

УДК 621.762

**РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
САМОФЛЮСЮЩЕГОСЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОРОШКОВОГО  
МАТЕРИАЛА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ  
НА РАБОЧУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ВТУЛКИ ПОДШИПНИКА  
ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

**Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П.***ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,  
e-mail: mpkuhtik@gmail.com*

Проанализированы основные направления современных разработок в области порошковых материалов для газотермических покрытий. Разработан состав и технология получения самофлюсующегося порошка ПГНТ-1 для нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность втулки подшипника газоперекачивающего агрегата. Приведены зависимости относительной износостойкости порошков ПГ-СР3 и ПГНТ-1 от температурного интервала кристаллизации и времени оплавления покрытия. Порошок ПГНТ-1 обладает твердостью и износостойкостью, сравнимой с покрытием из порошка ПГ-СР3, но имеет меньшую температуру оплавления и более широкий интервал кристаллизации. Проведенные испытания газоплазменных покрытий из порошка системы С-Сг-В-Си-Сu-Зn-Нi в условиях граничного и сухого трения свидетельствуют о хорошей и быстрой прирабатываемости пар трения ПГНТ-1 и стали 40Х. Рассмотрены преимущества лазерного оплавления газотермических покрытий, их микроструктура и характеристики после оплавления. Приведены результаты сравнительных испытаний на изнашивание образцов, подвергнутых лазерной отделочно-упрочняющей обработке (ЛОУО). В результате ЛОУО снижается шероховатость обработанного ролика и при работе образца в паре с этим роликом уменьшается его износ. Кроме того, повышается износостойкость упрочняемой детали и снижается приработочный износ антифрикционного вкладыша.

**Ключевые слова:** самофлюсующиеся гетерогенные порошковые материалы, вращающиеся пары трения, газотермические покрытия, лазерное оплавление

**DEVELOPMENT OF COMPOSITION AND TECHNOLOGY OF GETTING  
OF SELF-FLUXING HETEROGENEOUS POWDER MATERIAL  
FOR DEPOSITION OF WEARPROOF COATINGS ON WORK SURFACE  
OF BEARING SLEEVE OF GAS-COMPRESSOR UNIT**

**Serdobintsev Yu.P., Kukhtik M.P.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical  
University», Volgograd, e-mail: mpkuhtik@gmail.com*

Main directions of modern developments in the field of powder materials for gas-thermal coatings have been analyzed. The composition and the technology of production of self-fluxing powder PGNT-1 for deposition of wearproof coatings on work surface of bearing sleeve of gas-compressor unit have been developed. The dependencies of relative wear resistance of the powders PG-SR3 and PGNT-1 on temperature crystallization range and time of coating infusion have been represented. The powder PGNT-1 has hardness and wear resistance, which is comparable with coating of the powder PG-SR3, but has smaller infusion temperature and wider crystallization range. The carried out tests of gas-thermal coatings of the powder of the system C-Cr-B-Si-Cu-Zn-Ni under the conditions of boundary and dry friction testify to good and fast conformability of friction couples PGNT-1 and steel 40Cr. The advantages of laser infusion of gas-thermal coatings, their microstructure and characteristics after infusion have been considered. The results of comparison tests on wear of samples, which had been subjected to laser finishing and hardening processing (LFHP), have been represented. As a result of LFHP roughness of processed roller is reduced and its wear decreases, when sample operates in pair with this roller. Besides, wear resistance of hardening part rises and attrition wear of antifriction bushing is reduced.

**Keywords:** self-fluxing heterogeneous powder materials, rotating friction couples, gas-thermal coatings, laser infusion

Защитные порошковые газотермические покрытия наносятся на рабочие поверхности трущихся деталей газоперекачивающих агрегатов для повышения основных триботехнических параметров (линейный износ, коэффициент трения, отсутствие схватывания и др.). Для создания указанных покрытий могут быть использованы сплавы системы Cu-Zn-Cr-B-Si-Fe, C, Ni, полученные путем механического легирования с последующим просеиванием

через специальные сита до заданной дисперсности. Для достижения заданной пористости (3–4 %) целесообразна разработка технологии лазерного оплавления, позволяющая обеспечить смазочную способность в экстремальных условиях эксплуатации пар трения, например когда смазка не поступает в зону трения. Целью настоящего исследования является разработка износостойких газотермических покрытий, отвечающих эффекту безызносности

(Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский [1, 2]) за счет образования на трущихся поверхностях эвтектического слоя системы Ni-Cu-Zn-B-Si-Cr с низким модулем сдвига.

