

УДК 621.891:620.22

*В. А. КОВТУН¹, В. Н. ПАСОВЕЦ², Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ³,
М. МИХОВСКИ⁴*

¹*Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Гомель, Беларусь*

²*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

³*Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси, Гомель, Беларусь*

⁴*Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария*

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВЫХ НАНОПОЛНЕННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ СПЕКАНИЕМ

Установлены зависимости физико-механических характеристик порошковых нанонаполненных металлополимерных композиционных материалов на основе порошковых систем «медь – омедненный полимер – углеродные нанотрубки» от содержания углеродных нанотрубок и гранул омедненного полимера. Анализ результатов исследований позволил оптимизировать компонентный состав исходных порошковых металлополимерных нанонаполненных систем по критериям прочности при сжатии и микротвердости.

Введение. Разработка новых композиционных материалов триботехнического назначения, обеспечивающих повышенную надежность и долговечность узлов и агрегатов, вызывает научный и практический интерес, так как материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения, во многом определяют ресурс работы машин и механизмов различного назначения [1, 2]. Именно по данной причине получение и исследование свойств композитов триботехнического назначения с целью обеспечения надежности и безопасности работы технических систем, а также повышения конкурентоспособности продукции машиностроительного назначения, относится к числу приоритетных направлений научно-технической деятельности [3].

На сегодняшний день современным машиностроением все в больших объемах используются порошковые композиционные материалы на основе металлической матрицы для изготовления деталей узлов трения [4]. При этом несомненно, что введение в порошковые композиции оптимального количества наполнителей функционального назначения позволяет значительно повысить нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации получаемых материалов. Одним из широко используемых наполнителей, повышающих триботехнические характеристики порошковых композиционных материалов, является политетрафторэтилен (ПТФЭ). Однако введение данного наполнителя в порошковую композицию может отрицательно сказаться на механических свойствах получаемых композитов по причине разупрочнения металлической матрицы порошковой системы. Данные порошковые компо-

зиты, обладая зачастую высокими триботехническими характеристиками, имеют невысокие показатели прочности и твердости. В то же время анализ результатов опубликованных исследований свойств композиционных материалов, содержащих полимерный наполнитель в виде гранул полимера, плакированных металлом, позволил установить, что композиции данного класса дают возможность вводить в свой состав практически в два раза больше антифрикционного полимерного наполнителя при сохранении достаточно высоких значений механических характеристик [5]. Также перспективные направления существенного улучшения свойств открываются при наполнении металлополимерных композиций наноструктурами углерода. В настоящее время среди наноструктур углерода наиболее изученными являются углеродные нанотрубки (УНТ), которые при введении в состав исходной порошковой системы значительно улучшают физико-механические и триботехнические характеристики сформированных композитов. Добавление в состав композиционных материалов углеродного наноструктурного наполнителя в виде УНТ способствует созданию прочных связей в зоне контактного взаимодействия компонентов порошкового материала [6].

Выбор материала матрицы композиционного материала триботехнического назначения определяется режимами эксплуатации. Композиционные материалы на основе медной матрицы получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, электропроводностью и коррозионной стойкостью. Указанные свойства, наряду с умеренной склонностью к схватыванию, хорошей пластичностью, высокой теплопроводностью и относительной дешевизной, обеспечили эффективное применение порошковой меди в качестве матрицы композитов для узлов трения машин и механизмов [7, 8].

Одним из перспективных путей получения порошковых нанонаполненных металлополимерных композиционных материалов является электроконтактное спекание, относящиеся к числу наиболее активно развивающихся экологически чистых эффективных ресурсосберегающих технологий получения композитов и покрытий на их основе. Совмещение процессов прессования и спекания требует меньших затрат энергии и труда, позволяет высвободить производственные площади, занятые технологическим оборудованием. При этом коэффициент использования материалов при изготовлении деталей узлов трения по технологии электроконтактного спекания достигает 0,96–0,98 [9].

Таким образом, цель работы заключалась в исследовании влияния компонентного состава исходных порошковых систем на физико-механические характеристики нанонаполненных металлополимерных композиционных материалов, получаемых методом электроконтактного спекания.

Материалы и методы исследования. В качестве материала матрицы нанонаполненных металлополимерных композитов триботехнического на-

значения использовали порошок меди электролитический ПМС-1 ГОСТ 4960-2009. В качестве углеродного наноструктурного наполнителя использовали УНТ, полученные методом пиролиза ароматических углеводородов. В качестве полимерного наполнителя металлической порошковой матрицы использовали порошок ПТФЭ ГОСТ 10007–80, плакированный оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм, с размером частиц от 100 до 200 мкм.

Приготовление порошковых композиционных смесей осуществляли в опытном смесителе-активаторе [10]. Композиционные порошковые материалы получали методом электроконтактного спекания с использованием модернизированной машины контактной сварки МШ 3207. Образцы формировались путем предварительного прессования порошковой смеси при давлении 300 МПа в специальной пресс-форме. Спекание производилось путем пропускания электрического тока силой 12 кА.

