

ВНУТРИФОРМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНОВ. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРОГО ЧУГУНА. СООБЩЕНИЕ 3*

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

Кортаева З.А.¹, к.х.н., научный сотрудник

Жданок А.А.¹, инженер

Кузнецов В.А.², директор

Самохин А.В.³, к.т.н., старший научный сотрудник

¹ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18)

² ООО «Цетролит-С»

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

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
(119891, г. Москва, Ленинский пр., 49)

Аннотация. Исследовано влияние концентрации и состава наноразмерных модификаторов, полученных различными методами (термическим, плазмохимическим, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза – СВС, механохимическим и комбинированным с механохимическим), на микроструктуру и механические свойства синтетического серого чугуна при внутриформенном модифицировании. Кроме этого, в качестве наноразмерных модификаторов были исследованы пылевидные металлургические отходы. Для сравнения модифицирующих свойств использованы классические модификаторы российского производства. Увеличение твердости по Бринеллю в пределах 13 % показали образцы чугуна, модифицированные карбидами вольфрама и титана (методы СВС + механохимический), 10 % – модифицированные оксидом иттрия с цирконием или хромом (механохимический метод) и [α-Fe, TiC_xN_y, SiC] (плазмохимический метод). Увеличение предела прочности на растяжение примерно на 20 % зафиксировано на образцах чугуна, модифицированных карбидами вольфрама и титана с цирконием (механохимический метод). На образцах, модифицированных оксидом иттрия с цирконием или хромом (механохимический метод) и [α-Fe, TiC_xN_y, SiC] (плазмохимический метод), предел прочности возрос на 8 – 12 %. Концентрации модификаторов, при которых проявляется наибольший модифицирующий эффект, составили примерно 0,002 – 0,050 %.

Ключевые слова: внутриформенное модифицирование, железо, карбид титана, карбиды вольфрама, керамические частицы, металл-протектор, механохимический метод, модификатор, плазмохимический метод, предел прочности на растяжение, СВС, серый чугун, твердость, термический метод, титаномагнетит, хром, цирконий.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-728-734

Влияние наноразмерных частиц тугоплавких фаз (НЧТФ) на структуру и механические свойства чугунов рассматривается во многих исследованиях, этому вопросу посвящены монографии [1, 2]. В работах [3 – 8] изучены особенности, характерные для введения НЧТФ в чугуны различных марок. В роли модификаторов выступали следующие НЧТФ: SiC, BN, AlN, TiN и TiCN. В работах [3, 4] НЧТФ в виде SiC и BN добавляли в объеме алюминиевого прутка, а Al₂O₃ в работах [3, 4, 6] добавляли на дно ковша в латунной фольге. В исследованиях [5, 7] поверхность НЧТФ, полученных плазмохимическим синтезом, плакировалась смесью твердых углеводородов метанового ряда. В работе [8] смесь частиц SiC с металлом-протектором заворачивали в алюминиевую фольгу и помещали на дно

ковша. Время выдержки после ввода НЧТФ составляло 5 мин [8] и в интервале от нуля до 16 мин [5]. Показано, что после ввода частиц BN в серых чугунах наблюдается измельчение колоний эвтектики [3, 4]; уменьшение глубины отбела [3, 4]; изменение морфологии графитовых включений [3]; увеличение прочности на растяжение на 32 % [3] и относительного удлинения на 40 % [3]. Результатом введения частиц SiC является измельчение зерна [3, 4], уменьшение количества мартенсита до 40 % [4], увеличение износостойкости на 15 – 20 % [3, 4], образование мелкозернистой структуры [5], снижение отбела [5]. Авторы работы [8] отмечают равномерное распределение графита. Показано, что хлопьевидный графит стал тоньше, а выделения сферического графита уменьшились в радиусе. При добавке 0,1 % SiC предел прочности на растяжение возрос на 22,7 %, а износостойкость увеличилась до 78 % в зависимости от концентрации модификатора. Ввод частиц

