

**ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ИЗ ПОРОШКОВ ХРОМОКРЕМНИЕВОГО ЧУГУНА,
ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЕЙНО-ДЕФОРМАЦИОННЫМИ
МЕТОДАМИ И НАНЕСЕННЫМИ ГАЗОПЛАМЕННЫМ
НАПЫЛЕНИЕМ**

О. Г. ДЕВОЙНО, д-р техн. наук, **А. Г. СЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук,
В. А. ШЕЙНЕРТ, **Э. А. ВАНЮК**
Белорусский национальный технический университет

В статье рассматриваются результаты исследований режимов формирования покрытий из хромкремниевого чугуна с использованием газопламенного напыления и лазерного оплавления. Подобран состав сплава на основе железа, содержащий 16 % хрома и 10 % кремния. В лабораторных условиях изготовлены быстроохлажденные слитки и методами дробления и размолва получены образцы порошков фракциями от менее 80 до 180 мкм. Установлены режимы формирования покрытий, определена их микротвердость и предложена область применения.

Ключевые слова: *слитки из хромкремниевого чугуна, дробление и размол, порошки, газопламенное напыление, лазерное оплавление, микротвердость.*

FORMATION OF PROTECTIVE COATINGS FROM CHROME-SILICON CAST IRON POWDERS PRODUCED BY CASTING-STRAIN METHODS AND APPLIED BY GAS FLAME SPRAY

O. G. DEVOINO, Dr. of Technical Sciences, **A. G. SLUTSKY**, Ph. D. in
Technical Sciences, **V. A. SCHEINERT**, **E. A. VANYUK**
Belarusian National Technical University

The article discusses the results of studies of the modes of formation of coatings from chromium-silicon cast iron using flame spraying and laser reflow. The composition of an iron-based alloy containing 16 % chromium and 10 % silicon has been selected. Fast-cooled ingots were manufactured in laboratory conditions and powder samples with fractions from less than 80 to 180 microns were obtained by crushing and grinding methods. The modes

of formation of coatings are established, their microhardness is determined and the scope of application is proposed.

Keywords: *ingots of chromium-silicon cast iron, crushing and grinding, powders, flame spraying, laser reflow, microtve.*

По статистическим данным, приведенным в работах [1; 2], до 80 % деталей машин выходит из строя по причине преждевременного износа. Остальные 20 % приходятся на заводской брак и возникновение внешних повреждений при эксплуатации. В среднем рабочие поверхности до 60 % деталей, вышедших из строя, можно восстановить различными способами нанесения покрытий. В основном к восстанавливаемым относятся сложные, металлоемкие и дорогостоящие детали. Экономическая выгода восстановления таких деталей лежит в пределах 10–50 % стоимости изготовления [3].

Наиболее распространенными методами восстановления деталей машин являются газотермические способы нанесения покрытий и вакуумно-конденсационное напыление. К группе промышленно развитых относят методы газотермического напыления, а именно электродуговое, газопламенное, плазменное и детонационное напыление. Все они объединены единым принципом формирования покрытия из отдельных частиц, нагретых и ускоренных с помощью высокотемпературной газовой струи.

Практический опыт применения газотермических покрытий, накопленный за последние 20–30 лет в различных отраслях промышленности, показывает, что таким путем можно, как правило, в 2–5 раз уменьшить износ деталей машин, эксплуатируемых в самых разных условиях, а также эффективно восстанавливать изношенные детали [4–7].

Существенный интерес представляет газотермическое напыление в сочетании с лазерными технологиями, которые расширяют возможности по созданию покрытий с широкой гаммой свойств. При такой технологии возможно заменить дефицитные дорогостоящие материалы на обычные низколегированные и углеродистые стали, а также чугуны, за счет создания покрытий с высоким комплексом физико-механических свойств. Область применения газотермического напыления ограничивается слабой адгезией формиру-

емых покрытий к основе, в связи с чем дополнительно применяется лазерное оплавление таких покрытий.

Основным недостатком является то, что в Беларуси отсутствует производство порошков для газотермического нанесения, а ввоз порошковых материалов из зарубежных стран экономически нецелесообразен из-за высоких таможенных пошлин. В связи с этим стоит задача получения порошков, позволяющих заменить зарубежные аналоги с сохранением физико-механических свойств покрытий, а также сократить затраты применения дорогостоящих легирующих компонентов за счет использования в качестве основного материала низколегированных углеродистых сталей.

