

УДК 621.891:620.22

DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-14-22

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОМЕДНЕННОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ С МЕДНОЙ МАТРИЦЕЙ

**В. А. КОВТУН, В. Н. ПАСОВЕЦ**

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

**В. А. ЛОДНЯ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

*Установлены закономерности влияния состава порошковых металлополимерных систем на трибо-технические и физико-механические характеристики покрытий, сформированных электроконтактным спеканием на металлической подложке. По комплексному критерию антифрикционности, износостойкости и прочности оптимизирован состав металлополимерных покрытий. Установлено, что введение омедненных полимерных частиц позволяет увеличить в два раза степень наполнения (до 7–8 мас. %) и нагрузочные режимы эксплуатации покрытий толщиной  $110 \pm 5$  мкм (до 1 МПа). Такие покрытия характеризуются коэффициентом трения до 0,13–0,14, интенсивностью изнашивания до 0,10–0,11 мкм/км, модулем Юнга до 59–63 ГПа и микротвердостью до 800–830 МПа.*

**Ключевые слова:** порошковый металлополимерный композит, электроконтактное спекание, омедненный политетрафторэтилен, медная матрица.

**Для цитирования.** Ковтун, В. А. Комплексная оценка влияния омедненного политетрафторэтилена на характеристики металлополимерных порошковых покрытий с медной матрицей / В. А. Ковтун, В. Н. Пасовец, В. А. Лодня // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 2 (101). – С. 14–22. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-14-22

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF COPPER-PLATED POLYTETRAFLUOROETHYLENE ON THE CHARACTERISTICS OF METAL-POLYMER POWDER COATINGS WITH A COPPER MATRIX

**V. A. KOVTUN, V. N. PASOVETS**

*The University of Civil Protection of the Ministry  
for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk*

**V. A. LODNYA**

*Belarusian state university of transport, Gomel*

*The influence patterns of the composition of powder metal-polymer systems on the tribological and physicomachanical characteristics of coatings formed by electrocontact sintering on a metal substrate have been established. The composition of metal-polymer coatings has been optimized according to the complex criterion of antifricition, wear resistance and strength. It has been established that the introduction of copper-plated polymer particles allows doubling the degree of filling (up to 7–8 wt. %) and load modes of operation*

of coatings with a thickness of  $110 \pm 5 \mu\text{m}$  (up to 1 MPa). Such coatings are characterized by a friction coefficient of up to 0.13–0.14, wear intensity of up to 0.10–0.11  $\mu\text{m}/\text{km}$ , Young's modulus of up to 59–63 GPa and microhardness of up to 800–830 MPa.

**Keywords:** powder metal-polymer composite, electrocontact sintering, copper-plated polytetrafluoroethylene, copper matrix.

**For citation.** Kovtun V. A., Pasovets V. N., Lodnya V. A. Comprehensive assessment of the influence of copper-plated polytetrafluoroethylene on the characteristics of metal-polymer powder coatings with a copper matrix. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 2 (101), pp. 14–22 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-14-22

## Введение

Современное развитие техники и научно-технический прогресс во всех отраслях промышленности требует от материаловедов разработки новых материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств и технологичностью в процессе производства [1, 2]. При этом следует отметить, что повышение эксплуатационной надежности современной техники без существенного увеличения ее массы и стоимости является весьма сложной и в то же время актуальной задачей сегодняшнего дня.

Одним из путей повышения ресурса современной техники является применение металлополимерных композиционных материалов на основе порошковой медной матрицы для изготовления деталей узлов трения.

В настоящее время для применения в подвижных узлах техники все большей популярностью пользуются металлополимерные материалы, содержащие в своем составе политетрафторэтилен (ПТФЭ). Несомненная перспектива применения ПТФЭ в качестве полимерного наполнителя металлической матрицы таких материалов обусловлена наличием у него ряда уникальных свойств, например, низкий коэффициент трения (0,04–0,05 по стали без смазки), высокая термостойкость (температура начала термоокислительной деструкции 688 K), высокая химическая стойкость.

