

УДК 669.131.7

**В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев\*,  
Ю. Д. Бачинский, Д. С. Козак**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

### **МЕДЬ В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ**

*Получены экспериментальные данные о влиянии легирования медью на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна в зависимости от качества шихтовых материалов, способа плавки, скорости охлаждения и вида термической обработки. Обоснована целесообразность применения легирования медью для получения высокопрочных чугунов марок ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2 и повышения прочности высокопрочных чугунов ферритного класса.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, медь, легирование.

*Отримані експериментальні дані про вплив легування міддю на структуру та механічні властивості виливків з високоміцного чавуну в залежності від якості шихтових матеріалів, способу плавки, швидкості охолодження і виду термічної обробки. Обґрунтована доцільність застосування легування міддю для отримання високоміцних чавунів марок ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2 та підвищення міцності високоміцних чавунів феритного класу.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, мідь, легування.

*Experimental data about laws of copper alloying influence on structure and mechanical properties of high-strength cast iron castings depending on quality of charge materials, melting method, speed of cooling and kind of heat treatment are received. The expediency of copper alloying application for reception of high-strength cast iron grades ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2 and strength increasing of ferritic high-strength cast iron class is proved.*

**Keywords:** high-strength cast iron, copper, alloying.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является перспективным литым конструкционным материалом современного машиностроения, обеспечивающим надежность и долговечность работы деталей машин и механизмов при различных режимах и условиях их эксплуатации [1]. Применение отливок из высокопрочного чугуна (взамен стальных) позволяет уменьшить массу деталей, повысить коэффициент использования металла, значительно снизить расход энергии и стоимость производства. Из высокопрочного чугуна выпускают отливки массой от десятков грамм до нескольких десятков тонн. Мировое производство высокопрочного чугуна составляет 25 млн. т в год, то есть примерно 30 % от общего выпуска отливок из всех видов сплавов. В Украине из-за кризиса в машиностроительном комплексе и

применения устаревших технологий выпуск отливок из высокопрочного чугуна значительно меньше и составляет ~3,8 % от общего объема производимого литья [2]. Повышение свойств высокопрочного чугуна, создание прогрессивных технологий, обеспечивающих улучшение качества отливок при снижении стоимости их производства, являются актуальными направлениями научных разработок, результаты которых будут востребованы промышленными предприятиями.

Физико-механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом определяются структурой металлической матрицы, основными факторами регулирования которой являются: качество исходного расплава, параметры модифицирования (включающие состав, количество, способ и очередность ввода присадок), химический состав, легирование, скорость охлаждения отливок и термическая обработка.

Высокопрочный чугун легируют для повышения механических показателей или придания ему специальных свойств (износостойкость, ударостойкость, коррозионная стойкость и др.). Вследствие повышенной склонности высокопрочного чугуна к образованию при кристаллизации карбидной фазы выбор легирующих элементов для упрочнения его металлической основы, по сравнению со сталью и чугуном с пластинчатым графитом, крайне ограничен. Эффективное повышение прочностных свойств высокопрочного чугуна достигается путем легирования химическими элементами, упрочняющими твердый раствор, но не образующими карбидов в чугуне. К таким элементам относятся медь и никель. Наиболее распространенным и относительно недорогим легирующим элементом высокопрочного чугуна является медь.

*Анализ последних достижений и публикаций.*

Медь – металл плотностью 8920 кг/м<sup>3</sup> и температурой плавления 1083 °С. Кристаллическая решетка подобна решетке  $\gamma$ -железа и поэтому медь способствует расширению этой области на диаграмме состояния Fe-C-сплавов. Растворимость меди зависит от температуры и состава чугуна: повышается с увеличением содержания никеля, марганца, кремния. Медь растворяется в чугуне до 3,0-4,0 %, а при содержании, превышающем предельную растворимость, может выделяться в виде самостоятельной микроскопической фазы [3, 4].

Медь благотворно влияет на улучшение литейных свойств (снижает усадку, повышает жидкотекучесть) [5], является графитизирующим элементом, который, не способствуя образованию цементита при кристаллизации, обеспечивает формирование перлитной матрицы в структуре отливок. Медь, так же как и никель, повышает устойчивость аустенита и улучшает прокаливаемость чугуна [3, 6].

Оптимальным по влиянию на структуру и физико-механические свойства высокопрочного чугуна считается содержание в чугуне 0,6–1,0 % Cu. Такое количество меди способствует образованию перлитной металлической основы с повышенными значениями прочности и износостойкости.

В работах [7, 8] отмечается, что медь при ее содержании в чугуне более 1,8 % препятствует образованию шаровидного графита. Негативное влияние меди на получение шаровидного графита увеличивается в присутствии титана в количестве ~0,04 %, несмотря на достаточное содержание магния в чугуне – 0,03-0,06 %.

В работе [9] показано, что при модифицировании комплексной магний-кальциевой лигатурой ЖКМК-4Р и легировании 0,6-0,8 % Cu обеспечивается получение высокопрочного чугуна с перлитной металлической основой и высокими механическими свойствами в литом состоянии:  $\sigma_b = 800-900$  МПа,  $\delta = 5-7$  %. Натурные испытания коленчатых валов из такого чугуна показали высокий уровень усталостной прочности (долговечности).

Легирование медью применяется для повышения прочности и износостойкости изделий из бейнитного высокопрочного чугуна [10-12].

