

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С НАНОУГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

И. О. Соколов<sup>1</sup>, Э. А. Ванюк<sup>2</sup>, Д. В. Куис<sup>3</sup>, Д. Н. Лобко<sup>4</sup>, Д. В. Шейбак<sup>5</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, проректор по научно-методической работе УО «Республиканский институт профессионального образования», Минск, Беларусь, e-mail: sokorov@yandex.ru

<sup>2</sup> Магистр технических наук, аспирант, мл. науч. сотрудник ОНИП плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и проектирование технических систем» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь

<sup>4</sup> Магистр технических наук, аспирант Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь

<sup>5</sup> Магистрант Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь

## Реферат

В статье изложены результаты исследований структуры и физико-механических свойств композиционных газотермических покрытий, модифицированных нанокремнекислотными компонентами, с применением последующей лазерной обработки напыленных покрытий.

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, нанокремнекислотные компоненты, лазерная обработка, физико-механические свойства.

## RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GAS-THERMAL COMPOSITE COATINGS WITH NANOCARBON COMPONENTS MODIFIED BY LASER PROCESSING

I. O. Sokorov, E. A. Vanyuk, D. V. Kuis, D. N. Lobko, D. V. Sheybak

## Abstract

The article presents the results of studies of the structure and physical and mechanical properties of composite thermal gas coatings modified with nanocarbon components, with the use of subsequent laser treatment of the sprayed coatings.

**Keywords:** gas thermal spraying, nanocarbon components, laser processing, physical-mechanical properties.

## Введение

Повышение износостойкости и коррозионной стойкости поверхностей деталей машин актуально для различных отраслей техники. При постоянном повышении качества машин и механизмов повышаются и требования к узлам трения. К таким требованиям относятся: снижение шума в узлах, снижение вибраций в узлах, повышение срока службы узлов. Для улучшения этих показателей применяются легированные стали со специальными свойствами, которые не производятся в Республике Беларусь, а закупаются за границей.

Для решения этой проблемы необходимо развивать новый подход к выбору материалов на стадии проектирования, а именно – газотермическое нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности деталей, либо на уже изношенные поверхности.

В настоящее время известна большая группа металлов с высокими эксплуатационными свойствами – это баббиты и самофлюсующиеся сплавы на основе железа, никеля, хрома и меди. Но метод нанесения этих покрытий трудоемкий и энергозатратный. Для повышения физико-механических свойств, а также ресурса быстроизнашиваемых деталей, предлагается исследовать направление по внедрению нанокремнекислотных компонентов в газотермические композиционные покрытия на основе модификации углерода – фуллерены.

Обычно под словом фуллерен имеют в виду чистый C<sub>60</sub> или C<sub>70</sub>, но эти модификации очень дорога. Поэтому не менее интересным материалом является фуллереновая сажа – это новый нанокластерный материал, в котором фуллерена содержится от 1 до 10 %, остальное – углеродная сажа [1, 2].

В газотермические композиционные покрытия в таблице 1 вводилась добавка в виде нанокремнекислота «фуллереновой сажи» до 10% от напыляемого порошка. В качестве технологии нанесения покрытия производилось газопламенное напыление и лазерное оплавление.

**Методы нанесения покрытия на образцы, марки покрытий, состав основы** приведены в таблице 1.

Исследуемые образцы с покрытиями приведены на рисунке 1.

Образцы на рисунке 1 подвергались газопламенному напылению и лазерному оплавлению. В процессе лазерного оплавления обрабатывались различные режимы и были выбраны оптимальные: толщина покрытия при газопламенном напылении h≈0,5 мм; мощность лазерного излучения P=1 кВт; развертка 400×050; расстояние от сопла до поверхности образца l=350 мм; ширина луча b=5 мм; скорость перемещения луча  $v = 300 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$ .

