

УДК 669.1.112

## ВНУТРИФОРМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ И СВС МЕТОДАМИ, НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРОГО ЧУГУНА. СООБЩЕНИЕ 2\*

*Полубояров В.А.<sup>1</sup>, д.х.н., профессор, ведущий научный сотрудник (sanych@solid.nsc.ru)*

*Коротаева З.А.<sup>1</sup>, к.х.н., научный сотрудник*

*Жданок А.А.<sup>1</sup>, инженер*

*Кузнецов В.А.<sup>2</sup>, директор*

*Самохин А.В.<sup>3</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник*

<sup>1</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18)

<sup>2</sup>ООО «Центролит-С»

(630088, Россия, г. Новосибирск, ул. Петухова, 51)

<sup>3</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

(119991, г. Москва, Ленинский пр., 49)

**Аннотация.** Исследовали влияние нанопорошков, полученных методами плазмохимическим и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), на служебные характеристики серого чугуна СЧ20 при внутриформенном модифицировании. Плазмохимическим методом получены модификаторы *I* в железной матрице состава ( $\alpha$ -Fe,  $\text{TiC}_x\text{N}_y$ , SiC) из природного сырья (титаномагнетита) взаимодействием порошка титаномагнетита с метаном в потоке водородно-азотной плазмы. Методом СВС, комбинированным с механохимическим методом, получены модификаторы состава *II* в пересчете на карбиды (70 – 80 % WC ÷ 20 – 30 % TiC) с металлом-протектором цирконием. Применение модификатора *I* в количестве 0,002 % увеличивает твердость по Бринеллю на 9,8 %, предел прочности в условиях растяжения на 11,9 %, относительную износостойкость на 21 %, коррозионную стойкость в соляной кислоте на 12,3 % по сравнению с контрольным (немодифицированным) образцом чугуна. Применение модификатора *II* в количестве 0,038 % увеличивает твердость по Бринеллю на 13,1 %, предел прочности в условиях растяжения на 19,8 %, относительную износостойкость на 69 %, коррозионную стойкость в соляной кислоте на 28 %.

**Ключевые слова:** внутриформенное модифицирование, износостойкость, карбид титана, карбиды вольфрама, коррозионная стойкость, металл-протектор, механохимический метод, плазмохимический метод, предел прочности, СВС, серый чугун, твердость, титаномагнетит, цирконий.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-561-566

В настоящее время большой интерес приобретает использование наноматериалов в металлургии для улучшения качества изделий. Одним из способов применения наноматериалов является введение в металл модифицирующих наноразмерных частиц тугоплавких фаз (НЧТФ), находящихся в определенном физическом, химическом, структурном и размерном соответствии с основным металлом. Введенные НЧТФ могут служить, во-первых, центрами зародышеобразования и кристаллизации, тем самым увеличивая их количество, во-вторых, блокировать диффузию соответствующих атомов к зарождающимся и растущим кристаллам, замедляя их рост.

Современная литература, посвященная влиянию НЧТФ на структуру и механические свойства материалов, весьма обширна. Существуют несколько монографий [1, 2] и ряд статей, посвященных вводу НЧТФ в

стали и чугуны различных марок, в никелевые, алюминиевые, медные, магниевые и цинковые расплавы.

В работах [3 – 9] рассматривается ввод НЧТФ в стали различных марок, где ввод осуществлялся в промежуточном ковше сортовой машины непрерывного литья заготовок [3 – 6], при центробежном электрошлаковом литье [8] или в вакуумно-дуговой печи [9]. Основными НЧТФ, вводимыми в расплав, были соединения TiN, TiCN, SiC,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , а также смесь  $\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$ . Как правило, на свойства металлов и сплавов исследуется влияние ультрадисперсных порошков, полученных плазмохимическим методом [1, 2], и при модифицировании одной из проблем является введение НЧТФ. В связи с тем, что при нагреве они достаточно легко агломерируют, интенсивно взаимодействуют с адсорбированными газами и плохо смачиваются жидким металлом, необходима дополнительная обработка НЧТФ, чтобы избежать этих негативных явлений. Поэтому авторы работ смешивали нанопорошки в планетарной

\* Работа выполнена в рамках госконтракта № 16.513.11.3131 при участии Батаева А.А., Цветкова Ю.В., Алексеева Н.В., Степановой Н.В.

