

УДК 669.017

Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко, А. С. Федосенко

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ШИХТЫ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

UDC 669.017

F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko, Z. M. Lovshenko, A. S. Fedosenko

## OPTIMIZING THE MIXTURE COMPOSITION OF MECHANICALLY ALLOYED POWDERS USED FOR GAS-THERMAL COATINGS

### Аннотация

Представлены результаты исследований влияния состава шихты для механического легирования порошков, применяемых при газотермическом нанесении покрытий различного функционального назначения, обладающих высокой износостойкостью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью.

### Ключевые слова:

порошки, композиционные материалы, реакционное механическое легирование, состав, газотермические покрытия, износостойкость, жаропрочность, шихта.

### Abstract

The paper presents research findings on the effects of mixture composition in mechanical alloying of powders used for gas-thermal coatings for various functional applications, which are characterized by high wear, heat and corrosion resistance.

### Key words:

powders, composite materials, reactive mechanical alloying, composition, gas-thermal coatings, wear resistance, heat resistance, mixture.

### Введение

Ряд технически значимых деталей, определяющих долговечность машин и механизмов, работают в условиях интенсивного изнашивания и воздействия различных агрессивных сред. Упрочнение и восстановление их является важной научно-технической задачей. Для этой цели получили широкое применение термическая обработка и нанесение покрытий гальваническими, химическими, химико-термическими методами, а также газотермическим напылением. Последний метод имеет ряд преимуществ экономического и технологического плана: обеспечивает высокую производительность, характеризуется

относительно небольшой трудоемкостью и не вызывает существенной деформации основы; позволяет проводить восстановление и ремонт изношенных деталей различной формы, обрабатывать как всю деталь, так и ее отдельные участки. Газотермические способы обеспечивают получение покрытий, обладающих специальными свойствами – износостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, и позволяют решить ряд проблем машиностроительной отрасли. Из газотермических способов, включающих детонационный, электродуговой, газопламенный, плазменный, два последних отличаются высокой производительностью и хорошим качеством покрытий. Достоинством их

является также возможность регулирования в процессе напыления состава материала и структуры, что позволяет дополнительно повысить физико-механические свойства покрытий.

Для широкого промышленного применения газопламенного и плазменного способов наряду с созданием и внедрением высокопроизводительного автоматизированного оборудования и новых технологических процессов актуальными являются вопросы разработки и освоения низкочастотных, экологически безопасных, высокоэффективных, простых и универсальных технологий производства новых порошковых материалов, обладающих необходимым комплексом физико-механических свойств.

В последнее время для производства композиционных порошков различного состава находят применение реакционное механическое легирование, основанное на обработке шихты, состоящей из дешевых промышленно выпускаемых порошков, в энергонапряженных мельницах – механореакторах, при которой протекают механически активируемые структурные и фазовые превращения, вызывающие формирование материалов с субмикроструктурной структурой основы, характеризующейся высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными включениями механически синтезированных упрочняющих фаз, что обеспечивает высокий упрочняющий эффект, сохраняющийся практически до температуры плавления основы.

Механически легированные порошки независимо от их состава являются композиционными материалами; имеют однородное распределение элементов, нанокристаллический тип структуры с размером зерен основы менее 100 нм, состоящих из субзерен величиной менее 50 нм, стабилизированной дисперсными включениями упрочняющих фаз. Они обладают комплексным упрочнением, сочетающим твердо-

растворное, дисперсионное, зернограничное и дисперсное при решающей роли двух последних, и являются неравновесными системами, в которых наряду с равновесными фазами существуют промежуточные соединения и исходные легирующие компоненты. Фазовый состав порошков достигает равновесного состояния после термического воздействия при температурах выше  $0,5T_{пл. основы}$ . При этом они сохраняют наноразмерный тип структуры, являются жаропрочными, по твердости в интервале температур 20...1000 °С существенно превосходят аналоги и перспективны в качестве материалов для газотермических износостойких покрытий различного функционального назначения.

В работе представлены результаты по оптимизации состава шихты, ряда перспективных композиций на основе железа, обеспечивающих получение порошков для газотермических покрытий различного функционального назначения, являющихся износостойкими и жаропрочными.

### *Методика исследования*

Получение порошковых материалов основывалось на оптимальных значениях технологических параметров процесса механического легирования в энергонапряженной вибромельнице, обеспечивающих максимальную твердость композиционных порошков для конструкционных материалов [1] и газотермических покрытий. Независимо от состава они находятся в пределах: ускорение рабочих тел – 135...145 м·с<sup>-2</sup>; отношение объемов рабочих тел и шихты – 10...12; степень заполнения полевой камеры рабочими телами – 75...80 %; время обработки в механореакторе – 8...10 ч.

