



УДК 669.131.6:539.378.6

Поступила 13.08.2015

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРАФИТИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С ПОМОЩЬЮ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОЙ ГАЗИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛИ

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF GRAY CAST IRON GRAPHITIZING MODIFICATION BY DISPERSION-FILLED CONSUMABLE PATTERN

*И. А. НЕБОЖАК, В. В. СУМЕНКОВА, О. И. ШИНСКИЙ, В. Д. БАБЮК, Е. А. ЖИДКОВ,
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина*

*I. A. NEBOZHAK, V. V. SUMENKOVA, O. I. SHYNSKY, V. D. BABYUK, E. A. ZHYDKOV, Physical and
Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

На примере образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 определены основные критерии оценки процесса графитизирующего модифицирования матричного расплава – концентрация кремния и коэффициент его усвоения. Путем исследования влияния этих показателей на структуру и свойства полученных отливок доказана эффективность внутриформенного модифицирования жидкого чугуна дисперсным ферросилицием марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) по ЛГМ-процессу.

The key criteria of the process of graphitizing modification of matrix melt silicon concentration and silicon assimilation evaluated were on samples of gray cast iron grade СЧ20 State Standard 1412-85. These criteria of evaluation on the structure and properties of casting ingots proved an efficiency of intra-mold modification of molten gray cast iron by dispersed ferrosilicon grade ФС75 State Standard 1415-93 (ISO 5445-80) using lost-foam casting (LFC-process).

Ключевые слова. *Аппроксимация, газомодель, графитизирующий элемент, графическая интерпретация, длина включений пластинчатого графита, концентрация кремния, коэффициент усвоения кремния, кремний, ЛГМ-процесс, литейная форма, литой образец, литье по газифицируемым моделям, математическая обработка, материал, матричный расплав, модифицирование, отливка, параметры микроструктуры, пенополистирол, перлит, пластинчатый графит, полином, серый чугун, твердость, феррит, ферросилиций, функциональная зависимость, характер зависимости, цементит, экспериментальные данные, эмпирическое уравнение.*

Keywords. *Approximation, consumable pattern, graphitizer, graphical interpretation, length of inclusions of flaked graphite, silicon concentration, silicon assimilation quotient, silicon, lost-foam casting (LFC-process), casting mold, casting specimen, mathematical treatment, material, matrix melt, modification, ingot, microstructure parameters, foam polystyrene, pearlite, flaked graphite, polynomial, gray cast iron, hardness, ferrite, ferrosilicon, functional relation, temper of functional relation, cementite, experimental data, empirical equation.*

Производство тонкостенного чугунного литья в песчано-глинистых литейных формах (ЛФ) и особенно в кокилях часто сопровождается отбелом поверхностного слоя отливок, глубина которого зависит от ряда факторов: толщины стенки литой заготовки, химического состава и температуры заливаемого чугуна, материала ЛФ и др. Повышенное содержание Fe_3C в поверхностном слое отливки приводит к неравномерности физико-механических свойств чугуна по сечению литой заготовки, а в случае тонкостенного кокильного литья – к сквозному отбелу и хрупкости отливок. Существует несколько способов устранения этого недостатка, среди которых наиболее распространенным является изменение химического состава чугуна путем введения графитизирующих элементов (ГЭ) в расплав [1] или длительного отжига литых заготовок. Наиболее доступным ГЭ является кремний, содержание которого в чугуне определяет его твердость [2] и обрабатываемость [1].

Отличительной особенностью процесса литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесса) является присутствие газомодели (ГМ) в «полости» ЛФ в процессе формообразования и заполнения ЛФ распла-

вом. Кроме того, ГМ в большинстве случаев получают в полости пресс-формы из гранулированного пенополистирола. Эти обстоятельства и позволили вводить в состав ГМ дисперсные присадки [3] и, тем самым, сразу решить двуединую задачу: осуществлять инокулирование расплава в «полости» ЛФ с одновременной утилизацией отходов ферросплавного производства. Имплантирование инокуляторов в ГМ проводится холодным плакированием поверхности гранул пенополистирола дисперсными присадками.

В начале 70-х годов прошлого века в ФТИМС НАН Украины было проведено ряд исследований [4–6], связанных с легированием и модифицированием сталей и чугунов в «полости» ЛФ. Однако эти исследования были единичными и не имели системного характера. В 90-х годах XX столетия исследования, направленные на легирование и модифицирование чугуна в «полости» ЛФ, возобновили и продолжают их проводить до сегодняшнего дня [7–12]. Дисперсно-наполненные ГМ получают по методике, описанной в [7].

Путем инокулирования матричного расплава в «полости» ЛФ по ЛГМ-процессу [3, 7] удалось осуществить графитизирующее модифицирование чугунных отливок дисперсным ферросилицием марки ФС75, ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80). Методика исследования, а также металлургические и технологические параметры ЛГМ-процесса приведены в работах [9, 12].

Так как исследования влияния технологических параметров (независимых факторов) ЛГМ-процесса, в частности, содержания дисперсного ферросилиция в «теле» ГМ, плотности пенополистирола, скорости заливки металла в «полость» ЛФ и его температуры на показатели усвоения модификатора (концентрацию кремния после модифицирования матричного расплава $[Si]_M$) и коэффициент его усвоения ($k_{[Si]}$), параметры микроструктуры (количества перлита (П), феррита (Ф), цементита (Fe_3C), пластинчатого графита (ПГ), а также длину включений пластинчатого графита ($l_{ПГ}$)) и основные механические свойства литых образцов (твердость (НВ)) из серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) провести на всех отливках физически сложно, то нами был использован метод полнофакторного эксперимента. Исходя из этих соображений, в качестве подопытной отливки был избран литой образец с индексом «14».

