

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.822.5;621.002.3(785.5)

ФРУЦКИЙ
Виктор Александрович

**АНТИФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ И МЕДЬЮ
ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ
ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

05.02.01 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новополоцк 2006

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Научный руководитель член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *Пантелеенко Ф.И.* («Белорусский национальный технический университет, заведующий кафедрой порошковой металлургии, сварки и технологии материалов») г. Минск

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор *Ловшенко Ф.Г.* (УО «Белорусско-Российский университет», первый проректор) г. Могилев
кандидат технических наук, доцент *Шевцов А.И.* (ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси, ведущий научный сотрудник) г. Минск

Оппонирующая организация: ГНУ «Институт механики и надежности машин» НАН Беларуси

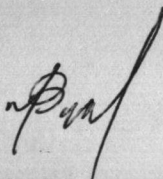
Защита состоится 6 июля 2006 года в 14 часов на заседании Совета К 02.19.03 по защите диссертаций в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина 29; тел. ученого секретаря 8(0214) 531047; факс 8(0214) 530679.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан 6 июня 2006 года.

Ученый секретарь Совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



В.М. Константинов

© В.А. Фруцкий, 2006

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В современных условиях для промышленности Беларуси актуален вопрос поиска антифрикционных материалов, способных заменить дорогостоящие антифрикционные бронзы без ухудшения триботехнических свойств в тяжелонагруженных кривошипно-шатунных механизмах, таких как опорные втулки прессового оборудования и втулки двигателя внутреннего сгорания.

В различных научных центрах ведутся активные работы по созданию антифрикционных литых и композиционных материалов на железной основе. Сырьем для этих материалов служат, как правило, серийно выпускаемые сплавы. Металлоотходы, в частности чугунная стружка, для этих целей почти не используются. Создание ресурсосберегающих технологий и материалов с активным использованием внутренних сырьевых ресурсов является одним из показателей технического прогресса, способствует повышению конкурентоспособности продукции. Особенно актуальна эта проблема для небольших предприятий, для которых проблематична закупка импортных антифрикционных бронз, а их станочный парк образует сотни тонн металлических отходов в год, более половины которых составляет чугунная стружка. Исходя из этого представляется целесообразным замена дорогостоящих антифрикционных материалов сплавами из отходов металлообработки, если эта замена происходит без снижения триботехнических свойств материала.

Таким образом, исследования в области трибоматериаловедения, посвященные разработке и внедрению новых антифрикционных материалов, синтезированных на основе стружечных отходов серых чугунов с дополнительным легированием легирующим, являются весьма актуальными. Успешное решение данного вопроса обеспечит получение новых антифрикционных материалов из стружечных отходов с высокой износостойкостью для тяжелонагруженных узлов трения, работающих в условиях недостаточной смазки, что позволит предложить пути решения проблемы повышения износостойкости трущихся пар, имеющие важное значение.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в рамках следующих заданий:

- Белорусского республиканского ФФИ Т98М-177 «Изучение закономерностей диффузионного легирования и разработка технико-экономических принципов создания экономно-легированных наплавочных материалов». № ГР 19993083, 1998 – 1999 гг.;

- Министерства образования Республики Беларусь «Разработка научных и технологических основ получения бористых графитизируемых покрытий из металлоотходов», № ГР 19981721, 1998 – 1999 гг.;

- ГПОФИ «Материал» 3.25 «Исследование механизма структурообразования и разработка физико-химических основ синтеза эвтектических слоев и газотермических покрытий из новых диффузионно-легированных сплавов под воздействием низкотемпературной плазмы», № ГР 20021385, 2002 – 2005 гг.;

- РНТП «Инновационное развитие Витебской области» Витебского облисполкома 02.01 «Разработать гамму самофлюсующихся порошков и технологические основы их получения, плазменной наплавки и механической обработки лез-

вийным и алмазно-абразивным инструментом с обеспечением твердости покрытий 25...67 HRC, на деталях нефтехимического и сельскохозяйственного оборудования», № ГР 20003710, 2000 – 2002 гг.

А также в рамках выполнения хоздоговорных тем:

- ХД 97-43 «Разработать технологию плазменной наплавки опорных подшипников ГKM бронзовым порошком», № ГР 19974059, 1997 г.;

- ХД 99-156 Разработка материала и технологии плазменной наплавки опорной втулки кривошипно-шатунного пресса К1430», 2000 г.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является повышение износостойкости тяжело нагруженных пар трения, работающих при переменных динамических нагрузках, путем разработки антифрикционного гетерогенного материала с управляемой структурой из диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

- разработать структурную модель антифрикционного материала и методики триботехнических испытаний пар трения скольжения, моделирующих работу трибосопрежений, подвергающихся динамическим нагрузкам;

- определить наилучший химический состав антифрикционного материала для различных условий нагружения и исследовать их структуру и свойства при условии ограниченной смазки;

- исследовать влияние технологических режимов нанесения на структуру и триботехнические свойства материала, работающего в условиях ограниченной смазки;

- исследовать влияние химического состава и взаимного расположения составляющих на эксплуатационные и технологические свойства материала;

- исследовать влияние температуры в зоне контакта на изнашивание пар трения как при статическом, так и при динамическом характере приложения нагрузок;

- провести промышленную апробацию разработанного материала в различных условиях эксплуатации, разработать техническую документацию.

Решение поставленных задач позволит расширить номенклатуру порошковых антифрикционных материалов, существенно повысить их триботехнические свойства, снизить стоимость получения подшипников скольжения.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются антифрикционные гетерогенные материалы из диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки. Предметом исследования является взаимосвязь режимов диффузионного легирования и нанесения чугуновой стружки, химического состава, микроструктуры, микродюриметрии фаз, теплофизических свойств материала с его триботехническими характеристиками.

Гипотеза. В работе сформулировано предположение о том, что композиционный материал, состоящий из ферритной основы с упрочняющими карбидными и боридными фазами, медными включениями и значительной пористостью, обладает высокой износостойкостью в условиях переменных нагрузок и ограниченной смазки. В силу того, что ферритная основа и медные включения обеспечивают высокую теплопроводность, упрочняющие фазы придают высокую твер-

дость и прочность, открытые поры служат своеобразными «карманами» для удержания смазки. Материал такого типа должен обеспечивать высокие антифрикционные свойства узлов трения, работающих в тяжелых условиях.

Методология и методы исследования. Исследования строились на основе доказательства причинно-следственной связи «состав, структура, свойства диффузионно-легированной стружки \Rightarrow технологические параметры формирования \Rightarrow состав, структура, свойства полученного антифрикционного материала», что позволило на каждом этапе вносить коррективы в состав и структуру для получения материалов, обладающих максимальной износостойкостью при различных условиях нагружения.

При проведении экспериментальных исследований использовались как известные методики (определение текучести, пикнометрической и насыпной плотности, макро- и микротвердости, металлографические исследования, рентгеноструктурные и химические исследования состава), так и разработанные нами методики изучения триботехнических свойств материалов при динамическом нагружении.

