

УДК 621.891:620.22

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ
САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

В. Н. ПАСОВЕЦ

*Государственное учреждение образования «Университет
гражданской защиты Министерства по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь», г. Минск
Государственное научно-производственное объединение
порошковой металлургии, г. Минск, Республика Беларусь*

В. А. КОВТУН

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

Представлен сравнительный анализ характеристик разработанных композиционных материалов на основе медной матрицы, наполненной плакированным металлом полимером и наноструктурами углерода, а также покрытий на основе разработанных материалов с известными и широко распространенными в промышленности композитами ПА-ДГр10, ДН5МЗКФ9, DU, DP4, Fritex-B, MU.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы, узлы трения, триботехнические характеристики, физико-механические характеристики, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TRIBOTECHNICAL
AND STRESS-RELATED CHARACTERISTICS
OF ANTI-FRICTION POWDER SELF-LUBRICATING
COMPOSITE MATERIALS**

V. N. PASOVETS

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus, Minsk
State Research and Production Powder Metallurgy
Association, Minsk, the Republic of Belarus*

V. A. KOVTUN

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

The article presents a comparative analysis of the characteristics of the developed composite materials based on a copper matrix, filled with a metal-clad polymer and carbon nanostructures, and as well as coatings based on the developed materials with well-known and widely used in industry composites PA-DGp10, DN5M3KF9, DU, DP4, Fritex-B, MU.

Keywords: powder composite materials, friction units, tribotechnical characteristics, stress-related characteristics, friction coefficient, wear rate.

Введение

В настоящее время одной из главных задач современного трибоматериаловедения является разработка новых антифрикционных композиционных материалов, которые позволяют обеспечить устойчивую работу узлов трения машин и механизмов различного назначения без применения жидких или консистентных смазок [1]. При этом также необходимо обратить внимание на актуальность проблем, связанных с увеличением надежности и долговечности современных образцов техники, что обусловлено негативным влиянием процессов трения и изнашивания поверхностей контактирующих деталей [2].

В технической литературе описан ряд композиционных материалов для изготовления деталей узлов трения. На сегодняшний день широкое распространение получили композиционные материалы на основе металлической матрицы, содержащие в своем составе функциональные наполнители различного назначения [3]. При этом для улучшения антифрикционных свойств композитов триботехнического назначения применяются графит [4], дисульфид молибдена [5], нитрид бора [6] и др. На рынке также не теряют своей популярности композиты на основе металлической матрицы, включающей в себя полимерный наполнитель, например, материалы DU, DP и DX [7]. Однако на смену перечисленным материалам приходят нанокompозиты – многокомпонентные твердые материалы, в которых один из компонентов в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100–500 нм [8]. При этом наиболее широкое распространение в качестве наноразмерного наполнителя получили наноструктуры углерода, например, фуллерены [9], углеродные нанотрубки (УНТ) [10] и луковичные наноструктуры углерода (ЛНУ) [11].

Если обратить внимание на вопросы технологии получения материалов для узлов трения, то не вызывает сомнений актуальность и важность вопросов экономии металлов при получении композиционных материалов. Порошковая металлургия является прогрессивной технологией и позволяет значительно снизить потребление металла при производстве деталей различного назначения. При производстве деталей узлов трения методами порошковой металлургии можно получить значительную экономию за счет уменьшения потерь металла. А применение метода электроконтактного спекания, позволяющего в широких пределах варьировать компонентный состав порошковых композитов, дает возможность формировать свойства материалов, недостижимые при использовании традиционных методов спекания в печах [12].

Таким образом, в связи с вышеизложенным необходимо рассмотреть вопросы о сравнении характеристик прочности и износостойкости как традиционно используемых антифрикционных материалов, так и новых композитов, содержащих в своем составе наноразмерный наполнитель. Целью исследования является сравнение триботехнических и физико-механических характеристик традиционно используемых композиционных материалов и разработанных порошковых композитов для узлов трения без смазки.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве металлической матрицы разработанных композитов использовался порошок меди ПМС-1 ГОСТ 4960–2017. В качестве наноразмерного наполнителя металлической матрицы использовалась смесь, состоящая из 20 % УНТ и 80 % ЛНУ. В качестве полимерного наполнителя металлической матрицы использовался порошок политетрафторэтилена (ПТФЭ) ГОСТ 10007–80, плакированный оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм.

