

УДК 621.891:620.22
DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-34-44

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА НИКЕЛЯ И ОМЕДНЕННОГО ОЛОВА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИТОВ

В. Н. ПАСОВЕЦ, В. А. КОВТУН

*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*

Представлены результаты исследований влияния оксида никеля и омедненного олова на триботехнические и механические характеристики самосмазывающихся композитов на основе порошковой системы «меди – омедненный политетрафторэтилен – комбинированный углеродный наноструктурный наполнитель». Проведен анализ свойств указанных композиционных материалов с дополнительным содержанием от 0,5 до 8 мас. % оксида никеля и от 0,5 до 8 мас. % омедненного олова. Установлено, что введение 4–6 мас. % оксида никеля и 3–5 мас. % омедненного олова способствует формированию порошковых самосмазывающихся металлополимерных композитов с коэффициентом трения 0,11–0,13, интенсивностью изнашивания 0,07–0,08 мкм/км, микротвердостью 920–1000 МПа и пределом прочности при сжатии 164–169 МПа. Отмечено, что совокупное действие твердых дисперсных компонентов стабилизирует процесс трения и улучшает эксплуатационные характеристики композиционного материала.

Ключевые слова: порошковый самосмазывающийся композиционный материал, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, предел прочности при сжатии, микротвердость.

Для цитирования. Пасовец, В. Н. Влияние оксида никеля и омедненного олова на триботехнические и механические характеристики порошковых металлополимерных самосмазывающихся композитов / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, В. А. Лодня // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 34–44. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-34-44

THE INFLUENCE OF NICKEL OXIDE AND COPPER-PLATED TIN ON THE TRIBOTECHNICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POWDER METAL-POLYMER SELF-LUBRICATING COMPOSITES

V. N. PASOVETS, V. A. KOVTUN

*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 article presents the results of studies of the influence of nickel oxide and copper-plated tin on the tribotechnical and mechanical properties of self-lubricating composites based on the powder system

"copper - copper-plated polytetrafluoroethylene - combined carbon nanostructured filler". The properties of these composite materials with an additional content of 0.5 to 8 wt. % nickel oxide and 0.5 to 8 wt. % copper-plated tin were analyzed. It was found that the introduction of 4–6 wt. % nickel oxide and 3–5 wt. % copper-plated tin facilitates the formation of self-lubricating metal-polymer composite powders with a friction coefficient of 0.11–0.13, a wear rate of 0.07–0.08 $\mu\text{m}/\text{km}$, a microhardness of 920–1000 MPa, and a compressive strength of 164–169 MPa. The combined effect of the solid dispersed components stabilizes the friction process and improves the performance characteristics of the composite material.

Keywords: powder self-lubricating composite material, friction coefficient, wear rate, compressive strength, microhardness.

For citation. Pasovets V. N., Kovtun V. A., Lodnya V. A. The influence of nickel oxide and copper-plated tin on the tribotechnical and mechanical characteristics of powder metal-polymer self-lubricating composites. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 34–44 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-34-44

Введение

Процессы трения сопряженных поверхностей деталей и сопровождающий их износ являются причиной приблизительно 85 % неисправностей машин и механизмов различного функционального назначения, а затраты на ремонт и техническое обслуживание могут в несколько раз превышать их стоимость: например, в 6 раз – для автомобилей и в 8 раз – для станков [1]. Необходимо отметить, что промышленные предприятия разных стран несут значительные финансовые затраты, связанные с ремонтом и техническим обслуживанием промышленного оборудования. Согласно исследованию, представленному в [2], в Китае затраты на техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования, вышедшего из строя в результате изнашивания трущихся поверхностей, составляют 15 % от себестоимости производимой продукции. А общие экономические потери, связанные с трением и износом при добывче полезных ископаемых, в мире составляют около 210 млрд евро в год, из которых 27 % приходится на производство запасных частей, вышедших из строя [3].

Представленные данные убедительно свидетельствуют о высокой экономической значимости внедрения эффективных путей повышения износостойкости узлов трения. Выполнение этой задачи требует комплексного подхода, сочетающего оптимизацию конструктивных параметров узлов трения и разработку материалов с повышенными триботехническими и физико-механическими характеристиками. Одним из перспективных направлений в данной области исследований является разработка порошковых композиционных материалов на основе металлической матрицы, способных обеспечивать требуемый комплекс эксплуатационных свойств.

