

УДК 621.891:620.22

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ  
МЕХАНИЗМА ТРЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**В. А. КОВТУН**

*Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,  
г. Гомель*

**В. Н. ПАСОВЕЦ**

*Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,  
г. Минск  
Государственное научно-производственное объединение  
порошковой металлургии, г. Минск, Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** наноструктуры углерода, полимерный наполнитель, композиционные порошковые материалы, триботехнические характеристики, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

**Введение**

Развитие современного машиностроения сопряжено с разработкой машин и механизмов различного назначения с высокими техническими характеристиками. Наиболее важным требованием к разрабатываемым машинам и механизмам является получение максимального эффекта от их использования при минимуме затрат на производство и обслуживание, чего можно добиться за счет повышения надежности и долговечности, снижения их материалоемкости и повышения нагрузочно-скоростных режимов работы.

Повышение нагрузочно-скоростных режимов функционирования техники невозможно без улучшения работы узлов трения машин и механизмов. При этом надежность функционирования узлов трения зачастую определяет надежность как отдельного агрегата, так и всей машины в целом. Износ поверхностей пар трения нарушает их взаимодействие, вызывает дополнительные ударные нагрузки, шум и вибрацию, а также может стать причиной разрушения как самого узла трения, так и механизма, в котором он установлен. Борьба с потерями на трение и изнашивание подвижных сочленений машин и механизмов является одной из приоритетных задач современного машиностроения. Разработка и применение современных материалов триботехнического назначения является одним из путей обеспечения надежности эксплуатации узлов трения. В связи с этим совершенствованию материалов, предназначенных для работы в узлах трения, уделяется постоянное и пристальное внимание. Такое внимание к данным материалам не случайно, так как в большинстве случаев детали, работающие в узлах трения, выходят из строя значительно раньше, чем другие части машин. В нашей стране, США, Великобритании, Германии и Японии

на ремонт машин и механизмов ежегодно расходуются колоссальные средства, из которых 85 % – на замену деталей узлов трения [1]–[4].

При разработке материалов узлов трения с целью повышения качества продукции, сбережения материальных, энергетических и трудовых ресурсов, а также улучшения экологической обстановки необходимо учитывать закономерности физических и химических процессов, протекающих при трении и изнашивании подвижных соединений, критерии антифрикционности и износостойкости, доступность компонентов и технологические аспекты получения. При выборе материалов пар трения необходимо учитывать их совместимость, возможность схватывания и последующего задира, что связано с химическим сродством, близостью строения и значений параметров кристаллических решеток. Материалы должны обеспечивать оптимальные параметры узла трения при длительной эксплуатации, быстро приспосабливаться к резким изменениям нагрузки, скорости и температуры при неблагоприятных условиях смазки. Процесс приработки должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задира, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения.

Наиболее оптимальными материалами для узлов трения, функционирующих в условиях трения без смазки, являются металлополимерные композиты, получаемые по технологии порошковой металлургии, позволяющей получить коэффициент использования материала, равный 0,95–0,98. Данный показатель для традиционной технологии механической обработки сортовых профилей находится в пределах 0,4–0,5 [5]. Использование самосмазывающихся материалов в узлах трения позволяет отказаться от системы подачи смазывающих веществ, что упрощает конструкцию и значительно снижает материалоемкость машин и механизмов.

На сегодняшний день в промышленности медь и ее сплавы нашли широкое применение в качестве матриц порошковых композитов, так как они обладают высокими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью и теплопроводностью. Также необходимо отметить, что медь является одним из распространенных материалов, что связано с простотой получения медных порошков, легкостью их восстановления из окислов, высокой пластичностью и сравнительно низкой температурой плавления и спекания. И. В. Крагельский в работе [6] отмечает, что пленки окислов, возникающие на меди, являются хорошей смазкой.

Исключительно высокими антифрикционными свойствами обладает политетрафторэтилен, коэффициент трения которого без смазки составляет 0,04–0,06. Однако политетрафторэтилен имеет низкий предел текучести и, как все полимеры, плохо отводит тепло. Высокие антифрикционные свойства политетрафторэтилена можно реализовать в комбинации с другими материалами, например, при введении в порошковую гетерогенную систему [7].

