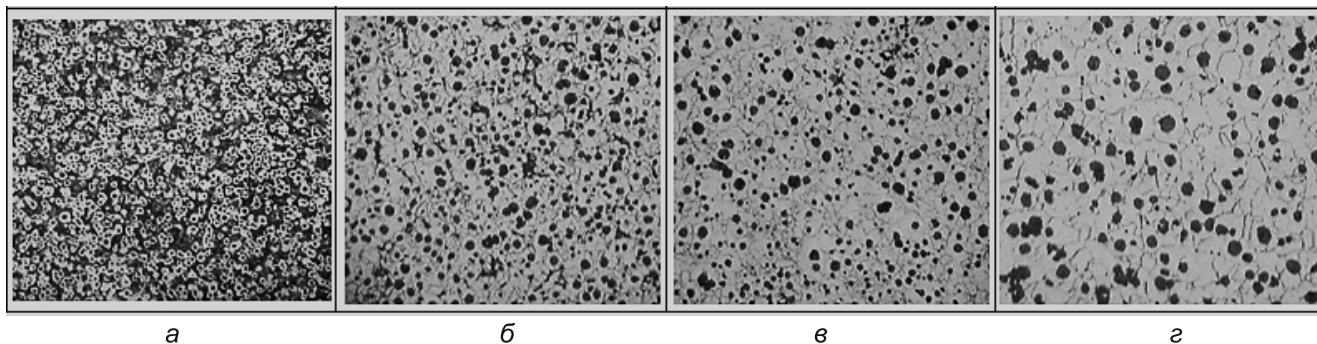


Рис. 6. Микроструктура высокопрочного чугуна, модифицированного в предкристаллизационном периоде, в стенке толщиной 2,0 мм (а); 3,0 мм (б); 6,5 мм (в) и 12,0 мм (г) (x150)

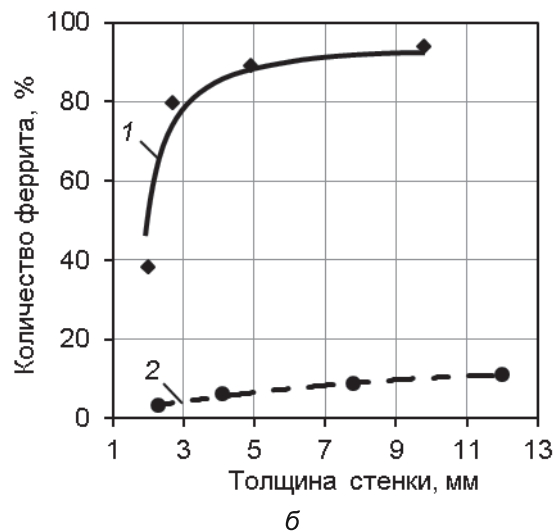
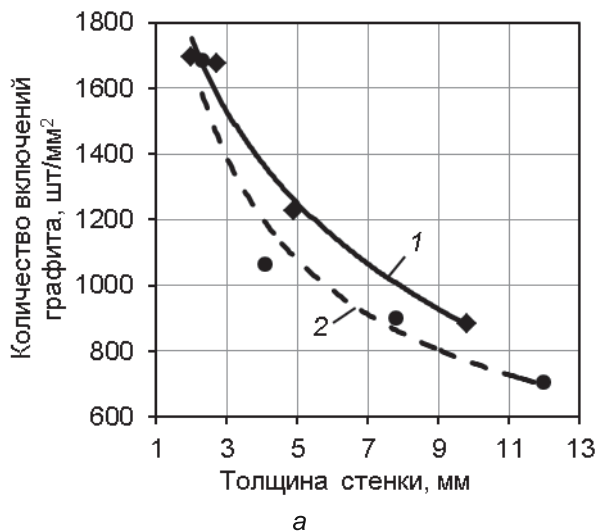
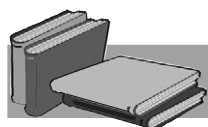


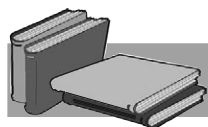
Рис. 7. Влияние легирования медью на количество включений шаровидного графита (а) и феррита (б) в структуре высокопрочного чугуна, модифицированного в предкристаллизационном периоде: 1 – нелегированный ВЧ; 2 – ВЧ, легированный 1 % Си



ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко А.А. Научно-исследовательские работы Института машиноведения и сельскохозяйственной механики Академии наук УССР в области высококачественных чугунов // *Высокопрочные чугуны*. – Киев: Машгиз, 1954. – 304 с.
2. Бубликов В.Б., Шейко А.А., Зеленый Б.Г. Высокопрочный чугун: история, наука, свойства, технологии // Книга «50 лет в Академии наук Украины: ИПЛ, ИЛП, ФТИМС». – Киев: МП «Информлиття», 2008. – С. 61–81.
3. Бубликов В.Б. Высокопрочному чугуну – 60 // *Литейное производство*. – 2008. – № 11. – С. 2–8.
4. Census of World Casting Production: Global Casting Production Growth Stalls // *Modern Casting*. – December 2017. – P. 24–28.
5. Бех Н.И., Александров Н.Н., Нуралиев Ф.А. Высокопрочный чугун сейчас и в будущем // *Литейное производство*. – 2018. – № 5. – С. 2–5.
6. Stefanescu D., Ruxanda R. Lightweight iron castings – can they replace aluminum castings // *Foundryman*. – 2003. – Vol. 96. – № 9. – P. 221–224.
7. Бубликов В.Б. Развитие технологий производства литых коленчатых валов из высокопрочного чугуна // *Процессы литья*. – 2008. – № 4. – С. 9–16.
8. Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher. Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application // *International Journal of Metalcasting*. – April 2014. – Vol. 8. – Issue 2. – P. 35–40.
9. Schoenborn S., Kaufmann H., Sonsino C.M., Heim R. Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 101. – P. 440–449.
10. Бубликов В.Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование чугуна // *Литейное производство*. – 2003. – № 8. – С. 20–22.
11. Бубликов В.Б., Бачинский Ю.Д. Плавление FeSiMg лигатур в жидком чугуне // *Литейное производство*. – 2015. – № 2. – С. 7–11.

Поступила 02.10.2018



REFERENCES

1. Vasilenko, A.A. (1954). Research work of the Institute of mechanical engineering and agricultural mechanics of the Academy of Sciences of the USSR in the field of ductile cast iron. *Ductile cast irons*. Kiev: Mashgiz, 304 p. [in Russian].
2. Bublikov, V.B., Sheyko, A.A., Zelenyy, B.G. (2008). Ductile cast iron: history, science, properties, and technologies. 50 years of Academy of sciences of Ukraine. Kiev: MP "Informlyttia", pp. 61–81 [in Russian].
3. Bublikov, V.B. (2008). Ductile cast iron is 60 years. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 11, pp. 2–8 [in Russian].
4. Census of World Casting Production: Global Casting Production Growth Stalls. *Modern Casting*. December 2017, pp. 24–28 [in English].
5. Bekh, N.I., Aleksandrov, N.N., Nuraliev, F.A. (2018). High-duty cast iron now and in the future. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 5, pp. 2–5 [in Russian].
6. Stefanescu, D., Ruxanda, R. (2003). Lightweight iron castings – can they replace aluminum castings. *Foundryman*, Vol. 96, no. 9, pp. 221–224 [in English].

7. *Bublikov, V.B.* (2008). Development of technologies of ductile cast iron cast crankshafts production. *Casting processes*. no. 4, pp. 9–16 [in Russian].
8. *Wolfram Stets, Herbert Löblich, Gert Gassner, Peter Schumacher.* (2014). Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International Journal of Metalcasting*. April, Vol. 8, Issue 2, pp. 35–40 [in English].
9. *Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C.M., Heim, R.* (2015). Cumulative damage of high-strength cast iron alloys for automotive applications. *Procedia Engineering*. Vol. 101, pp. 440–449 [in English].
10. *Bublikov, V.B.* (2003). Increasing of modifying effect on the structure formation of cast iron. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 8, pp. 20–22 [in Russian].
11. *Bublikov, V.B., Bachinskiy, Yu.D.* (2015). Melting of FeSiMg master alloy in liquid cast iron. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 2, pp. 7–11 [in Russian].

Received 02.10.2018

Анотація

В.Б. Бубликов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,
e-mail: otchel.vch@gmail.com; **Ю.Д. Бачинський**, канд. техн. наук,
наук. співр., e-mail: 909_bach@ukr.net

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
Київ, Україна*

Високоміцний чавун: прогрес технологій, підвищення властивостей

У статті наведено інформацію про основні наукові результати та досягнення Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України в отриманні та виробництві високоміцного чавуну з кулястим графітом. Вказано основні способи поліпшення структуроутворення високоміцного чавуну в тонкостінних виливках. Показано перспективність широкого впровадження і застосування деталей з високоміцного чавуну в промисловості.

Ключові слова

Високоміцний чавун, технологія, модифікування, комплексна лігатура, механічні властивості, виливок.

Summary

V.B. Bublikov, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher,
Head of Department, e-mail: otchel.vch@gmail.com; **Yu.D. Bachynskiy**,
Candidate of Engineering Sciences, Research Officer,
e-mail: 909_bach@ukr.net

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kyiv,
Ukraine*

Ductile cast iron: the progress of technologies, an improvement of properties

The article provides information about the main scientific results and achievements of Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine in the obtaining and production of nodular graphite cast iron. The main ways of ductile cast iron structure formation improvement in thin-walled castings are shown. The perspective of wide introduction and application of ductile cast iron details in the industry is shown.

Keywords

Ductile cast iron, technology, modifying, complex master alloy, mechanical properties, casting.