

**В. Н. Пасовец<sup>1,2</sup>, В. А. Ковтун<sup>3</sup>, Ю. М. Плескачевский<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Республика Беларусь*

<sup>3</sup>*Гомельский филиал Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Гомель, Республика Беларусь*

<sup>4</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИТОВ**

**Аннотация.** Проведенные микроструктурные исследования с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и триботехнические испытания с применением стандартных методов изучения характеристик трения и изнашивания позволили установить механизм повышения износостойкости наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся композиционных материалов. Показано, что политетрафторэтилен, содержащийся в порошковой медной матрице, позволяет на поверхности трения сформировать полимерные слои, способствующие снижению коэффициента трения и повышению нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации узла трения, а при разрушении данных слоев в процессе трения наноструктуры углерода, распределенные в объеме медной матрицы, препятствуют развитию процессов схватывания, возникающих при взаимодействии микронеровностей на поверхностях материала и контртела. Установлено, что при значениях давления в трибоконтакте выше 1,5 МПа происходит вытеснение полимерного наполнителя из зоны трения и практически полное вдавливание наноструктур углерода в открытые участки поверхности медной матрицы композита, в результате чего частицы наноструктурного углеродного наполнителя не имеют возможности перемещаться по поверхности трения и не препятствуют развитию процессов схватывания поверхностей композиционного материала и контртела. Повышение скорости скольжения выше 1,5 м/с сопровождается ростом температуры в трибоконтакте, что ведет к деструкции полимерного наполнителя и потере им свойств самосмазывания. Также интенсивное тепловыделение в трибоконтакте сопровождается образованием и накоплением структурных дефектов поверхностных слоев композиционного материала с сопутствующим снижением его прочностных свойств, повышением коэффициента трения и интенсификацией процесса изнашивания контактирующих поверхностей. При этом скорости скольжения выше 1,5 м/с способствуют достаточно быстрому выносу наноструктур углерода из зоны трения и, соответственно, ухудшению триботехнических характеристик композиционного материала. Полученные результаты исследований могут быть использованы в машиностроении, на транспорте и в энергетике.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, углеродные нанотрубки, луковичные наноструктуры углерода, политетрафторэтилен, коэффициент трения, интенсивность изнашивания

**Для цитирования:** Пасовец, В. Н. Износостойкость наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся порошковых композитов / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 154–160. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-154-160>

**Vladimir N. Pasovets<sup>1,2</sup>, Vadim A. Kovtun<sup>3</sup>, Yury M. Pleskachevsky<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>3</sup>*Gomel branch of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*

<sup>4</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

## **WEAR RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED METAL-POLYMER SELF-LUBRICATING POWDER COMPOSITES**

**Abstract.** Tribotechnical tests and microstructural studies were carried out. Wear mechanism of nanostructured metal-polymer self-lubricating composite materials has been established. This mechanism involves in the formation of separating polymer layers on the friction surface, which reduces the coefficient of friction and running-in period of parts of friction units. Carbon nanoparticles move along the friction surface, hinder the development of seizure processes during the interaction of mi-

roughnesses of the contacting surfaces of the material and the counterbody during the destruction of the separating polymer layers. It was found that the polymer filler is displaced from the friction zone, carbon nanoparticles are pressed into the open areas of the surface of the copper matrix of the composite when the pressure in the tribocontact is higher than 1.5 MPa. The temperature in the tribocontact increases, the polymer filler degrades, the carbon nanoparticles are removed from the friction zone, the strength properties of the composite decrease, the friction coefficient and the wear rate increase at a sliding speed above 1.5 m/s. The obtained research results can be used in mechanical engineering, transportation industry and power engineering.

**Keywords:** composite materials, carbon nanotubes, onion carbon nanostructures, polytetrafluoroethylene, friction coefficient, wear intensity

**For citation:** Pasovets V. N., Kovtun V. A., Pleskachevsky Yu. M. Wear resistance of nanostructured metal-polymer self-lubricating powder composites. *Vestsi Natsyuanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 154–160 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-154-160>

**Введение.** Детали машин и механизмов, поверхности которых находятся в контакте и перемещаются друг относительно друга, подвергаются изнашиванию, что в свою очередь ведет к ухудшению их эксплуатационных характеристик. Для повышения надежности и долговечности узлов трения необходимо обеспечить поддержание таких характеристик поверхностей трения, которые гарантируют высокие триботехнические характеристики материалов на всех этапах эксплуатационного цикла [1].