мельнице с порошками-протекторами, где в роли последних выступали хром [3 – 6] и железо [4], которые потом закатывали в стальную ленту [4, 7] или порошковую проволоку с оболочкой из стали [3, 6]. В работе [8] ультрадисперсный TiCN перемешивался с Ti с последующим прессованием в таблетки, а в работе [9] нанодисперсный порошок помещался в предварительно просверленные в образце выемки.

В работах отмечается уменьшение размера зерна и изменение морфологии, повышение химической и структурной однородности [3 – 8], рассредоточение и измельчение неметаллических включений [3, 7]. Также наблюдается увеличение удельной плотности [3, 4, 6], предела текучести [4, 5, 7], предела прочности, относительного удлинения и относительного сужения [4, 5], рост объемной доли феррита [9], его размер составил около 3 мкм.

В работах [7, 10 – 14] изучается ввод НЧТФ в чугун различных марок. В роли модификаторов выступали НЧТФ: SiC, BN, AlN, TiN и TiCN. В исследованиях [7, 10] НЧТФ SiC и BN добавляли в объеме алюминиевого прутка, а  $Al_2O_3$  в работах [7, 10, 12] добавляли на дно ковша в латунной фольге. В исследованиях [11, 13] поверхность НЧТФ, полученных плазмохимическим синтезом, плакировалась смесью твердых углеводородов метанового ряда. В работе [14] смесь SiC с металлом-протектором заворачивали в алюминиевую фольгу и помещали на дно ковша. Время выдержки после ввода НЧТФ составляло 5 мин [14] и в интервале от нуля до 16 мин [11].

Показано, что после ввода BN в серых чугунах наблюдается измельчение эвтектического зерна, уменьшение глубины отбела [7, 10], изменение морфологии графитовых включений, повышение механических характеристик, увеличение прочности на разрыв на 32 % и относительного удлинения на 40 % [7]. После ввода SiC зафиксировано измельчение зерна, увеличение износостойкости на 15 – 20 % [7, 10], образование мелкозернистой структуры без наличия свободного цементита и карбидов в металлической основе и снижение отбела [11]. Авторы [14] отмечают равномерное распределение графита, хлопьевидный графит стал тоньше, а сферический графит уменьшился в радиусе. При добавке 0,1 % SiC предел прочности на разрыв увеличился на 22,7 %, а прочность на износ увеличилась на 78 % в зависимости от концентрации SiC. Ввод  $Al_2O_3$  в чугун приводит к образованию карбидов округлой формы, равномерно распределенных в объеме матрицы [12], выделению глобулярной формы графита [10], увеличению твердости на 86,6 % и уменьшению износа на 31,6 % [7, 12]. При добавлении TiN и TiCN в работе [11] наблюдается измельчение зерна, устранение столбчатости, увеличение микротвердости цементита на 8 – 12 %, аустенита на 18 – 36 % и перлита на 28 – 47 %. В исследовании [13] отмечено, что для измельчения первичного аустенита в промышленных отливках размер частиц (TiCN) должен быть 10 – 50 нм, а для устранения отбела и измельче-

ния графитовой фазы размер частиц (SiC) должен быть 50 – 200 нм. Также авторами [13] показано возрастание эксплуатационных свойств, повышение стойкости валков на 14,7 – 38,7 % и увеличение стойкости сталеразливочных изложниц из чугуна на 22 – 45 %.

Как видно, во всех случаях отмечается положительный эффект, наблюдается уменьшение размеров зерен после введения НЧТФ и улучшение механических свойств, однако результаты модифицирующего действия НЧТФ разнятся и существенно зависят от выбранной системы НЧТФ – металл.

Цель настоящей работы – исследование влияния наноразмерных модификаторов, полученных плазмохимическим и СВС методами, на эксплуатационные характеристики серого чугуна при внутриформенном модифицировании.