Статистическая обработка проводилась на ПЭВМ при помощи программного обеспечения «EXCEL». При этом рассчитывались среднее, среднеквадратичное, строились зависимости между задаваемыми параметрами и функцией отклика, проверялась адекватность полученных зависимостей.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Получили дальнейшее развитие процессы диффузионного легирования чугуновой стружки, в частности совместное легирование бором и медью. Установлено, что припекание частиц меди к поверхности чугуновой стружки происходит только при наличии боридной оболочки. При этом растворения меди в ферритной основе не происходит. Впервые изучен механизм структурообразования гетерогенного антифрикционного материала, обусловленный контактным эвтектическим плавлением боридной оболочки, образованием избыточных боридов, отсутствием растворения медных фрагментов и их обособленным расположением в структуре, а также интенсивным порообразованием.

Установлено экстремальное влияние бора в антифрикционном материале на износ трибопары, обусловленное низким упрочняющим воздействием при недостаточности бористых фаз (доэвтектическое содержание бора 2,3 %) и охрупчиванием при избытке твердых фаз (заэвтектическое содержание бора более 4,3 %). При этом увеличивается износ сопряженного вала, вследствие повышения твердости вкладыша. Выявлена ведущая роль структуры и взаиморасположения фаз антифрикционного материала, в соответствии с разработанной моделью, для триботехнических характеристик материала.

Впервые разработаны антифрикционные материалы на основе чугуновой стружки, работающие в тяжелых условиях нагружения при недостатке смазочного материала, являющиеся альтернативой антифрикционным бронзам в условиях переменных нагрузок; определена структура материала, обладающая максимальной износостойкостью.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость результатов исследования состоит в использовании их для решения проблем

ресурсосбережения и импортозамещения отечественной продукцией за счет создания альтернативных антифрикционным бронзам материалов из чугунной стружки.

Разработаны антифрикционный материал для подшипников скольжения и технология его получения (Положительное решение по Заявке РБ № а 20000543; Заявка РБ № а 200010023).

Разработаны приспособление и методика триботехнических испытаний антифрикционных материалов, моделирующие условия работы деталей кривошипно-шатунных механизмов, работающих с переменными нагрузками при недостатке смазочного материала (Патент РБ № 277).

Разработаны Технические условия ГУ РБ 02071694.004-2004 «Материал антифрикционный для подшипников скольжения»; Технологический регламент 4120/08 на получение антифрикционного материала для деталей нефтехимического и сельскохозяйственного оборудования предприятий Витебской области.

Разработан технологический процесс изготовления втулки подшипника скольжения с рабочим слоем из антифрикционного материала на основе диффузионно-легированного медью и бором чугунной стружки для ОАО «Полоцкий завод «Проммашремонт» (ТП 02071694.015-01).

Разработанные рекомендации по замене антифрикционных бронз передачу ряду предприятий (ОАО «Минский подшипниковый завод», ОАО «Витебский мотороремонтный завод», УП «Минский завод «Продмаш», ОАО «Полоцкий завод «Проммашремонт»).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс по курсу «Триботехника» для студентов специальности Т 03.02, при дипломном проектировании по специальности Т 03.02 «Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1) Системный подход к разработке новых составов антифрикционных материалов, получаемых из чугунной стружки, состоящий в:

- проектировании структуры антифрикционного материала, учитывающий как условия работы конкретного трибосопряжения, так и состав, свойства исходной стружки и возможности ее диффузионного легирования, для получения требуемого фазового и химического состава;

- последующем плазменном формообразовании антифрикционного материала с необходимой структурой и свойствами из диффузионно-легированной требуемым количеством бора и меди чугунной стружки.

2) Результаты изучения особенностей структурообразования антифрикционного материала при различном содержании легирующих элементов в диффузионно-легированной стружке и различных технологических режимах плазменного формообразования. Структурная наследственность материала по отношению к диффузионно-легированной стружке обеспечивает формирование гетерогенной структуры, содержащей как высокотвердые фазы (бориды, бороцементит $H_{20} = 12000 \dots 16000$ МПа), так и мягкие фазы (медные включения $300 \dots 600$ МПа, феррит $H_{20} = 1600 \dots 2600$ МПа).

Режимы плазменного формообразования позволяют регулировать структурную наследственность материала, вплоть до полного переплава и получения литой эвтектической структуры.

3) Взаимосвязь структуры антифрикционного материала и его триботехнических свойств. Выявлена экстремальная зависимость роста износа трибопары от увеличения количества введенного бора. Минимум износа приходится на содержание бора в материале вкладыша 1,5...2 %.

4) Результаты исследования триботехнических свойств антифрикционных материалов, при различном характере приложенных нагрузок. Минимальный износ трибопары в условиях переменных нагрузок наблюдается при содержании бора в материале 1,5...2 %, в условиях постоянной нагрузки 0,5...1,5 %.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором лично или в соавторстве:

- антифрикционный материал для тяжело нагруженных подшипников скольжения; методика триботехнических испытаний с переменной нагрузкой; методика определения температуры в зоне контакта; исследования микроструктуры, микро- и макротвердости материалов; триботехнические исследования по схеме «вал – вкладыш» получены автором лично;

- исследования технологии получения материалов на основе отходов металлообработки соискателем проводились совместно с С.Н. Жабуренком; исследования качества сцепления материала с основой – с А.М. Авсиевичем.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации доложены и обсуждены: на МНТК «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк, 1999 г.; МНТК «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка», Могилев, 2000 г.; 54-й НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов «Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения», Минск (БГПА) 2000 г.; НТК «Настоящее и будущее в области механизации и электрификации сельского хозяйства», Кишинев (Молдова), 2000 г.; V республиканской НТК студентов, магистрантов, аспирантов республики Беларусь (НИРС-2000), Гродно, 2000 г.; 6-й МНТК «Пленки и покрытия», Санкт-Петербург, 2001 г.; 22-м Международном симпозиуме студентов и научных сотрудников, Зелена Гура (Польша), 2001 г.; МНТК «Упрочнение, восстановление и ремонт на рубеже веков», г. Новополоцк, 2001 г.; МНТК «Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин», г. Новополоцк, 2003 г.

Опубликованность результатов. Основные результаты исследований содержатся в 21 опубликованном научном труде. Из них 3 статьи в научных журналах, 4 статьи в сборниках трудов, 1 патент Республики Беларусь, 1 положительное решение по заявке, 1 заявка на изобретение, 11 публикаций в материалах и тезисах научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения с выводами, списка использованных источников, приложений. Полный объем диссертации включает 84 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 46 таблиц, 194 библиографических источника, приложения на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научных исследований в области разработки антифрикционных материалов, работающих при переменных нагрузках в условиях недостаточной смазки.

Первая глава посвящена проблеме износостойкости антифрикционных сплавов. Определены требования к антифрикционному материалу: высокая износостойкость в условиях переменного нагружения; высокая антифрикционность и прирабатываемость; низкая стоимость.

Указанным требованиям отвечают материалы на основе никеля, меди, специальные чугуны. В направлении развития этой тематики выделяются работы Д.Н. Гаркунова, И.В. Крагельского, А.А. Шермана, В.К. Ярошевича, М.А. Белоцерковского, А.А. Кутькова, Y. Jakeda, B. Lenggell и др. Вызывают интерес работы по замене известных антифрикционных материалов материалами на основе отходов металлообработки С.С. Кипарисова, О.В. Падалко, Ю.А. Харламова.

