

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.792

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ МЕТАЛЛООТХОДОВ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук О.П. ШТЕМПЕЛЬ,  
канд. техн. наук А.В. ДУДАН, канд. техн. наук В.А. ФРУЦКИЙ, С.Ф. ДЕНИСЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены антифрикционные материалы, работающие при высоких скоростях скольжения и больших давлениях. Проанализированы причины высокой износостойкости антифрикционных оловянистых бронз типа БрОФ10-1 в таких условиях. Разработана технология нанесения износостойкого композиционного материала, полученного из отходов механической обработки чугунов с последующим экономным легированием исходного материала в подвижных расходуемых смесях. Показана возможность получения антифрикционного материала со структурой, подобной структурам Шарпи I типа, который не уступает по износостойкости антифрикционным оловянистым бронзам. Химический состав, структуру и свойства нанесенного на рабочую поверхность композиционного материала можно варьировать в широком диапазоне, подбирая оптимальные параметры для конкретных условий. Экономически целесообразно использование в ремонтном производстве предприятий технологии получения композиционного материала на основе металлоотходов серого чугуна с применением термодиффузионного легирования.*

**Введение.** Объектом исследования в данной работе стали подшипники скольжения, применяемые в кривошипно-шатунных механизмах двигателей (КШМ) и узлах кузнечно-прессового оборудования (КПО). Как правило, втулки подшипников скольжения изготавливают цельнометаллическими, из антифрикционных оловянистых бронз.

Экономическая ситуация, сложившаяся сегодня в Беларуси, заставляет предприятия минимизировать расходы на закупку дорогостоящих дефицитных бронз. В результате недостатка антифрикционных материалов оборудование работает в аварийных режимах за пределами допустимых границ безопасной эксплуатации.

Цель работы – разработать антифрикционный материал, обладающий эксплуатационными свойствами, подобными оловянистым бронзам, но с меньшей стоимостью.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ условий работы втулок в цехе КПО Минского подшипникового завода показал:

- а) конструктивное расположение узла затрудняет возможность его монтажа-демонтажа, что ограничивает частоту ремонтных мероприятий;
- б) втулка как опора вала воспринимает нагрузки непосредственно с рабочего органа машины;
- в) распределение нагрузок по рабочей поверхности вала неравномерное (рис. 1);
- г) трибосопряжение работает под действием переменной динамической нагрузки;
- д) режим работы узла – повторно кратковременный, скорость скольжения  $V = 3$  м/с, давление  $P = 5$  МПа;
- е) смазка узла осуществляется посредством закачки консистентного смазочного материала под давлением через технологические каналы в рабочей поверхности втулки. Вид трения трибопары «вал – втулка» – граничный;
- ж) узел работает в условиях запыленности рабочего помещения (на участке присутствовали станки заточной и шлифовальной групп), загрязненности смазочного материала пылью и песком (при длительном периоде эксплуатации на оборудовании отсутствуют кожухи и пылезащитные уплотнения) с содержанием кварца и корунда твердостью 18 и 23 ГПа соответственно.

Металлографические исследования антифрикционных материалов, проводимые на комплексе Nikon EpiPhot 200 BD по стандартным методикам, позволили сделать следующие выводы:

- а) у литых оловянистых бронз наблюдается резко выраженная дендритная структура (рис. 2), причем в осях дендритов содержится олова меньше, чем в междоузлиях пространств, являющихся более легкоплавкими и твердыми;
- б) структура материала соответствует структурам Шарпи I типа и состоит из мягкой матрицы – меди, с равномерно расположенными в ней упрочняющими фазами в виде интерметаллидов  $Cu_{31}Sn_8$  и  $Cu_3P$  [1].