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

Al_2O_3 в чугуна приводит к образованию карбидов округлой формы, равномерно распределенных в объеме матрицы [6], выделению графита глобулярной формы [4], увеличению твердости на 86,6 % [3, 6] и уменьшению износа на 31,6 % [3, 6]. В работе [3] при добавлении частиц TiN и TiCN наблюдали измельчение зеренной структуры, увеличение микротвердости аустенита на 18 – 36 % и перлита на 28 – 47 %. В работе [7] отмечено, что для измельчения аустенита в промышленных отливках размер частиц (TiCN) должен быть 10 – 50 нм, а для устранения отбела и измельчения графитовой фазы размер частиц (SiC) должен быть в пределах 50 – 200 нм. Приводятся также данные об увеличении стойкости валков на 14,7 – 38,7 % и стойкости сталеразливочных изложниц из чугуна на 22 – 45 % [7]. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных модифицированию чугунов, исследованию внутриформенного модифицирования как модельного объекта уделяется недостаточно внимания.

Целью настоящей работы является исследование влияния состава модификаторов и их концентрации на микроструктуру и механические свойства синтетического серого чугуна при внутриформенном модифицировании.

Для исследования процессов модифицирования применялись модификаторы, полученные следующими

методами: термическим (углетермическим, Т), плазмохимическим (ПХ), самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС), механохимическим (МХ) и комбинированным с механохимическим (когда модификатор подвергался дополнительной механохимической обработке в планетарно-центробежных мельницах). Кроме этого, в качестве модификаторов были исследованы пылевидные металлургические отходы: ККС (смесь из углерод-карбидкремниевых материалов производства ООО Торговый дом «Русский металлургический брикет») и ПУД (продукт улавливания дисперсный, отход дробления ферросилиция). Состав ККС следующий: 65 ± 1 % SiC; 26 ± 2 % $C_{сум}$; 6–7 % SiO_2 ; ≤ 1 % CaO; ≤ 1 % Al_2O_3 ; ≤ 1 % Fe_2O_3 ; следы P; $\leq 0,12$ % S.

Модификаторы применялись в виде порошков и таблеток diam. 10 – 25 мм, которые получали прессованием без вяжущего материала или с вяжущим материалом – метилцеллюлозой (МЦ). Для сравнения модифицирующих свойств были использованы классические модификаторы российского производства – ферросилиций с магнием и барийстронциевый карбонат. Состав модификаторов, методы получения и свойства приведены в табл. 1.

Модификаторы состава TiCN в медно-стальной матрице получали термическим методом. Компонен-

Т а б л и ц а 1

Состав, методы получения и свойства модификаторов

Table 1. Composition, production methods and the properties of modifiers

Модификатор	Метод получения	МХ-обработка, мин	$S_{уд}$, м ² /г
TiCN–Cu–Fe	Т	0	0,88
TiCN–Cu–Fe	Т + МХ	1,0	1,70
(TiCN–Fe–Cu) + Zr	Т + МХ	1,0	2,00
α -Fe, TiC_xN_y , SiC:			
ПХ-1, порошок (90 % Fe)	ПХ	–	1,60
ПХ-3, порошок (95 % Fe)			20,20
ПХ-4, порошок (95 % Fe)			5,00
ПХт-1, таблетки (90 % Fe)			1,60
70 – 80 % WC/20 – 30 % TiC	СВС	–	6,0 – 18,5
(WC–TiC) + Zr, ((1)÷1)	СВС + МХ	1,0	5,50
Y_2O_3 + Zr, (1÷1)	МХ	1,0	2,80
Y_2O_3 + Cr, (1÷1)	МХ	0,5	3,00
(SiC + Zr), (1÷1)	МХ	1,0	3,40
FeSi + SiC, (1÷1)	МХ	2,0	7,30
ККС	Отходы	–	1,70
ПУД (ферросилиций, фракция 1,5 – 20 мкм)	Отходы	–	0,30
ККС + ПУД (1÷1)	Отходы + МХ	2,5	17,90
ПФСМг-7(ферросилиций с 7 % Mg)	ТУ 14-5-14-134-86	–	0,40
БСК-2-УС (барийстронциевый карбонат)	ТУ 1717-001-75073896 – 2005	–	0,40
БСК-2-УС + ПУД (3÷2)	Механическая смесь	–	0,40