Известно [1], что микроструктура литых образцов как из серого, так и белого чугунов представляет собой ту группу факторов, от которых, в первую очередь, зависят механические и специальные свойства отливок. Таким образом, чтобы влиять на структурообразование вышеуказанных чугунов, необходимо знать, как влияют на микроструктуру материала литых образцов те или иные металлургические и технологические факторы ЛГМ-процесса. Для серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 такими факторами являются $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$. Последний в общем случае был рассчитан по формуле:

$$k_{[Si]} = \frac{[Si]_M - [Si]_0}{C_{Si}^{ГМ}}, \quad (1)$$

где $[Si]_0$ – концентрация кремния в исходном матричном расплаве, % (мас. доля); $C_{Si}^{ГМ}$ – концентрация кремния (от массы литого образца) в газомодели, % (мас. доля).

Так как $[Si]_0 = 1,75$, а $C_{Si}^{ГМ} = 0,75$, то формулу (1) можно записать в виде:

$$k_{[Si]} = \frac{[Si]_M - 1,75}{0,75}. \quad (2)$$

На примере исследуемой отливки, т. е. отливки с индексом «14», экспериментально установлено (табл. 1), что каждому конкретному значению как $[Si]_M$ в сером чугуне, так и $k_{[Si]}$ соответствует свое конкретное значение количества П, Ф, Fe_3C , ПГ, а также $l_{ПГ}$. Это свидетельствует о том, что параметры микроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412–85 зависят прежде всего от показателей усвоения кремния, т. е. $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$.

Графическая интерпретация результатов эксперимента (рис. 1) показала, что между большинством параметров микроструктуры и $[Si]_M$ в объеме отливки из серого чугуна существует ярко выраженная полиномиальная зависимость и только влияние $[Si]_M$ на количество Fe_3C носит степенной характер. По мере увеличения $[Si]_M$ от 1,54 до 2,41% количество П постепенно уменьшается. Его максимум достигает 94%, в то время как минимум этой структурной составляющей материала литого образца равен 56%. Количество Ф в структуре серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в интервале концентраций от 1,54 до 2,41% монотонно возрастает. При $[Si]_M = 1,54\%$ его содержание составляет 0%. Дальнейшее увеличение концентрации кремния в объеме подопытной отливки приводит к тому, что при $[Si]_M = 2,41\%$ коли-

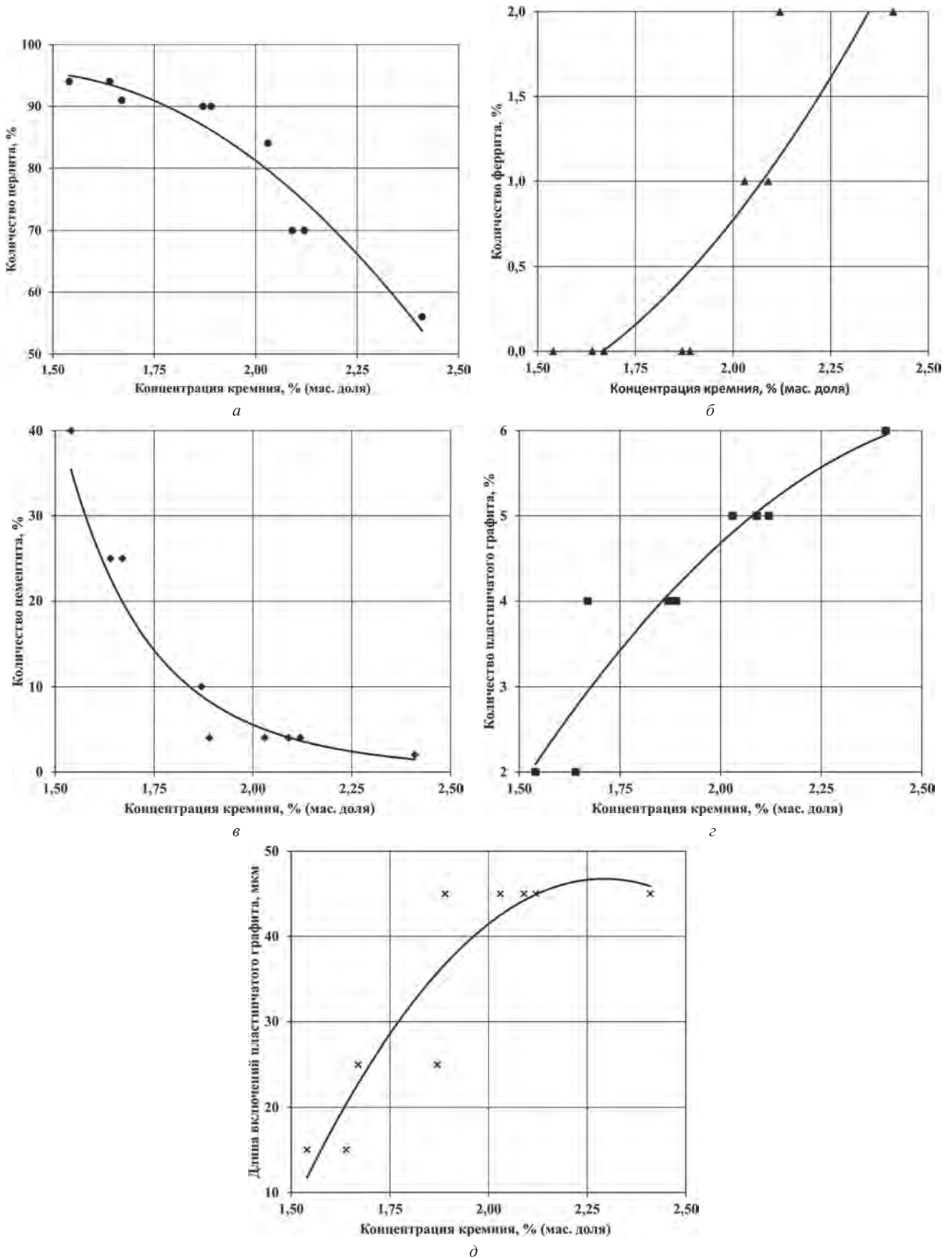


Рис. 1. Зависимость параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 от показателей усвоения кремния: а – количества перлита $\{П = f_1([Si]_M)\}$; б – количества феррита $\{Ф = f_2([Si]_M)\}$; в – количества цементита $\{Fe_3C = f_3([Si]_M)\}$; г – количества пластинчатого графита $\{ПГ = f_4([Si]_M)\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{l_{ПГ} = f_5([Si]_M)\}$