В данном контексте также можно выделить, что разработка и промышленное внедрение таких композитов представляются не только актуальной научной задачей, но и стратегическим направлением для решения проблем, связанных с повышением ресурса и надежности машин и механизмов в различных отраслях техники [4–6].

Цель настоящего исследования заключается в исследовании влияния содержания оксида никеля и омедненного олова на триботехнические и механические характеристики порошковых металлополимерных самосмазывающихся композитов.

Характер влияния дисперсных компонентов на формирование свойств порошковых металлополимерных самосмазывающихся композитов

Материалы на основе меди получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, обусловленными образованием на поверхности меди износостойких оксидных пленок, преимущественно состоящих из Cu_2O и CuO . Такие пленки образуются в результате гетерогенных реакций окисления медной поверхности при контакте с кислородом воздуха. Механизм их связан с сочета-

нием трех функциональных эффектов. Во-первых, оксидный слой выполняет барьерную функцию, предотвращая прямой металлический контакт меди с контртелом и тем самым снижая энергию адгезии и вероятность развития адгезионного износа. Во-вторых, в условиях повышенных контактных нагрузок происходит микроотслаивание оксидного покрытия с образованием мелкодисперсных частиц, которые действуют по принципу твердой смазки, уменьшая коэффициент трения и стабилизируя процесс скольжения. В-третьих, благодаря высокой химической активности меди в окислительной среде, поврежденные участки оксидного слоя быстро восстанавливаются за счет вторичного окисления, что обеспечивает эффект динамической самосмазываемости.

Следует подчеркнуть, что медь обладает хорошей пластичностью, высокой электропроводностью и относительной дешевизной [7]. В работах [8, 9] описаны преимущества использования медных электролитических стабилизированных порошков при создании композитов для производства изделий триботехнического назначения. В данных публикациях отмечается, что медные порошки марок ПМС-1 и ПМС-В способны обеспечить высокий уровень триботехнических и физико-механических характеристик формируемым изделиям, обладают насыпной плотностью до $3 \text{ г}/\text{см}^3$ и хорошей текучестью. В работе [8] уточняется, что одним из наиболее приемлемых для использования в качестве материала матрицы при получении композиционных материалов методом электроконтактного спекания является порошок меди марки ПМС-1, имеющий температуру начала процесса окисления около 365°C и конца процесса окисления – около 755°C . Указанные свойства обеспечили эффективное применение композиционных материалов на основе меди в узлах трения машин и механизмов, а также в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов.

В настоящее время с целью снижения износа трущихся металлических поверхностей большое распространение получили жидкие смазки. Однако их применение не всегда целесообразно, так как значительно усложняет конструкцию узлов трения и увеличивает их стоимость. В условиях, когда невозможно или нежелательно использовать жидкие смазочные материалы, стали активно внедрять самосмазывающиеся материалы.

Самосмазывающиеся композиты на основе меди отлично подходят в качестве подшипников скольжения, например, на транспорте, в электронике и авиации благодаря их высокой теплопроводности, устойчивости к коррозии и хорошим смазочным свойствам [10]. В процессе трения медная матрица благодаря своей высокой пластичности и низким значениям твердости способна перераспределять контактные напряжения, ограничивая тем самым локальный перегрев трибоконтакта, что в совокупности повышает износостойкость композита.

Высокие триботехнические характеристики композиционных материалов на основе меди при работе в режиме самосмазывания могут быть получены при введении наполнителей в виде твердых смазок. Наиболее широкое применение в качестве твердых смазок порошковых самосмазывающихся композитов на основе медной матрицы получили оксиды металлов, мягкие металлы, а также полимерные и углеродные материалы [11, 12].

В последние годы углеродным наноразмерным материалам уделяется значительное внимание благодаря уникальному сочетанию физико-механических и триботехнических характеристик, включая высокую теплопроводность и низкий коэффициент трения. Особое место среди углеродных наноразмерных материалов занимают

nanoструктуры углерода: углеродные нанотрубки (УНТ) и луковичные nanoструктуры углерода (ЛНУ). Введение в состав композиционных материалов УНТ и ЛНУ позволяет снизить коэффициент трения композитов как за счет качения отдельных nanoструктур углерода, действующих в качестве подвижных элементов, так и за счет их скольжения по поверхности микровыступов [13]. При этом введение значительных объемов УНТ и ЛНУ нежелательно из-за возможной агломерации nanoструктур углерода [14]. Проведенные исследования показали, что армирование углеродными нанотрубками порошковой металлической матрицы улучшает триботехнические свойства формируемых композитов [15–17].

