

УДК 536.12:621.891

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОЙ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ

В. М. КОНСТАНТИНОВ<sup>+</sup>, Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, В. А. ФРУЦКИЙ, В. И. СОРОГОВЕЦ

Приведены результаты экспериментального исследования тепловых процессов в паре трения “газотермическое покрытие из боромеденной чугунной стружки – стальной закаленный вал”. Установлена и объяснена взаимосвязь между тепловыделением, износом, температуропроводностью и структурой газотермического покрытия. Показано, что покрытия с преобладанием боридной эвтектики имеют наименьшую температуропроводность по сравнению с доэвтектическими и заэвтектическими покрытиями и соответственно высокие значения износа и тепловыделения. Максимальная температуропроводность, минимальные износ и тепловыделение характерны для покрытий с доэвтектической концентрацией бора с преобладанием в покрытии бористого феррита.

**Ключевые слова:** антифрикционное покрытие, боридная эвтектика, износ, температуропроводность, тепловыделение, средняя объемная температура.

**Введение.** Медьсодержащие серые чугуны, активно разрабатываемые в последние годы, обладают широким спектром функциональных возможностей, как антифрикционные сплавы для ряда тяжелых условий трения [1]. Гетерогенизация структуры, обеспечивающая высокий комплекс антифрикционных свойств возможна не только традиционными металлургическими приемами, но и получением газотермических покрытий из композиционных порошков [2]. Опыт авторов в области разработки диффузионно-легированных (ДЛ) металлических порошков и специализированных покрытий из них свидетельствует о перспективности использования в качестве антифрикционных — плазменных покрытий из боромеденной чугунной стружки.

Известно, что эвтектические структуры в системе Fe—В—С—Х, обладая максимальной гетерогенностью, являются наиболее износостойкими. Однако для антифрикционных материалов износостойкость в ряде случаев не является ограничивающим фактором работоспособности. Очевидна необходимость учета теплофизических свойств борсодержащих эвтектических сплавов, предназначенных для работы в подшипниках скольжения. Широкие возможности управления структурой покрытий из ДЛ-порошков позволяют изучить влияние бора и меди на триботехнические и теплофизические свойства покрытий и “сконструировать” покрытие, обладающее высоким комплексом антифрикционных свойств.

**Цель работы** — изучение взаимосвязи между структурой, температуропроводностью и триботехническими свойствами гетерогенных эвтектических покрытий из чугунной стружки, дополнительно легированной бором и медью.

**Материалы и методики исследования.** Сырьем для получения ДЛ-порошков служила измельченная стружка серого чугуна. Диффузионное легирование бором и медью порошка осуществляли во вращающемся герметизируемом контейнере по технологии описанной в работе [3]. Газотермические покрытия из ДЛ-порошков получали плазменным напылением на стальную подложку на установке УПУ-3Д в струе азотной плазмы [4]. Полученные покрытия изучали традиционными методами: металлографическим (ГОСТ 9.302), дюрOMETрическим (ГОСТ 200017, ГОСТ 299999), микродюрOMETрическим (ГОСТ 9450). Фазовый рентгеноструктурный полуколичественный ана-

Полоцкий государственный университет. Беларусь, 211440, г. Новополоцк, Блохина, 29.

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

лиз проводили на дифрактометре ДРОН-3.0 в излучении  $\text{CuK}_\alpha$ , монохроматизированном графитовым монохроматором, с применением пакета программ "X-RAY". Триботехнические свойства покрытий изучали на машине трения СМЦ-2, по схеме "вал — частный вкладыш", контролируя весовой износ вкладыша и вала при трении скольжения со смазочным материалом. Вал: диаметр — 60 мм, сталь 45 (50 HRC<sub>3</sub>). Изучаемые покрытия наносили на стальной вкладыш (20×20 мм). Консистентную смазку с абразивными частицами для интенсифицирования изнашивания (ЦИАТИМ + 30% SiO<sub>2</sub>) периодически вводили в зону трения. Измеряли также объемную температуру в зоне трения контактным методом [5]. Триботехнические испытания проводили, как при постоянной ( $p = 7,6$  МПа,  $v \leq 7,2$  м/с), так и при переменной ( $p = 3,5 \div 8,9$  МПа;  $v \leq 4,2$  м/с) нагрузках, имитирующих работу подшипника скольжения кривошипно-шатунного механизма [6].