Предел прочности при сжатии определяли на универсальной испытательной машине Instron 5567. Микротвердость исследуемых материалов определялась с помощью нанотестера FISCHERSCOPE H100C. Каждое представленное значение исследованных характеристик – среднее трех измерений.

Результаты исследований и их обсуждение. Проведенный комплекс экспериментов позволил исследовать влияние состава наполненных углеродными нанотрубками дисперсных систем на основе порошковой меди и омедненного ПТФЭ на физико-механические характеристики получаемых материалов.

Результаты физико-механических испытаний композиционных материалов показали, что оптимальное содержание вводимых в дисперсные системы УНТ составляет 0,06–0,07 мас.% (рисунки 1 и 2). При таком содержании наноструктурного наполнителя композиты имеют достаточно высокие физико-механические характеристики.

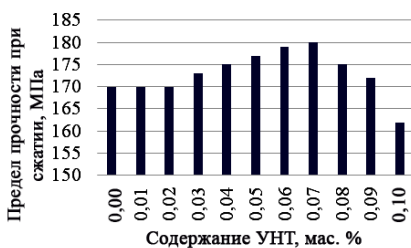


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности при сжатии металлополимерных нанонаполненных композиционных материалов, сформированных из порошковых систем «медь–УНТ–омедненный ПТФЭ (6 мас.%)», от содержания УНТ

На рисунке 1 представлены зависимости предела прочности при сжатии композиционных материалов от содержания наноструктурного наполнителя.

Установлено, что увеличение содержания углеродного наноструктурного наполнителя до 0,07 мас. % ведет к повышению предела прочности при сжатии. Данное явление можно объяснить реализацией механизма упрочнения, который связан с процессом армирования зон контактного взаимодействия частиц медной матрицы. При пропускании электрического тока через порошковую матрицу происходит частичное проникновение жидкой фазы металла в сердцевину открытых нанотрубок под действием капиллярного эффекта и эффекта теплового удара, который возникает при формировании материалов методом электроконтактного спекания. В результате после кристаллизации металла в зонах контактного взаимодействия образуются дополнительные армирующие связи, повышающие прочность материала. Данный механизм подтверждается результатами микроструктурных исследований, полученными просвечивающей электронной микроскопией и опубликованными в [11]. При дальнейшем увеличении содержания наноструктурного наполнителя происходит снижение предела прочности, вероятно, за счет уменьшения числа контактов металл–металл, что приводит к разупрочнению металлической матрицы.

Использование наноструктур углерода в количестве 0,05–0,07 мас. % позволяет наиболее равномерно и в максимальной степени заполнить свободное межчастичное пространство в порошковой матрице, не перекрывая поверхности остальных гранул наполнителей. Также применение наноструктур углерода в количестве 0,05–0,07 мас. % позволяет повысить микротвердость композиционного материала (рисунок 2).



Рисунок 2 – Зависимость микротвердости металлополимерных нанонаполненных композиционных материалов, сформированных из порошковых систем «медь–УНТ–омедненный ПТФЭ (6 мас.%)», от содержания УНТ

Анализ результатов исследований позволил также установить следующее. Содержание углеродных нанотрубок в количестве менее 0,05 мас.% в композиционной порошковой системе на основе металлической матрицы и полимерного наполнителя недостаточно для эффективной реализации уникальных прочностных свойств углеродных нанотрубок. Это приводит к ухудшению физико-механических характеристик материала, а также сниже-

нию его срока службы в узлах трения. При содержании УНТ в композиции более 0,07 мас.% также происходит ухудшение характеристик композиционного порошкового материала за счет того, что углеродные нанотрубки, попадая в области контактного взаимодействия компонентов материала, разупрочняют порошковую матрицу, не позволяя создавать достаточно прочные металлические связи между частицами металла. Кроме того, превышение оптимального содержания УНТ в порошковой системе может приводить к процессам агломерирования частиц наноструктур углерода в процессе приготовления порошковых нанонаполненных смесей в смесителе-активаторе. В дальнейшем при эксплуатации композитов в узлах трения данный эффект может способствовать повышению износа материала и снижению его срока службы.

Результаты экспериментальных исследований нанонаполненных композиционных металлополимерных материалов, полученных из порошковых систем «медь–УНТ (0,06 мас. %) – омедненный ПТФЭ» от содержания омедненного полимера показали, что при повышении содержания частиц омедненного полимера в композиционном материале на основе медной матрицы от 1 до 6 мас. % происходит ухудшение таких механических характеристик как микротвердость и прочность при сжатии (рисунки 3 и 4). Так для материала, содержащего в своем составе 6 мас. % частиц омедненного ПТФЭ, микротвердость составляет порядка 800 МПа, а предел прочности при сжатии – 140 МПа. При последующем увеличении концентрации полимерного наполнителя в порошковой нанонаполненной композиционной системе до 10 мас.% происходит дальнейшее, но более интенсивное уменьшение названных физико-механических параметров материала, вероятно, связанное с развивающимися процессами разупрочнения медной порошковой матрицы. При этом у композиционного материала, содержащего 10 мас. % омедненного ПТФЭ, предел прочности при сжатии составляет порядка 80 МПа (рисунок 4), а микротвердость – порядка 500 МПа (рисунок 3).