Наиболее распространен среди полимерных наполнителей самосмазывающихся композиционных материалов политетрафторэтилен (ПТФЭ), обладающий одним из самых низких коэффициентов трения среди известных твердых материалов и обеспечивающий улучшение износостойкости за счет образования на поверхности трения тонкой пленки, предотвращающей прямой контакт металлических поверхностей. При этом ПТФЭ обеспечивает самосмазывание при температурах до 260 °C, обладает низкой адгезией к большинству материалов, что предотвращает налипание частиц и продуктов износа на поверхности трения [18].

Композиционные материалы на основе трехкомпонентной порошковой системы «медь – ПТФЭ – nanoструктуры углерода», полученные методом электроконтактного спекания, достаточно исследованы и используются для изготовления деталей узлов сухого трения, например, вкладышей подшипников скольжения и антифрикционных втулок [12]. Однако высокая пластичность данных композитов [19] ограничивает их применение нагрузками до 1,5 МПа и препятствует достижению высоких нагрузочных характеристик. Таким образом, разработка многокомпонентных самосмазывающихся композиционных материалов на основе порошковой системы «медь – ПТФЭ – nanoструктуры углерода» путем введения дополнительных антифрикционных и упрочняющих компонентов, обеспечивающих повышение нагрузочно-скоростных характеристик и быструю приработку к сопряженной поверхности контргайки, является актуальной задачей для современного трибоматериаловедения. При этом вводимые компоненты не должны существенно удорожать получаемые композиты и быть дефицитными.

Повышение нагрузочно-скоростных характеристик композиционных материалов требует введения дополнительных компонентов, увеличивающих их прочностные свойства. В качестве одного из таких компонентов целесообразно использовать порошок оксида никеля, введение которого повышает твердость и предел прочности при сжатии формируемых порошковых композитов. С другой стороны, введение оксида никеля может приводить к ухудшению характеристик трения и изнашивания самосмазывающихся композиционных материалов на основе порошковой системы «медь – ПТФЭ – nanoструктуры углерода». В этой связи целесообразно введение мягкого металла, способного взаимодействовать с металлом матрицы, например омедненного олова, что позволит улучшить триботехнические характеристики композиционных материалов на основе порошковой системы «медь – ПТФЭ – nanoструктуры углерода» в присутствии оксида никеля. При этом добавление олова в порошковые композиционные материалы на основе меди обеспечивает быструю приработку сопряженных поверхностей трения. Олово, являясь мягким металлом, обладает хорошей пластичностью и низкой температурой плавления (232 °C), что способствует формированию плотной структуры самосмазывающихся композитов на основе меди [20].

Необходимо отметить, что использование при получении порошковых композиционных материалов для узлов сухого трения исходных порошковых компонентов, плакированных металлом матрицы, позволяет ввести в состав материала значительно большее количество дисперсных антифрикционных наполнителей при сохранении требуемых значений механических характеристик спеченной матрицы [21]. Полученный эффект можно объяснить тем, что частицы плакированного наполнителя в меньшей степени экранируют металлические частицы матрицы, что способствует образованию максимального количества металлических контактов как между частицами металлической матрицы, так и между частицами матрицы и частицами дисперсных наполнителей. В результате формируется сплошной металлический каркас композиционного материала, в котором частицы антифрикционных наполнителей распределены в виде изолированных включений.

Материалы и методика исследования

В работе в качестве металлической матрицы использовался порошок меди ПМС-1 ГОСТ 4960-2017. Как упрочняющие наполнители применялись порошок оксида никеля ГОСТ 17607-72 крупностью 25–50 мкм и смесь наноструктур углерода, содержащая 20 % УНТ и 80 % ЛНУ в виде комбинированного углеродного наноструктурного наполнителя. Антифрикционными наполнителями выступали гранулы омедненного ПТФЭ крупностью 50–200 мкм при содержании в них меди 50–60 мас. % и гранулы омедненного олова крупностью 45–63 мкм при содержании в них меди 10–20 мас. %. Гранулы антифрикционных наполнителей изготавливались из порошков ПТФЭ ГОСТ 10007-80 и олова марки ПОЗ ГОСТ 9723-73. Плакирование частиц наполнителей осуществлялось путем химического осаждения меди из раствора медного купороса. В качестве базового состава применялась порошковая система «меди – омедненный ПТФЭ (6 мас. %) – комбинированный углеродный наноструктурный наполнитель (0,07 мас. %)».