Для придания материалу специальных свойств, в том числе антифрикционности, в материал дополнительно вводят легирующие элементы (ЛЭ). Перспективные результаты по износостойкости показали материалы на железной основе с ЛЭ, введенными диффузионным путем. В этом направлении работают научные школы Ф.Г. Ловшенко, Ф.И. Пантелеенко и др. Однако для снижения себестоимости детали синтезируемый материал должен иметь не только минимальную стоимость основы, но и быть экономно-легируемым.

Анализ износостойкости различных материалов в условиях переменных нагрузок выявил возможность замены применяемых антифрикционных бронз менее дорогими материалами на основе отходов обработки чугунов, с применением экономного легирования для придания необходимых эксплуатационных свойств.

Исходя из анализа состояния вопроса, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава содержит описание материалов, методик и оборудования, используемых в работе.

Для достижения поставленных целей выполнены теоретические и экспериментальные исследования. В процессе теоретических исследований выявлены условия работы подшипников скольжения (ПС) кривошипно-шатунных механизмов (КШМ); факторы, влияющие на их работоспособность; предложена модель антифрикционного композиционного материала для ПС кривошипно-шатунных механизмов. С помощью экспериментальных исследований определены условия и режимы получения антифрикционного материала из чугуновой стружки, изучены его структура и свойства, выполнена опытно-промышленная апробация композиционного материала в промышленности.

Предложена модель структуры композиционного антифрикционного материала для подшипников скольжения КШМ, обеспечивающая комплекс эксплуатационных свойств ПС (рис. 1).

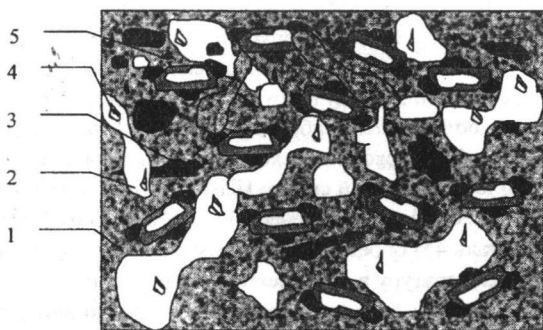


Рис. 1. Структурная модель антифрикционного материала для подшипников скольжения кривошипно-шатунных механизмов:

- 1 – эвтектика; 2 – матричная фаза; 3 – фазы с повышенными антифрикционными свойствами; 4 – избыточные металлоподобные фазы; 5 – поры

Каждая структурная составляющая имеет свои физико-механические характеристики и обеспечивает определенные свойства антифрикционного материала. Поры, расположенные в верхней по высоте трети материала, играют роль карманов для смазки и адсорбирования продуктов изнашивания. Мелкодисперсные антифрикционные фазы наряду с хорошей прирабатываемостью уменьшают коэффициент трения и улучшают теплопроводность материала. Крупнодисперсные матричные фазы воспринимают основные нагрузки и отводят основной тепловой поток. Эвтектические фазы являются каркасом, сдерживающим нарастание деформаций; избыточные боридные фазы – упрочняющими узлами, воспринимающими пиковые нагрузки. Избыточные фазы выполняют еще одну важную функцию – являются поставщиками вторичных структур оксидного типа на контактных поверхностях в тяжелых условиях трения.

В качестве исходного материала для получения ПС использовали стружку серого чугуна СЧ 20 и белого чугуна ИЧХ28Н2. Дополнительное легирование стружки бором и медью осуществляли методами химико-термической обработки. Диффузионное легирование проводили во вращающемся герметизируемом контейнере в порошковых бор- и медьсодержащих средах. Гранулометрический состав, пикнометрическую и насыпную плотность, текучесть диффузионно-легированной бором и медью стружки определяли стандартным методом (ГОСТ 18318, ГОСТ 19440, ГОСТ 20899). Формирование композиционного материала осуществляли плазменным напылением на стальную подложку диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки на установке УПУ-3Д. При необходимости проводили термическую обработку материала. Структуру и фазовый состав материала изучали металлографическим (микроскопы Unimet Union 7321, МВТ-71), микродюретрическим (микротвердомеры Micromet-II, ПМТ-3 по ГОСТ 9450), рентгеноструктурным фазовым (ДРОН-3,0) и микрорентгеноспектральным (Cameca MS-46) анализами. Твердость определяли по Виккерсу, Роквеллу (приборы ИТ 5010-01 и ТК-2).

Трибологические испытания композиционных материалов различного состава и структуры проводили по разработанной методике на модернизированной ма-

шине трения СМЦ-2. На разработанное приспособление для трибологических испытаний получен Патент Республики Беларусь № 277G01N3/56. Методика позволяет моделировать условия трения подшипников скольжения КШМ, обеспечивая переменный цикл нагружения. За цикл нагрузка изменяется от 3,5 до 8,9 МПа при скорости скольжения не более 6 м/с. Триботехнические испытания проводили и при постоянной нагрузке 7,6 МПа, скорости скольжения 4...6 м/с. Смазывание узла осуществляли периодической подачей смазки ЦИАТИМ ГОСТ 4366 с добавлением 10 % частиц кварцевого песка фракцией менее 30 мкм. Износ антифрикционного материала и контртела (сталь 45) определяли весовым методом на аналитических весах Т-200. Объемную температуру в зоне трения определяли контактным методом.

Полученные результаты были обработаны с помощью аппарата математической статистики.

Третья глава посвящена вопросам изучения диффузионного легирования чугунной стружки и получения из нее композиционного материала.

Получение структуры антифрикционного материала, близкой к предложенной модели (см. рис. 1), возможно из чугунной стружки, дополнительно легированной бором и медью. В результате диффузионной обработки частицы чугунной стружки приобретают композиционное строение (рис. 2). Частица состоит из ядра (H_{20} 1000...2300 МПа), диффузионной боридной оболочки (H_{20} 8000...10300 МПа), на которой находятся медные включения (H_{20} 300...700 МПа).



ядро

боридная оболочка

медные включения

Рис. 2. Микроструктура частицы стружки серого чугуна после диффузионного легирования ($\times 400$)

Установлено, что припекание медных частиц к поверхности чугунной стружки наиболее интенсивно происходит при наличии диффузионной боридной оболочки, что обусловлено малой растворимостью меди в феррите и восстановительным действием бора в оболочке исходной частицы. В результате медная пусыера, находящаяся в насыщающей смеси при температурах 920...980 °С, припекается к боридной оболочке чугунных частиц. Следует отметить, что боридная оболочка в данных условиях практически диффузионно непроницаема для меди, поэтому растворения меди в чугунной стружке не происходит, что обеспечивает в дальнейшем в напыленном материале наличие медных участков (табл. 1).

Фазовый состав диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна и композиционного материала из нее

Фаза	Содержание фазы в стружке, % объемн.		Содержание фазы в напыленном материале, % объемн.	Объем кристаллической ячейки фаз, Å^3		
	исходная чугунная стружка	легированная бором и медью стружка		табличное значение	значение для легированной бором и медью стружки	значение для напыленного материала
Fe- α	48	16	8	23,38	23,55	23,38
Cu	—	21	18	47,24	47,07	47,07
Графит	6,3	2,5	0,8	—	—	—
Fe ₂ B	—	9	13	110,23	110,68	110,25
FeB	—	16	16	65,61	65,87	65,68
Fe ₂ O ₃	24	12	—	—	—	—
Fe ₃ (C, B)	—	—	23	155,35	—	156,49

Аналогична ситуация для диффузионно-легированной стружки чугуна ИЧХ28Н2 (табл. 2). Из всех фаз этой стружки только в медной фазе отсутствуют примеси.