Нанесение покрытий осуществлялось на следующих режимах: сила тока – 240...250 А; напряжение – 190...200 В; мощность – 45...49 кВт; дистанция напыления – 250...300 мм; диаметр трубки –

3,1...3,3 мм; расстояние от среза сопла до выходного отверстия – 4...5 мм.

В качестве параметров, определяющих оптимальный состав шихты для механически легированных порошков, выбраны твердость HV и относительная износостойкость  $I_{отн}$  покрытий, полученных из них. Оптимизация проходила в два этапа. На первом этапе методом однофакторного эксперимента определялось оптимальное содержание легирующих компонентов в исходной шихте, на втором – с применением центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка математически описывалась область оптимума. При этом результаты первого этапа исследования использовались для установления граничных значений факторов. Определение фазового состава и структуры покрытий, полученных из порошков оптимального состава, проводилось с применением стандартных

методик рентгеноструктурного, металлографического и электронно-микроскопического анализа.

Базовые композиции на основе железа представляли собой системы порошков: 1) «Fe–Al» (ЖА); 2) «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» (ЖА–ДУ); 3) «Fe–Cr–C» (Х6); 4) «Fe–Cr–Ni–Al–MoO<sub>3</sub>» (15X18H10Т–ДУ); 5) «Fe–Cr–Ni» (15X2Н4). Предполагалось, что они обеспечат получение композиционных порошков для газотермических износостойких жаропрочных покрытий следующего функционального назначения: для упрочнения инструмента и конструкционных изделий, работающих при больших нагрузках в условиях интенсивного износа (Х6, ЖА, ЖА–ДУ); коррозионно-стойких (15X18H10Т–ДУ, ЖА, ЖА–ДУ); для восстановления конструкционных изделий общего назначения (15X2Н4). Состав базовых композиций и их обозначение (марка) соответствуют приведенным в табл. 1.

Табл. 1. Состав исследуемых композиций

Содержание компонентов, %	Химический состав, %	Аналог
26 % БЧ; 20 % ПХ30; Ж2М2 (ост.)	1 % С, 6 % Cr, 0,45 % О, Fe (ост.)	Х6
6,6 % ПХ30; 4 % ПНК-ОНТ2; ПЖ2М2 (ост.)	0,15 % С; 0,45 % О; 2 % Cr, 4 % Ni, Fe (ост.)	15X2Н4
59 % ПХ30; 10 % ПНК-ОНТ2; 0,5 % Ti; 1% ПА4; 1,4 % МоО <sub>3</sub> ; ПЖ2М2 (ост.)	0,15 % С; 0,9 % О; 18 % Cr; 10 % Ni; 0,9 % Мо; 1 % Al; Fe (ост.)	15X18H10-ДУ
30 % ПА4; 0,3 % C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH; ПЖ2М2 (ост.)	0,4 % С; 0,45 % О; 30 % Al; Fe (ост.)	ЖА
30 % ПА4; 0,3 % C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH; 7,8 %; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; ПЖ2М2 (ост.)	0,4 % С; 2,8 % О; 30 % Al; Fe (ост.)	ЖА–ДУ

Следует отметить, что законченные и систематизированные результаты исследований, направленные на создание технологии производства, установление закономерностей формирования фазового состава структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе нижеприведенных систем и получение газотермических покрытий из них, кроме сведений, представленных в [1–5], отсутствуют.

При определении влияния на параметры оптимизации содержания в исходной шихте легирующих компонентов независимыми переменными являлись: 1) «Fe–Al» – алюминий и стеариновая кислота; 2) «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» – алюминий и оксид железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 3) «Fe–Cr–C» – ПХ30 и белый чугун; 4) «Fe–Cr–Ni–Al–MoO<sub>3</sub>» – алюминий и оксид молибдена (MoO<sub>3</sub>); 5) «Fe–Cr–Ni–C» (15X2Н4) – хром и углерод. Результаты исследования представлены на рис. 1...5.

### Результаты исследований

В системах «Fe–Al» и «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» (см. рис. 1 и 2) возрастание износостойкости покрытий с повышением содержания в исходной шихте алюминия и стеариновой кислоты обусловлено увеличением в структуре количества интерметаллидов Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, а также мартенсита и степени его пересыщения. В компози-

ции «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» имеет место дополнительное упрочнение наноразмерными включениями оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, образующимися в результате механически и термически активируемых окислительно-восстановительных реакций между алюминием и оксидом железа, протекающих при получении композиционных порошков и нанесении покрытий из них.

