

УДК 544.2:544-971;544.344;669

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ**

© 2020 г. А. С. Криворогова<sup>а</sup>, Н. И. Ильиных<sup>б, с, \*</sup>,  
С. А. Ильиных<sup>б</sup>, Б. Р. Гельчинский<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

<sup>б</sup>Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>с</sup>Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики”, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: ninail@bk.ru

Поступила в редакцию 18.06.2019 г.

После доработки 02.07.2019 г.

Принята к публикации 21.08.2019 г.

Представленная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию самофлюсующихся материалов на основе никеля: Ni–0.5C–15Cr–3.2Si–2B (ПГСР-2) и Ni–1C–17Cr–4.1Si–3.6B (ПГСР-4). Данные материалы широко применяются для получения износостойких покрытий на различные детали машин и механизмов, которые наносятся газопламенным напылением, плазменным напылением и наплавкой. Исследование закономерностей взаимосвязи структуры и свойств покрытий с основными технологическими параметрами представляет интерес для решения как прикладных, так и теоретических задач. Кроме этого, для проектирования и оптимизации процессов нанесения газотермических покрытий необходимы сведения о структуре жидких сплавов, так как термическая обработка расплава может сильно влиять на свойства затвердевших материалов. Одним из эффективных направлений решения этой проблемы является применение методов компьютерного моделирования. Проведено термодинамическое моделирование равновесного состава указанных выше самофлюсующихся материалов. Показано, что при равновесном нагревании ПГСР-2 и ПГСР-4 в конденсированной фазе возможно образование Ni, Cr, C, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB, Ni<sub>2</sub>Si, NiSi, CrB, CrSi. Кроме этого, при нагревании ПГСР-4 в конденсированной фазе, наряду с указанными выше компонентами, образуются соединения Cr<sub>5</sub>V<sub>3</sub>, CrV<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Экспериментально исследованы микротвердость и микроструктура покрытий, полученных методом плазменного напыления. Показано, что покрытие ПГСР-2 характеризуется наличием пористости по всей толщине, поры имеют неправильную форму и размеры от нескольких микрон до 100 мкм, а покрытие из порошка ПГСР-4 характеризуется высокой плотностью, низкой пористостью, ровной границей с подложкой. Микротвердость покрытия ПГСР-4 существенно выше, чем у покрытия ПГСР-2, а уровень микротвердости обоих покрытий, в среднем, в 3.0–4.0 раза превышает микротвердость основы.

*Ключевые слова:* термодинамическое моделирование, состав, покрытие, никель, самофлюсующийся материал, микроструктура, микротвердость

DOI: 10.31857/S0235010620010053

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время производство машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях, невозможно без использования газотермических покрытий, наноси-

мых с целью экономии высоколегированных материалов, упрочнения поверхностей и придания им особых свойств для защиты от воздействия высоких температур, термоэрозионного и абразивного износа, а также при восстановлении геометрических размеров поверхностей изношенных деталей [1–7].

В качестве материалов для нанесения газотермических покрытий используются самофлюсующиеся сплавы [6, 7], которые имеют относительно низкие температуры плавления и, как правило, требуют термообработки после распыления. Разработаны сплавы на основе никеля или кобальта, которые используют бор, фосфор или кремний, по отдельности или в комбинации, в качестве депрессантов температуры плавления и флюсующих агентов [6].

Для проектирования и оптимизации процессов нанесения газотермических покрытий необходимо усовершенствовать наши представления о структуре жидких сплавов, так как термическая обработка расплава может сильно влиять на свойства затвердевших материалов [8–11].

Исследование закономерностей взаимосвязи структуры и свойств покрытий с основными параметрами процесса, характеризующими качество покрытий, представляет собой сложную и многогранную задачу. Одним из эффективных направлений решения этой проблемы является применение методов компьютерного моделирования, при которых возможно получение максимального объема информации об изучаемом процессе при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований.

Уникальные свойства газотермических покрытий (механические, электрические, теплофизические, оптические и другие) определяются условиями их формирования [1–7].