Таблица 2

Фазовый состав диффузионно-легированной бором и медью стружки белого чугуна ИЧХ28Н2

Фаза	Содержание фазы, % объемн.		Объем кристаллической ячейки фаз легированной бором и медью стружки, Å^3		Приближенная концентрация примеси в фазе, % атомн.
	исходная чугунная стружка	легированная бором и медью стружка	опытное значение	табличное значение	
Fe- α	24	4	23,58	23,55	Примесь хрома 0,43
Cu	—	12	47,23	47,24	Без примесей
Cr ₇ C ₃	15	2,5	12,43	11,84	Избыток углерода 0,09
Cr ₃ C ₂	17	—	—	—	—
Fe ₂ B	—	10	110,35	110,24	Примесь хрома 0,38
FeB	—	8	66,75	65,61	Примесь хрома 6,75
Cr ₃ B ₃	—	2	303,27	298,01	Избыток бора 7,3
Cr ₇ B	—	12	479,4	463,2	Избыток бора 1,3

Формирование антифрикционного материала для ПС плазменным напылением и последующей термической обработкой позволяет сохранить исходную композиционность частиц диффузионно-легированной чугунной стружки, обеспечив гетерогенность материала (см. табл. 1). Количество структурно-свободной

медной фазы несколько ниже, чем в легированной бором и медью стружке, что обусловлено растворением и выгоранием меди при формировании материала. При этом микротвердость медных включений, по сравнению со стружкой, остается неизменной (H_{20} 300...700 МПа). Обнаружено существенное уменьшение количества графита в напыленном материале, обусловленное как выгоранием, выкрашиванием его, так и образованием бороцементита.

Таким образом, структура ПС из композиционного материала на основе серого чугуна выглядит следующим образом: матричная фаза Fe- α (H_{20} 1200...1800 МПа), занимает более половины объема материала. Расположение ее по объему таково: в приповерхностном слое располагаются мелкодисперсные (до 50 мкм) фазы; в средней части отмечено укрупнение фаз (до 100 мкм); у подложки размеры фазы увеличиваются до 120 мкм. Около четверти объема материала занимает боридная эвтектика (H_{20} 3200...3600 МПа) с равномерным расположением ее по всему объему. Матричная фаза окаймлена мелкодисперсной избыточной фазой цементного типа (H_{20} 6800...8000 МПа). По границам пор и неметаллических включений находятся бориды с микротвердостью H_{20} 7500...10000 МПа. Размеры медных включений у внешней границы материала несколько меньше (до 50 мкм), чем в середине (до 30 мкм) (рис. 3).

Наличие карбидообразующего хрома в стружке чугуна ИЧХ28Н2, по сравнению с серым чугуном СЧ 20, увеличивает количество избыточных фаз боридного и карбидного типа, повышая твердость материала от НВ 110 у СЧ 20 до НВ 295 у ИЧХ28Н2).

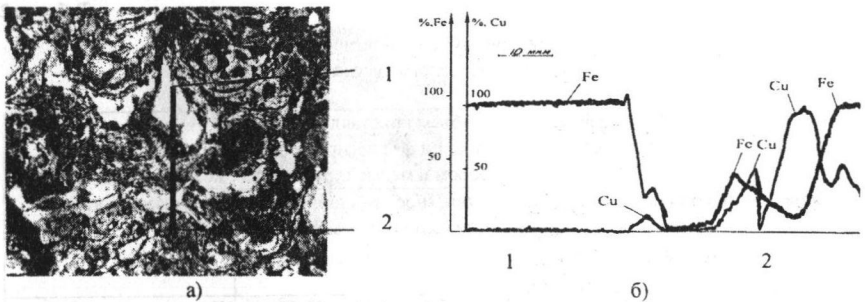


Рис. 3. Гетерогенный антифрикционный материал (1,8 % В; 10 % Сu):

а – микроструктура ($\times 400$); б – распределение элементов;

1 – 2 – линия и направление сканирования

Определяющее влияние на структурообразование наряду с химическим составом оказывают режимы плазменного формирования материала. Установлено, что повышение силы тока от 160 А до 280 А при неизменном напряжении вызывает следующие изменения: у материала на основе легированной бором и медью стружки серого чугуна твердость увеличивается с 115 до 240 НВ. При этом диапазон микротвердости структурных составляющих увеличивается до 500...2000 МПа до 1000...3500 МПа. У материала на основе легированной бором и медью стружки ИЧХ28Н2 твердость повышается с 255 НВ до 360 НВ при увеличении диапазона

микротвердости структурных составляющих от 1600...6000 и токе напыления 160 А до 4000...8600 МПа. Это обусловлено тем, что при увеличении силы тока происходит отбел чугуна, при ускоренном затвердевании выделяются фазы повышенной твердости. Таким образом, антифрикционный материал на основе стружки СЧ 20 при увеличении силы тока сверх 250 А может иметь структуры, соответствующие износостойкому материалу и аналогичные структуре материала из стружки на основе ИЧХ28Н2. Регулирование типа структуры силой тока при плазменном формообразовании позволяет получать материалы широкого диапазона свойств.

Немаловажный параметр антифрикционного материала для подшипников скольжения – пористость. Регулируя пористость материала, можно добиться необходимых триботехнических свойств не только на этапе приработки, но и на этапе установившегося изнашивания, что регламентируется количеством карманов для смазки, роль которых выполняют открытые поры. При высоких значениях силы тока (около 300 А) происходит расплавление частицы и при ударе о подложку она разбрызгивается, что подразумевает большую пористость. Этого не происходит при уменьшении силы тока. Однако при недостаточной мощности (силе тока менее 120 А) неразогретая частица недостаточно пластична, что также ведет к повышению пористости материала. Распределение пор по объему материала таково, что в приповерхностном слое находятся крупные поры, с приближением к материалу основы объем локальных пор снижается. Увеличение содержания бора способствует снижению пористости до 15...20 % (4 % масс. В). Это обусловлено увеличением доли легкоплавких эвтектик в материале и флюсующем действии бора. Максимальная износостойкость материала наблюдается при пористости 10...12 %.

Таким образом, варьируя технологические параметры диффузионного легирования стружки и плазменного напыления, возможно получение композиционных материалов широкого диапазона структур и свойств.

Четвертая глава содержит результаты триботехнических исследований композиционных материалов из диффузионно-легированной бором и медью чугунной стружки при различных режимах нагружения.

При постоянной нагрузке с увеличением содержания бора в материале вкладыша пропорционально увеличивается суммарный износ пары трения. Причем износ вала опережает износ вкладыша при содержании бора в материале более 2 % масс. Это обусловлено увеличением количества высокотвердых боридов в материале и увеличением его твердости (табл. 3).

