

Рис. 3. Фазово-химические равновесия в системе Fe – C – O₂ – H₂ в зависимости от $-\lg p_{O_2}$ газовой фазы и температуры:
█ – поверхность углеродоотложения; █ – поверхность перехода FeO в Fe_{Me}; █ – поверхность FeO – Fe₃O₄;
█ – поверхность Fe₃O₄ – Fe₂O₃

фициенте избытка воздуха $\gamma_b < 1$, а необходимый тепловой баланс процесса должен обеспечиваться за счет увеличения расхода топлива.

Выводы. Основные параметры технологических процессов, связанных с окислением, а также восстановлением оксидов железа, для удобства практического применения систематизированы в виде таблиц со значениями кислородных потенциалов газовой фазы в зависимости от состава гомогенной газовой смеси и температуры. Обозначены также исходные и конечные составы газовых смесей, температура начала сажеотложения и количество сажистого углерода, выделяющего-

ся при охлаждении из насыщенной углеродом исходной газовой фазы. На основе собранных данных рекомендованы оптимальные режимы для некоторых технологических процессов, таких как получение шпинелей (тонкодисперсных и крупнокристаллических), упрочняющего и восстановительного обжига рудоугольных окатышей, а также термической обработки металлических изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Филиппов С.И. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 280 с.
- Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. I. Реакции между газообразными и твердыми фазами. – 2-е изд., испр. и дополн. – Свердловск: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 671 с.
- Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
- Теория металлургических процессов: Учебник для вузов / Под ред. Д.И. Рыженкова. – М.: Металлургия, 1989. – 392 с.
- Сурик А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов: Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 568 с.
- Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. 1 – 4 / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1979. – 1982. – 1620 с.
- Якушевич Н.Ф., Чужинова И.В. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. Вып. 20. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. С. 25 – 36.
- Якушевич Н.Ф., Елкин К.С., Чужинова И.В. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. Вып. 21. – Новокузнецк, изд. СибГИУ, 2008. С. 27 – 33.
- Строкина И.В., Якушевич Н.Ф. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 32 – 36.
- Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 13 – 18.

© 2012 г. Н.Ф. Якушевич, И.В. Строкина, О.А. Полях
Поступила 3 октября 2011 г.

УДК 669.14.018.5-176

R. Lazarova¹, P. Kuzmanov¹, R. Dimitrova¹, A. Черепанов², B. Манолов¹

¹ Институт металловедения, сооружения и технологии «Акад. А. Балевски» БАН (София, Болгария)

² Учреждение академии наук Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

СВОЙСТВА СТАЛИ 110Г13Л И ЧУГУНА СЧ 25, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОПОРОШКАМИ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ*

Качество металлоизделий, их механические и эксплуатационные свойства во многом определяются макро- и микроструктурой металла. Поэтому поиск

* Работа проведена при содействии Национального фонда «Научные исследования» Республики Болгария – Проект ТК01/076, интеграционного проекта СО РАН № 12, Россия и гранта РФФИ № 11-08-00814.

эффективных способов управления процессом формирования кристаллической структурой является важной задачей литейного и металлургического производства. В последние годы большое внимание уделяется применению нанопорошков тугоплавких соединений в качестве экзогенных модифицирующих добавок. Было установлено, что введение в расплав специально под-

готовленных нанопорошковых модификаторов в количестве, не превышающем десятых долей процента по массе, позволяет упрочнить матрицу металла и одновременно воздействовать на его кристаллическое строение за счет инокулирующих способностей поверхности частиц [1 – 5]. Эффективность такого воздействия зависит от химического состава наночастиц, используемых для модификации конкретного сплава, концентрации тугоплавкой составляющей композиции, способа ее ввода в расплав, температурного режима обработки сплава.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования свойств модифицированных и не модифицированных образцов из стали и чугуна марок 110Г13Л и СЧ 25 соответственно. Сталь 110Г13Л находит широкое применение при изготовлении быстро изнашиваемых частей (плиты, щеки, била, конуса дробилок различных типоразмеров) дробильного оборудования, на экскаваторах востребованными запчастями являются зубья ковша, гусеничные траки и др. Феррито-перлитный чугун СЧ 25 применяется для деталей, работающих при динамических нагрузках. Это поршни цилиндров, барабаны сцепления, зубчатые колеса и другие отливки. Поэтому повышение износостойкости деталей является весьма актуальной практической задачей. Результаты экспериментов показали, что применение наномодификатора (НМ) приводит к измельчению структуры и к улучшению механических свойств исследованных сплавов.