Тепловые процессы при трении, как известно, отличаются высокой степенью неравновесности. Поэтому для анализа нестационарного теплового процесса при трении целесообразно знать температуропроводность покрытия. Для этого был разработан метод определения коэффициента температуропроводности, относящийся к классу инверсных задач [7].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Анализируемые газотермические покрытия имеют характерное гетерогенное строение (рис. 1). Комплекс выполненных исследований позволяет сформулировать некоторые закономерности структурообразования плазменных покрытий из боромеденной чугунной стружки [6, 8]. ДЛ-порошок из чугунной стружки представляет собой частицы, имеющие боридную и бороцементитную оболочку с локальными медными фрагментами на поверхности. В результате плазменного напыления происходят определенные изменения в фазовом составе, приводящие к некоторому повышению физико-химической равновесности сплава (табл. 1).

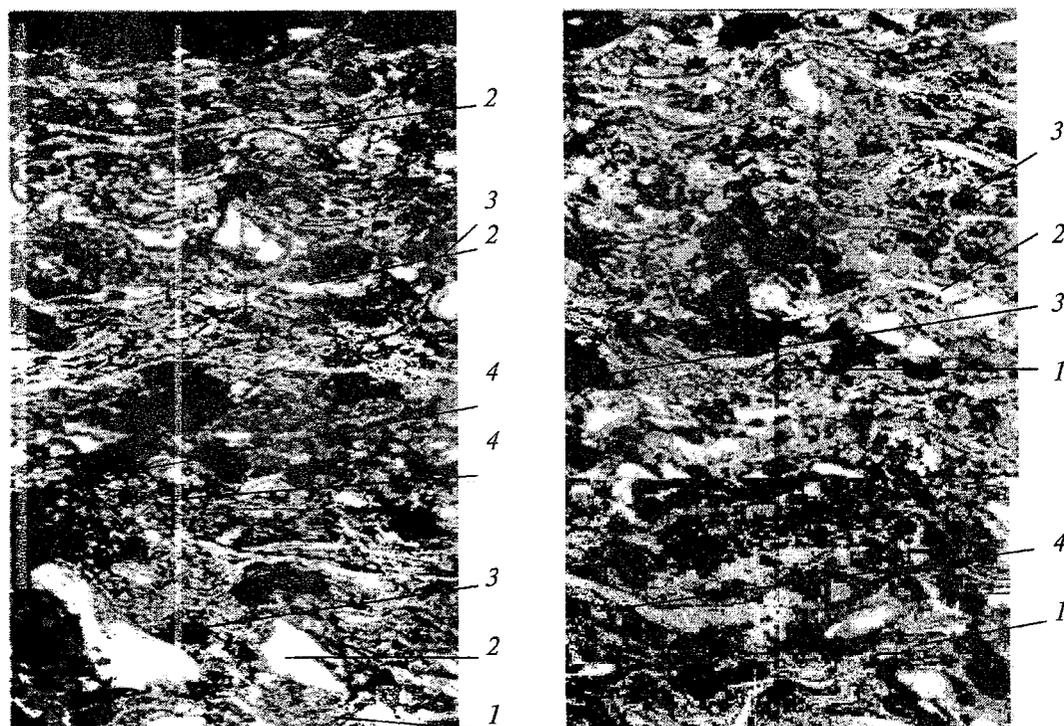


Рис. 1. Микроструктура плазменного покрытия из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна (×300): 1 — участки мелкодисперсной бористой эвтектики; 2 — ламели  $\alpha$ -фазы с фрагментами перлита; 3 — медистые включения; 4 — боридные, бороцементитные включения

Увеличивается легированность твердого раствора углеродом, бором и медью, уменьшается количество высокобористых фаз, образуются локальные участки эвтектики  $\text{Fe}_3(\text{BC})$ ,  $\text{Fe}_3\text{B} + \text{Fe}_\alpha(\text{C}, \text{B})$ . Следует отметить изолированное расположение медных фрагментов между ламелями покрытия, что оказывает влияние на триботехнические характеристики покрытий.