Плазмохимическим методом были получены модификаторы в железной матрице состава I ( $\alpha$ -Fe,  $TiC_xN_y$ , SiC) из природного сырья – титаномagnetитового порошка путем его взаимодействия с метаном в потоке водородно-азотной плазмы.

Исходным сырьем для получения нанопорошковых композиций тугоплавких соединений с железом являлся титаномagnetит состава: 9,14 %  $TiO_2$ ; 5,98 %  $SiO_2$ ; 2,61 %  $Al_2O_3$ ; 0,15 %  $Cr_2O_3$ ; 37,5 %  $Fe_2O_3$ ; 36,9 % FeO; 0,2 % MnO; 3,5 % MgO; 1,3 % CaO; 0,62 %  $V_2O_5$ ; 0,2 %  $P_2O_5$ ; 0,5 % S.

Продукты реакции представляли собой порошки с удельной поверхностью порядка 1,6 – 20 м<sup>2</sup>/г. По данным электронной микроскопии (рис. 1, а), они состояли преимущественно из частиц размерами 30 – 70 нм.

Результаты рентгенофазового анализа (рис. 1, б) показали, что порошки являются композиционными, с преобладающими фазами феррита, аустенита и цементита. В незначительном количестве отмечено присутствие оксида железа в виде магнетита. Интегральная интенсивность ( $I$ ) дифракционных линий магнетита более чем на порядок меньше суммарной интегральной интенсивности всех присутствующих форм железа. На дифрактограммах образцов присутствуют линии, соответствующие соединениям титана  $Ti_xC_yN_z$  со структурой типа NaCl (TiN, TiC, TiCN), а также линии карбида кремния SiC.

Методом СВС, комбинированным с механохимическим методом, были получены модификаторы состава II в пересчете на карбиды (70 – 80 % WC ÷ 20 – 30 % TiC) с металлом-протектором цирконием.

Для получения смеси карбидов вольфрама и титана впервые использовали метод СВС карбида титана в смеси вольфрам–титан–углерод, описанный в работе [15]. СВС карбида титана в этой смеси разогревает ее, что приводит далее к синтезу карбидов вольфрама.

В табл. 1 приведены данные об удельной поверхности  $S_{уд}$  (МО – 1 мин после СВС) и размерам кристаллитов (область когерентного рассеивания, ОКР), рассчитанные по результатам рентгенофазового анализа для продуктов СВС: WC (при  $2\theta = 35^\circ$ ),  $W_2C$  (при  $2\theta = 39^\circ$ )

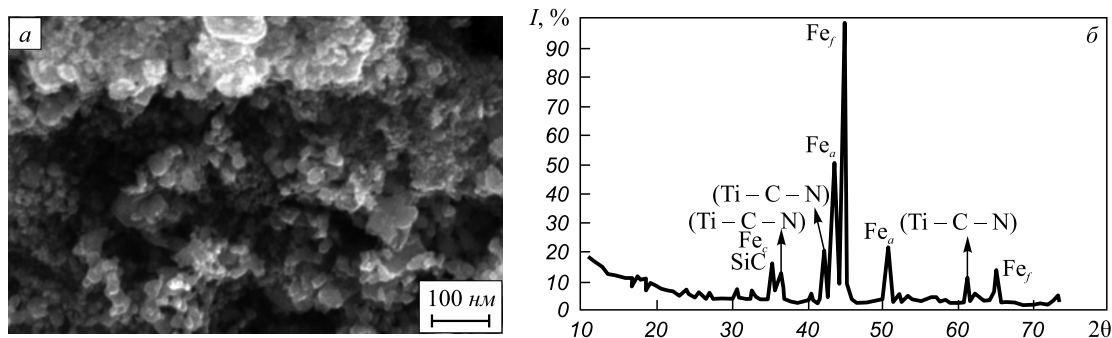


Рис. 1. Морфология (а), рентгеновская дифрактограмма (б) порошка, полученного в плазменном реакторе

Fig. 1. Morphology (a) and X-ray diffraction pattern (b) of the powder produced in plasma reactor

Т а б л и ц а 1

## Состав и свойства порошков, полученных методом СВС

Table 1. Composition and properties of the powders produced by SHS method

Состав	$\tau$ , мин	ОКР, нм, по			$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
		W <sub>2</sub> C	TiC	WC	
70 % WC ÷ 30 % TiC	1	28,16	28,37	33,52	6,12
75 % WC ÷ 25 % TiC	1	—	34,03	34,85	—
80 % WC ÷ 20 % TiC	5	—	28,35	33,50	18,45

Пр и м е ч а н и е.  $\tau$  – время механохимической обработки (МО) до СВС.

