

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ ИНФИЛЬТРИРОВАННЫЕ МЕДНЫМИ СПЛАВАМИ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ТЯЖЕЛОАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, СТРУКТУРА, ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

1. Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

2. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,  
Минск, Беларусь

*Представлены результаты исследования влияния состава на структуру и триботехнические свойства инфильтрированных медью каркасов на основе железа. Показана актуальность проведенных исследований, приведена методика получения материалов, приборы и методы исследования их структуры и триботехнических свойств. Показано, что псевдосплавы, получаемые инфильтрацией пористых каркасов на основе железа медным сплавом, имеют более высокие механические и триботехнические свойства, чем получаемые прессованием и спеканием. Установлено, что состав каркаса, его пористость и режимы получения оказывают существенное влияние на морфологию структуры и свойства инфильтрированных материалов. Псевдосплавы, полученные по традиционной технологии порошковой металлургии, имеют высокую (до 20 %) пористость размером более 100 мкм, неоднородную структуру и дискретное расположение медной фазы, полученные инфильтрацией, имеют пористость менее 10 %, а медная фаза располагается равномерно по границам частиц и зерен с в стыках зерен. Увеличение содержания меди в материале приводит к повышению триботехнических свойств, как материалов, получаемых прессованием и спеканием, так и инфильтрацией, а повышение содержания углерода в стальном каркасе обеспечивает высокую износостойкость и предельное давление схватывания. При наличии в структуре каркаса псевдосплава свободного цемента в виде разорванной или сплошной сетки при содержании углерода более 1,5 % износостойкость псевдосплава существенно возрастает, так при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Коэффициент трения инфильтрированных материалов в большей степени зависит от содержания меди, износостойкость и предельное давление схватывания – от твердость стального каркаса. Выявлено, что псевдосплавы, полученные инфильтрацией, обладают хорошей прирабатываемостью.*

**Введение.** Основными узлами, определяющими срок службы машин и механизмов, являются узлы трения, долговечность которых зависит от характеристик антифрикционных материалов подшипников скольжения [1; 2]. Параметрами, характеризующими эксплуатационные свойства современных антифрикционных материалов, являются необходимые триботехнические свойства, а для тяжелых условий работы – еще и высокие прочность, теплопроводность, термостойкость, самосмазываемость.

Преимущественно для подшипников скольжения применялась литая бронза, однако уровень ее триботехнических и механических свойств недостаточен для работы в условиях высоких нагрузок, поэтому были созданы порошковые композиционные материалы, обладающие высоким комплексом механических и триботехнических свойств. Технология порошковой металлургии позволяет создавать материалы, получить которые традиционной металлургией невозможно. Триботехнические и механические свойства

порошковых материалов можно варьировать их составом, пористостью, введением твердых керамических добавок и добавок соединений, выполняющих роль твердых смазок, образующих на поверхности трения разделительную пленку.

Неограниченными перспективами для работы в условиях трения обладают композиционные материалы, состоящие из компонентов с различающимися физико-химическими свойствами – псевдосплавы [3; 4], которые получают прессованием и спеканием, а также методом инфильтрации спрессованных или спеченных каркасов. Метод инфильтрации позволяет получать высокоплотные, соответственно высокопрочные, материалы. Наиболее широко в промышленности применяются псевдосплавы сталь – медный сплав, поскольку имеют широкий диапазон свойств, получаемых варьированием состава стального каркаса и инфильтрата в виде медного сплава. Кроме того, поскольку основой материала является железо, псевдосплавы значительно дешевле антифрикционных материалов на основе медных сплавов.

Метод инфильтрации позволяет получать изделия с уникальным комплексом физико-механических (низкая пористость, высокая прочность и теплопроводность, ктлр, близкий ктлр компактных сталей и др.) триботехнических (низкий коэффициент трения, высокая износостойкость), функциональных (высокие электропроводность, коррозионная стойкость, теплостойкость, демпфирующие свойства) характеристик, благодаря чему они находят широкое применение в промышленности для изделий различного назначения [5; 6].