Сочетание газотермических способов нанесения покрытий и лазерных технологий с целью замены дорогостоящих дефицитных материалов на обычные углеродистые и низколегированные стали рассматриваются в работах [8; 9].

В настоящей статье приведены результаты оценки возможностей получения порошковых сплавов на железной основе из отходов литейного производства, обработки режимов формирования чугунных покрытий из порошка хромкремниевого чугуна, полученного литейно-деформационным методом и нанесенных газопламенным напылением, а также исследований микротвердости получаемых покрытий из вышеуказанных порошков.

В связи с вышеуказанной целью работы является исследование режимов формирования газотермических защитных покрытий, включающие режимы металлургического синтеза, закалки из жидкого состояния, размола в шаровой мельнице и нанесения покрытия газопламенным напылением с лазерным оплавлением.

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 [10].

На первом этапе в лабораторных условиях были проведены экспериментальные исследования технологических особенностей получения дисперсных порошков из слитков хромкремниевого износостойкого чугуна. В качестве легирующих материалов использовали металлический хром (Хр1), кремний кристаллический (Кр1). Расчет шихты вели на следующий состав сплава, %: С – 3,3; Si – 5,0;

Mn – 0,3–0,4; Cr – 16,0. Плавка производилась на базе установки индукционной печи УИН 30-8-50 емкостью 3 кг по расплаву. 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 [10]. Для размолы использовали шары из стали ШХ15 диаметром 8, 25, 40 мм и общим весом 2,6 кг. Режимы размолы: 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 размолы составило $t = 6$ ч.

В результате размолы получены следующие фракции порошков в процентном соотношении от размалываемой шихты:

- 1) грануляция менее 80 мкм – 31 %;
- 2) грануляция 80–180 мкм – 43 %;
- 3) грануляция 180–315 мкм – 16 %;
- 4) грануляция свыше 315 мкм – 10 %.

Полученные образцы порошков исследовали на аналитическом сканирующем электронном микроскопе VEGA TESCAN в масштабе увеличения: 1:500 и 1:50 мкм, изображения представлены на рисунке 1.

При анализе СЭМ-изображений порошка из хромокремниевое чугуна, полученного в шаровой мельнице, установлено, что идет кристаллизация в направлении теплоотода и, поскольку это литая в кокиль закаленная структура, а соответственно термонапряженная, характерна выраженная направленная лучистая транскристаллизация. Следовательно, при дроблении слитка трещины проходят по плоскостям спайности блоков вдоль дислокаций, которые образуются в направлении теплоотода. При анализе изломов частицы (рисунок 1, в) установлено, что структура продольного излома слитка гладкая плотная, а структура поперечного излома рыхлая и представлена матрицей с гетерогенными включениями (карбиды и силициды хрома). При анализе СЭМ-изображения (рисунок 1, г) видна твердая структура включений по изломам, то есть скол произошел по включениям или около включений.

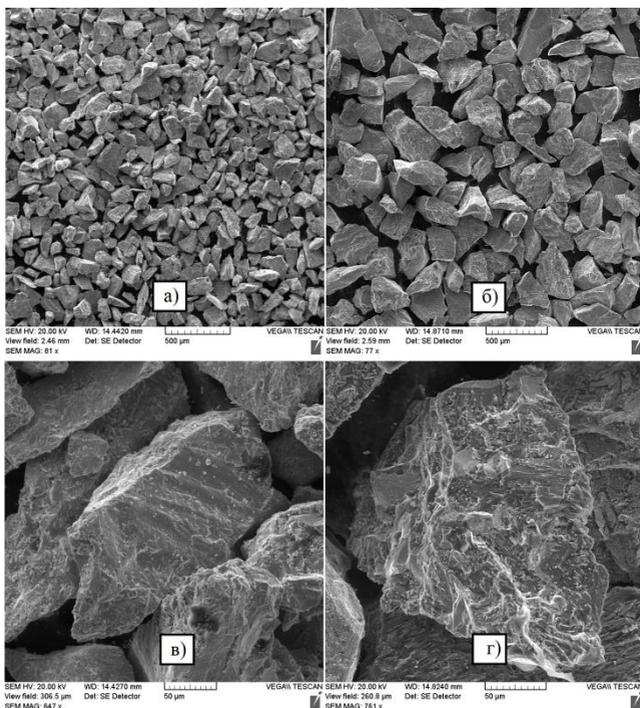


Рисунок 1 – Изображения на сканирующем электронном микроскопе VEGA TESCAN порошка из хромосилицевого чугуна, полученного в шаровой мельнице: а, б – грануляция 80–180 мкм; в, г – грануляция 180–315 мкм

Технология нанесения покрытий из порошка хромосилицевого чугуна включала газопламенное напыление и лазерное оплавление на предварительно подготовленную поверхность струйно-абразивной обработкой. Размеры образцов: 70×70×8 мм, материал образцов – ст. 3.

