

Б.П. Середа⁽¹⁾, зав. кафедрой, д.т.н., профессор
С.Н. Ткаченко⁽²⁾, инженер-технолог

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЧУГУНОВ В УСЛОВИЯХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ ОАО «Запорожский сталепрокатный завод»

Для забезпечення необхідних поверхневих властивостей деталей із чавунів застосовували сіліціювання за умов саморосповсюджуючого високотемпературного синтезу. Експерименти проводили на зразках чавунів марки АСЧ-1, СЧ-20, СЧ-25, ВЧ 45-5, ВЧ 38-17, ВЧ 42-12. Виконано дослідження мікроструктури та визначено мікротвердість поверхневого шару.

Для обеспечения необходимых поверхностных свойств деталей из чугунов применяли силицирование в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Эксперименты проводили на образцах чугунов марки АСЧ-1, СЧ-20, СЧ-25, ВЧ 45-5, ВЧ 38-17, ВЧ 42-12. Проведены исследования микроструктуры и определена микротвердость поверхностного слоя.

Введение. Благодаря высоким технологическим и физическим (тепловые свойства, электрические и магнитные характеристики) свойствам чугунов и сталей, используемых в качестве материала для изготовления деталей машин и аппаратов химической промышленности, прокатных валков листовых станов, подшипников скольжения, втулок, поршневых колец, колес, шаров для мельниц, применяют силицирование чугунов и сталей методом теплового самовоспламенения, заключающегося в совмещении химических транспортных реакций с процессом теплового самовоспламенения порошковых смесей.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения [1]. Нанесение защитных покрытий на рабочую поверхность материала методом СВС осуществляют как в режиме горения, так и в режиме теплового самовоспламенения. Химизм процесса может быть представлен следующим выражением:

$$\sum a_i \cdot X_i + \sum b_i \cdot Y_i = Z + Q, \quad (1)$$

где X – титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, молибден, вольфрам и др.; Y – бор, углерод, азот, кремний, селен, сера, алюминий и др.; Z – бориды, карбиды, нитриды, силициды и др.; Q – тепловой эффект процесса.

Элементы X представляют собой порошки металлов, элементы Y используются в порошкообразном, жидком или газообразном состояниях, продукт Z является тугоплавким материалом и при температуре горения обычно находится в твердом состоянии. Элементы X (металлы) выполняют функцию горючего, элементы Y (неметаллы) – окислителя. Химическое взаимодействие элементов протекает в конденсированной фазе даже в случае, если один из реагентов – газ. В большинстве

сочетаний взаимодействие X с Y происходит с выделением значительного количества теплоты, что и предопределяет возможность горения. СВС является одним из самых высокотемпературных процессов горения: температура процесса достигает 2500...4000 °С.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка технологии поверхностного упрочнения чугуна различных марок в условиях СВС, исследование микроструктуры, а также определение микротвердости поверхностного слоя.

Основная часть исследований. В условиях СВС силицированию подвергали образцы из серого, ковкого и высокопрочного чугуна с целью повышения их коррозионной стойкости. Природа фаз, появляющихся на поверхности чугунных изделий, и кинетика их развития определяются, в основном, методом силицирования и химическим составом металлической основы. Форма графитных включений существенного влияния на фазовый состав и кинетику формирования диффузионного слоя не оказывает [2-4].

Эксперименты выполняли на образцах чугуна марки АСЧ-1, СЧ-20, СЧ-25, ВЧ 45-5, ВЧ 38-17 и ВЧ 42-12. Химический состав данных марок чугуна приведен в табл 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых чугунов

Марка чугуна	Содержание элементов, %					
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>
АСЧ-1	3,20...3,60	1,30...2,00	0,60...1,20	0,15...0,30	≤ 0,12	0,2...0,4
СЧ-20	3,30...3,50	1,80...2,40	0,70...0,90	≤ 0,25	≤ 0,15	-
СЧ-25	3,20...3,40	1,40...2,20	0,70...1,00	≤ 0,20	≤ 0,15	-
ВЧ 45-5	2,70...3,70	1,60...2,70	0,50...0,60	≤ 0,10	0,10	-
ВЧ 38-17	2,70...3,70	1,60...2,70	0,50...0,60	≤ 0,10	0,10	-
ВЧ 42-12	2,80...3,80	1,40...2,50	0,50...0,60	≤ 0,10	0,10	-

Химико-термическую обработку образцов осуществляли в реакторе открытого типа ($P = 10^5$ Па) в рабочем интервале температур 950...1050 °С при общей продолжительности изотермической выдержки 2...6 ч, как для одновременного, так и для последовательного способа насыщения.