Таблица 3

Износ пары трения (вал/вкладыш) при постоянной нагрузке, $\text{мг} \cdot 10^{-6}$

Кол-во В, % по массе	Путь трения, м			Твердость вкладыша, НВ	
	2000	4000	6000		
4,0...4,5	3,01 (2,01/1)	8,4 (6,8/1,6)	12,1 (10,1/2)	14,7 (12,4/2,3)	247 ± 14
2,5...3,0	2,2 (1,8/0,4)	5,9 (4,6/1,3)	12,1 (9,8/2,3)	13,7 (10,4/3,2)	200 ± 10
1,5...2,0	1,26 (1,2/0,06)	2,7 (2,4/0,3)	4,3 (3,7/0,6)	5,3 (4,2/1,1)	187 ± 9
0,5...1,0	0,35 (0,2/0,15)	0,9 (0,5/0,4)	1,15 (0,9/0,25)	4,4 (1,2/3,2)	153 ± 7

Одним из наиболее важных периодов в эксплуатации трибосопряжения является этап приработки, на котором происходит формирование микрорельефа рабочей поверхности и закладываются основы триботехнического взаимодействия деталей. В результате исследований было выявлено следующее: максимальный угол подъема кривой износа, и следовательно максимальная интенсивность изнашивания, наблюдаются в материале с содержанием бора более 4 %, что связано с заэвтектической структурой материала, преобладанием высокотвердых фаз типа Fe_3B и $Fe(B, C)$. При снижении содержания бора до 1,5...2 % интенсивность изнашивания уменьшается в 2,4 раза. Снижение интенсивности изнашивания обусловлено структурой материала. В данном случае увеличивается количество феррита, уменьшается количество эвтектики и избыточных фаз, что позитивно отражается на минимизации износа трибосопряжения. При малом (до 1,5 %) содержании бора наблюдаются: минимальный тангенс угла подъема кривой износа трибосопряжения, и соответственно минимальная интенсивность изнашивания. Таким образом, структура материала, имеющая минимальную интенсивность изнашивания, следующая: 65...70 % объема покрытия занимает фаза $Fe-\alpha$ дисперсностью 50...120 мкм, расположенная равномерно по всему объему; эвтектика занимает менее 10 % объема и выполняет функцию каркаса. Расположение меди различно: у внешнего края материала – мелкодисперсная фракция (0...50 мкм); в средней части и у подложки – фрагменты большего размера (50...120 мкм).

При изменении характера нагрузки (увеличении пиковых значений, возникновении динамического перераспределения) изменяется характер взаимодействия деталей в трибопаре, т.е. изменяется процесс изнашивания (рис. 4).

В отличие от статического нагружения, где минимальный износ наблюдается при содержании бора до 1,0 %, минимальный износ трибопары, работающей при переменной нагрузке, наблюдается при содержании бора 2,5...3,0 %. Это обусловлено необходимостью повышения несущей способности подшипника и компенсации пиковых нагрузок. В процессе эксплуатации на площадках контакта при переменных нагрузках возникают борсодержащие вторичные структуры оксидного типа. При недостатке последних наблюдается повышенный износ как вкладыша, так и всей трибопары.

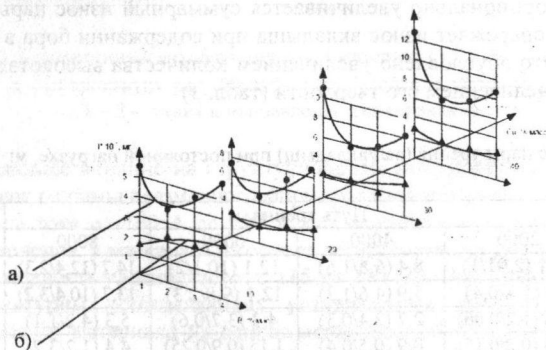


Рис. 4. Влияние легирующих элементов на износ трибосопряжения:
а – суммарный износ трибопары; б – износ вала

Высокий уровень триботехнических свойств сопряжений обусловлен соответствием структур правилу Шарпи. При этом каждая фаза выполняет определенные функции: крупнодисперсная фаза феррита является основой покрытия; эвтектические фазы с упрочняющей сеткой бороцементита играют роль армирующего каркаса; бориды входят непосредственно в узлы армирующего каркаса; медь придает покрытиям антифрикционные свойства, одновременно увеличивая прирабатываемость и теплопроводность. Микроструктура материала (рис. 5) отвечает структурной модели, разработанной для данных условий эксплуатации.

Сопоставительный анализ синтезированной структуры со структурной моделью свидетельствует: матричная фаза (феррит) занимает более 50 % объема покрытия, причем расположение по сечению отличается различной дисперсностью.

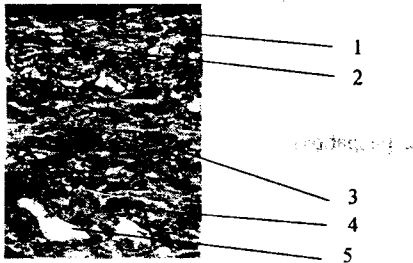


Рис. 5. Микроструктура антифрикционного материала с максимальной износостойкостью ($\times 50$):

- 1 – поры; 2 – медь; 3 – избыточные фазы;
4 – эвтектика; 5 – феррит

структуры, тем самым выполняя функцию узлов упрочняющего каркаса; первичные бориды расположены ближе к внешней границе материала и совместно с эвтектикой являются источником вторичных структур оксидного типа, защищающих рабочую поверхность на жестких режимах трения; медная фаза при дисперсности 0...50 мкм располагается у внешней границы материала, увеличивает прирабатываемость и снижает коэффициент трения материала. Увеличение дисперсности фазы до 80 мкм при расположении ближе к середине материала ведет к уменьшению износа материала в период установившегося износа; поры, занимающие не более 10 % объема материала, сосредоточены в верхней части, что является своеобразным «карманом» для адсорбирования неметаллических частиц и объемов смазочного материала.

Выявлена связь между структурой материала, температурой в зоне контакта и износом трущихся деталей. Максимальная температура наблюдается в эвтектических композициях. Эвтектика представляет собой в данном случае механическую смесь бористого феррита и бороцементита и имеет пластинчатое строение (границы фаз), что является препятствием на пути распространения теплового потока. Как известно, теплопроводность избыточных фаз больше, чем у механической смеси, но меньше, чем у твердых растворов. Следовательно, чем больше содержание феррита в материале, тем выше теплопроводность. Установлено, что в этом случае наблюдается минимальный износ вклада

Если у подложки располагаются крупно- и среднелдисперсные (50...120 мкм) фазы, то к внешней границе материала феррит заметно измельчается (до 50 мкм), что хорошо согласуется с теоретической моделью. Бористая эвтектика занимает 17 % объема покрытия и равномерно распределена по всему материалу, т.е. выполняет функцию своеобразного каркаса. Вторичные боридные и бороцементитные фазы составляют 1,8 % объема материала. Они расположены на периферии фаз $Fe-\alpha$, повышая несущую способность

дыша. Это хорошо согласуется с приведенными данными при снижении содержания бора.

Установлено, что разработанный материал по своим триботехническим свойствам приближается к теоретически смоделированному и является адекватной заменой антифрикционным бронзам при эксплуатации в условиях переменных нагрузок (табл. 4). При этом коэффициент трения созданного материала составляет 0,17...0,19.