Режимы газопламенного напыления покрытий: давление кислорода – 0,36–0,40 МПа; давление МАФ – 0,10–0,12 МПа; давление воздуха – 0,18–0,20 МПа; дистанция напыления – 200–220 мм; угол напыления – 90°; подача – 10–20 мм/с; толщина покрытия при газопламенном напылении $h \approx 0,5$ мм.

Лазерное оплавление покрытий производилось на оптоволоконном лазере марки YLR-1 (мощность 1 кВт) при 4-х различных скоростях перемещения лазерного пучка.

Режимы оплавления покрытий: ширина сканирования $b = 4$ мм; дистанция оплавления $l = 350$ мм; скорость перемещения луча лазера $v = 100\text{--}2000$ мм/мин.

На рисунке 2 представлены фотографии образцов с покрытием из порошка хромокремниевого чугуна после лазерного оплавления.

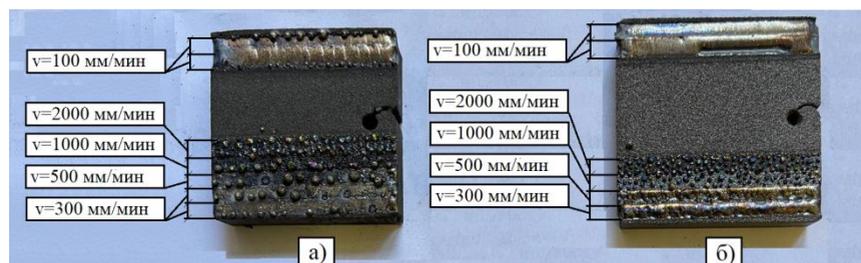


Рисунок 2 – Фотографии образцов с покрытием из порошка хромокремниевого чугуна после лазерного оплавления:

- а – образец с покрытием при размере частиц менее 80 мкм;
- б – образец с покрытием при размере частиц 80–180 мкм

Покрытия обрабатывали лазерным лучом на режимах с различной степенью проплавления материала основы. Основным параметром подбора режимов лазерного оплавления являлась скорость перемещения луча лазера, остальные показатели были постоянными.

На основании эксперимента установлена оптимальная скорость оплавления покрытия, которая находится в диапазоне 90–110 мм/мин. Низкое проплавление покрытия и основы связано с высокой скоростью перемещения лазерного луча. Исходя из рисунка 2, при скоростях перемещения 500–1500 мм/мин установлено свертывание покрытий, а также каплеобразование, отраженное в виде цветов побежалости на поверхности частиц и появления тонкой оксидной пленки, которая преломляет падающий на поверхность частиц свет.

На основе выбранных режимов лазерного оплавления покрытий из порошка хромокремниевого чугуна была подготовлена кон-

трольная партия образцов для исследований физико-механических свойств вышеуказанных покрытий.

На рисунке 3 представлены фотографии образцов с покрытием из порошка хромокремниевого чугуна после лазерного оплавления при следующих режимах: мощность лазерного излучения $P = 1$ кВт; ширина сканирования $b = 4$ мм; дистанция оплавления $l = 350$ мм; скорость перемещения луча $v = 100$ мм/мин.