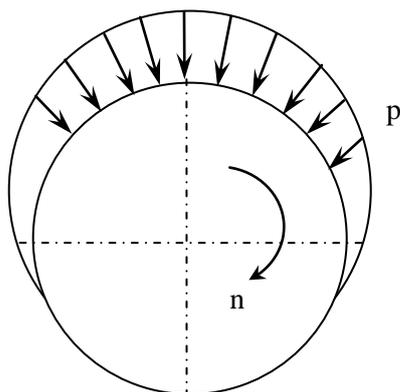


Рис. 1. Эпюра распределения радиальной нагрузки на вал кривошипно-шатунного механизма

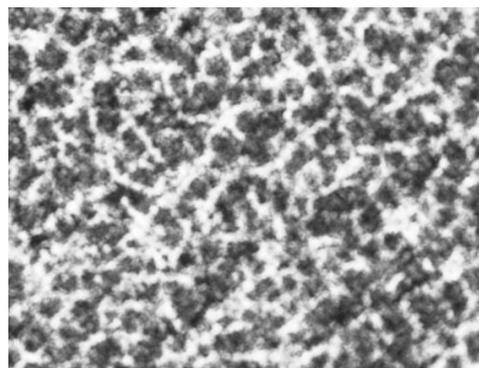


Рис. 2. Структура материала подшипника скольжения из бронзы БрОФ 10-1,  $\times 100$

Основными рабочими режимами, определяющими работу антифрикционного материала в подшипниках скольжения, являются давление и скорость скольжения. Для выбора материала основы рассмотрим рекомендуемые режимы для широко используемых антифрикционных материалов приведенных в таблице 1 [2].

Таблица 1

Допустимые режимы эксплуатации антифрикционных материалов

| Марка материала | Предельные режимы эксплуатации |                                |                               |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                 | давление, $P$ , МПа            | скорость скольжения, $V$ , м/с | $P \cdot V$ , МПа $\cdot$ м/с |
| АЧС-1           | 0,05...9,0                     | 2,0...0,2                      | 0,1...1,8                     |
| АЧС-3           | 0,1...6,0                      | 3,0...0,75                     | 0,3...4,5                     |
| АЧВ-1           | 0,5...12                       | 5,0...1,0                      | 2,5...12                      |
| АЧК-1           | 0,5...12                       | 5,0...1,0                      | 2,5...12                      |
| БрОЦС 5-5-5     | 8                              | 3,0                            | 12                            |
| БрОФ 10-1       | 10                             | 10,0                           | 15                            |
| БрАЖ 9-4        | 15,0                           | 4,0                            | 12                            |
| Полимеры        | До 5                           | До 1                           | –                             |

Анализируя приведенные данные, видно, что при тяжелых эксплуатационных режимах ( $P \geq 5$  МПа,  $V \geq 3$  м/с) целесообразно использовать сплавы с высокими антифрикционными свойствами типа оловянисто-фосфористых бронз. Однако и у сплавов на основе чугунов есть определенные перспективы при применении в подобных условиях эксплуатации. Несмотря на относительно невысокую скорость скольжения, стальная матрица антифрикционных чугунов характеризуется более высоким комплексом механических свойств (HB 160...270) [3]. Втулки подшипников из чугунов применяются с валами, имеющими повышенную твердость поверхности (более 55 HRC<sub>3</sub>). Мягкие антифрикционные чугуны (АЧС-3, АЧВ-2, АЧК-2) могут работать с сопряженным валом из улучшенной стали (25...35 HRC<sub>3</sub>), однако при этом испытываемые нагрузки должны быть небольшими.

В качестве альтернативы дефицитным и дорогостоящим оловянистым бронзам предлагается изготавливать подшипники скольжения из композиционного материала на основе отходов металлообработки серого чугуна с применением термодиффузионного легирования для улучшения эксплуатационных характеристик. Традиционно дополнительное легирование чугунов осуществляется элементами как растворимыми в материале матрицы для повышения несущей способности, так и нерастворимыми, образующими самостоятельные упрочняющие фазы. Исходя из минимизации затрат на восстановление деталей, были проанализированы цены на материалы, которые можно использовать в качестве основы и источников легирующих элементов (табл. 2, 3).

Проанализировав влияние наиболее широко применяемых легирующих элементов на структуру и свойства антифрикционного материала, имеющего основу из серого чугуна, пришли к выводу, что для повышения несущей способности материала целесообразно введение бора, а для повышения антифрикционных свойств – меди [1].

Для получения композиционного материала на основе чугунной стружки, дополнительно легированной бором и медью, предложена оригинальная технология, включающая: сбор стружки и ее сепарирование; отсев нужных фракций (0,06...0,1 мм); диффузионное насыщение стружки в подвижных расходимых смесях по методикам [4]. Полученный материал содержит до 1,5 % бора и около 15 % меди.

