

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВ ЛИТЕЙНО- МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

А. Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **В. А. ШЕЙНЕРТ**, **Э. А. ВАНЮК**,
А. А. АНДРУШЕВИЧ, канд. техн. наук, **К. А. МЕЛЬНИКОВ**
Белорусский национальный технический университет

В статье представлены результаты исследований технологических особенностей получения и применения самофлюсующихся порошков из слитков. Подобран состав легированного сплава на основе железа, содержащий хром, кремний бор, вольфрам и кобальт. В лабораторных условиях с использованием высокотемпературного синтеза изготовлены слитки, на основе которых методом дробления и размола получены порошки для нанесения покрытий. Приведены результаты их испытаний при нанесении покрытий различными способами.

***Ключевые слова:** самофлюсующийся сплав, высокотемпературный синтез, слитки, дробление, размол, порошки, покрытия*

TECHNOLOGICAL FEATURES OF OBTAINING SELF- FLUXING POWDERS BY THE FOUNDRY-METALLURGICAL METHOD FOR APPLYING WEAR-RESISTANT COATINGS

A. G. SLUTSKY, Ph. D. in Technical Sciences, **V. A. SHEINERT**,
E. A. VANYUK, **A. A. ANDRUSHEVICH**, Ph. D. in Technical Sciences,
K. A. MELNIKOV

Belarusian National Technical University

The article presents the results of research on the technological features of obtaining and using self-fluxing powders from ingots. The composition of an iron-based alloy containing chromium, silicon boron, tungsten and cobalt was selected. In laboratory conditions, using high-temperature synthesis, ingots were made, on the basis of which, by crushing and grinding, powders for coating were obtained. The results of their tests when applying coatings by various methods are presented.

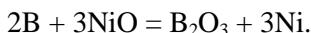
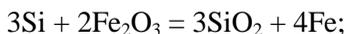
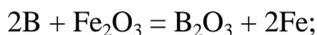
Keywords: *self-fluxing alloy, high-temperature synthesis, ingots, crushing, grinding, powders, coatings*

Наиболее распространенными методами восстановления деталей машин являются газотермические способы нанесения покрытий и вакуумно-конденсационное напыление. Однако применение газотермического напыления ограничивается слабой адгезией формируемых покрытий к основе, что вызывает необходимость дополнительно использовать лазерное и плазменное оплавление таких покрытий. Основным недостатком является отсутствие собственного производства порошков для нанесения покрытий, а поставки их по импорту экономически нецелесообразны из-за высоких таможенных пошлин. В связи с этим актуальной является задача получения собственных порошков, позволяющая заменить зарубежные аналоги при условии сохранения физико-механических свойств покрытий.

Одним из распространенных способов изготовления порошков с точки зрения технологической простоты и минимизации затрат является прямая плавка (металлургический синтез) исходных материалов с получением компактного слитка и последующее его дробление и размол до необходимого гранулометрического состава [1]. Выполненные ранее исследования [2, 3] показали реальную возможность получения таких порошков из силицидов и хромокремниевых чугунов.

Наиболее эффективными являются самофлюсующиеся порошки, которые широко применяются при нанесении покрытий различными способами. Они не требуют применения при нанесении слоя дополнительной защиты, так как содержат в себе флюсующие элементы (бор и кремний), которые, образуя боросиликатную подложку, помогают защитить наносимый слой от окисления, смачивают и активизируют наплавляемую поверхность, а также повышают скорость протекания диффузионных процессов на границе фаз [4, 5]. Современные самофлюсующиеся сплавы имеют следующий состав: хром – 9–15 %, бор – 2–4 %, кремний – 2–4 %, остаток – никель или кобальт (никель применяется чаще из-за его более высокой коррозионной стойкости). Эти сплавы частично плавятся при 1050–1100 °С, дают эвтектические расплавы с высоким содержанием бора и кремния. Такой эвтектический расплав при температуре более 1050 °С

активно реагирует с оксидами железа, никеля и кобальта в системе покрытие-субстрат, разрушая их восстановлением, например по реакциям:



Легкие оксиды бора и кремния выносятся эвтектическим расплавом на поверхность покрытия, а лишённые оксидных плёнок частицы покрытия спекаются через расплав эвтектики между собой и с очищенным от оксидов субстратом. Таким образом, добавки бора и кремния позволяют решить комплексную задачу[4]. Анализ показал, что широко применяются порошки на никелевой и железной основах.