В настоящее время существуют различные способы нанесения покрытий: лазерная наплавка, газопламенное напыление проволокой или стержнями, газопламенное напыление порошком, газопламенное напыление пластиков, сверхзвуковое газопламенное напыление, детонационное напыление, плазменное напыление, электродуговая металлизация, холодное напыление. Общим для всех этих способов является наличие диспергированного напыляемого материала, ускоряемого газовой струей. При большинстве способов нанесения покрытий частицы напыляемого материала размером 5–200 мкм, находясь в расплавленном состоянии, со скоростью 50–1000 м/с ударяются о практически холодную напыляемую поверхность (подложку). Происходит расплющивание этих частиц и, иногда, частичное разбрызгивание. При этом они резко охлаждаются, формируя расплющенную частицу с кристаллической или аморфной структурой. Эти частицы наслаиваются друг на друга, образуя чешуйчатую структуру покрытия. Чешуйки отделены друг от друга оксидной пленкой, которая в ряде случаев образует керамический каркас покрытия. Таким образом, формирование покрытия происходит путем постепенного наложения отдельных, дискретно твердеющих с высокой скоростью частиц друг на друга в слоях и последовательного послойного формирования всего материала. Частицы, формирующие покрытие, имеют различную температуру, скорость и находятся в различных агрегатных состояниях. Поэтому напыленное покрытие характеризуется высокой степенью неоднородности, слоистым характером и высокой открытой пористостью, что обусловлено, помимо дискретного характера массопереноса, еще и спецификой процесса, заключающейся в быстротекающей ( $10^{-3}$ – $10^{-5}$  с) высокотемпературной (5000–15000 К) обработке частиц материала и их последующим высокоскоростным (100–300 м/с) соударением с поверхностью основы. Существенные изменения происходят в ряде случаев с химическим составом материала вследствие взаимодействия частиц с газами окружающей атмосферы и плазмой, а также их термической обработкой во время нагрева. Кристаллическая структура частиц, слагающих покрытие, определяется как явлениями, про-

**Таблица 1.** Оптимальный технологический режим плазменного напыления покрытий

№	Технологический параметр	Размерность	Величина показателей	
			подслой	покрытие
1	Напряжение на дуге	В	160–165	165–175
2	Сила тока на дуге	А	150–160	1750–1800
3	Давление плазмообразующего газа	кгс/см	4–5	4–5
4	Расход воздуха	л/мин	45–50	50–66.7
5	Дистанция напыления	мм	150–200	150–200
6	Скорость вращения детали	об./мин	90–120	90–120
7	Подача плазмотрона	мм/об.	2–6	2–6
8	Грануляция порошка	мкм	63–100	63–100
9	Расход охлаждающей воды	л/мин	8–10	8–10
10	Давление охлаждающей воды	кгс/см	4–6	4–6
12	Толщина слоя за один проход плазмотрона	мкм	20–40	30–50
13	Расход транспортирующего газа	л/мин	3–4	3–4
14	Угол наклона	град	90	90

текающими в плазме при их нагреве и ускорении, так и процессами взаимодействия с основой.

Целью настоящей работы является исследование свойств самофлюсующихся сплавов Ni–0.5C–15Cr–3.2Si–2B и Ni–1C–17Cr–4.1Si–3.6B, а также покрытий на их основе, полученных методом плазменного напыления.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Компьютерный эксперимент проведен с использованием методики термодинамического моделирования [12–15]. В качестве программного обеспечения для моделирования фазового и химического равновесия использовался программный комплекс TERRA [12–14].

Для нанесения покрытий использовалась установка плазменного напыления 15-ВВ-02 (КИЕВ-7) (ПН). При выборе режимов напыления учитывался ряд факторов, оказывающих влияние на структуру и свойства плазменных покрытий (скорость и температура напыляемых частиц, дистанция напыления, фракция применяемого порошка, состав и расход плазмообразующих газов и др.). Разработан оптимальный режим напыления, параметры которого представлены в табл. 1. В качестве материала подложки для напыления использован дюралюминий, так как ряд деталей авиационной, бытовой и другой техники изготавливается именно из этого материала.

Исследования микротвердости и структуры покрытия проводились на поперечном металлографическом шлифе. Микротвердость измеряли по стандартной методике микротвердомером ПМТ-3, оснащенным монитором и цифровой видеокамерой. Ис-

следование микроструктуры напыленной струей плазмы поверхности проводилось посредством компьютерного металлографического анализа с использованием системы анализа изображения "SIAMS-600".

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *а) Термодинамическое моделирование состава и равновесных характеристик сплавов системы Ni–C–Cr–Si–B*

Моделирование выполнено в интервале температур 300–3000 К при общем давлении  $P = 10^5$  Па в атмосфере аргона. Исходный состав моделируемых систем соответствовал составу порошковых самофлюсующихся материалов на основе никеля (мас. %): ПГСП-2 (Ni – 79.3, C – 0.5, Cr – 15, Si – 3.2, B – 2) и ПГСП-4 (Ni – 74.3, C – 1, Cr – 17, Si – 4.1, B – 3.6). Содержание аргона для обеих систем составляло 1 мас. %.