В качестве реакционной среды использовали смесь порошков дисперсностью 100...350 мкм следующих материалов: оксида хрома (Cr_2O_3) – окислителя; оксида алюминия (Al_2O_3) – инертной добавки; алюминия – восстановителя; кремния марки Кр1 – источника кремния в покрытии и хлорида аммония (NH_4Cl) – активатора процесса насыщения. Для силицирования использовали расплавы на основе моносили-ката натрия: $(2/3 Na_2SiO_3 + 1/3 NaCl) + 20\% SiC$ и $(2/3 Na_2SiO_3 + 1/3 SiC) + 25\% NaCl$.

Микротвердость упрочненного слоя измеряли на приборе «ПМТ-3» при нагрузке на индентор 1 Н, микроструктуру данного слоя исследовали на световом микроскопе «Neophot-2».

Содержание кремния в слоях чугунов достигает 11...13 %, что позволяет получать малопористые диффузионные силицированные слои, стойкие в агрессивных средах [5]. Установлено, что рост глубины силицированного слоя удовлетворительно подчиняется общим закономерностям формирования однофазных диффузионных

слоев. Некоторые отклонения от экспоненциального и параболического характера роста диффузионного слоя могут быть вызваны изменением содержания углерода в металлической основе при изменении условий насыщения [6].

С целью поиска оптимального состава СВС-смеси и режима СВС-процесса, обеспечивающих заданный уровень параметра оптимизации (Y) – микротвердости нанесенного слоя, использовали дробный факторный эксперимент [7].

Микроструктура поверхностных слоев исследуемых марок чугуна приведена на рис. 1.

Результаты измерения микротвердости поверхностных слоев чугунов по сравнению с исходными материалами представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты исследования микротвердости поверхностных слоев чугунов до (числитель) и после (знаменатель) поверхностного упрочнения

Марка чугуна	АСЧ-1	СЧ-20	СЧ-25	ВЧ-45-5	ВЧ-38-17	ВЧ 42-12
Микротвердость, МПа	$\frac{2200}{3200}$	$\frac{2400}{8200}$	$\frac{2400}{8200}$	$\frac{3200}{5800}$	$\frac{2400}{3100}$	$\frac{2400}{4200}$

При разработке математической модели поверхностного упрочнения чугунов для показателя микротвердости перед проведением экспериментов осуществляли кодирование факторов и заполнение таблицы кодирования на двух уровнях. В качестве нулевого уровня факторов выбирали центр интервала, в котором выполняли эксперименты.

При количестве исследуемых факторов, равном четырем, выбирают дробную реплику 2^{4-1} , которую записывают в развернутом виде (табл. 4), где исключают фактор X_4 , который варьируется в соответствии с генерирующим соотношением $X_4(X_1X_2X_3)$.

