

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.891:620.22

*В. А. КОВТУН¹, В. Н. ПАСОВЕЦ², член-корреспондент Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ³,
М. МИХОВСКИЙ⁴, А. И. ХАРЛАМОВ⁵*

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГИБРИДНЫХ НАНОПОЛНЕННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ
ПОРШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ**

¹Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь
vadimkov@yandex.ru

²Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь
pasovets_v@mail.ru

³Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь
pleskym@mail.ru

⁴Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария
nntdd@abv.bg

⁵Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина
dep73@ipms.kiev.ua

Исследованы триботехнические и прочностные характеристики гибридных композиционных материалов на основе порошковых систем «медь–омедненный политетрафторэтилен–наноструктуры углерода». Показано, что введение наноструктур углерода и плакированного металлом политетрафторэтилена (ПТФЭ) в порошковую металлическую матрицу композита при его формировании методом электроконтактного спекания позволяет получить материалы с высокими эксплуатационными характеристиками. По критериям прочности и износостойкости установлено, что оптимальное содержание частиц омедненного ПТФЭ в исследованных композиционных материалах с порошковой медной матрицей составляет 5–6 мас. %, а наноструктурного углеродного наполнителя – 0,06–0,07 мас. %.

Ключевые слова: нанонаполненные металлополимерные композиты, триботехнические и механические характеристики.

V. A. KOVTUN¹, V. N. PASOVETS², Yu. M. PLESKACHEVSKY³, M. MIHOVSKI⁴, A. I. HARLAMOV⁵

**TRIBOENGINEERING AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE HYBRID
NANOFILLED METAL–POLYMER POWDER COMPOSITES**

¹Gomel Engineering Institute of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Gomel, Belarus
vadimkov@yandex.ru

²Institute for Command Engineers of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
pasovets_v@mail.ru

³V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Gomel, Belarus
pleskym@mail.ru

⁴Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
nntdd@abv.bg

⁵I. N. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
dep73@ipms.kiev.ua

Triboengineering and strength properties of hybrid composite materials based on copper–copper-plated polytetrafluoroethylene–carbon nanostructure power systems are investigated. It is shown that the introduction of carbon nanostructures and metal-plated polytetrafluoroethylene (PTFE) into a metal powder matrix of composite, when it is formed by the electrocontact sintering method, allows obtaining materials with high-performance characteristics. By the criteria of strength and wear resistance it is established that the optimal content of copper-plated PTFE particles in the investigated composites with powder copper matrix is 5–6 wt. % and of a carbon nanostructured filler – 0.06–0.07 wt. %.

Keywords: nanofilled metal-polymer composites, tribological and mechanical characteristics.

Введение. Материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения, во многом определяют ресурс работы машин и механизмов, а проблема разработки новых композиционных материалов, способных адаптироваться к условиям эксплуатационного воздействия и обеспечивать повышенную надежность и долговечность узлов и агрегатов, представляет собой научный и практический интерес как с точки зрения машиностроения, так и с точки зрения современного материаловедения [1; 2]. Именно поэтому получение и исследование свойств композитов, разработанных на основе методов управления структурой и свойствами машиностроительных материалов на наноструктурном уровне, с целью обеспечения надежности и безопасности работы технических систем, а также сопутствующее повышение конкурентоспособности продукции машиностроения, относятся к числу приоритетных направлений научно-технической деятельности [3; 4].

Современным машиностроением все в больших объемах используются порошковые металлополимерные композиционные материалы на основе металлической матрицы для изготовления деталей узлов трения, обеспечивающих заданный эксплуатационный ресурс работы машин и механизмов. Однако металлополимерные композиты, обладая высокими триботехническими характеристиками, по сравнению с традиционно используемыми материалами для производства деталей узлов трения, имеют невысокие показатели прочности и жесткости при сжатии, что объясняется разупрочнением металлической матрицы при введении полимерного наполнителя. Наиболее рациональным путем повышения прочностных характеристик металлополимерных композитов является применение плакированных металлом матрицы частиц полимера, а также введение в состав материалов наноструктур углерода в виде углеродных нанотрубок (УНТ) и луковичных наноструктур углерода (ЛНУ), которые, играя роль наполнителя, повышают прочность, износостойкость и теплостойкость нанокompозита [5; 6].

