

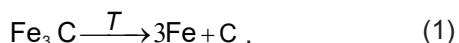
Влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна в «полости» литейной формы

На примере образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) определены основные критерии оценки процесса графитизирующего модифицирования матричного расплава – концентрация кремния и коэффициент его усвоения, а также измерена твёрдость отливок. Путём математической обработки и графической интерпретации экспериментальных данных доказано влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на эффективность внутриформенного модифицирования жидкого чугуна дисперсным ферросилицием марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80)

Ключевые слова: газомодель, графитизирующее модифицирование, графическая интерпретация, жидкий металл, концентрация кремния, коэффициент усвоения кремния, ЛГМ-процесс, литейная форма, литой образец, математическая обработка, отбел, отливка, плотность пенополистирола, расплав, серый чугун, скорость заливки, твёрдость, температура заливки, технологические параметры, уравнение регрессии, ферросилиций, цементит

При всех способах литья, а особенно при литье чугуна в кокиль, интенсивная теплоотдача, которая имеет место в тонких сечениях отливки, приводит к повышенной скорости кристаллизации матричного расплава [1-5]. В этом случае, с термодинамической точки зрения, создаются благоприятные условия для образования структурного свободного цементита [6], что впоследствии является причиной поверхностного, а для кокильного литья – сквозного, отбела чугунных отливок. Отбел серого чугуна, как правило, повышает его твёрдость и хрупкость, и тем самым ухудшает обрабатываемость этого материала резанием [7].

Указанный недостаток можно устранить с помощью термической обработки чугуна литья, где под действием высокой температуры (1173 ... 1223 К) происходит разложение цементита [6]:



или путём графитизирующего модифицирования [8-10] жидкого металла в ковше перед заливкой в литейную форму (ЛФ). Графитизирующее модифицирование серого чугуна на практике осуществляют в большинстве случаев с помощью кускового ферросилиция, реже – ферросиликобария.

Однако термообработка (графитизирующий отжиг) чугуна литья – процесс энергоёмкий, что особенно актуально в условиях нехватки энергоносителей. Металлургическая обработка металлического расплава в ковше также не самый лучший вариант, так как модифицированию подлежит не только отливка, но и литниковая система (ЛС), и в этом случае имеет место перерасход ферросплавов. Кроме того, при больших объёмах жидкого металла приходится делать поправку на время «живучести» модификатора, так как длительность транспортировки, заливки и кристаллизации чугуна сравнительно

велики, и «живучести» модификатора может не хватить [7], то есть:

$$\tau_{\text{жив}}^E \geq \tau_{\text{тр}}^{\text{Me}} + \tau_{\text{зал}}^{\text{Me}} + \tau_{\text{кр}}^{\text{Me}}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{жив}}^E$, $\tau_{\text{тр}}^{\text{Me}}$, $\tau_{\text{зал}}^{\text{Me}}$, $\tau_{\text{кр}}^{\text{Me}}$ – соответственно, время «живучести» модификатора, длительность транспортировки, заливки и кристаллизации жидкого металла, ×60 с.

Известные на сегодняшний день методы внутриформенного модифицирования чугуна [11-13] позволяют в большей или меньшей мере избежать тех недостатков, которые имеют место при термообработке чугуна литья, а также в процессе графитизирующего модифицирования матричного расплава перед заливкой в ковше. Однако эти приёмы усложняют ЛС и, таким образом, требуют дополнительных капиталовложений при проектировании и изготовлении модельной оснастки.

Используя преимущества ЛГМ-процесса и его особенности, состоящие, главным образом, в наличии неизвлекаемой газифицируемой модели (ГМ) в «полости» ЛФ, которую получают из гранулированного пенополистирола в пресс-форме (ПФ), сотрудники ФТИМС НАН Украины [14-19] разработали и опробовали принципиально новый метод внутриформенного модифицирования чугуна расплава. Этот метод [14, 15] состоял в том, что гранулы пенополистирола предварительно плакировали порошкообразными ферросплавными добавками, которые затем задували в полость ПФ и спекали по известной технологии [20]. Преимущество этого метода сводится не только к металлургической обработке жидкого чугуна исключительно в полости ЛФ, но и к возможности утилизации пылевидных отходов ферросплавного производства, что предусматривает дополнительный экономический эффект.

Технологические параметры ЛГМ-процесса

Уровень фактора	Независимые факторы			
	$C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}}$, %мас.	$T_{\text{Ме}}^0$, К	$v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}}$, $\times 10^{-3}$ м/с	$\rho_{\text{ГМ}}$, кг/м ³
min	0,2	1523	25	20
max	1,0	1753	50	50

В ФТИМС НАН Украины была поставлена и выполнена серия экспериментов [21-27], связанных с графитизирующим модифицированием серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) ферросилицием марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80). Модифицирование осуществляли посредством дисперснонаполненной ГМ, однако ни в одном из упомянутых случаев влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на структуру и свойства полученных таким образом оливок не исследовали.

Цель настоящей работы – изучить зависимость конечной концентрации кремния в чугунной отливке и коэффициента его усвоения матричным расплавом (соответственно, $[Si]_{\text{М}}$ и $k_{[Si]}$), а также твердости литого образца по шкале Бринелля (НВ) от: содержания (от массы отливки) ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), имплантированного в ГМ ($C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}}$); температуры заливки ($T_{\text{Ме}}^0$); расчетной скорости подъема жидкого чугуна в полости ЛФ ($v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}}$) и плотности модельного материала ($\rho_{\text{ГМ}}$).