Таблица 1. Показатели эффективности усвоения кремния, параметры микроструктуры и твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости литого образца

Индекс		Координаты, мм				Показатели эффективности усвоения кремния		Параметры микроструктуры					Твердость по Бринеллю НВ
отливки	темплета	питателя		«контрольной» точки		[Si] _М , % (мас. доля)	k _[Si]	количество, % (по площади)				l _{ПГ} , мкм	
		H ₀	a ₀	H ₀	a ₀			Π	Φ	Fe ₃ C	ПГ		
14	14-1	0	50	290	10	2,12	0,493	70	2	04	5	45	235
	14-2			290	50	2,03	0,373	84	1	04	5	45	255
	14-3			290	90	2,09	0,453	70	1	04	5	45	248
	14-4			150	10	1,87	0,160	90	0	10	4	25	262
	14-5			150	50	2,41	0,880	56	2	02	6	45	229
	14-6			150	90	1,89	0,187	90	0	04	4	45	241
	14-7			010	10	1,67	0,000	91	0	25	4	25	302
	14-8			010	50	1,54	0,000	94	0	40	2	15	321
	14-9			010	90	1,64	0,000	94	0	25	2	15	311

чество Φ достигает 2%. Содержание Fe₃C в диапазоне [Si]_М = 1,54–2,41% также изменяется. В рассматриваемом интервале концентраций количество этой важной структурной составляющей серого чугуна постепенно уменьшается с 40 до 2%. Увеличение [Si]_М от 1,54 до 2,41% приводит к тому, что такие параметры микроструктуры материала литого образца, как ПГ и l_{ПГ}, также монотонно возрастают от 2% и 15 мкм до 6% и 45 мкм соответственно.

В результате математической обработки экспериментальных данных (табл. 1), т. е. аппроксимации соответствующих функциональных зависимостей, заданных в табличной форме, был получен целый ряд эмпирических уравнений в виде полиномов второго порядка (кроме [Fe₃C] = f₃ ([Si]_М), где зависимость носит степенной характер), которые приближенно описывают влияние [Si]_М на параметры микроструктуры серого чугуна (Π, Φ, Fe₃C, ПГ, а также l_{ПГ}):

$$\Pi = -42,421[\text{Si}]_M^2 + 120,19[\text{Si}]_M + 10,516, \quad (3)$$

$$\Phi = 1,7642[\text{Si}]_M^2 - 4,148[\text{Si}]_M + 2,0135, \quad (4)$$

$$[\text{Fe}_3\text{C}] = 761,33[\text{Si}]_M^{-7,104}, \quad (5)$$

$$\text{ПГ} = -2,9211[\text{Si}]_M^2 + 15,974[\text{Si}]_M - 15,583, \quad (6)$$

$$l_{\text{ПГ}} = -61,839[\text{Si}]_M^2 + 283,53[\text{Si}]_M - 278,24. \quad (7)$$

Полученные результаты экспериментов (рис. 2) позволили также установить зависимость параметров микроструктуры серого чугуна от k_[Si]. Так, например, изменение k_[Si] от 0 до 0,88 приводит к уменьшению количества Π от 94 до 56%. Количество Φ в этом интервале плавно увеличивается (без экстремума) от 0 до 2%. Содержание Fe₃C при k_[Si] = 0–0,88 монотонно уменьшается с 40 до 2%. Эта зависимость подчиняется закону экспоненты. Что же касается количества ПГ и l_{ПГ}, то в рассматриваемом интервале k_[Si] эти параметры микроструктуры серого чугуна увеличиваются соответственно от 2% и 15 мкм до 6% и 45 мкм. Эти зависимости, как и первые две, также являются полиномами второго порядка.

Математическая обработка экспериментальных данных (табл. 1) позволила аналитически описать зависимость основных параметров микроструктуры серого чугуна, т. е. количеств Π, Φ, Fe₃C, ПГ, а также l_{ПГ} от k_[Si]. Эмпирические уравнения этих зависимостей, которые были получены в результате аппроксимации табличных функций, имеют вид:

$$\Pi = -7,319k_{[\text{Si}]}^2 - 38,363k_{[\text{Si}]} + 94,12, \quad (8)$$

$$\Phi = -0,8279k_{[\text{Si}]}^2 + 3,3238k_{[\text{Si}]} - 0,1427, \quad (9)$$

$$[\text{Fe}_3\text{C}] = 19,424e^{-3,154k_{[\text{Si}]}} \quad (10)$$

$$\text{ПГ} = -3,8587k_{[\text{Si}]}^2 + 7,0293k_{[\text{Si}]} + 2,7324, \quad (11)$$

$$l_{\text{ПГ}} = -75,897k_{[\text{Si}]}^2 + 95,664k_{[\text{Si}]} + 18,821. \quad (12)$$