Несомненно, что введение полимерных наполнителей в порошковые композиционные системы на основе металлической матрицы позволяет расширить нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации антифрикционных самосмазывающихся покрытий, а также улучшить их триботехнические характеристики. Однако введение дисперсных наполнителей данного класса в композиционную порошковую систему выше определенного соотношения может отрицательно сказаться на свойствах покрытий, получаемых методом электроконтактного спекания, вследствие возможного торможения диффузионных процессов, проходящих в зонах контактного взаимодействия металл–металл при формировании металлического матричного каркаса в процессе спекания электрическим током. По этой причине может происходить разупрочнение матрицы порошковой системы, что отрицательно сказывается и на свойствах металлополимерных покрытий.

На сегодняшний день свойства композиционных порошковых покрытий триботехнического назначения с повышенным содержанием функциональных наполнителей, нанесенных на металлические подложки методом электроконтактного спекания, изучены недостаточно. При этом ряд вопросов, касающихся влияния размеров частиц и природы материалов матрицы и наполнителей на структуру композиционных покрытий, установления оптимального соотношения компонентов по критериям прочности и износостойкости, остается не исследованным в полной мере. В этой связи научный и практический интерес представляет поиск эффективных научно-технических решений, направленных на разработку новых композиционных самосмазывающихся покрытий, обладающих высокими триботехническими характеристиками и сопротивлением разрушению.

Цель работы состояла в комплексном экспериментальном исследовании закономерностей влияния ПТФЭ-наполнителя на триботехнические и физико-механические характеристики металлополимерных порошковых покрытий, сформированных методом электроконтактного спекания.

### **Материалы и методика исследования**

В качестве металлической матрицы исследуемых покрытий использовался порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-2017) без дополнительной очистки. В качестве дисперсных наполнителей использовались порошки ПТФЭ (ГОСТ 10007-80), исходные и плакированные оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм, а также порошки графита марки ГАК Завальевского графитового комбината, плакированные оболочкой меди толщиной от 4 до 7 мкм, с размером частиц от 20 до 250 мкм. Плакирование частиц наполнителей осуществлялось путем химического осаждения меди из раствора медного купороса по ТУ 21-0282050-09-88.

Консолидацию исследуемых композиционных металлополимерных порошковых систем и формирование покрытий толщиной  $110 \pm 5$  мкм на металлической подложке в виде ленты осуществляли методом электроконтактного спекания при одинаковых технологических режимах на опытно-промышленной установке УНП 684.22.25, выполненной на базе машины контактной сварки МШ-3207.

Триботехнические испытания композиционных износостойких покрытий антифрикционного назначения проводили на машине трения СМЦ-2 трением скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш» при нагрузках 0,5 и 1,0 МПа и скорости скольжения 1,0 м/с при температуре окружающей среды 293 К. Материалом контртела служили ролики диаметром 40 мм и шириной 12 мм, изготовленные из стали 45 ГОСТ 1050-74, закаленные до 44 HRC, с шероховатостью поверхности трения  $Ra = 0,63$  мкм.

Для определения значений микротвердости, модуля Юнга и энергии деформации металлополимерных покрытий использовали исследовательский комплекс с компьютерным управлением FISCHERSCOPE H100C (Fischer Co., Германия).

### **Результаты и их обсуждение**

В процессе проведения экспериментальных исследований по установлению закономерностей влияния ПТФЭ-наполнителя на характеристики металлополимерных покрытий, полученных методом электроконтактного спекания, в качестве исходной выбрана порошковая композиционная система «медь – омедненный графит» с общим содержанием графита 5 мас. %.

На рис. 1 представлены зависимости характеристик трения и изнашивания металлополимерных покрытий, полученных из порошковых систем «медь – омедненный графит – ПТФЭ», от содержания дисперсного ПТФЭ при нагрузке 0,5 МПа и скорости скольжения 1,0 м/с.

Анализ результатов испытаний позволил установить, что при увеличении содержания политетрафторэтилена от 1 до 6 мас. % происходит значительное снижение значений коэффициента трения с 0,38 до 0,18, которое замедляется после концентрации ПТФЭ около 3 мас. % (рис. 1, а). В то же время зависимость интенсивности изнашивания исследованных покрытий от концентрации ПТФЭ носит экстремальный характер с минимумом (рис. 1, б). При этом наилучшей износостойкостью (0,14–0,15 мкм/км) обладают металлополимерные покрытия с содержанием ПТФЭ около 3–4 мас. %, а при дальнейшем увеличении концентрации наблюдается резкое повышение исследуемой характеристики.