*Анализ современных порошковых материалов для газотермических покрытий*

Для сложных неоднородных моделей, которой является модель трения и износа подшипника скольжения с износостойким покрытием поверхностного рабочего слоя втулки, важен системный подход, в основе которого лежит рассмотрение процесса контактного взаимодействия как сложной и развивающейся по мере совершенствования наших знаний о природе трения и изнашивания системы, состоящей из множества подсистем. К одной из таких подсистем относится структурная модель материала покрытия, определяющая с позиций физики граничного трения и теории усталостного разрушения требования к размерам, форме, механическим характеристикам и другим факторам, обеспечивающим рациональную смазочную способность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Эти требования определяют принципы конструирования износостойких порошковых композиционных материалов, методы их нанесения и технологию обработки покрытий, позволяющие реализовать на практике рациональные физические аспекты модели трения и износа [3].

Порошки являются основным видом материалов, используемых при газоплазменном, плазменном, лазерном и детонационном способах нанесения покрытий.

К основным направлениям разработок в области порошков для газотермических покрытий следует отнести [4–6]:

1. Развитие научных основ целевой разработки материалов для газотермического напыления, обеспечивающих получение покрытий с заданными свойствами.

2. Расширение ассортимента напыляемых материалов главным образом за счет создания новых типов сплавов, механических смесей и композиционных порошков.

3. Экономия дефицитных компонентов за счет создания и использования безникелевых и малоникелевых, безвольфрамовых твердых сплавов для газотермического напыления.

4. Снижение затрат на порошки для напыления за счет применения для этих целей природных материалов и отходов производства.

В систему целевой разработки порошков для получения покрытий с заданными свойствами в качестве основного элемента входит этап конструирования порошка. Наиболее гибким путем его решения является создание композиционных порошков.

Разработка самофлюсующихся твердых сплавов на основе железа с сохранением триботехнических характеристик, с одной стороны, позволит снизить относительно высокую стоимость хромоникелевых сплавов, а с другой – такие сплавы имеют большую функциональную предназначенность. Перспективным является применение в парах трения порошковых антифрикционных сплавов с пониженной температурой оплавления, обеспечивающих высокое качество покрытия и основного металла.

*Технология получения самофлюсующегося порошка для нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность втулки подшипника газоперекачивающего агрегата*

Для увеличения износостойкости, ударной вязкости в порошок на основе никеля, содержащий углерод, хром, бор, кремний, медь, дополнительно вводится цинк, увеличено содержание меди, кремния и бора до пропорций, изменяющих механизм оплавления. Назовем его ПГНТ-1 (порошок гранулированный с низкой температурой оплавления).

Порошки типа ПГ-СРЗ имеют узкий интервал кристаллизации. Увеличение выдержки при оплавлении покрытия может привести к укрупнению и огрублению структуры покрытия, что снижает его износостойкость. Зависимости относительной износостойкости  $\varepsilon$  (безразмерная величина) от интервала кристаллизации и времени оплавления показаны на рис. 1 и 2 [3]. Порошок ПГ-СРЗ (ГОСТ 21448-75) имеет состав: 0,4–0,7% С, 13,5–16,5% Cr, 2,5–3,5% Si, 2–2,8% В, не более 5% Fe, остальное – Ni.

Оптимальное количество компонентов подбирали таким образом, чтобы придать покрытиям из них свойства самофлюсования, пониженную температуру оплавления, хорошую смачиваемость и текучесть при сохранении хороших механических свойств. Механизм оплавления разработанного порошка отличается от механизма оплавления известных порошковых композиций тем, что оплавляется только легкоплавкая матрица в широком интервале температур до 100 °С. Соотношение легкоплавких компонентов подбирали таким образом, чтобы они образовывали твердые растворы и эвтектические композиции с низкой температурой плавления с бором и кремнием. Хром образует с бором и углеродом карбоборидные твердые включения, равномерно распределенные в упругопластичной матрице, придающие сплаву износостойкость, так как приложенная нагрузка действует на твердые фазы, а в матрице происходит релаксация напряжений.