Образцы получали методом электроконтактного спекания, обеспечивающим быструю консолидацию исходных компонентов за счет локального нагрева током высокой плотности. Формировались они путем прессования при давлении 400 МПа. Спекание производилось посредством пропускания электрического тока плотностью 400 А/мм² в течение 1,5 с.

Триботехнические испытания проводили в режиме самосмазывания на машине СМЦ-2 трением скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш», имитирующей реальные условия трения в подшипниковых узлах, при нагрузке 2 МПа, скорости скольжения 1,5 м/с и температуре окружающей среды 295 К. Материалом контроллера служила сталь 45 твердостью 44 HRC, шероховатостью поверхности 0,32–0,4 мкм. Поверхности трения образцов перед испытаниями обезжиривались спиртом гидроизенным. Приработка проводилась при нагрузке 100 кПа до образования контакта на площади, равной 95 % поверхности трения. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания определялись для режима установившегося трения.

Микротвердость материалов устанавливали с помощью нанотестера FischerScope H100C (Fischer Co., Германия). Предел прочности при сжатии определяли по ГОСТ 25.503-97 на универсальной испытательной машине Instron 5567 (Instron, США). Для каждого состава испытывали по три образца.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости предела прочности при сжатии и микротвердости порошкового самосмазывающегося композиционного материала от содержания оксида никеля. Показано, что введение дисперсных частиц оксида никеля в композиционный самосмазывающийся материал на основе порошковой системы

«медь – омедненный ПТФЭ (6 мас. %) – комбинированный углеродный наноструктурный наполнитель (0,07 мас. %)» способствует повышению значений предела прочности при сжатии и микротвердости данного материала в условиях оптимального содержания оксида никеля и равномерного его распределения в объеме медной матрицы. Так, для материала, содержащего 5 мас. % оксида никеля, значение предела прочности при сжатии составляет 180 МПа, микротвердости – 1100 МПа. Однако повышение содержания оксида никеля до 8 мас. % резко снижает механические характеристики, и тогда значение предела прочности при сжатии с такой концентрацией данного компонента составляет 80 МПа, что можно объяснить существенным разупрочнением металлической матрицы.

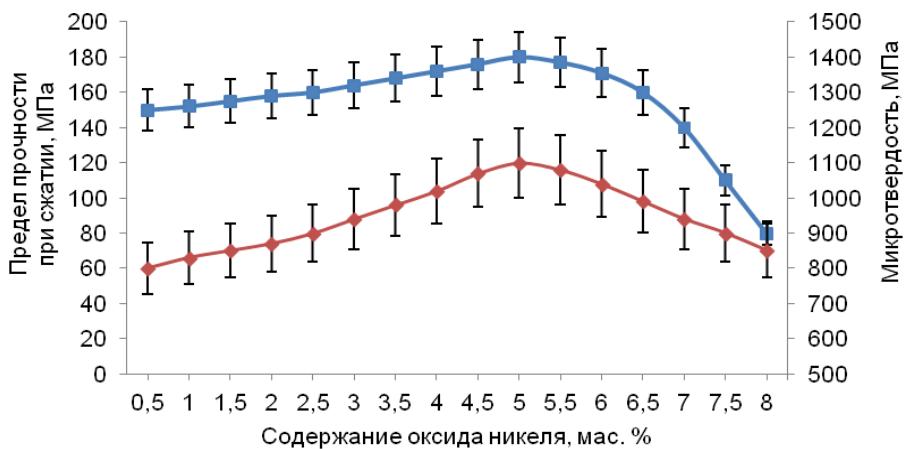


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии и микротвердости порошкового самосмазывающегося композиционного материала от содержания оксида никеля:
■ – предел прочности при сжатии, МПа; ● – микротвердость, МПа

Результаты экспериментальных исследований механических характеристик композиционного материала показали, что оптимальная концентрация оксида никеля составляет около 4–6 мас. %. При данном содержании оксида никеля исследуемый материал обладает следующими механическими характеристиками: микротвердость – от 1020 до 1100 МПа; предел прочности при сжатии – от 171 до 180 МПа.