и TiC (при  $2\theta = 41,85^\circ$ ). Размеры кристаллитов различных фаз находятся в пределах 30 – 35 нм.

Для получения модификаторов смесь карбидов вольфрама и титана подвергалась в течение 1 мин обработке в планетарных активаторах совместно с различными металлами (Fe, Ni, Cr, Zr). Соотношение керамики и металла составляло 1:1.

Ниже приведены состав и свойства модификаторов с различными металлами-протекторами, полученных комбинированным методом (СВС плюс механохимический):

Номер	Керамика	Металл	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
5		—	10,10
6	Смесь карбидов	Cr	11,71
7	вольфрама (70 %)	Ni	8,99
8	и титана (30 %)	Fe	10,08
9		Zr	5,48

В настоящей работе для исследования процессов модифицирования использовали состав с металлом-протектором цирконием.

Размер частиц смеси карбидов вольфрама и титана, полученных методом СВС, на основании данных сканирующей электронной микроскопии составляет менее 100 нм (рис. 2).

Для исследования процессов модифицирования производили выплавку синтетического серого чугуна марки СЧ20 в индукционной печи ОКБ-281 с кислой футеровкой (кварц и 3 % борной кислоты) и емкостью тигля 750 кг. Металл в литейные формы заливали при температуре 1350 – 1550 °С.

В ходе экспериментов литейная форма была модернизирована. Для того чтобы модификатор не всплывал, в форму устанавливали два керамических фильтра, между которыми помещали модификатор. Состав материала для изготовления литейных форм – сухая песчано-глинистая смесь (ПГС). Формы из ПГС являются теплыми. Кристаллизация чугуна в них происходит медленнее, чем, например, в песчано-жидкостекольных формах.

В ходе экспериментов отливали десять образцов: девять – с различными модификаторами, завернутыми в алюминиевую фольгу, один – без модификатора. На нижний фильтр помещали пустую алюминиевую фольгу. Были подобраны технологические режимы, при реализации которых не происходило вытекания металла из форм, не было перелива и выплесков чугуна.

Среднее значение временного сопротивления на разрыв брали по шести данным, что обеспечивало корректность получаемых результатов.

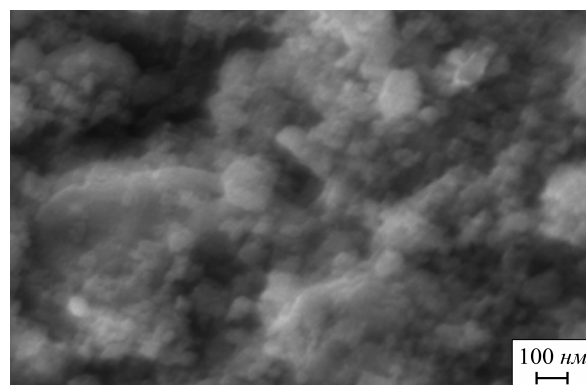


Рис. 2. Морфология порошка, полученного методом СВС (смесь карбидов вольфрама и титана)

Fig. 2. Morphology of the powder produced by SHS method (mixture of tungsten and titanium carbides)

Для характеристики твердости материалов использовали метод Бринелля. Измерения проводили в различных точках образца (не менее пяти отпечатков) и сравнивали их со значениями, полученными при исследовании контрольного образца.