Выбор модифицирующих добавок осуществляли согласно рекомендациям авторов работ [5 – 7]. В статьях [3, 6, 7] теоретически и экспериментально установлено, что нитрид и карбонитрид титана, обладая металлической проводимостью, являются эффективными инокуляторами для сплавов на основе железа и устойчивыми к растворению в перегретом расплаве стали. Проведенные ранее исследования по модификации износостойкого чугуна нанопорошковыми композициями на основе нитрида титана и оксида иттрия [7] показали существенное повышение износостойкости деталей горнодобывающего оборудования, что и обусловило использование аналогичной композиции для анализа ее воздействия на свойства серого чугуна.

Краткое описание эксперимента

Расплав получали в индукционной печи Laybold Heraeus с вместимостью тигля до 10 кг стали. В зависимости от потребности эксперимента печь может работать под давлением до 8 МПа, а также под вакуумом и при атмосферном давлении. В рассматриваемом случае экспериментальные отливки массой 2 кг отливались в песчаные формы при атмосферном давлении. Форма отливки подбрана так, чтобы имелся тепловой узел, при котором условия кристаллизации менее благоприятны и размер зерен больше. Из отливок были получены экспериментальные образцы для анализа макро- и микроструктуры, а также механических свойств. Во время эксперимента измерялась температура литья с помощью погружаемой Pt – PtRh термопары, а также температура стенки формы во время затвердевания. Отлиты образцы с наномодификатором и без него.

НМ с определенной заранее массой заворачивался в алюминиевую фольгу и вставлялся в контейнер из стальной трубы. Применялось внутривечное модификация, для чего контейнер погружался в тигель с расплавом на время, необходимое для полного расплавления контейнера и гомогенизации порошка в объеме расплава за счет индукционного перемешивания последнего.

Влияние нанопорошка TiN на свойства стали 110Г13Л

Наноразмерный порошок TiN, полученный плазмохимическим синтезом, смешивался с порошком хрома со средним размером частиц 30 мкм в соотношении TiN : Cr = 1 : 2 и подвергался механической обработке (активации) в планетарной мельнице АГО 3.

Отлиты экспериментальные образцы из стали 110Г13Л с химическим составом (здесь и далее по массе): 1,1 – 1,3 % C, 11,5 – 13,5 % Mn, до 0,5 % Si и до 0,06 % P без и с добавлением НМ, содержащего 0,025 % TiN. Макроструктура стали с наномодификатором и без него показана на рис. 1. Хорошо видно измельчение и изменение морфологии кристаллитов в образце с НМ. Вместо столбчатой они приобрели близкую к глобулярной форме. Проведены испытания образцов на износостойкость по стандартной методике, согласно которой основа цилиндрического образца скользит по врачающемуся диску, на котором закреплена абразивная бумага. Образец подвергался соответствующей нагрузке. Результаты исследования показаны на рис. 2. Видно, что оба образца с одинаковым количеством наномодификатора имеют меньшую потерю массы Δm (с некоторым разбросом значений) по сравнению с образцом без НМ при одинаковом числе N циклов. Здесь показана и зависимость динамики износа ΔM от времени, которая также меньше для образцов с НМ по сравнению с



Рис. 1. Макроструктура образцов из стали марки 110Г13Л:
а – без НМ; б – НМ 0,025 % TiN

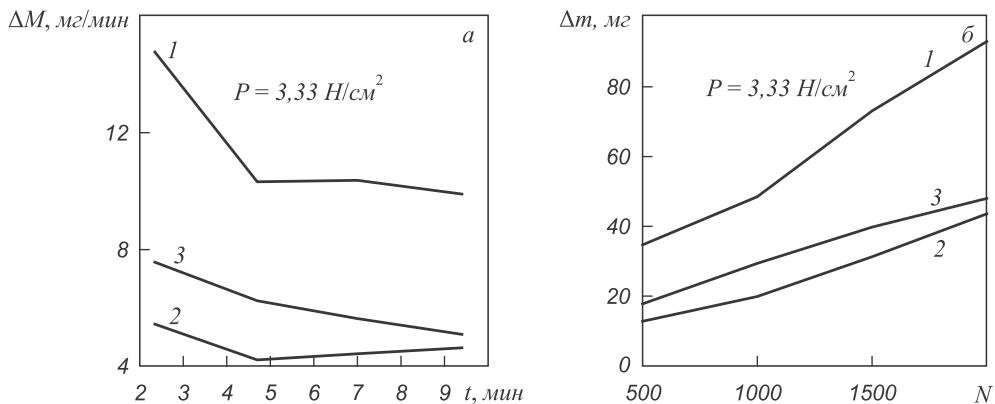


Рис. 2. Зависимости динамики износа ΔM от времени t (а) и потери массы Δm от числа N циклов (б) для образцов из стали 110ГЛ13:
1 – без модификатора; 2 – 0,025 % TiN; 3 – 0,025 % TiCN