Разработка наноструктурированных материалов является одним из быстро развивающихся направлений современной науки и техники. К числу перспективных наполнителей наноструктурированных композиционных материалов относятся углеродные нанотрубки и луковичные наноструктуры углерода, обладающие уникальным комплексом физико-механических свойств [8], [9].

Цель работы состояла в исследовании нагрузочно-скоростного диапазона применения новых наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов.

#### **Материалы и методы исследования**

В качестве наноструктурного наполнителя при получении композиционных материалов использовали углеродные нанотрубки (УНТ) и луковичные наност-

руктуры углерода (ЛНУ), синтезированные методом пиролиза углеводородов в ИПМ НАН Украины (г. Киев). Медный порошок ПМС-1 ГОСТ 4960–2009, произведенный АО «Уралэлектромедь» (г. Верхняя Пышма, Россия), использовался без дополнительной очистки. В качестве полимерного наполнителя использовались плакированные, оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм, гранулы порошка ПТФЭ ГОСТ 10007–80. Плакирование поверхности гранул ПТФЭ осуществлялось путем химического осаждения меди из раствора медного купороса по ТУ 21-0282050-09–88. Содержание наноструктурного наполнителя в композиционном материале составляло 0,07 мас. %, полимерного наполнителя – 6 мас. %.

Распределение УНТ на поверхности и внутри дендритных частиц медного порошка осуществлялось в процессе механоактивации в течение 60 минут в специальном смесителе-активаторе [10] путем двухстадийной подготовки порошковой смеси. На первой стадии проводилась механоактивация порошковой системы «медь – наноструктуры углерода», на второй – смешивание данной порошковой системы с плакированным политетрафторэтиленом (ПТФЭ). Двухстадийная подготовка порошковой смеси позволяет сохранить наследственную структуру плакированного ПТФЭ.

Композиционные порошковые материалы получали методом электроконтактно-го спекания с использованием опытно-промышленной установки УНП 684, изготовленной на базе машины шовной сварки МШ 3207. Образцы формировались путем предварительного прессования при давлении 500 МПа в специальной пресс-форме. Спекание производилось путем пропускания электрического тока силой 20 кА в течение 1,5 секунды.

Исследование структуры наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов проводили методом сканирующей электронной микроскопии по стандартным методикам с использованием электронного микроскопа «VEGA II LSH». Триботехнические испытания исследуемых композитов проводили на машине СМЦ-2 при трении скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш» со ступенчатым повышением нагрузки при нескольких постоянных скоростях скольжения. С увеличением давления при постоянной скорости скольжения определялся момент, когда не могли быть получены устойчивые значения коэффициента трения при продолжении эксперимента или наблюдались признаки разрушения трущихся поверхностей.

Классическим критерием оценки работоспособности материалов триботехнического назначения является произведение удельной нагрузки на скорость скольжения – [pv]-фактор, который показывает предельно допустимый нагрузочно-скоростной режим эксплуатации. С целью определения уровня возможного применения наноструктурированных металлополимерных композитов в различных узлах трения машин и механизмов в данной работе исследованы значения [pv]-фактора.

### Результаты и их обсуждение

Экспериментальным путем установлены допустимые значения давления и скорости скольжения. Установлено, что в интервале значений нагрузки от 0,5 до 1,5 МПа происходит увеличение нагрузочной способности наноструктурированных металлополимерных порошковых композитов без значительного ухудшения значений характеристик трения и изнашивания. При дальнейшем увеличении прилагаемой нагрузки от 1,5 до 2,5 МПа наблюдается значительное возрастание интенсивности изнашивания (рис. 1, а) и коэффициента трения (рис. 1, б).