Инфильтрация может производиться принудительно, когда угол смачивания между инфильтратом и каркасом более  $90^\circ\text{C}$ , либо самопроизвольно, когда угол смачивания стремиться к 0 [7], кроме того, необходимо учитывать возможность взаимодействия в процессе инфильтрации материала инфильтрата и каркаса, поскольку при межфазном взаимодействии жидкой и твердой фаз каркасная структура может переходить в матричную, а в случае, если прочность инфильтрированного материала обеспечивается каркасом, такая трансформация структуры недопустима. Одним из методов снижения вредного влияния взаимодействия жидкой и твердой фаз является их направленное легирование.

При получении материалов методом инфильтрации необходимо учитывать, что жидким металлом могут заполниться только открытые и тупиковые поры, а степень их заполнения зависит от размера пор и изменения их размеров в процессе инфильтрации [8; 9].

Для повышения свойств *Fe–Cu* композиционных материалов в железо вводится углерод и легирующие элементы (*Ni*, *Cr*, *Mo*, *V* и др.), в медь – *Sn*, *Zn*, *Cr*, *Ni* и др., а также применяются термическая, термомеханическая и химико-термическая обработки.

**Основная часть.** В работе исследовали взаимосвязь состава и триботехнических свойств антифрикционных инфильтрированных медными сплавами каркасов из порошковых сталей.

Сравнительные испытания триботехнических свойств выявили преимущества псевдосплавов, полученных инфильтрацией, по сравнению с псевдосплавами, полученными традиционными методами порошковой металлургии, и компактной бронзой, особенно по предельному давлению схватывания и коэффициенту трения при больших давлениях (рис. 1). Это объясняется структурой и теплофизическими свойствами материала. Псевдосплавы, полученные по традиционной технологии порошковой металлургии, имеют высокую (до 20 %) пористость размером более 100 мкм, неоднородную структуру и дискретное расположение медной фазы (рис. 2, *а*), из-за чего теплопроводность их низкая, а в полученных инфильтрацией, пористость не превышает 10 % и медная фаза располагается равномерно по границам частиц и зерен и в стыках зерен (рис. 2, *б*), что обеспечивает повышенную теплопроводность.

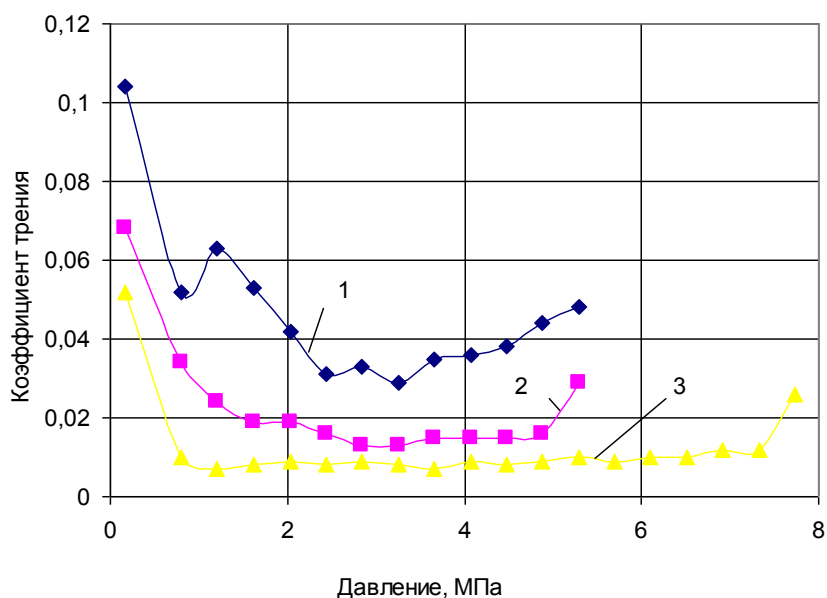


Рис. 1. Влияние давления на коэффициент трения антифрикционных материалов на основе железа:  
 1 – псевдосплав, полученный инфильтрацией каркаса плотностью 85 % из материала,  $Fe + 1 \%Gr$  инфильтратом  $Cu + 5 \%Sn$ ; 2 – псевдосплав,  $Fe + 1 \%Gr + 15 \%Cu + 5 \%Sn$ , полученный прессованием и спеканием; 3 – компактная бронза БрО10

