

УДК 621.375.826

Изготовление фрикционных материалов системы Fe–Cu аддитивной технологией

Ломакин Иван Алексеевич^(*)ivlomakin@mail.ru
SPIN-код: 2261-5630

Шиганов Игорь Николаевич

inshig@bmstu.ru

Холопов Андрей Андреевич

xol@bmstu.ru

Богатырев Дмитрий Олегович

bdo15t467@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В данной работе исследовалась возможность создания композиционных материалов системы Fe–Cu методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ) с целью изготовления высококачественных фрикционных материалов. Для каждого из образцов определялись коэффициент трения и весовой износ в широком диапазоне температур. Выявлено значительное улучшение трибологических характеристик композиционных материалов относительно характеристик чистого железа и меди. Установлена оптимальная композиция 50%Fe–50%Cu, обладающая наименьшим износом (0,138 г/м³) и стабильными фрикционными свойствами. Показана температурная стабильность коэффициента трения до 150 °С, что расширяет область применения материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, фрикционные материалы, металлические композиты Fe–Cu, трибологические свойства, весовой износ, коэффициент трения

Manufacturing of Fe–Cu Friction Materials by Additive Technology

Lomakin Ivan Alekseevich

ivlomakin@mail.ru
SPIN-code: 2261-5630

Shiganov Igor Nikolaevich

inshig@bmstu.ru

Kholopov Andrey Andreevich

xol@bmstu.ru

Bogatyrev Dmitriy Olegovich

bdo15t467@student.bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This work investigated the possibility of creating Fe–Cu composite materials by direct laser deposition (DLD) method for manufacturing high-quality friction materials. Friction coefficient and weight wear were determined for each sample in a wide temperature range. Significant improvement of tribological characteristics of composite materials relative to pure iron and copper was revealed. The optimal composition 50%Fe–50%Cu with the lowest wear (0.138 g/m³) and stable friction properties was established. Temperature stability of friction coefficient up to 150 °C was shown, which expands the application area for sliding bearings of internal combustion engines and power plants.

Keywords: *additive manufacturing, direct laser deposition, friction materials, Fe–Cu metal matrix composites, tribological properties, wear resistance, friction coefficient*

Введение. Композиционные материалы на основе систем несмешивающихся компонентов (НК) обладают уникальными свойствами, которые делают их перспективными для различных промышленных применений. Их компоненты практически нерастворимы друг в друге, что позволяет создавать композиции, имеющие высокую износостойкость, термостойкость и низкий коэффициент трения [1]. Однако традиционные методы, такие как порошковая металлургия и литье, не позволяют добиться равномерного распределения фаз, что ограничивает их эксплуатационные характеристики.

Различие в плотности компонентов Fe–Cu приводит к их расслоению при кристаллизации, а существующие технологии не обеспечивают должного контроля над получаемой структурой. Метод прямого лазерного выращивания (ПЛВ) позволяет решить эти проблемы, обеспечивая послойное формирование структуры и равномерное распределение компонентов по объему изделия [2, 3]. Изготовление фрикционных деталей, таких как нагруженные подшипники скольжения для двигателей внутреннего сгорания и энергетики из композиционного материала системы НК железо–медь представляет особый интерес.

Материалы и методы. Методом ПЛВ на установке КЛП-500 сформированы объемные образцы из смеси порошков в соотношении: 100%Fe, 75%Fe–25%Cu, 50%Fe–50%Cu, 25%Fe–75%Cu. Концентрированный поток лазерной энергии обеспечил малый объем ванны расплава при высоких скоростях охлаждения и позволил получить материалы систем НК с равномерным распределением компонентов, минимальной взаимной растворимостью элементов и полностью исключал расслоение.

Для определения коэффициента трения и весового износа использовались образцы в виде дисков толщиной 5 мм и диаметром 45 мм, вырезанные из выращенных материалов. Испытания проводили на штифто-дисковом трибометре THT800 Anton Paar (рис. 1) при следующих условиях: нормальная нагрузка 7 Н, контртело — глиноземный шарик диаметром 6 мм, продолжительность испытаний 22000 оборотов, частота вращения 310 об/мин, температурный диапазон 20–250 °С.

Скорость износа рассчитывалась по формуле: $w = V/(d \cdot P)$, где V — объем удаленного материала, d — испытательное расстояние, P — приложенная нагрузка. Объем материала определялся путем измерения профиля дорожки износа (рис. 2) с помощью поверхностного профилометра Taylor Hobson с выполнением минимум шести измерений на каждом образце.

Результаты. В ходе проведенных трибологических испытаний дисковых образцов композитов на основе системы Fe–Cu, полученных методом прямого лазерного выращивания, были установлены зависимости весового износа и коэффициента трения от состава материала, а также температурная стабильность фрикционных характеристик. Результаты измерений массового износа представлены в таблице.