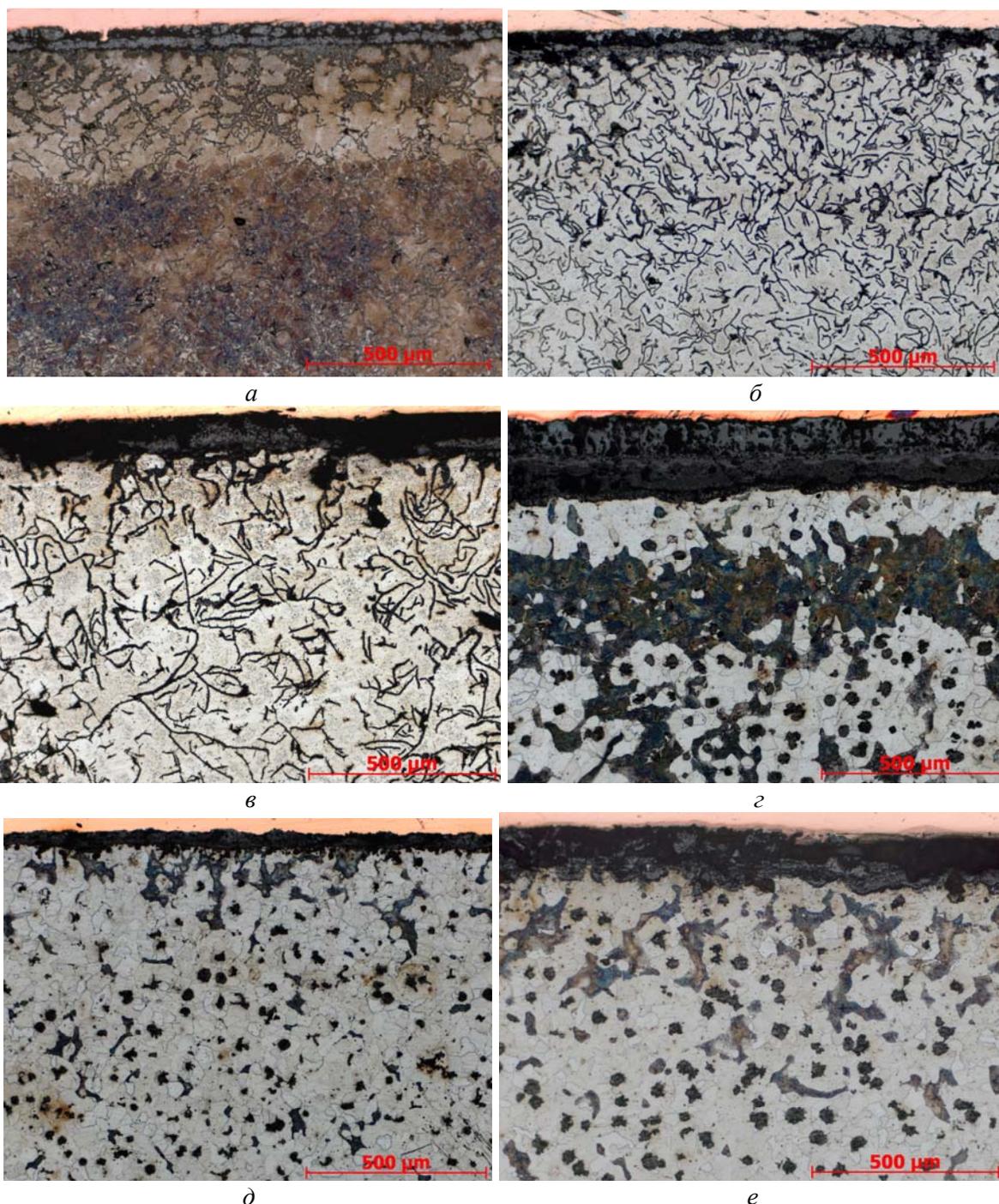
Математическую зависимость между результирующим показателем Y и тремя факторами X_1 , X_2 и X_3 находили в форме модели множественной линейной регрессии:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot X_i, \quad (2)$$

где Y – модельное (теоретическое) значение результирующего показателя; $\bar{a} = (a_0; a_1; a_2; a_3)$ – вектор неизвестных коэффициентов регрессии; $X_i, i = \overline{1,3}$ – значение i -го фактора (см. табл. 3).

Таблица 3 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровни факторов	Содержание кремния в шихте, %	Содержание ХС в шихте, %	Температура процесса, °С	Время выдержки, ч
код	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень $X_i = 0$	30	20	1000	4
Интервал варьирования δ_i	10	10	100	2
Нижний уровень $X_i = -1$	20	10	900	2
Верхний уровень $X_i = 1$	40	30	1100	6



АСЧ-1 (а); СЧ-20 (б); СЧ-25 (в); ВЧ 45-5 (г); ВЧ 38-17 (д); ВЧ 42-12 (е)
Рисунок 1 – Микроструктура силицированных покрытий на чугунах, х 200:

После реализации всех опытов матрицы планирования математическая модель изучаемого процесса имеет вид:

$$Y = 383,75 + 3,75X_1 + 5X_2 + 5X_3 + 6,25X_1X_2X_3 . \quad (3)$$

Осуществляют проверку значимости каждого из коэффициентов уравнения регрессии (3) при помощи критерия Стьюдента (t -критерия). Для этого рассчитывают доверительный интервал указанных коэффициентов по формуле:

$$\Delta b_i = t_{\alpha fl} \cdot S_{b_i} , \quad (4)$$

где $t_{\alpha n}$ – значение t -критерия, которое выбирают в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы при определении дисперсности опыта f_i ; S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка определения коэффициентов регрессии; $S_{b_i} = (S_y^2 / n)^{0,5}$; S_y^2 – дисперсия эксперимента; n – количество дублированных экспериментов на основном уровне.