Таблица 1 – Сводная таблица

Марка порошка	Химический состав**	Технология
ПГ-СР4	Осн. Ni; 13-17%Cr; 0,6-1%С; 3-5%Si; 2,5-4%B; 4%Fe	гн+ло
ПР-БрОНСР	основа Cu; 8% Sn; 5% Ni; 1%Si; 1%B	гн+ло
ПН-НД-42	осн. Ni – Cu; 42,5%Cu; 0,2%С; 0,9%Si; 1%B; до3%Fe	гн+ло
ПР-Х4ГСР	Осн. Fe; 3,8% Cr; 1,2% С; 2,5% Si; 2,2% В; 0,5% Cu	гн+ло
ПГ-19М-01	основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al	гн+ло
ПТ-ЮНХ16СР3	Осн. Ni; 0,7% С; 16% Cr; 3,2% Si; 2,6% В; 1,2% Al	гн+ло

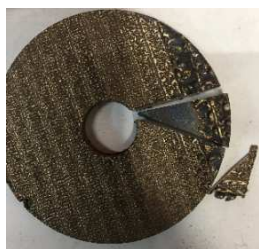
\* гн+ло – газопламенное напыление с лазерным оплавлением;

\*\* основа +10% нанокремнекислотных компонентов



Образец № 1

На рисунке 3 представлена фотография результата лазерного оплавления образца ПР-БрОНСП с добавкой 10% наноуглерода.



Образец № 2



Образец № 3



Образец № 4



Образец №5



Образец №6

Рисунок 1 – Исследуемые образцы с покрытиями после лазерного оплавления

Покрытие на образце 2 при режимах со скоростью луча  $v=300$  мм/мин полностью прогорало. А при повышении скорости не проплавились основа, как результат – отслоение покрытия (рис. 2).



Рисунок 2 – Образец 2В при различных режимах лазерного оплавления (каждая полоска соответствует определенному режиму оплавления)



Рисунок 3 – Фотография образца из материала ПР-БрОНСП с добавкой 10% наноуглерода после лазерного оплавления

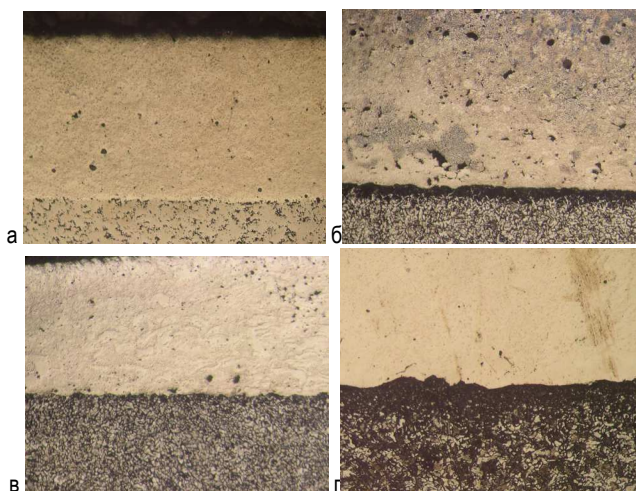
Для покрытий с введением наноуглеродов, модифицированных лазерной обработкой, рекомендуется производить образцы с толщиной основы не менее 8 мм для дальнейших исследований на износостойкость и коэффициент трения. Толщина покрытия рекомендуется не менее 1 мм, чтобы устранить растрескивание покрытия. Трещинообразование, по-видимому, обусловлено возникающими остаточными напряжениями растяжения.

Анализ результатов предварительных исследований влияния наноконструктивных компонентов на свойства покрытий показал, что необходимо проводить дальнейшие исследования для сопоставления изменения физико-механических свойств покрытий и их эксплуатационных характеристик.