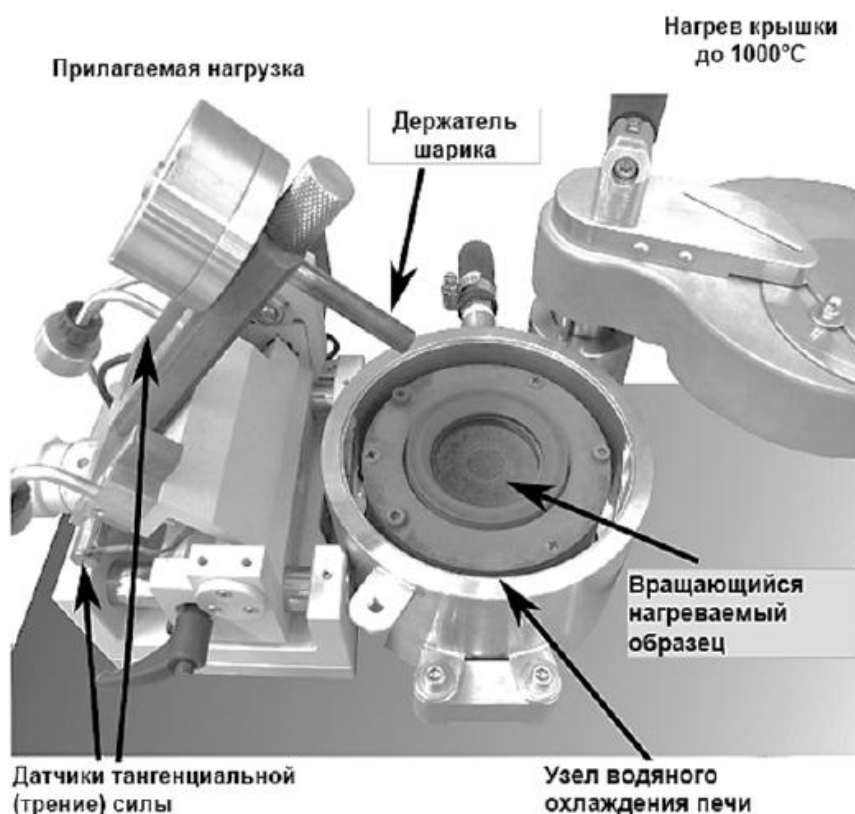


Рис. 1. Штифтодисковый трибометр ТНТ1000 с нагреваемыми образцами, представляющий основные компоненты для измерения приложенной силы и тангенциальной силы. Верхний нагреватель используется для получения максимальной температуры 1000 °С



Рис. 2. Схематическое изображение дорожки износа и измерения с помощью поверхностного профилометра (сканы)

График изменения коэффициента трения от взаимного содержания компонентов системы железо–медь при сухом трении приведен на рис. 3.

Исследовано изменение коэффициента трения образца с содержанием элементов 50%Fe–50%Cu при постепенном нагреве, результаты эксперимента представлены в графическом виде на рис. 4.

Весовой износ композитов Fe–Cu при 22000 оборотов

Материал (масс. %)	Весовой износ, г/м ³
100% Fe	0,175
75% Fe–25% Cu	0,162
50% Fe–50% Cu	0,138
25% Fe–75% Cu	0,147

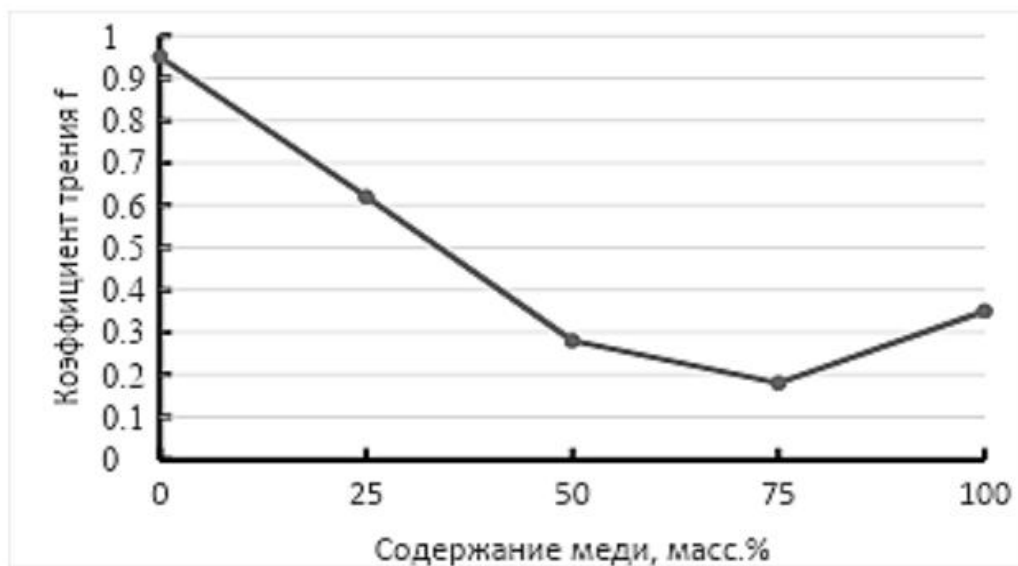


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от содержания меди в композиционном материале