ты предварительно смешивали, шихту нагревали в течение 1,5 – 2 ч при температуре 1200 °С. При этом смесь продували азотом для удаления оксидов углерода и образования карбонитрида титана. Состав шихты соответствовал составу лигатуры TiCN–Cu–Fe: TiO₂ (размер частиц 0,1 – 0,2 мкм); сажа (0,006 мкм); медный порошок; графит (бой электродов); стальная дробь (1 мм); борная кислота. Спек получался в виде кусков и порошка. Для активирования модификатор подвергался дополнительной механохимической обработке в планетарно-центробежных мельницах. Наиболее эффективным оказался модификатор, обработанный дополнительно в мельнице с цирконием или никелем.

Плазмохимическим методом были получены модификаторы в железной матрице состава [α-Fe, TiC_xN_y, SiC] из природного сырья – титаномагнетита – взаимодействием порошка титаномагнетита с метаном в потоке водородно-азотной плазмы. Продукты реакции представляли собой порошки с удельной поверхностью 1,6 – 20 м²/г.

Методом СВС, комбинированным с механохимическим методом, были получены модификаторы состава в пересчете на карбиды (70 – 80 % WC ÷ 20 – 30 % TiC) с цирконием, выполнявшим функцию металла-протектора. Для получения смеси карбидов вольфрама и титана был впервые использован метод СВС карбида титана в композиции титан–вольфрам–углерод, описанный в работе [9]. Размеры кристаллитов (область когерентного рассеивания), рассчитанные по данным рентгенофазового анализа, для продуктов СВС (WC, W₂C и TiC) находятся в пределах 30 – 35 нм. Для исследования процессов модифицирования в настоящей работе использовали состав с металлом-протектором цирконием.

Механохимическим методом, совместной обработкой в планетарных мельницах АГО-2 или АГО-3 были получены модификаторы на основе Y₂O₃ или SiC с плакирующими металлами хромом и цирконием и смесь FeSi с SiC.

Выплавку синтетического серого чугуна марок СЧ20 и СЧ25 проводили в индукционной печи ОКБ-281 со следующими характеристиками: емкость тигля 750 кг, футеровка кислая (кварц и 3 % борной кислоты). Заливку в литейные формы проводили при температуре 1350 – 1380 °С. В ходе экспериментов литейная форма была модифицирована. В нее устанавливали два керамических фильтра, между которыми помещали модификатор. Такое решение препятствовало всплыванию модификатора. В качестве материала для изготовления литейных форм использовали сухую песчано-глинистую смесь.

В ходе эксперимента производили заливку (режим Z – 1) из одного ковша одновременно десяти образцов (девять образцов с различными модификаторами, завернутыми в алюминиевую фольгу, один – без модификатора, на нижний фильтр помещали пустую алюминиевую фольгу).

Среднее значение предела прочности на растяжение рассчитывали по шести измерениям, что обеспечивало корректность получаемых данных. Измерения твердости по Бринеллю НВ проводили на приборе типа ТШ-2. На каждом анализируемом образце делали не менее пяти отпечатков. Полученные данные сравнивали со значениями, зафиксированными на контрольном (К) образце. Микроскопические исследования проводили с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m.

Заливку по режиму Z – 1 проводили с целью исследования влияния состава модификаторов и их концентрации на микроструктуру и механические свойства синтетического чугуна СЧ20.

Данные по составу модификаторов, их концентрации (в пересчете на активные керамические частицы), твердость по Бринеллю (и прирост твердости ΔНВ) образцов чугуна отражены в табл. 2 (модификаторы применялись в виде порошков). Наибольшее увеличение твердости (в пределах 13 %) показали образцы чугуна, модифицированные карбидами вольфрама и титана (методы СВС + механохимический). При модифицировании чугуна оксидом иттрия с цирконием или хромом (механохимический метод) и ПХ-3 (плазмохимический метод) твердость возросла примерно на 10 %. Введение в расплав модификаторов типа ПХ-1, ПХ-4 (плазмохимический метод) и отходов (ККС) привело к росту твердости на 5 – 8 %.