При исследовании влияния технологических параметров (независимых факторов) ЛГМ-процесса на показатели усвоения модификатора, такие как концентрация кремния в материале литого образца и коэффициент его усвоения матричным расплавом, а также твердость серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) по Бринеллю был использован метод полного факторного эксперимента. Варьирование каждого фактора (табл. 1) осуществлялось на 2-х уровнях. Число необходимых экспериментов в данном случае было подсчитано с помощью формулы, предложенной авторами работы [28]:

$$k = 2^n, \quad (3)$$

где $n = 4$ – число независимых факторов, а регрессионная модель в общем виде, которая была создана для 4-х независимых факторов (технологических параметров ЛГМ-процесса), выглядит следующим образом [28]:

$$\begin{aligned} & ([Si]_{\text{М}}, k_{[Si]}, [\text{П}], [\text{Ф}], [Fe_3C], [\text{ПГ}], l_{\text{ПГ}}, \text{НВ}) = \\ & a_0 x_0 + a_1 C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} + a_2 \rho_{\text{ГМ}} + a_3 v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} + a_4 T_{\text{Ме}}^0 + \\ & + a_{1,2} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} \rho_{\text{ГМ}} + a_{1,3} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} + \\ & + a_{1,4} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} T_{\text{Ме}}^0 + a_{2,3} \rho_{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} + \\ & + a_{2,4} \rho_{\text{ГМ}} T_{\text{Ме}}^0 + a_{3,4} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} T_{\text{Ме}}^0 + \\ & + a_{1,2,3} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} \rho_{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} + a_{1,2,4} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} \times \\ & \times \rho_{\text{ГМ}} T_{\text{Ме}}^0 + a_{1,3,4} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} T_{\text{Ме}}^0 + \\ & + a_{2,3,4} \rho_{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} T_{\text{Ме}}^0 + a_{1,2,3,4} C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} \rho_{\text{ГМ}} v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} T_{\text{Ме}}^0 \end{aligned} \quad (4)$$

где $[Si]$ – конечная концентрация кремния в чугуне, %мас.; $k_{[Si]}$ – коэффициент усвоения кремния; $[\text{П}]$, $[\text{Ф}]$, $[Fe_3C]$, $[\text{ПГ}]$ – количество, соответственно, перлита, феррита, цементита, пластинчатого графита, %

(по площади); $l_{\text{ПГ}}$ – длина включений пластинчатого графита, мкм; НВ – твердость по Бринеллю, МПа; a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $a_{1,4}$, $a_{2,3}$, $a_{2,4}$, $a_{3,4}$, $a_{1,2,3}$, $a_{1,2,4}$, $a_{1,3,4}$, $a_{2,3,5}$, $a_{1,2,3,4}$ – коэффициенты регрессии; x_0 – фиктивный фактор, $x_0 = 1$.

Расчет коэффициентов регрессии осуществлялся путём решения системы 16-ти уравнений. Каждое уравнение имело по 16 неизвестных, которые, собственно, и были коэффициентами регрессии. Эта математическая задача была решена с помощью персонального компьютера. В основе решения оптимальной системы уравнений регрессии был использован известный в математике [29] метод Гаусса.

Экспериментально установлено (табл. 2), что между технологическими параметрами ЛГМ-процесса, концентрацией и коэффициентом усвоения кремния существует функциональная зависимость. Но, чтобы выяснить её характер, воспользовавшись формулой (4) и табл. 1, 2, необходимо выполнить серию математических операций и преобразований, а именно:

– как для концентрации кремния, так и коэффициента его усвоения составить по системе из 16-ти уравнений с 16-ю неизвестными;

– по очереди решить каждую из этих систем линейных уравнений, и затем определить коэффициенты регрессии;

– задаться такими оптимальными [min (табл. 1)] значениями технологических параметров ЛГМ-

процесса как: $C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}} = 0,2$ (%мас.), $\rho_{\text{ГМ}} = 20$ кг/м³, $v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}} = 0,025$ м/с, $T_{\text{Ме}}^0 = 1523$ К;

– по очереди зафиксировать по 3 из этих 4-х технологических параметров ЛГМ-процесса, и подставить их численные значения в каждую из систем уравнений регрессии.

Каждое из уравнений той или иной системы, полученных в результате этих математических преобразований, в конечном виде представляет собой уравнение, которое аналитически описывает влияние того или иного параметра ЛГМ-процесса на концентрацию или коэффициент усвоения кремния в сером чугуне марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84).

Так были получены линейные уравнения (5)-(8), аналитически описывающие зависимость концентрации кремния в объеме отливок из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) от технологических параметров ЛГМ-процесса – $C_{\text{Фс75}}^{\text{ГМ}}$, $\rho_{\text{ГМ}}$, $v_{\text{Ме}}^{\text{ЛФ}}$, $T_{\text{Ме}}^0$. Эти уравнения, соответственно к каждому из приведённых параметров, представлены ниже.

Вследствие графической интерпретации (рис. 1) расчётных данных (5)-(8) был установлен характер влияния таких технологических параметров

Таблица 2

Показатели эффективности усвоения кремния матричным расплавом и твердость чугуна

Индекс отливки	Экспериментальные и расчётные данные		
	[Si] _м , %мас.	k _[Si]	НВ, МПа
01	1,79	0,27	388
02	2,00	0,33	255
03	1,87	0,80	285
04	1,91	0,21	280
05	1,92	1,13	270
06	2,32	0,76	208
07	2,00	1,67	250
08	2,29	0,72	229
09	1,94	1,27	267
10	1,97	0,29	260
11	1,81	0,40	321
12	2,01	0,35	248
13	2,16	2,73	246
14	2,41	0,88	187
15	1,85	0,67	293
16	2,21	0,61	241
К	1,75	–	429

$$[Si]_M = 1,7363517 + 2,4982065 \cdot 10^{-1} \cdot C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}; \quad (5)$$

$$[Si]_M = 1,72687455 + 2,972064 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{\text{ГМ}}; \quad (6)$$

$$[Si]_M = 1,66598116 + 4,8133868 \cdot 10^{-3} \cdot V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}}; \quad (7)$$

$$[Si]_M = 7,93 \cdot 10^{-1} + 6,5221 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{МФ}}^0; \quad (8)$$

ЛГМ-процесса как: $C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$, $\rho_{\text{ГМ}}$, $V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}}$, $T_{\text{МФ}}^0$, на среднее значение концентрации кремния в чугуне. Очевидным остаётся тот факт, что каждый из параметров, представленных выше, способствует повышению концентрации кремния в объёме литых образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84), но в разной степени. Положительное влияние $C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}$ объясняется тем, что ферросилиций марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), будучи источником избыточного Si в чугуне, попадая в матричный расплав, сначала разносится конвективными потоками в его объёме, а затем расплавляется, что видно из уравнения конвективного массопереноса [1]:

$$\begin{aligned} & - \frac{\partial}{\partial x} (V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}} C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}} S) dx df = \\ & = V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}} C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}} S df - (V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}} + \frac{\partial V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}}}{\partial x} dx) \times \\ & \times (C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}} + \frac{\partial C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}}{\partial x} dx) (S + \frac{\partial S}{\partial x} dx), \end{aligned} \quad (9)$$