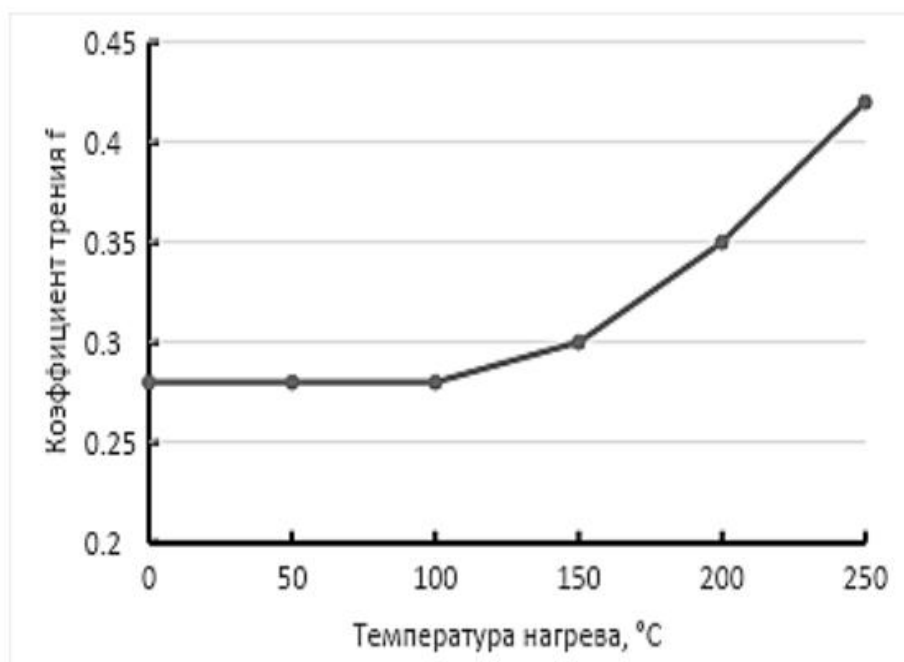


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента трения композиционного материала 50%Fe+50%Cu

Обсуждение. Результаты испытаний на весовой износ (рис. 3) показали, что наиболее низким значением обладает композиционный материал с содержанием элементов 50%Fe–50%Cu (0,138 г/м³).

В условиях сухого трения наблюдается снижение коэффициента трения с увеличением содержания меди в композиционном материале системы Fe–Cu. Наименьшее значение было получено для композиционного материала с содержанием меди на уровне 75 %, однако композиция 50%Fe+50%Cu (рис. 4) показала оптимальное сочетание низкого трения и высокой прочности.

Температурная зависимость коэффициента трения для композиции 50%Fe+50%Cu показывает стабильность в диапазоне температур от 20 до 150 °С. Начиная с температуры нагрева 200 °С коэффициент трения резко возрастает. Анализ результатов показал существенное снижение коэффициента трения и износа композиционных материалов по сравнению с характеристиками чистого железа и меди.

Заключение. Метод ПЛВ позволяет получать композиционные материалы Fe–Cu с контролируемым составом и равномерным распределением компонентов без расслоения. Композит 50%Fe–50%Cu демонстрирует оптимальные трибологические характеристики и стабильность при температурах работы до 150 °С. Аддитивная технология ПЛВ открывает перспективы создания сложных фрикционных элементов с градиентными свойствами для подшипников скольжения ДВС и энергетических установок.

Список источников

- [1] Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства)*. Москва, Интерконтакт Наука, 2002, 371 с.
- [2] Шиганов И.Н., Холопов А.А., Ломакин И.А., Богатырев Д.О. Структурные особенности композиционных материалов системы Fe–Cu, полученных аддитивной технологией прямого лазерного выращивания. *Технология машиностроения*, 2025, № 4, С. 5-10.
- [3] Makarenko K., Dubinin O., Shishkovsky I. Direct Energy Deposition of Cu–Fe System Functionally Graded Materials: Miscibility Aspects, Cracking Sources, and Methods of Assisted Manufacturing. *Advanced Additive Manufacturing, IntechOpen*, 2022.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.102562>