В табл. 3 представлены средние значения предела прочности σ_в на растяжение и значения прироста предела прочности Δσ_в. Наибольшее увеличение предела

Т а б л и ц а 2

Состав, количество модификаторов и твердость по Бринеллю образцов чугуна (режим Z – 1)

Table 2. Composition, the number of modifiers and Brinell hardness of cast iron samples (mode Z – 1)

Модификатор	Образцы чугуна			
	Состав	Количество активной фазы, %	НВ, Н/мм ²	ΔНВ, %
Y ₂ O ₃ + Zr		0,0130	201,0	9,8
Y ₂ O ₃ + Cr		0,0250	201,0	9,8
(WC–TiC) + Zr		0,0375	207,0	13,1
(WC–TiC) + Zr		0,0130	192,0	4,9
ПХ-1 [α-Fe, TiC _x N _y , SiC]		0,0030	197,0	7,7
ПХ-3 [α-Fe, TiC _x N _y , SiC]		0,0015	201,0	9,8
ПХ-4 [α-Fe, TiC _x N _y , SiC]		0,0015	192,0	4,9
FeSi + SiC		0,0500	183,0	0
ККС		0,6500	192,0	4,9
Контрольный (алюм. фольга)		0	183,0	–

Предел прочности (и прирост предела прочности) образцов чугуна

Table 3. Ultimate strength (and the increase of ultimate strength) of cast iron samples

Показатель	Значения показателя для образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (К)
σ_b , МПа	260,4	261,6	280,5	254,0	254,6	262,0	257,4	244,3	242,4	234,2
δ	3,8	5,7	5,0	2,8	8,1	4,0	5,6	7,1	2,6	6,8
$\Delta\sigma_b$, %	12,2	11,7	19,8	8,5	8,7	11,9	9,9	4,3	3,5	0

Пр и м е ч а н и е. δ – доверительный интервал.

прочности (примерно 20 %) зафиксировано на образцах чугуна, модифицированных карбидами вольфрама и титана с цирконием (механохимический метод). При снижении концентрации модификатора в три раза прирост предела прочности по сравнению с контрольным материалом составил 8,5 %.

Остальные образцы с модификаторами, полученными плазмохимическим и механохимическим методами, характеризуются приростом предела прочности в пределах 8 – 12 %.

Микроструктурные исследования выявили, что в структуре всех образцов, кроме третьего, присутствуют перлит (70 %) и феррит (30 %). В образце 3 (модификатор WC–TiC с металлом-протектором цирконием, концентрация керамических частиц 0,0375 %) объемная доля перлита составляет 92 %, феррита 8 % (рис. 1). Феррит находится вокруг графитовых включений в отдельных областях, равномерно расположенных в объеме материала. Дисперсность пластинчатого перлита определяется средним расстоянием между пластинами цементита. Расстояние между пластинами цементита во всех образцах составляет 0,8 – 1,3 мкм.

Заливку по режиму Z – 2 проводили с целью оценки влияния различных модификаторов на микроструктуру

и механические свойства синтетического чугуна второго переплава СЧ25 и оценки верхнего предела концентраций модификаторов. В тигель помещали выплавленный синтетический чугун, в который было добавлено 0,1 % Cr и 0,1 % Ni.

Данные по составу модификаторов, их концентрации, твердости по Бринеллю (в различных точках относительно центра) образцов чугуна приведены в табл. 4. Заметные отличия в значениях твердости могут быть связаны с изменениями фазового состава чугуна. Следует отметить, что твердость образца, модифицированного карбидами вольфрама и титана с цирконием, одинакова во всех точках (образец 8), что обусловлено наиболее равномерной кристаллизацией расплава в присутствии этого модификатора.