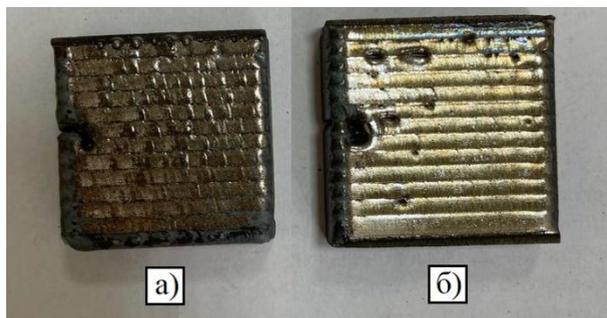


Рисунок 3 – Фотографии образцов с покрытием из порошка хромокремниевого чугуна после лазерного оплавления: *a* – образец с покрытием при размере частиц менее 80 мкм; *б* – образец с покрытием при размере частиц 80–180 мкм

Установлено, что при оплавлении покрытий на выбранных режимах отсутствует образование трещин. При анализе покрытия образца (рисунок 3, *б*) установлено образование пор и частичное свертывание покрытия за счет отсутствия смачиваемости основы. На покрытии образца 1 (рисунок 3, *а*) дефектов не обнаружено.

На рисунке 4 представлена зависимость микротвердости покрытий из порошка хромокремниевого чугуна от глубины лазерного оплавления.

При анализе зависимостей, приведенных на рисунке 4, установлено, что средняя микротвердость покрытий, нанесенных из порошка грануляцией менее 80 мкм, составляет 475 HV, а у покрытий из порошка грануляцией 80–180 мкм – 495 HV. При этом в верхней части слоя покрытия образца 1 (глубина до 10 мкм) микротвердость составляет 440 HV, а микротвердость верхней части слоя покрытия образца 2 – 590 HV. Было установлено, что микротвердость поверх-

ностного слоя покрытия образца 1 (рисунок 3, а) в 1,3 раза выше микротвердости поверхностного слоя покрытия образца 2 (рисунок 3, б). Таким образом, микротвердость покрытия из порошка хромокремниевого чугуна, подвергнутого лазерной обработке, прямо пропорциональна увеличению размера частиц порошка. Повышение микротвердости покрытий возможно внесением дополнительно упрочняющих фаз в виде переходных и тугоплавких металлов. Введение в сплав вышеуказанных фаз способствует упрочнению за счет увеличения степени легирования твердого раствора или повышения содержания карбидной фазы. В обоих случаях это приведет к повышению микротвердости, а соответственно и к увеличению других прочностных характеристик. Следует отметить, что повышение присутствия карбидных фаз в составе механической смеси порошка будет способствовать снижению прочности сцепления покрытия с основой и рекомендуется обеспечивать содержание карбидных фаз не более 30 %.

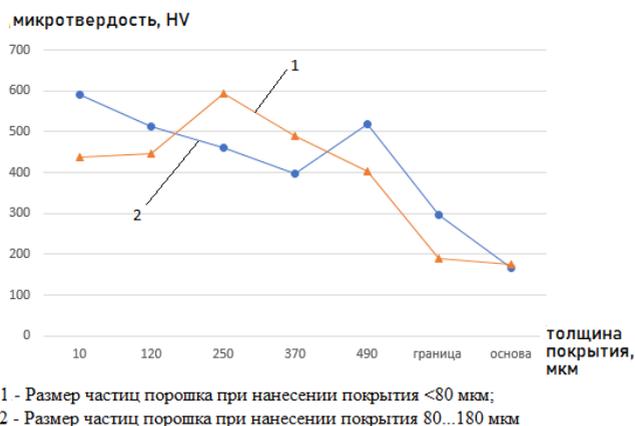


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости покрытий из порошка хромокремниевого чугуна от глубины лазерного проплавления

Выводы. На основании анализа основных способов нанесения износостойких покрытий показана перспективность использования порошков, получаемых из слитков различных сплавов методом размола.

Экспериментально отработаны технологические особенности плавки и получения слитков из хромокремниевоего чугуна. Установлено, что оптимальная концентрация кремния, обеспечивающая хрупкость сплава, составляет 10 %.

Исследованы режимы измельчения слитков, обеспечивающие за счет эффективного дробления и размола получение порошков с размером фракций от менее 80 до 180 мкм.

Проведены лабораторные испытания опытных образцов порошков при нанесении покрытий газопламенным напылением с лазерным оплавлением. Анализ качественных характеристик наносимых покрытий из хромокремниевоего чугуна показал отсутствие на их поверхности трещин.

Установлены следующие режимы оплавления покрытий: толщина покрытия $h \approx 0,5$ мм, мощность лазерного излучения $P = 1$ кВт, ширина сканирования $b = 4$ мм, дистанция оплавления $l = 350$ мм, скорость перемещения луча $v = 100$ мм/мин, которые обеспечили микротвердость у покрытий равную от 4750 МПа до 4950 МПа в зависимости от размера фракции.