*Выделение нерешенной части проблемы.*

В настоящее время большинство предприятий Украины производят лишь часть

сортамента марок высокопрочного чугуна. Это главным образом марка ВЧ500-7 с перлитно-ферритной металлической матрицей, получаемая в литом состоянии. На основе этой марки графитизирующим отжигом получают марки высокопрочного чугуна ферритного класса. Марку ВЧ600-3 в отливках можно получить в большинстве случаев путем регулирования содержания марганца и кремния [13]. Для получения высокопрочного чугуна перлитного класса марок ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2 (ДСТУ 3925-99) требуется легирование, упрочняющее твердый раствор и увеличивающее количество перлита и степень его дисперсности. Получение указанных марок высокопрочного чугуна является для большинства предприятий Украины проблематичным.

Упрочнение легированием твердого раствора позволяет значительно повысить прочностные характеристики высокопрочных чугунов со всеми типами металлической основы, в том числе с ферритной и бейнитной. С целью гарантирования стабильных результатов поверхностной закалки на мартенсит коленчатых и распределительных валов, других деталей из высокопрочного чугуна также требуется перлитная металлическая основа, так как феррит вследствие кратковременности нагрева не успевает превратиться в аустенит. При получении бейнитного высокопрочного чугуна изотермической закалкой также оптимальной является исходная перлитная металлическая основа, благодаря которой значительно сокращается время выдержки в термической печи после нагрева для получения аустенита и повышаются прочностные показатели.

С учетом вышеизложенного и противоречивости некоторых результатов ранее выполненных исследований очевидна актуальность проведения системного исследования и уточнения ряда закономерностей влияния меди на кристаллизацию, структуру и механические свойства высокопрочного чугуна. Полученные результаты позволяют расширить базу данных для разработки прогрессивных технологий получения изделий из высокопрочного чугуна с повышенными свойствами.

### *Цель и методика исследований.*

Цель работы заключалась в исследовании влияния содержания меди шихтовых материалов, скорости охлаждения и вида термической обработки на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна.

В лабораторных плавках в качестве шихты применяли передельный чушковый чугун марки ПЛ2 следующего химического состава (%мас.): 4,1 С; 0,75 Si; 0,35 Mn; 0,06 Cr; 0,02 Al; 0,026 Ti; 0,035 S; 0,08 P. В конце плавки в печь вводили расчетное количество ферросилиция марки ФС75. Содержание кремния в отливках находилось в пределах 2,60–2,95 %. Для получения в структуре отливок шаровидной формы графита применяли модифицирование в ковше магний-кальциевой лигатурой ЖКМК-4Р в количестве 2,5 % от массы жидкого чугуна. Катодную медь марки М0к (ДСТУ ГОСТ 859–2003) в количестве до 1 % вводили в ковш, укладывая ее сверху ранее засыпанной лигатуры ЖКМК-4Р. В опытах с содержанием меди в чугуне 1,2–3,0 %, ее вводили в печь в конце плавки.

В опытно-промышленных условиях использовали два технологических варианта плавки. Первый – в дуговой печи основным процессом из рафинированного литейного чушкового чугуна ЛР6 (50 %), отходов автомобильного листа из стали 08кп (50 %) и графита для науглероживания. Исходный нелегированный высокопрочный чугун имел следующий химический состав (%мас.): 3,64 С; 2,78 Si; 0,39 Mn; 0,041 Mg; 0,008 S; 0,029 P. По второму варианту плавки проводились в индукционной электропечи на шихте, состоящей из рафинированного чушкового чугуна ЛР3 (30 %), отходов стали 20 (70 %) и графита для науглероживания. Химический состав нелегированного высокопрочного чугуна находился в следующих пределах (%мас.): 3,42–3,61 С; 2,56–2,84 Si; 0,48–0,54 Mn; 0,039–0,052 Mg; 0,024 S; 0,04 P.

В лабораторных опытах для исследования микроструктуры в сырых песчаных фор-

Скорость охлаждения ( $V_{\text{охл}}$ ) кильблоков в зависимости от их толщины

Толщина отливки у основания, мм	8	12	16	20	25	30	45
$V_{\text{охл}}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	0,75	0,46	0,32	0,23	0,17	0,12	0,04

мах отливали пластины высотой 200 мм, шириной 40 мм, толщиной 5, 10, 15, 20 мм, скорость охлаждения которых составляла 4,20; 1,25; 0,60; 0,45  $^\circ\text{C}/\text{c}$  соответственно. Для определения механических свойств и микроструктуры отливали стандартные клиновидные пробы толщиной у основания 25 мм массой 7 кг (ДСТУ 3925-99), скорость охлаждения которых составляла 0,12  $^\circ\text{C}/\text{c}$ .

С целью изучения влияния скорости охлаждения на механические свойства высокопрочного чугуна, легированного различным количеством меди (от 1,0 до 3,0 %), в сырых песчаных формах отливали комплект клиновидных проб (кильблоков) с толщиной у основания от 8 до 45 мм, длиной 100 мм и высотой 140 мм. Скорости охлаждения ( $V_{\text{охл}}$ ) клиновидных проб представлены в таблице.