Распределение наноразмерного наполнителя при получении нанокомпозитов осуществлялось в процессе механоактивации путем двухстадийной подготовки порошковой смеси. На первой стадии проводилась механоактивация порошковой системы «медь – наноструктуры углерода», на второй – смешивание данной порошковой системы с плакированным ПТФЭ [13]. Применение двухстадийной подготовки порошковой смеси обусловлено возможностью сохранения наследственной структуры плакированного ПТФЭ [14].

Консолидацию исходных компонентов разработанных композитов осуществляли на опытно-промышленной установке, выполненной на базе машины контактной сварки МШ-3207 с электродами-пуансонами (рис. 1, а). Образцы формировались путем предварительного прессования при давлении 400 МПа и спекались при пропускании электрического тока плотностью 400 А/мм² в течение 1,5 с.

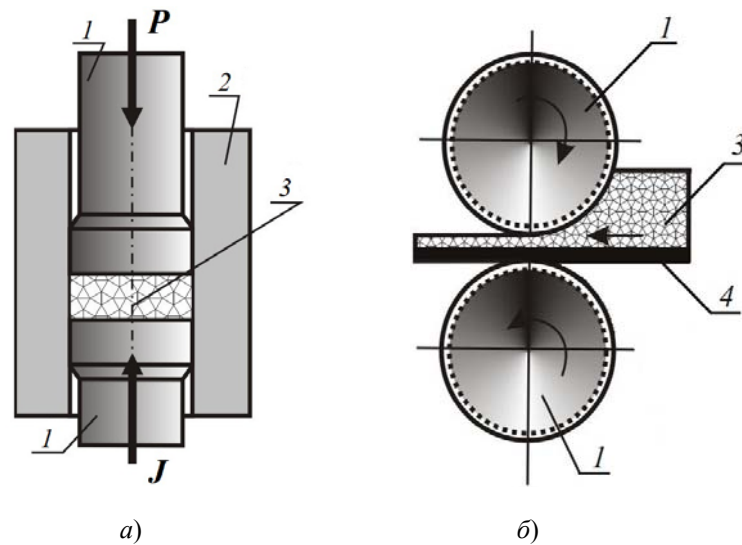


Рис. 1. Схемы электроконтактного спекания порошкового материала с использованием электродов-пуансонов (а) и роликовых электродов (б):
1 – электрод; 2 – пресс-форма; 3 – спекаемая порошковая система;
4 – подложка; P – давление прессования; J – электрический ток

Покрyтия из разработанных нанокомпозитов получали методом электроконтактного припекания (рис. 2, б). В качестве металлической основы использовались медные ленты марки ДПРНМ-0,35×15 НДМ 3 ГОСТ 1173–2006. Нанесение покpытия осуществляли на установке, выполненной на базе машины контактной сварки МШ-3207 с роликовыми электродами. В подающем устройстве стальную ленту нагревали до температуры 80 °С. На поверхность стальной ленты наносили слой толщиной 60–70 мкм желеобразного флюса ПКБ-26 М, предварительно прогретого до температуры 100–120 °С. С помощью дозатора наносили и формировали слой металлического порошка. Перед нанесением металлический порошок прогревали до температуры 110–130 °С. Затем стальную ленту с нанесенным и сформированным порошковым слоем помещали между двумя роликовыми электродами диаметром 200 мм и прокатывали с пропуском переменного электрического тока частотой 50 Гц в виде импульсов, описываемых неполной синусоидой (их длительность меньше периода синусоиды, составляет 0,75 ее периода, а длительность паузы составляет 0,25 периода синусоиды), и одновременным прикладыванием давления. В результате осуществлялось припекание порошкового слоя к ленте при давлении 300 МПа, плотности тока 300 А/мм² и скорости перемещения электрода 0,4 м/мин.

Триботехнические испытания проводились на машине СМЦ-2 трением скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш» при нагрузке 1,5 МПа, скорости скольжения 1,5 м/с и температуре окружающей среды 293 К. Материалом контртела служила сталь 45 с шероховатостью поверхности $Ra = 0,3-0,4$ мкм. Образцы перед испытаниями обезжиривались в ацетоне ГОСТ 2603–79. Приработка проводилась при нагрузке 100 кПа до образования полного контакта по всей поверхности трения. Интенсивность изнашивания определялась для режима установившегося трения без смазки.