образцом без него. По экспериментальным значениям была вычислена износостойкость I стали по формуле

$$I = \rho S L / \Delta m, \quad (1)$$

где ρ и S – плотность и площадь образца; L – длина пути трения.

Результаты расчета представлены ниже:

Образец	Δm , г	$I \cdot 10^{-6}$	Улучшение I , %
1*	0,0930	1,37	0
2	0,0436	2,92	113
3	0,0480	2,66	94

П р и м е ч а н и е. * – образец без добавления НМ.

Из выше представленного следует, что образцы с введенным наномодификатором имеют значение износостойкости существенно выше образцов без НМ. Это увеличение достигает порядка 100 %.

Влияние нанопорошков $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5} + \text{Y}_2\text{O}_3$ на свойства чугуна СЧ 25

Из чугуна с химическим составом 3,33 % C, 1,99 % Si, 0,55 % Mn были отлиты экспериментальные образцы с НМ и без него. Наномодификатор состоял из смеси порошков в соотношении $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5} : \text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Cr} : \text{Fe} = 5 : 3 : 16 : 5$.

Концентрация $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$ изменялась в интервале от 0,015 до 0,04 %. Выполненные металлографические исследования показали, что образцы, модифицированные НМ с $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$ в количестве 0,015 и 0,025 % имеют более мелкие и равномерно распределенные графитовые включения (рис. 3, б, в, г) по сравнению с образцом без $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$ (рис. 3, а). Здесь и далее указывается содержание тугоплавкого соединения $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$, поскольку количество второго соединения (Y_2O_3) легко рассчитать согласно приведенному выше соотношению для компонентов смеси. Механические свойства образцов из чугуна СЧ 25 представлены ниже:

Образец	Содержание TiCN , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
1	Без НПИ	233,5	257,6	0,50
2	0,015	270,6	297,7	0,53
3	0,025	278,5	298,3	0,45
4	0,040	235,2	242,1	0,30

Не трудно видеть, что для образцов с содержанием 0,015 % $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$ предел текучести $\sigma_{0,2}$ и прочность на растяжение σ_b выше, чем у образцов без НМ на 16 и 15 % соответственно. Для чугуна с содержанием 0,025 % $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$ это превышение составляет 19 и 16 %. Дальнейшее увеличение концентрации наномодификатора не приводит к повышению механических свойств сплава, что может быть связано с коагуляцией частиц и снижением инокулирующей способности.

Проведены также исследования износостойкости чугуна в соответствии с описанной выше методикой. На рис. 4 показано сравнение зависимостей потери массы Δm образца от числа N циклов для образца без

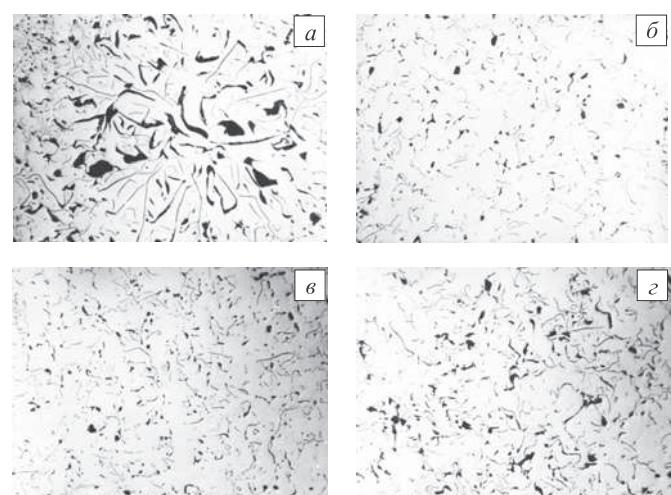


Рис. 3. Микроструктура, $\times 100$, образцов из чугуна марки СЧ 25:
а – без $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$; б – с 0,015 % $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$; в – с 0,025 % $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$;
г – с 0,040 % $\text{TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$