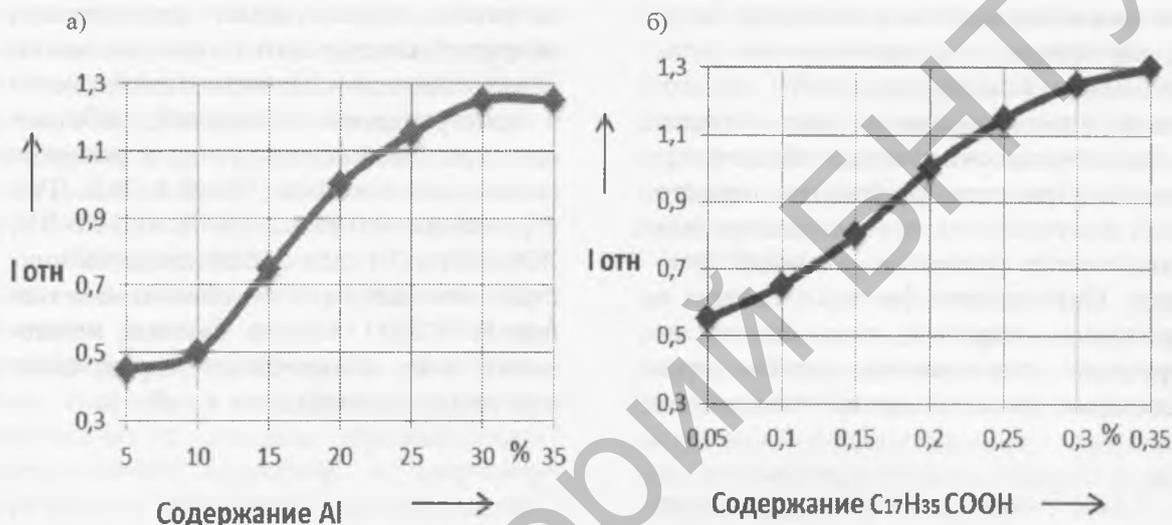


Рис. 1. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и стеариновой кислоты (б) на относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Al»: а – 0,20 % C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH; б – 20 % Al

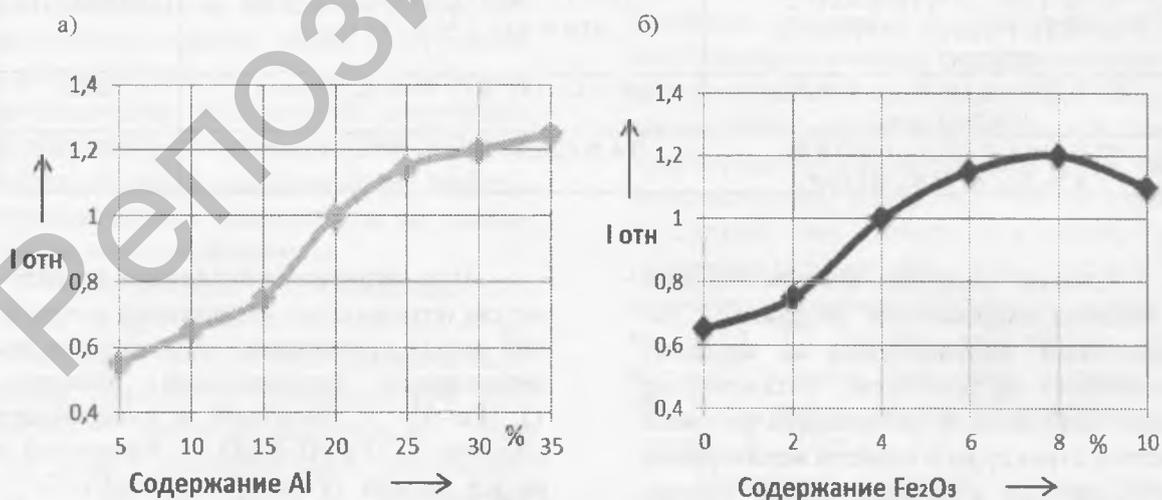


Рис. 2. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и оксида железа (б) на относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>»: а – 4 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; б – 20 % Al

В системе «Fe–Cr–C» увеличение в исходной шихте количества белого чугуна и железохромового сплава ПХ30 (поставщиков углерода и хрома), соответственно, приводит к росту твердости и износостойкости покрытий, получаемых из механически легированных композиционных порошков (см. рис. 3). Это обусловлено повышением концентрации углерода и хрома в мартенсите, являющегося основой структуры покрытия, и увеличением содержания в ней наноразмерных включений синтезированных в процессе реализации технологии карбидов хрома, вызывающих дисперсное упрочнение.