Повышение скорости скольжения в интервале значений от 0,5 до 1,5 м/с не оказывает значительного влияния на такие триботехнические характеристики, как коэффициент трения (рис. 2, б) и интенсивность изнашивания (рис. 2, а). Так, при данной скорости скольжения значения коэффициента трения составляют 0,1–0,14,

а интенсивность изнашивания не превышает 0,06–0,07 мкм/км. Увеличение скорости скольжения до 2 м/с ведет к повышению интенсивности изнашивания в три раза при возрастании коэффициента трения до 0,25. Таким образом, значение  $[pv]$ -фактора исследуемого материала находится в пределах  $[pv] = 2,2–2,3$  МПа · м/с. При этом в некоторых источниках отмечается, что увеличение скорости скольжения, при сохранении постоянства  $pv$  в результате снижения  $p$ , приводит к улучшению условий теплоотвода при повышении конвективной составляющей теплообмена [11].

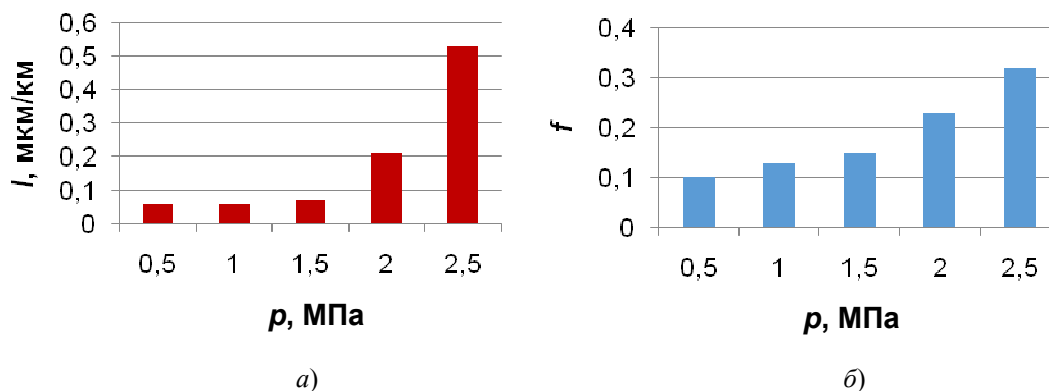


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  (а) и коэффициента трения  $f$  (б) порошкового наноструктурированного металлополимерного композиционного материала «медь – наноструктуры углерода – омедненный ПТФЭ» от давления

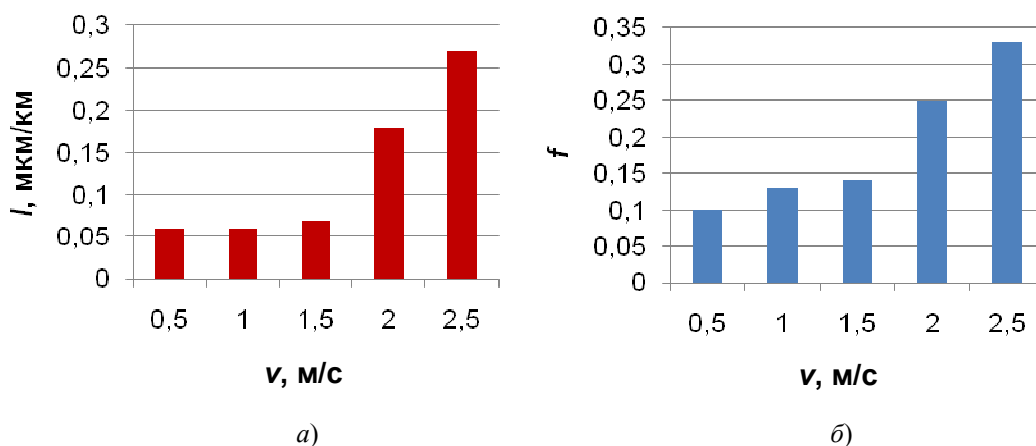


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  (а) и коэффициента трения  $f$  (б) порошкового наноструктурированного металлополимерного композиционного материала «медь – наноструктуры углерода – омедненный ПТФЭ» от скорости скольжения

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании процессов трения без смазки, позволил предположить механизм контактного взаимодействия наноструктурированного металлополимерного композиционного материала с контртелом. Изначально при вступлении в контакт двух скользящих друг относительно друга поверхностей возникают силы трения, под действием которых происходит деформация неровностей. При этом компоненты различного структурного уровня, расположенные на поверхности трения, испытывают различные виды деформации: металлические частицы матрицы и металлическая оболочка полимерного наполнителя – упругую и пластическую, полимерный наполнитель – вязкоупругую и вязкопластическую, наноструктурный наполнитель деформации не подвергается.