Предел прочности при сжатии определяли по ГОСТ 25.503–97 на универсальной испытательной машине Instron 5567 (США). Пористость спеченных композиционных материалов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898–89, устанавливающему методы определения плотности и пористости пресованных и спеченных изделий порошковой металлургии.

Физико-механические и триботехнические характеристики используемых на сегодняшний день композиционных материалов для узлов трения взяты из открытых источников.

Для проведения полноценного и всестороннего сравнительного анализа композиционных материалов и покрытий были сформированы определенные критерии, на основании которых проведено сравнение:

- 1) антифрикционности, характеризующейся коэффициентом трения;
- 2) износостойкости, характеризующейся интенсивностью изнашивания;
- 3) прочности, характеризующейся пределом прочности при сжатии и модулем Юнга.

Результаты и их обсуждение

Проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению физико-механических и триботехнических характеристик разработанных композитов для узлов трения без смазки. Анализ результатов исследований позволил установить механизм повышения износостойкости композиционных материалов данного класса, заключающийся в том, что при трении без смазки содержащийся в материале ПТФЭ позволяет сформировать разделительные слои, находящиеся на поверхности трения, способствующие снижению коэффициента трения до 0,1–0,13 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, совершают специфическое движение по поверхности трения материала, 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.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1. В табл. 1 также приведены режимы триботехнических испытаний (скорость скольжения и давление), при которых получены соответствующие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

При этом для обоснования выбора разработанных материалов для эксплуатации в узлах трения, работающих без смазки, необходимо рассмотреть существующие аналоги. Одним из наиболее популярных в промышленности является антифрикционный порошковый материал на основе меди ПА-ДГр10 ГОСТ 26719–85, предназначенный для деталей узлов трения машин и механизмов, содержащий в своем составе 9–11 мас. % углерода в виде графита. Данный материал представляет собой медную матрицу с равномерно распределенными включениями графита, может быть использован для работы без смазки при высоких скоростях скольжения (до 50 м/с).

Таблица 1

Триботехнические и физико-механические характеристики порошковых композиционных материалов для узлов трения без смазки

Материал (страна), «состав»	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, мкм/км	Скорость скольжения, м/с Давление, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Пористость, %
ПА-ДГр10 (СССР), «Cu + 10 мас. % Гр» [15, 16]	0,15–0,20	0,5–0,55	$\frac{10}{0,025}$	–	2–9
CuG15 (РФ), «Cu + 15 мас. % Гр» [17]	0,22–0,26	1,46–1,5	$\frac{1}{1}$	135–175	3–5
RU 2024639 (РФ), «Cu + 2 мас. % Гр + 5 мас. % Sn + + 1 мас. % CaF ₂ + + 5 мас. % ПН85Ю15» [18]	0,1–0,12	0,19–0,21	$\frac{2,5}{1,5}$	–	–
ДН5МЗКФ9 (Украина), «Cu + 5 мас. % Ni + 3 мас. % Mo + + 9 мас. % CaF ₂ » [19]	0,16	30	$\frac{60}{7}$	177–183	2–4
DE10 2004 011 831 (Германия), «Cu + 7,41 мас. % Гр + + 12,04 мас. % Sn + 1,85 мас. % Pb + + 0,93 мас. % CuP» [20]	0,2	8,3	$\frac{0,008}{10}$	230	–
Разработанный материал, «Cu + 6 мас. % ПТФЭ + + 0,07 мас. % (УНТ+ЛНУ)»	0,1–0,13	0,06–0,07	$\frac{1,5}{1,5}$	156–165	2–4

Примечание: Гр – графит, ПН85Ю15 – интерметаллид (химическое соединение Ni и Al).

Для изготовления самосмазывающихся подшипников скольжения, работающих в режимах сухого и полусухого трения, разработан материал, представленный в [18]. При этом необходимо обратить внимание на то, что в режиме полусухого трения трущиеся поверхности соприкасаются полностью или на участках большой протяженности, а разделительный слой смазки отсутствует. Согласно [18] данный материал может быть использован в узлах трения электродвигателей радиотехнической и электронной промышленности, приборов бытовой техники, в узлах трения текстильных машин и других, работающих в диапазоне удельных давлений до 1,5 МПа и скоростей скольжения до 25 м/с. Композит получают методом порошковой металлургии путем прессования при давлении 170–200 МПа с последующим спеканием в среде эндогаза при температуре 750–850 °С. При этом интерметаллид ПН85Ю15 вводится для повышения износостойкости путем формирования в зоне трения вторичных структур, которые выравнивают шероховатость сопряженных поверхностей. Фтористый кальций CaF₂ и графит применяются в составе материала в качестве твердых смазок.