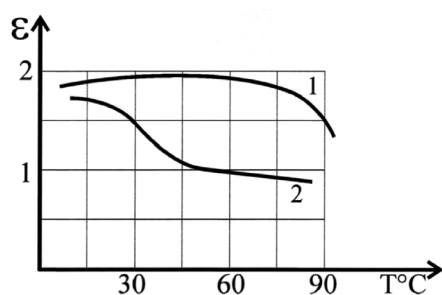


Рис. 1. Зависимость относительной износостойкости от температурного интервала кристаллизации:  
1 – относительная износостойкость ПГ-СРЗ;  
2 – относительная износостойкость ПГНТ-1

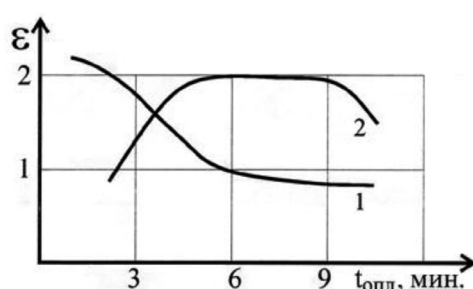


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости от времени оплавления покрытия: 1 – относительная износостойкость ПГ-СРЗ;  
2 – относительная износостойкость ПГНТ-1

Порошок для нанесения покрытий получают сфероидизацией расплава. Исходные компоненты в мелком количестве и мелких фракциях тщательно перемешивают в течение 10–12 ч, затем в установке для распла-

ва в среде инертного газа, проходя горячую зону 1300–1400 °С, расплавляются и сфероидизируются. Продолжая падение в холодной зоне, порошки кристаллизуются. На виброситах отсеивается фракция 40–120 мкм.

Частицы порошка имеют гетерогенную структуру, состоящую из нескольких фаз: сложнолегированного твердого раствора на основе никеля, боросилицидной эвтектики и карбоборидной фазы с дендритным параметром 10–15 мкм. Режим оплавления: выдержка в печи при температуре 850–880 °С в течение 4–9 мин. Структура покрытия носит наследственный характер [3].

Сравнительные характеристики состава и свойства покрытия приведены в табл. 1. Порошок по [7] имеет состав: 16–18 % Cu, 4–5 % В, 6–8 % Si, остальное – Ni.

Газотермические покрытия из самофлюсующихся сплавов с пониженной температурой оплавления (830–870 °С) и широким интервалом кристаллизации позволяют сохранить наследственные параметры порошка при оплавлении, которое производится по принципу жидкофазного спекания с оплавлением легкоплавной матрицы и равномерным распределением в ней армирующей фазы. В системе Ni-Cu-Zn-B-Si-Cr, которая использовалась при газотермическом напылении на рабочую поверхность втулки подшипника, при 340 °С образуется расплав Zn. Жидкая фаза смачивает медь, растекается по ее поверхности и, диффундируя, обрадует твердый раствор Cu-Zn и химические соединения. При контактом взаимодействии меди с цинком образуется переходной слой из α-твердого раствора цинка в меди и эвтектики α + β' [3].

Таблица 1

Химический состав и свойства покрытий из порошка ПГНТ-1

| № примера | Ингредиенты и их количественное содержание |    |         |     |       |     |      |      | Свойства и показатели      |                            |                                           |
|-----------|--------------------------------------------|----|---------|-----|-------|-----|------|------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
|           | Cu                                         | Zn | Cr      | B   | Si    | Fe  | C    | Ni   | Температура оплавления, °С | Твердость HRC <sub>2</sub> | Температурный интервал кристаллизации, °С |
| 1         | 12                                         | 12 | 2       | 1   | 3     | –   | –    | ост. | 930                        | 50                         |                                           |
| 2         | 14                                         | 14 | 2       | 2   | 4     | –   | 0,1  | ост. | 920                        | 52                         |                                           |
| 3         | 15                                         | 15 | 3       | 3   | 5     | –   | 0,1  | ост. | 910                        | 52                         |                                           |
| 4         | 16                                         | 16 | 4       | 4   | 6     | –   | 0,15 | ост. | 870                        | 52                         |                                           |
| 5         | 18                                         | 18 | 5       | 4   | 7     | –   | 0,2  | ост. | 850                        | 50                         | 80...100                                  |
| 6         | 20                                         | 19 | 6       | 5   | 7     | –   | 0,2  | ост. | 830                        | 49                         |                                           |
| 7         | 22                                         | 20 | 6       | 5   | 8     | –   | 0,25 | ост. | 820                        | 48                         |                                           |
| 8         | 23                                         | 21 | 7       | 6   | 9     | –   | 0,3  | ост. | 800                        | 42                         |                                           |
| 9         | 24                                         | 33 | 8       | 7   | 10    | –   | 0,4  | ост. | 790                        | 42                         |                                           |
| 10        | Порошок по [7]                             |    |         |     |       |     |      |      |                            |                            |                                           |
| 11        | 7...9                                      | –  | 15...16 | 2,8 | 3...4 | 3,8 | 0,6  | ост. | 1130                       | 50                         | 20...40                                   |
| 12        | –                                          | –  | –       | 3,5 | –     | 4,6 | 0,9  | ост. | –                          | –                          | –                                         |