Вышеуказанные покрытия могут применяться при работе в условиях сухого и полусухого трения, при гидроабразивном воздействии на изнашиваемую деталь, в условиях, где происходит микрорезание, а также в агрессивных окружающих средах, где поверхности деталей подвергаются химическому воздействию или коррозии, например, быстроизнашивающиеся детали сельхозтехники (лопатки ускорителя выброса комбайнов, пластины ножей измельчающего барабана жатки, ножи для измельчения кормов, рабочие органы плугов и культиваторов); в автомобиле- и тракторостроении (пары сопряжений: палец-втулка, вал-втулка, ползун-башмак); в металлургической промышленности для деталей, которые подвергаются высоким температурам и агрессивным химическим средам; в химической, пищевой, нефте- и газодобывающей промышленности.

Список литературы

1. Основные причины выхода из строя деталей сельскохозяйственной техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-prichiny-vyhoda-iz-stroya-detaley-selskohozyaystvennoy-tehniki> – Дата доступа: 04.04.2023.

2. **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск: Технология, 2011. – 527 с.

3. **Коробейник, А. В.** Ремонт автомобилей. Практический курс: серия «Библиотека автомобилиста» / А. В. Коробейник. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 512 с.

4. **Коровов, Ю. С.** Анализ свойств газотермических покрытий : учеб. пособие в 2 ч. / Ю. С. Коровов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2016.

5. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 215 с.

6. **Сокоров, И. О.** Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением / И. О. Сокоров, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. – Барановичи: РИО БарГУ, 2012. – 183 с.

7. **Хасуи, А.** Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

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

9. **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.

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

References

1. <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-prichiny-vyhoda-iz-stroya-detaley-selskohozyaystvennoy-tehniki>.

2. **Bogdanovich, P. N.** *Trenie, smazka i iznos v mashinah : uchebnik* [Friction, lubrication and wear in machines: a textbook] / P. N. Bogdanovich, V. Ya. Prushak, S. P. Bogdanovich. – Minsk: Technology Publ., 2011. – 527 p.

3. Korobeynik, A. V. *Remont avtomobilej. Prakticheskij kurs: seriya "Biblioteka avtomobilista"* [Car repair. Practical course: series "Library of a motorist"] / A. V. Korobeynik. – Rostov n/D: Feniks Publ., 2004. – 512 p.

4. Korobov Yu. S. *Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytij: ucheb. posobie v 2 ch* [Analysis of the properties of gas-thermal coatings: [text-book. manual] in 2 hours] / Yu. S. Korobov, V. I. Panov, N. M. Razikov. – Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2016.

5. Lovshenko, F. G. *Kompozicionnye nanostrukturnye mekhanicheski legirovannye poroshki dlya gazotermicheskikh pokrytij* [Composite nanostructured mechanically alloyed plates for gas-thermal coatings] / F. G. Lovshenko, G. F., Lovshenko. – Mogilev: Belorussian-Russian University Publ., 2013. – 215 p.

6. Sokolov, I. O. *Tekhnologiya uprochneniya tyazhelonagruzhennykh detalej gazotermicheskim napyleniem* [Technology of hardening of heavily loaded parts by gas thermal spraying] / I. O. Sokolov, N. V. Spiridonov, M. V. Neroda. – Baranovichi: Baranovichi State University Publ., 2012. – 183 p.

7. Hasui, A. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying] / A. Hasui, O. Morigaki. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. – 240 p.

8. Tekhnologiya formirovaniya iznosostojkikh pokrytij na zheleznoj osnove metodami lazernoj obrabotki [Technology of forming wear-resistant coatings on an iron base by laser processing methods] / O. G. Devoino [et al.]. – Minsk: BNTU Publ., 2020. – 280 p.

9. Gilev, V. G. *Lazernoe poverhnostnoe 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.

10. Sposoby polucheniya iznosostojkikh materialov dlya zashchitnykh pokrytij s ispol'zovaniem litejno-metallurgicheskikh metodov [Methods for obtaining wear-resistant materials for protective coatings using foundry-metallurgical methods] / A. G. Slutsky [et al.] // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhdzheodstvennyj sbornik nauchnykh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*. – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vol. 42. – P. 216–224.

Поступила 20.10.2023

Received 20.10.2023