Увеличение содержания алюминия и оксида молибдена в исходной шихте при производстве порошков системы «Fe–Cr–Ni–Al–MoO<sub>3</sub>» для напыления коррозионно-стойкого жаропрочного покрытия типа 15X18Н10-ДУ приводит к росту его твердости и относи-

тельной износостойкости (см. рис. 4). Это объясняется тем, что в процессе реакционного механического легирования и последующего плазменного напыления покрытия происходит механически и термически активируемое взаимодействие между компонентами шихты, приводящее к образованию наноразмерных фаз, например, оксида алюминия, способных эффективно упрочнять и стабилизировать структуру материала, препятствуя протеканию рекристаллизационных процессов.

Повышение содержания углерода и хрома в исходной шихте при изготовлении механически легированных порошков для напыления конструктивных покрытий системы «Fe–Cr–Ni–C» (15X2Н4) приводит к увеличению их твердости и относительной износостойкости (см. рис. 5), обусловленному ростом количества карбидов и мартенсита и степени легированности последнего.

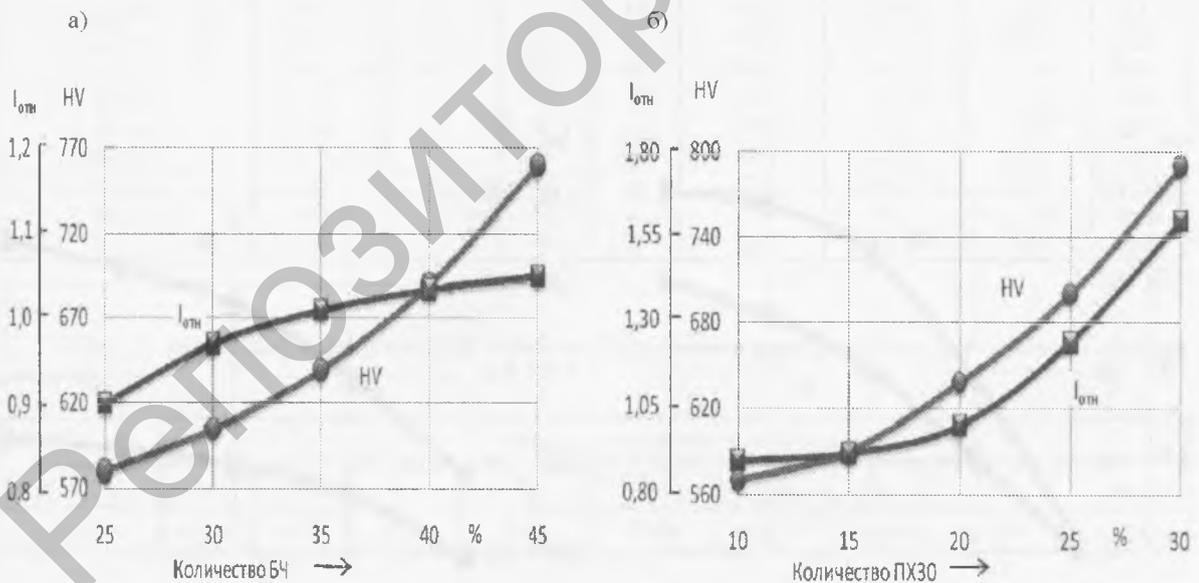


Рис. 3. Влияние содержания в шихте порошков белого чугуна (БЧ) (а) и железохромового сплава ПХ30 (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe–Cr–C»: а – 20 % ПХ30; б – 35 % белого чугуна