Плазменное покрытие из самофлюсующегося порошка ПГНТ-1, состоящее из Cr, B, Cu, Zn, Si, C, содержит поры, некоторые из которых заполнены медью или твердым раствором Cu-Zn. В условиях трения мягкие пластичные зерна меди выдавливаются и размазываются по рабочим поверхностям, о чем свидетельствует характерный блеск: по мере расхождения медной пленки в процессе трения происходит ее подпирывание из металлографических объемов. Отсутствие задигов и низкая контактная температура при сухом трении объясняются изменением условий трения после того, как в зоне контакта образовалась сервитная пленка меди. Структура покрытия, состоящая из пластической матрицы на основе Ni с легкоплавкими компонентами Cu и Zn и тугоплавкими карбоборидными фазами  $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{B}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{B}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , равномерно распределенными в упруго-пластической матрице, отличается хорошей износостойкостью, так как действующая нагрузка воспринимается твердыми фазами, а в матрице происходит релаксация напряжений. Проведенные испытания газоплазменных покрытий из порошка системы C-Cr-B-Si-Cu-Zn-Ni в условиях граничного и сухого трения свидетельствуют о хорошей и быстрой прирабатываемости пар трения ПГНТ-1 и стали 40X.

Оптимальный состав порошка приведен в примерах 4–7 табл. 1. Самофлюсующийся порошок ПГНТ-1 обладает твердостью и износостойкостью, сравнимой с покрытием из порошка [7], но имеет меньшую температуру оплавления и более широкий интервал кристаллизации.

#### *Лазерное оплавление газотермических покрытий*

Общим для методов газотермического нанесения покрытий является то, что напыляемый материал ускоряется, нагревается, пластифицируется или плавится в высокотемпературном потоке газов. На поверхность обрабатываемой детали напыляемый материал поступает в виде потока пластифицированных частиц или жидких капель, которые ударяются об основу и закрепляются на ней, образуя покрытие. Принято различать методы газотермического нанесения покрытий по уровню термического воздействия на поверхность основы и напыляемый материал, так как в них используются различные источники тепла.

Из анализа литературы [8, 9] видно, что по коэффициенту использования материала (КИМ) и по коэффициенту тепловложения лазерная наплавка является наиболее предпочтительным способом для нанесения из-

носостойких покрытий на ответственные детали технологического оборудования.

Интенсивное развитие производства мощных лазеров, как с непрерывным, так и импульсным характером излучения, открывает новые возможности в создании новых эффективных технологий оплавления покрытий. Использование энергии лазеров может дать решение многих проблем: повышение плотности покрытия путем заплывания пористости (а подбор режима может обеспечить заданную в 3–4% пористость, необходимую для поддержания смазочной способности подшипника скольжения в период критической нехватки смазки, например из-за аварии системы смазки и т.п.), получение аморфизированных и микродисперсных структур, обладающих повышенной износостойкостью и повышенной коррозионной стойкостью, снижение подплавления, подогрева и коробления подложки и реализации еще многих преимуществ в получении высокого качества покрытий.

При лазерной наплавке износостойких самофлюсующихся покрытий их можно наносить на поверхность следующим образом: газоплазменным или плазменным напылением [10, 11], химическим или гальваническим осаждением, нанесением в виде паст или насыпанием в виде порошков; диффузией элементов из газовой или холодной среды; накаткой, напрессовкой и т.п.; электроискровым легированием; накладыванием фольги, проволоки, ленты и т.п.