#### Исследование микроструктуры упрочненных слоев

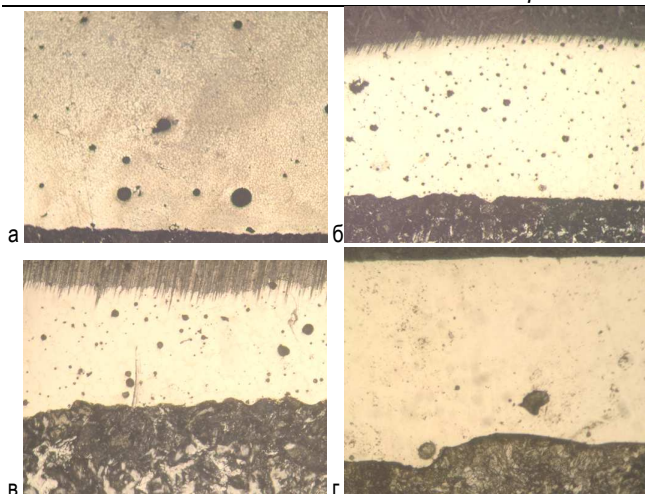
Методами световой микроскопии, методами измерения микротвердости было исследовано структурное состояние и показатели механических свойств образцов композиционных газотермических покрытий, нанесенных газопламенным способом и с применением лазерного оплавления с добавками 2%, 5% и 10% фуллереновой сажи.

Результаты исследования микроструктуры и тонкой структуры исследуемых образцов в световом микроскопе представлены на рисунках 4–8.

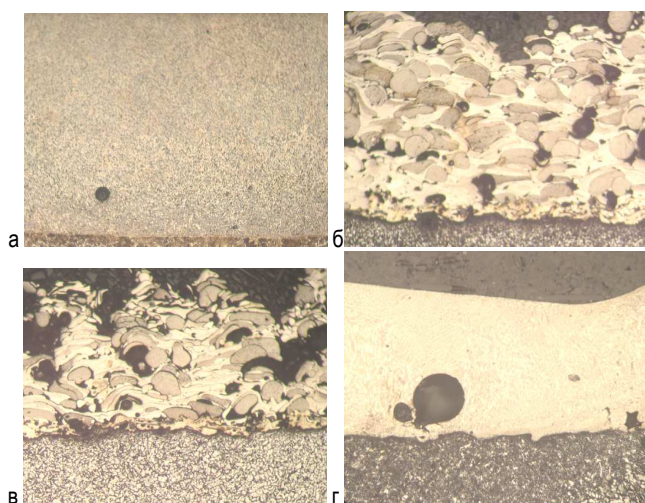


а – без наноуглерода; б – 2%; в – 5%; г – 10%

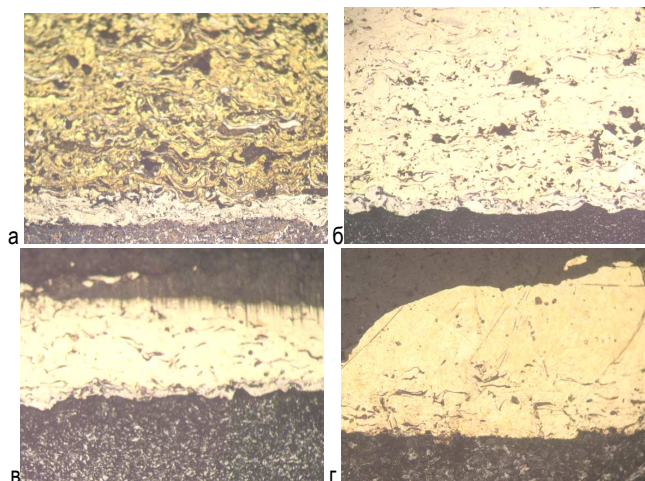
Рисунок 4 – Микроструктура образца ПГ-СП4



а – без нанougлерода; б – 2%; в – 5%; г – 10%  
Рисунок 5 – Микроструктура образца ПН-НД-42



а – без нанougлерода; б – 2%; в – 5%; г – 10%  
Рисунок 6 – Микроструктура образца ПР-Х4ГСП