Экспериментальные исследования показали, что увеличить количество полимерного наполнителя, вводимого в медную матрицу металлополимерных композиционных порошковых систем, и тем самым расширить диапазон нагрузочно-скоростных

режимов эксплуатации самосмазывающихся антифрикционных покрытий, полученных методом электроконтактного спекания, позволяет использование плакированных медью частиц ПТФЭ.

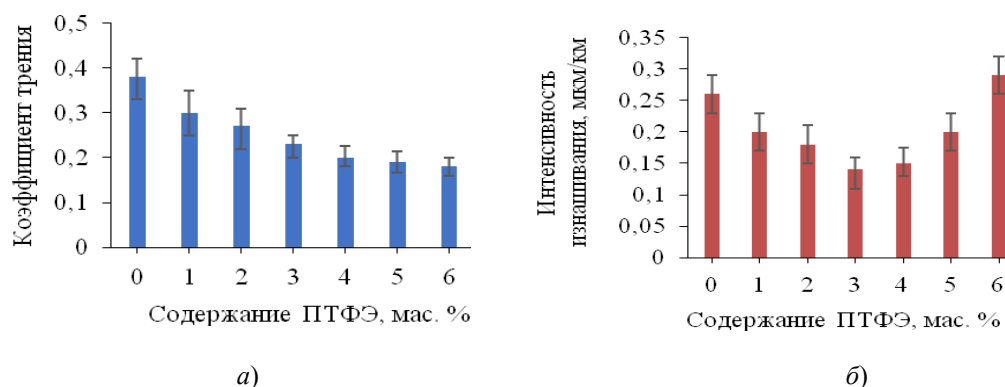


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) металлополимерных покрытий от содержания ПТФЭ

На рис. 2 представлены результаты триботехнических испытаний металлополимерных покрытий, полученных из порошковых систем «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ».

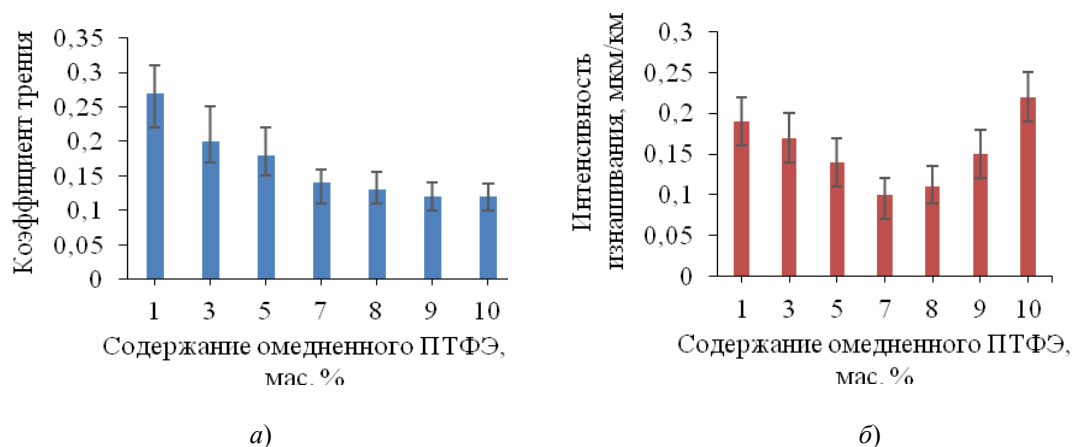


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) металлополимерных покрытий от содержания омедненного ПТФЭ

Результаты исследований показали, что порошковые металлополимерные покрытия, содержащие от 1 до 5 мас. % омедненного полимерного наполнителя, обладают относительно высоким коэффициентом трения и низкой износостойкостью, что, вероятно, обусловлено пониженным фактическим содержанием антифрикционных составляющих в порошковой системе и высокой пористостью для данного типа материалов. Увеличение содержания частиц ПТФЭ приводит к снижению коэффициента трения покрытий и росту значений интенсивности изнашивания, что позволяет сделать заключение о начале процессов разупрочнения металлической матрицы, вероятно, по причине высокой фактической концентрации антифрикционных компонентов.