При моделировании учитывались следующие элементы, ионы и соединения: *газообразные*: Ag, электронный газ  $e^-$ , Ni, C, Cr, Si, B,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $Si_2$ ,  $Si_3$ , SiC,  $Si_2C$ ,  $SiC_2$ ,  $Si_2C_2$ ,  $Si_3C$ ,  $B_2$ , BC,  $B_2C$ ,  $BC_2$ ,  $Cr_2$ ,  $CrC_2$ ; *конденсированные*: Ni, C, Cr, Si, B,  $Ni_3C$ , NiB,  $Ni_3B$ ,  $Ni_2B$ ,  $Ni_4B_3$ , NiSi,  $NiSi_2$ ,  $Ni_2Si$ ,  $Ni_7Si_{13}$ , SiC,  $SiB_{14}$ ,  $B_4Si$ ,  $B_6Si$ ,  $B_4C$ , CrB,  $CrB_2$ ,  $Cr_3B_4$ ,  $Cr_5B_3$ ,  $Cr_3C_2$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$ , CrSi,  $CrSi_2$ ,  $Cr_3Si$ ,  $Cr_5Si_3$ .

Информация о свойствах некоторых компонентов была взята из базы данных TERA.PROPS и из литературы [15–20]. Однако, следует отметить, что в доступной литературе сведения о термодинамических свойствах ряда бинарных соединений в конденсированном состоянии (твердом и жидком) отсутствуют, а иногда и противоречивы. Поэтому, с использованием различных расчетных методов (см., например, [21–23]), в настоящей работе были рассчитаны термодинамические свойства (стандартные энтальпии и энтропии образования, температурные зависимости теплоемкостей).

Рассчитаны температурные зависимости равновесного состава и термодинамических характеристик (энтальпия, энтропия и энергия Гиббса) сплавов ПГСП-2 и ПГСП-4. Показано, температурные зависимости термодинамических характеристик исследованных систем не являются монотонными, а имеют изломы, которые можно объяснить фазовыми превращениями.

На рис. 1 представлены температурные зависимости содержания компонентов сплавов ПГСП-2 (а) и ПГСП-4 (б). Как видно из рис. 1а, в конденсированной фазе, образующейся при нагревании ПГСП-2, возможно существование Ni, Cr, C,  $Ni_3B$ ,  $Ni_2B$ , NiB,  $Ni_2Si$ , NiSi, CrB, CrSi. Из рис. 1б видно, что при нагревании ПГСП-4 в конденсированной фазе, наряду с казанными выше компонентами, образуются соединения  $Cr_5B_3$ ,  $CrB_2$ ,  $Cr_3C_2$ . Содержание других компонентов незначительно.

### *б) Микроструктура покрытий*

Важнейшей особенностью структуры покрытий, получаемых при плазменном напылении, является высокая степень дисперсности, которая определяет комплекс эксплуатационных характеристик.

На рис. 2 представлена микроструктура покрытия ПГСП-2. Покрытие характеризуется наличием пористости по всей толщине, поры имеют неправильную форму и размеры от нескольких микрон до 100 мкм. Участок покрытия на границе с подложкой характеризуется более равномерной структурой.

На рис. 3 представлена микроструктура покрытия ПГСП-4. Покрытие из стандартного Ni–Cr–B–Si порошка характеризуется высокой плотностью, низкой пористостью, ровной границей с подложкой. Поры малы и расположены далеко друг от друга. Встречаются также очень маленькие по размерам поры, образованные, по-видимому,