где x – координата линейного пространства, м; f – площадь поперечного сечения литейной формы в направлении, перпендикулярном конвективному потоку жид-

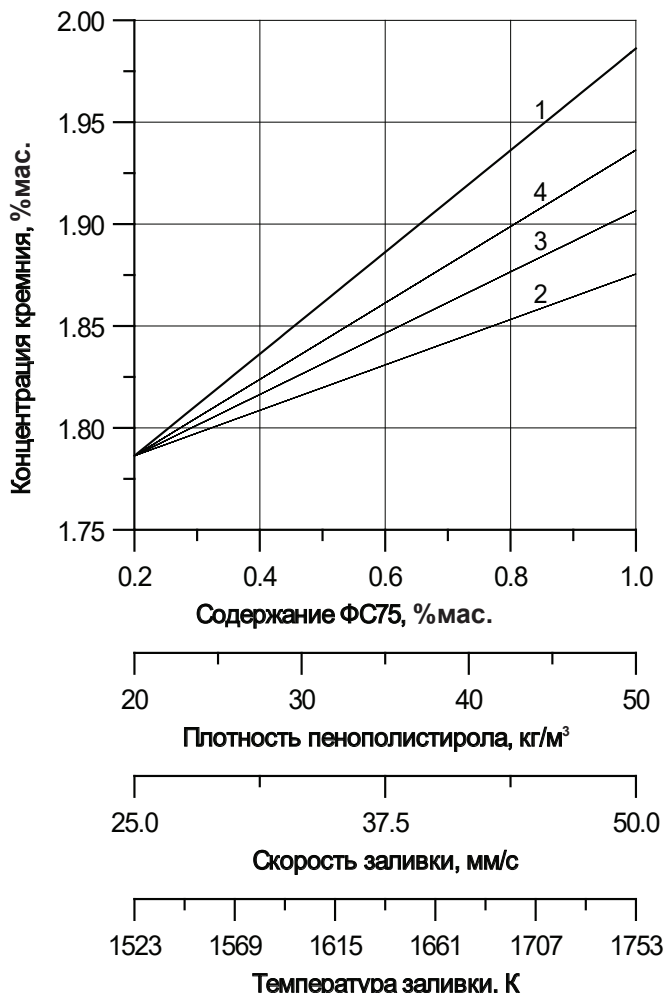


Рис. 1. Влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на концентрацию кремния в сером чугуне марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84): 1 – содержания ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80); 2 – плотности пенополистирола; 3 – скорости заливки; 4 – температуры заливки

кого чугуна, м²; S – относительное количество матричного расплава в двухфазной зоне.

При взаимодействии кремния с образующимся в процессе кристаллизации жидкого чугуна Fe_3C , равновесие, согласно принципу Ле-Шателье [30], сдвигается в сторону продуктов химической реакции, то есть в сторону выделения железа и углерода из расплава. Связь между плотностью модельного материала и концентрацией кремния объясняется тем, что по мере возрастания этой величины повышается количество парогазовой фазы продуктов термической деструкции пенополистирола в зазоре δ [20], которая образуется в процессе его взаимодействия с зеркалом металла. Так как большая часть продуктов термодеструкции модельного материала – это, как правило, углеводороды вида C_nH_m различного состава, то атмосфера зазора « δ » [20], по отношению как к матричному расплаву в целом, так и отдельным его компонентам, носит восстановительный характер. Таким образом, увеличение плотности пенополистирола способствует повышению концентрации кремния в объёме литых образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Повышение скорости заливки ЛФ металлом также ведёт к повышению концентрации кремния, хотя и не так интенсивно, как

в предыдущем случае. Это можно объяснить тем, что по мере повышения скорости подъёма матричного расплава в полости ЛФ повышается степень турбулизации потока, а значит и конвективная составляющая процесса массопереноса (9). Повышение температуры заливки улучшает усвоение кремния жидким чугуном как за счёт активизации процесса конвективного массопереноса частиц дисперсного ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) в объёме металла [1-5], так и повышения скорости молекулярной диффузии атомов самого кремния из ферросилиция в матричный расплав [31]. Это и приводит в конечном итоге к повышению концентрации кремния в объёме литых образцов из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84).

Следует отметить, что при условии отсутствия гидродинамических потоков в объёме расплава, частицы модификатора движутся и проходят значительный путь, перемещаясь в определённом направлении лишь на незначительное расстояние [32]. Зависимость перемещения частицы ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) в чугунном расплаве во времени может быть описана с помощью уравнения Эйнштейна-Смолуховского [33]:

$$\Delta_{\text{ФС75}} = \sqrt{2\tau_{\text{ФС75}} D_L}, \quad (10)$$

где τ – текущее время, с; D_L – коэффициент диффузии частицы ФС75 в расплаве чугуна, м²/с.

Если частицы модификатора имеют сферическую форму, то коэффициент их диффузии в матричном расплаве может быть описан следующей зависимостью [33]:

$$D_L = \frac{kT}{6\pi r_{\text{ФС75}} \eta_{[\text{СЧ20-ФС75}]}} \quad (11)$$

где $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$, Дж/К [34] – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура системы [СЧ20-ФС75], К; $r_{\text{ФС75}}$ – радиус частицы ФС75, $\cdot 10^{-6}$ м; $\eta_{[\text{СЧ20-ФС75}]}$ – динамическая вязкость коллоидного расплава [СЧ20 – ФС75], Па·с.