Анализ полученных данных, обоснование научных результатов. Из графиков (рис. 1), описывающих термокинетические параметры охлаждения и фазовых превращений образцов массой ~70 г, отлитых в алундовом тигле диаметром 20 мм и высотой ~30 мм, следует, что легирование высокопрочного чугуна медью в количестве 1,0 % повышает температуру эвтектического превращения на 2-3  $^\circ\text{C}$  и понижает температуру эвтектоидного превращения на 40-50  $^\circ\text{C}$ . Отмеченное повышение температуры эвтектической кристаллизации связано со снижением растворимости углерода в жидком чугуне вследствие его легирования медью и свидетельствует об определенном улучшении условий для выделения из расплава при кристаллизации графитной

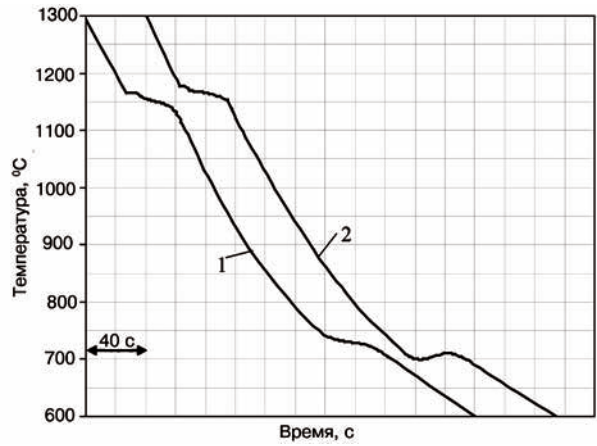


Рис. 1. Охлаждение образцов исходного нелегированного высокопрочного чугуна (1) и легированного 1,0 % Cu (2)

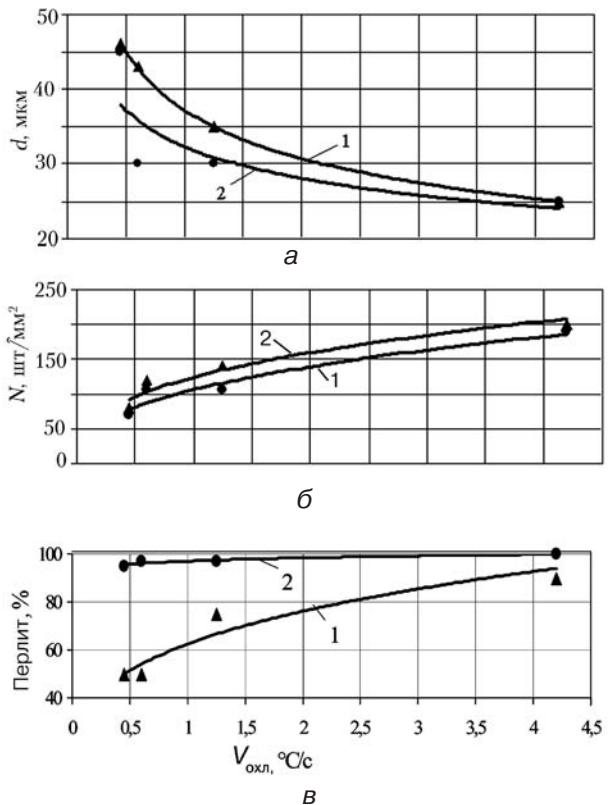


Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на диаметр  $d$  (а), количество включений шаровидного графита  $N$  (б) и содержание перлита (в) в структуре отливки из исходного нелегированного высокопрочного чугуна (1) и легированного 1,0 % Cu (2)



фазы. Установленное значительное снижение температуры эвтектоидного превращения, обусловленное повышением устойчивости аустенита вследствие его легирования медью, способствует превращению аустенита в перлит и повышению дисперсности последнего.

Легирование 1,0 % Cu оказывает незначительное влияние на параметры графитной фазы. В отливках пластин толщиной 5, 10, 15, 20 мм наблюдается некоторое

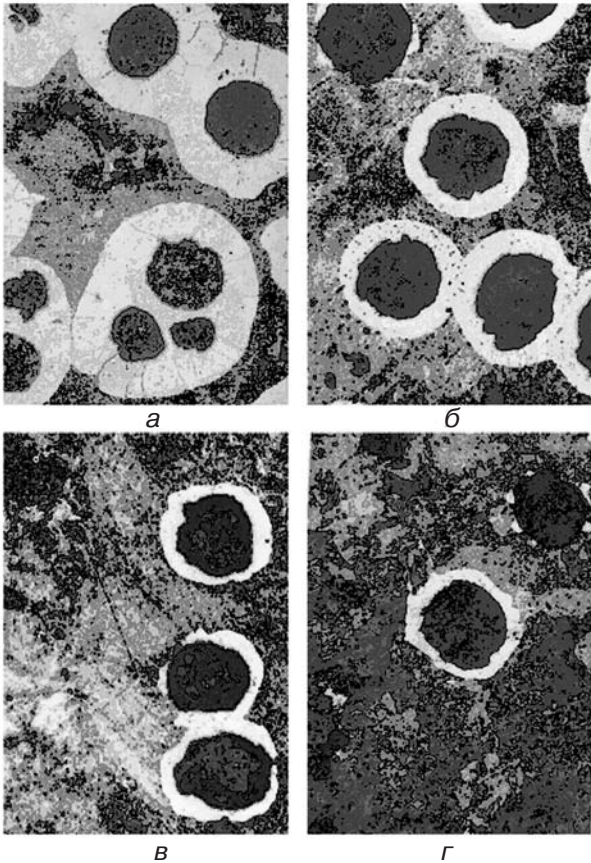


Рис. 3. Микроструктура клиновидных отливок толщиной 25 мм (ДСТУ 3925-99) из исходного нелегированного высокопрочного чугуна (а) и легированного медью в количестве 0,5 (б); 1,0 (в); 2,0 % (г),  $\times 200$

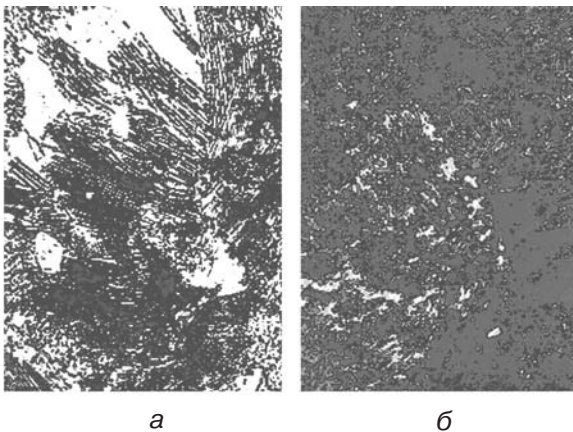


Рис. 4. Микроструктура перлита в исходном нелегированном высокопрочном чугуне (а) и легированном 1,0 % Cu (б),  $\times 1000$