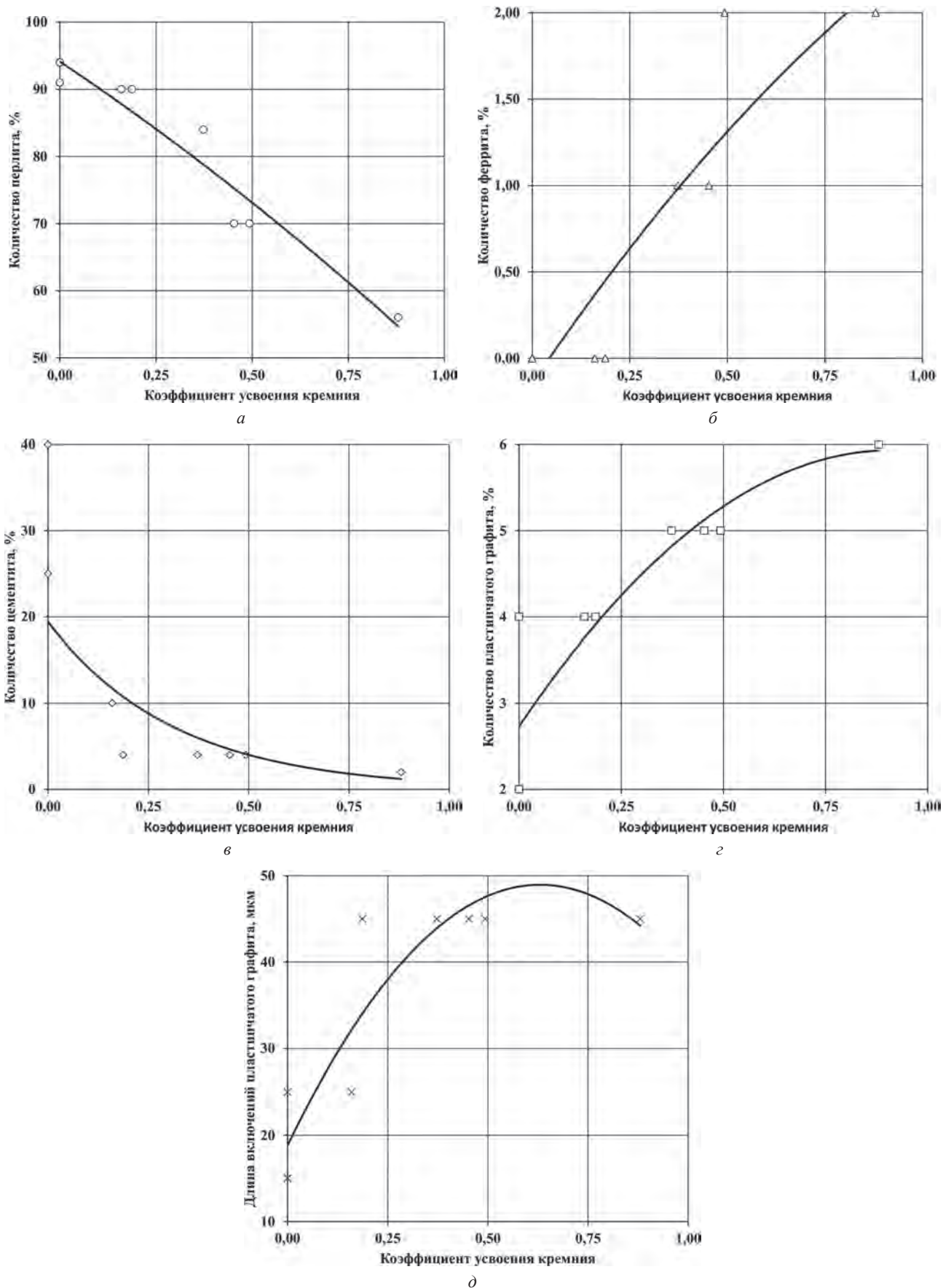


Рис. 2. Зависимость параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 от показателей усвоения кремния: а – количества перлита $\{\Pi = \varphi_1(k_{[Si]})\}$; б – количества феррита $\{\Phi = \varphi_2(k_{[Si]})\}$; в – количества цементита $\{[Fe_3C] = \varphi_3(k_{[Si]})\}$; г – количества пластинчатого графита $\{\PiГ = \varphi_4(k_{[Si]})\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{l_{\PiГ} = \varphi_5(k_{[Si]})\}$