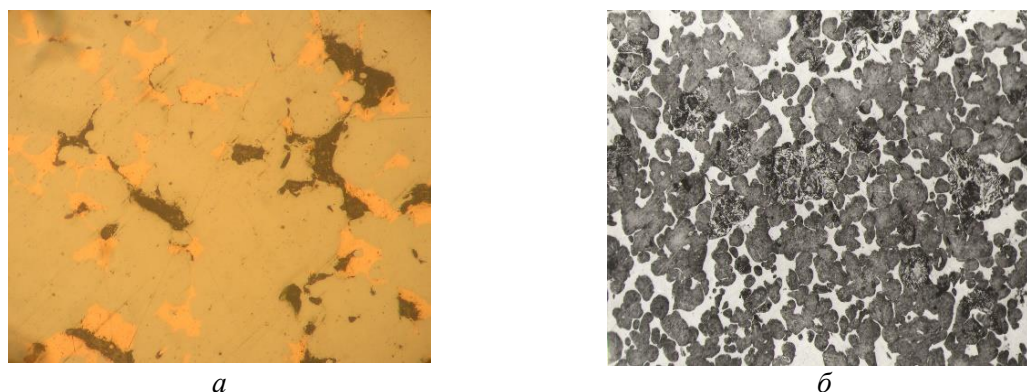


Рис. 2. Микроструктура псевдосплава ЖГр1Д25, полученного различным способом:  
 а – прессование и спекание, не травлено; б – инфильтрация, травлено. X350

Свойства псевдосплавов, получаемых инфильтрацией, определяются составом пористого стального каркаса и составом, содержанием и морфологией инфильтрата. Свойства псевдосплавов повышаются с увеличением содержания меди и углерода. Необходимо отметить, что, если на коэффициент трения в большей степени влияет содержание меди и в меньшей – содержание углерода (рис. 3), то износостойкость и предельное давление схватывания определяется преимущественно твердостью стального каркаса, соответственно, содержанием в нем углерода (рис. 4, табл. 1). При наличии в структуре каркаса псевдосплава свободного цементита в виде разорванной или сплошной сетки при содержании углерода более 1,5 % износостойкости псевдосплава существенно возрастает, так при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при

содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Выявленный эффект снижения интенсивности изнашивания псевдосплавов, полученных инфильтрацией, с увеличением времени испытания говорит об их хорошей прирабатываемости.

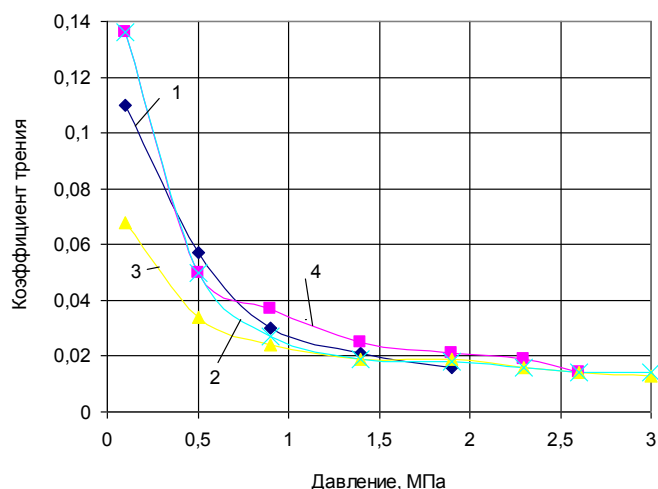


Рис. 3. Влияние давления и содержание углерода в каркасе на коэффициент трения псевдосплав, полученного инфильтрацией медным сплавом:  
1 – 0,3 %; 2 – 0,8 %; 3 – 1,2 %; 4 – 1,8 %