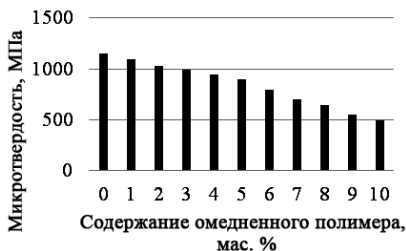


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости металлополимерных нанонаполненных композиционных материалов, сформированных из порошковых систем медь–УНТ (0,06 мас. %)–омедненный ПТФЭ, от содержания омедненного полимера

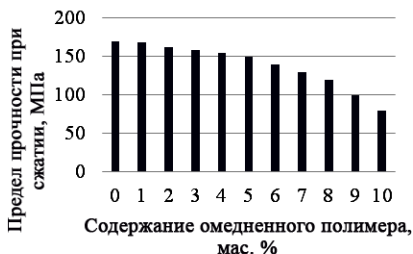


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности при сжатии металлополимерных нанонаполненных композиционных материалов, сформированных из порошковых систем медь – УНТ (0,06 мас. %) – омедненный ПТФЭ, от содержания омедненного полимера

Заключение. На основании проведенного комплекса исследований установлены зависимости физико-механических характеристик порошковых нанонаполненных металлополимерных композиционных материалов, сформированных из порошковых систем «медь – омедненный ПТФЭ – углеродные нанотрубки» методом электроконтактного спекания, от содержания наноструктур углерода и гранул омедненного полимера. Анализ результатов исследований свойств рассматриваемых материалов позволил оптимизировать их компонентный состав и установить, что композиции данного класса позволяют вводить в металлическую порошковую матрицу значительное количество антифрикционного полимерного и наноструктурного углеродного наполнителя при сохранении достаточно высоких значений прочностных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T15MC-010, выполняемого Гомельским инженерным институтом МЧС Республики Беларусь и Институтом механики Болгарской академии наук при участии Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Ильющенко, А. Ф.** Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3–4. – С. 113–120.
- 2 **Шевченко, А. А.** Физикохимия и механика композиционных материалов / А. А. Шевченко. – М. : Профессия, 2010. – 224 с.
- 3 **Катеринич, Д. С.** Инновационные подходы к повышению конкурентоспособности продукции машиностроения / Д. С. Катеринич // Всероссийский экономический журнал. – 2014. – № 10. – С. 53–57.
- 4 **Витязь, П. А.** Состояние и перспективы развития порошковой металлургии в России, Украине и Беларуси / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докладов IX Междунар. симпоз., Минск, 8–10 апреля 2015 г. /

Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. В 2 ч. Ч. 2. – Минск : Беларуская навука, 2015. – С. 17–40.

5 **Kovtun, V. A.** Thermal state modeling of metal-polymer composite powder materials under the effect of electric current / V. A. Kovtun, M. Mihovski, T. V. Semenova // Int. J. Engineering & automation problems. – 2006. – Vol. 5, № 1. – P. 129–135.

6 **Пасовец, В. Н.** Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский; УО «Гомельский инженерный институт» МЧС Респ. Беларусь. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 200 с.

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 **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.

10 Смеситель-активатор порошковых материалов: пат. 10409 Респ. Беларусь, МПК В 02С 17/16 / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун; заявитель ГИИ МЧС РБ. – № и 20140184; заявл. 19.05.14; опубл. 30.12.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 6. – С. 184–185.

11 **Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе порошковых дисперсных систем медь – углеродные нанотрубки** / В. А. Ковтун [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2011. – Т. 55, №1. – С. 91–95.

V. A. KOVTUN¹, V. N. PASOVETS², Y. M. PLESKACHEVSKY³, M. MIHOVSKI⁴

¹*Gomel Engineering Institute of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Gomel, Belarus*

²*Command and Engineering Institute of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

³*V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus*

⁴*Institute of Mechanics of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF NANO FILLED POWDER METAL-POLYMER COMPOSITES FORMED BY ELECTROCONTACT SINTERING

There were established the physical-mechanical characteristics dependences of the nano filled powder metal composites with the "copper-copperplated polymer - carbon nanotubes" powder systems base on the portion of carbon nanotubes and the coppered polymer granules. Analysis of the research results allowed to optimize the component composition of the original metal-powder nano filled systems according to the criteria of compression strength and microhardness.

Получено 17.11.2015