уменьшение диаметра сфероидов  $d$  и увеличение их количества  $N$  (рис. 2, а, б). Влияние скорости охлаждения на металлическую основу высокопрочного чугуна проявляется более контрастно. В результате легирования медью во всем диапазоне скоростей охлаждения отливок пластин (0,45–4,20 °С/с) в их структуре формируется перлитная металлическая основа (рис. 2, в).

Влияние содержания меди на изменение микроструктуры стандартных клиновидных отливок толщиной 25 мм, отлитых из высокопрочного чугуна, выплавленного на шихте из передельного чушкового чугуна марки ПЛ2, представлено на рис. 3. С повышением содержания меди увеличивается количество перлита в металлической основе, но сохраняются ферритные оторочки вокруг сфероидов графита. Даже при легировании 2 % Cu вокруг части сфероидов наблюдается 3-5 % феррита в виде оторочек или отдельных лепестков (рис. 3, г). На рис. 4 представлены характерные участки структуры перлита исследованных чугунов: в исходном нелегированном высокопрочном чугуне преобладает среднепластинчатый перлит, а в легированном 1,0 % Cu – мелко- и тонкопластинчатый.

С повышением содержания меди увеличиваются временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ), условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), твердость (НВ), но при этом уменьшается величина относительного удлинения ( $\delta$ ) и ударной вязкости (КС), рис. 5. Полученные закономерности свидетельствуют, что для получения

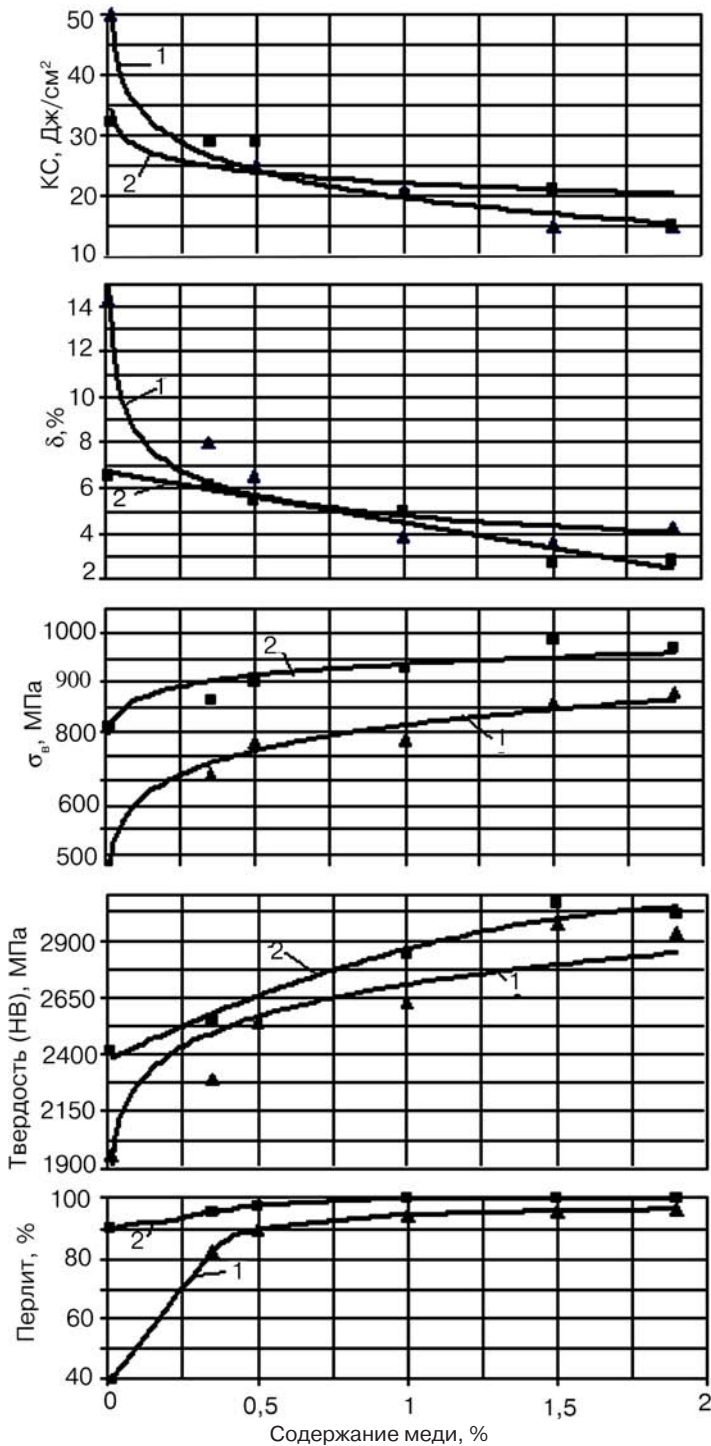


Рис. 5. Влияние содержания меди на количество перлита и механические свойства высокопрочного чугуна (шихта – 100 % чушкового чугуна ПЛ1): 1 – в литом состоянии; 2 – после нормализации

высокопрочного чугуна перлитного класса (с содержанием в металлической основе более 92 % перлита) достаточным является легирование 1 % Cu, при котором удается получить высокопрочный чугун со следующими свойствами:  $\sigma_b \geq 750$  МПа;  $\delta \geq 3$  %;  $K_C \geq 20$  Дж/см<sup>2</sup>. При содержании 1,5 % Cu повышается прочность, но снижаются относительное удлинение и ударная вязкость:  $\sigma_b \geq 800$  МПа;  $\delta \geq 2,5$  %;  $K_C \geq 12$  Дж/см<sup>2</sup>.