Таблица 4

Износ трибопар при различных режимах нагружения, путь трения 6000 м

Материал	Износ, мг·10 ⁻⁶	
	постоянная нагрузка	переменная нагрузка
БрОФ 10-1	0,17	0,35
БрОЦС 5-5-5	2,95	0,86
БрАЖ 9-4	1,0	0,56
СЧ 20 + 1,5 % В + 10 % Cu	0,25	0,9
СЧ 20 + 2,6 % В + 10 % Cu	0,82	0,36

Пятая глава отражает результаты разработки и внедрения антифрикционного материала из легированной бором и медью стружки в промышленности. Разработанный антифрикционный материал был апробирован при изготовлении и восстановлении подшипников скольжения различных кривошипно-шатунных механизмов (табл. 5). Как показали исследования, именно в условиях переменных нагрузок антифрикционный материал является более предпочтительным, чем медные сплавы.

Таблица 5

Применение результатов исследований в промышленности

Организация	Исходная деталь, материал, условия эксплуатации	Антифрикционный материал втулки из легированной бором и медью стружки	Результаты замены
1	2	3	4
ОАО «Витебский мотороремонтный завод»	Втулки головки шатуна ДВС: СМД-18 – литая; СМД-31 – биметаллическая (35...40 HRC _э ; V _{ск} – 8 м/с; P – 4,5 МПа)	Биметаллическая втулка: основа – сталь 20; рабочий слой – легированная бором и медью стружка на основе СЧ 20 + 10 % Cu + 1,5 % В; 183 НВ	Увеличение срока службы в 1,9...2,2 раза. Разница затрат: 25638 руб./шт.; 14601 руб./шт. соответственно
ОАО «Минский подшипниковый завод»	Цельные втулки: из бронзы БрОФ 10-1 (литая); точеная из прутка БрАЖ 9-4 (среда с 15 % абразива; 45...50 HRC _э ; V _{ск} – 4 м/с; P – 6,8 МПа)	Биметаллическая втулка: основа – сталь 20; рабочий слой – легированная бором и медью стружка на основе СЧ 20 + 3 % Cu + 0,8 % В; 90 НВ	Срок службы сопряжения больше, чем исходный в 1,2 раза

1	2	3	4
УП Минский завод Проммаш»	Цельная втулка: сталь 20 с цементацией (45 – 50 HRC ₃ ; V _{ск} – 5 м/с; P – 4 МПа)	Биметаллическая втулка: основа – сталь 20; рабочий слой – легированная бором и медью стружка на основе СЧ 20 + 15 % Cu + 0,7 % В; 165 НВ	Увеличение износостойкости узла составляет 3,3 раза. Расчетный ожидаемый экономический эффект на изделие составит 4856 руб.
ОАО «Полоцкий завод «Проммашремонт»	Втулка поршневых пальцев двигателя ЗМЗ-53 биметаллическая из бронзы БрОЦС 5-5-5 (НВ 108; V _{ск} – 4 м/с; P – 7 МПа)	Биметаллическая втулка: основа – сталь 20; рабочий слой – легированная бором и медью стружка на основе СЧ 20 + 10 % Cu + 3 % В; 200 НВ	Увеличение износостойкости в 2,1 раза
УО «ПУУ»	Учебный процесс, кафедра технологии конструкционных материалов, курс «Триботехника», дипломное проектирование по специальности Т 03.02.01		

Разработаны эффективные приемы, режимы и соответствующая оснастка, позволяющие получить стабильные по толщине антифрикционные материалы из легированной бором и медью стружки.

Разработаны и изготовлены антифрикционные и абразивостойкие материалы для деталей нефтехимического и сельскохозяйственного оборудования, предприятий Витебской области.

Разработаны Технические Условия ТУ РБ 02071694.004-2004 «Материал антифрикционный для подшипников скольжения»; а также Технологический регламент 4120/08 на получение антифрикционного материала.

Для ОАО «Полоцкий завод «Проммашремонт»» разработан технологический процесс получения подшипника скольжения с рабочим слоем из разработанного материала (ТП 02071694.015-01).

Технико-экономический анализ применения антифрикционного материала на предприятиях Республики Беларусь свидетельствует об эффективности разработанных технических решений (табл. 6)

Таблица 6

Технико-экономические показатели замены опорных втулок на ОАО «Витебский мотороремонтный завод»

Типоразмер втулки	Стоимость новой детали, руб.*	Стоимость деталей из разработанного материала, руб.	Годовая программа выпуска, тыс. шт.	Расчетный экономический эффект, тыс. руб.
240-1004115	44600	20000	20	492000
A 57.01.006	87000	40000	25	1175000
A 57.01.019	144000	55000	35	3115000
01 – 09	51000	25000	5	130000

* Цены приведены по состоянию на 2000 год

Ожидаемый расчетный экономический эффект по предприятию ОАО «Витебский мотороремонтный завод» при замене втулок указанных типоразмеров 4 912 000 тыс. руб. (в ценах 2000 года); УП «Минский завод «Проммаш» 121400 тыс. руб. (в ценах 2002 года).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и запатентован антифрикционный гетерогенный материал из диффузионно-легированной бором и медью чугунной стружки (Положительное решение по Заявке № а 20000543 от. 12.06.2000), высокая износостойкость которого обеспечивается за счет наличия и распределения в структуре высокотвердых, избыточных фаз, обеспечивающих релаксацию пиковых нагрузок, фаз, обладающих высокими антифрикционными свойствами, матричных фаз, воспринимающих основные нагрузки и обеспечивающих основной отвод тепла из зоны контакта и эвтектических фаз, повышающих несущую способность материала. Износостойкость разработанного материала в тяжелых условиях трения скольжения превосходит износостойкость БрАЖ 9-4, БрОЦС 5-5-5, БрОФ 10-1 в 2,8...2,9 раза [1, 4, 5, 6, 11, 16, 19].

2. Изучено влияние технологических режимов процесса диффузионного легирования бором и медью на строение и свойства гетерогенного материала из чугунной стружки. Установлено, что меднение происходит только после борирования, причем медь припекается на границе боридного слоя. В результате получается композиционный материал, содержащий ядро из феррита с микротвердостью H_{20} 880...3860 МПа, периферийный боридный слой с микротвердостью H_{20} 7500...9000 МПа и припеченные частицы меди с микротвердостью H_{20} 300...700 МПа [1, 10, 11, 16].

3. Предложен способ нанесения и установлены наилучшие технологические параметры, обеспечивающие получение структуры материала, работающего в тяжелых условиях эксплуатации, при динамическом нагружении. Для легированного бором и медью материала на основе серого чугуна параметры формирования следующие: дистанция напыления 95...105 мм при силе тока 180...220 А. Для материала на основе белого чугуна параметры напыления: дистанция 95...105 мм, сила тока 220...260 А [1, 10, 11, 16].