Порошки на никелевой основе используются для напыления и наплавки покрытий, стойких против коррозии, к изнашиванию трением. Такие покрытия устойчивы против газовой коррозии вплоть до температур 700–850 °С, стойки в пресной и морской воде, солевых растворах, нефтесодержащих средах, аммиаке и в других агрессивных средах. Сплавы плавятся в диапазоне температур, характерном для материалов с эвтектикой в структуре [5]. Основная структурная фаза покрытий из таких сплавов – это γ -твёрдый пересыщенный раствор на основе никеля; упрочняющие фазы (бориды хрома и никеля переменного состава, карбиды хрома типа Cr_{23}C_6 и карбобориды хрома); в порошках с повышенным содержанием углерода дополнительно присутствуют частицы более прочного карбида Cr_7C_3 [6]. Твёрдость и износостойкость покрытий возрастает по мере увеличения в никелевых сплавах содержания хрома, бора, кремния и углерода. Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1080 °С, а также восстанавливают окисные плёнки на поверхности подложки с образованием боросиликатных шлаков (самофлюсование) в присутствии жидкой фазы и улучшают смачиваемость подложки жидким металлом.

Например, порошок марки ПР-НД42СР содержит 42,5 % меди, 0,2 % углерода, 0,9 % кремния, 1,0 % бора, до 3,0 % железа, осталь-

ное никель. Твердость его составляет 190–230 НВ. Порошок марки ПР-НХ15СР2 содержит 0,47 % углерода, 15 % хрома, 3,1 % кремния, 2,0 % бора, менее 5,0 % железа, остальное никель. Твердость покрытия составляет 42–48 НRc. Порошки из никелевых сплавов используются в качестве износостойких покрытий на деталях металлургического, горно-нефтедобывающего, энергетического, стекольного и химического оборудования, штампового и прессового инструмента, деталях автомобильного, железнодорожного и судового транспорта, газоперекачивающих установок, сельскохозяйственной техники и др.

Примерами самофлюсующихся порошков на железной основе являются высокоуглеродистые сплавы: ПР-Х4ГСР (содержание меди – 0,5 %, углерода – 1,2 %, хрома – 3,8 %, кремния – 2,3 %, бора – 3,6 %, остальное – железо), твердость покрытия составляет 60–64 НRc; ПГ-Ж14 (содержание никеля – 37 %, углерода – 1,4 %, хрома – 14 %, кремния – 2,5 %, бора – 2,2 %, остальное железо дополнительно легируют молибденом и вольфрамом), твердость покрытия составляет 38–45 НRc. Покрытие из таких сплавов характеризуется повышенной твердостью и высокой стойкостью к абразивному изнашиванию в водной среде, [5, 6].

Самофлюсующиеся порошки производятся распылением расплава инертным газом. Затем их подвергают рассеву на узкие по размерам частиц фракции для различных технологий напыления и наплавки покрытий, в том числе с использованием детонационного и сверхзвукового напыления, газопорошковой наплавки, газопламенного и плазменного напыления, лазерной и электроискровой наплавки, плазменной и индукционной наплавки. Для этих целей используют порошки размером фракций 40, 60, 100 мкм. Представленный выше анализ показывает, что в составах самофлюсующихся порошков для износостойких покрытий, наряду с кремнием и бором, используются такие легирующие элементы как хром, ванадий, молибден, вольфрам и др.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований технологических особенностей получения самофлюсующихся порошков из легированного сплава. В качестве базового был выбран сплав на основе железа, содержащий: 2,5 % С, 6 % Cr, 5 % Si, 1,5 % В, 8 % W, 4 % Со.

Плавка производилась в высокоскоростной индукционной печи УИН 30-8-50 емкостью 3 кг по расплаву. В качестве легирующих материалов использовали металлический хром (Хр1), кремний кристаллический (Кр1), борсодержащую лигатуру, которая была получена СВС процессом в лабораторных условиях по методике, изложенной в работе [7]. Необходимое количество вольфрама и кобальта обеспечивалось добавками отходов стали Р6М5. Разливка расплава осуществлялась при температуре 1823 К в металлический кокиль (размеры полости 6×3×150 мм). Температура контролировалась контактной термопарой ВР5/20.

В дальнейшем полученные слитки подвергались дроблению и размолу по методике, описанной в работе [8]. Для размола использовали шары из стали ШХ15 диаметром 8, 25, 40 мм и общим весом 2,6 кг. Режимы размола: частота вращения $n = 60$ об/мин, объем камеры $V_k = 0,003 \text{ м}^3$, коэффициент заполнения камеры шарами $K_{з.к.ш} = 0,5$, коэффициент заполнения камеры шарами и измельчаемой шихтой – $K_{з.к.ш.п.} = 0,7$, время размола составило $t = 6$ ч. В результате были получены следующие фракции порошков в процентном соотношении от размалываемой шихты: фракция менее 80 мкм – 31 %; фракция 80–180 мкм – 43 %; фракция 180–315 мкм – 16 %; фракция более 315 мкм – 9 %.