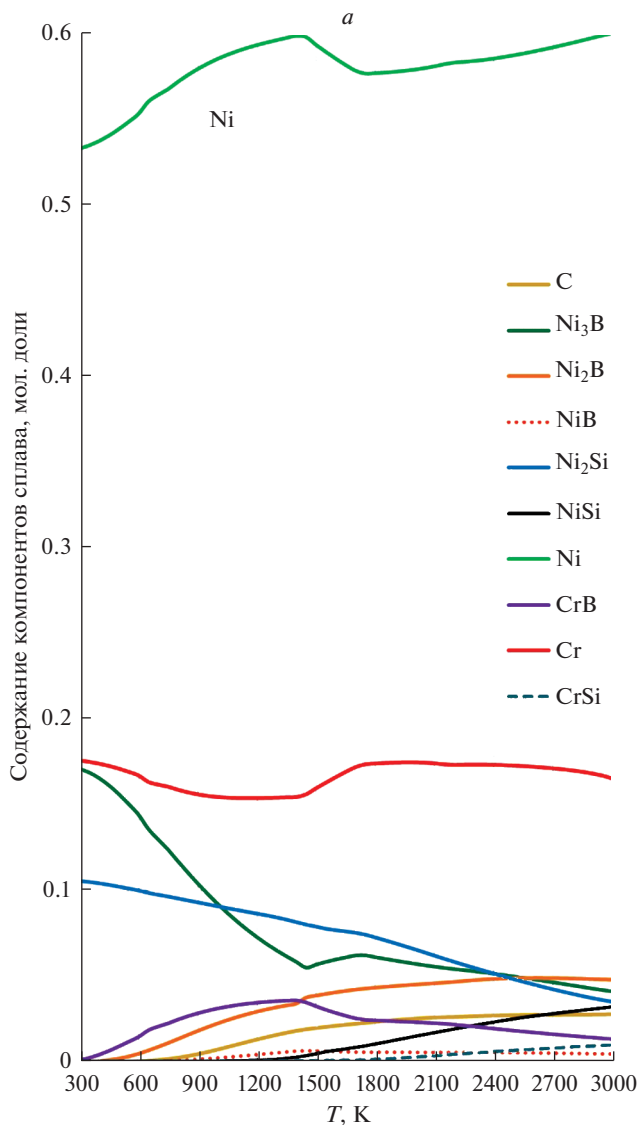


Рис. 1. Температурные зависимости содержания компонентов сплава (а) ПГСП-2, (б) ПГСП-4.

в результате дегазации расплавленного материала частиц при их кристаллизации. Оксидные пленки тонкие, но расположены вдоль границ раздела “основа—покрытие” достаточно близко друг к другу, что свидетельствует о выгорании частиц порошка.

#### в) Микротвердость покрытий

Измерение микротвердости относится к микромеханическим испытаниям, которые были разработаны для металлографических исследований свойств отдельных структурных составляющих сплавов. Прибор для определения микротвердости обеспечивает возможность выбора участка микроструктуры, где будет произведено вдавли-

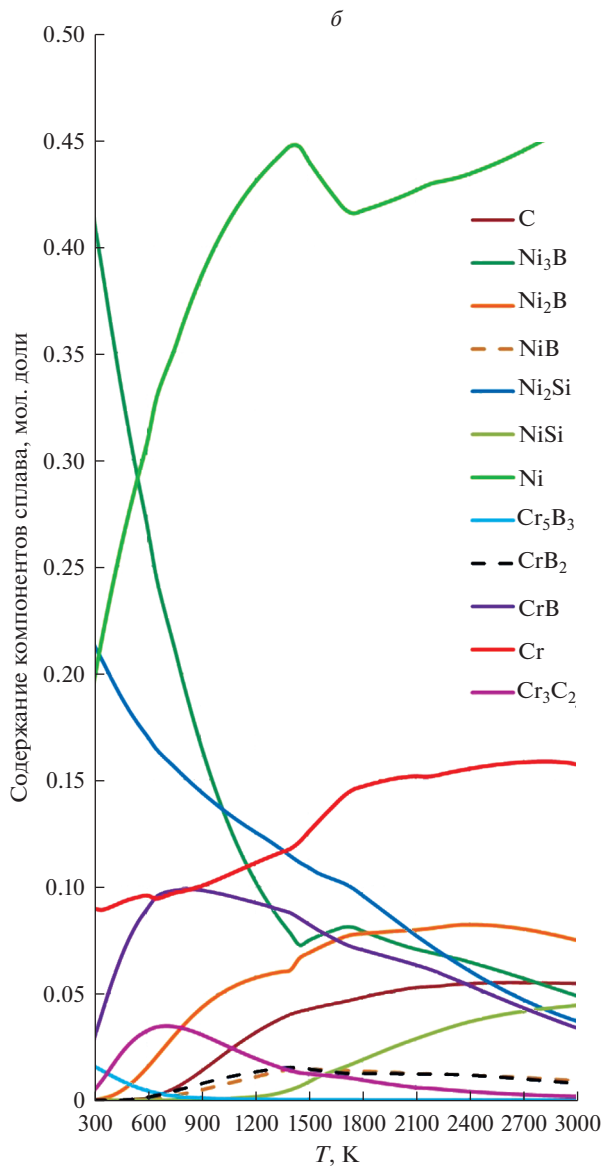


Рис. 1. Окончание

ливание; благодаря малым размерам отпечатка можно измерять микротвердость отдельных фаз или даже отдельных зерен. Данные о микротвердости используют для изучения неоднородности распределения растворимых примесей по зерну, исследования пластической деформации, построения диаграмм фазового равновесия и т.д.