Таблица 1. Фазовый состав боромеденной чугушной стружки и полученного из нее плазменного покрытия (полуколичественный фазовый рентгеноструктурный анализ)

| Фаза                                    | ДЛ-порошок            |                          | Плазменное покрытие    |                          |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|   | Содержание фазы об. % | Микротвердость фазы, МПа | Содержание фазы, об. % | Микротвердость фазы, МПа |
| Fe <sub>a</sub> (C)                     | 16                    | 1000–2000                | 8                      | 1500–2400                |
| Cu                                      | 21                    | 300–700                  | 18                     | 300–600                  |
| Графит                                  | 2,5                   | —                        | —                      | —                        |
| Fe <sub>2</sub> B                       | 9                     | 8000–9600                | 13                     | 6800–7500                |
| FeB                                     | 16                    | 9200–10500               | 15                     | 7200–8400                |
| CuO                                     | 10                    | —                        | —                      | —                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 12                    | —                        | —                      | —                        |
| Fe <sub>3</sub> C, Fe <sub>3</sub> (BC) | 2,5                   | 7500–9000                | 23                     | 5800–6200                |

Определяющим фактором структурообразования покрытия наряду с режимами напыления, является химический состав ДЛ-порошка. Пропорционально увеличению содержания меди в ДЛ-порошке происходит увеличение количества “медных” участков в покрытии. Для содержания меди < 15 мас.% характерно наличие мелкодисперсных включений по всему объему покрытия. При большем содержании меди происходит дифференциация медистой фазы по объему покрытия и формирование отдельных крупных включений (80...120 мкм). Бор, являясь химически активным элементом, оказывает более существенное влияние на структурообразование покрытий. Значительную часть объема покрытия занимает мелкодисперсная боридная эвтектика с микротвердостью  $H_{20} = 3600...4400$  МПа. Следует отметить, что эвтектическая концентрация смещена в сторону меньших содержаний бора, что обусловлено повышенной скоростью охлаждения расплава, неравновесной кристаллизацией и получением квазиэвтектики. Поэтому первичные высокотвердые боридные и бороцементитные фазы в покрытии присутствуют уже при доэвтектической концентрации бора в покрытии.

Высокий уровень триботехнических свойств анализируемых покрытий обусловлен соответствием их структуры правилу Шарпи (табл. 2). Позитивное влияние оказывают и вторичные структуры оксидного типа, образующиеся на бористых сплавах железа в условиях трения скольжения [9, 10].

Таблица 2. Триботехнические свойства различных пар трения при постоянной нагрузке

| Материал вкладыша  |         | Интенсивность изнашивания пары трения, $10^{-7}$ мг/м на пути трения $L$ , м |       |       |       | Коэффициент трения без смазочного материала | Твердость покрытия, НВ |
|--|---------|--|-------|-------|-------|---|------------------------|
|  |         | 300  | 600   | 1400  | 2000  |   |                        |
| Газотермическое покрытие из боромеденной чугушной стружки при содержании бора (мас. %) | 6–8     | 0,1  | 0,14  | 0,086 | 0,074 | 0,19–0,2                                    | 227                    |
|  | 2–6     | 0,073  | 0,098 | 0,086 | 0,069 |   | 202                    |
|  | 1,5–2   | 0,042  | 0,045 | 0,031 | 0,027 | 0,17–0,19                                   | 180                    |
|  | 0,5–1,5 | 0,011  | 0,015 | 0,018 | 0,022 |   | 168                    |
| Бр ОФ 10-1   |         | 0,042  | 0,056 | 0,041 | 0,044 | 0,16–0,2                                    | 159                    |
| Бр ОЦС 5-5-5   |         | 0,014  | 0,03  | 0,029 | 0,034 |   | 108                    |
| Бр АЖ 9-4  |         | 0,012  | 0,027 | 0,022 | 0,023 |   | 180                    |

Представляло интерес исследование теплового режима работы разработанных покрытий в паре трения. Было установлено влияние теплового режима на износ вкладыша как в условиях статического, так и динамического нагружения (рис. 2). При малых, доэвтектических концентрациях бора нагрев и износ вкладыша невелик. Важна также тенденция к стабилизации этих параметров на этапе уставившегося изнашивания. Покрытия, имеющие максимальное количество избыточных боридов и соответственно наибольшую твердость имеют максимальную интенсивность изнашивания и более высокий коэффициент трения (табл. 2). Для указанных покрытий характерна так же высокая температура нагрева (рис. 2, I, г; II, г). Неожиданные результаты получены при анализе эвтектических покрытий, традиционно считающихся наиболее износостойкими. Прогрессирующий характер изнашивания и температуры свидетельствуют о крайне неблагоприятных

условиях трения. Наиболее ярко обнаруженные закономерности проявляются в условиях переменных нагрузок, что подтверждает важность анализа теплового режима трения (рис. 2, II).