Композиционные материалы на основе меди получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, электропроводностью и коррозионной стойкостью. Указанные свойства обеспечили эффективное их применение в узлах трения машин и механизмов, а также в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов. Следует отметить, что медь обладает умеренной склонностью к схватыванию, хорошей пластичностью, высокими тепло- и электропроводностью, относительной дешевизной [7; 8].

Одним из перспективных путей получения таких материалов является электроконтактное спекание, относящееся к числу наиболее активно развивающихся экологически чистых ресурсосберегающих технологий получения композитов и покрытий на их основе. При этом коэффициент использования материалов при изготовлении деталей узлов трения по технологии электроконтактного спекания составляет 0,96–0,98 [9; 10].

Цель работы – оптимизация компонентного состава гибридных композиционных материалов, полученных из порошковых систем «медь–плакированный медью полимер–углеродный наноструктурный наполнитель», по критериям прочности, износостойкости и антифрикционности на основе исследования их триботехнических и физико-механических характеристик.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных компонентов порошковой системы использовали порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 4960–09) с крупностью частиц 45–63 мкм. Гранулометрический состав медного порошка определяли ситовым анализом в соответствии с ГОСТ 18318–94. В качестве наноразмерного наполнителя применяли наноструктуры углерода в виде УНТ и ЛНУ, синтезированные методом пиролиза бензола в ИПМ НАН Украины [11]. Причем наноструктурный углеродный наполнитель представлял собой композицию, состоящую из 20 % УНТ и 80 % ЛНУ. Количество наноструктур углерода в исследуемых образцах материала составляло от 0 до 0,1 мас. %. В качестве полимерного наполнителя с учетом высоких температур начала термоокислительной деструкции использовали порошок политетрафторэтилена (ПТФЭ) (ГОСТ 1007–80), плакированный оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм.

Процесс традиционного смешивания компонентов порошковой композиции для повышения степени равномерного распределения наноразмерных и микроразмерных дисперсных компонентов в порошковой медной матрице был заменен процессом механической активации в специально разработанном смесителе активаторе порошковых материалов [12]. Отличительной особенностью

данного устройства является комбинированное силовое и вибрационное воздействия на порошковую композиционную систему.

С помощью дозатора-смесителя [13] получали предварительно высушенный до влажности 3 % порошковый материал и формировали заготовки. Затем сформированные заготовки помещали между двумя электродами опытно-промышленной установки УНП 684, разработанной на базе машины шовной сварки [14]. Заготовки сжимали пневмоцилиндрами с усилием 9500 Н и пропускали переменный электрический ток частотой 50 Гц в виде импульсов, описываемых неполной синусоидой, длительность которых составляла 0,75 ее периода, соответственно длительность паузы составляла 0,25 периода синусоиды. Сила тока составляла около 18 кА. В результате осуществлялось спекание исходных компонентов порошкового материала. Необходимую длительность импульса устанавливали на блоке управления установки УНП 684.

Предел прочности при сжатии определяли по ГОСТ 25.503–97 на универсальной испытательной машине Instron 5567 (США), а модуль Юнга композиционных материалов исследовали с помощью нанотестера FISCHERSCOPE H100C (Германия).

Триботехнические испытания порошковых металлополимерных гибридных композиционных материалов, формируемых методом электроконтактного спекания, проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал–частичный вкладыш» при нагрузке 1,5 МПа и скорости скольжения 1,5 м/с при температуре окружающей среды 293 К. Контртелом служили ролики диаметром 40 мм и шириной 12 мм, изготовленные из стали 45 ГОСТ 1050–88, закаленные до 44 HRC, с шероховатостью поверхности трения по $R_a = 0,3–0,4$ мкм. Поверхности трения образцов покрытий перед испытанием обезжиривались в ацетоне (ГОСТ 2603–79) или бензине (ГОСТ 2084–77) и прирабатывались при нагрузке 100 кПа в течение времени, необходимого для создания дорожки трения не менее, чем на 90 % поверхности покрытия. Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания композиционных порошковых материалов определялись для режима установившегося трения без смазки.

Каждое представленное значение исследуемых характеристик гибридных наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов – среднее трех измерений.