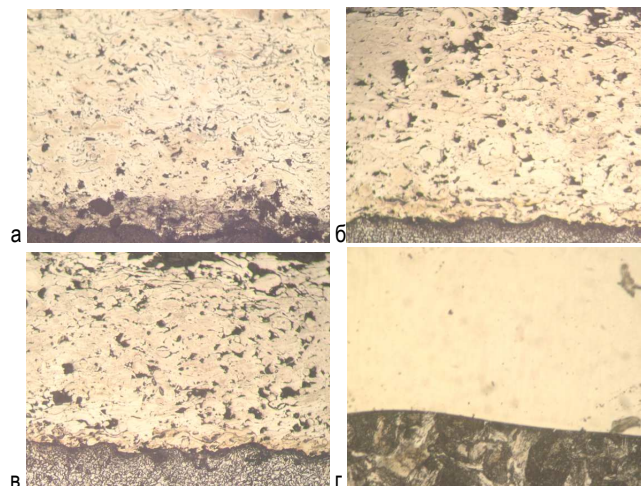
а – без нанougлерода; б – 2%; в – 5%; г – 10%  
Рисунок 7 – Микроструктура образца ПГ-19М-01

При газопламенном оплавлении пористость покрытий  $\approx 2-4\%$ , а при лазерном оплавлении пористость покрытий составляет  $\approx 1-3$ . Исследования показали, что введение наноструктурированного углерода и самофлюсующихся порошков позволило уменьшить пористость покрытий. Оплавление обеспечивает диффузию углерода в подложку и тем самым формирование упрочненного переходного слоя.

### Исследование микротвердости упрочненных слоев

Для измерений использовали твердомер DuraJet фирмы Struers (Дания). Проведение испытаний проводилось по стандартной методике. Использовался метод Роквелла (шкала В, С).

В таблице 2 представлены композиции для напыления и технология формирования покрытий. В основной порошок производилась добавка нанougлеродных компонентов: 2% - А; 5% - Б; 10% - В. Для наглядности результатов в таблице 2 сравнивалась твердость покрытий, нанесенных газопламенным напылением с газопламенным оплавлением (го) и нанесенных газопламенным напылением с лазерным оплавлением (ло).



а – без нанougлерода; б – 2%; в – 5%; г – 10%  
Рисунок 8 – Микроструктура образца ПТ-ЮНХ16СР3

Результаты испытаний на твердость исследуемых образцов покрытий представлены в таблице 2 и на рисунке 9.



Рисунок 9 – Диаграмма результатов определения твердости образцов покрытий

Определено, что введение нанougлеродных компонентов в состав покрытий с газопламенным оплавлением приводит к уменьшению их твердости, а при лазерном оплавлении твердость в образцах 1В, 4В и 6В значительно повышается.

### Основные результаты исследования

При внедрении компонентов фуллереновой сажи в газотермические композиционные покрытия происходит увеличение твердости покрытий на 25...40%, коэффициента трения снижается на 40...50% и износостойкость упрочняемых поверхностей повышается в 1,5-3,6 раза.

Исследования показали, что введение наноструктурированного углерода в самофлюсующиеся порошки позволило уменьшить пористость покрытий с 5...7%, до  $\approx 1...3\%$ . Оплавление обеспечивает диффузию углерода в основу и тем самым формирование упрочненного переходного слоя.

Таблица 2 – Составы и твердость исследуемых образцов покрытий

№ образца	Марка порошка	Химический состав порошка	Добавка С, %	Твердость, НВ
1 (го)*	ПГ-СР4	Основа Ni; 13-17% Cr; 0,6-1% C; 3-5% Si; 2,5-4% B; 4% Fe	-	481
1А (го)			2	301
1 Б (го)			5	264
1 В (го)			10	234
1В (ло)**			10	667
3 (го)	ПН-НД-42	Основа Ni-Cu; 42,5% Cu; 0,2% C; 0,9% Si; 1% B; до 4% Fe	-	264
3А (го)			2	180
3Б (го)			5	169
3В (го)			10	156
3В (ло)			10	250
4 (го)	ПР-Х4ГСР	Основа Fe; 3,8% Cr; 1,2% C; 2,5% Si; 2,2% B; 0,5% Cu	-	577
4А (го)			2	319
4Б (го)			5	294
4В (го)			10	228
4В (ло)			10	733
5 (го)	ПГ-19М-01	Основа Cu; 4% Fe; 8,5-10% Al	-	144
5А (го)			2	156
5Б (го)			5	139
5В (го)			10	137
5В (ло)			10	139
6 (го)	ПТ-ЮНХ16СР3	Основа Ni; 16% Cr; 0,7% C; 3,2% Si; 2,6% B; 1,2% Al	-	443
6А (го)			2	496
6Б (го)			5	222
6В (го)			10	208
6В (ло)			10	704

(го)\* — газопламенное оплавление;

(ло)\*\* — лазерное оплавление.