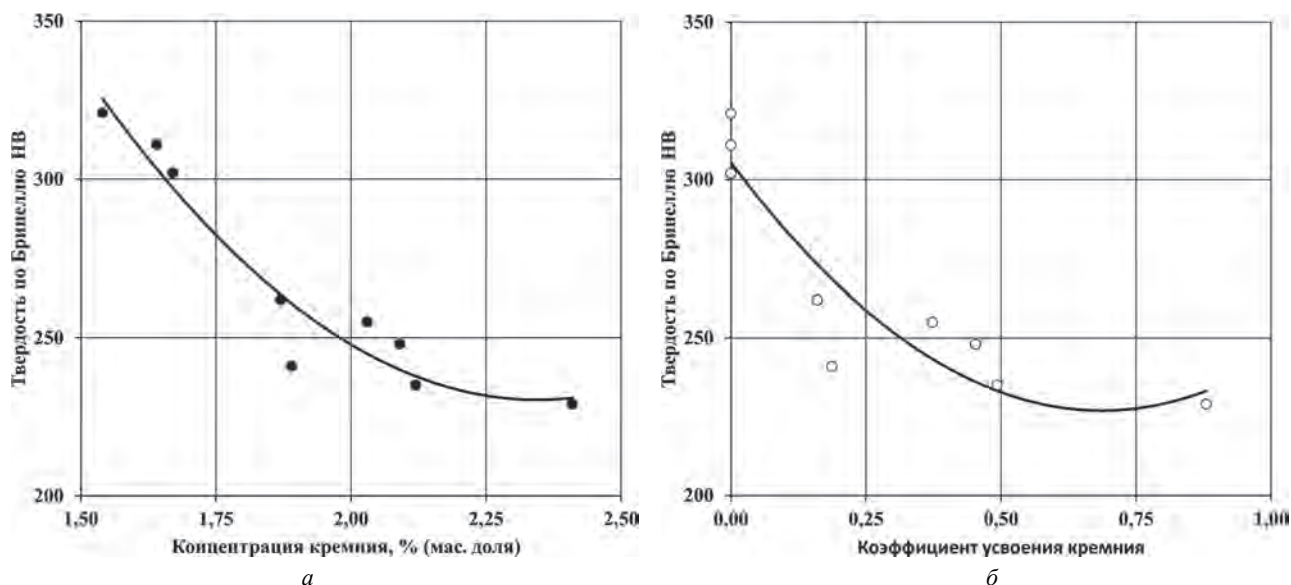


Рис. 3. Влияние показателей усвоения кремния на твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85: а – концентрации кремния $\{HB = f([Si]_M)\}$; б – коэффициента усвоения кремния $\{HB = \varphi(k_{[Si]})\}$

Как видно из уравнений (3)–(12), такие показатели эффективности усвоения кремния, как $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$, влияют на основные параметры микроструктуры СЧ20, ГОСТ 1412-85. Это объясняется тем, что кремний, будучи ГЭ, приводит к уменьшению количества структурно свободного Fe_3C в основе серого чугуна, а также вследствие распада Fe_3C способствует графитизации его металлической матрицы.

Установлено (табл. 1), что твердость литых образцов в первую очередь зависит от $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$ расплавом серого чугуна. Полученные результаты (рис. 3) показали, что твердость СЧ20, ГОСТ 1412-85 при $[Si]_M = 1,54\text{--}2,41\%$ падает с 321 до 229 HB. Аналитическая зависимость существует также и между $k_{[Si]}$ и твердостью литых образцов. Так, например, увеличение $k_{[Si]}$ от 0 до 0,88 приводит к плавному снижению твердости чугуновой отливки с 321 до 229 HB. В обоих случаях линии аппроксимации соответствующих функциональных зависимостей представляют собой полиномы второго порядка.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила аналитически описать влияние таких показателей усвоения кремния, как $[Si]_M$ и $k_{[Si]}$ на одну из наиболее важных механических характеристик серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 – его твердость. Уравнения рассмотренных зависимостей имеют вид:

$$HB = 146,62[Si]_M^2 - 687,8[Si]_M + 1037, \quad (13)$$

$$HB = 166,59k_{[Si]}^2 - 228,74k_{[Si]} + 305,49. \quad (14)$$

Характер этих функциональных зависимостей объясняется тем, что кремний, будучи ГЭ, в незначительных количествах существенно снижает содержание структурно свободного Fe_3C и, тем самым, уменьшает хрупкость и твердость литого образца. Увеличение $[Si]_M$ в составе серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 способствует также уменьшению количества П и образованию Ф в структуре материала, что в свою очередь приводит к повышению его ударной вязкости и пластичности.

Из табл. 1, видно, что твердость отливок изменяется в зависимости от микроструктуры серого чугуна. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, подтверждают и наглядно иллюстрируют влияние параметров микроструктуры СЧ20, ГОСТ 1412-85 на твердость литых образцов. Так, например, увеличение количества П в структуре чугуновых отливок на всем исследуемом интервале, т. е. от 56 до 94%, приводит к повышению их твердости соответственно от 229 до 321 HB. Эта зависимость описывается полиномом второго порядка. Вследствие увеличения содержания Ф от 0 до 2% твердость серого чугуна уменьшилась соответственно с 321 до 229 HB. Влияние данного параметра микроструктуры литого образца на его твердость носит экспоненциальный характер. Увеличение количества структурно свободного Fe_3C от 2 до 40% привело к увеличению твердости отливок из СЧ20, ГОСТ 1412-85 от 229 HB в начале интервала до 321 HB в его конце. Содержание ПГ в основе чугуна также влияет на твердость литых образцов. Увеличение количества ПГ от 2 до 6% вызвало снижение твердости материала соответственно с 321 до 229 HB. Зависимость твердости исследуемого литого образца от $l_{ПГ}$, как и в двух предыдущих

