

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДНОГО НАНОСТРУКТУРНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

© 2016 г. В.Н. ПАСОВЕЦ

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, г. Минск  
e-mail: pasovets\_v@mail.ru

**Введение**

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 лувочичных наноструктур углерода (ЛНУ), которые, играя роль наполнителя, повышают прочность, износостойкость и теплостойкость нанокompозита [1].

Композиты на основе меди получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, тепло- и электропроводностью, коррозионной стойкостью. Указанные свойства обеспечили эффективное их применение в узлах трения машин и механизмов, а также в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов. 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 [2, 3].

Цель работы – оптимизация компонентного состава нанокompозитов, 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 матрицы использовали порошок меди ПМС - 1 ГОСТ 4960 – 09 с крупностью частиц 45 – 63 мкм. В качестве наноразмерного наполнителя применяли наноструктуры углерода в виде УНТ и ЛНУ, синтезированные методом пиролиза бензола [4]. Причем наноструктурный углеродный наполнитель представлял собою 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. Количество ПТФЭ в исследуемых образцах материала, с учетом ранее проведенных исследований, составляло 6 мас. % [5].

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 [6].

С помощью дозатора-смесителя [7] 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 [8]. Заготовки сжимали пневмоцилиндрами с усилием 9500 Н и пропускали переменный электрический ток силой 18 кА.

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. 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 [9].

### **Результаты исследований**

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 нанокомпозита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя. Как видно, при увеличении содержания данного 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 тоже 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 работе [8] 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.

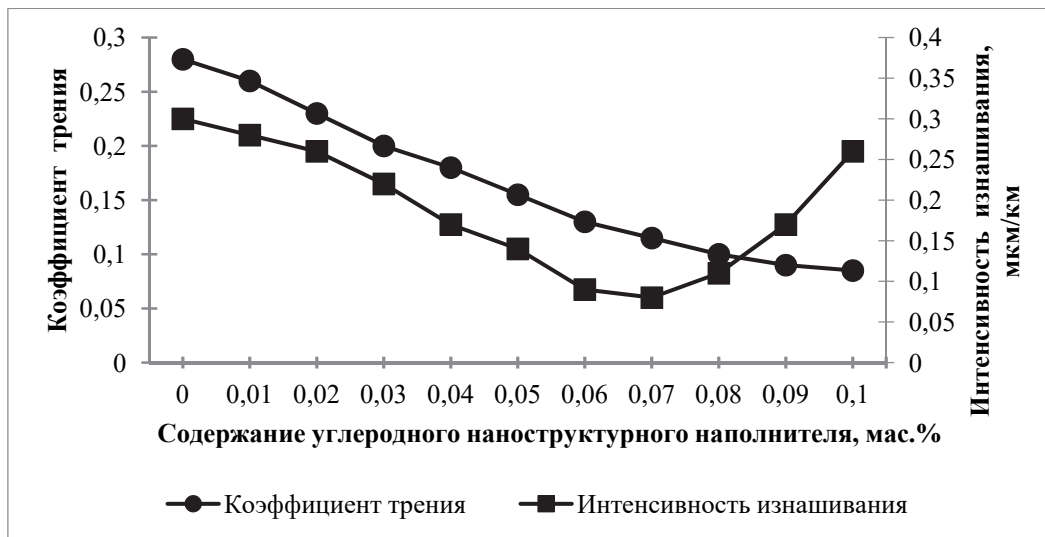


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя.

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. 2). 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.

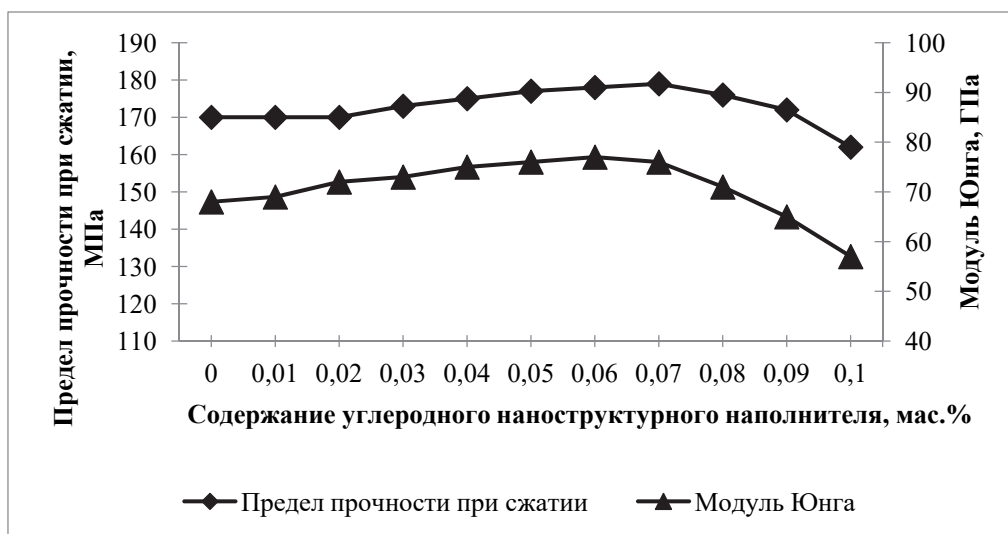


Рис. 2. Зависимости предела прочности при сжатии и модуля Юнга порошкового металлополимерного гибридного композита от содержания углеродного наноструктурного наполнителя.

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 подтверждается результатами микроструктурных исследований, полученными методами электронной микроскопии и опубликованными в работе [9]. 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.

### 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. 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 № Т15МС-010 и Белинфонда по проекту «Нанокompозиты триботехнического назначения».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витязь П.А., Свидунович Н.А.* Основы нанотехнологий и наноматериалов. – Минск: Вышэйшая школа, 2010. – 302 с.
2. *Джонс В.Д.* Основы порошковой металлургии: Свойства и применение порошковых материалов / Под ред. М.Ю. Бальшина. – М.: Мир, 1965. – 390 с.
3. *Белявин К.Е. и др.* Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов. – Минск: Ремико, 1997. – 180 с..
4. *Харламов А.И. и др.* Синтез луковичных наноструктур углерода при пиролизе ароматических углеводородов // Доклады НАН Украины. – 2006. – № 3. – С. 97–103.
5. *Пасовец В.Н., Ковтун В.А., Ильющенко А.Ф., Плескачевский Ю.М.* Нанокompозиты триботехнического назначения. – Минск: КИИ, 2016. – 295 с.
6. *Пасовец В.Н., Ковтун В.А.* Смеситель-активатор порошковых материалов: пат. 10409 Респ. Беларусь, МПК В 02С 17/16 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 6. – С. 184-185.
7. *Пасовец В.Н., Ковтун В.А., Горбацевич Р.Л.* Дозатор-смеситель для порошковых материалов: пат. 10564 Респ. Беларусь, МПК G01F 11/00, B65D 88/68 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 159-160.
8. *Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Плескачевский Ю.М.* Металлоуглеродные композиционные порошковые материалы для ответственных узлов машин и механизмов. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 283 с.
9. *Пасовец В.Н., Ковтун В.А., Плескачевский Ю.М.* Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 200 с.