На рисунке 1 представлены результаты исследований полученных порошков на аналитическом сканирующем электронном микроскопе VEGA TESCAN в масштабе увеличения: 1:500.

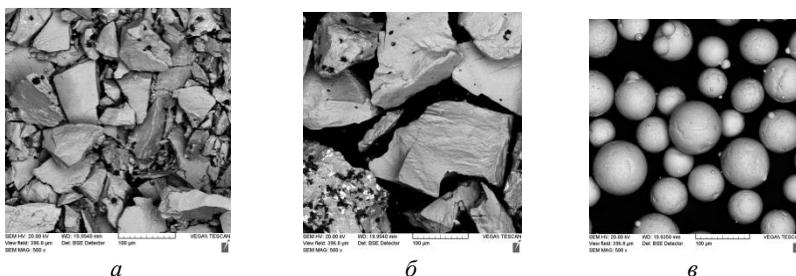


Рисунок 1 – Изображения порошков, полученных при помощи аналитического сканирующего электронного микроскопа VEGA TESCAN при увеличении 1:500 мкм:

а – порошок на основе легированного чугуна с размер частиц менее 80 мкм; *б* – с размером частиц 80–180 мкм; *в* – серийный порошок на основе никеля ПГ-СР4

При анализе изображений установлено [7], что частицы из порошка, полученного литейно-металлургическим методом, после размола имеют осколочную форму (рисунок 1, *а, б*), что может оказать влияние на их текучесть и насыпную плотность по сравнению с эталонным порошком ПГ-СР4, обладающим сферической формой (рисунок 1, *в*).

На следующем этапе были проведены испытания покрытий, полученных с использованием опытных порошков. На рисунке 2 представлены фотографии образцов таких покрытий, нанесенных на стальную подложку газопламенным напылением с последующим лазерным и плазменным оплавлением.

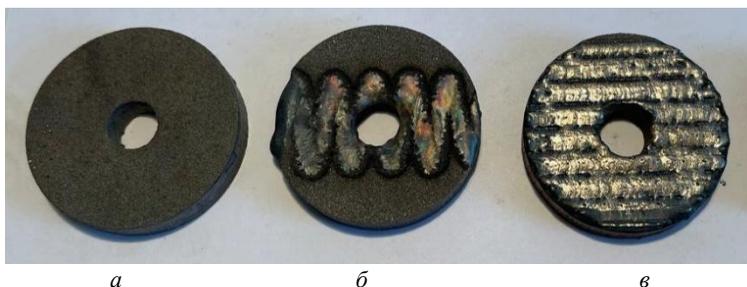


Рисунок 2 – Фотографии образцов с покрытием из порошка на основе легированного чугуна, размер частиц менее 80 мкм:
а – после газопламенного оплавления; *б* – после плазменного оплавления;
в – после лазерного оплавления

Результаты металлографических исследований полученных покрытий приведены на рисунке 3.

Анализ показал наличие дендритного строения слоя покрытия на стальной подложке при лазерном оплавлении (рисунок 3, *а*). При этом размер карбидов в среднем составляет 5 мкм, а боридов – 1 мкм. При большем увеличении ($\times 500$) четко просматривается карбидная сетка с размером зерна в пределах 10–15 мкм. При плазменном оплавлении характер распределения фаз несколько отличается от лазерного (рисунок 3, *б*), что, по-видимому, связано с воздействием на покрытие температурных факторов. Карбидная сетка более мелкая, но сохраняется направленность дендритной структуры в сторону теплоотвода.