Изображения отпечатков проводимых измерений микротвердости представлены на рис. 4, численные результаты измерений представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, микротвердость покрытия ПГСП-4 существенно выше, чем у покрытия ПГСП-2. Уровень микротвердости покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4, в среднем, в 3.0–4.0 раза превышает микротвердость основы.

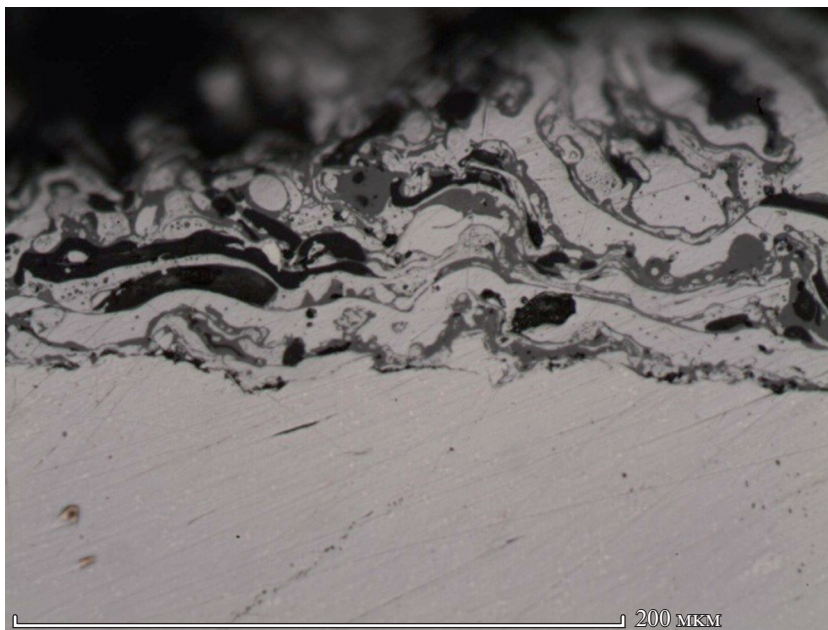


Рис. 2. Микроструктура покрытия ПГСР-2, изображение  $\times 500.0$ .