Объяснение полученных результатов потребовало изучения теплопроводности покрытий. Известно, что перенос тепла в многофазном, пористом дисперсном твердом теле, каким является анализируемое покрытие, осуществляется посредством теплопроводности: а) самих частиц материала; б) оксидных пленок; в) молекулярной теплопроводности газа, заполняющего поры; г) контактной теплопроводности межчастичных контактов, а так же д) конвекцией газа в порах и е) излучением от частицы к частице [11]. Позднее было установлено, что преобладающая часть тепла в газотермическом слоистом покрытии передается в местах контакта между lamелями [12, 13].

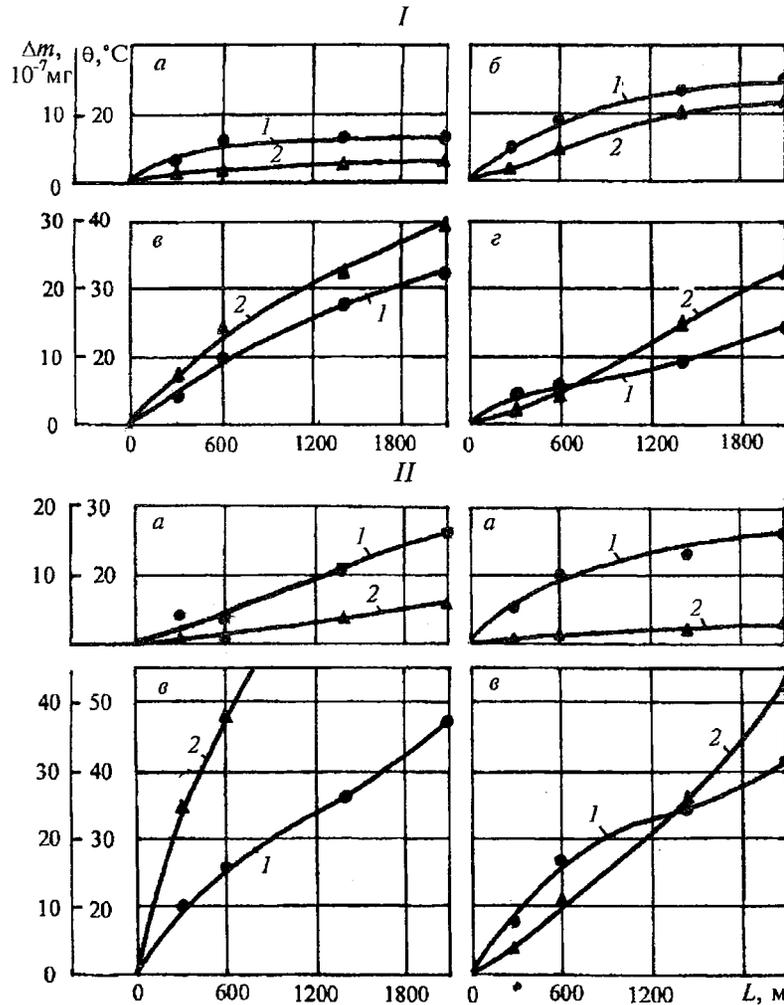


Рис. 2. Изменение температуры (1) и износа (2) вкладыша с газотермическим покрытием из боромеденной чугуны в процессе испытаний при постоянной (I) и переменной (II) нагрузках: а - с = 0,5-1,5 мас. %; б - 1,5-2,0; в - 2,0-4,0; г - 4,0-6,0

В анализируемом покрытии контактные области между lamелями являются преимущественно бористым сплавом различной степени эвтектичности (рис. 1). Именно через них проходит основной поток тепла. Полученные результаты определения коэффициента теплопроводности боросодержащих сплавов свидетельствуют об определяющем влиянии бора (табл. 3). Резкое снижение теплопроводности сплава при легировании бором обусловлено гетерогенизацией последнего и является известным фактором [14]. Что касается обнаруженной экстремальности влияния бора на теплопроводность сплава то она требует объяснения. Установлено, что минимальной теплопроводностью обладают сплавы эвтектической концентрации, для которых характерна наибольшая степень гетерогенности вследствие преобладания мелкодисперсной механической смеси бористого феррита и бороцементита. Дальнейшее увеличение содержания бора