Сравнительный анализ характеристик трения и изнашивания показал, что самосмазывающиеся тонкослойные покрытия, содержащие в композиционной порошковой системе плакированные медью полимерные частицы, позволяют оптимально

вводить в состав 7–8 мас. % наполнителя данного класса. Следует также отметить, что по сравнению с базовыми, где присутствует исходный полимер, данные покрытия обладают меньшей интенсивностью изнашивания, сохраняя при этом низкий и стабильный коэффициент трения при повышенных нагрузках до 1,0 МПа и скоростях скольжения до 1,0 м/с.

Полученный эффект можно объяснить тем, что частицы омедненного полимерного наполнителя в меньшей степени экранируют частицы металла матрицы и позволяют образовывать максимальное количество металлических контактов как между частицами медной матрицы, так и между матрицей и оболочкой дисперсных полимеров, стимулируя тем самым протекание диффузионных процессов. Это позволяет образовывать сплошной металлический каркас тонкослойного антифрикционного покрытия, где частицы полимерного наполнителя находятся в виде изолированных этим каркасом включений. При этом следует отметить, что характер изменения коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий определяется главным образом конкурирующим влиянием фактической концентрации полимерного наполнителя в покрытии после спекания, прочностью закрепления частиц ПТФЭ в металлической матрице, а также структурными особенностями и прочностными характеристиками самой металлической матрицы.

Дальнейшие экспериментальные исследования физико-механических характеристик порошковых покрытий, таких как микротвердость и модуль Юнга, подтвердили результаты по оптимизации содержания частиц полимерного наполнителя в порошковой композиции по критериям антифрикционности и износостойкости.

Результаты исследований композиционных покрытий из порошковой системы «медь – омедненный графит – ПТФЭ» показали, что при повышении содержания частиц политетрафторэтилена в композиционном материале на основе медной матрицы от 1 до 4 мас. % происходит снижение микротвердости и модуля Юнга (рис. 3). Так, для покрытия, содержащего в своем составе 4 мас. % полимерного порошкового наполнителя, микротвердость составляет 760 МПа, а модуль Юнга – 50 ГПа. При дальнейшем увеличении концентрации полимерного наполнителя в порошковой композиционной системе происходит резкое ухудшение данных характеристик покрытия, вероятно, связанное с процессами разупрочнения матрицы в результате уменьшения количества контактов металл–металл. При этом величина модуля Юнга имеет прямо пропорциональную зависимость от содержания ПТФЭ, а оптимальное содержание частиц полимерного наполнителя в композиции составляет около 3–4 мас. %.

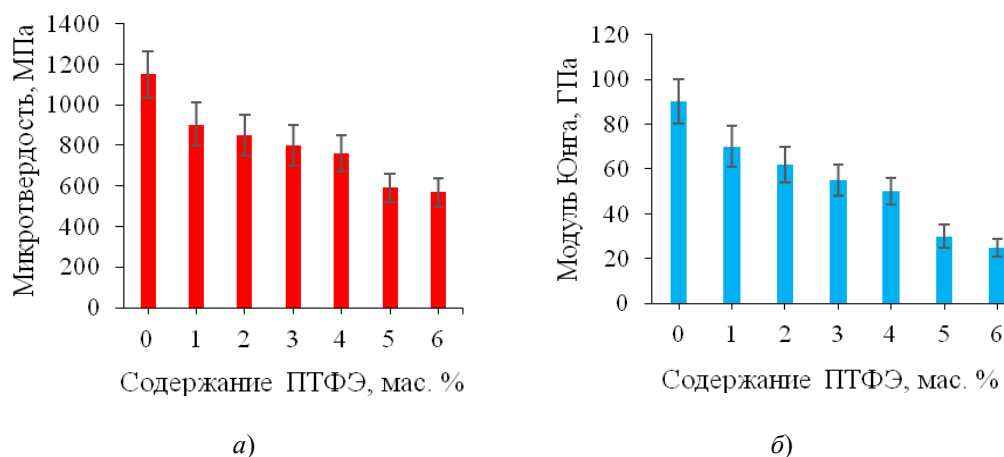


Рис. 3. Зависимость микротвердости (а) и модуля Юнга (б) порошкового композиционного покрытия «медь – омедненный графит – ПТФЭ» от содержания ПТФЭ

Анализ результатов исследований механических характеристик композиционных покрытий из порошковой системы «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ» позволил установить, что композиции данного класса позволяют вводить в свой состав практически в два раза больше антифрикционного полимерного наполнителя при сохранении достаточно высоких значений механических характеристик (рис. 4).