Также необходимо отметить, что применение некоторых марок жидких и пластичных смазочных материалов на нефтяной и синтетической основе иногда приводит к образованию веществ, обладающих высокой токсичностью [2]. Отказ от применения смазочных материалов указанного класса требует разработки новых самосмазывающихся композиционных материалов, удовлетворяющих требованиям надежности и экологичности.

Одним из путей решения данной проблемы является разработка сопряженных деталей узлов трения из материалов, обладающих низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и экологически безопасных. При этом потребность промышленности Республики Беларусь в композиционных материалах, предназначенных для работы, например, только в условиях малонагруженных узлов трения машин и механизмов различного назначения, составляет около 1000 т в год и имеет тенденцию к увеличению [3].

Нами установлено, что наноструктурированные металлополимерные композиционные материалы триботехнического назначения обладают доступной ценой и высокой износостойкостью при работе в режиме «сухого» трения и представляют собой композиты, содержащие в своем составе порошки металлов, например меди, характеризующейся высокой теплопроводностью, умеренной склонностью к схватыванию, хорошей пластичностью, невысокой твердостью и быстрой прирабатываемостью в процессе трения; полимеров, например политетрафторэтилена (ПТФЭ) с температурой начала термоокислительной деструкции 420 °С и низким коэффициентом трения (0,04–0,09); наноструктур углерода, например в виде смеси углеродных нанотрубок (УНТ) и луковичных наноструктур углерода (ЛНУ), отличающихся высокими триботехническими и физико-механическими характеристиками [4].

Важными преимуществами порошковых композитов перед другими материалами, делающими их конкурентоспособными, являются высокая точность формы и размеров при изготовлении, что обеспечивает снижение затрат на дальнейшую механическую обработку, а также использование ресурсосберегающих методов получения, позволяющих достигать коэффициента использования материала 0,97–0,98 [5, 6].

Процессы изнашивания современных композиционных материалов сложны, что объясняется взаимодействием элементов многокомпонентных систем в процессе трения, сопровождающимся образованием частиц износа. Следует отметить, что реальные поверхности обладают определенной шероховатостью. Шероховатости в процессе трения контактируют с образованием пятен контактов с размерами от нескольких нанометров до нескольких микрометров. При этом взаимодействие шероховатостей даже при малых общих нагрузках приводит к возникновению значительных контактных давлений и температур. На сегодняшний день для объяснения процессов изнашивания материалов используются несколько теорий: теория изнашивания И. В. Крагельского, в основе которой лежит гипотеза о двойственности природы трения, обусловленной адгезионным взаимодействием и механическим деформированием на пятнах контакта, что приводит к накоплению дефектов, являющихся очагами разрушения [7]; теория схватывания металлов А. П. Семенова,

базирующаяся на образовании металлических связей при трении в результате совместного пластического деформирования, приводящего к объединению кристаллических решеток [8]. Трение металлополимерных композитов описывается более сложными механизмами [9].

Важным вопросом в процессе изучения механизмов трения и изнашивания наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов является исследование роли переноса вещества с одного контактирующего тела на другое [10]. Этот процесс составляет основу механизма самосмазывания контактирующих материалов разной природы. При этом значительное влияние на процесс переноса вещества при контактном взаимодействии трущихся поверхностей имеют давление в контакте сопряженных поверхностей и скорость скольжения, превышение критических значений которых приводит к выходу из строя узла трения [11].

*Цель работы* заключалась в исследовании механизма трения и изнашивания наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся композиционных материалов, а также определении диапазонов их надежного функционирования.

**Материалы и методика эксперимента.** В исследовании в качестве металлической матрицы использовался порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-2017). В качестве наноразмерных наполнителей матрицы при разработке новых наноструктурированных композиционных материалов применялась смесь, содержащая 20 % УНТ и 80 % ЛНУ в виде комбинированного углеродного наноструктурного наполнителя. В качестве полимерного наполнителя использовался порошок ПТФЭ (ГОСТ 10007-80), плакированный по ТУ 21-0282050-09-88 оболочкой меди толщиной 5–7 мкм. Содержание наноструктурного наполнителя в материале составляло 0,07 мас.%, ПТФЭ – 6 мас.%

Образцы формировались путем прессования при давлении 400 МПа. Спекание производилось путем пропускания электрического тока плотностью 400 А/мм<sup>2</sup> в течение 1,5 с.