Относительную износостойкость ( $\varepsilon$ ) определяли по ГОСТ 17367 – 71 в процессе испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{и}}} \left( \frac{d_{\text{э}}}{d_{\text{и}}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\Delta l_{\text{э}}$  и  $\Delta l_{\text{и}}$  – абсолютный линейный износ эталонного и испытуемого образцов, мм;  $d_{\text{э}}$  и  $d_{\text{и}}$  – фактический диаметр эталонного и испытуемого образцов, мм.

В качестве абразивного материала использовали абразивную шкурку Н6; для каждого образца брали новую абразивную шкурку. При испытании всех образцов путь трения был одинаковым. В формуле (1) за эталонный образец был взят контрольный немодифицированный материал, значение износостойкости которого приняли равным единице. Испытания проходили при трении торца образца по поверхности абразивной шкурки. Характеристики испытания материалов на износостойкость следующие: частота вращения диска 60 об/мин; удельное давление на образец 400 МПа; путь трения 50 м; радиальное перемещение образца 1,4 мм/об; рабочая поверхность образца 2×2×17 мм.

Коррозионную стойкость исследовали по ГОСТ 9.908 – 85 на двух подготовленных образцах чугуна (модифицированном и контрольном). Для измерения относительной коррозионной стойкости образцы должны иметь одинаковый диаметр и высоту, т.е. поверхность, контактирующая с агрессивной средой, должна быть одинаковой.

Испытания проводили в 25 %-й соляной кислоте и в 25 %-й серной кислоте. Количество кислот было достаточным для взаимодействия образцов (рассчитано по реакции и взято с избытком около 10 %). Образцы помещали в растворы кислот при комнатной температуре

(20 °С). Через 24 ч их вынимали из растворов, промывали водой и измеряли потерю массы модифицированного и контрольного образцов.

Коррозионную стойкость, кг/м<sup>2</sup>, вычисляли по формуле

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \quad (2)$$

где  $m_0$  и  $m_1$  – масса образца до и после испытаний и удаления продуктов коррозии, кг;  $S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Диаметр исследованных образцов составлял 25 мм, высота 5,5 мм, количество кислот с концентрацией 25 % – 125 мл. Площадь образцов, контактирующая с агрессивными средами, – 14,134×10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>.

Свойства образцов чугуна даны в табл. 2. Образцы чугуна, обработанные модификатором I (получен плазмохимическим методом), показали увеличение твердости ( $\Delta_{\text{НВ}}$ ) на 9,8 %, временного сопротивления на разрыв ( $\Delta_{\sigma_{\text{в}}}$ ) – на 11,9 %. При испытаниях образцов, обработанных модификатором II (получен комбинированным методом), зафиксировано увеличение твердости на 13,1 %, временного сопротивления на разрыв – на 19,8 % по сравнению с контрольным (немодифицированным) чугуном.

Триботехнические свойства образцов представлены на рис. 3. Относительная износостойкость чугуна,

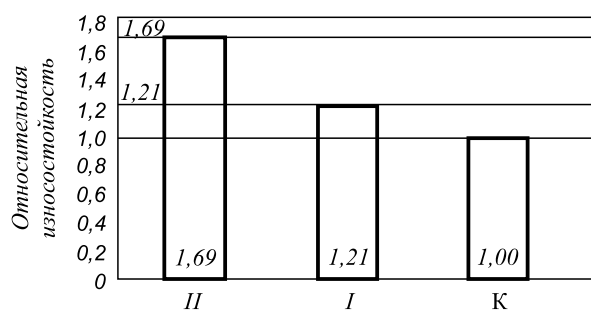


Рис. 3. Износостойкость модифицированных образцов при трении о закрепленные частицы абразива

Fig. 3. Wear resistance of modified samples when rubbing against fixed abrasive particles

Т а б л и ц а 2

Свойства образцов чугуна в зависимости от состава и количества модификаторов

Table 2. Properties of cast iron samples depending on the composition and quantity of modifiers

Образец	Модификатор		НВ	$\Delta_{\text{НВ}}$ , %	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\gamma$	$\Delta_{\sigma_{\text{в}}}$ , %
	Состав	Количество, %					
1	I	0,002	201,0	9,8	262,00	4,01	11,87
2	II	0,038	207,0	13,1	280,54	5,03	19,79
3	К	0	183	0	234,20	6,77	0

П р и м е ч а н и е.  $\gamma$  – доверительный интервал.