Однако введение оксида никеля негативно влияет на триботехнические характеристики получаемых материалов. Так, при содержании 6 мас. % оксида никеля в материале значение коэффициента трения повышается до 0,19 при практически неизменных значениях интенсивности изнашивания – 0,07–0,08 мкм/км (рис. 2). Данное поведение материала можно объяснить, используя адгезионно-деформационную теорию трения Бoudena–Tейбора [22], согласно которой коэффициент трения пропорционален энергии пластической деформации в зоне контакта. При этом энергия, затраченная на необратимую пластическую деформацию микронеровностей поверхности, проявляется как сопротивление движению, увеличивая коэффициент трения. К тому же повышение микротвердости композиционного материала увеличивает глубину пластических деформаций рабочей поверхности контртела, в результате чего возрастают значения коэффициента трения в паре «порошковый самосмазывающийся композит – контртело». Дальнейшее увеличение содержания оксида никеля в композиционном материале повышает значения коэффициента трения до 0,33 и интенсивности изнашивания – до 0,38 мкм/км.

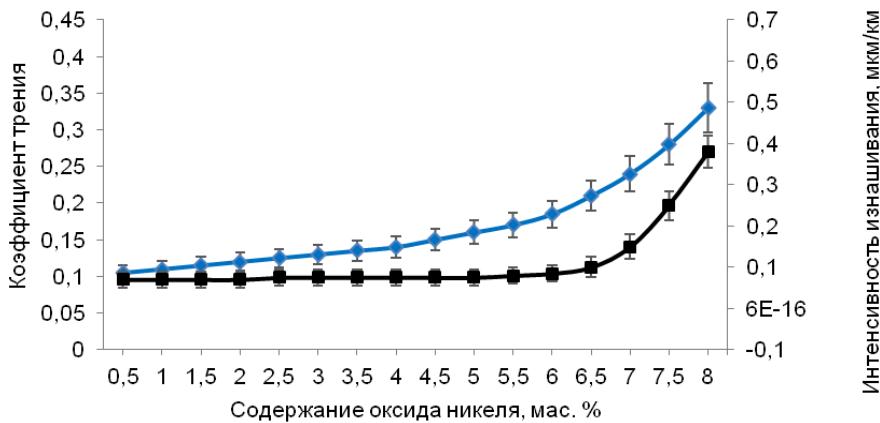


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового самосмазывающегося композиционного материала от содержания оксида никеля:
—●— коэффициент трения; —■— интенсивность изнашивания

Исследовано влияние содержания омедненного олова на триботехнические и механические характеристики самосмазывающегося композиционного многокомпонентного материала на основе порошковой системы «медь – омедненный ПТФЭ (7 мас. %) – комбинированный углеродный наноструктурный наполнитель (0,07 мас. %) – оксид никеля (5 мас. %)» (рис. 3 и 4). Установлено, что введение от 0,5 до 4 мас. % омедненного олова позволяет снизить коэффициент трения с 0,16 до 0,11 при практически неизменных значениях интенсивности изнашивания, которые составляют 0,07–0,08 мкм/км. Дальнейшее увеличение содержания омедненного олова в материале ведет к росту исследуемых характеристик трения и изнашивания. Так, при содержании омедненного олова в материале 8 мас. % коэффициент трения повышается до 0,26, а интенсивность изнашивания – до 0,25 мкм/км, что объясняется введением значительного количества мягкой фазы материала. При этом по критериям износстойкости и прочности оптимальное содержание омедненного олова в материале составляет 3–5 мас. %. Рассматриваемый материал при данной концентрации омедненного олова обладает следующими триботехническими и механическими характеристиками: коэффициент трения – от 0,11 до 0,13; интенсивность изнашивания – от 0,07 до 0,08 мкм/км; микротвердость – от 920 до 1000 МПа; предел прочности при сжатии – от 164 до 169 МПа.

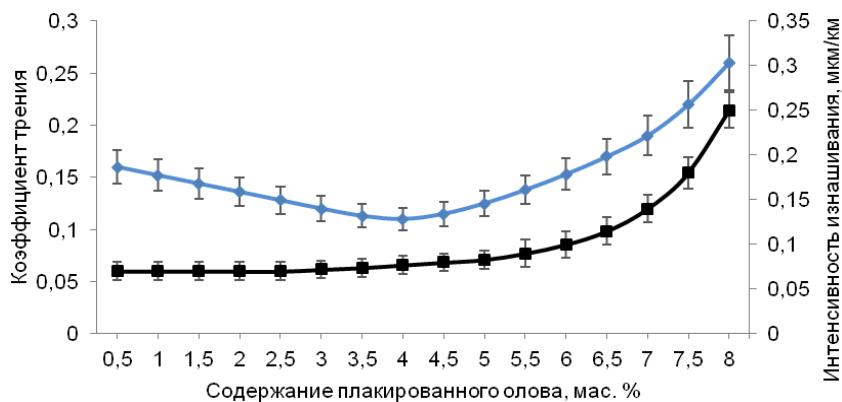


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения и интенсивности изнашивания порошкового самосмазывающегося композиционного материала от содержания омедненного олова:
—●— коэффициент трения; —■— интенсивность изнашивания