Одновременно были получены уравнения, которые аналитически описывают влияние тех самых параметров ЛГМ-процесса на коэффициент усвоения кремния расплавом серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Как и в предыдущем случае зависимости коэффициента усвоения кремния матричным расплавом от $C_{\text{ФС75}}^{\text{ЛФ}}$, $\rho_{\text{ЛФ}}$, $v_{\text{ЛФ}}$, $T_{\text{ЛФ}}$ носят линейный характер. Эти зависимости представлены ниже:

$$k_{[\text{Si}]} = 1,06793 \cdot 10^{-1} + 7,5096 \cdot 10^{-2} \cdot C_{\text{ФС75}}^{\text{ЛФ}}; \quad (12)$$

$$k_{[\text{Si}]} = -6,71768 \cdot 10^{-2} + 9,44945 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{\text{ЛФ}}; \quad (13)$$

$$k_{[\text{Si}]} = -5,928168 \cdot 10^{-1} + 2,858516 \cdot 10^{-2} \cdot v_{\text{ЛФ}}; \quad (14)$$

$$k_{[\text{Si}]} = -6,5206 + 4,3614 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{ЛФ}}; \quad (15)$$

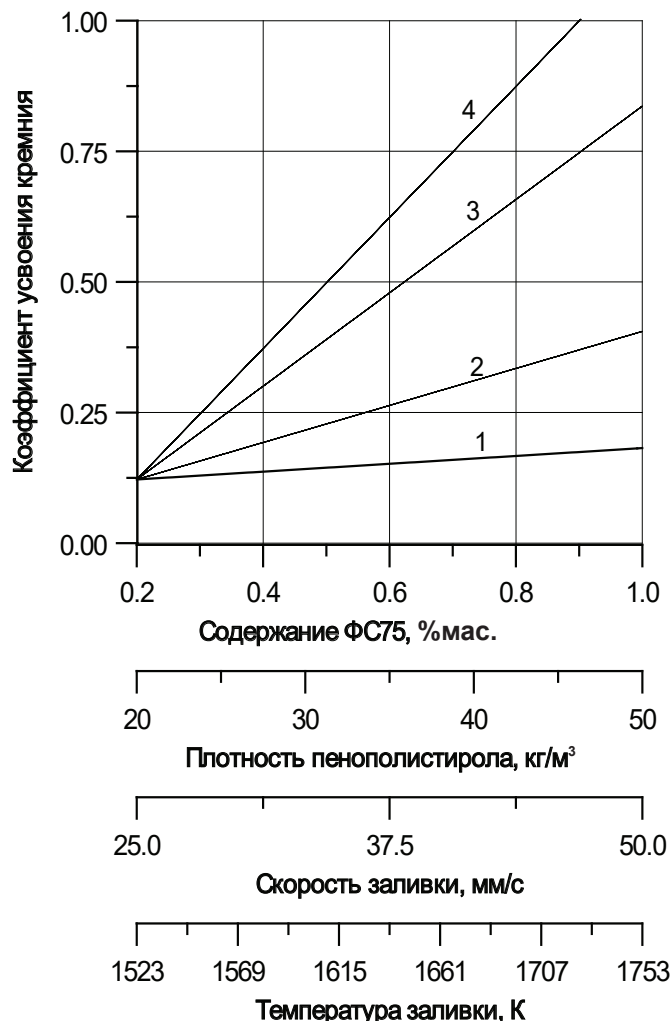


Рис. 2. Зависимость коэффициента усвоения кремния расплавом серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) от технологических параметров ЛГМ-процесса: 1 – содержания ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80); 2 – плотности пенополистирола; 3 – скорости заливки; 4 – температуры заливки

Графическая интерпретация (рис. 2) функциональных зависимостей (12)-(15), дала возможность представить, каким именно образом влияют технологические параметры ЛГМ-процесса на коэффициент усвоения кремния расплавом серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Очевидным, в первую очередь, остаётся тот факт, что все из перечисленных технологических параметров ЛГМ-процесса существенно влияют на коэффициент усвоения кремния матричным расплавом, но, как и в предыдущем случае, каждый по-своему. Так как конечная концентрация кремния в полученном чугуне и коэффициент его усвоения между собой связаны линейно [21, 25, 27], а также типы функциональных зависимостей (рис. 2) и виды соответствующих уравнений регрессии идентичны, то влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на коэффициент усвоения кремния имеет такое же объяснение, как и в случае с концентрацией кремния.

Экспериментально установлено (табл. 2), что формирование механических свойств серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84), в частности твёрдости литых образцов, происходит,

в первую очередь, под влиянием технологических параметров ЛГМ-процесса. Все эти факторы способствуют снижению твёрдости подопытных оливок в допустимых пределах, но в разной степени.

Математическая обработка полученных результатов (табл. 2), дала возможность аналитически описать зависимость твёрдости серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) от содержания дисперсного ферросилиция ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), имплантированного в ГМ; плотности пенополистирола; скорости и температуры заливки жидкого металла в полость ЛФ. Вследствие такой обработки экспериментальных данных был выведен ряд эмпирических уравнений, которые аналитически описывают влияние содержания ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), плотности модельного материала, скорости, а также температуры заливки матричного расплава в полость ЛФ на твёрдость литых образцов. Эти уравнения, как и в предыдущих случаях, носят исключительно линейный характер. Зависимости твёрдости отливок из серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) от технологических параметров ЛГМ-процесса, о которых идёт речь, представлены ниже:

$$HB = 420,86055 - 166,54405 \cdot C_{\text{ФС75}}^{\text{ГМ}}, \quad (16)$$

$$HB = 456,6012 - 3,45248 \cdot \rho_{\text{ГМ}}, \quad (17)$$

$$HB = 505,85264 - 4,73204 \cdot V_{\text{МФ}}^{\text{ЛФ}}, \quad (18)$$

$$HB = 1188,9848 - 0,52622 \cdot T_{\text{Ме}}^0, \quad (19)$$

Графическая интерпретация (рис. 3) зависимостей (16)-(19), полученных вследствие математической обработки экспериментальных данных (табл. 2), наглядно демонстрирует влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на твёрдость серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Кроме того, это даёт возможность представить характер зависимостей твёрдости чугуновых отливок от содержания ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), плотности пенополистирола, скорости и температуры заливки матричного расплава в «полость» ЛФ.