При скольжении контртела по поверхности наноструктурированного металлополимерного порошкового материала происходит удаление из зоны трения загрязняю-

щих частиц и частиц износа, отделенных от гранул плакированного полимера. Фрагменты плакирующей оболочки могут быть вынесены из зоны трения или поглощены ПТФЭ, имеющим способность обволакивать инородные частицы. Полимерный наполнитель создает разделительные слои на поверхности трения и частично переносится на поверхность контртела.

В процессе трения на некоторых участках поверхности возможно разрушение поверхностных разделительных полимерных слоев и возникновение процессов образования связей, которые определяют адгезионную составляющую при трении. Таким образом, слои ПТФЭ не являются сплошными и из-за слабой адгезии к металлу могут уноситься из зоны при достижении критической толщины 10–40 нм (рис. 3). При этом продукты износа ПТФЭ можно рассматривать как граничную смазку [12].

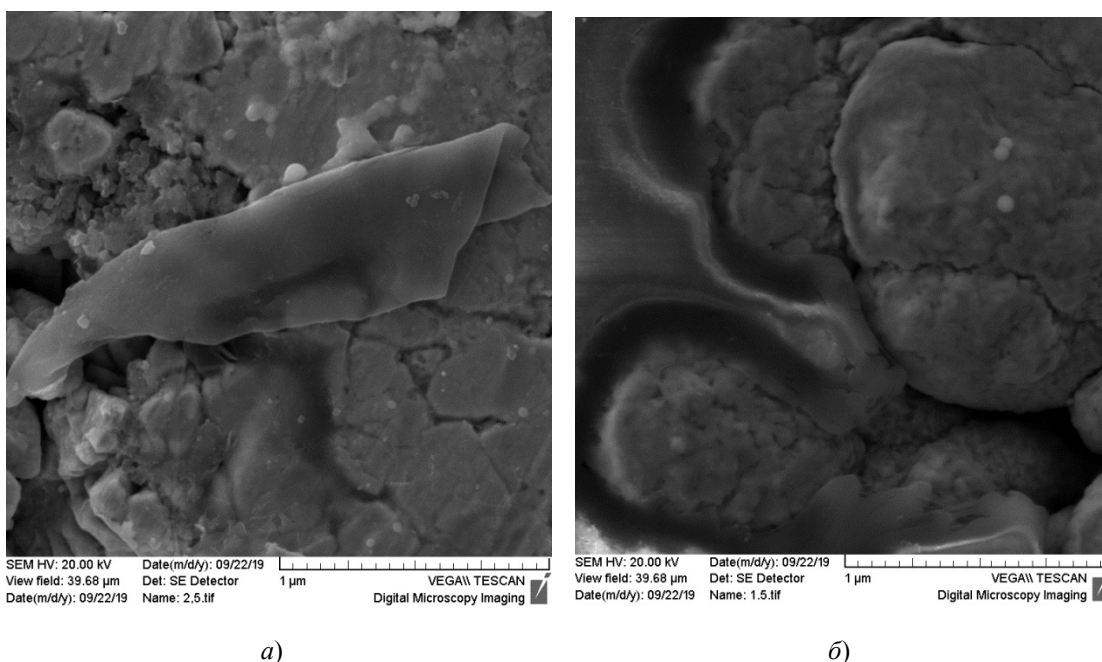


Рис. 3. Поверхность трения порошкового наноструктурированного металлополимерного композиционного порошкового материала

Повышение давления в контакте сопряженных трущихся поверхностей или увеличение скорости скольжения приводит к разрушению разделительных полимерных слоев (рис. 3, а) и возможности возникновения процессов схватывания металлической матрицы композиционного материала и контртела. Однако наноструктурный наполнитель, находящийся в зоне контактного взаимодействия поверхностей трения композиционного материала и контртела, на участках, в которых должно произойти взаимодействие поверхностей материалов, препятствуют процессу схватывания между частицами композиционного материала и контртела (рис. 3, б). Кроме того, наноструктуры углерода оказывают содействие перетеканию электрических зарядов между трущимися поверхностями, что снижает силу трения и интенсифицируют теплопередачу между поверхностями.