формирует заэвтектическую структуру с преобладанием относительно крупных первичных боридов. Бориды железа  $Fe_2B$  обладают низкой теплопроводностью: ( $\lambda^{20\text{ }^\circ\text{C}} = 0,3 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$ ), однако количество мелкодисперсной эвтектики и, следовательно, степень гетерогенности покрытия в этом случае снижается, поэтому происходит некоторое повышение теплопроводности. Наибольшая теплопроводность в анализируемой системе характерна для доэвтектических концентраций бора. Избыточной фазой в этом случае является бористый феррит, обладающий существенно большей теплопроводностью, а содержание эвтектики в покрытии невелико.

Таблица 3. Влияние содержания бора на теплопроводность  $\alpha$  ( $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) покрытий системы Fe—C—B

| Содержание бора,<br>мас. % | Температура, $^\circ\text{C}$ |         |         |         |         |         |
|----------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                            | 50–100                        | 100–150 | 150–200 | 200–250 | 250–300 | 300–350 |
| 0                          | 22,900                        | 22,317  | 21,928  | 21,442  | 19,734  | 18,552  |
| 2,5–3,1                    | 8,570                         | 8,563   | 8,210   | 7,725   | 7,403   | 6,832   |
| 3,2–4,1                    | 3,450                         | 3,256   | 3,181   | 3,189   | 3,145   | 2,966   |
| 4,8–5,2                    | 7,322                         | 6,936   | 6,552   | 6,101   | 5,793   | 5,583   |

Установленные факторы влияния бора на теплопроводность покрытий позволяют предложить характер взаимосвязи теплофизических и триботехнических свойств газотермических бористых покрытий. Тепловой режим пары трения, как известно, обусловлен протеканием конкурирующих процессов тепловыделения и теплопередачи. При относительно постоянных показателях тепловыделения решающее значение будет иметь теплопередача. Покрытия, имеющие заэвтектическую концентрацию бора, обладают максимальной твердостью в системе вследствие наличия в их структуре первичных боридных и бороцементитных фаз. Однако, несмотря на это, интенсивность изнашивания этих покрытий велика. Это обусловлено, как плохой прирабатываемостью, так и невысокой теплопроводностью покрытий. Для этих покрытий характерна линейная зависимость роста температуры и износа от пути трения, что позволяет предположить наличие абразивного изнашивания. Покрытия с эвтектической концентрацией бора, как было показано выше, обладают наименьшей теплопроводностью. Этим обусловлен параболический рост температуры покрытия и кривой износа, несмотря на меньшую твердость. И хотя суммарный износ в указанном диапазоне пути трения меньше, чем у покрытий с заэвтектической концентрацией бора, кинетика изнашивания и температурный режим свидетельствуют о неработоспособности этого покрытия. Коэффициент трения в анализируемом диапазоне концентраций бора изменяется незначительно. Покрытие с доэвтектической концентрацией бора обладает наименьшей твердостью, хорошей прирабатываемостью и максимальной теплопроводностью в анализируемой системе. Все это обуславливает минимальную интенсивность изнашивания, как вкладыша, так и вала. Хорошие триботехнические характеристики этой пары трения позволяют прогнозировать ее высокую работоспособность в условиях граничного трения скольжения.

**Заключение.** Теплопроводность газотермических покрытий из боромедленной стружки серого чугуна оказывает существенное влияние на их триботехнические свойства. Наименьшая теплопроводность и, соответственно, неудовлетворительные триботехнические характеристики имеют место для покрытий с эвтектической концентрацией бора. Это обусловлено крайне низкой теплопроводностью дисперсной эвтектической механической смеси бористого феррита и бороцементита. Поэтому количество боридной эвтектики в указанных покрытиях следует ограничивать. Увеличение теплопроводности покрытий с доэвтектической концентрацией бора, обусловленное уменьшением доли эвтектики за счет увеличения количества бористого феррита, обеспечивает повышение антифрикционных свойств в определенных условиях трения. Следует отметить, что некоторое снижение твердости покрытия при уменьшении доли эвтектики является несущественным на фоне повышения теплопроводности покрытия.