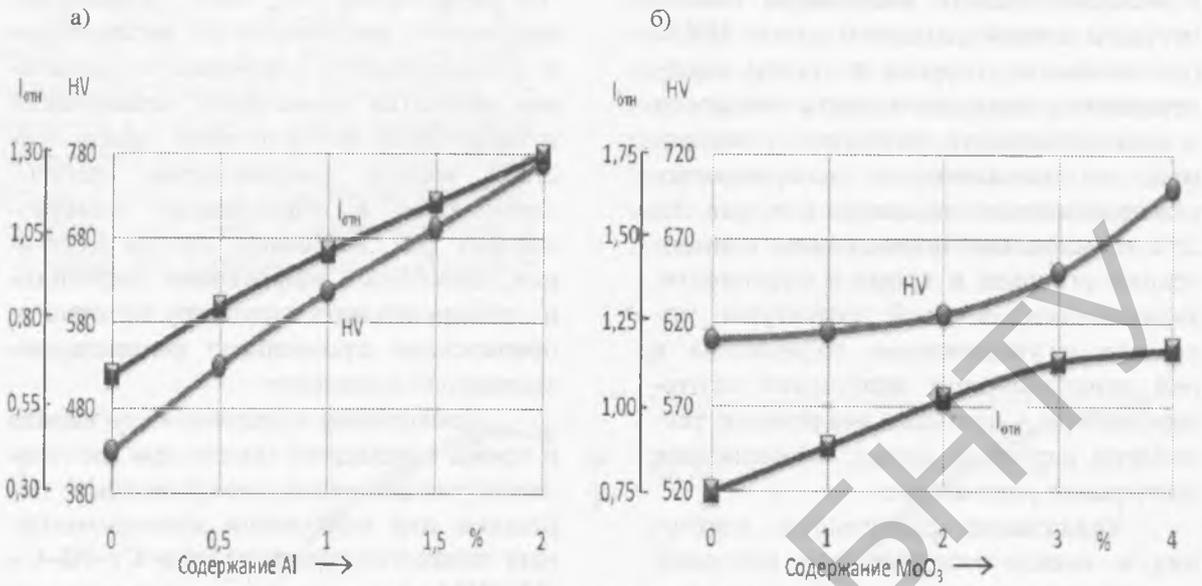


Рис. 4. Влияние содержания в шихте алюминия (а) и  $MoO_3$  (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe-Cr-Ni-Al- $MoO_3$ »: а – 2 %  $MoO_3$ ; б – 1 % алюминия

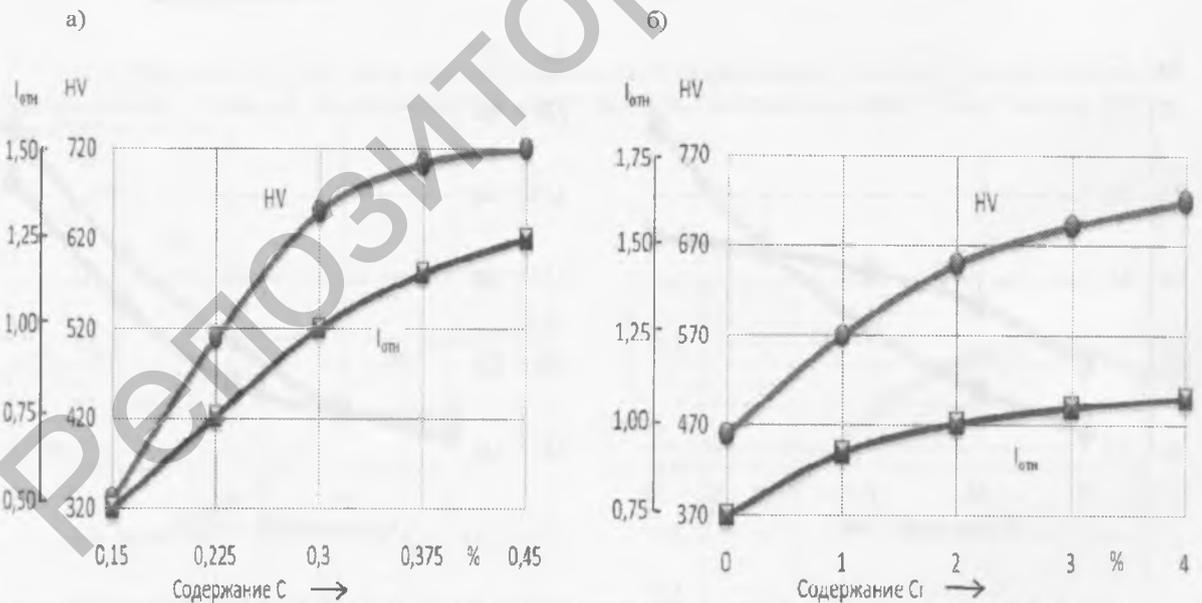


Рис. 5. Влияние содержания в шихте углерода (а) и хрома (б) на твердость и относительную износостойкость покрытий из механически легированных порошков системы «Fe-Cr-Ni-C»: а – 2 % Cr; б – 0,3 % C

**Описание области оптимума состава шихты для механически легированных порошков на основе железа**

Описание области оптимума направлено на установление совместного влияния компонентов шихты на свойства покрытий. Для решения этой задачи реализован центральный композиционный ортогональный план второго порядка.

**Композиции «Fe-Al», «Fe-Al-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>».** В системе «Fe-Al» независимым фактором являлось содержание в исходной шихте алюминия ( $X_1$ ) и стеариновой кислоты ( $x_2$ ); в системе «Fe-Al-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» – алюминия ( $x_1$ ) и оксида железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $x_2$ ). Матрицы планирования, результаты экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума для системы приведены в табл. 2...5.