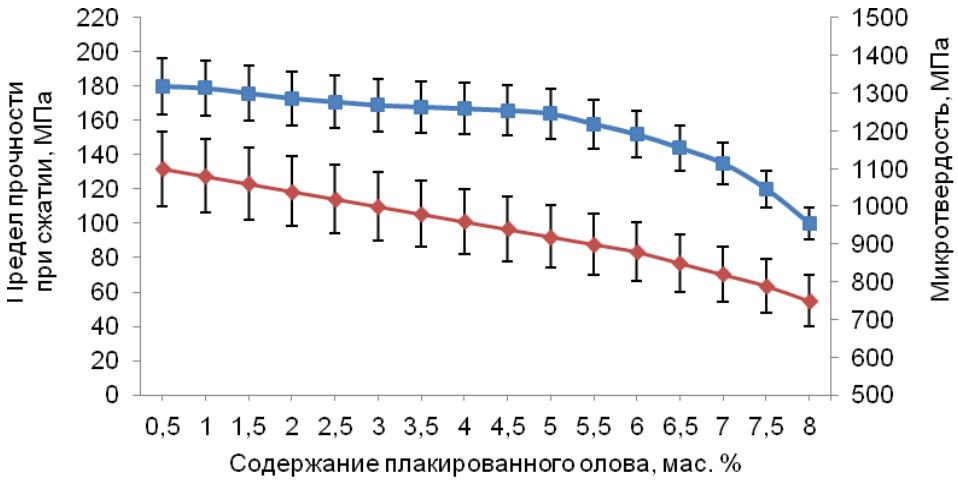


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии и микротвердости порошкового самосмазывающегося композиционного материала от содержания омедненного олова:

■ — предел прочности при сжатии, МПа; ● — микротвердость, МПа

На основании результатов экспериментальных исследований можно отметить, что введение омедненного олова оказывает комбинированное влияние на прочностные и триботехнические характеристики композиционного материала. Во-первых, в процессе электроконтактного спекания олово частично образует жидкую фазу, компенсируя тем самым деформации медной матрицы, возникающие под действием эффекта теплового удара и пинч-эффекта. В процессе электроконтактного спекания при формировании жидкой фазы меди в местах контактного взаимодействия частиц медной матрицы олово образует ограниченный твердый раствор с медью. Во-вторых, благодаря низкой температуре плавления и высокой пластичности, олово в процессе трения может локально размягчаться в зонах микроконтактов под действием трения с частичным переходом в полужидкую фазу, что способствует заполнению и сглаживанию неровностей микрорельефа на контактирующих поверхностях, снижению концентрации контактных напряжений и уменьшению вероятности адгезионного скрепления.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования триботехнических и механических характеристик порошкового самосмазывающегося композиционного материала с медной матрицей, содержащего в своем составе плакированный металлом матрицы ПТФЭ, наноструктуры углерода, оксид никеля и омедненное олово. На основе анализа полученных результатов исследований установлены особенности влияния оксида никеля и омедненного олова на триботехнические и механические характеристики формируемых композитов.

Показано, что введение в состав композиционного материала 4–6 мас. % оксида никеля и 3–5 мас. % омедненного олова позволяет получить композит, обладающий коэффициентом трения 0,11–0,13, интенсивностью изнашивания 0,07–0,08 мкм/км, микротвердостью 920–1000 МПа и пределом прочности при сжатии 164–169 МПа. Такое сочетание свойств, вероятно, обусловлено совокупным действием твердых дисперсных компонентов, стабилизирующих процесс трения и улучшающих эксплуатационные характеристики композиционного материала. Наблюдаемый эффект позволяет при введении оксида никеля и омедненного олова использовать компози-

ционные самосмазывающиеся материалы на основе порошковой системы «медь – омедненный ПТФЭ (6 мас. %) – комбинированный углеродный наноструктурный наполнитель (0,07 мас. %)» при трении с нагрузкой до 2 МПа, что делает данный композит перспективным для применения в самосмазывающихся узлах трения.