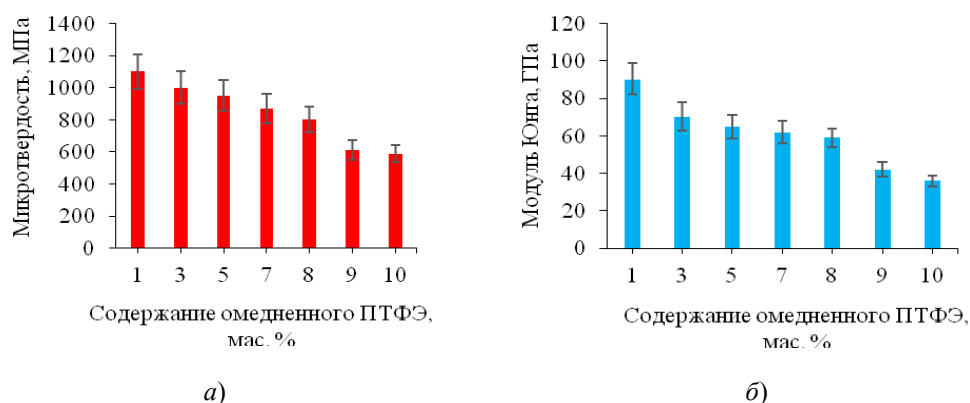


Рис. 4. Зависимость микротвердости (а) и модуля Юнга (б) порошкового композиционного покрытия «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ» от содержания омедненного ПТФЭ

Так, порошковое покрытие, содержащее 8 мас. % омедненного ПТФЭ, характеризуется микротвердостью 800 МПа, а модуль Юнга составляет 59 ГПа, что соответствует уровню аналогичных характеристик покрытий, содержащих в своем составе 4 мас. % неомедненных частиц ПТФЭ. Дальнейшее повышение содержания омедненного полимерного наполнителя в порошковой композиционной системе характеризуется ухудшением механических характеристик тонкослойных покрытий.

Результаты экспериментальных исследований также показали, что при введении в медную порошковую матрицу полимерных дисперсных наполнителей в результате изменения твердости и прочности порошкового композиционного материала изменяется величина проникновения индентора при его нагружении. При этом энергия деформации в полной мере определяется силой, приложенной к индентору, а также его перемещением. Следует также отметить, что изменение значений энергии деформации прямо пропорционально изменению глубины проникновения индентора в композиционное порошковое тонкослойное покрытие (рис. 5).

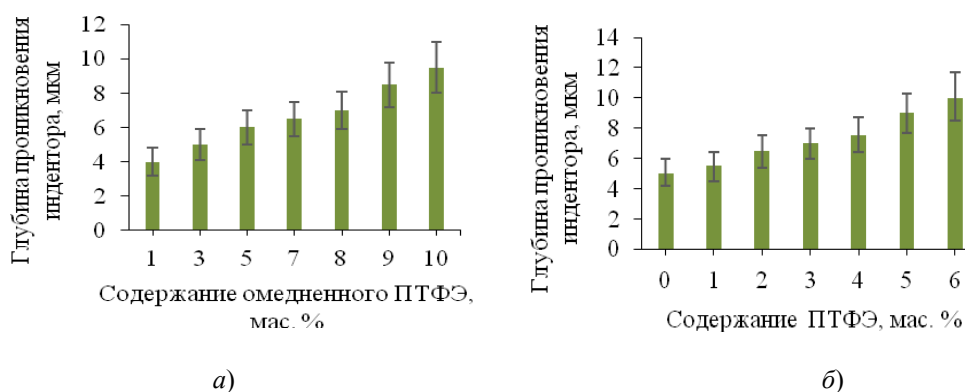


Рис. 5. Зависимость глубины проникновения индентора в композиционные порошковые покрытия, содержащие частицы ПТФЭ (а) и частицы омедненного ПТФЭ (б), от степени наполнения дисперсным полимером при нагрузке 1000 мН

Как видно (рис. 5), при воздействии постоянной нагрузкой 1000 мН глубина проникновения индентора в композиционные тонкослойные покрытия на основе порошковых систем «медь – омедненный графит – ПТФЭ» и «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ» увеличивается прямо пропорционально увеличению содержания полимерного наполнителя. Однако необходимо отметить, что при проникновении в порошковое покрытие на основе системы «медь – омедненный графит – ПТФЭ» индентор проходит меньшее расстояние, чем при проникновении в порошковое покрытие, содержащее в качестве наполнителя частицы политетрафторэтилена, у которых отсутствует оболочка меди.