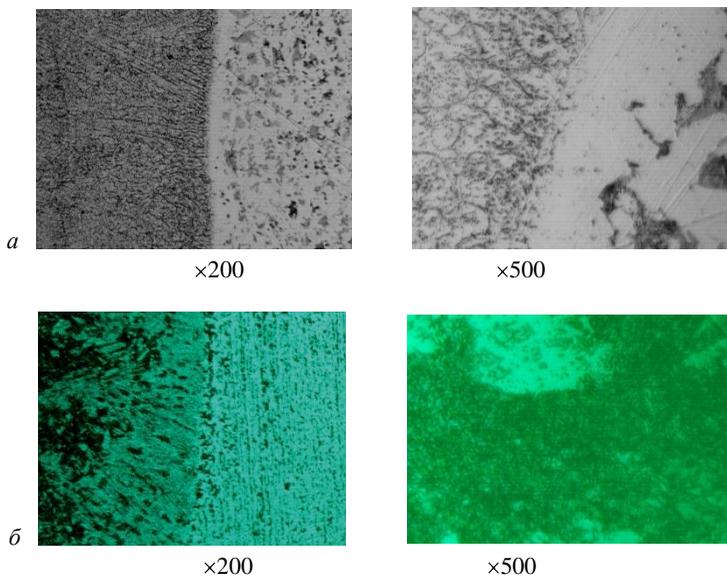


Рисунок 3 – Микроструктура покрытия порошком фракции менее 80 мкм из легированного чугуна, нанесенного на стальную подложку после лазерного оплавления (а) и плазменного оплавления (б)

Был выполнен рентгеноструктурный анализ покрытий из легированного чугуна, который показал (рисунок 4) наличие, наряду с железом, соединений в виде боридов вольфрама (WB_4), карбидов хрома ($Cr_{23}C_6$), а так же комплексных соединений ($Cr_{23}C_6$; WB_4).

На рисунке 5 представлены результаты исследований микротвердости покрытий из опытных и серийного порошков.

Установлено, что метод газопламенного напыления с лазерным оплавлением обеспечивает более высокую микротвердость покрытия из легированного чугуна по сравнению с плазменным оплавлением, при этом на покрытии из серийного порошка на никелевой основе микротвердость несколько выше.

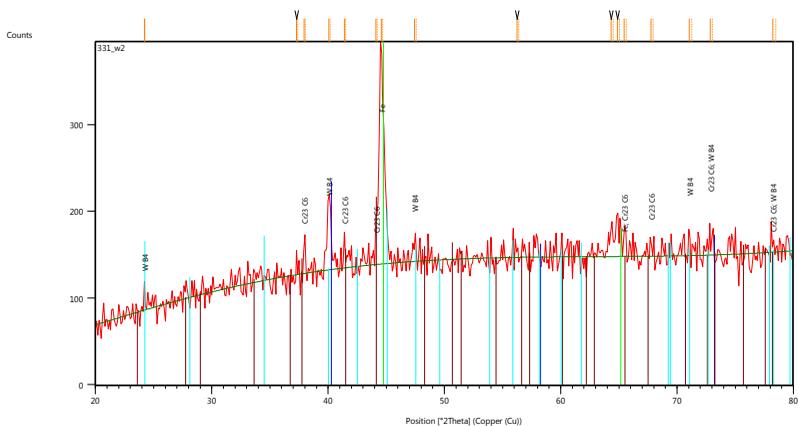


Рисунок 4 – Характер распределения фаз в покрытии из порошка легированного чугуна фракцией менее 80 мкм после лазерного оплавления

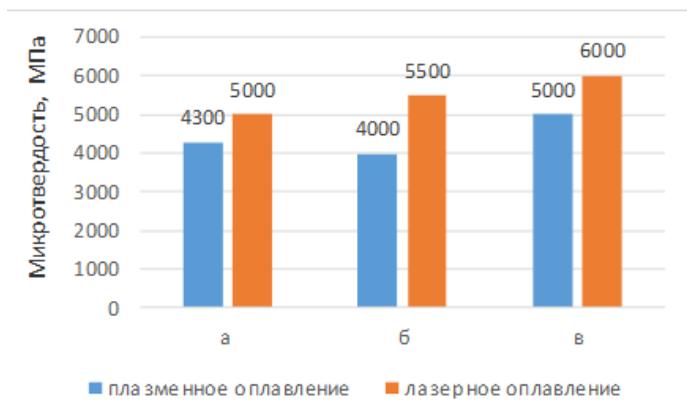


Рисунок 5 – Гистограмма микротвердости покрытий:

- а – опытный порошок на основе железа, фракция менее 80 мкм;
- б – фракция 80–180 мкм, в – серийный порошок ПГ-СР4 на основе никеля

На рисунке 6 приведены результаты исследования износостойкости полученных покрытий, которые осуществляли экспресс-методом на машине торцового трения по схеме диск – втулка.

Определение величины износа производили с помощью прибора для измерения шероховатости поверхности SJ-210.