Литература

1. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
2. A mapping analysis of maintenance in industry 4.0 / M. D. Nardo, M. Madonna, P. Addonizio, M. Gallab // Journal of Applied Research and Technology. – 2021. – Vol. 19, N 6. – P. 653–675.
3. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry / K. Holmberg, P. Kivikyto-Reponen, P. Harkisaari [et al.] // Applied Composite Material. – 2017. – Vol. 115, N 6. – P. 116–139. – DOI 10.1016/j.triboint.2017.05.010
4. Beaumont, P. W. R. The Structural Integrity of Composite Materials and Long-Life Implementation of Composite Structures / P. W. R. Beaumont // Applied Composite Materials. – 2020. – Vol. 19, N 6. – P. 449–478. – DOI 10.1007/s10443-020-09822-6
5. Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations / ed. K. K. Kar. – Berlin : Springer, 2017. – 686 p.
6. Campbell, F. C. Structural composite materials / F. C. Campbell. – Materials Park : ASM International, 2010. – 611 p.
7. Friction and wear behavior of copper metal matrix composites at temperatures up to 800 °C / Y. Xiao, Y. Chang, M. Shen [et al.] // Journal of materials research and technology. – 2022. – Vol. 19. – P. 2050–2062.
8. Ковтун, В. А. Триботехнические покрытия на основе порошковых межнографитовых систем / В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский ; под науч. ред. акад. П. А. Витязя. – Гомель : ИММС НАНБ, 1998. – 148 с.
9. Довыденкова, А. В. Получение и свойства конструкционных деталей из порошков меди и ее сплавов / А. В. Довыденкова, И. Д. Радомысельский // Порошковая металлургия. – 1982. – № 3. – С. 44–53.
10. Microstructure and frictional properties of copper-tin composites containing graphite and MoS₂ by rapid hot-press sintering / Y. Su, F. Siang, M. Long [et al.] // Tribology International. – 2023. – Vol. 183. – P. 108392. – DOI 10.1016/j.triboint.2023.108392
11. 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.
12. Порошковые нанокомпозиты триботехнического назначения / В. Н Пасовец, А. Ф. Ильющенко, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский. – Минск : КИИ, 2016. – 295 с.
13. Enhancement mechanisms of mechanical, electrical and thermal properties of carbon nanotube-copper composites: A review / Y. Jia, K Zhou, W. Sun [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 32. – P. 1395–1415. – DOI 10.1016/j.jmrt.2024.07.181
14. Azrin, A. S. The effect of sintering duration on metal matrix composite reinforced with CNT fabricated by powder metallurgy: a review / A. S. Azrin, S. Shamsuddin // Scientific Research Journal. – 2024. – Vol. 21, N 2. – P. 1–21. – DOI 10.24191/srj.v21i2.25405
15. Carneiro, I. Strengthening mechanisms in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites: a review / I. Carneiro, S. Simoes // Metals. – 2021. – Vol. 11. – P. 1613–1640. – DOI 10.3390/met11101613
16. Ujah, C. O. Tribological properties of CNTs-reinforced nano composite materials / C. O. Ujah, D. V. V. Kallon, V. S. Aigbodion // Lubricants. – 2023. – Vol. 11, N 3. – P. 95–119. – DOI 10.3390/lubricants11030095

17. Pasha, A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites by powder metallurgy: a review / A. Pasha, B. M. Rajaprakash, M. N. Ahmed [et al.] // Material Science Research India. – 2020. – Vol. 17, N 3. – P. 201–206. – DOI 10.13005/msri/170302
18. Фторполимерные материалы / отв. ред. акад. В. М. Бузник. – Томск : НТЛ, 2017. – 600 с.
19. Numerical stress state evaluation of powder nanofilled metal-polymer composite materials at electrocontact sintering / V. Kovtun, M. Mihovski, V. Pasovets [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2019. – Vol. 49, N 4. – P. 343–359.
20. A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn–Ag–Cu based solders and substrates / G. Zeng, S. Xue, L. Zhang [et al.] // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 21. – P. 421–440.
21. Effect of carbon content on friction and wear properties of copper matrix composites at high speed current-carrying / Z. Yang, Y. Ge, X. Zhang [et al.] // Materials. – 2019. – Vol. 12 (2881). – P. 1–13. – DOI 10.3390/ma12182881
22. Bowden, F. P. Friction and lubrication of solids / F. P. Bowden, D. Tabor. – Oxford : Clarendon Press, 1964. – 554 p.