Для получения широких и протяженных полос (например, внутренней поверхности втулки подшипника газоперекачивающего агрегата) износостойких покрытий наиболее применимым является метод лазерного переплавления покрытий, нанесенных газоплазменным или плазменным напылением (далее газотермических покрытий). Он обладает рядом преимуществ: достаточно полное (до 90%) использование применяемого порошка; отсутствие копти и выгорания легирующих элементов покрытий; возможность автоматизации процесса напыления с последующим оплавлением покрытия (при наличии технологического лазерно-плазменного комплекса).

Эксперименты по лазерному оплавлению напыленных сплавов типа «колмоной» показали, что после полного переплавления в покрытии почти нет пор; при коэффициенте перемешивания 0,1 химический состав оплавленного покрытия близок к исходному химическому составу порошка.

На рис. 3 приведена микроструктура газотермического покрытия из механической смеси порошка ПГСР-4 с добавкой 25%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  после его оплавления с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера модели GTE-975 фирмы «Spectra-

Physics» в непрерывном режиме (мощность излучения  $W = 4$  кВт; подача  $v = 0,7$  м/мин; диаметр сфокусированного луча  $d_{\text{л}} = 8$  мм; коэффициент поглощения лазерного излучения  $\eta_{\text{эф}} = 0,7$ ) [3]. В таких условиях происходит полный термический цикл процесса (нагрев зоны облучения до температуры плавления; образование ванны расплава и ее перегрев, сопровождающийся интенсивным перемешиванием; кристаллизация расплава и охлаждение зоны обработки за счет отвода тепла в массу детали), в результате формируется бездефектное покрытие с высокой адгезионной способностью к основе.

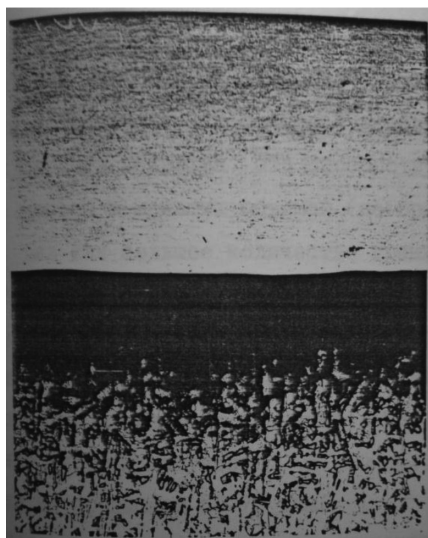


Рис. 3. Микроструктура газотермического покрытия (ПГСП-4 + 25 %  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), оплавленного лазером ( $\times 25$ )

Кроме того, лазерное оплавление газотермических покрытий приводит к «залечиванию» газовых раковин и пор (рис. 4); структура покрытия после оплавления характеризуется высокой дисперсностью и однородностью карбидоборидной фазы по всему объему зоны оплавления, что повышает стабильность физико-механических свойств покрытия. Микротвердость оплавленного поверхностного слоя, его ширина и глубина изменяются незначительно при изменении удельной погонной энергии излучения  $q = W \cdot \eta_{\text{эф}} / (v \cdot d_{\text{л}})$ . Высота микронеровностей не превышает 50–70 мкм.



Рис. 4. Дефектная зона газотермического покрытия (ПГСП-4 + 25 %  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) на границе лазерной дорожки ( $\times 25$ )

Обычно покрытия, оплавленные лазером, имеют нижеприведенные характеристики.

|                                                                                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Толщина слоя, наплавленного за один проход, мм.....                              | 1–1,5 |
| Толщина дефектного слоя, не более, мм.....                                       | 0,1   |
| Потери наплавленного материала, не более, %.....                                 | 1     |
| Глубина зоны термического влияния, не более, мм.....                             | 1     |
| Прочность сцепления с деталью, на которую наносится покрытие, не более, МПа..... | 350   |

При разработке технологии лазерной обработки покрытий (обладающих высокой износостойкостью и антифрикционными свойствами и в первую очередь минимальным суммарным износом пары трения (цапфа вала газоперекачивающего агрегата – втулка подшипника скольжения) и высокой контактной жесткостью) определяющим требованием к ним, с точки зрения триботехнических особенностей разрушения поверхностей, является наличие микрогетерогенной структуры при оптимальной (3–5 %) наследственной пористости [12, 13]. При этом износостойкость покрытий, обладающих большим модулем сдвига, будет достаточно высока, так

как напряжения, возникающие в процессе трения, не будут превышать предельно допустимых, при достижении которых начинается интенсивный износ.