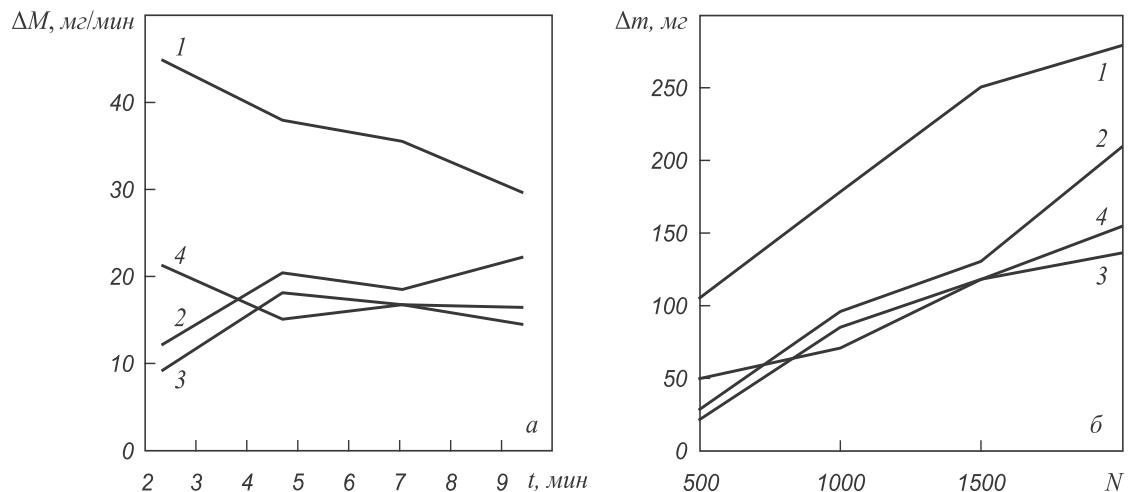


Рис. 4. Зависимости динамики износа ΔM от времени t (а), потери массы Δm от числа N циклов (б) для образцов из чугуна СЧ 25:
1 – без модификатора; 2 – 0,015 % TiCN; 3 – 0,025 % TiCN; 4 – 0,04 % TiCN

НМ и для образцов с содержанием 0,015, 0,025 и 0,04 % $TiC_{0,5}N_{0,5}$. Видно значительное уменьшение величины Δm для наномодифицированных образцов. Подобные результаты (рис. 4) получены и для зависимости динамики износа ΔM от времени. Износостойкость I вычислена по формуле (1) для соответствующих образцов. Результаты расчета представлены ниже:

Образец	$I \cdot 10^{-6}$	Улучшение I , %
1	0,5	–
2	0,6	20
3	1,0	100
4	0,8	60

Из выше представленного следует, что для наномодифицированных образцов величина I выше на 20 – 100 % (в зависимости от концентрации НПИ) по сравнению с образцами без наномодификатора.

Выходы. Проведенные экспериментальные исследования влияния наноразмерных модифицирующих добавок показывают, что введение небольших количеств порошков TiN и $TiC_{0,5}N_{0,5} + Y_2O_3$ в расплав стали и чугуна марок 110Г13Л и СЧ 25 соответственно приводит к измельчению структурных составляющих затвердевшего

металла, изменению их морфологии, и, как следствие, к росту значений механических характеристик и повышению износостойкости модифицированных сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модификации металлов и сплавов / В.П. Сабуров, А.Н. Черепанов, М.Ф. Жуков и др. – Новосибирск: Наука, 1996. – 312 с.
2. Модификация сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / В.П. Сабуров, Е.Н. Еремин, А.Н. Черепанов, Г.Н. Миннеканов. – Омск: изд. ОмГТУ, 2002. – 212 с.
3. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 10, 11.
4. Razavi M., Rahimipour M.R., Zamami A.H. // Science and Engineering: A. Vol. 454, 455. 2007. P. 144 – 147.
5. Бабаскин Ю.З., Овсиенко Д.Е., Ростовская Л.А. и др. // Литейное производство. 1975. № 2. С. 17 – 20.
6. Комшуков В.П., Протопопов Е.В., Черепанов А.Н., Фойгт Д.Б. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 2. С. 22 – 24.
7. Пат. № 2344180 РФ. Способ внепечного модификации чугунов и сталей / В.А. Полубояров, А.Н. Черепанов, З.А. Карагаева, Е.Н. Ушакова // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 2. С. 32.

© 2012 г. Р. Лазарова, П. Кузманов, Р. Димитрова,
А. Черепанов, В. Манолов
Поступила 11 июля 2011 г.