Дальнейшее повышение содержания меди до 2 % не оказывает существенного влияния на изменение показателей механических свойств.

Эффективным средством повышения прочности легированного медью перлитного высокопрочного чугуна является нормализация, которую проводили по следующему режиму: нагрев в термической печи до 870 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. В результате нормализации высокопрочного чугуна легированного 1,0-1,5 % Cu, **повышаются прочность (на 12-18 %) и твердость, показатели относительного удлинения и ударной вязкости изменяются незначительно.**

Для исследования влияния скорости охлаждения на механические свойства отливок из высокопрочного чугуна, легированного 1-3 % Cu, были отлиты комплекты клиновидных проб (кильблоков) толщиной от 8 до 45 мм. Во всех трех вариантах

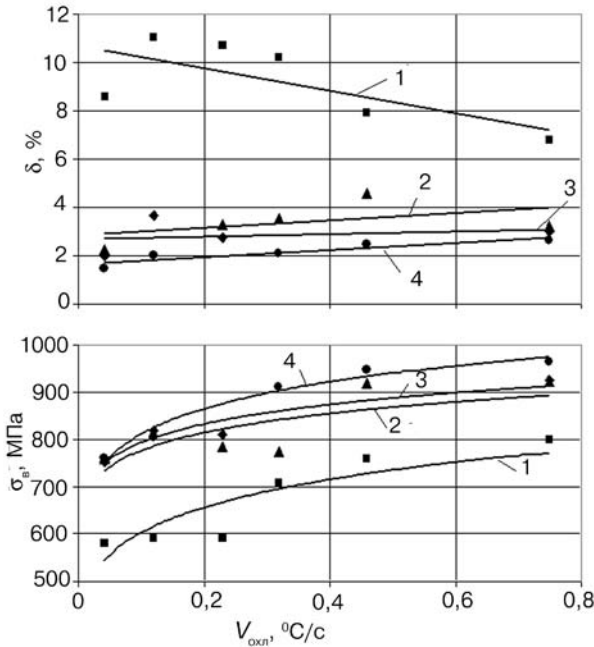


Рис. 6. Влияние скорости охлаждения и содержания меди на механические свойства исходного нелегированного высокопрочного чугуна (1) и легированного 1,0 Cu (2), 2,0 Cu (3), 3,0 % Cu (4)

отливок увеличиваются размеры зерна, усиливается ликвация примесей в межзеренное пространство, повышается неоднородность структуры, развивается микропористость, что в комплексе приводит к явлению, когда с увеличением толщины сечения отливки одновременно снижаются как прочность, так и пластичность. В условиях проведенного исследования прочность высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и перлитной металлической основой снижается с 900 до 750 МПа при увеличении толщины стенки отливки с 8 до 45 мм. При этом наблюдается также незначительное уменьшение относительного удлинения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях применения шихты обычного качества с содержанием 0,035 % S и широкого интервального варьирования скорости охлаждения (0,04-0,75 °С/с) при ковшовом модифицировании расплава магний-кальциевой лигатурой ЖКМК-4Р и легировании медью вплоть до 3 % в структуре отливок стабильно обеспечивается получение шаровидной формы графита ШГФ5, ШГФ4. Учитывая высокую стоимость меди и закономерности ее влияния на механические свойства высокопрочного чугуна, представляется рациональным ее применение для легирования в количестве до 1,0-1,2 %. При литье тонкостенных отливок содержание меди в высокопрочном чугуне может быть значительно меньше.

легирования микроструктура клиновидных проб состояла из перлитной металлической основы (количество феррита не превышало 6 %) и шаровидного графита ШГФ5, ШГФ4 (ГОСТ 3443-87). Поэтому наблюдаемое отличие механических свойств отливок различной толщины определялось особенностями сформировавшейся тонкой структуры металлической основы и влиянием так называемого масштабного фактора, проявляющегося через степень ликвации, уровень микропористости, образование различных неоднородностей. Повышение механических свойств легированного медью высокопрочного чугуна с увеличением скорости охлаждения (рис. 6) объясняется измельчением структуры, уменьшением ликвации, повышением дисперсности перлита в условиях ускоренного теплоотвода. По мере уменьшения скорости охлаждения

## Новые литые материалы

Важным фактором, способствующим увеличению механических свойств легированного медью высокопрочного чугуна, является повышение качества исходного расплава. Так, при плавке в дуговой печи основным процессом на шихте из рафинированного продувкой магнием литейного чушкового чугуна марки ЛР6 и отходов листовой стали 08кп получен расплав с весьма низким содержанием серы и фосфора – 0,008 и 0,029 % соответственно. Низкое содержание серы позволило снизить расход сфероидизирующей лигатуры до 1,2 % от массы металла при модифицировании в ковше, что в 2 раза меньше, чем при модифицировании расплава, выплавленного в индукционной электропечи на шихте из передельного чушкового чугуна ПЛ1 с содержанием 0,035 % S. В результате легирования 1 % Си, выплавленного основным процессом расплава с низким содержанием серы и фосфора, получен перлитный высокопрочный чугун с  $\sigma_b \geq 900$  МПа,  $\delta > 6$  % (рис. 7),