4. Данные теоретических исследований, воплощенные в разработанной модели антифрикционного материала, подтверждены экспериментальными исследованиями. Выявлено наилучшее, с точки зрения триботехнических свойств, расположение элементов – составляющих в материале. Матричная фаза феррита занимает 50...55 % объема. Бористая эвтектика занимает 10...15 % объема и равномерно распределена по всему материалу. Вторичные боридные и бороцементитные включения составляют 1,5...2 % объема материала и расположены на периферии фаз. Медная фаза при дисперсности до 50 мкм располагается у внешней границы материала, ближе к основанию дисперсность увеличивается до 100 мкм. Сферические поры, занимающие не более 10 % объема материала, сосредоточены в верхней части [1, 2, 3, 4, 5, 7, 11, 14, 18].

5. Температура в зоне контакта антифрикционных материалов из диффузионно-легированной бором и медью стружки серого чугуна оказывает существенное влияние на их триботехнические свойства. Наибольшая температура и, соответственно, неудовлетворительные триботехнические свойства характерны для материалов с эвтектической концентрацией бора, что обусловлено низкой темпера-

туропроводностью дисперсной эвтектической механической смеси бористого феррита и борозементита. Уменьшение температуры в контактной зоне материалов с доэвтектической концентрацией бора, обусловленное уменьшением доли эвтектики за счет увеличения количества феррита, обеспечивает повышение антифрикционных свойств материалов в условиях переменных нагрузок. Установлено, что покрытия с доэвтектической концентрацией (до 3...4 % масс.) бора обладают хорошей прирабатываемостью и минимальной температурой в зоне контакта [8, 12, 13, 14, 15, 17].

6. Разработаны Технические Условия ТУ РБ 300220696.001-2004, Технологический регламент 4120/08 и комплект технологической документации (ТП 02071694.-15-01) на получение антифрикционного материала из диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки. Результаты производственных испытаний, проведенных на ряде предприятий, свидетельствуют об эффективности замены разработанным материалом бронз в подшипниках скольжения кривошипно-шатунных механизмов. Так, долговечность подшипника из разработанного материала в 2,9 раза выше, чем из бронзы БрОЦС 5-5-5 (ОАО «Проммашремонт»). Предложены рекомендации по замене существующих антифрикционных материалов разработанными [1, 4, 5, 6, 9].

Расчетный ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанных материалов только на ОАО «Витебский мотороремонтный завод» составляет 4912000 руб. (по ценам 1997 г.).

Соискатель выражает благодарность В.М. Константинову, канд. техн. наук, доценту кафедры технологии конструкционных материалов УО «ПГУ» за многолетнюю поддержку и научно-методическую помощь, оказанную в процессе выполнения работы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научно-технических журналах

1. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной стружки как альтернатива антифрикционным бронзам // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. – С. 36 – 39.
2. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Взаимосвязь структуры и свойств антифрикционных газотермических покрытий из боромедненной стружки // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. – 2003. – Т. 2, № 2. – С. 7 – 11.
3. Триботехнические и теплофизические свойства газотермических покрытий из диффузионно-легированной стружки / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Фруцкий, В.И. Сороговец // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 2. – С. 190 – 196.

Статьи в сборниках трудов и материалах конференций

4. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Разработка экономно-легированных материалов для восстановления подшипников скольжения // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Темат. сб. – Новополоцк, 1999. – С. 28 – 30.
5. Авсиевич А.М., Фруцкий В.А. Исследование технологичности диффузионно-легированных самофлосующихся порошков при напылении газотермических покрытий // 22 Международный симпозиум ученых, студентов и аспирантов. Т. Механика, Зелена Гура (Республика Польша), май 2001 г. – Зелена Гура, 2001. – С. 223 – 229.
6. Исследование прочности сцепления с основой напыленных плазменных покрытий из борированных диффузионно-легированных самофлосующихся порошков / А.М. Авсиевич, О.Г. Девойно, С.А. Гришанов, В.А. Фруцкий // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 98 – 100.
7. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Газотермические покрытия из диффузионно-легированной чугунной стружки как альтернатива антифрикционным бронзам // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 105 – 109.
8. Фруцкий В.А. Диффузионно-легированный порошок из чугунной стружки для антифрикционных покрытий // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Сб. ст. / Под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 35 – 37.
9. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Перспективный способ восстановления деталей в ремонтном производстве // Материалы МНТК, Одесса, 18 – 20 апреля 2000 г. – Одесса, 2000. – С. 19 – 20.
10. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Исследование процессов диффузии в композиционных покрытиях // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: Материалы МНТК, Могилев, 18 – 19 мая 2000 г. – Могилев, 2000. – С. 151 – 152.
11. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Разработка альтернативного композиционного материала для восстановления и упрочнения антифрикционных деталей // Настоящее и будущее в области механизации и электрификации сельского хозяйства: Материалы НТК, Кишинев, 19 – 20 октября 2000 г. – Кишинев, 2000. – С. 214 – 216.
12. Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Моделирование условий работы трибосопряжений с переменной нагрузкой // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: Материалы МНТК, посв. 80-летию БГПА, Минск, 21 – 24 ноября 2000 г. – Мн.: БГПА, 2000. – С. 123 – 125.

13. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Триботехнические аспекты разработки альтернативного антифрикционного материала // НИРС-2000: Материалы V респ. науч. конф. студ. магистрантов, аспирантов Республики Беларусь, Гродно, 25 – 27 ноября 2000 г. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 226 – 229.
14. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Исследование газотермических антифрикционных покрытий из диффузионно-легированных чугуновых порошков // Пленки и покрытия: Материалы 6-й МНТК / Под ред. В.С. Клубникаина. – СПб.: ГТУ, 2001. – С. 383 – 384.
15. Константинов В.М., Сивый С.Б., Фруцкий В.А. Изучение триботехнических характеристик газотермических бронзовых покрытий // Пленки и покрытия: Материалы 6-й МНТК / Под ред. В.С. Клубникаина. – СПб.: ГТУ, 2001. – С. 385 – 386.
16. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Антифрикционный порошковый материал из диффузионно-легированной чугуновой стружки // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: Материалы 6-й МНТК. – Мн.: Тонпик, 2004. – С. 36 – 38.
17. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Исследование триботехнических аспектов разработки альтернативного антифрикционного материала // Защитные покрытия, сварка и контроль: Сб. докл. 33-го межгосударственного семинара, Минск, 25 апреля 2002 г. – Мн.: НИКТИСП с ОП, 2002. – С. 56 – 57.

Тезисы докладов

18. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Фруцкий В.А. Антифрикционные газотермические покрытия на основе легированной чугуновой стружки для подшипников скольжения // Тез. докл. Белорусско-Польского науч.-практ. семинара, г. Ольштын (Республика Польша). – Мн., 2004. – С. 116 – 118.

Патенты и заявки на изобретения

19. Пат. № 277 G 01 N 3/56. Приспособление для триботехнических испытаний / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Фруцкий. – № И 20000153; Заявл. 03.10.2000; Опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Вынаходніцтвы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры. – 2001. – № 2. – С. 181.
20. Положительное решение по Заявке на изобретение Республики Беларусь № а 20000543. Способ получения износостойких покрытий / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Фруцкий; Заявл. 12.06.2000; Опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Вынаходніцтвы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры. – 2001. – № 4. – С. 40.
21. Заявка на изобретение Республики Беларусь № а 200010023. Порошок для термического нанесения покрытий / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Фруцкий; Заявл. 01.09.2001; Опубл. // Афіцыйны бюлетэнь / Вынаходніцтвы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры. – 2002. – № 3. – С. 40.