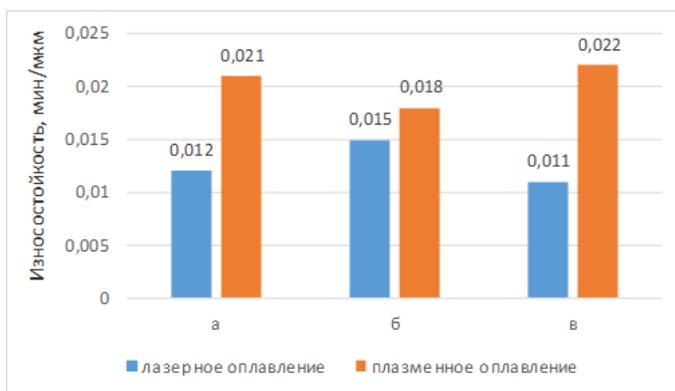


Рисунок 6 – Гистограмма износостойкости исследуемых покрытий:

а – порошок на основе железа (фракция менее 80 мкм); *б* – фракция 80–180 мкм;
в – серийный порошок ПГ-CP4 на основе Ni

Установлено, что у покрытий, нанесенных газопламенным напылением и оплавленных плазменной струей, износостойкость у порошка из легированного чугуна с размером частиц менее 80 мкм несколько выше, чем у серийного (на никелевой основе).

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований показана возможность получения самофлюсующихся порошков литейно-металлургическим методом с последующим их применением для нанесения износостойких покрытий плазменными и лазерными технологиями.

Список литературы

1. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. – 280 с.

2. Исследование процесса плазменного напыления чугунных покрытий / И. В. Кривцун [и др.]. // Вестник Брестского государственного технического университета, 2006. – № 4. – С. 39–45.

3. Гилев, В. Г. Лазерное поверхностное оплавление чугуна СЧ20 в отбеленном состоянии / В. Г. Гилев, Е. А. Морозов, И. Б. Пуртов // *Обработка металлов*, 2017. – № 1 (74). – С. 40–50.

4. Восстановление деталей машин. Справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

5. Способы получения износостойких материалов для защитных покрытий с использованием литейно-металлургических методов / А. Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия. Республ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 216–224.

6. Технологические особенности получения литых заготовок из износостойких материалов для защитных покрытий / В. А. Шейнерт [и др.] // *Металлургия. Республ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 43. – С. 145–151.

7. Формирование защитных покрытий из порошков хромокремниевоего чугуна, полученных литейно-деформационными методами и нанесенными газопламенным напылением / О. Г. Девойно [и др.] // *Металлургия. Республ. межвед. сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 44. – С. 89–100.

References

1. *Tekhnologiya formirovaniya iznosostojkikh pokrytij na zheleznoj osnove metodami lazernoj obrabotki* [Technology for forming wear-resistant coatings on an iron base using laser processing methods] / O. G. Dtvoyno [at al.]. – Minsk: BNTU Publ., 2020. – 280 p.

2. *Issledovanie processa plazmennogo napyleniya chugunnykh pokrytij* [Study of the process of plazma spraying of cast iron coating] / I. V. Krivtsun [at al.] // *Vestnik Brestkogh gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Brest State Technical University Publ.*, 2006. – No. 4. – P. 39–45.

3. *Gilev, V. G. Lazernoe poverkhnostoe oplavlenie chuguna sch20 v otbelennom sostoyanii* [Laser surface melting of cast iron Sch20 in a bleached state] / V. G. Gilev, E. A. Morozov, I. B. Purtov // *Obrabotka metallov = Metal processing*. 2017. – No 1 (74). – P. 40–50.

4. *Vosstavlenie detalej mashin* [Restoration of machine parts. Reference book] / F. I. Panteleenko [at al.] – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. – 672 p.

5. Sposoby polucheniya iznosostojkikh materuilov dlya zashchitnykh pokrytij s izopol'zovaniem litejno-metalourgicheskikh metodov [Methods of obtaining wear-resistant materials for protective coating using foundry-metallurgical methods] / A. G. Slutsky [at al.] // *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vyp. 42. – P. 216–224.

6. Teknologicheskie osobennosti polucheniya litykh zagotovok iz iznosostojkikh materialov dlya zashchitnykh pokrytij [Technological features of producing cast blanks from wear-resistant materials for protective coatings] / V. A. Sheinvert [at al.] // *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vyp. 43. – P. 145–151.

7. Formirovanie zashchitnykh pokrytij iz poroshkov khromokremnivogo chuguna, polychennykh litejno-deformacionnymi metodami i nanesennymi napyleniem [Formation of protective coating from chromium-silicon cast iron powders obtained by casting-deformation methods and applied by flame spraying] / O. G. Devoyno [at al.] // *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2023. – Vyp. 44. – P. 89–100.

Поступила 23.10.2024

Received 23.10.2024