Триботехнические испытания проводили в режиме самосмазывания на машине СМЦ-2 трением скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш» при нагрузке 0,5–2,5 МПа, скорости скольжения 0,5–2,5 м/с и температуре окружающей среды 295 К. Материалом контртела служила сталь 45 твердостью 44 HRC, шероховатость поверхности  $Ra = 0,32–0,40$  мкм. Поверхности трения образцов перед испытаниями обезжиривались спиртом гидролизным. Приработка проводилась при нагрузке 100 кПа до образования полного контакта по всей поверхности трения. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания определялись для режима установившегося трения. Каждое представленное значение триботехнических характеристик – среднее трех измерений. Микроструктурные исследования поверхности трения образцов осуществляли с использованием сканирующей электронной микроскопии (VEGA II LSH, Tescan, Чехия).

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов от давления в трибоконтакте. Установлено, что в интервале значений давления от 0,5 до 1,5 МПа не наблюдается значительного ухудшения характеристик трения и изнашивания исследуемого композита. При дальнейшем увеличении давления в контакте от 1,5 до 2,5 МПа заметен существенный рост интенсивности изнашивания и коэффициента трения, значения которых при давлении 2,5 МПа достигают соответственно 0,53–0,54 мкм/км и 0,32–0,33.

Результаты исследований также показали, что повышение скорости скольжения в интервале значений от 0,5 до 1,5 м/с также не оказывает значительного влияния на коэффициент трения и интенсивность изнашивания (рис. 2). Так, в данном интервале скоростей значения коэффициента трения составляют 0,10–0,14, а интенсивность изнашивания не превышает 0,06–0,07 мкм/км. Однако дальнейшее увеличение скорости скольжения до 2,5 м/с ведет к повышению интенсивности изнашивания в 3,5 раза при возрастании коэффициента трения до 0,33–0,34.

Анализ полученных экспериментальных данных и результатов микроструктурных исследований позволил установить механизм повышения износостойкости наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов в условиях трения без смазки, который состоит в следующем. В начальный период при вступлении в контакт двух скользящих друг относительно друга поверхностей происходит деформирование микронеровностей. 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.

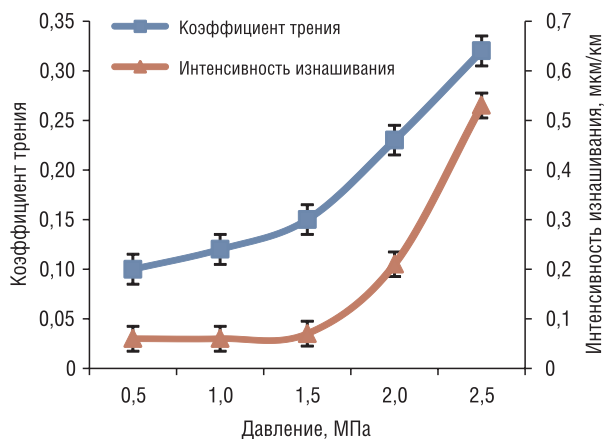


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошковых наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся композиционных материалов от давления в трибоконтакте при скорости скольжения 1,5 м/с

Fig. 1. Dependence of the friction coefficient and the wear rate of the powder nanostructured metal-polymer self-lubricating composite materials from the tribocontact pressure at sliding velocity of 1.5 m/s

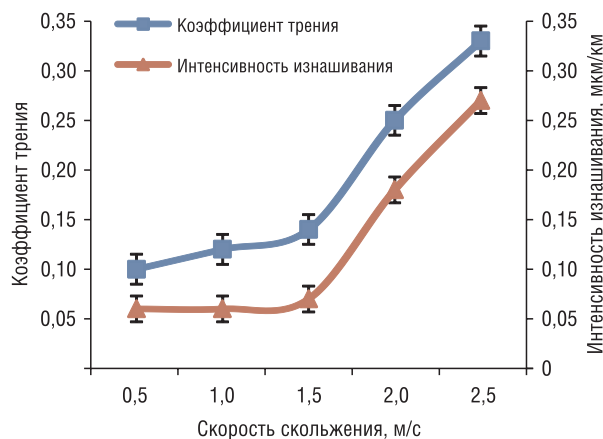


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошковых наноструктурированных металлополимерных композиционных материалов от скорости скольжения при давлении 1,5 МПа