References

1. Garkunov D. N. *Tribotechnics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p. (in Russian).
2. Nardo M. D., Madonna M., Addonizio P., Gallab M. A mapping analysis of maintenance in industry 4.0. *Journal of Applied Research and Technology*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 653–675.
3. Holmberg K., Kivikyto-Reponen P., Harkisaari P., Valtonen K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Applied Composite Materia*, 2017, vol. 115, no. 6, pp. 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>
4. Beaumont P. W. R. The Structural Integrity of composite materials and long-life implementation of composite structures. *Applied Composite Materials*, 2020, vol. 19, no. 6, pp. 449–478. <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09822-6>
5. Ed. K. K. Kar. Composite Materials: processing, applications, characterizations. Berlin, Springer Publ., 2017. 686 p.
6. Campbell F. C. *Structural composite materials*. Materials Park., ASM International Publ., 2010. 611 p.
7. Xiao Y. E., Cheng Y., Shen M., Yao P., Du J., Ji D., Zhao H., Liu Sh., Hua L. Friction and wear behavior of copper metal matrix composites at temperatures up to 800 °C. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 19, pp. 2050–2062.
8. Kovtun V. A., Pleskachevskij Ju. M. *Tribotechnical coatings based on copper-graphite powder systems*. Ed. Vitjazja P. A. Gomel', IMMS NANB Publ., 1998. 148 p. (in Russian).
9. Dovydenkova A. V., Radomysel'skij I. D. Poluchenie i svojstva konstrukcionnyh detalej iz poroshkov medi i ee splavov. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*, 1982, no. 3, pp. 44–53 (in Russian).
10. Su Y., Jiang F., Long M., Wu F., Xiao Z., Wu M. Microstructure and frictional properties of copper-tin composites containing graphite and MoS₂ by rapid hot-press sintering. *Tribology International*, 2023, vol. 183, art. 108392. <https://doi.org/10.1016/j.triboint>
11. Kovtun V. A., Pasovets V. N., Pleskachevsky Yu. M. *Metallouglerodnye kompozicionnye poroshkovye materialy dlya otvetstvennyh uzlov mashin i mehanizmov*. Gomel', Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta, 2013. 283 p. (in Russian).
12. Pasovets V. N., Ilyuschenko A. F., Kovtun V. A., Pleskachevsky Yu. M. *Poroshkovyye nano-kompozity tribotekhnicheskogo naznacheniya*. Minsk, KII Publ., 2016. 295 p. (in Russian).
13. Jia Y., Zhou K., Sun W., Ding M., Wang Y., Kong X., Jia D., Wu M., Fu Y. Enhancement mechanisms of mechanical, electrical and thermal properties of carbon nanotube-copper composites: A review. *Journal of materials research and technology*, 2024, vol. 32, pp. 1395–1415. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.181>

14. Azrin A. S., Shamsuddin S. The effect of sintering duration on metal matrix composite reinforced with CNT fabricated by powder metallurgy: a review. *Scientific Research Journal*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 1–21. <https://doi.org/10.24191/srj.v21i2.25405>
15. Carneiro I., Simoes S., Strengthening Mechanisms in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites: a review. *Metals*, 2021, vol. 11, pp. 1613–1640. <https://doi.org/10.3390/met11101613>
16. Ujah C. O., Kallon D. V. V., Aigbodion V. S. Tribological properties of CNTs-reinforced nano composite materials. *Lubricants*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 95–119. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030095>
17. Pasha A., Rajaprakash B. M., Ahmed M. N., Hafeezi T., Manjunath A. C. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites by powder metallurgy: a review. *Material Science Research India*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 201–206. <https://doi.org/10.13005/msri/170302>
18. Ed. Buznik V. M. Fluoropolymer materials. Tomsk. Nauchno-tehnicheskaya literatura Publ., 2017. 600 p. (in Russian).
19. Kovtun V., Mihovski M., Pasovets V., Biryuk V., Mirchev Y. Numerical stress state evaluation of powder nanofilled metal-polymer composite materials at electrocontact sintering. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, vol. 49, no. 4, pp. 343–359.
20. Zeng G., Xue S., Zhang L., Gao L. L., Dai W., Luo J. D. A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn–Ag–Cu based solders and substrates. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 21, pp. 421–440.
21. Yang Z., Ge Y., Zhang X., Shangguan B., Zhang Y., Zhang J. Effect of carbon content on friction and wear properties of copper matrix composites at high speed current-carrying. *Materials*, 2019, vol. 12 (2881), pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma12182881>
22. Bowden F. P., Tabor D. *Friction and lubrication of solids*. Oxford. Clarendon Press Publ., 1964. 554 p.

Поступила 11.09.2025 г.