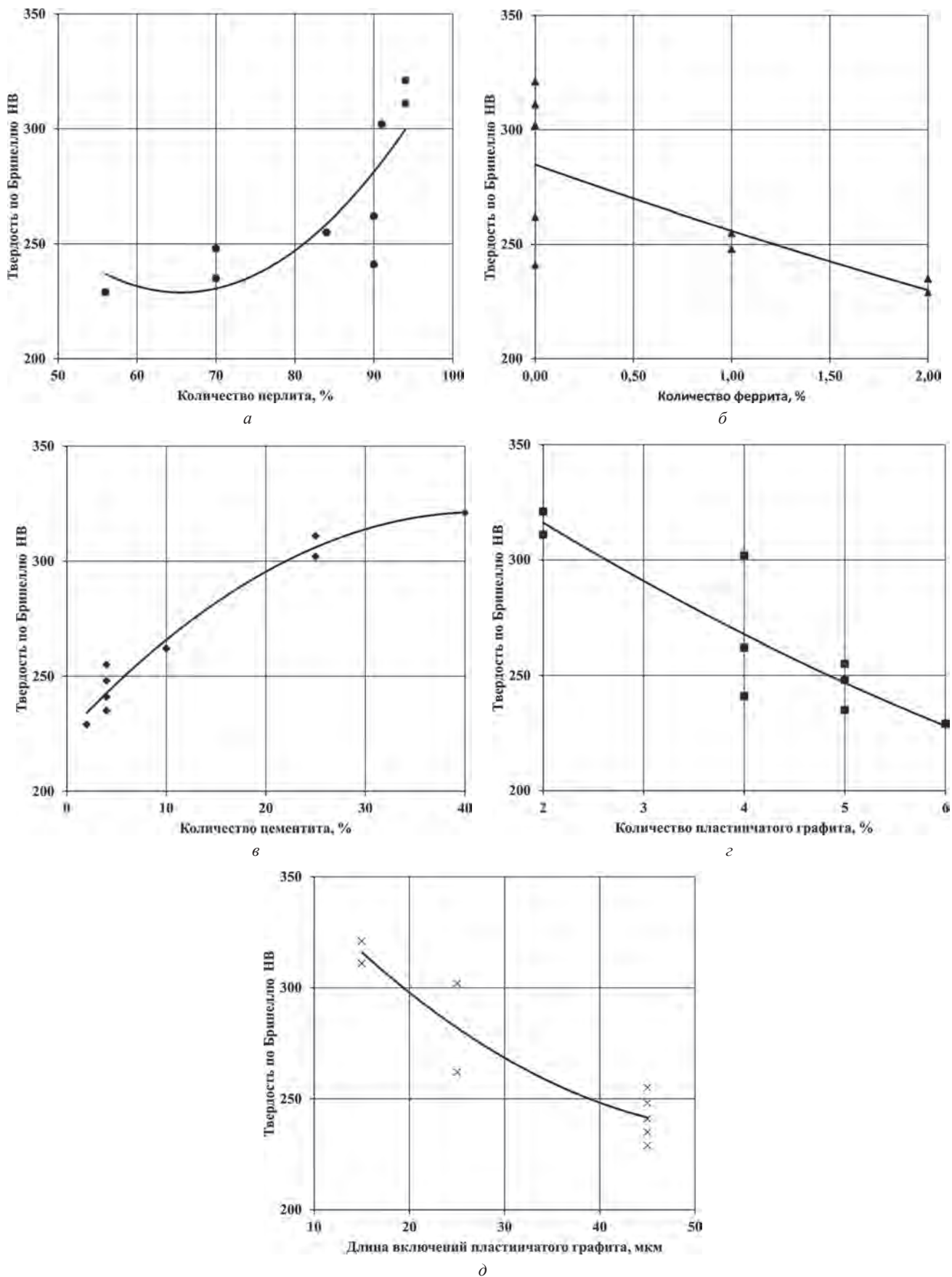


Рис. 4. Зависимость твердости отливок от параметров микроструктуры серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85: а – количества перлита $\{HB = \psi_1(\Pi)\}$; б – количества феррита $\{HB = \psi_2(\Phi)\}$; в – количества цементита $\{HB = \psi_3([Fe_3C])\}$; г – количества пластинчатого графита $\{HB = \psi_4(\PiГ)\}$; д – длины включений пластинчатого графита $\{HB = \psi_5(l_{\PiГ})\}$

случаях, является полиномом второго порядка, что показала математическая обработка экспериментальных данных. При $l_{\text{ПГ}} = 15$ мкм твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 максимальная и составляет 321 НВ. По мере увеличения $l_{\text{ПГ}}$ твердость материала отливки уменьшается и уже при 45 мкм достигает минимального значения – 229 НВ.

Математическая обработка экспериментальных данных (табл. 1) позволила получить соответствующие эмпирические уравнения, которые аналитически описывают зависимость твердости исследуемых литых образцов от параметров микроструктуры серого чугуна:

$$\text{НВ} = 0,0878\Pi^2 - 11,521\Pi + 606,68, \quad (15)$$

$$\text{НВ} = 284,71e^{-0,107\Pi}, \quad (16)$$

$$\text{НВ} = -0,0557[\text{Fe}_3\text{C}]^2 + 4,6298[\text{Fe}_3\text{C}] + 225,08, \quad (17)$$

$$\text{НВ} = 1,0986(\text{ПГ})^2 - 30,804(\text{ПГ}) + 373,37, \quad (18)$$

$$\text{НВ} = 0,046l_{\text{ПГ}}^2 - 5,24l_{\text{ПГ}} + 384,25. \quad (19)$$

Выбранные на соответствующих графиках линии аппроксимации, за исключением уравнения (16), где влияние количества Π на НВ носит экспоненциальный характер, описываются с помощью полиномов второго порядка (15), (17)–(19).

Такая зависимость твердости исследуемой отливки от параметров микроструктуры материала литого образца объясняется, прежде всего, тем, что каждая структурная составляющая характеризуется определенной микротвердостью, которая в зависимости от ее количества, в конечном итоге, влияет на твердость серого чугуна в целом. Так, например, перлитизация матрицы чугуновых отливок приводит к увеличению их твердости. Повышение содержания структурно свободного Fe_3C , как самой твердой составляющей серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85, также способствует увеличению твердости литого образца. В то же время твердость Π значительно ниже твердости Fe_3C , поэтому для повышения общей твердости серого чугуна на одну и ту же величину достаточно количество последнего в его структуре довести до 40%, что в 2,35 раза меньше количества Π . Увеличение содержания ПГ существенно упрочняет металлическую матрицу, и, тем самым, приводит к падению твердости чугуновых отливок. Вместе с тем, дальнейшее увеличение количества этой структурной составляющей, которую фактически можно рассматривать как концентратор механических напряжений в основе материала, приводит к тому, что матрица СЧ20, ГОСТ 1412-85 ослабляется и, как следствие, уменьшается прочность литого образца. Зависимость твердости исследуемой отливки от $l_{\text{ПГ}}$ объясняется тем, что этот показатель влияет на прочность металлической матрицы серого чугуна. Последняя в свою очередь определяет твердость материала литого образца. Следует принять во внимание, что $l_{\text{ПГ}}$ может влиять на твердость серого чугуна так же как и количество ПГ, поскольку эти показатели микроструктуры материала напрямую связаны между собой – общее содержание ПГ может увеличиваться за счет увеличения $l_{\text{ПГ}}$, и наоборот.