Результаты и их обсуждение. Проведенный комплекс экспериментов позволил исследовать влияние состава композиционных материалов на основе порошковой меди, частиц омедненного ПТФЭ и наноструктур углерода на их триботехнические и физико-механические характеристики. Так, на рис. 1 представлены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя. Как видно, при увеличении содержания углеродного наноструктурного наполнителя в исходной порошковой системе от 0 до 0,1 мас. % при содержании омедненного полимера в количестве 6 мас. % коэффициент трения монотонно снижается с 0,28 до 0,09. В то же время зависимость интенсивности изнашивания материала от содержания наноструктурного наполнителя носит экстремальный характер с минимумом. Минимальной интенсивностью изнашивания, равной 0,08 мкм/км, обладает композиционный материал с содержанием углеродного наноструктурного наполнителя порядка 0,07 мас. %. При дальнейшем увеличении количества частиц углеродного нанонаполнителя наблюдается рост исследуемого параметра и при его содержании 0,1 мас. % достигает значений 0,26–0,27 мкм/км, практически соответствующих материалу с содержанием углеродного наноструктурного наполнителя 0,01 мас. %. Таким образом, снижение интенсивности изнашивания материала при применении наноструктур углерода обеспечивается за счет их специфического движения по поверхности трения материала. В [15] на основании результатов микроструктурных исследований показано, что наночастицы углерода перемещаются по поверхности трения износостойкого материала в бороздах, образуемых ими под действием нагрузок и сил трения, что способствует снижению коэффициента трения. При этом низкая интенсивность изнашивания композита в режиме самосмазывания обеспечивается за счет сведения к минимуму числа участков касания микровыступов сопряженных поверхностей и подавления процесса развития узлов схватывания, что происходит благодаря распределению и перемещению частиц углерода по поверхности трения образцов.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента трения материала от содержания полимерного наполнителя. Как видно, характер изменения коэффициента трения при увеличении содержания омедненного полимера от 0 до 10 мас. % в композиционном материале, содержащем 0,07 мас. % наноструктурного углеродного наполнителя, аналогичен выше описанному. Зависимость интенсивности изнашивания также носит экстремальный характер. Минимальной интенсивностью изнашивания обладает композиционный материал с содержанием порядка 6 мас. % частиц ПТФЭ, а дальнейшее увеличение количества дисперсного полимера приводит к ухудшению исследуемой характеристики.

Зависимости предела прочности при сжатии и модуля Юнга композиционных материалов от содержания наноструктурного углеродного наполнителя характеризуются максимальными значениями, наблюдаемыми при 0,06–0,07 мас. % (рис. 3). Так, установлено, что увеличение содержания наноструктур углерода до 0,07 мас. % ведет к повышению значений предела прочности при сжатии до 179 МПа и модуля Юнга до 76 ГПа. Данный эффект можно объяснить проявлением механизма упрочнения, который обусловлен процессом армирования зон контактного взаимодействия поверхностей частиц металлической матрицы частицами наноструктур углерода. При пропускании электрического тока через порошковую матрицу происходит проникновение жидкой фазы металла, образующейся частично в зонах контактного взаимодействия поверхностей порошковой меди, в поры формируемого композита под действием пинч-эффекта и эффекта теплового удара, которые возникают при получении материалов по технологии электроконтактного спекания. После кристаллизации металла в зонах контактного взаимодействия образуются дополнительные армирующие связи, повышающие прочность материала. Данный механизм подтвер-