Такое влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на твёрдость серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) объясняется, в первую очередь, зависимостью микроструктуры чугуновых отливок от содержания ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) в ГМ, плотности модельного материала, скорости подъёма жидкого металла в «полости» ЛФ и температуры заливки. Микроструктура серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85

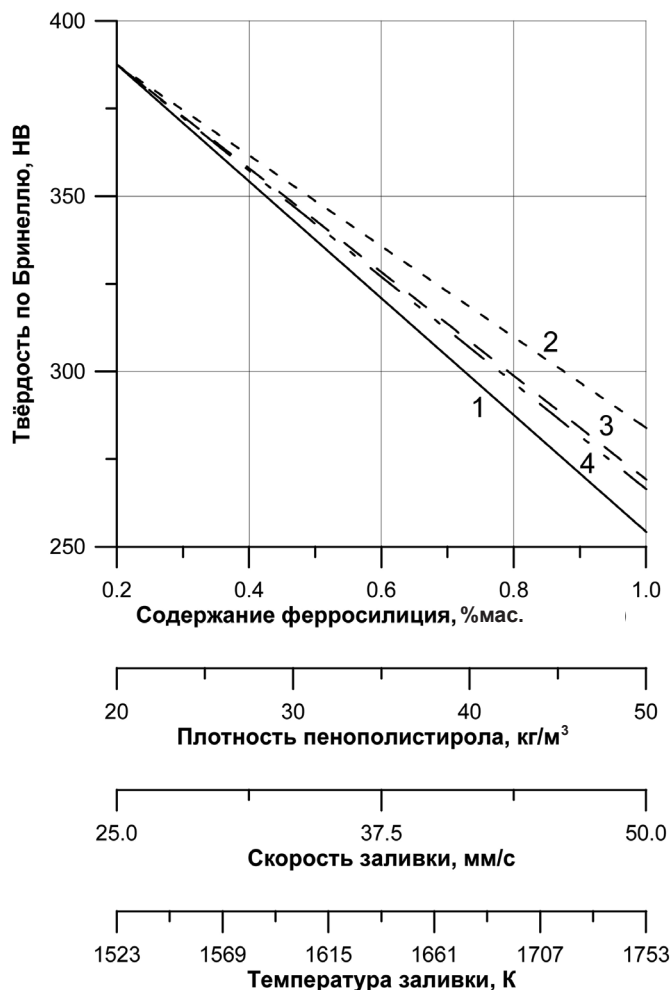
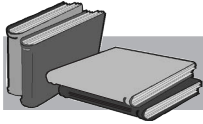


Рис. 3. Влияние технологических параметров ЛГМ-процесса на твёрдость серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84): 1 – содержания ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80); 2 – плотности пенополистирола; 3 – скорости заливки; 4 – температуры заливки

(СТ СЭВ 4560-84), в свою очередь, формируется под воздействием концентрации кремния и коэффициента его усвоения матричным расплавом.