Средние значения предела прочности показаны на рис. 2, а изменения уровня прочности по отношению к немодифицированному (контрольному) материалу – на рис. 3. Концентрация модификаторов в этом эксперименте варьировалась в пределах 0,05 – 0,10 % (в пересчете на керамические частицы). Наибольшее увеличение предела прочности зафиксировано на образце 3, модифицированном ферросилицием с магнием. Предел прочности остальных образцов не изменяется или даже

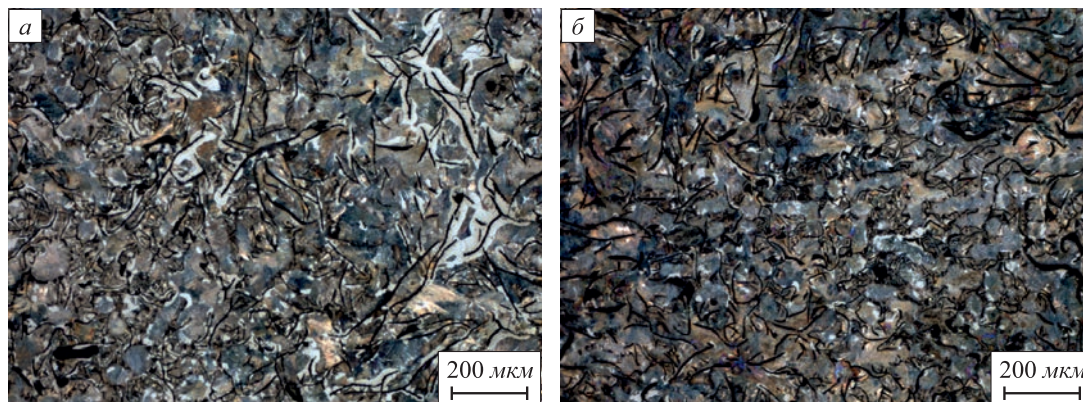


Рис. 1. Структура образцов чугуна, выявленная в 5 %-ном спиртовом растворе HNO_3 :
а – контрольный образец; б – образец 3 (режим Z – 1)

Fig. 1. Structure of cast iron samples, revealed in 5 %-alcoholic solution HNO_3 :
а – check sample; б – sample 3 (mode Z – 1)

Состав, количество модификаторов и твердость по Бринеллю образцов чугуна (режим Z – 2)

Table 4. Composition, the number of modifiers and Brinell hardness of cast iron samples (mode Z – 2)

Образец	Модификатор		Значение НВ, Н/мм ² , в точках			
	Состав	Количество активной фазы, %	1 (центр)	2	3	среднее
1	Контр. (алюм. фольга)	0	201	197	197	198,3
2	ККС + ПУД	0,10	192	201	197	196,7
3	ПФСМГ-7 (FeSi + Mg)	0,15	192	197	197	195,3
4	ПХТ-1 [α -Fe, TiC _x N _y , SiC], таблетки	0,05	197	192	197	195,3
5	БСК-2-УС + ПУД	0,10	187	183	187	185,7
6	((TiCN + Cu – Fe) + Zr) + МЦ, таблетки	0,10	179	187	192	186,0
7	(Y ₂ O ₃ + Zr) + МЦ, таблетки	0,10	187	197	197	193,7
8	((WC – TiC) + Zr) + МЦ, таблетки	0,10	197	197	197	197,0
9	(SiC + Zr) + МЦ, таблетки	0,10	187	201	197	195,0

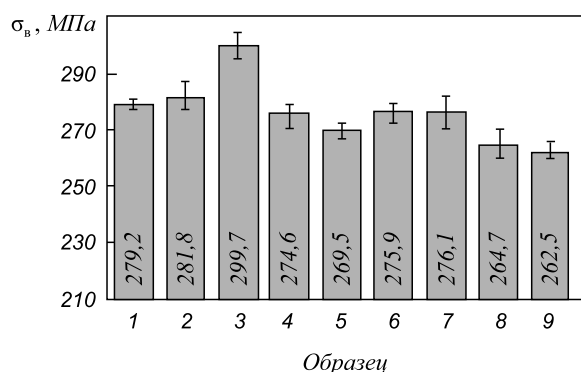


Рис. 2. Временное сопротивление на разрыв образцов чугуна (режим Z – 2)

Fig. 2. Ultimate strength on the rupture of cast iron samples (mode Z – 2)

уменьшается. Это говорит о том, что модификаторы эффективны при концентрациях ниже той, что применялась в данной заливке (ниже 0,05 % для модификаторов, полученных плазмохимическим методом, и ниже 0,1 % для модификаторов, полученных остальными методами).