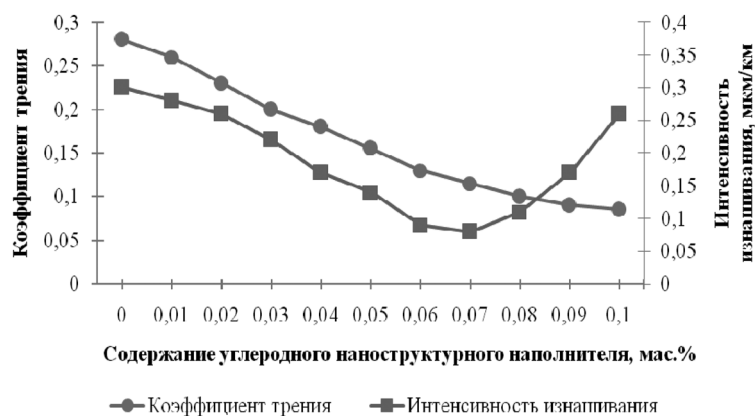


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя

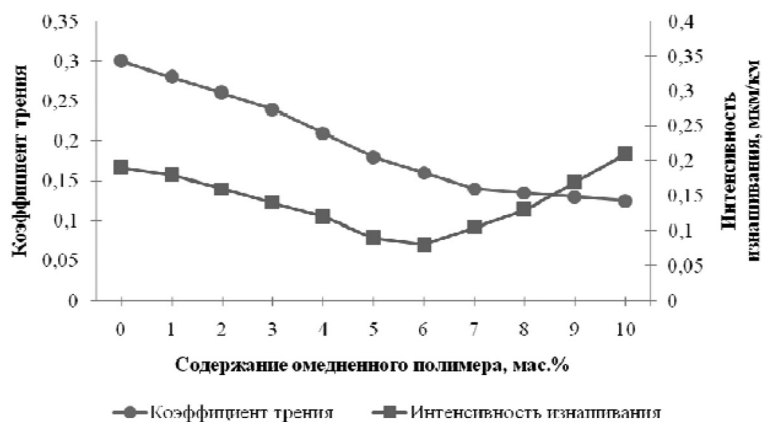


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания омедненного политетрафторэтилена

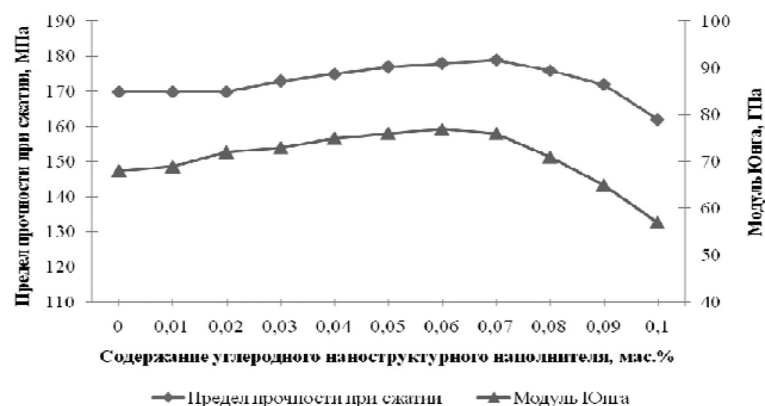


Рис. 3. Зависимости предела прочности при сжатии и модуля Юнга порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя

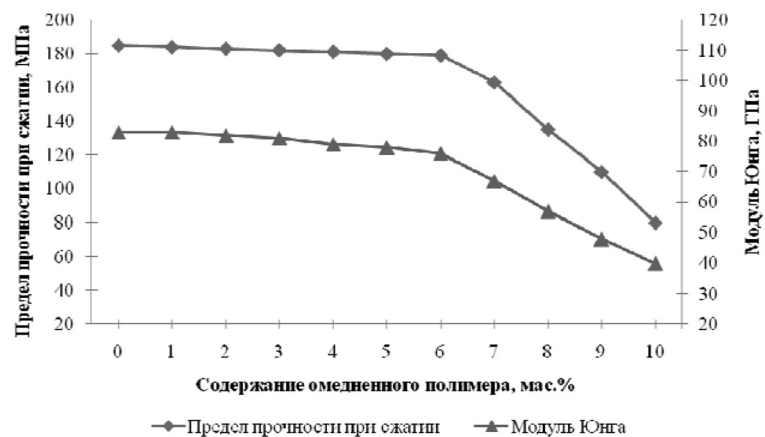


Рис. 4. Зависимости предела прочности при сжатии и модуля Юнга порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания омедненного политетрафторэтилена

ждается результатами микроструктурных исследований, полученными методами электронной микроскопии и опубликованными в работе [14]. Однако при дальнейшем увеличении содержания наноструктурного углеродного наполнителя происходит снижение предела прочности материала, вероятно, за счет уменьшения числа контактов металл–металл, что приводит к некоторому разупрочнению металлической порошковой матрицы.