Fig. 2. Dependence of the friction coefficient and the wear rate of the powder nanostructured metal-polymer self-lubricating composite materials from the sliding velocity at pressure of 1.5 MPa

При скольжении контртела по поверхности наноструктурированного металлополимерного композита происходит разрушение лакирующих оболочек ПТФЭ и удаление из зоны трения металлических частиц износа, отделенных от гранул лакированного полимера (рис. 3, *a*). Фрагменты лакирующей оболочки могут быть вынесены из зоны трения или поглощены ПТФЭ, имеющим способность обволакивать инородные частицы. В дальнейшем деформируемые частицы ПТФЭ создают разделительные полимерные слои на поверхности трения и частично переносятся на поверхность контртела (рис. 3, *b*).

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 трения при достижении критической толщины 10–40 нм (рис. 4, *a*). При этом продукты износа ПТФЭ можно рассматривать как граничную смазку [12]. При разрушении разделительных полимерных слоев создается возможность возникновения процессов схватывания металлической матрицы композиционного материала и контртела. Однако частицы наноструктурного наполнителя, находящиеся 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 (см. рис. 3, *c* и 4, *b*) [13, 14].

Следует отметить, что при значениях давления в трибоконтакте выше 1,5 МПа происходит вытеснение полимерного наполнителя из зоны трения и практически полное вдавливание наноструктур углерода в открытые участки поверхности медной матрицы композита, в результате чего частицы наноструктурного углеродного наполнителя не имеют возможности перемещаться по поверхности трения и не препятствуют развитию процессов схватывания поверхностей композиционного материала и контртела (рис. 3, *d*). Повышение скорости скольжения выше 1,5 м/с сопровождается ростом температуры в трибоконтакте, что ведет к частичной термо- и термоокислительной деструкции полимерного наполнителя и потере им свойств самосмазывания. Также интенсивное тепловыделение в трибоконтакте сопровождается образованием и накоплением структурных дефектов поверхностных слоев композиционного материала с сопутствующим снижением его прочностных свойств, повышением коэффициента трения и интенсификацией процесса изнашивания контактирующих поверхностей [15]. При этом скорости скольжения выше 1,5 м/с способствуют достаточно быстрому выносу наноструктур углерода из зоны трения и, соответственно, ухудшению триботехнических характеристик композиционного материала.