Таблица 2

Относительная стоимость чистых элементов по состоянию на 2001 год [1]

|                          |       |      |      |      |       |       |    |
|--------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|----|
| Элемент                  | B     | C    | Ti   | V    | Cr    | Mn    | Fe |
| Стоимость, отн. ед. / кг | 65,4  | 0,2  | 16,5 | 71,5 | 12,9  | 10,5  | 1  |
| Элемент                  | Co    | Ni   | Al   | Si   | Mo    | W     |    |
| Стоимость, отн. ед. / кг | 123,9 | 31,2 | 4,8  | 3,8  | 147,7 | 117,7 |    |

Таблица 3

Относительная стоимость стружечных отходов (ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт»)

| Тип отходов                  | Чугунная стружка | Стружка алюминиевых сплавов | Стружка оловянистой бронзы | Латунная стружка |
|------------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| Относительная стоимость 1 кг | 1                | 10,2                        | 31,0                       | 22,2             |

Получение диффузионно-легированного порошка это только первый этап в достижении антифрикционных свойств материала. Следующий этап – формирование слоя антифрикционного материала на рабочей поверхности детали.

В результате функционально-стоимостного анализа возможных методов нанесения композиционного материала на рабочую поверхность подшипника скольжения было применено плазменное напыление на установке ВДУ-3Д [1].

При применении пробно-аналитического метода выявили оптимальные режимы для нанесения диффузионно-легированного порошка на основе чугунной стружки на деталях типа «втулка», которые представляют собой тонкостенные цилиндры с толщиной стенки 4 мм.

Расход плазмообразующего газа (аргона) при диаметре отверстия сопла 3 мм составил 20 л/мин. Порошковая смесь фракции 0,065...0,1 мм подавалась инъекционным способом. Расстояние напыления 80...120 мм при угле наклона напылительной головки 50...60°; относительное вращение детали – 6 об/мин. Максимальный нагрев подложки ограничивали 500 °С. Напыление начиналось при минимальном расстоянии от детали до сопла. По мере разогрева детали расстояние до сопла увеличивали.

Для дополнительного повышения эксплуатационных свойств возможно введение пористости. Поры как резервуары для смазочного материала при трении выполняют функции, аналогичные функциям мягких антифрикционных фаз в материале. Количественный состав пор при различной силе тока существенно отличается. При уменьшении силы тока до 150 А происходит существенное увеличение пористости материала, вследствие малой пластичности элементных частиц из-за недостаточного нагрева. При увеличении силы тока до 300 А пластичность частиц увеличивается, что приводит к уменьшению пористости материала более чем в два раза (табл. 4).

Таблица 4

Пористость композиционного материала при различной силе тока

| Материал              | Сила тока, А | Пористость, % |              |         |
|-----------------------|--------------|---------------|--------------|---------|
|                       |              | минимальная   | максимальная | средняя |
| Исходная стружка СЧ20 | 200          | 18            | 31           | 24      |
| СЧ20 + В + Cu         | 150          | 18            | 32           | 24      |
| СЧ20 + В + Cu         | 200          | 11            | 22           | 17      |
| СЧ20 + В + Cu         | 300          | 6             | 15           | 11      |

Таким образом, с точки зрения образования антифрикционных структур наиболее оптимальное значение силы тока напыления составляет 300 А.

Для оценки влияния различных технологических факторов экспериментально исследована прочность сцепления  $\sigma_{сц}$  покрытий (табл. 5).

Таблица 5

Прочность сцепления материала при плазменном напылении, МПа

| Сила тока, А | Дистанция напыления, мм |      |      | Прочность сцепления, МПа |
|--------------|-------------------------|------|------|--------------------------|
|              | 80                      | 100  | 120  |                          |
| 100          | 4,8                     | 4,1  | 3,6  | 60...65                  |
| 200          | 7,9                     | 7,2  | 6,6  | 70...75                  |
| 300          | 13,0                    | 13,4 | 12,5 | 80...90                  |

Анализ данных таблиц 4, 5 показал:

- выходной параметр  $\sigma_{сц}$  (МПа) увеличивается с ростом силы тока и уменьшается с увеличением дистанции напыления;

- резкое улучшение адгезии с ростом температуры подложки (в два раза) объясняется не только дополнительной активацией поверхности, но и частичным связыванием адсорбированных поверхностных пленок бором;

- заметное влияние на прочность сцепления оказывает пластичность поверхности контакта. Это может быть достигнуто за счет добавки в поверхностный слой легкоплавкой меди либо напылением пластичного подслоя из никель-алюминиевого порошка.