## Коррозионная стойкость

Table 3. Corrosion resistance

Образец чугуна	Модификатор		Потеря массы, г, за 24 ч			$\Delta m$ , кг/м <sup>2</sup>	$\Delta m'_k$ , %
	Состав	Количество, %	$m_0$	$m_1$	$m_0 - m_1$		
1	I	0,002	16,50	15,25	1,25	0,88	> на 4,5
		0,002	17,95	17,15	0,80	0,57	> на 12,3
2	II	0,0385	16,80	15,45	1,35	0,96	< на 4,3
		0,0380	16,55	15,85	0,70	0,50	> на 28,0
3	К	0	17,40	16,10	1,30	0,92	0
			16,15	15,25	0,90	0,64	

Пр и м е ч а н и е. В числителе – потеря массы при  $t_{\text{ком}}$  в серной кислоте (125 мл), в знаменателе – в соляной кислоте (125 мл);  $\Delta m'_k$  – коррозионная стойкость относительно контрольного образца.

обработанного модификатором I (плазмохимический метод), увеличилась на 21 %, а обработанного модификатором II (комбинированный метод) – на 69 % по сравнению с контрольным (К) образцом.

Данные о коррозионной стойкости исследуемых материалов представлены в табл. 3. Коррозионная стойкость  $\Delta m$  модифицированных образцов чугуна в серной кислоте оказалась сравнимой с коррозионной стойкостью  $\Delta m_k$  контрольного образца.

Коррозионная стойкость в соляной кислоте увеличилась примерно на 12,3 % с применением модификатора I, полученного плазмохимическим методом при концентрации тугоплавких частиц 0,002 %, и на 28 % с применением модификатора II, полученного комбинированным методом при концентрации тугоплавких частиц 0,038 %.

**Выводы.** При внутриформенном способе получения чугуна применение наномодификаторов, полученных плазмохимическим и комбинированным методами, в количестве 0,002 – 0,038 % позволяет увеличить твердость НВ на 9,8 – 13,1 %, предел прочности в условиях растяжения на 11,9 – 19,8 %, относительную износостойкость на 21 – 69 %, коррозионную стойкость в соляной кислоте на 12,3 – 28 % по сравнению с контрольными (немодифицированными) образцами чугуна.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сабуров В.П., Черепанов А.Н., Жуков М.Ф. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 344 с.
2. Жуков М.Ф., Черский И.Н. Упрочнение металлических, полимерных и эластомерных материалов ультрадисперсными порошками плазмохимического синтеза. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 312 с.
3. Комшуков В.П., Фойгт Д.Б., Черепанов А.Н., Амелин А.В. Модифицирование непрерывнолитой стали нанопорошками тугоплавких соединений // Сталь. 2009. № 4. С. 65 – 68.
4. Комушков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми ма-