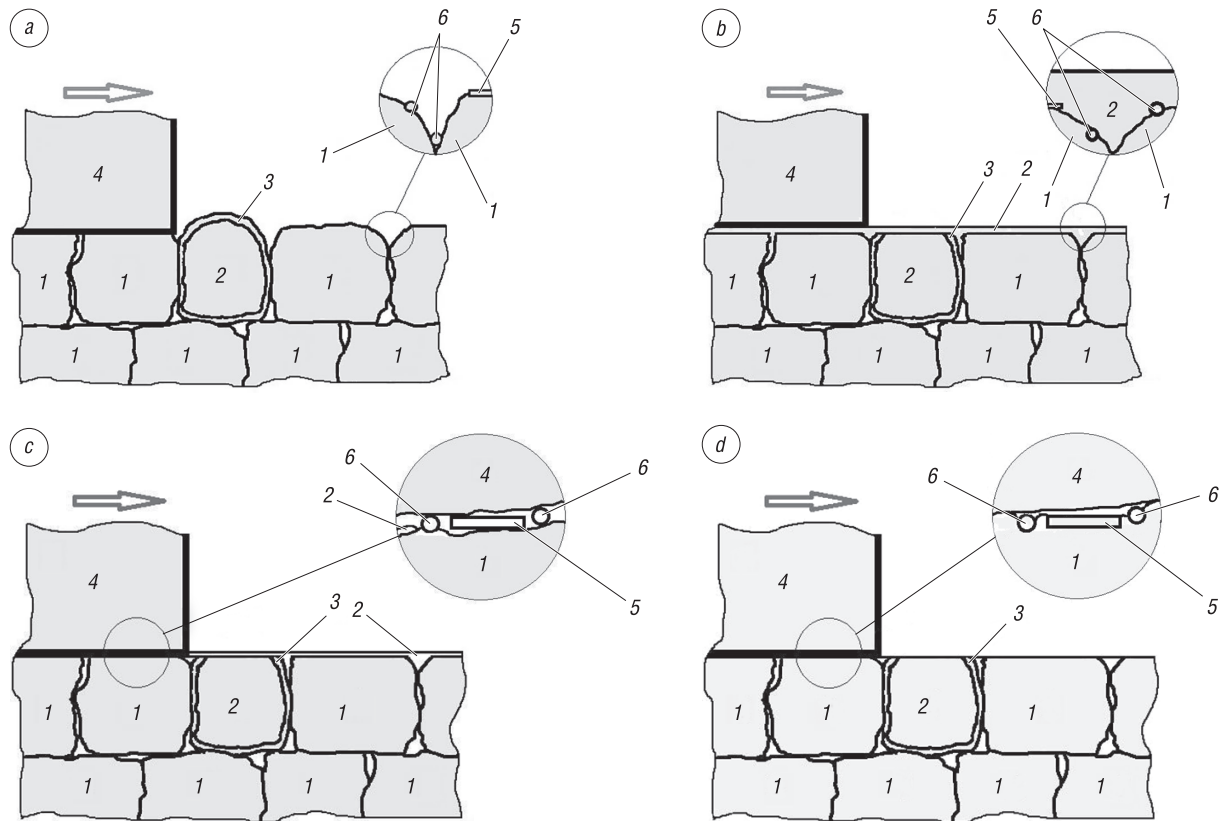


Рис. 3. Моделирование процессов трения и изнашивания наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся композиционных материалов: 1 – частицы меди, 2 – ПТФЭ, 3 – медная оболочка ПТФЭ, 4 – контртело, 5 – углеродные нанотрубки, 6 – луковичные наноструктуры углерода

Fig. 3. Simulation of friction and wear processes of nanostructured metal-polymer composite materials: 1 – copper particles, 2 – PTFE, 3 – copper shell of PTFE, 4 – counterbody, 5 – carbon nanotubes, 6 – onion carbon nanostructures