РЕЗЮМЕ

ФРУЦКИЙ Виктор Александрович

**АНТИФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ И МЕДЬЮ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ
ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

Ключевые слова: антифрикционный материал, диффузионное легирование, подшипники скольжения, напыление, структура, износ.

Объект исследования – антифрикционные гетерогенные материалы из диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки.

Предмет исследования – взаимосвязь режимов диффузионного легирования и нанесения чугуновой стружки, химического состава, микроструктуры, микродюрметрии фаз, теплофизических свойств материала с его триботехническими характеристиками.

Цель работы – повышение износостойкости тяжело нагруженных пар трения, работающих при переменных динамических нагрузках, путем разработки антифрикционного гетерогенного материала с управляемой структурой из диффузионно-легированной бором и медью чугуновой стружки.

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования структуры и свойств антифрикционных материалов на основе чугуновой стружки, в том числе металлографические исследования (микротвердомер ПМТ-3), фазовый рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3,0), испытания материала на износостойкость в условиях переменных нагрузок при недостатке смазки.

Разработаны антифрикционные материалы из чугуновой стружки и технология изготовления подшипников скольжения, эксплуатирующихся в тяжелых режимах нагружения, позволяющая повысить долговечность пары трения за счет увеличения износостойкости, обеспечивающейся структурой материала.

Установлено влияние легирующих элементов и режимов формирования на структуру и свойства материала.

Определены системы легирования, содержание легирующих элементов, режимы формирования материалов для конкретных условий эксплуатации, обеспечивающих повышение долговечности подшипников скольжения в 1,9...3,2 раза.

Разработан технологический регламент производства антифрикционных материалов. Материалы и технология получения подшипников скольжения предложены к использованию в производстве.

Область применения результатов работы – производство антифрикционных материалов для подшипников скольжения в машиностроительном и ремонтном производстве.

ФРУЦКІ Віктар Аляксандравіч

АНТЫФРЫКЦЫЙНЫ МАТЭРЫЯЛ З ЛЕГІРАВАНАЙ БОРАМ І МЕДЗЬЮ ЧЫГУННАЙ СТРУЖКІ ДЛЯ ПАДШЫПНІКАЎ СЛІЗАННЯ

Ключавыя словы: антыфрыкцыйны матэрыял, дыфузійнае легіраванне, падшыпнік слізання, напыленне, структура, знос.

Аб'ект даследавання – антыфрыкцыйныя гетэрагенныя матэрыялы з дыфузійна-легіраванай борам і медзю стружкі.

Прадмет даследавання – узаемасувязь рэжымаў дыфузійнага легіравання і нанясення чыгуннай стружкі, хімічнага складу, мікраструктуры, мікрадзюраметры фаз, цеплафізічных уласцівасцяў матэрыялу з яго трыбатэхнічнымі характарызтыкамі.

Мэта работы – павышэнне зносаўстойлівасці цяжканагружаных пар трэння, якія працуюць пры пераменных дынамічных нагрузках, праз распрацоўку антыфрыкцыйнага гетэрагеннага матэрыялу з прагназіруемай структурай з дыфузійна-легіраванай борам і медзю чыгуннай стружкі.

У рабоце выкарастаны тэарэтычныя і эксперыментальныя метады даследавання структуры і ўласцівасцяў антыфрыкцыйных матэрыялаў на аснове чыгуннай стружкі. у тым ліку металаграфічныя даследаванні (мікрацвердамер ПМТ-3), фазавы рэнтгенаструктурны аналіз (дыфрактометр ДРОН-3,0), выпрабаванні матэрыялу на зносаўстойлівасць ва ўмовах пераменных нагрузак пры недахопе змазкі.

Распрацаваны антыфрыкцыйныя матэрыялы з чыгуннай стружкі і тэхналогія вырабу падшыпнікаў слізання, якія эксплуатуецца ў цяжкіх рэжымах нагружэння, што дазваляе павысіць даўгавечнасць пары трэння за кошт павелічэння зносаўстойлівасці, якая забяспечваецца структурай матэрыялу.

Устаноўлены ўплыў легіруючых элементаў і рэжымаў фарміравання на структуру і ўласцівасці матэрыялу.

Вызначаны сістэмы легіравання. утрыманне легіруючых элементаў, рэжымы фарміравання матэрыялаў для канкрэтных умоў эксплуатацыі, якія забяспечваюць павышэнне даўгавечнасці падшыпнікаў слізання ў 1,9...3,2 разы.

Распрацаваны рэгламент вытворчасці антыфрыкцыйных матэрыялаў. Матэрыялы і тэхналогія вырабу падшыпнікаў слізання прапанаваны да выкарыстання ў вытворчасці.

Галіна прымянення вынікаў работы – выраб антыфрыкцыйных матэрыялаў для падшыпнікаў слізання ў машынабудуўнічай і рамонтнай вытворчасці.

SUMMARU

Frutski Victor

**ANTIFRICTIONAL MATERIAL FROM BORON AND COPPER
THE PIG-IRON SHAVING FOR BEARING OF SLIDING**

Key words: an antifrictional material, run through alloying, bearings of sliding, heaping, structure, wear.

The object of research – antifrictional heterogeneous materials from diffusion-alloyed by a pine boron and copper of a pig-iron shaving.

The subject of research – interrelation of modes through alloying and drawings of a pig-iron shaving, a chemical compound, a microstructure, microdurometrieng phases, thermal physics properties of a material from it tribo engineering characteristics.

The purpose of work – development of an antifrictional heterogeneous material with predicted structure for increase of wear resistance heavily load the pairs friction working at variable dynamic loadings from run through-alloyed pine boron and copper of a pig-iron shaving, as alternative to known antifrictional materials.

In work theoretical and experimental methods of research of structure and properties of antifrictional materials are used on the basis of a pig-iron shaving, including metalgraphing researches (microhardnessguage ПИМТ-3), phase x-structure the analysis (diffractometer ДРОН-3,0), tests of a material for wear resistance in conditions of variable loadings at lack of greasing.

Antifrictional materials from a pig-iron shaving and manufacturing techniques of bearings of the sliding maintained in heavy modes loadе are developed, allowing to raise durability of pair friction due to increase in the wear resistance provided by structure of a material. Influence of alloying elements and modes of formation is established on structure and properties of a material. Influence of alloying elements and modes of formation is established on structure and properties of a material. Systems alloying, percentage of alloying elements, modes of formation of materials for the concrete conditions of operation providing increase of durability of bearings of sliding in 1,9...of 3,2 times are determined.

The rules of manufacture of antifrictional materials is developed. Materials and technology of reception of bearings of sliding from them are offered to use in manufacture. A scope of results of work-manufacture of antifrictional materials for bearings of sliding in machine-building and repair manufacture.

ФРУЦКИЙ Виктор Александрович

**АНТИФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ И МЕДЬЮ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ
ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Редактор Р.Н. Авласенок

Подписано в печать 01.06.06.	Формат 60×84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.	Гарнитура Таймс
Усл. печ. л. 1.39.	Уч. - изд. л. 1,14.	Тираж 60.	Заказ 800.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 г.
ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04 г.

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29