Более детальный анализ изменения значений общей энергии деформации от состава порошковых покрытий позволил установить следующую закономерность (рис. 6 и 7).

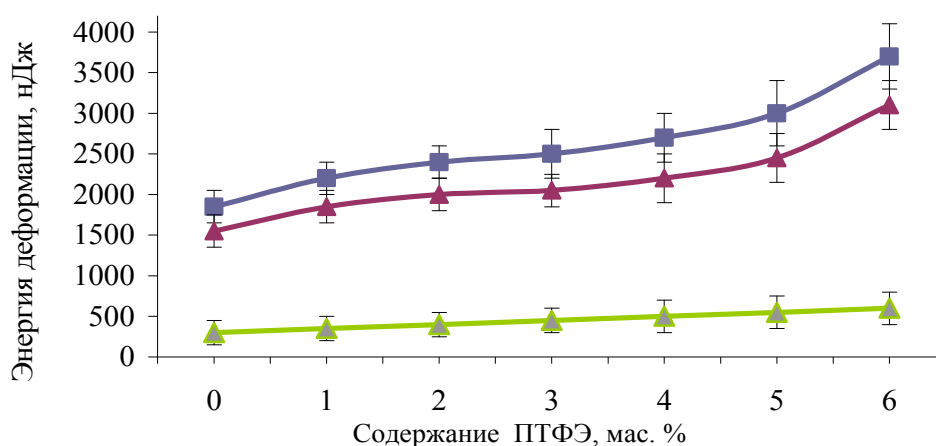


Рис. 6. Зависимость энергии деформации порошкового покрытия «медь – омедненный графит – ПТФЭ» от содержания частиц полимерного наполнителя:

■ – общая энергия деформации; ▲ – пластическая часть общей энергии деформации; ▲ – упругая часть общей энергии деформации

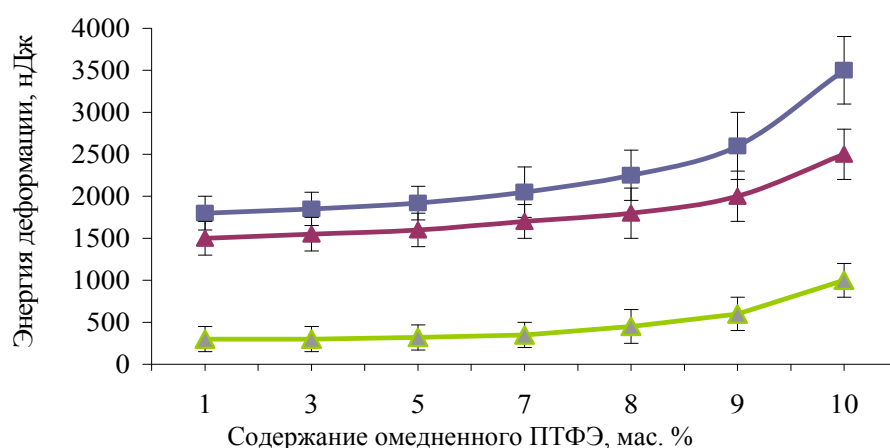


Рис. 7. Зависимость энергии деформации порошкового покрытия «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ» от содержания частиц полимерного наполнителя:

■ – общая энергия деформации; ▲ – пластическая часть общей энергии деформации; ▲ – упругая часть общей энергии деформации

Как показали результаты исследований, на процессы пластического деформирования композиционных порошковых покрытий на основе систем «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ», содержащих до 8 мас. % омедненных полимерных час-

тиц, затрачивается около 80–83 % от общей величины энергии деформации. При введении 9–10 мас. % омедненных частиц полимера в покрытия, сформированные из порошковой системы «медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ», пластическая часть общей энергии деформации составляет только 75–77 %.

Таким образом, при введении в медную порошковую матрицу частиц полимерного наполнителя, плакированных медной оболочкой, снижается пластичность композиционного тонкослойного покрытия на 5–8 %, что, соответственно, приводит к улучшению его упругих характеристик.