Кроме того, в процессе выполнения данной работы опытным путем (табл. 2) было установлено, что механические свойства чугуновой отливки зависят от геометрических размеров литого образца. Так, например, графическая интерпретация экспериментальных данных (рис. 5), представленных в табл. 2, доказала функциональную зависимость, которая существует между твердостью чугуна, длиной и высотой исследуемой отливки. В частности, для экспериментального литого образца характерно повышение твердости серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в нижней части отливки. По мере повышения литого образца твердость его материала сначала падает, а потом, начиная с 220 мм, незаметно возрастает. Максимальная твердость чугуна – в точке подвода расплава в «полость» ЛФ и составляет 321 НВ. В центральной части отливки этот показатель понижается до 262 НВ, а с противоположной стороны от питателя твердость достигает 255 НВ. С левой стороны от питателя на высоте 0, 150 и 300 мм серый чугун соответственно имеет твердость 302, 241 и 235 НВ, в то время как твердость правой стороны отливки на той самой высоте приобретает значения 311, 229 и 248 НВ. Очевидно, что твердость чугуна зависит также и от длины литого образца, причем зависимость носит параболический характер.

Математическая обработка результатов эксперимента (табл. 2) позволила аналитически описать влияние габаритных размеров отливки на твердость серого чугуна. При этом установлено, что твердость СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости [7] литого образца изменяется по закону полинома второго порядка. Уравнение этой зависимости имеет вид:

Таблица 2. Твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 в «контрольной» плоскости литого образца

Индекс		Координаты, мм				Твердость по Бринеллю НВ
отливки	темплета	питателя		«контрольной» точки		
		H_0	a_0	H_0	a_0	
14	14-1	0	50	290	10	235
	14-2			290	50	255
	14-3			290	90	248
	14-4			150	10	241
	14-5			150	50	262
	14-6			150	90	229
	14-7			010	10	302
	14-8			010	50	321
	14-9			010	90	311
К	К-1	0	50	290	10	415
	К-2			290	50	429
	К-3			290	90	444
	К-4			150	10	429
	К-5			150	50	415
	К-6			150	90	429
	К-7			010	10	415
	К-8			010	50	444
	К-9			010	90	461

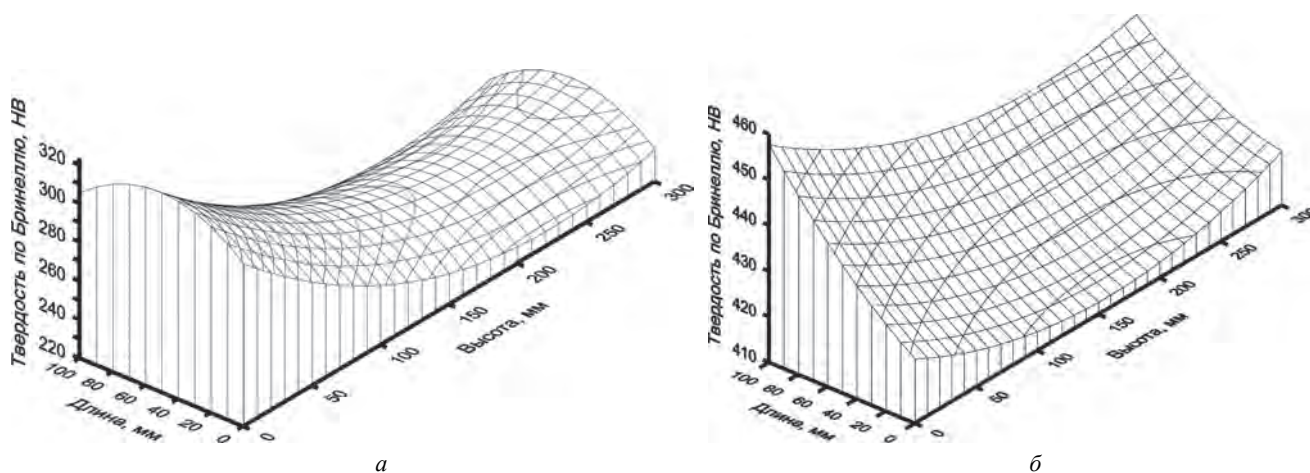


Рис. 5. Распределение твердости материала литых образцов в «контрольной» плоскости [7] отливок из: а – серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85; б – белого чугуна

$$\begin{aligned}
 \text{НВ} = & 304,556 - 6,86667 \cdot 10^{-1} \cdot H_0 + 1,54074 \cdot 10^{-3} \cdot H_0^2 + 1,33333 \cdot 10^{-4} \cdot H_0 a_0 + \\
 & + 7,46667 \cdot 10^{-1} \cdot a_0 - 7,33333 \cdot 10^{-3} \cdot a_0^2,
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

где H_0 – высота отливки, $\times 10^{-3}$ м; a_0 – длина литого образца, $\times 10^{-3}$ м.

Такое распределение твердости в «контрольной» плоскости отливки объясняется тем, что в процессе формозаполнения в «полости» ЛФ возникают гидродинамические и конвективные потоки, которые приводят к тому, что концентрационное поле кремния колеблется в «контрольной» плоскости литого образца, и в этом случае приходится говорить о неравномерности распределения этого ГЭ в объеме отливки, причем не хаотично. Совершенно очевидно (рис. 5), что кремний «вымывается» потоком поднимающегося в «полости» ЛФ матричного расплава как по фронту его движения, так и по обе стороны от питателя. Поскольку зависимость твердости от $[\text{Si}]_M$ и $k_{[\text{Si}]}$ рассмотрена и доказана выше (рис. 3, уравнения (13), (14)), то, исходя из этих соображений, понятно, почему твердость серого чугуна марки СЧ20, ГОСТ 1412-85 зависит от длины и высоты литого образца.