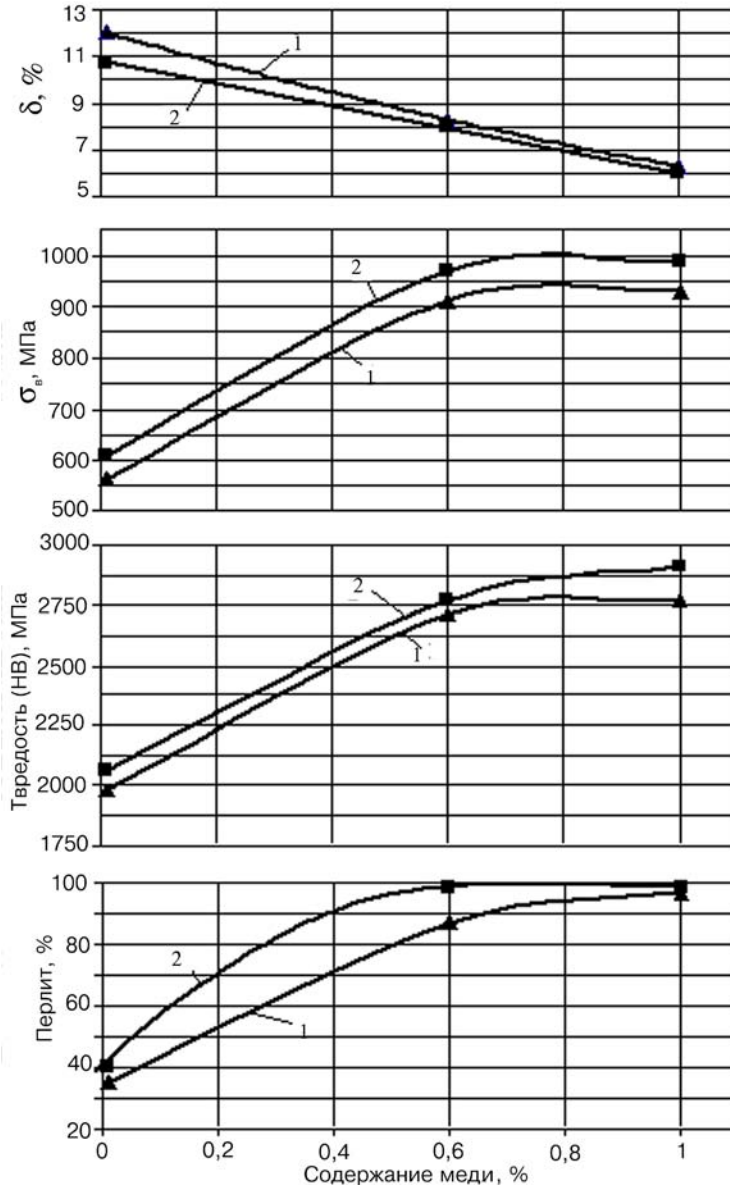


Рис. 7. Влияние содержания меди на количество перлита и механические свойства высокопрочного чугуна (шихта – 50 % чушкового чугуна ЛР6, 50 % сталь 08кп): 1 – в литом состоянии; 2 – после нормализации



который по сравнению с высокопрочным чугуном, полученным из переплавленного в индукционной электропечи чушкового чугуна ПЛ1, характеризуется повышенной на 20 % прочностью и в 2 раза большим относительным удлинением. Характер влияния нормализации на механические свойства выплавленного основным процессом легированного медью высокопрочного чугуна аналогичен ранее рассмотренным при анализе результатам лабораторного исследования (см. рис. 5). В результате нормализации повышаются прочность и твердость, относительное удлинение изменяется незначительно (см. рис. 7).

Исследование влияния легирования медью на механические свойства проводилось также на высокопрочном чугуне, выплавленном в опытно-промышленных условиях в индукционной печи из шихты, состоящей из рафинированного продувкой магнием чушкового чугуна ЛРЗ (30 %) и стали 20 (70 %). Механические свойства определяли на образцах, изготовленных из клиновидных проб толщиной у основания 15 мм.

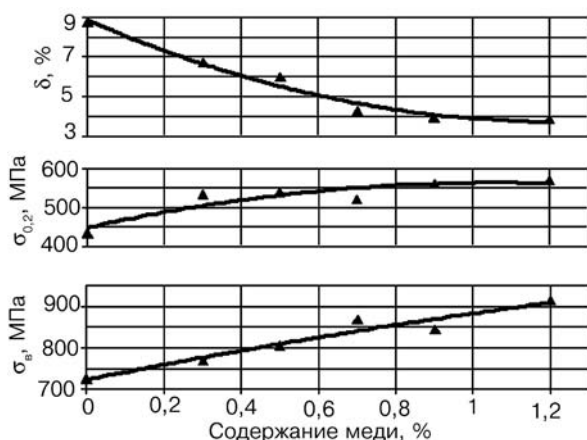


Рис. 8. Влияние содержания меди на механические свойства высокопрочного чугуна, выплавленного на шихте из чушкового чугуна ЛРЗ (30 %) и стали 20 (70 %)

ется на уровне ~4 %. В данной серии опытов наряду с прочностью и относительным удлинением также определяли условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , величина которого в легированном медью чугуне превышает 500 МПа, что соответствует требованиям стандартов к марке ВЧ800-2.

Анализ полученных данных свидетельствует, что в условиях проведенного исследования при плавке на шихте из рафинированного чушкового чугуна и отходов стали 20 для получения перлитного высокопрочного чугуна ВЧ800-2 в отливках с преобладающей толщиной стенки 15 мм рациональным является легирование 0,7–0,9 % Cu. В целом, наряду с легированием медью, улучшение качества шихтовых материалов и выплавленного расплава является определяющим фактором получения высоких механических свойств высокопрочного чугуна перлитного класса.