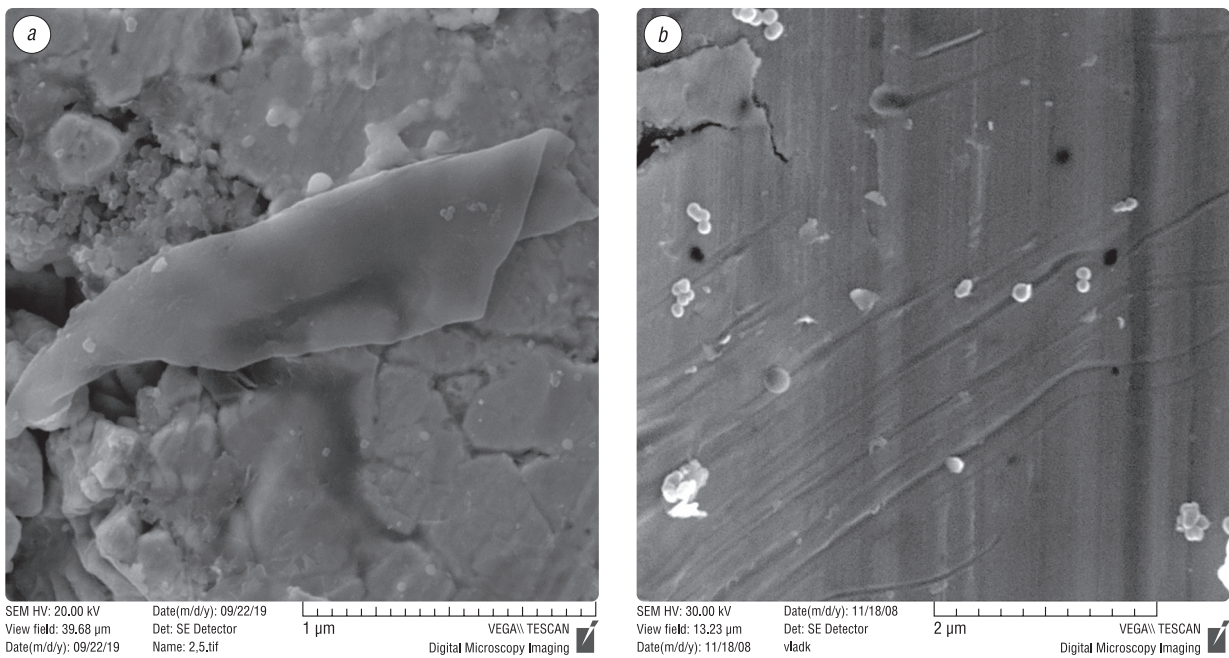


Рис. 4. Разрушение поверхностного разделительного полимерного слоя в процессе трения (а) и поверхность трения наноструктурированного металлополимерного самосмазывающегося композиционного материала (б)

Fig. 4. Destruction of the surface separating polymer layer during friction (a) and friction surface of nanostructured metal-polymer self-lubricating composite material (b)

**Заклучение.** Проведены триботехнические испытания и микроструктурные исследования наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся композитов, содержащих в своем составе порошки меди, омедненного ПТФЭ и смеси УНТ и ЛНУ. Анализ результатов исследований позволил установить механизм повышения износостойкости композиционных материалов данного класса, который заключается в том, что при трении без смазки содержащийся в материале ПТФЭ позволяет сформировать разделительные слои, находящиеся на поверхности трения, способствующие снижению коэффициента трения до 0,10–0,13 и силы трения в контакте, минимизации периода приработки деталей узлов трения и повышению допустимой нагрузки на узел трения (давления до 1,5 МПа и скорости скольжения до 1,5 м/с). При разрушении данных слоев в процессе трения наноструктуры углерода, распределенные в объеме металлополимерной матрицы, по мере изнашивания материала выходят на поверхность, перемещаются по поверхности, препятствуют развитию процессов схватывания при взаимодействии микронеровностей контактирующих поверхностей материала и контртела, что позволяет снизить интенсивность изнашивания материала до 0,06–0,07 мкм/км.

При увеличении нагрузочно-скоростных режимов до значений давления выше 1,5 МПа и скорости скольжения более 1,5 м/с происходят частичная термо- и термоокислительная деструкция, а также вытеснение полимерного наполнителя из зоны трения, вынос и вдавливание частиц наноструктур углерода в поверхность металла матрицы, что сопровождается образованием и накоплением структурных дефектов поверхностных слоев композиционного материала с сопутствующим снижением его прочностных свойств, повышением коэффициента трения и интенсификацией процесса изнашивания контактирующих поверхностей.

Результаты проведенных исследований позволили разработать новые наноструктурированные металлополимерные самосмазывающиеся композиционные материалы, защищенные патентами Республики Беларусь и Российской Федерации (BY 21703, BY 18890, RU 2374346, RU 2405848), которые внедрены и используются в узлах трения автопогрузочной, строительной и сельскохозяйственной техники, а также теплоэнергетического и пожарного аварийно-спасательного оборудования.

#### Список использованных источников

1. Blau, P.J. Friction Science and Technology from Concepts to Applications / P.J. Blau. – Boca Raton: CRC Press, 2019. – 436 p.
2. Madanhire, I. Mitigating Environmental Impact of Petroleum Lubricants / I. Madanhire, Ch. Mbohwa. – Geneva: Springer International Publishing AG Switzerland, 2016. – 238 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31358-0>
3. Роман, О.В. История порошковой металлургии Беларуси за 50 лет / О.В. Роман, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко // 50 лет порошковой металлургии Беларуси: история, достижения, перспективы / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: ГНПО ПМ, 2010. – Гл. 1. – С. 5–33.
4. Порошковые нанокомпозиты триботехнического назначения / В.Н. Пасовец [и др.]. – Минск: КИИ, 2016. – 295 с.
5. Материалы и технологии порошковой металлургии в компонентах авиационной и космической техники / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 272–284. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-272-284>
6. Ильющенко, А.Ф. Введение наноразмерных добавок при модифицировании энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / А.Ф. Ильющенко, Е.Е. Петюшик, О.К. Кривонос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №2. – С. 135–142. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>
7. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 430 с.
8. Семёнов, А.П. Схватывание металлов / А.П. Семёнов. – М.: Машгиз, 1958. – 280 с.
9. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
10. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
11. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 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.
13. 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 // Arch. Metall. Mater. – 2017. – Vol. 62, №1. – P. 51–58. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0007>
14. Preparation and properties of 3D interconnected CNTs/Cu composites / Sh. Chen [et al.] // Nanotechnol. Rev. – 2020. – Vol. 9, №1. – P. 146–154. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0013>
15. Алеутдинова, М.И. Характеристики сухого скользящего электроконтакта металлов в условиях катастрофического изнашивания / М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, №2. – С. 103–108. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-2-103-108>