Таблица 4 – Матрица планирования ДФЭ 2⁴⁻¹

Номер опыта	Значение факторов в кодированном виде				
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_4(X_1X_2X_3)$
1	+	+	+	+	+
2	+	+	+	-	-
3	+	+	-	+	-
4	+	+	-	-	+
5	+	-	+	+	-
6	+	-	+	-	+
7	+	-	-	+	+
8	+	-	-	-	-

Величина доверительного интервала Δb_i составляет 3,88. Выполняют сравнение коэффициентов регрессии со значением параметра Δb_i . Установлено, что значение коэффициента при X_1 Δb_i незначимое, так как условие $|b_i| > \Delta b_i$ для него не выполняется и уравнение математической модели окончательно приобретает вид:

$$Y = 383,75 + 5X_2 + 5X_3 + 6,25X_1X_2X_3 \quad (5)$$

Далее полученное уравнение проверяют на адекватность в целом, то есть его пригодность для описания объекта исследования (табл. 5). С использованием полученной модели определяют поочередно для всех опытов матрицы планирования расчетные значения параметра оптимизации (Y_p). Для этого в уравнение подставляют значение факторов в кодированном виде.

Таблица 5 – Расчет дисперсии адекватности

Опыт	Значение Y		$ \Delta y $	Δy^2
	экспериментальное	расчетное		
1	395	400	5	25
2	375	378	3	9
3	370	378	8	64
4	380	380	0	0
5	395	388	7	49
6	390	390	0	0
7	395	390	5	25
8	370	368	2	4
				$\Sigma 176$

Расчетами установлено, что дисперсия адекватности модели составляет 44, а расчетное значение критерия Фишера – 3,67.

Из таблицы [7] для $\alpha = 0,05$, $f_1 = 3$ и $f_2 = 4$ находят табличное значение критерия Фишера, которое составляет 6,59. Таким образом, условие адекватности модели $F^{табл} < F^{расч}$ выполняется и ее можно использовать для расчета значений микротвердости силицированных покрытий чугунов в изученных пределах варьирования факторов.

Выводы. Проведенные исследования поверхностных слоев чугуна, полученных методом СВС, позволили изучить их микроструктуру, определить микротвердость, а также разработать технологию поверхностного упрочнения для данного вида высокоуглеродных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sereda B. P.* The Modeling of Products Pressing in SHS-Systems / B. P. Sereda, A. A. Zhe-rebtsov, Yu. A. Belokon // Pittsburg, Pe, USA, David L. Lawrence Convantional Centre. ACerS, IOM3, ASM International. Material Science and Technology 2008. Conference & Exhibition.
2. *Sereda B. P.* The Reception of Borized Coatings of Eutectic Type on Steel in SHS-conditions / B. P.Sereda // Pittsburg, Pe, USA, David L. Lawrence Convantional Centre. ACerS, IOM3, ASM International. Material Science and Technology 2008. Conference & Exhibition.
3. *Мержанов А. Г.* Процессы горения и синтеза материалов / А. Г.Мержанов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
4. *Середа Б. П.* Теория строения жидкого, кристаллического и аморфного состояния вещества / Б. П. Середа. – Запорожье, 2003. – 179 с.
5. *Середа Б. П.* Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Б. П.Середа, Н. Є.Калініна, І. В.Кругляк. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004. – 230 с.
6. *Удовицкий В. И.* Антифрикционное пористое силицирование углеродистых сталей / В. И. Удовицкий. – М.: Машиностроение, 1977. – 191 с.
7. *Налимов В. В.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2010 р.
Рецензент, проф. Ю.В.Ольшанецький