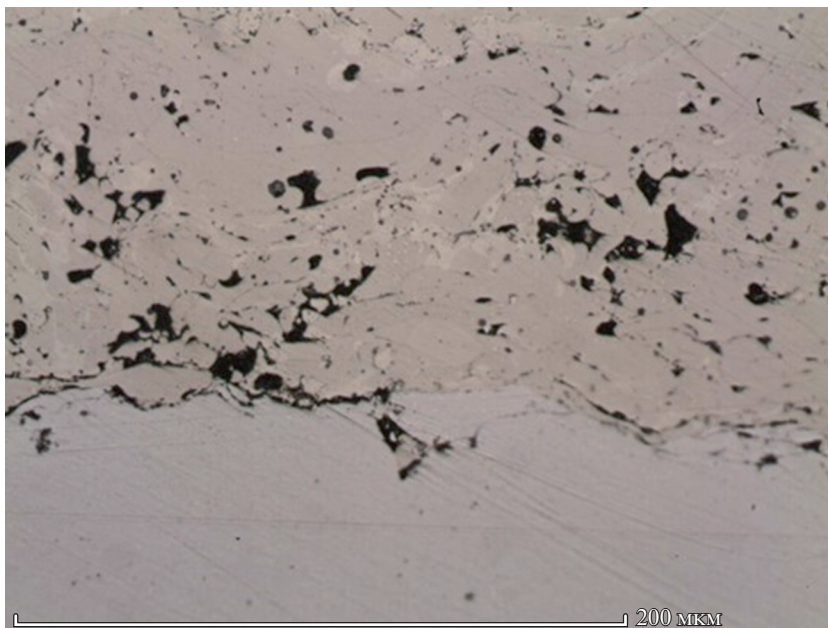
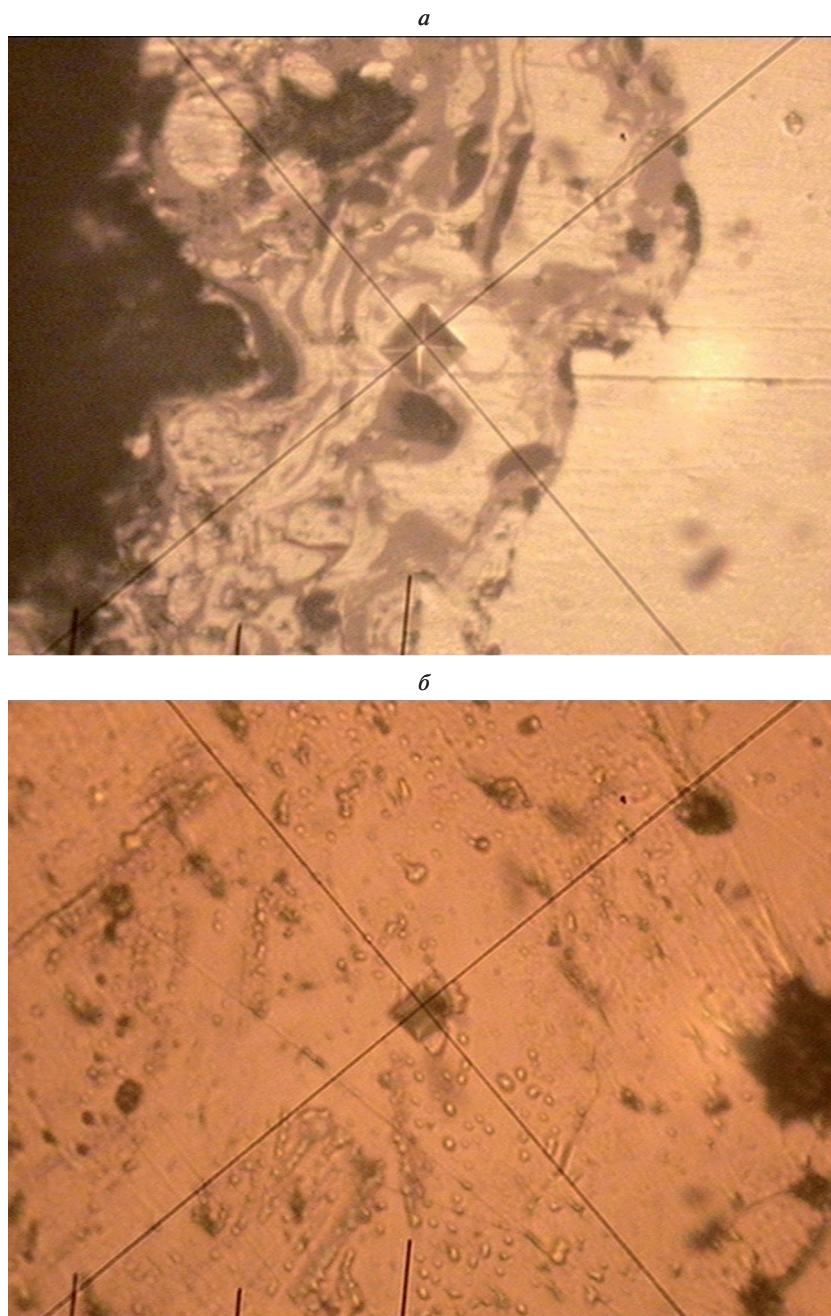


Рис. 3. Микроструктура покрытия ПГСР-4, изображение  $\times 500.0$ .



**Рис. 4.** Изображения отпечатков проводимых измерений микротвердости, изображение  $\times 500.0$ : (а) ПГСП-2, (б) ПГСП-4.



**Таблица 2.** Результаты измерений микротвердости покрытий ПГСП-2 и ПГСП-4

№	Название	ПГСП-2	ПГСП-4
		HV	HV
1	Покрытие	310.5	558.1
2	Покрытие	261.7	540.4
3	Покрытие	289.4	407.4
4	Покрытие	318	447
5	Покрытие	257	702.7
6	Покрытие	267.5	526.7
7	Покрытие	277.6	591.9
8	Подложка	94.7	99.6

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено термодинамическое моделирование равновесного состава самофлюсующихся сплавов на основе никеля: Ni–0.5C–15Cr–3.2Si–2B (ПГСП-2) и Ni–1C–17Cr–4.1Si–3.6B (ПГСП-4), экспериментально исследованы микротвердость и микроструктура покрытий, полученных методом плазменного напыления.