Таким образом, в результате графитизирующего модифицирования чугуна расплава в «полости» ЛФ с помощью дисперсно-наполненной ГМ удалось получить образцы конструкционного материала,

которые можно использовать для производства опытно-экспериментальной партии реальных отливок, необходимой для производственных испытаний. В то же время необходимо учитывать, что формирование структуры и твердости литых образцов происходит, в первую очередь, под влиянием гидро-, газодинамики ЛГМ-процесса. Эти условия в значительной мере влияют на показатели усвоения ГЭ матричным расплавом, от которых, прежде всего, зависят микроструктура и механические свойства, в частности твердость, исследуемых отливок. Проведенные исследования показали, что благодаря методу планирования эксперимента, а также использованию полученных аналитических зависимостей можно предопределить влияние элементов-модификаторов на структурообразование чугунных отливок в целом, минуя проведение обширной серии испытаний.

Литература

1. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. 758 с.
2. Гуляев А. П. *Металловедение: Учеб. пособ.* 5-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1977. 648 с.
3. Пат. 244 України: МКІ³ В22С7/02, В22С3/00. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / О. Й. Шинський, Л. П. Вишнякова, В. Н. Плотнікова, Є. Ф. Князєв (Україна); Заявл. 15.01.93; Опубл. 30.04.93.
4. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1973. 134 с.
5. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1975. Вып. 2. 193 с.
6. Литье по газифицируемым моделям // Сб. науч. тр. Киев: АН УССР. Ин-т проблем литья, 1979. 168 с.
7. Анненко Л. П., Шуляк В. С., Лузан П. П. Изготовление пенополистироловых моделей с легирующими присадками // Новое в точном литье. 1972. С. 226–227.
8. Исследование концентрационных полей легирующих и модифицирующих элементов, полученных с использованием газифицируемых моделей с мелкодисперсными присадками / О. И. Шинский, В. В. Суменкова, И. В. Ткачук, О. Х. Бабаджанов // Процессы литья. 1999. № 2. С. 41–48.
9. Особливості структуроутворення СЧ20, модифікованого ФС75 у порожнині ливарної форми за ГАМОЛІВ-процесом / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, І. В. Ткачук, О. Й. Шинський // MOM. 2001. № 4. С. 43–49.
10. Використання дисперснонаповнених моделей, що газифікуються, для отримання чавунних виливків / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, О. Й. Шинський, О. О. Онищук // MOM. 2005. № 4. С. 19–22.
11. Небожак И. А., Суменкова В. В., Шинский О. И. Исследование эффективности внутрiformенного модифицирования отливок из серого чугуна ферросилицием при литье по газифицируемым дисперсно-наполненным моделям // Процессы литья. 2008. № 5. С. 50–56.
12. Микроструктура модифицированных ферросилицием чугунных отливок, полученных с помощью газифицируемых дисперснонаполненных моделей / И. А. Небожак, Т. К. Пилипенко, В. В. Суменкова, О. И. Шинский // Процессы литья. 2009. № 3. С. 17–23.

References

1. *Iron casting handbook* / Edited by N. G. Girshovich. 3-rd ed., rev. and add. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningradskoe otdelenie, 1978. 758 p.
2. Gulyaev A. P. *Physical metallurgy*. 5-rd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 648 p.
3. Shynskiy O. Y., Vyshnyakova L. P., Plotnikova V. N., Knyazev Y. F. A method of manufacturing models from foam polystyrene. *Patent 244 Ukraine*, no. 1079340, 1993.
4. *Lost-foam casting: Collection of scientific papers*. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1973. 134 p.
5. *Lost-foam casting: Collection of scientific papers*. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1975. Issue 2. 193 p.
6. *Lost-foam casting: Collection of scientific papers*. Kiev, Academy of Sciences of USSR. Institute for Problems in Casting, 1979. 168 p.
7. Annenko L. P., Shulyak V. S., Luzan P. P. Production of foam polystyrene models with alloying addition. *A new in precision casting*. 1972, pp. 226–227.
8. Shynskiy O. I., Sumenkova V. V., Tkachuk I. V., Babadjanov O. K. Investigation of concentration fields of modifying alloying elements obtained using evaporative casting model with fine-dispersed additives. *Protsessy lit'ya*. 1999, no. 2, pp. 41–48.
9. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Tkachuk I. V., Shynskiy O. I. Features of С420 structure formation which is modified with ФС75 in the casting mold cavity using lost-foam process. *MOM*. 2001, no. 4, pp. 43–49.
10. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shynskiy O. I., Onyschuk O. O. The use of the dispersion-filled consumable patterns for production of cast iron ingots. *MOM*. 2005, no. 4, pp. 19–22.
11. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shynskiy O. I. Research of efficiency of intra-mold ferrosilicon modification of gray cast iron ingots using dispersion-filled consumable patterns. *Protsessy lit'ya*. 2008, no. 5, pp. 50–56.
12. Nebozhak I. A., Pilypenko T. K., Sumenkova V. V., Shynskiy O. I. The microstructure of ferrosilicon modified cast iron ingots and produced using dispersion-filled consumable patterns. *Protsessy lit'ya*. 2009, no. 3, pp. 17–23.

Сведения об авторе

Небожак Иван Анатольевич. Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, б-р Академика Вернадского, 34/1, г. Киев-142, Украина. E-mail: nebozhak@ukr.net.

Information about the author

Nebozhak Ivan. Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1, Vernadsky Ave., Kyiv-142, Ukraine. E-mail: nebozhak@ukr.net.