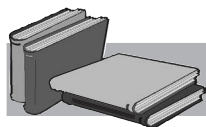
Таким образом, экспериментально установлено, что эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) с использованием дисперснонаполненной ГМ зависит от технологических параметров ЛГМ-процесса, так как металлургическая обработка матричного расплава в полости ЛФ приводит к повышению конечной концентрации кремния в литых образцах и коэффициента его усвоения жидким металлом, а также снижению твёрдости чугуновых отливок. Это связано с тем, что содержание дисперсного ферросилиция марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80), плотность пенополистирола, скорость и температура заливки жидкого металла в полость ЛФ влияют, во-первых, на гидро-, газодинамику ЛГМ-процесса, а во-вторых, на микроструктуру литых образцов.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Баландин Г. Ф.* Основы теории формирования отливки: Учебное пособие: В 2-х ч. / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1979. – Ч. 2: Формирование макроскопического строения отливки. – 335 с.
2. *Радл Р. У.* Затвердевание отливок: Пер. с англ. / Р. У. Радл. – М.: Машгиз, 1960. – 391 с.
3. *Баландин Г. Ф.* Формирование кристаллического строения отливок. Кристаллизация в литейной форме. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
4. *Оно А.* Затвердевание металлов: Пер. с англ. / А. Оно. – М.: Металлургия, 1980. – 152 с.
5. *Комаров О. С.* Термокинетические основы кристаллизации чугуна / О. С. Комаров. – Минск: Наука и техника, 1982. – 262 с.
6. *Гуляев А. П.* Металловедение: Учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
7. *Справочник по чугунному литью* / Под ред. Н. Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1978. – 758 с.
8. *Сергеева В. Н.* Графитизирующее модифицирование чугуна / В. Н. Сергеева // Новые материалы и технологии их обработки: X Республиканская студенческая научно-техническая конференция (28-30 апреля 2009 г.). – Минск: «Научно-технологический парк БНТУ «Метолит», 2009. – С. 67-68.
9. *Капустина Л. С.* Повышение эффективности процесса графитизирующего модифицирования чугуна с целью улучшения его качества: Автореф. дис. ... канд. тех. наук : (наприм. 05.02.08) / Л. С. Капустина. – Москва, 1984. – 24 с.
10. *Перегудов Л. В.* Взаимодействие расплава и кремнистых присадок при модифицировании чугуна / Л. В. Перегудов, М. М. Малашин, Т. В. Дружина // Литейное производство. – 1982. – № 4. – С. 6 – 7.
11. Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко и др. // *Металл и литьё Украины*. – 2015. – № 10. – С. 10-15.
12. Усовершенствование технологии отливок из высокопрочного чугуна путём внутриформенного модифицирования / В. Г. Горенко, О. И. Шинский, Л. П. Вишнякова, В. Б. Вихляев // Труды науч.-тех. конф. «Производство литых заготовок повышенной точности и малой трудоёмкости». – Свердловск, 1986. – С. 26-28.
13. Внутриформенное модифицирование чугуна брикетами / В. И. Литовка, А. П. Ляпунов, В. Я. Куровский, Т. Ф. Жесткова // Структура и свойства чугуна. – К.: АН УССР. Ин-т пробл. литья. – 1989. – С. 62-65.
14. А.с. 304049 СССР, МКИЗ В22С7/02. Способ изготовления моделей из полистирола / П. П. Лузан, В. С. Шуляк, Л. П. Анненко, А. С. Житник (СССР). – № 1428955/22-02; Заявл. 27.04.70; Оpubл. 25.05.71, Бюл. № 17. – 1 с.
15. Пат. 244 Украина, МКИЗ В22С7/02, В22С3/00. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / О. Й. Шинський, Л. П. Вишнякова, В. Н. Плотнікова, Є. Ф. Князев (Україна); НАН України. Ін-т пробл. литья (Україна). – № 3493216/22-02; Заявл. 15.01.93; Оpubл. 30.04.93, Бюл. № 1; Пріоритет 27.09.82, № 1079340 А1 (СССР). – 1 с.
16. Определение некоторых теплофизических характеристик пенополистироловых моделей с металлическими присадками / Л. П. Анненко, Г. Г. Грищенко, Л. К. Величко, С. А. Сажина // *Литьё по газифицируемым моделям*. – К.: АН УССР. Ин-т пробл. литья. – 1975. – Вып. 2. – С. 74-79.
17. *Анненко Л. П.* О некоторых свойствах пенополистироловых моделей с металлическими присадками / Л. П. Анненко // *Литьё по газифицируемым моделям*. – К.: АН УССР. Ин-т пробл. литья. – 1973. – С. 33-36.
18. *Анненко Л. П.* Пенополистироловые модели для легирования и модифицирования металла в форме / Л. П. Анненко, В. С. Шуляк, П. П. Лузан // *Литьё по газифицируемым моделям*. – К.: АН УССР. Ин-т пробл. литья. – 1973. – С. 51-54.
19. *Анненко Л. П.* Изготовление пенополистироловых моделей с легирующими присадками / Л. П. Анненко, В. С. Шуляк, П. П. Лузан // *Новое в точном литье*. – К.: АН УССР. Ин-т пробл. литья. – 1972. – С. 226-227.
20. *Литьё по газифицируемым моделям: Инженерная монография* / Ю. А. Степанов, Д. С. Гришин, В. П. Кирпиченков и др.; под ред. Ю. А. Степанова. – М.: Машиностроение(Основы теории и технологии), 1976. – 224 с.
21. *Небожак І. А.* Особливості структуроутворення СЧ20, модифікованого ФС75 у порожнині ливарної форми за ГАМОЛИВ-процесом / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, І. В. Ткачук, О. Й. Шинський // *Металознавство та обробка металів*. – 2001. – № 4. – С. 43-49.
22. *Небожак І. А.* Особенности структурообразования железоуглеродистых и цветных сплавов, обработанных ферродобавками в «полости» литейной формы по ГАМОЛИВ-процессу / І. А. Небожак // *Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции : материалы Международного научно-технического конгресса*. – Киев: МП «Информлитьё». – 2002. – С. 13-14.
23. *Небожак І. А.* Технології отримання точних виливків із чавуну за моделями, що газифікуються, наповненими дисперсною легуючою та модифікуючою фазою / І. А. Небожак, В. В. Суменкова // *Экономический путь к высококачественному литью : материалы Международного научно-технического конгресса*. – Киев: МП «Информлитьё» и ООО «НПО «Лидер-К». – 2005. – С. 100- 102.
24. Використання дисперснонаповнених моделей, що газифікуються, для отримання чавунних виливків / І. А. Небожак, В. В. Суменкова, О. Й. Шинський, О. О. Онищук // *Металознавство та обробка металів*. – 2005. – № 4. – С. 19- 22.
25. *Небожак І. А.* Исследование эффективности внутриформенного модифицирования отливок из серого чугуна ферросилицием при литье по газифицируемым дисперснонаполненным моделям / И. А. Небожак, В. В. Суменкова, О. И. Шинский // *Процессы литья*. – 2008. – № 5. – С. 50- 56.
26. *Небожак І. А.* 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.
27. Эффективность графитизирующего модифицирования серого чугуна с помощью дисперснонаполненной газифицируемой модели / И. А. Небожак, В. В. Суменкова, О. И. Шинский и др. // *Литьё и металлургия*. – 2015. – № 4. – С. 56- 66.
28. *Дикий Н. А.* Основы научных исследований: Теплоэнергетика / Н. А. Дикий, А. А. Халатов; под. ред. Г. М. Доброва. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1985. – 223 с.

29. Пастушенко С. М. Вища математика: основні поняття, формули, зразки розв'язування задач: Навч. посіб. для студентів ВУЗів / С. М. Пастушенко, Ю. П. Підченко. – Киев: Діал, 2002. – 160 с.
30. Глинка Н. Л. Общая химия: Учебное пособие. – 24-е изд., испр. / Н. Л. Глинка. – Л.: Химия, 1985. – 702 с.
31. Яворский Б. М. Справочное руководство по физике для поступающих в ВУЗы и для самообразования. – 4-е изд., испр. / Б. М. Яворский, Ю. А. Селезнёв. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 576 с.
32. Небожак І. А. Триботехнічні властивості сплаву АК12, армованого дисперсним інтерметалідом FeCr / І. А. Небожак, В. Г. Новицький, О. Й. Шинський, В. П. Гаврилюк // Металознавство та обробка металів. – 2004. – № 2. – С. 62- 70.
33. Баландин Г. Ф. Физико-химические основы литейного производства / Г. Ф. Баландин, В. А. Васильев. М.: Машиностроение, 1971. 216 с.
34. Яворский Б. М. Справочник по физике / Яворский Б. М., Детлаф А. А. М.: Наука, 1985. 512 с.