Таким образом, в процессе лазерного оплавления предварительно нанесенных самофлюсующихся покрытий должна быть решена первая технологическая задача – получение микрогетерогенной двух- или трехфазной структуры, состоящей из дисперсных твердых включений размером  $S = 0,5–2$  мкм, равномерно распределенных в менее твердой матрице. При этом поля напряжений от твердых фаз не должны интерферировать. Это условие соблюдается при расстоянии

между источниками возникающих напряжений не менее чем 5S. Решив эту задачу, можно получить структуру покрытия, обеспечивающую наибольшее сопротивление его усталостному триборазрушению.

Однако формирование между трущимися поверхностями вала и втулки газоперекачивающих агрегатов устойчивого граничного слоя вторичных структур, образующихся из адсорбированных молекул смазочного материала, газов, пленок оксидов и продуктов изнашивания, также обуславливает усталостный характер

кого чугуна КЧ37-12 (ГОСТ 1215-79) [14]. При этом наблюдается снижение шероховатости (до 4 раз увеличивается шаг микронеровностей и в 2–3 раза – радиус закругления их вершин) и уменьшение волнистости поверхностей; образуются мелкодисперсные износостойкие структуры; исчезают микротрещины, в результате чего повышается износостойкость и контактная жесткость рабочих поверхностей вала и втулки по сравнению с этими показателями поверхностей, обработанных традиционными методами.

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний на изнашивание образцов, подвергнутых ЛОУО

| Материал ролика | Вид обработки ролика                                   | Твердость                 | Шероховатость $R_a$ , мкм | Износ (мкм) образца из |        |        |
|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|--------|--------|
|                 |                                                        |                           |                           | стали                  | чугуна | бронзы |
| Сталь 40Х       | Закалка +<br>+ отпуск<br>ЛОУО                          | HRC <sub>3</sub><br>51–53 | 0,75                      | –                      | 48     | 93     |
|                 |                                                        | –                         | 0,51                      | –                      | 5      | 70     |
| Сталь 25ХГТ     | Нитроцементация (НЦ)<br>на глубину 0,8 мм<br>НЦ + ЛОУО | 61–62                     | 0,54                      | 57                     | 200    | –      |
|                 |                                                        | –                         | 0,48                      | 28                     | 75     | –      |

изнашивания элементов пары трения. Поэтому на поверхности втулки газоперекачивающего агрегата необходимо иметь наследственно формирующиеся масляные карманы достаточной вместимости.

Следовательно, второй технологической задачей лазерного оплавления покрытий является формирование наследственной пористости. Размеры пор и расстояние между ними должны быть такими, чтобы при обеспечении высокой антифрикционности и задиростойкости смазанных поверхностей трущихся деталей не уменьшалась существенно усталостная прочность износостойких покрытий.

Таким образом, решив указанные технологические задачи, можно повысить усталостную прочность, а следовательно, износостойкость поверхностей составляющих пары «вал – втулка подшипника». Однако обеспечение высоких эксплуатационных свойств этих поверхностей связано с решением еще одной технологической задачи – снижением шероховатости, волнистости и прирабочного износа составляющих пары трения.

Лабораторные исследования и обработка пробных партий деталей типа вала показали, что лазерная отделочно-упрочняющая обработка (ЛОУО) может быть успешно применена для повышения качества поверхностных слоев изделий из сталей 40Х (ГОСТ 4543-71), 25ХГТ (ГОСТ 4543-71), 4Х5МФС (ГОСТ 5950-2000), а также ков-

В табл. 2 приведены результаты сравнительных испытаний на износостойкость образцов (колодок) из бронзы БрОЦС5-5-5 (ГОСТ 613-79), чугуна СЧ21 (ГОСТ 1412-85) и нормализованной стали 20 (ГОСТ 1050-88), работающих в паре с роликами из сталей 40Х и 25ХГТ. Эксперименты проводились на серийно выпускаемой машине для испытаний на трение и износ СМЦ-2, оснащенной образцами типа «ролик – колодка», при следующих условиях: давление 20 МПа; скорость скольжения 40 м/мин; смазочный материал – масло марки И-20А [14].