Разработанные гетерогенные газотермические покрытия из боромедленной чугунной стружки соответствуют правилу Шарпи. Каждая фаза в покрытии выполняет определенные функции:

— матричная база бористого феррита ( $H_{20} = 1500\div 2400 \text{ МПа}$ ;  $45\div 55\%$  объема покрытия) является основой покрытия;

- боридная эвтектика (3600÷4400 МПа; 14÷18 %) играет роль армирующего каркаса;
- вторичные боридные и бороцементитные фазы (5800÷6200 МПа; 2÷4 %) повышают несущую способность покрытия и совместно с эвтектикой являются источником вторичных структур оксидного типа, обеспечивающих защиту поверхности на жестких режимах трения;
- медистая фаза (360÷600 МПа, 10÷15 %) увеличивает прирабатываемость и температуропроводность, обеспечивая улучшение триботехнических характеристик покрытия.

Разработанное покрытие является альтернативой антифрикционным бронзам в условиях граничного трения скольжения в паре с закаленным валом ( $HRC_3 \geq 45$ ) при нагрузках  $\leq 9$  МПа и скоростях скольжения  $v \leq 5$  м/с.

### Обозначения

$\Delta m$  — износ покрытий в условиях трения скольжения, мг;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $\lambda^{20^\circ C}$  — коэффициент теплопроводности при температуре 20 °С, Вт/(см·К);  $H_{20}$  — микротвердость, МПа; HB,  $HRC_3$  — твердость по Бринелю, по Роквеллу соответственно;  $c$  — содержание фазы, мас.%;  $L$  — путь трения, м;  $\theta$  — температура, °С;  $p$  — нагрузка, МПа;  $v$  — скорость скольжения, м/с;  $I$  — интенсивность изнашивания, мг/м;  $f$  — коэффициент трения.

### Литература

1. Камынин В. В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных узлов трения: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Курск. — 2000
2. Пантелеенко Ф. И., Лялякин В. П., Иванов В. П., Константинов В. М. Восстановление деталей машин: Справочник / Под ред. В. П. Иванова. — М.: Машиностроение. — 2003
3. Штемпель О. П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Новополоцк: ПГУ. — 2003
4. Авсневич А. М. Технология формирования износостойких газотермических покрытий из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на железной основе: автореф. дис. канд. техн. наук. — Минск: БНТУ. — 2003
5. Лысенко Ю. В., Балакин В. А. Экспериментальные исследования температуры в теплонагруженных узлах трения // Трение и износ. — 2003 (24), № 2, 179—185
6. Константинов В. М., Фруцкий В. А. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной стружки, как альтернатива антифрикционным бронзам // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2002, № 6, 36—39
7. Сороговец В. И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Новополоцк. — 2001
8. Константинов В. М., Фруцкий В. А. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромедненной чугушной стружки // Вестник Полоцкого гос. ун-та. — серия В, 2003 (2), № 2, 7—11
9. Ярошевич В. К., Белоцерковский М. А. Антифрикционные покрытия из металлических порошков. — Минск: Наука и техника. — 1981
10. Ворошин Л. Г., Пантелеенко Ф. И., Любецкий С. Н. Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость // Трение и износ. — 1991 (12), № 2, 310—314
11. Смирнов Е. В., Ионин В. Е. Виды переноса тепловой энергии в металлически плазменно напыленных покрытиях и некоторая качественная оценка их теплопроводности // ИФЖ. — 1970 (18), № 4, 17—20
12. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. — М.: Машиностроение. — 1990
13. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением: Теория, технология и оборудование. — М.: Металлургия. — 1992

14. Медовар Б. И., Пинчук Н. И., Чикотило Л. В. Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций. — Киев: Наукова думка. — 1970

*Поступила в редакцию 25.02.04.*

Konstantinov V.M., Panteleenko F.I., Frutskii F.I., and Sorogovets V.I. *Triboengineering and thermo-physical properties of gas thermal coatings from diffusion alloyed cast iron chippings.*

Results are shown of the experimental study of heat processes in a pair of gas thermal coating with a steel tempered shaft. A relation has been revealed and explained between heat generation, wear, heat conductivity and the structure of the gas thermal coating. It is shown that the coatings with dominating boride eutectics possess the least heat conductivity versus pre-eutectic and post-eutectic coatings, hence stronger wear and heat generation. Coatings with a pre-eutectic boron concentration in which boron ferrite dominates typically show the maximum heat conductivity, the least wear and heat generation.