Микроструктурными исследованиями выявлено, что структура образца 3 имеет перлитное строение (рис. 4, в). В структуре остальных образцов присутствуют как перлит, так и феррит. Соотношение перлита и феррита в образцах 2 и 4 составляет соответственно 96 и 4 % (рис. 4, б). В структуре остальных образцов 92 % площади шлифа занимает перлит и 8 % феррит (рис. 4, а). Феррит находится вокруг графитовых включений. Межпластинчатое расстояние в перлите составляет 0,8 – 1,3 мкм.

В структуре образца 5 (модификатор БСК-2-УС плюс ПУД) присутствует фосфидная эвтектика (рис. 4, з).

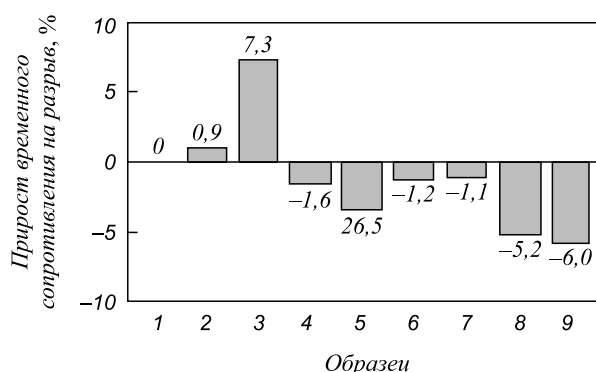


Рис. 3. Изменение временного сопротивления на разрыв материалов по сравнению с контрольным образцом (режим Z – 2)

Fig. 3. Change of ultimate strength on the rupture of the materials in comparison with the check sample (mode Z – 2)

Выводы. При внутриформенном способе получения чугуна применение наномодификаторов, полученных различными методами (плазмохимическим, термическим, СВС, механохимическим и комбинированным вышеуказанных методов с механохимической обработкой в активаторах), позволяет увеличить твердость по Бринеллю, предел прочности на растяжение при концентрации модификаторов примерно 0,002 – 0,050 %.

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.