Табл. 2. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава механически легированных порошков системы «Fe-Al» из шихты «ПЖ2М2-ПА4-ПАВ»

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Параметр оптимизации	
		основной		производный			Относительная износостойкость	
		Al, %	ПАВ, %	$x_1 x_2$	$x_1 - x_1^2 - 2/3$	$x_2^1 - x_2^2 - 2/3$		
Основной уровень Интервал варьирования (I) Верхний уровень Нижний уровень		20 10 30 10	0,20 0,10 0,30 0,10					
Код	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1 - x_1^2 - 2/3$	$x_2^1 - x_2^2 - 2/3$	эксперимент.	расчет.
Опыты								
1(10)	+1	-1	1	+1	+1/3	+1/3	0,35	0,32
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	0,65	0,66
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1,45	1,50
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	0,80	0,80
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1,25	1,21
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	0,50	0,55
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1,25	1,21
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	0,65	0,69
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1,00	1,01

Табл. 3. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	$b_0'$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$\Delta b_0'$	$\Delta b_0$
$I_{отн}$	0,88	1,01	0,33	0,26	0,09	-0,13	-0,06	$\pm 0,023$	$\pm 0,1$

Продолжение табл. 3

Параметр	Результат статистической обработки								
	$\Delta b_i$	$\Delta b_{ij}$	$\Delta b_{ii}$	$S_y^2$	$S_{ан}^2$	$f_1$	$f_2$	$F_{0,05}^{расч}$	$F_{0,05}^{табл}$
$I_{отн}$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	0,0026	0,0024	9	3	1,0	3,9

Табл. 4. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава механически легированных порошков системы «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» из шихты «ПЖ2М2–ПА4–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0,30 % ПАВ»

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Параметр оптимизации	
		основной		производный			Относительная износостойкость	
		Al, %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %					
Основной уровень		20	4					
Интервал варьирования (I)		10	4					
Верхний уровень		30	8					
Нижний уровень		10	0					
Код	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup> =x <sub>1</sub> <sup>2</sup> -2/3	x <sub>2</sub> <sup>2</sup> =x <sub>2</sub> <sup>2</sup> -2/3	эксперимент.	расчет.
Опыты								
1(10)	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	0,45	0,43
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	0,95	0,97
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1,35	1,35
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	0,75	0,81
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1,20	1,18
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	0,80	0,85
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1,20	1,19
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	0,65	0,65
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1,00	1,02

Табл. 5. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	b <sub>0</sub> '	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>22</sub>	Δb <sub>0</sub> '	Δb <sub>0</sub>
I <sub>отн</sub>	0,93	1,02	0,19	0,27	0,01	-0,03	-0,10	±0,03	± 0,11

Продолжение табл. 5

Параметр	Результат статистической обработки									
	Δb <sub>i</sub>	Δb <sub>ij</sub>	Δb <sub>ii</sub>	S <sub>y</sub> <sup>2</sup>	S <sub>дел</sub> <sup>2</sup>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	F <sub>0,05</sub> <sup>расч</sup>	F <sub>0,05</sub> <sup>табл</sup>	
I <sub>отн</sub>	± 0,03	± 0,04	± 0,06	0,0030	0,0021	9	5	0,7	5,2	

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов. Установленные зависимости имеют следующий вид:

– система «Fe–Al»

$$I_{отн} = 1,01 + 0,33 x_1 + 0,26 x_2 + 0,09 x_1 x_2 - 0,13 x_1^2 - 0,06 x_2^2; \quad (1)$$

– система «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>»

$$I_{отн} = 1,02 + 0,19 x_1 + 0,27 x_2 - 0,10 x_2^2. \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 6.

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что в исследованном интервале изменения факторов наибольшую износостойкость имеют покрытия из механически легированных композиций, полученных из шихты с максимальным содержанием легирующих компонентов. Дополнительно проведенные исследования показали, что дальнейшее увеличение их содержания создает технологические проблемы как на стадии производства порошка, так и при нанесении покрытия.