Выпускается и используется на практике композиционный материал для узлов трения на основе меди ДН5МЗКФ9 [19]. Данный композит предназначен для функционирования в узлах трения при скоростях от 200 до 400 об/мин. Необходимо отметить, что в тяжелых условиях работы пары трения, когда среди других нагрузочных факторов присутствует влияние высоких скоростей и, как следствие, высоких температур в зоне взаимодействия контактирующих поверхностей, жидкие

смазочные материалы не способны разделить трущиеся поверхности и снизить процессы схватывания, приводящие к износу материала. Для этой цели используют функциональные добавки в композиционные материалы триботехнического назначения, выполняющие роль твердой смазки. Учитывая достаточно высокую термическую и химическую стабильность CaF_2 , можно предположить, что в тяжелых условиях работы материалы с присадками фторида кальция будут отвечать требованиям антифрикционности.

Согласно источнику [19] изготовление образцов из материалов ДН5МЗКФ9 проводилось методами порошковой металлургии путем трехэтапного смешивания в течение 4 часов, прессования при давлении 400–450 МПа и спекания при температуре 820–870 °С. Трехэтапная подготовка исходных компонентов позволила избежать сегрегации отдельных порошков в составе композиции. Для обеспечения минимальной остаточной пористости применяли дополнительную механическую операцию – калибровку при удельном давлении 840 МПа и отжиг при $t = 450$ °С в течение 1 часа в среде водорода.

Заслуживающим внимания при проведении сравнительного анализа является также спеченный материал на основе порошковой меди для изготовления подшипников скольжения, характеризующийся содержанием 10–15 мас. % олова, 0,5–10 мас. % висмута и 5–12 мас. % графита в медной матрице [20]. При этом в [20] отмечается, что в качестве антифрикционного наполнителя предпочтительно применение графита с размером зерна < 40 мкм, а в качестве добавок для спекания в материал желательно дополнительно вводить 1–3 мас. % дисульфида молибдена или 0,5–2 мас. % фосфида меди. Данный композиционный материал используется в промышленности для изготовления радиальных и упорных подшипников скольжения, а также антифрикционных втулок и пластин скольжения.

Композиционные материалы триботехнического назначения, используемые в виде покрытий, также представляют значительный интерес. К таким материалам, широко представленным на рынке, относятся композиты MU и Fritex, производимые компанией Technumon (Италия), а также композиты DU и DP, изготавливаемые компанией GGB Bearing Technology (Великобритания).

Материал MU (табл. 2) сконструирован послойно, содержит прирабочную поверхность, состоящую из ПТФЭ и дисульфида молибдена толщиной 0,01–0,04 мм, слой спеченной бронзы толщиной 0,20–0,35 мм, стальную основу с низким содержанием углерода толщиной 0,25–2,70 мм. Данный композит предназначен для изготовления антифрикционных втулок и упорных шайб, а также для других специальных изделий, которые эксплуатируются при температуре от -200 до $+280$ °С. Максимально допустимая скорость скольжения при сухом трении составляет 2,5 м/с [21]. Необходимо отметить, что применение жидких смазок позволяет повысить максимальную допустимую скорость скольжения данного материала до 10 м/с. При этом срок службы материала MU определяется значениями PV-фактора. Практические наблюдения показали, что длительный срок службы данного материала подразумевается только при значениях PV-фактора от 0,2 до 1,8 МПа · м/с. Значения PV-фактора от 2,5 до 3,6 МПа · м/с допустимы только в течение коротких периодов времени работы материала. Материал обладает достаточно низкими значениями коэффициента трения, которые составляют 0,15–0,2 при скорости скольжения 0,5–2,5 м/с и давлении 1 МПа. При этом в паре с данным материалом необходимо избегать применения контртел, изготовленных из бронзы и алюминия, а также с шероховатостью поверхности более 0,4 мкм.