Результаты моделирования показывают, что при равновесном нагревании ПГСП-2 и ПГСП-4 в конденсированной фазе возможно образование Ni, Cr, C, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB, Ni<sub>2</sub>Si, NiSi, CrB, CrSi. Кроме этого, при нагревании ПГСП-4 в конденсированной фазе, наряду с указанными выше компонентами, образуются соединения Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>, CrB<sub>2</sub> Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Показано, что покрытие ПГСП-2 характеризуется наличием пористости по всей толщине, поры имеют неправильную форму и размеры от нескольких микрон до 100 мкм. Участок покрытия на границе с подложкой характеризуется более равномерной структурой. Покрытие из порошка ПГСП-4 характеризуется высокой плотностью, низкой пористостью, ровной границей с подложкой. Поры малы и расположены далеко друг от друга. Микротвердость покрытия ПГСП-4 существенно выше, чем у покрытия ПГСП-2, а уровень микротвердости обоих покрытий в среднем, в 3.0–4.0 раза превышает микротвердость основы.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменение содержания легирующих добавок приводит к существенному изменению как состава сплавов, так и механических свойств покрытий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с японского. Под ред. Степина В.С., Шестеркина Н.Г. М.: Машиностроение. 1985.
2. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение. 1975.
3. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука. 1977.
4. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. Киев: Наукова Думка, 1987.
5. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. К.: Техніка, 1986.
6. Tucker R.C. J. Introduction to Coating Design and Processing // ASM Handbook. 1994. 5. P. 497–509.
7. Фролов В.А. Поклад В.А., Рябенко Б.В. и др. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) // Сварочное производство. 2006. № 11. С. 38–47.
8. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Л.: Наука. 1972.
9. Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972.
10. Ватолин Н.А., Пастухов Э.А. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. М.: Наука, 1980.

11. Ватолин Н.А. Металлические расплавы. Состояние исследований // Вестник АН СССР. 1983. № 8. С. 62–73.
12. Снярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука. 1983.
13. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994.
14. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. С. 240–249.
15. Ильиных Н.И., Куликова Т.В., Моисеев Г.К. Состав и равновесные характеристики металлических расплавов бинарных систем на основе железа, никеля и алюминия. Екатеринбург: УрО РАН. 2006.
16. H. Yokokawa. Tables of Thermodynamic properties of Inorganic compounds // J. Nat. Chem. Laboratory for Industry Japan. 1988. 83. P. 27.
17. Barin I., Knacke O., Kubashewski O. Thermochemical properties of inorganic substances. Supplement. Springer – Verlag, Berlin–Heidelberg–New-York, 1977.
18. Massalski T.B. Binary Alloy Phase Diagrams // American Society for Metals. Metals Park. Ohio. 1986, 1987. 1, 2.
19. Landolt-Börnstein: Thermodynamic Properties of Inorganic Material. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1999.
20. Knacke O., Kubaschewski O., Hesselman K. Thermochemical properties of inorganic substances. 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 1991.
21. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А., Маршук Л.А., Ильиных Н.И. Температурные зависимости приведенной энергии Гиббса некоторых неорганических веществ. Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН, 1997.
22. Vassiliev V.P., Taldrik A.F., Ilinykh N.I. New Correlative Method of Thermo-dynamic Analysis of the Inorganic Compounds // MATEC Web of Confer-ences. 2013. 3. № 01078.
23. Васильев В.П., Ильиных Н.И., Тальдрик А.Ф. Связь термодинамических свойств с Периодическим законом // Расплавы. 2015. № 3. С. 61–65.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SELF-FLUXING MATERIALS BASED ON NICKEL

A. S. Krivorogova<sup>1</sup>, N. I. Ilinykh<sup>2, 3</sup>, S. A. Ilinykh<sup>2</sup>, B. R. Gelchinski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

<sup>3</sup>*Ural Technical Institute of Telecommunications and Informatics, Yekaterinburg, Russia*

The presented work is devoted to the theoretical and experimental study of self-fluxing materials based on nickel: Ni–0.5Cr–15Cr–3.2Si–2B (PGSR-2) and Ni–1Cr–17Cr–4.1Si–3.6B (PGSR-4). These materials are widely used to obtain wear-resistant coatings on various parts of machines and mechanisms that can be obtained by flame spraying, plasma spraying and surfacing. The investigation of the relationships between the structure and properties of coatings with the main technological parameters is of interest for solving both applied and theoretical problems. In addition, information on the structure of liquid alloys is necessary for the design and optimization of thermal spraying processes, since heat treatment of the melt can greatly affect the properties of hardened materials. One of the effective ways to solve this problem is the use of computer simulation methods. Thermodynamic modeling of the equilibrium composition of the above self-fluxing materials was carried out. It is shown that with equilibrium heating of PGSR-2 and PGSR-4 in the condensed phase, the formation of Ni, Cr, C, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB, Ni<sub>2</sub>Si, NiSi, CrB, CrSi is possible. In addition, when heating PGSR-4 in the condensed phase, along with the above components, Cr<sub>3</sub>B<sub>3</sub>, CrB<sub>2</sub> Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> compounds are formed. The microhardness and microstructure of coatings obtained by plasma spraying were experimentally studied. It was shown that the PGSR-2 coating is characterized by the presence of porosity over the entire thickness; the pores have an irregular shape and size from a few microns to 100 microns. High density, low porosity, and an even border with the substrate characterize the PGSR-4 powder coating. The microhardness of the PGSR-4 coating is significantly higher than that of the PGSR-2 coating,

and the average microhardness of both coatings is 3.0–4.0 times higher than the microhardness of the base.