Исследование влияния легирования медью на повышение прочностных показателей высокопрочного чугуна с ферритной металлической основой проводилось на клиновидных отливках толщиной 45 мм, полученных в серии опытов по исследованию влияния скорости охлаждения на изменение механических свойств. Вырезанные из нижней части клиновидных отливок темплеты были термообработаны по режиму двухстадийного отжига: нагрев до 860 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с печью до 720 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. После термической обработки все составы исследованных высокопрочных чугунов имели ферритную металлическую основу.

Данные рис. 9 позволяют оценить влияние легирования медью на степень упроч-

Структура металлической основы клиновидной пробы толщиной 15 мм из исходного высокопрочного чугуна состояла из 70 % перлита (остальное феррит). После легирования 0,35 % Cu количество перлита увеличивается до 85 %, а при легировании 0,60 % Cu – до 95 %. По мере повышения содержания меди прочность  $\sigma_v$  увеличивается по линейной закономерности от 730 МПа в нелегированном состоянии до 920 МПа в высокопрочном чугуне, легированном 1,2 % Cu (рис. 8). Относительное удлинение снижается по мере уменьшения количества феррита и при содержании в металлической основе более 95 % перлита стабилизируются

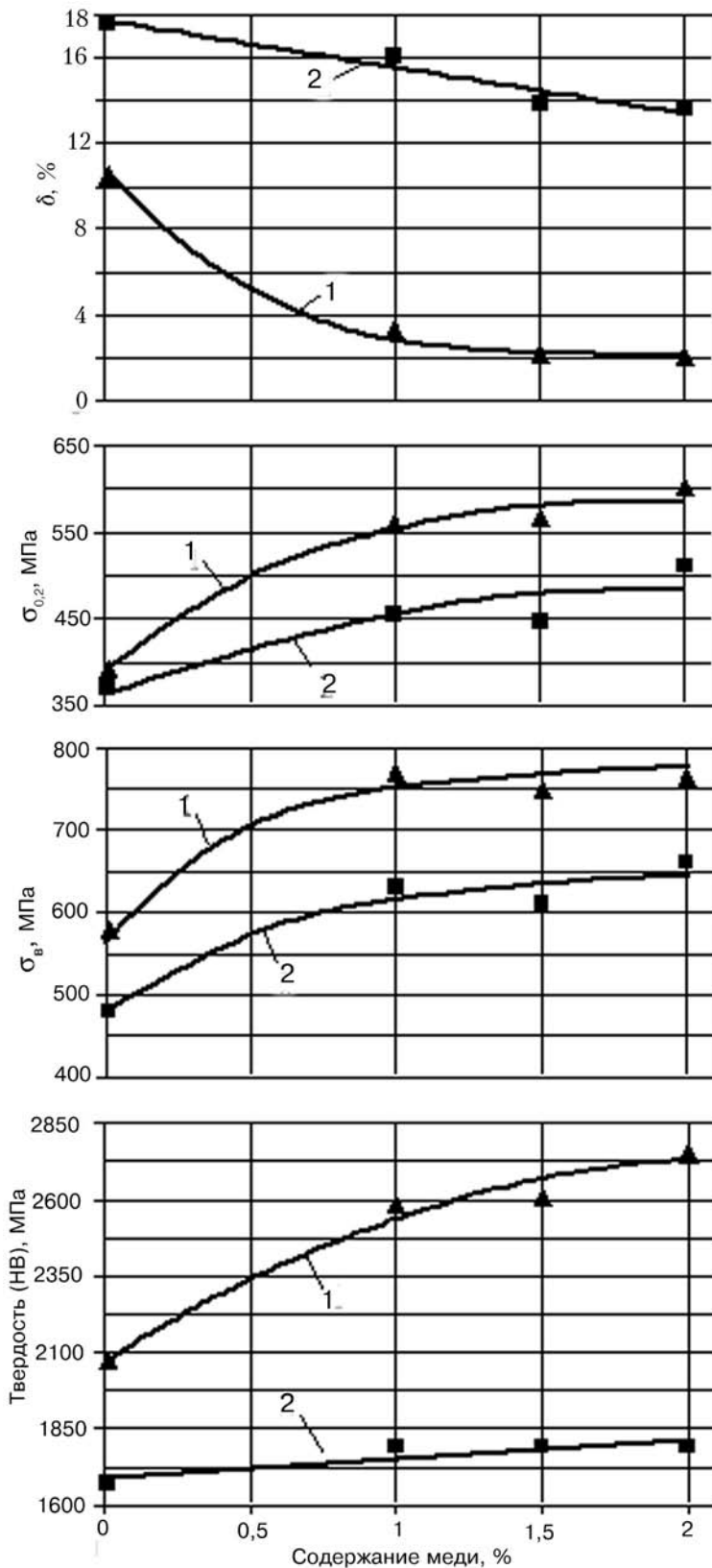


Рис. 9. Влияние содержания меди на механические свойства высокопрочного чугуна: 1 – в литом состоянии; 2 – после ферритизирующего отжига

## Новые литые материалы

нения твердого раствора (феррита). В результате легирования медью прочностные показатели повышаются на 20–25 % по сравнению с нелегированным ферритным высокопрочным чугуном:  $\sigma_B$  с 480 до 600 МПа,  $\sigma_{0,2}$  с 370 до 450 МПа, незначительно повышается твердость, относительное удлинение  $\delta$  снижается с 18 до 15 %. Таким образом, легирование медью позволяет эффективно повышать прочностные показатели высокопрочного чугуна ферритного класса.