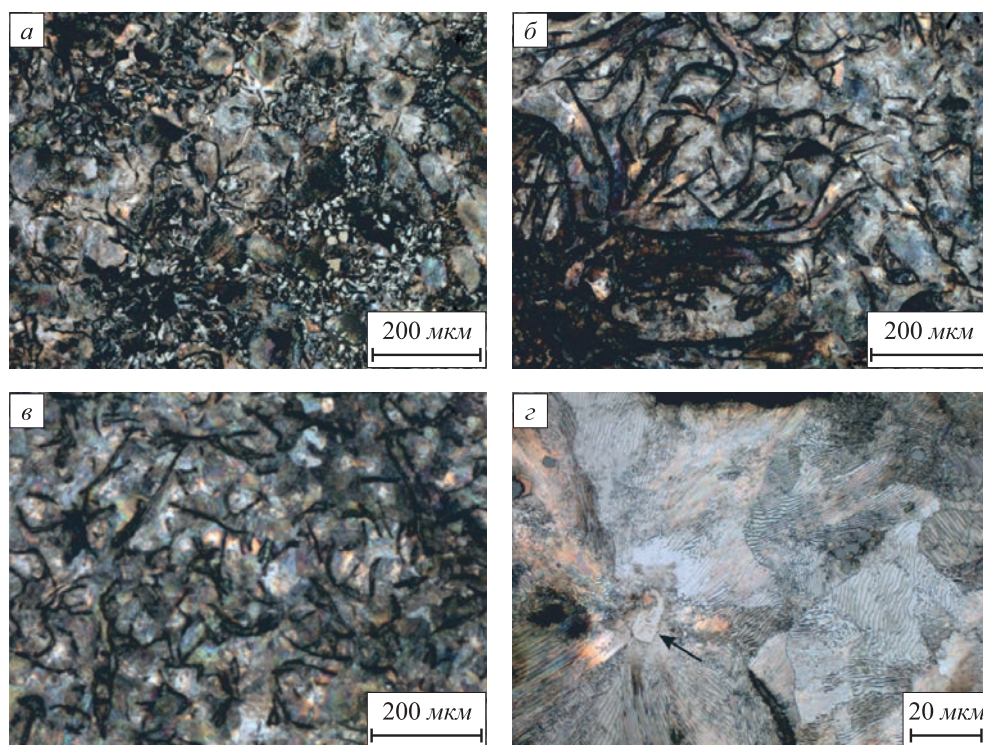


Рис. 4. Структура первого (а), второго (б), третьего (в) и пятого (г) образцов чугуна, выявленная в 5 %-ном спиртовом растворе HNO_3 (режим Z – 2)

Fig. 4. Structure of the first (a), second (b), third (c) and fifth (d) cast iron samples, revealed in 5 %-alcoholic solution HNO_3 (mode Z – 2)

3. 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.
4. Крушенко Г.Г., Ямских И.С., Бонченков А.А., Мишин А.С. Повышение качества чугуновых отливок с помощью нанопорошков // Металлургия машиностроения. 2002. № 2 (9). С. 20, 21.
5. 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.
6. Пинкин В.Ф., Каренгин А.Г., Осиненко С.А. Модифицирование высокохромистого чугуна ИСЦ ультрадисперсным порошком // Литейное производство. 1994. № 3. С. 7.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 10, pp. 728–734.

INTRAFORM MODIFICATION OF CAST IRON. INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND CONCENTRATION OF NANOSIZED MODIFIERS ON THE SERVICE CHARACTERISTICS OF GRAY CAST IRON. REPORT 3

V.A. Poluboyarov¹, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods (sanych@solid.nsc.ru)

Z.A. Korotaeva¹, Cand. Sci. (Chem.), Researcher of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods

A.A. Zhdanok¹, Engineer of the Laboratory of Synchrotron Radiation Methods

V.A. Kuznetsov², Director

A.V. Samokhin³, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

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

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

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

Abstract. The paper presents the research of the influence of the concentration and composition of nanoscale modifiers, obtained when using

different methods (thermal, plasma-chemical, self-spreading high-temperature synthesis – SHS, mechanochemical and combined with mechano-chemical), on the microstructure and mechanical properties of synthetic grey cast iron in the intraform modification. In addition, in the capacity of nanosized modifiers dust-like metallurgical waste have been investigated. Classic modifiers of the Russian production have been used to compare modifying properties. The increase in the Brinell hardness in the range of 13 % has been shown by the samples of cast iron, modified by tungsten and titanium carbides (the SHS method + the mechanochemical one), 10 % – modified by yttrium with zirconium or chromium (the mechanochemical method) and $[\alpha\text{-Fe}, \text{TiC}_x\text{N}_y, \text{SiC}]$ (the plasma-chemical method). The increase in the limit of tensile strength by approximately 20 % has been recorded on the samples of cast iron, modified by tungsten and titanium carbides with zirconium (the mechanochemical method). On the samples modified by yttrium with zirconium or chromium (the mechanochemical method) and $[\alpha\text{-Fe}, \text{TiC}_x\text{N}_y, \text{SiC}]$ (the plasma-chemical method), tensile strength has increased by 8 – 12 %. The concentration of modifiers, in which the greatest modifying effect has been revealed, has made approximately 0.002 – 0.050 %.

Keywords: intraform modification, iron, titanium carbide, tungsten carbide, ceramic particles, protector metal, mechanochemical method, modifier, plasma-chemical method, ultimate strength on tension, self-spreading high-temperature synthesis, grey cast iron, hardness, thermal method, titaniferous magnetite, chromium, zirconium.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-728-734

REFERENCES

1. Saburov V.P., Cherepanov A.N., Zhukov M.F. *Plazmokhimiicheskiy 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. *Uprochneniye metallicheskiikh, polimernykh i elastomernykh materialov ul'tradispersnymi poroshkami plazmokhimiicheskogo 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. 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.).
4. 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.).
5. 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.).
6. 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.).
7. 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.).
8. 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.
9. 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