REFERENCES

1. Balandin G. F. (1979) Osnovy teorii formirovaniia otlivki [Basic theory of the formation of the casting]: Textbook: In 2 parts. Moscow: Mashinostroyeniye, pp. 335. [in Russian].
2. Radley R. U. (1960). Zatverdevanie otlivok [Solidification of castings]. Moscow: Mashgiz, pp. 391. [in Russian].
3. Balandin G. F. (1973). Formirovanie kristallicheskogo stroeniia otlivok. Kristallizaciia v liteynoy forme. [Formation of the crystalline structure of the castings. Crystallization in the mold]. – 2 nd ed, Revised. and ext. Moscow.: Mashinostroyeniye, pp. 152. [in Russian].
4. Ono A. (1980). Zatverdevaniemetallov: Trans. from English. [The solidification of metals]. Moscow: Metallurgiya, pp. 152. [in Russian].
5. Komarov O. S. (1982). Termokineticheskie osnovy kristalizacii chuguna [Thermokinetic foundations of iron crystallization]. – Minsk: Nauka i tekhnika, pp. 262. [in Russian].
6. Gulyaev A. P. (1977). Metallovedenie [Metallurgy]: Textbook. – 5 th ed., Revised. and ext. Moscow: Metallurgiya, pp. 648. [in Russian].
7. Girshovich N. G. (1978). Spravochnik po chugunnomu litia. [Reference iron casting], Leningrad: Mashinostroyeniye, no 3, pp. 758. [in Russian].
8. Sergeyenya V. N. (2009). Grafitiziruiushchee modifitsirovanie chuguna [Inoculation of cast iron]. New materials and processing technology: X Republican Student Scientific Conference, 28-30 April, 2009 / Prev. the Editorial Board. N.I. Ivanitskii. – Minsk: Nauchno-tehnologicheskiiy park BNTU «Metolit», pp. 67-68. [in Russian].
9. Kapustin L. S. (1984). Povyshenie effektivnosti processa grafitiziruyushchego modifitsirovaniia chuguna s celiu uluchsheniia ego catchestva [Improved grafitiziruyushchego modification of cast iron process in order to improve its quality]: Extended abstract of candidate's thesis. Moscow. [in Russian].
10. Peregoudov L. V., Malashin M. M., Druzhbina T. V. (1982). Vzaimodeystvie rasplava i kremnistyh prisadok pri modifitsirovanii chuguna [The interaction of the melt and siliceous Preece dock in the modification of cast iron]. Moscow: Liteynoye proizvodstvo, no 4, pp. 6-7. [in Russian].
11. Fesenko M. A., Kosyachkov V. A., Fesenko A. N. et al. (2015). Grafitiziruyushchee modifitsirovanie chuguna v liteynoy forme [Inoculation of cast iron in the mold]. Kiev: Metall i lit'yo Ukrainy, no 10, pp. 10-15. [in Russian].
12. Gorenko V. G., Shyns'kyy O. Y., Vishnyakova L. P., Vihl'jaev V. B. (1986). Uovershenstvovanie tehnologii otlivok iz vysokoprochnogo chuguna putjom vnutriformennogo modifitsirovaniia [Improving casting technology of ductile iron by mold inoculation]. Proizvodstvo lityx zagotovok povyshennoy tochnosti i maloy trudoyemkosti: materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Sverdlovsk, 1986 god), pp. 26-28. [in Russian].
13. Litovka V. I., Lyapunov A. P., Kurovs'kyy V. Y., Zhestkova T. F. (1989). Vnutriformennoe modifitsirovanie chuguna briketami [The mold inoculation of cast iron briquettes] Structure and properties of cast iron. Kiev: Ukrainian Academy of Sciences. Inst. probl. Casting, pp. 62-65. [in Russian].
14. Luzan P. P., Shuljak V. S., Annenkov L. P., Zhytnyk A. S. Sposob izgotovleniya modelej iz polistirola [The method of manufacturing the models of polystyrene]. A. s. SSSR, no 304049, 25.07.71. [in Russian].
15. Shyns'kyy O. Y., Vishnyakova L. P., Plotnikov V. N., Knyazev E. F. Sposib vigotvorennya modelej iz pinopolistirolu [A method of making models of polystyrene]. Pat. Ukraine, no 244, 1982. [in Russian].
16. Annenko L. P., Grishhenko G. G., Velichko L. K., Sazhina S. A. (1975). Opredelenie nekotoryh teplofizicheskikh harakteristik penopolistirolovykh modelej s metallicheskimi prisadkami [Determination of certain thermal characteristics of cellular polystyrene models with metallic additives]. Kiev: Lit'io po gazifitsiruemykh modeljam. AN USSR. In-t probl. lit'ja, no 2, pp. 74-79. [in Russian].
17. Annenko L. P. (1973). O nekotoryh svojstvakh penopolistirolovykh modelej s metallicheskimi prisadkami [On some properties of cellular polystyrene models with metallic additives]. Kiev: Lit'jo po gazifitsiruemykh modeljam. AN USSR. In-t probl. lit'ja, pp. 33-36. [in Russian].
18. Annenko L. P. V. S. Shuljak, P. P. (1973.) Luzan Penopolistirolovye modeli dlja legirovaniia i modifitsirovaniia metalla v forme [Styrofoam model for doping and modification of metal in the form]. Kiev: Lit'jo po gazifitsiruemykh modeljam. AN USSR. In-t probl. lit'ja, pp. 51-54. [in Russian].
19. Annenko L. P., Shuljak V. S., Luzan P. P. (1972). Izgotovlenie penopolistirolovykh modelej s legiruyushchimi prisadkami [Production of cellular polystyrene models with dopants]. Kiev: New in precise casting Ukrainian Academy of Sciences. Inst. probl. Casting, pp. 226-227. [in Russian].
20. Stepanov Y. A., Grishin D. S., Kirpichenkov V. P. et al. Lit'e po gazifitsiruemykh modeljam: Inzhenernaya monografija [The lost-foam casting Engineering monograph]: Inzhenernaya monografija. Moscow: Mashinostroyeniye, pp. 224 (Foundations of the theory and technology). [in Russian].

21. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Tkachuk I. V., Shyns'kyi O. I. (2001). Features of structure C420 modified ФС75 in the cavity mold by HAMOLIV-process [Osoblivosti strukturoobrazovannia SCh20, modifikovanogo FS75 u porozhnini livarnoi formi za GAMOLIV-procesom]. Kiev: MOM, no 4, pp. 43-49. [in Ukraine].
22. Nebozhak I. A. (2002). Osobennosti strukturoobrazovannia zhelezouglerodistyh i cvetnyh splavov, obrabotannyh ferrodobavkami v «polosti» liteynoy formy po GAMOLIV-processu. [Features of structure of iron-carbon alloys and non-ferrous processed ferrodobavkami in the «cavity» mold for GAMOLIV-process]. Liteynoe proizvodstvo v novom veke – kak pobedit' v konkurencii: materialy Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo kongressa. Kiev: MP «Informlit'jo», pp. 13-14. [in Russian].
23. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V. (2005). Tehnologii otrimannia tochnykh vilivkiv iz chavunu za modeliami, shcho gazifikuiut'sia, napovnenimi dispersnou legujuchoju ta modifikujuchoju fazoju Jekonomicheskij put' k vysokokachestvennomu lit'ju : materialy Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo kongressa. [Technology for precision castings made of cast iron by the models that gasification filled with doping and modifying dispersed phase dokladov]. Abstracts of the International Science and Technology Congress "Economic way to high quality casting". Kiev: MP «Informlit'jo» i OOO «NPO «Lider-K», pp. 100-102. [in Ukraine].
24. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shyns'kyi O. Y., Onyschuk O. O. (2005). Viktoristannja dispersnapovnenih modelej, shho gazifikujut'sja, dlja otrimannja chavunnih vilivkiv [Use dyspersnapovnenykh models gasification, to produce castings] Kiev: MOM, no 4, pp. 19-22. [in Russian].
25. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shyns'kyi O. Y. (2008). Issledovanie deffektivnosti vnutriformennogo modifitsirovaniia otlivok iz serogo chuguna ferrosilicem pri lit'e po gazificiruemykh dispersnapolnennykh modeliam. [Research of efficiency of mold inoculation of gray iron castings ferrosilicon when casting on gasified models dispersnapolnennykh]. Kiev: Processy lit'ia, no 5, pp. 50-56. [in Russian].
26. Nebozhak I. A. (2009). Mikrostruktura modifitsirovannykh ferrosilicem chugunnykh otlivok, poluchennykh s pomoshch'iu gazificiruemykh dispersnapolnennykh modelej [The microstructure of the modified ferrosilicon iron castings obtained by gasified models dispersnapolnennykh]. Kiev: Processy lit'ia, no 3, pp. 17-23. [in Russian].
27. Nebozhak I. A., Sumenkova V. V., Shyns'kyi O. I. et al. (2015). Jeffektivnost' grafitiziruushhego modifitsirovaniia serogo chugunka s pomoshh'ju dispersnapolnenoj gazificiruemoj modeli. [Effectiveness of inoculation of gray iron pots using dispersnapolnenoj gasified models]. Lito i metallurgija, no 4, pp. 56-66. [in Russian].
28. Dikij N. A., Halatov A. A., pod. red Dobrova G. M. (1985). Osnovy nauchnykh issledovanij: Teplojenergetika [Basic research: Thermal Engineering]. Kiev: Vishha shkola, Golovnoe izd-vo, pp. 223. [in Russian].
29. Pastushenko S. M., Pidchenko Ju. P. (2002). Vishha matematika: osnovni poniattia, formuli, zrazki rozv'iazuvannia zadach: Navch. posib. dlja studentiv VUZiv [Higher Mathematics: Basic concepts, formulas, designs solving: A manual for students of higher educational institutions]. Kiev: Dial, pp. 160. [in Russian].
30. Glinka N. L. (1985). Obshhaja himija: Uchebnoe posobie. [General Chemistry: Textbook]. Leningrad: Himija, pp. 702. [in Russian].
31. Javorskij B. M., A. Seleznev Ju. (1989). Spravochnoe rukovodstvo po fizike dlja postupaushchih v VUZy i dlja samoobrazovannia. – 4-e izd., ispr. [Reference physics for entering higher education and self-education. – 4th publishing, corrected]. Moscow: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. lit., pp. 576. [in Russian].
32. Nebozhak I. A., Novic'kiy V. G., Shyns'kiy O. J., Gavriljuk V. P. (2004). Tribotekhnichni vlastivosti splavu AK12, armovanogo dispersnim intermetalidom FeCr [Tribotechnical properties of the alloy AK12 reinforced dispersed intermetallic FeCr]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, no 2, pp. 62-70. [in Ukraine].
33. Balandin G. F., Vasil'ev V. A. (1971). Fiziko-himicheskie osnovy litejnogo proizvodstva. [Physical and chemical bases of foundry]. Moscow: Mashinostroenie, pp. 216.
34. Javorskij B. M., Detlaf A. A. (1985). Spravochnik po fizike [Handbook of physics]. Moscow: Nauka, pp. 512. [in Russian].

Анотація

Небожак І. А., Суменкова В. В., Шинський О. Й.

Вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на ефективність графітуючого модифікування сірого чавуну у «порожнині» ливарної форми

На прикладі зразків із сірого чавуну марки С420 ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84) визначені основні критерії оцінки процесу графітуючого модифікування матричного розплаву – концентрація кремнію і коефіцієнт його засвоєння, а також виміряна твердість виливків. Шляхом математичної обробки і графічної інтерпретації експериментальних даних доведено вплив технологічних параметрів ЛГМ-процесу на ефективність модифікування рідкого чавуну дисперсним феросилієм марки ФС75 ГОСТ 1415-93 (ИСО 5445-80) у «порожнині» ливарної форми.

Ключові слова

газодель, графітуюче модифікування, графічна інтерпретація, рідкий метал, концентрація кремнію, коефіцієнт засвоєння кремнію, ЛГМ-процес, ливарна форма, литий зразок, математична обробка, відбіл, виливок, густина пінополістиролу, розплав, сірий чавун, швидкість заливки, твердість, температура заливки, технологічні параметри, рівняння регресії, феросиліцій, цементит

On for samples of grey cast iron grade SCH20 GOST 1412-85 (ST SEV 4560-84). Basic criteria for evaluation of matrix melt graphitizing modifying process that are the silicon concentration and its assimilation coefficient and also the hardness of castings is measured. Mathematical processing and graphical interpretation of experimental data proved the influence of LFC technological parameters on the effectiveness of liquid iron modifying with dispersed ferrosilicon grade FeSi75 GOST 1415-93 (ISO 5445-80) in the mold «cavity».

styrofoam pattern, graphitizing modifying, graphical interpretation, liquid metal, silicon concentration, absorption coefficient of silicon, LFC-process, mold, cast sample, mathematical processing, chill, casting, styrofoam density, melt, grey cast iron, pouring rate, hardness, pouring temperature, technological parameters, regression equation, ferrosilicon, cementite

Оформление рукописи для опубликования в журнале "Металл и литьё Украины":

Материалы для публикации необходимо подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер страницы А4, книжная ориентация, шрифт – Arial, 10, междустрочный интервал – 1,5. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Рукопись должна содержать:

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации (на русском, украинском и английском языках);
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) научной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть чёрно-белыми, чёткими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную подпись;
- список литературы на 2 языках: оригинала и английском (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например – [1]).