Анализ данных, полученных на образцах клиновидных проб толщиной 45 мм, позволяет прогнозировать более высокий уровень механических свойств в тонкостенных отливках, подвергнутых отжигу для получения ферритной металлической основы. В связи с этим для повышения прочностных характеристик ферритного высокопрочного чугуна рекомендуется производить легирование медью в количестве до 1,0 %.

Для получения бейнитной (по зарубежной терминологии аусферритной) металлической основы, легированный 1,5 % Cu, высокопрочный чугун нагревали в селитровой ванне до температур 800, 830, 870 °С и после выдержки 20 мин проводили изотермическую закалку в селитровой ванне с температурой 380 °С (время выдержки 30 мин). Полученные закономерности (рис. 10) свидетельствуют, что легированный медью бейнитный высокопрочный чугун, закаленный с температуры 870 °С, по механическим свойствам значительно превосходит высокопрочный чугун марки ВЧ900-2 ДСТУ 3925-99 ( $\sigma_B \geq 900$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 600$  МПа;  $\delta \geq 2$  %) и бейнитный высокопрочный чугун марки FCAD 900-4 (стандарт Японии JIS G 5503).

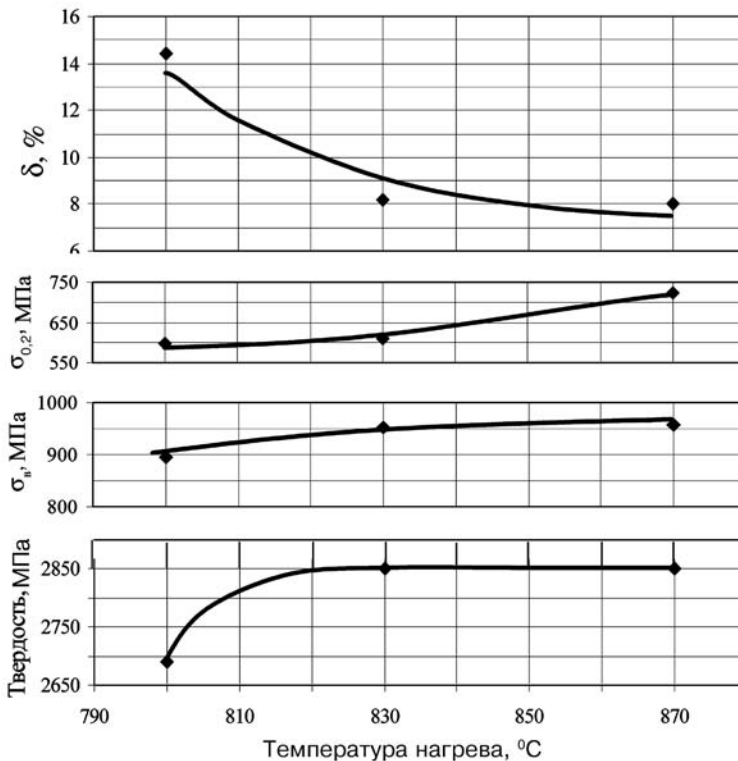


Рис. 10. Влияние температуры нагрева при изотермической закалке на механические свойства высокопрочного чугуна, легированного 1,5 % Cu

### Выводы

На основе результатов экспериментального исследования получены количественные закономерности, характеризующие влияние содержания меди на струк-

туру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна в зависимости от качества шихтовых материалов, способа плавки, скорости охлаждения и вида термической обработки. Медь эффективно упрочняет твердый раствор, повышает степень перлитизации металлической основы, увеличивает прочностные показатели высокопрочного чугуна. Показано, что влияние меди на механические свойства высокопрочного чугуна значительно усиливается при повышении скорости охлаждения до  $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Эффективным средством повышения механических свойств легированного медью высокопрочного чугуна является термическая обработка (нормализация или изотермическая закалка). Определены технологические параметры получения на основе легирования медью марок высокопрочного чугуна ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2 (ДСТУ 3925-99) и повышения прочностных показателей высокопрочных чугунов ферритного класса.



### Список литературы

1. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 // Литейн. пр-во. – 2008. – № 11. – С. 2-8.
2. Клименко С. И. Состояние литейного производства в Украине и перспективы его развития. // Там же. – 2008. – № 5. – С. 37-38.
3. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. – М.: Металлургия, 1976. – 287 с.
4. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
5. Горушкина Л. П. Структура и свойства магниевого чугуна. – Харьков: Вища школа, 1980. – 160 с.
6. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук. думка, 1987. – 208 с.
7. Ващенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок. – Киев: Вища шк., 1992. – 246 с.
8. Высококачественные чугуны для отливок / В. С. Шумихин, В. П. Кутузов, А. И. Храмченков и др. / Под. ред. Н. Н. Александрова. – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
9. Бубликов В. Б. Развитие технологий производства литых коленчатых валов из высокопрочного чугуна // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 9-16.
10. Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко И. Г. Бейнитный высокопрочный чугун. – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2008. – 139 с.
11. Зубчатые колеса из бейнитного высокопрочного чугуна / Н. И. Бестужев, А. Н. Крутилин, В. А. Стефанович и др. // Литейн. пр-во. – 2009. – № 5. – С. 2-7.
12. Термічна обробка виливків із високоміцного чавуну / С. М. Волощенко, В. І. Ульшин, М. Г. Аскеров та ін. // Металознавство та обробка металів. – 2009. – № 4. – С. 25-31.
13. Влияние содержания марганца и скорости охлаждения на кристаллизацию, структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л.Н. Сыропоршнева и др. // Процессы литья. – 2009. – № 6. – С. 28-34.

Поступила 28.09.2009