- териалами на качество сортовой непрерывной заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 57 – 64.
5. Предтеченский М.Р., Черепанов А.Н., Тухто О.М., Коваль И.Ю., Алексеев А.В. Плазмохимический синтез нанопорошков тугоплавких соединений и их применение для модифицирования конструкционных сталей и сплавов // Литейщик России. 2010. № 3. С. 28, 29.
6. Комушков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Механические и металлографические исследования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 21 – 24.
7. Крушенко Г.Г., Черепанов А.Н., Полубояров В.А., Кузнецов В.А. Результаты опытно-промышленных исследований повышения свойств черных и цветных металлов с помощью тугоплавких нанопорошковых материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 4. С. 23 – 29.
8. Еремин Е.Н., Жеребцов С.Н. Центробежное электрошлаковое литье фланцевых заготовок с применением инокулирующего модифицирования // Современная электрометаллургия. 2004. № 3. С. 15 – 17.
9. Hossein Nedjad S., Farzaneh A. Formation of fine intragranular ferrite in cast plain carbon steel inoculated by titanium oxide nanopowder // Scripta Materialia. 2007. № 57. P. 937 – 940.
10. Крушенко Г.Г., Ямских И.С., Бонченков А.А., Мишин А.С. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков // Металлургия машиностроения. 2002. № 2(9). С. 20, 21.
11. Хрычиков В.Е., Калинин В.Т., Кривошеев В.А., Доценко Ю.В., Селиверстов В.Ю. Ультрадисперсные модификаторы для повышения качества отливок // Литейное производство. 2007. № 7. С. 2 – 5.
12. Пинкин В.Ф., Каренгин А.Г., Осиненко С.А. Модифицирование высокохромистого чугуна ИСЦ ультрадисперсным порошком // Литейное производство. 1994. № 3. С. 7.
13. Влас М.И., Калинин В.Т., Хрычиков В.Е., Кривошеев В.А., Меняйло Е.В., Кондрат А.А. Модифицирование износостойких чугунов ультра- и нанодисперсными материалами // Системные технологии. 2010. 1 (66). С. 150 – 162.
14. Jian-wei Lia, Mei-ling Chenb, Hong Gaob, Ying-hua Zhaoc. Structures and Properties of Cast Irons Reinforced by Trace Addition of Modified SiC Nanopowders // Chinese journal of chemical physics. 2007. Vol. 20. P. 625 – 631.
15. Пат. 2508249 РФ. Способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана методом СВС / Полубояров В.А., Мали В.И., Коротаева З.А., Жданок А.А., Паули И.А., Степанова Н.В.; опубл. 27.02.14. Бюл. № 6.

Поступила 28 мая 2015 г.

# INTRA-MOLD MODIFICATION OF CAST IRON. THE STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFIERS PRODUCED BY PLASMA CHEMICAL AND SHS METHODS ON SERVICE CHARACTERISTICS OF GREY CAST IRON. REPORT 2

**Poluboyarov V.A.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods (sanych@solid.nsc.ru)

**Korotaeva Z.A.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Chem.), Researcher of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods

**Zhdanok A.A.<sup>1</sup>**, Engineer of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods

**Kuznetsov V.A.<sup>2</sup>**, Director

**Samokhin A.V.<sup>3</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

<sup>1</sup> Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC) (18, Kutateladze str., Novosibirsk, 630128, Russia)

<sup>2</sup> “LLC “Tsentrolit-S” (51, Petukhova str., Novosibirsk, 630088 Russia)

<sup>3</sup> Institute of Metallurgy and Material Science named after Baikov A.A., RAS (49, Leninskii ave., Moscow, 119991, Russia)

**Abstract.** The studies are devoted to the influence of nanopowders produced by plasma chemical method and self-propagating high-temperature synthesis (SHS) on service characteristics of grey cast iron SCh20 at intra-mold modification. Modifiers (*I*) in iron matrix of the composition ( $\alpha$ -Fe,  $\text{TiC}_x\text{N}_y$ , SiC) from natural raw material (titano-magnetite) have been produced by plasma chemical method at the interaction of titano-magnetite powder and methane in the flow of hydrogen-nitrogen plasma. Modifiers of the composition *II* on conversion to carbides (70 – 80 % WC  $\div$  20 – 30 % TiC) with zirconium as metal-protector have been produced by SHS method combined with mechanochemical method. The usage of modifier *I* in the amount of 0,002 % increases Brinell hardness by 9,8 %, ultimate tensile strength – by 11,9 %, relative wear resistance – by 21 %, corrosion resistance in hydro-chloric acid – by 12,3 % as compared with check (unmodified) sample of cast iron. The usage of modifier *II* in the amount of 0,038 % increases Brinell hardness by 13,1 %, ultimate tensile strength – by 19,8 %, relative wear resistance – by 69 %, corrosion resistance in hydrochloric acid – by 28 %.