Для окончательного формирования требуемой микроструктуры композиционного материала применили диффузионный отжиг в печи в защитной атмосфере при температуре 820...860 °С, в течение 6 часов. Нагрев проводили в закрытом, герметичном контейнере при заполнении на  $\frac{3}{4}$  карбюризатором.

Технологию получения антифрикционного композиционного материала можно представить следующим образом:

1) предварительное получение дисперсного материала с требуемым строением и химическим составом частиц;

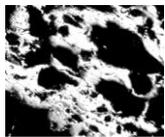
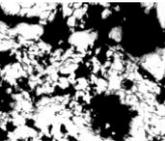
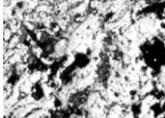
2) формирование рабочего слоя из дисперсного материала;

3) формирование структуры композиционного материала, близкой по конструкции структурам Шарпи I типа, обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства.

Основные результаты металлографических и триботехнических исследований материалов, полученных по предлагаемой технологии, представлены в таблице 6 и на рисунке 3.

Таблица 6

Влияние режимов нанесения материала Сч + В + Си на структуру и пористость покрытия

| Состав материала | Режимы напыления, А | Микроструктура, $\times 300$   | Пористость, % |
|------------------|---------------------|--|---------------|
| Чистый СЧ-20     | 200                 | —  | 9,54          |
| СЧ-20 + В        | 200                 |  | 8,67          |
| СЧ 20 + В + Си   | 150                 |  | 8,27          |
| СЧ 20 + В + Си   | 200                 |  | 6,38          |
| СЧ 20 + В + Си   | 300                 |  | 4,15          |

Установлено, что на строение напыленного слоя решающее значение оказывает сила тока и состав напыляемой порошковой смеси. Строение покрытия, отвечающее эксплуатационным требованиям, показано на рисунке 3. Такое покрытие после термообработки обеспечивает высокий уровень антифрикционных свойств (табл. 7), не уступающих антифрикционным оловянистым бронзам.