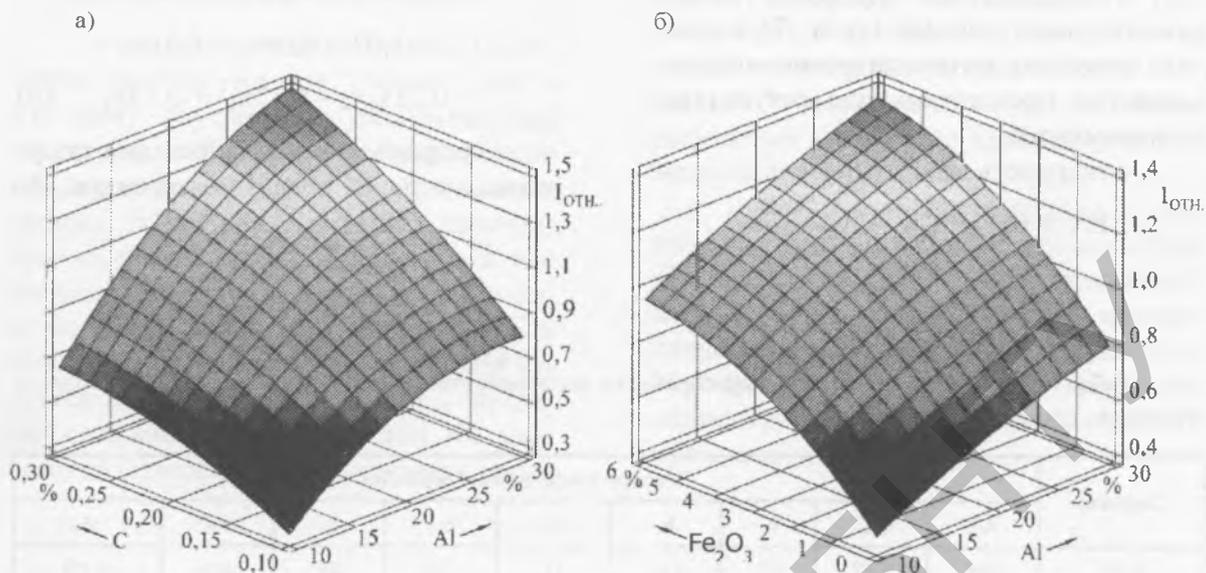


Рис. 6. Зависимость относительной износостойкости покрытий из механически легированных композиций систем «Fe–Al» (а) и «Fe–Al–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» (б) от содержания легирующих компонентов в исходной шихте

**Композиция «Fe–Cr–C».** Матрица планирования и результаты эксперимента для покрытия, полученного из порошка системы «Fe–белый чугун–

ПХ30», приведены в табл. 6. В роли факторов выступало количество белого чугуна и порошка ПХ30, вводимых в исходную шихту.

Табл. 6. Матрица планирования и результаты эксперимента при оптимизации состава покрытий из механически легированных композиций системы «Fe–белый чугун–ПХ30»

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Параметр оптимизации			
		основной		производный			Твердость HV		Относительная износостойкость	
Основной уровень		БЧ, %	ПХ30, %							
Интервал варьирования (I)		10	10							
Верхний уровень		45	30							
Нижний уровень		25	10							
Код	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	$x = x_1^2 - 2/3$	$x_2 = x_2^2 - 2/3$	HV <sub>экп.</sub>	HV <sub>расч.</sub>	эксперимент.	расчет.
Опыты										
1(10)	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	520	517	0,46	0,46
2(11)	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	740	737	1,45	1,50
3(12)	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	910	911	1,25	1,24
4(13)	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	690	691	1,10	1,08
5(14)	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	760	757	1,05	1,03
6(15)	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	580	583	0,95	0,85
7(16)	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	790	791	1,60	1,50
8(17)	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	570	571	0,90	0,90
9(18)	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	640	637	1,00	1,07

Статистическая обработка экспериментальных данных (табл. 7) позволила получить математические модели, адекватно представляющие результаты экспериментов:

– твердость покрытия

$$HV = 637 + 87x_1 + 110x_2 + 33x_1^2 + 44x_2^2; \quad (3)$$

– относительная износостойкость

$$I_{отн} = 1,07 + 0,09x_1 + 0,31x_2 - 0,21x_1x_2 - 0,13x_1^2 + 0,13x_2^2. \quad (4)$$

Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 7.

Табл. 7. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума

Параметр	Результат статистической обработки								
	$b_0'$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$\Delta b_0'$	$\Delta b_0$
HV	688	637	87	110	0	33	44	$\pm 5$	$\pm 19$
$I_{отн}$	1,07	1,07	0,09	0,31	-0,21	-0,13	0,13	-	$\pm 0,05$

Продолжение табл. 7

Параметр	Результат статистической обработки									
	$\Delta b_i$	$\Delta b_{ij}$	$\Delta b_{ii}$	$S_y^2$	$S_{ал}^2$	$f_1$	$f_2$	$F_{0,05}^{расч}$	$F_{0,05}^{табл}$	
HV	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 11$	91	25	9	4	0,27	-	
$I_{отн}$	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$	$\pm 0,10$	0,0089	0,0190	9	3	2,1	3,9	