Как видно из данных табл. 2, в результате лазерной отделочно-упрочняющей обработки ролика и при работе образца в паре с этим роликом уменьшается его износ. Кроме того, повышается износостойкость упрочняемой детали и снижается прирабочный износ антифрикционного вкладыша.

### Заключение

В статье разработан состав и технология получения самофлюсующегося порошка ПГНТ-1 для нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность втулки подшипника газоперекачивающего агрегата (ГПА). Порошок ПГНТ-1 обладает твердостью и износостойкостью, сравнимой с покрытием из порошка ПГ-СРЗ, но имеет меньшую температуру оплавления и более широкий интервал кристаллизации. Проведенные испытания газоплазменных покры-

тий из порошка системы C-Cr-B-Si-Cu-Zn-Ni в условиях граничного и сухого трения свидетельствуют о хорошей и быстрой прирабатываемости пар трения ПГНТ-1 и стали 40Х. Приведены результаты сравнительных испытаний на изнашивание образцов, подвергнутых лазерной отделочно-упрочняющей обработке, в результате которой снижается шероховатость обработанного ролика и износ образца при работе в паре с этим роликом.

Полученные результаты могут быть использованы для изготовления и ремонта опор скольжения ГПА при соответствующей технической базе. Под ремонтом имеется в виду замена вышедших из строя (при авариях) опор ротора ГПА, состоящих из втулок, изготовленных из баббита Б83, которые отливаются и растачиваются под ремонтный размер и цапф ротора, которые шлифуются под новый ремонтный размер.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-41-342001.*

#### Список литературы

1. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. М.: КноРус, 2017. 408 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
3. Сердобинцев Ю.П., Подшипков А.А. Триботехническое моделирование и исследование модифицированных пар трения технологического оборудования: монография. Волгоград: РПК «Политехник», 2002. 179 с.
4. Коробов Ю.С., Панов В.И., Разиков Н.М. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1: Основные методы и материалы газотермического напыления. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 80 с.
5. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование: монография. Минск: Беларуская навука, 2011. 357 с.
6. Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю. Уменьшение абразивного износа у деталей машин с помощью плазменного напыления порошковых материалов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 39. С. 2036–2040.
7. А.с. 1839024 СССР (ДСП), МПК 5 С 22 С 19/03, 4/06. Самофлюсующийся порошок на основе никеля для газотермического нанесения покрытий / Сердобинцев Ю.П., Казначеева Г.И., Косов М.Г. (СССР). 4758439/02; заявлено 09.11.89; опубл. 27.04.96. Бюл. 12.
8. Кузнецов Ю.А., Гончаренко В.В., Кулаков К.В. Инновационные способы газотермического напыления покрытий. Орел: ОрелГАУ, 2011. 124 с.
9. Белый А.В., Калиниченко А.С., Девойно О.Г., Кукареко В.А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. Минск: Беларуская навука, 2017. 457 с.
10. Кузьмин В.И., Ващенко С.П., Гуляев И.П., Картаев Е.В., Сергачев Д.В., Корниенко Е.Е., Долматов А.В. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов // Вестник Югорского государственного университета. 2015. № 2 (37). С. 45–52.
11. Девойно О.Г., Пантелеенко А.Ф. Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 3. С. 249–255. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255.
12. Смулов И.Ю., Дубенская М.А., Григорьев С.Н., Котобан Д.В., Подрабинник П.А. Применение методов лазерной инженерии поверхности для решения трибологических проблем // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 6. С. 682–690.
13. Фельдштейн Е.Э., Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Журек Д., Михальски М. Трибологические характеристики композиционных покрытий, сформированных лазерной наплавкой порошков никелевого самофлюсующегося сплава и бронзы // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 5. С. 588–596.
14. Строганов Г.А., Солдатов В.Ф., Шаравин С.И. Управление морфологией поверхностей с целью повышения их износостойкости путем лазерной обработки // Трение и износ. 1988. Т. 9. № 1. С. 66–72.