*Keywords:* thermodynamic modeling, composition, coating, microstructure, microhardness

## REFERENCES

1. Khasui A., Morigaki O. *Naplavka i napilenie* [Hard Facing and Sputtering]. M.: Mashinostroenie, 1985. (in Russian).
2. Khasui A. *Technica napilenija* [Spraying technique]. M.: Mashinostroenie. 1975. (in Russian).
3. Kudinov V.V. *Plasmennie pokritija* [Plasma coatings]. M.: Nauka. 1977. (in Russian).
4. Borisov Ju.S., Charlamov Ju.A., Sidorenko S.L. et al. *Gasotermicheskie pokritija is poroshkovich materialov* [Thermal coatings of powder materials] / Spravochnic. Kiev: Naukova Dumka, 1987. (in Russian).
5. Borisov Ju.S., Borisiva A.L. *Plasmennie poshkovie pokritija* [Plasma powder coatings]. Kiev: Technica, 1986. (in Russian).
6. Tucker R.C. J. Introduction to Coating Design and Processing // ASM Handbook. 1994. 5. P. 497–509.
7. Frolov V.A., Poclad V.A., Rjabenko B.V. et al. Technological features of supersonic gas thermal spraying methods (review) // Svarochnoe proizvodstvo. 2006. № 11. P. 38–47. (in Russian).
8. Frenkel Ja.I. *Vvedenie v teriju metallov* [Introduction to Metal Theory]. L.: Nauka. 1972. (in Russian).
9. Vilson D.R. *Struktura zhidkikh metallov i splavov* [Structure of liquid metals and alloys]. M.: Metallurgija, 1972. (in Russian)
10. Vatolin N.A., Pastuchov E.A. *Difrakcionnie issledovanija stroenija visokotemperaturnich rasplavov* [Diffraction investigations of the structure of high-temperature melts]. M.: Nauka, 1980. (in Russian).
11. Vatolin N.A. Metallic melts. Research status // Vestnic AN SSSR. 1983. № 8. P. 62–73. (in Russian).
12. Sinjarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. *Primenenie EVM dlja termodinamicheskich paschetov metallurgicheskich processov* [The use of IBM for the thermodynamic calculations of metallurgical processes]. M.: Nauka, 1983. (In Russian).
13. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v visokotemperaturnych neorganicheskikh sistemach* [Thermodynamic modeling in the high-temperature inorganic systems]. M.: Metallurgija, 1994. (In Russian).
14. Trusov B.G. Programmatic system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroenie [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University N.E. Bauman. Ser. Instrument making], 2012. P. 240–249. (In Russian).
15. Ilinykh N.I., Kulikova T.V., Moiseev G.K. *Sostav I ravnovesnye charakteristiki metallicheskich rasplavov binarnykh sisten na osnove zeleza, nikelja i aljuminija* [Composition and equilibrium characteristics of metallic melts of binary systems based on iron, nickel and aluminum]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006. (In Russian).
16. Yokokawa H. Tables of Thermodynamic properties of Inorganic compounds // J. Nat. Chem. Laboratory for Industry Japan. 1988. 83. P. 27.
17. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical properties of inorganic substances. Supplement. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New-York, 1977.
18. Massalski T.B. Binary Alloy Phase Diagrams // American Society for Metals. Metals Park. Ohio. 1986, 1987. 1, 2.
19. Landolt-Börnstein: Thermodynamic Properties of Inorganic Material. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1999.
20. Knacke O., Kubaschewski O., Hesselman K. Thermochemical properties of inorganic substances. 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 1991.
21. Moiseev G.K., Vatolin N.A., Marshuk L.A., Ilinykh N.I. *Temperaturnie zavisimosti privedennoi energii Gibbsa nekotorykh neorganicheskikh veshestv (alternativnyy bank dannich ACTRA. OWN)* [Temperature dependences of the reduced Gibbs energy of some inorganic substances (alternative database ACTPA.OWN)]. Yekaterinburg: UB RAS, 1997. 239 p. (in Russian).
22. Vassiliev V.P., Taldrik A.F., Ilinykh N.I. New Correlative Method of Thermo-dynamic Analysis of the Inorganic Compounds // MATEC Web of Conferences. 2013. 3. № 01078.
23. Vassiliev V.P., Ilinykh N.I., Taldrik A.F. Relationship of thermodynamic properties with the Periodic Law // Rasplavy. 2015. № 3. P. 61–65.