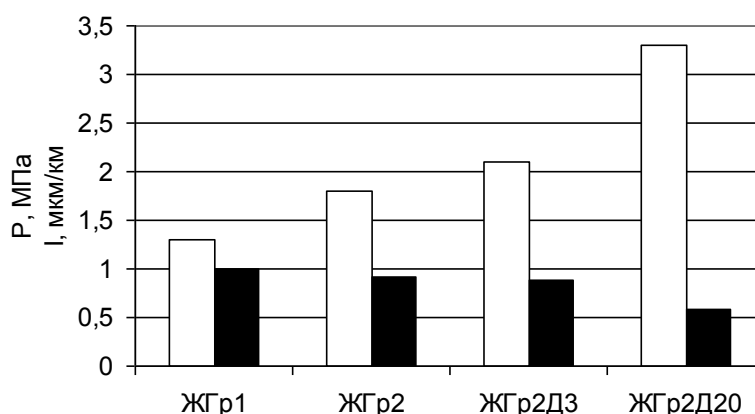


Рис. 4. Влияние содержания меди на предельное давление схватывания и интенсивность изнашивания (при  $P = 2,8$  МПа,  $V = 4$  м/с) псевдосплав, получаемого прессованием и спеканием:  
□ – предельное давление схватывания (P); ■ – интенсивность изнашивания (I)

Таблица 1 – Влияние содержания углерода, меди и состояния каркаса на износостойкость при  $P = 5$  МПа,  $V = 6$  м/с псевдосплав, полученного инфильтрацией

Время изнашивания, ч	Интенсивность изнашивания, мкм/км						
	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,0
Содержание графита, %	25	15	15	15	15	25	15
Содержание меди, %	спеч.	спеч.	неспеч.	спеч.	спеч.	спеч.	спеч.
Состояние каркаса							
2	0,87	1,85	0,69	0,463	0,347	0,23	0
5	0,805	1,02	0,648	0,37	0,278	0,185	0,185
10	0,506	0,602	0,463	0,255	0,278	0,185	0,139

Ведение добавок твердых смазок в виде свинца, сульфидов, селенидов в каркас позволяет существенно снизить коэффициент трения псевдосплавов (рис. 5).

Наиболее эффективно снижает коэффициент трения добавка 5 % свинца – с 0,016 до 0,007 при одном и том же давлении схватывания. А повысить предельное давление схватывания можно введением твердых керамических добавок [10].

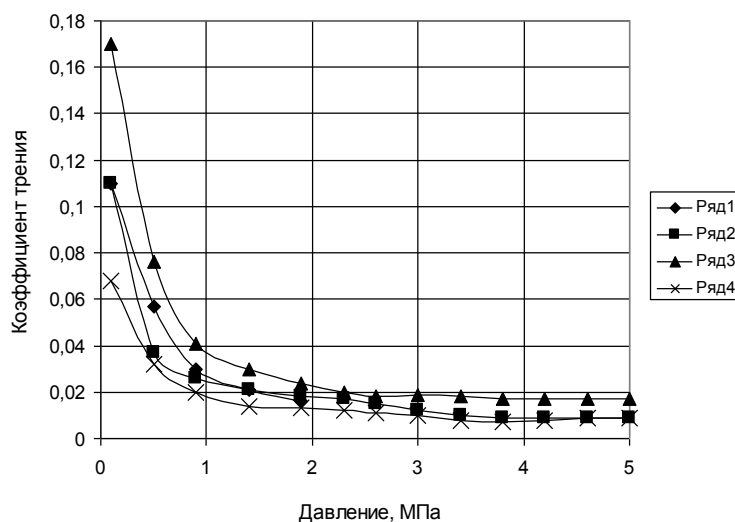


Рис. 5. Влияние давления на коэффициент трения псевдосплавов на снеге каркаса из стали ЖГр0,5 с добавкой твердой смазки, инфильтрированного медно-оловянным сплавом: ряд 1 – 0 % добавки; ряд 2 – 0,5 % MoS<sub>2</sub>; ряд 3 – 0,8 % S; ряд 4 – 5 % Pb