Результаты исследований таких характеристик, как микротвердость, модуль Юнга и энергия деформации показали, что композиционные порошковые металлополимерные покрытия, где в качестве полимерного наполнителя триботехнического назначения используются частицы омедненного ПТФЭ, по сравнению с вариантом наполнения металлической матрицы частицами ПТФЭ, не покрытыми оболочкой меди, при условии одинаковой степени наполнения имеют более высокие механические характеристики. При этом применение частиц омедненного ПТФЭ в качестве антифрикционного наполнителя позволяет в два раза увеличить содержание полимера в металлической матрице, не ухудшая механических характеристик композиционного порошкового материала, что, в свою очередь, обеспечивает повышение нагрузочно-скоростных режимов при эксплуатации тонкослойных покрытий.

Проведенный комплекс исследований позволил оптимизировать составы металлополимерных порошковых систем на основе медной матрицы по критериям антифрикционности, износостойкости и прочности (см. таблицу).

**Свойства металлополимерных порошковых покрытий**

| Порошковая система покрытия                                  | Режимы испытаний                                  | Коэффициент трения | Интенсивность изнашивания, мкм/км | Микротвердость, МПа | Модуль Юнга, ГПа |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|
| Медь – омедненный графит – ПТФЭ (3–4 мас. % ПТФЭ)            | Нагрузка – 0,5 МПа, скорость скольжения – 1,0 м/с | 0,18–0,20          | 0,13–0,14                         | 760–800             | 50–56            |
| Медь – омедненный графит – омедненный ПТФЭ (7–8 мас. % ПТФЭ) | Нагрузка – 1,0 МПа, скорость скольжения – 1,0 м/с | 0,13–0,14          | 0,10–0,11                         | 800–830             | 59–63            |

### **Заключение**

Установлены закономерности влияния состава порошковых металлополимерных систем на триботехнические и физико-механические характеристики покрытий, сформированных электроконтактным спеканием на металлической подложке. По комплексному критерию антифрикционности, износостойкости и прочности оптимизирован состав металлополимерных покрытий. Показано, что введение в порошковую медную матрицу омедненных полимерных частиц позволяет увеличить в два раза степень наполнения (до 7–8 мас. %) и нагрузочные режимы эксплуатации (до 1 МПа) покрытий данного класса толщиной  $110 \pm 5$  мкм, обеспечивая при этом снижение значений коэффициента трения до 0,13–0,14 и интенсивности изнашивания до 0,10–0,11 мкм/км, а также повышение модуля Юнга до 59–63 ГПа и микротвердости до 800–830 МПа.



**Литература**

1. Gan, Y. Research on the innovative development of new materials science and technology in China / Y. Gan // *Engineering*. – 2024. – Vol. 32, iss. 1. – P. 10–13. – DOI 10.1016/j.eng.2023.03.022
2. Dobrzanski, L. A. Significance of materials science for the future development of societies / L. A. Dobrzanski // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 175, iss. 1–3. – P. 133–148.
3. Wang, R. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers / R. Wang, G. Xu, Y. He // *Polymers*. – 2017. – Vol. 17, N 3. – P. 215–220. – DOI 10.1515/epoly-2016-0059
4. Dhanumalayan, E. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review / E. Dhanumalayan, G. M. Joshi // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – N 1. – P. 247–268. – DOI 10.1007/s42114-018-0023-8
5. Порошковые нанокompозиты триботехнического назначения / В. Н. Пасовец, А. Ф. Ильющенко, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский. – Минск : КИИ, 2016. – 295 с.

**References**

1. Gan Y. Research on the innovative development of new materials science and technology in China. *Engineering*. 2024, vol. 32, no. 1, pp. 10–13. DOI 10.1016/j.eng.2023.03.022
2. Dobrzanski L. A. Significance of materials science for the future development of societies. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 175, iss. 1–3, pp. 133–148.
3. Wang R., Xu G., He Y. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers. *Polymers*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 215–220. DOI 10.1515/epoly-2016-0059
4. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, no. 1, pp. 247–268. DOI 10.1007/s42114-018-0023-8
5. Pasovets V. N., Ilyuschenko A. F., Kovtun V. A., Pleskachevsky Yu. M. *Tribotechnical powder nanocomposites*. Minsk, KII, 2016. 295 p. (in Russian).

Поступила 19.03.2024 г.