**Keywords:** intra-mold modification, wear resistance, titanium carbide, tungsten carbides, corrosion resistance, metal-protector, mechanochemical method, plasma chemical method, ultimate strength, SHS, grey cast iron, hardness, titano-magnetite, zirconium.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-561-566

## REFERENCES

1. Saburov V.P., Cherepanov A.N., Zhukov M.F. *Plazmokhimicheskii sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modifitsirovaniya metallov i splavov* [Plasma chemical synthesis of ultra-disperse powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN, 1995. 344 p. (In Russ.).
2. Zhukov M.F., Cherskii I.N. *Uprochnenie metallicheskih, polimernykh i elastomernykh materialov ul'tradispersnymi poroshkami plazmokhimicheskogo sinteza* [Strengthening of metal, polymer and elastomer materials with ultra-disperse powders of plasma chemical synthesis]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN, 1999. 312 p. (In Russ.).

3. Komshukov V.P., Foigt D.B., Cherepanov A.N., Amelin A.V. Modifying continuous-cast steel with refractory nanopowder. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 4, pp. 363–365.
4. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V. Study of the influence of metal modification with nano-powdered materials on the quality of profiled continuous billet. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 57–64. (In Russ.).
5. Predtechenskii M.P., Cherepanov A.N., Tukhto O.M., Koval I.Yu., Alekseev A.V. Plasma chemical synthesis of nano-powders of refractory compounds and their application to modify structural steels and alloys. *Liteishchik Rossii*. 2010, no. 3, pp. 28–29. (In Russ.).
6. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V. Metal modification with nano-powdered inoculators in the crystallizer of continuous casting machine. Mechanical and metallographic studies. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no.10, pp. 21–24. (In Russ.).
7. Krushenko G.G., Cherepanov A.N., Poluboyarov V.A., Kuznetsov V.A. The results of half-industrial studies for improving the properties of ferrous and non-ferrous metals with the help of refractory nano-powdered materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 4, pp. 23–29. (In Russ.).
8. Eremin E.N., Zharebtsov S.N. Centrifugal electroslag casting of flange billets with the use of inoculating modification. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2004, no. 3, pp. 15–17. (In Russ.).
9. Hossein Nedjad S., Farzaneh A. Formation of fine intragranular ferrite in cast plain carbon steel inoculated by titanium oxide nanopowder. *Scripta Materialia*. 2007, no. 57, pp. 937–940.
10. Krushenko G.G., Yamskikh I.S., Bonchenkov A.A., Mishin A.S. Improvement of the quality of cast iron castings with the help of nanopowders. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2002, no. 2 (9), pp. 20–21. (In Russ.).
11. Khrychikov V.E., Kalinin V.T., Krivosheev V.A., Dotsenko Yu.V., Seliverstov V.Yu. Ultra-disperse modifiers for increasing the quality of castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 2007, no. 7, pp. 2–5. (In Russ.).
12. Pinkin V.F., Karengin A.G., Osinenko S.A. Modification of high-chromium cast iron with ultra-disperse powder. *Liteinoe proizvodstvo*. 1994, no. 3, p. 7. (In Russ.).
13. Vlas M.I., Kalinin V.T., Khrychikov V.E., Krivosheev V.A., Menyailo T.V., Kondrat A.A. Modification of wear-resistant cast iron with ultra- and nano-disperse materials. *Sistemnye tekhnologii*. 2010, no. 1 (66), pp. 150–162. (In Russ.).
14. Jian-wei Lia, Mei-ling Chenb, Hong Gaob, Ying-hua Zhaoc. Structures and Properties of Cast Irons Reinforced by Trace Addition of Modified SiC Nanopowders. *Chinese journal of chemical physics*. 2007. Vol. 20, pp. 625–631.
15. Poluboyarov V.A., Mali V.I., Korotaeva Z.A., Zhdanok A.A., Pauli I.A., Stepanova N.V. *Sposob polucheniya nanodispersnykh poroshkov karbidov vol'frama i titana metodom SVS* [Method for production of nano-disperse powders of tungsten and titanium carbides by SHS method]. Patent RF no. 2508249. *Byulleten' izobretenii*. 2014. no. 6. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed in the frames of State contract no. 16.513.11.3131 with the participation of Bataev A.A., Tsvetkov Yu.V., Alekseeva N.V., Stepanova N.V..

Received May 28, 2015