Таблица 2

Свойства металлополимерных порошковых покрытий

Материал (производитель), порошковая система	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, мкм/км	Режимы испытаний		PV-фактор, МПа · м/с
			Скорость скольжения, м/с	Давление, МПа	
MU (Technymon, Италия), «бронза – ПТФЭ – дисульфид молибдена» [21]	0,15–0,2	0,1–0,12	1,5	1,0	1,8
Fritex-B (Technymon, Италия), «бронза – ПТФЭ – графит» [22]	0,1–0,15	0,09–0,11	1,0	1,0	–
DU (GGB Bearing Technology, Великобритания), «бронза – ПТФЭ – свинец» [23]	0,1–0,16	0,12–0,15	0,5	1,0	1,75
DP4 (GGB Bearing Technology, Великобритания), «бронза – ПТФЭ» [24]	0,22–0,25	0,13–0,16	1,0	1,0	1,0
Разработанные покрытия, «Cu + 6 мас. % ПТФЭ + + 0,07 мас. % (УНТ+ЛНУ)»	0,1–0,13	0,06–0,07	1,5	1,5	2,25

Композиционный материал Fritex-B также предназначен для изготовления антифрикционных втулок, которые эксплуатируются при температуре от -100 до $+260$ °С. Fritex-B представляет собой опорный слой, изготовленный из бронзы CuSn8 (БрОФ7-0.2 ГОСТ 5017–2006) толщиной 0,50–2,70 мм, на который нанесен антифрикционный слой ПТФЭ. Значение коэффициента трения равно 0,15 при максимально допустимой скорости скольжения при сухом трении 1,5 м/с и давлении 1 МПа [22].

Широкое распространение получили композиционные материалы DU и DP4. Так материал DU содержит в своем составе стальную основу, обеспечивающую отвод тепла от поверхности трения и необходимую жесткость. На данную стальную основу нанесен пористый бронзовый слой толщиной 0,25 мм, пропитанный смесью ПТФЭ и свинца. На пропитанный бронзовый слой наносится завершающий слой ПТФЭ и свинца толщиной 0,025 мм, что обеспечивает формирование пленки переноса, которая эффективно покрывает сопрягаемую поверхность контртела на начальном этапе трения. По мере истончения данной пленки в процессе трения смазка в виде ПТФЭ будет поступать из пористого бронзового слоя. Материал DU может использоваться при температурах от -200 до $+280$ °С. При сухом трении PV-фактор равен 1,75 МПа · м/с, а максимально допустимая скорость скольжения равна 2,5 м/с. При этом в источнике [23] указывается, что коэффициент трения материала DU составляет 0,1–0,16 при скоростях скольжения выше 0,2 м/с.

Известный материал DP4 имеет аналогичную материалу DU конструкцию, состоящую из стальной основы с нанесенным на нее бронзовым слоем, который пропитан ПТФЭ, содержащим в своем составе смесь неорганических наполнителей и специальных полимерных волокон. Температурный интервал эксплуатации материала DP4 также составляет от -200 до $+280$ °С. Несмотря на то, что при сухом трении максимально допустимая скорость скольжения данного материала составляет 2,5 м/с,

его PV-фактор равен 1 МПа · м/с. Изучение документации, представленной в [24], показывает, что коэффициент трения материала DP4 при скорости скольжения 1 м/с и давлении 1 МПа составляет 0,22–0,25. DP4 имеет преимущество перед DU в средах, вызывающих коррозию свинца.

В табл. 2 также представлены триботехнические характеристики покрытий, изготовленных на основе разработанных композиционных материалов.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований разработанных композиционных материалов на основе медной матрицы, наполненной плакированным металлом полимером и наноструктурами углерода. Сравнительный анализ триботехнических и физико-механических характеристик разработанных композиционных материалов с известными и широко распространенными в промышленности композициями, например, ПА-ДГр10, ДН5МЗКФ9, и покрытий из разработанных композиционных материалов, сформированных на металлических поверхностях, с такими популярными композициями как, например, DU, DP4, Fritex-B, MU показал, что разработанные композиционные материалы на основе порошковых систем «медь – омедненный ПТФЭ – углеродный наноразмерный наполнитель» по критериям антифрикционности, износостойкости и прочности находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