### **Выводы.**

Исследовано влияние состава на триботехнические свойства инфильтрированных медью стальных каркасов. Показано, что псевдосплавы, получаемые инфильтрацией пористых каркасов на основе железа медным сплавом, имеют более высокие механические и триботехнические свойства, чем получаемые прессованием и спеканием. На коэффициент трения в большей степени влияет содержание меди, на износостойкость и предельное давление схватывания – твердость стального каркаса, соответственно, содержание в нем углерода, так, при содержании меди 25 % интенсивность изнашивания при повышении углерода с 0,3 до 1,8 % уменьшается в 3–4 раза в зависимости от времени изнашивания, а при содержании меди 15 % – в 2–4 раза соответственно. Выявленный эффект снижения интенсивности изнашивания псевдосплавов, полученных инфильтрацией, с увеличением времени испытания говорит об их хорошей прирабатываемости.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Сорокин, Г. М. Проблемы технического обновления различных отраслей машиностроения / Г. М. Сороркин // Трение и износ. – 2001. – Т. 22. – № 3. – С. 322–331.
2. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д. Н. Гаркунов. – М: МСХА, 2002. – 626 с.
3. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение/ А. А. Батаев, В. А. Батаев. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 400 с.
4. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технология, свойства, области применения. Справочник / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.

5. Краснобаев, А. Г. Конструирование структуры композиционных материалов на основе железа с заданными функциональными свойствами: дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / А. Г. Краснобаев. – Ростов-на-Дону, 2005. – 198 с.

6. Панин, В. Е. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье. – Новосибирск: Наука, 1993. – 153 с.

7. Тучинский, Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л. И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.

8. Дьячкова, Л. Н. Закономерности высокотемпературной инфильтрации при получении антифрикционных материалов системы железо-медь / Л. Н. Дьячкова, А. Н. Леонов, П. А. Витязь, М. М. Дечко // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56. – № 4. – С. 124–131.

9. Дьячкова, Л. Н. Закономерности формирования структуры псевдосплавов системы порошковая сталь – медный сплав, получаемых инфильтрацией / Л. Н. Дьячкова, П. А. Витязь // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56. – № 5. – С. 106–114.

10. Дьячкова, Л. Н. Порошковые материалы на основе железа с повышенными механическими и триботехническими свойствами. – Минск : Белорусская наука, 2020. – 203 с.

*Поступила 30.11.2023*

**УДК 004.89**

**Зеленковская Н. В., Горенкова М. А., Ясюкевич А. Д.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В настоящее время человечество достигло плато в определенных областях науки и технологий, что затрудняет разработку новых революционных идей. Поэтому рациональным будет движение не только вверх, но и вширь, то есть улучшение и модернизация уже имеющихся процессов и продуктов. В век автоматизации и оптимизации в приоритете стоит производство, так как численность населения растет, как и нужда в материальном обеспечении. Одной из самых важных целей в области науки является освоение искусственного интеллекта, так как его огромные возможности и потенциал позволят ускорить и облегчить многие трудоемкие процессы не только в производстве, но и в медицине, образовании, повседневной жизни и т. д.*

Машиностроение – высокотехнологичная отрасль, где на производстве выполняется множество трудоемких монотонных и рутинных операций. Внедрение и применение искусственного интеллекта в машиностроении имеет огромный потенциал, так как обеспечивает автоматизацию, улучшение точности и оптимизацию производства.

Искусственный интеллект – сфера науки и технологии, в которой компьютеры и машины способны выполнять задачи, решаемые с помощью интеллекта человека. Может использоваться для оптимизации рабочих процессов, распознавания и исправления ошибок, анализа данных и предоставления ценной информации для принятия управленческих решений.

Основными направлениями применения искусственного интеллекта являются:

– прогнозирование, анализ данных позволяет предсказывать потребность в ресурсах и снимает необходимость ручной проверки;

– отслеживание качества, автоматизированное отслеживание производственных процессов анализирует множество данных для предотвращения ошибок и повышение качества продукции;