При увеличении содержания частиц омедненного полимерного наполнителя в композиционном материале от 0 до 6 мас. % происходит медленное снижение значений предела прочности при сжатии до значений, равных 178–181 МПа (рис. 4). При содержании частиц омедненного полимера в композите более 6 мас. % значения данной характеристики резко ухудшаются, что связано с процессами разупрочнения металлической порошковой матрицы. Анализ результатов исследований модуля Юнга гибридных нанонаполненных металлополимерных материалов, сформированных из порошковой системы «медь–омедненный ПТФЭ–наноструктуры углерода», позволил установить, что композиции данного класса позволяют вводить в свой состав практически в два раза больше антифрикционного полимерного наполнителя при сохранении достаточно высоких значений физико-механических характеристик по сравнению с композитами, включающими неомедненные частицы политетрафторэтилена. Так, композиты, содержащие 5–6 мас. % омедненного ПТФЭ и 0,06–0,07 мас. % наноструктурного углеродного наполнителя, характеризуются значениями модуля Юнга 75–77 ГПа (рис. 4). Дальнейшее повышение содержания как омедненного полимерного наполнителя, так и наноструктурного углеродного наполнителя в порошковой композиционной системе характеризуется снижением значений модуля Юнга гибридных композитов.

Заключение. На основании комплекса проведенных исследований и анализа полученных результатов установлены зависимости триботехнических и физико-механических характеристик гибридных композиционных материалов на основе порошковых систем «медь–омедненный ПТФЭ–наноструктуры углерода» от содержания наноструктур углерода и частиц омедненного полимера. Показано, что введение углеродного наноструктурного наполнителя и плакированного металлом матрицы ПТФЭ в порошковую металлическую матрицу композита повышает предел прочности при сжатии и модуль Юнга, снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания при оптимальном соотношении компонентов в порошковой смеси. Анализ результатов исследований показал, что оптимальным компонентным составом по критериям прочности, износостойкости и антифрикционности обладают порошковые металлополимерные гибридные композиты, содержащие 5–6 мас. % омедненного полимера и 0,06–0,07 мас. % углеродного наноструктурного наполнителя.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту № T15MC-010.

Список использованной литературы

1. Козырева, Л. В. Ресурсосберегающие нанотехнологии на предприятиях технического сервиса / Л. В. Козырева. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 188 с.
2. Суслов, А. Г. Термофлуктуационная модель изнашивания поверхностей трения твердых тел при граничной смазке / А. Г. Суслов, С. П. Шеф, М. И. Прудников // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 10. – С. 40–47.
3. Мэттьюз, Ф. Механика и технология композитных материалов / Ф. Мэттьюз, Р. Роллингс. – М.: Техносфера, 2010. – 253 с.
4. Витязь, П. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич. – Минск: Вышэйш. шк., 2010. – 302 с.
5. Новые направления практического использования наноструктурированных композиционных материалов и покрытий с металлической матрицей / В. Ковтун [и др.] // Научни известия на НТСМ. – 2012. – Т. 20, № 1(133). – С. 245–251.
6. Моделирование термонапряженного состояния зон контактного взаимодействия «микродисперсная медь–углеродные нанотрубки» в процессе электроконтактного спекания нанонаполненных порошковых систем / В. А. Ковтун [и др.] // Научни известия на НТСМ. – 2013. – Т. 21, № 2(139). – С. 79–83.
7. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. – Киев: Наук. думка, 1980. – 404 с.
8. Джонс, В. Д. Основы порошковой металлургии: Свойства и применение порошковых материалов / В. Д. Джонс; под ред. М. Ю. Бальшина. – М.: Мир, 1965. – 390 с.
9. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К. Е. Белявин [и др.]. – Минск: Ремико, 1997. – 180 с.
10. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.
11. Синтез луковичных наноструктур углерода при пиролизе ароматических углеводородов / А. И. Харламов [и др.] // Докл. НАН Украины. – 2006. – № 3. – С. 97–103.
12. Смеситель-активатор порошковых материалов: пат. 10409 Респ. Беларусь, МПК В 02С 17/16 / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун; заяв. ГИИ МЧС РБ. – № u 20140184; заявл. 19.05.14; опубл. 30.12.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 6. – С. 184–185.
13. Дозатор-смеситель для порошковых материалов: пат. 10564 Респ. Беларусь, МПК G01F 11/00, B65D 88/68 / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Р. Л. Горбачевич; заяв. ГИИ МЧС РБ. – № u 20140326; заявл. 09.09.14; опубл. 28.02.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 159–160.
14. 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.
15. Пасовец, В. Н. Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец, Ю. М. Плескачевский. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 200 с.

Поступило в редакцию 06.04.2016