Литература

1. Chung, D. D. L. Composite materials / D. D. L. Chung. – Berlin : Springer, 2010. – 368 p.
2. Hutchings, I. Tribology: friction and wear of engineering materials / I. Hutchings, Ph. Shipway. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 412 p.
3. Kostornov, A. G. Sintered antifriction materials / A. G. Kostornov, O. I. Fushchich // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2007. – Vol. 46, N 9. – P. 503–512. <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0078-5>
4. Metallurgical aspects of self-lubricating composites containing graphite and MoS₂ / K. P. Furlan [et al.] // Journal of materials engineering and performance. – 2017. – Vol. 26, N 3. – P.1135–1145. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2563-4>
5. Winer, W. O. Molybdenum disulfide as a lubricant: A review of the fundamental knowledge / W. O. Winer // Wear. – 1967. – Vol. 10, N 6. – P. 422–452.
6. Tribotechnical characteristics of superhard boron nitride materials in contact with hard alloys / Yu. V. Naidich [et al.] // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2011. – Vol. 50, N 5/6. – P.331–342. <https://doi.org/10.1007/s11106-011-9336-7>
7. Lightweight composite materials for automotive – a review / M. Patel [et al.] // International research journal of engineering and technology. – 2018. – Vol. 5, N 11. – P. 41–47.
8. Gusev, A. I. Nanocrystalline materials / A. I. Gusev, A. A. Rempel. – Cambridge : Cambridge science publishing, 2004. – 351 p.
9. Processing of fullerene-reinforced composites / E. Barrera [et al.] // Journal of materials research. – 1994. – Vol. 9, N 10. – P. 2662–2669. <https://doi.org/10.1557/JMR.1994.2662>
10. Mansoor, M. Carbon nanotube-reinforced aluminum composite produced by induction melting / M. Mansoor, M. Shahid // Journal of applied research and technology. JART. – 2016. – Vol. 14, N 4. – P. 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.002>

11. Highly wear-resistant composites based on copper powder mixture with onion carbon nanostructures for self-lubricating friction units / V. A. Kovtun [et al.] // Journal of friction and wear. – 2010. – Vol. 31, N 2. – P. 128–132.
12. Pleskachevsky, Y. M. Tribological coatings formed by electrocontact sintering of powder systems / Y. M. Pleskachevsky, V. A. Kovtun, Y. E. Kirpichenko // Wear. – 1997. – Vol. 203–204. – P. 679–684. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07433-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07433-9)
13. Research of the interaction energy of carbon nanotubes in the agglomeration process / V. Kovtun [et al.] // International journal “NDT Days”. – 2020. – Vol. 3, iss. 2. – P. 72–79.
14. Modeling and investigation of influence of the formation regimes of wear-resistant nano-filled metal-polymer composites on a stress state of areas contact interaction of structural components / V. Kovtun [et al.] // International journal “NDT Days”. – 2018. – Vol. 1, iss. 3. – P. 322–329.
15. Microstructure and properties of copper–graphite composites fabricated by spark plasma sintering based on two-step mixing / J. Liu [et al.] // Metals. – 2020. – Vol. 10, N 11. – P. 1506–1519. <https://doi.org/10.3390/met10111506>
16. Dyachkova, L. N. Structure and properties of composite powder copper-based materials / L. N. Dyachkova // Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2020. – Vol. 64, № 4. – P. 488–494. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-488-494>
17. Friction and wear performance of copper–graphite surface composites fabricated by friction stir processing / H. Sarmadi [et al.] // Wear. – Vol. 304, N 1/2. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.023>
18. Спеченный антифрикционный материал на основе меди: пат. RU 2024639 / С. Н. Бошин, С. Р. Незамаев, В. А. Манерцев, С. В. Левина, Н. С. Бошин. – Опубл. 15.12.1994.
19. Effect of CaF₂ surface layers on the friction behavior of copper-based composite / K. Konopka [et al.] // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2012. – Vol. 51, N 5/6. – P. 363–367. <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9441-2/>
20. Sintered plain bearing material, plain bearing composite material and its uses: patent DE 10 2004 011 831 B3 / U. Roos, E. Kraft, Th. Koch. – Published 31.03.2005.
21. MU / Technymon plain sliding bearings. – Mode of access: <https://technymon.com/mu.html>. – Date of access: 25.08.202.
22. FRITEX-B / Technymon plain sliding bearings. – Mode of access: <https://technymon.com/fritex-b.html>. – Date of access: 25.08.2022.
23. DU / GGB bearing technology. – Mode of access: <https://www.ggbearings.com/en/our-products/metal-polymer-bearings/du>. – Date of access: 25.08.2022.
24. DP4 / GGB bearing technology. – Mode of access: <https://www.ggbearings.com/en/our-products/metal-polymer-bearings/dp4>. – Date of access: 25.08.2022.

Поступила 12.09.2022