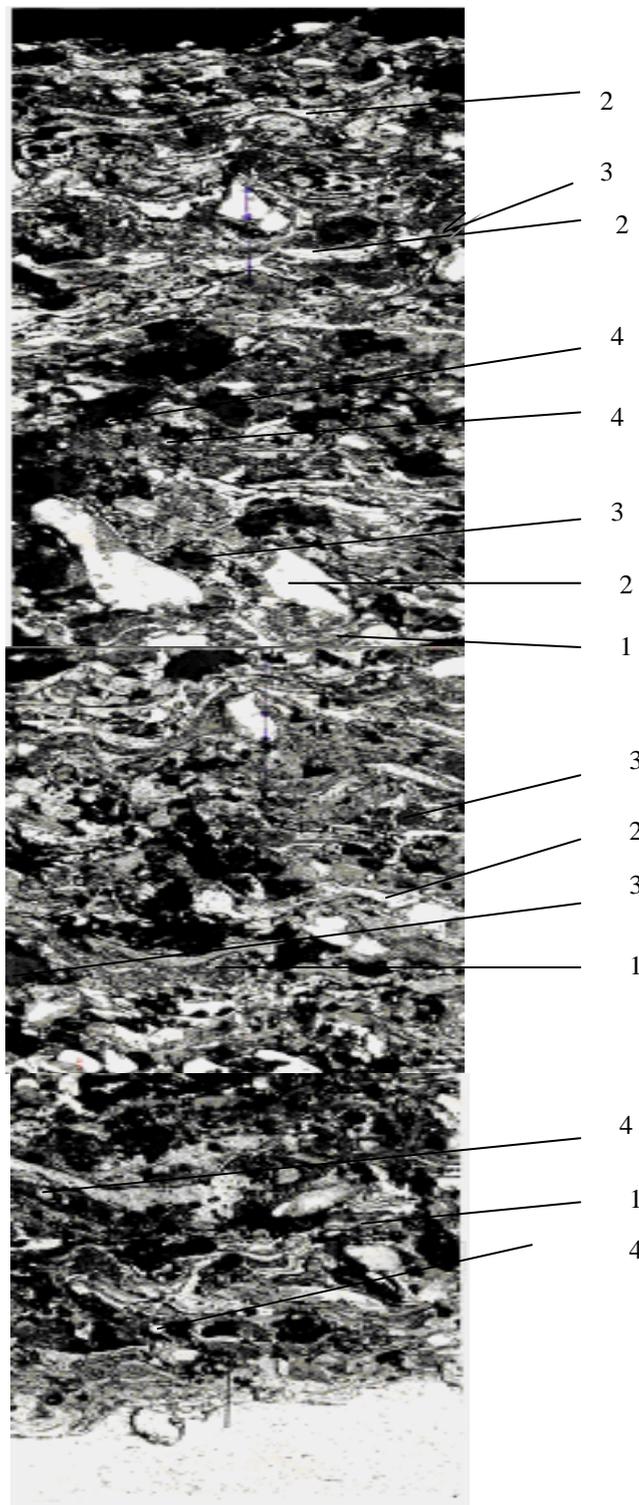


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна,  $\times 300$ :  
1 – участки мелкодисперсной бористой эвтектики; 2 – ламели  $\alpha$ -фазы с фрагментами перлита;  
3 – медистые включения; 4 – боридные, бороцементитные включения

Таблица 7

Износ вкладышей образцов,  $\text{мг} \cdot \text{Е}^{-5}$ 

| Материал      | Путь трения, м |      |       | Твердость, НВ |
|---------------|----------------|------|-------|---------------|
|               | 2000           | 4000 | 6000  |               |
| БрОФ 10-1     | 1,30           | 1,45 | 1,57  | 90            |
| БрОЦС 5-5-5   | 0,95           | 1,67 | 2,95  | 60            |
| БрАЖ 9-4      | 0,85           | 1,19 | 1,75  | 130           |
| СЧ20          | 4,10           | 4,50 | 11,30 | 100           |
| СЧ20 + Cu + В | 1,23           | 1,35 | 1,46  | 90            |
| БрОФ 10-1     | 1,30           | 1,45 | 1,57  | 90            |

Анализ полученных данных свидетельствует, что у композиционного материала, синтезированного из отходов серого чугуна с микроструктурой, подобной структурам Шарпи I типа, эксплуатационные характеристики, в том числе износостойкость, соответствуют показателям антифрикционных материалов на медной основе, что позволяет применять синтезированный материал в качестве заменителя дорогостоящих дефицитных бронз в тяжелонагруженных подшипниках скольжения КШМ и КПО при ремонтных работах.

По результатам проведенной работы можно сделать **выводы** о возможностях разработанной технологии получения композиционного антифрикционного материала:

- возможно формирование материалов на основе стружки серого чугуна с необходимыми для условий эксплуатации химическим фазовым составом и строением;
- разработанная технология позволяет получать материалы с наперед заданными свойствами и с возможностью их регулирования в широких диапазонах;
- возможно получение недорогого материала по свойствам, не уступающим известным антифрикционным материалам.

В современных экономических условиях целесообразно применение в ремонтных производствах промышленных предприятий технологий получения материалов на основе металлоотходов, позволяющих обеспечить высокие эксплуатационные свойства трибосопряжений, не уступающих исходным цельнометаллическим деталям из оловянистых бронз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фруцкий, В.А. Антифрикционный материал из легированной бором и медью чугуновой стружки для подшипников скольжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.А. Фруцкий. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 24 с.
2. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учеб. для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1999. – 336 с.
3. Восстановление деталей машин: справ. / Ф.И. Пантелеенко и др.; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
4. Штемпель, О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О.П. Штемпель. – Новополоцк: ПГУ, 2003. – 24 с.

Поступила 14.05.2009