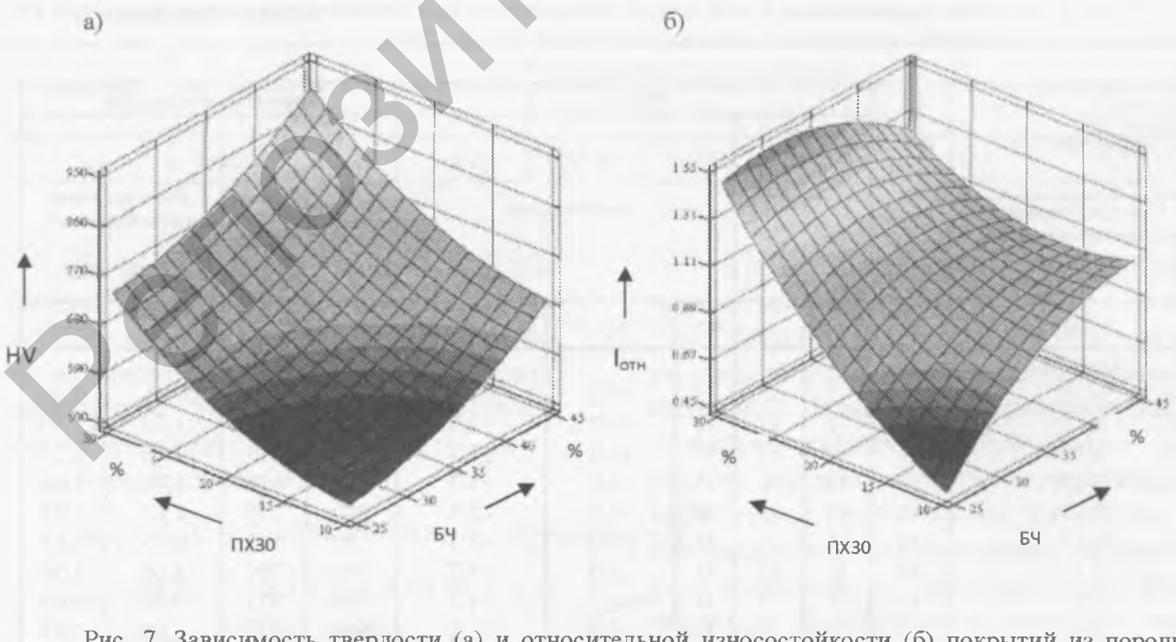


Рис. 7. Зависимость твердости (а) и относительной износостойкости (б) покрытий из порошка типа Х6 от количества белого чугуна и порошка ПХ30 в исходной шихте

## Выводы

1. Существенное увеличение стойкости против износа (более чем в 1,6 раза) обусловлено особенностями структуры и фазового состава покрытий, определяющими их свойства; независимо от состава покрытия, полученные из механически легированных порошков, наследуют суб/микроструктурный тип структуры последних. Основой покрытий типов Х6 и 15Х2Н4 является мартенсит, Х18Н10 ДУ – аустенит с включениями мартенсита. Фазами, стабилизирующими и упрочняющими

основу, имеющую высокоразвитую границу зерен и субзерен, служат синтезированные в процессе производства порошков и напыления покрытия, наноразмерные включения карбидов, интерметаллидов и оксидов.

2. Разработанные покрытия имеют комплексное упрочнение, сочетающее твердорастворное, зернограничное, дисперсионное и дисперсное и определяющее их высокую износостойкость и жаропрочность в широком интервале температур, верхнее значение которых превышает  $0,7 T_{пл\text{ основы}}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко . – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
2. **Ловшенко, Ф. Г.** Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе системы «железо-алюминий» и покрытий из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 36–49.
3. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные механически легированные наноструктурные порошки на основе железа для газотермического напыления покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 сент. 2010 г. : в 3 кн. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2010. – Кн. 1. – С. 153–166.
4. **Ловшенко, Ф. Г.** Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных стальных порошков и газопламенных покрытий из них / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко // Композиционные материалы в промышленности : материалы 31-й Междунар. конф., 6–10 июня. – Ялта, 2011. – С. 191–195.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация состава композиционных механически легированных наноструктурных порошков на основе железа для газотермического напыления покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко // Композиционные материалы в промышленности : материалы 30-й Юбилейной междунар. конф., 7–11 июня. – Ялта, 2010. – С. 344–349.

*Статья сдана в редакцию 27 марта 2013 года*

**Федор Григорьевич Ловшенко**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-25-21-26.

**Григорий Федорович Ловшенко**, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

**Зинаида Михайловна Ловшенко**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Алексей Сергеевич Федосенко**, лаборант, Белорусско-Российский университет.

**Fedor Grigoryevich Lovshenko**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-25-21-26.

**Grigory Fedorovich Lovshenko**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: Greg-lovshenko@mail.ru.

**Zinaida Mikhailovna Lovshenko**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Aleksey Sergeevich Fedosenko**, laboratory assistant, Belarusian-Russian University.