## References

1. Blau P.J. *Friction Science and Technology from Concepts to Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2019. 436 p.
2. Madanhire I., Mbohwa Ch. *Mitigating Environmental Impact of Petroleum Lubricants*. Geneva. Springer International Publishing AG Switzerland, 2016. 238 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31358-0>
3. Roman O. V., Vityaz' P. A., Il'yushchenko A. F. The history of powder metallurgy in Belarus for 50 years. *50 let poroshkovoy metallurgii Belarusi: istoriya, dostizheniya, perspektivy* [50 years of Powder Metallurgy in Belarus: History, Achievements, Prospects]. Minsk, 2010, pp. 5–33 (in Russian).
4. Pasovets V. N., Ilyuschenko A. F., Kovtun V. A., Pleskachevsky Yu. M. Tribotechnical Powder Nanocomposites. Minsk, KII, 2016. 295 p. (in Russian).
5. Il'yushchenko A. F., Krivonos O. K., Petyushik E. E., Osipov V. A., Baraj S. G. Materials and technologies of powder metallurgy in components of aviation and space engineering. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryyafizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 272–284 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-272-284>
6. Il'yushchenko A. F., Petyushik E. E., Krivonos O. K. Introduction of nanoscale additives in the process of modification of energysaturated heterogeneous composite material. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 135–142 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>.
7. Kragel'skij I. V. *Friction and Wear*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1968. 430 p. (in Russian).
8. Semyonov A. P. *Seizure of Metals*. Moscow. Mashgiz Publ., 1958. 280 p. (in Russian).
9. Myshkin N. K., Petrokovec M. I. *Friction, Lubrication, Wear: Physical Foundations and Technical Applications of Tribology*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
10. Garkunov D. N. *Tribotechnics*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p. (in Russian).
11. Chichinadze A. V. (ed.) *Basics of Tribology (Friction, Wear, Lubrication)*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p. (in Russian).
12. Myshkin N. K., Petrokovec M. I., Kovalev A. V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2006, vol. 27, no. 4, pp. 429–443 (in Russian).
13. Kovtun V., Pasovets V., Pieczonka T. Tribological properties and microstructure of the metal-polymer composite thin layer deposited on a copper plate by electrocontact sintering. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0007>
14. Chen Sh., Fu Sh., Liang D., Chen X., Mi X., Liu P., Zhang Y., Hui D. Preparation and properties of 3D interconnected CNTs/Cu composites. *Nanotechnology Reviews*, 2020, vol. 9, no 1, pp. 146–154. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0013>
15. Aleutdinova M. I., Fadin V. V. Characteristics of dry sliding electric contact of metals in conditions of catastrophic wearing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 103–108 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-2-103-108>

## Информация об авторах

*Пасовец Владимир Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь); докторант, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pasovets\_v@mail.ru

*Ковтун Вадим Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, Гомельский филиал Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (пр. Речицкий, 35, 246021, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: vadimkov@yandex.ru

*Плескачевский Юрий Михайлович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника», Белорусский национальный технический университет (ул. Я. Коласа, 22, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pleskym@mail.ru

## Information about the authors

*Vladimir N. Pasovets* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (25, Mashinostroiteley Str., 220118, Minsk, Republic of Belarus); Doctoral Student, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pasovets\_v@mail.ru

*Vadim A. Kovtun* – D. Sc. (Engineering), Professor, Gomel Branch of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (35, Rechitsky Ave., 246021, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: vadimkov@yandex.ru

*Yury M. Pleskachevsky* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Department, Belarusian National Technical University (22, Ya. Kolas Str, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pleskym@mail.ru