### Заключение

Разработаны и исследованы новые наноструктурированные металлополимерные композиционные порошковые материалы, характеризующиеся стабильными и низкими значениями коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Показано, что введение 6 мас. % плакированного металлом матрицы полимерного наполнителя и 0,07 мас. % УНТ позволяет повысить допустимую нагрузку на узел тре-

ния до  $[pv] = 2,2-2,3$  МПа · м/с при значениях коэффициента трения 0,1–0,12 и интенсивности изнашивания 0,06–0,07 мкм/км. Использование данных материалов позволит повысить ресурс узлов трения, а также решить проблему импортозамещения подшипников скольжения.

Механизм снижения интенсивности изнашивания наноструктурированного металлополимерного композиционного материала заключается в том, что при трении без смазки содержащийся в материале ПТФЭ позволяет сформировать разделительные слои, находящиеся на поверхности трения и обладающие небольшим сопротивлением сдвигу, оказывающие смазывающее действие, а также способствующие снижению силы трения и повышению износостойкости пары трения. Таким образом, на поверхности трения формируется легкоподвижная устойчивая пленка, которая снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания пары трения при эксплуатации без подвода внешней смазки. Наноструктуры углерода, содержащиеся в составе композита, внедряются в полимерный компонент, повышают несущую способность разделительных слоев, а при разрушении данных слоев – препятствуют развитию процессов схватывания.

*Работа представлена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T18-008 (2018–2020 гг.).*

### Литература

1. Pasovets, V. N. Thermal properties of composite materials based on the powder systems «copper–CNTs» / V. N. Pasovets, V. A. Kovtun, M. Mihovski // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, № 5. – P. 1267–1275.
2. Ковтун, В. А. Металлоуглеродные композиционные порошковые материалы для ответственных узлов машин и механизмов / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец, Ю. М. Плескачевский. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 283 с.
3. Порошковые нанокompозиты триботехнического назначения / В. Н. Пасовец [и др.]. – Минск : КИИ, 2016. – 295 с.
4. Damping characteristic of Ni-coated carbon nanotube/copper composite / K. Duan [et al.] // Materials & Design. – 2017. – Vol. 133. – P. 455–463.
5. Ковтун, В. А. Триботехнические покрытия на основе порошковых меднографитовых систем / В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский ; под науч. ред. акад. П. А. Витязя. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 1998. – 148 с.
6. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 430 с.
7. Kovtun, V. Tribological properties and microstructure of the metal-polymer composite thin layer deposited on a copper plate by electrocontact sintering / V. Kovtun, V. Pasovets, T. Pieczonka // Archives of metallurgy and materials. – 2017. – Vol. 62, Is. 1. – С. 51–58.
8. Mechanical properties of copper nanocomposites reinforced with uncoated and nickel coated carbon nanotubes / V. Koti [et al.] // FME Transactions. – 2018. – Vol. 46, № 4. – P. 623–630.
9. Ghorbani, A. Microstructure and mechanical properties of consolidated Cu–Cr–CNT nanocomposite prepared via powder metallurgy / A. Ghorbani, S. Sheibani, A. Ataie // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 732. – P. 818–827.
10. Активирующее устройство композиционных порошковых смесей : пат. 11036 Респ. Беларусь, МПК В 02С 17/16 / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец ; заявитель ГИИ

МЧС Респ. Беларусь. – № u20150391 ; заявл. 18.11.15 ; опубл. 30.04.16 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 141.

11. Комбалов, В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей / В. С. Комбалов. – М. : Наука, 1983. – 136 с.
12. Мышкин, Н. К. Трибология полимеров: адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, А. В. Ковалев // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 4. – С. 429–443.

*Получено 23.10.2019 г.*