Анализ результатов предварительных исследований влияния нано-компонентов на свойства покрытий показал, что необходимо проводить дальнейшие исследования для сопоставления изменения физико-механических свойств покрытий и их эксплуатационных характеристик.

#### Список цитированных источников

- Горелик, О. П. Кластерная структура частиц фуллереносодержащей сажи и порошка фуллеренов C<sub>60</sub> // О. П. Горелик, Г. А. Дюжев, Д. В. Новиков, В. М. Ойченко, Г. Н. Фурсей // Журнал технической физики – 2000. – Том 70. – Вып. 11. – С. 118–125.
- Мастеров, В. Ф. Физические свойства фуллеренов // Соровский образовательный журнал. – № 1 – 1997. – С. 92–99.
- Бородин, В. И. Термическая устойчивость фуллеренов / В. И. Бородин, В. А. Трухачева // Письма в ЖТФ. – 2004. – Том 30. – Вып. 14. – С. 53–55.
- Исакаев, Э. Х. Повышение ресурса деталей с газотермическими покрытиями нефтепромышленного оборудования / Э. Х. Исакаев, В. М. Гусев, В. Б. Мордынский // Технология машиностроения. – 2008. – № 12. – С. 18–22.
- Ефремов, С. Ю. Повышение ресурса поршневых компрессионных колец при изготовлении сменно-запасных частей в судоремонте: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новгород, 2005. – 19 с.
- Wille C. G., Tala 'at Al-Kassab, Kirchheim R. Time evolution of morphology in mechanically alloyed Fe-Cu // Ultramicroscopy. – 2011. – № 6(111). – P. 730–737.
- Mechanochemical synthesis of Mo-Cu nanocomposite powders / Aokui Sun, Dezhi Wang, Zhuangzhi Wu, Qijun Cheng // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – № 5(509). – P. 74–77.

#### References

- Gorelik, O. P. Klasterная структура chastic fulleremosoderzhashchey sazhi i poroshka fullerenov S<sub>60</sub> // O. P. Gorelik, G. A. Dyuzhev, D. V. Novikov, V. M. Ojchenko, G. N. Fursej // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki – 2000. – Tom 70. – Vyp. 11. – S. 118–125.
- Masterov V. F. Fizicheskie svojstva fullerenov // Sorovskij obrazovatel'nyj zhurnal. – № 1 – 1997. – S. 92–99.
- Borodin, V. I. Termicheskaya ustojchivosť fullerenov / V. I. Borodin, V. A. Truhacheva // Pis'ma v ZHTF. – 2004. – Tom 30. – Vyp. 14. – S. 53–55.
- Isakaev, E. X. Povyshenie resursa detalej s gazo-termicheskimi pokrytiami neftepromyslovogo oborudovaniya / E. X. Isakaev, V. M. Gusev, V. B. Mordynskij // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2008. – № 12. – S. 18–22.
- Efremov, S. YU. Povyshenie resursa porshnevnyh kompressionnyh kolec pri izgotovlenii smenno-zapasnyh chastej v sudoremonte: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – Novgorod, 2005. – 19 s.
- Wille C. G., Tala 'at Al-Kassab, Kirchheim R. Time evolution of morphology in mechanically alloyed Fe-Cu // Ultramicroscopy. – 2011. – № 6(111). – P. 730–737.
- Mechanochemical synthesis of Mo-Cu nanocomposite powders / Aokui Sun, Dezhi Wang, Zhuangzhi Wu, Qijun Cheng // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – № 5(509). – P. 74–77.

Материал поступил в редакцию 12.10.2020