

12. Курлов А.С., Гусев А.И. Фазовые равновесия в системе WC и карбиды вольфрама // *Успехи химии*. 2006. Т. 75. № 7. С. 687–708.

13. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справ. изд. М.: Металлургия. 1988. 400 с.

Для цитирования: Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.

POWDER LASER CLADDING OF A WEAR-RESISTANT COMPOSITE COATING

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., K.A. SAKHAROV, Postgraduate

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Metal-ceramic NiCrBSi-WC coating on 40X structural steel has been obtained by laser powder surfacing method. It is shown that cladding of high-alloyed powder mixture with the help of multichannel laser forms practically porous coating and provides metallurgical alloying with the base. It is noted that the fusion line is homogeneous in structure, and it confirms high homogeneity of integral heat input during cladding by this type of laser. It is established that due to high speeds of heating and cooling of the melt during powder laser cladding the dissolution of WC carbides in the melt bath is insignificant. No emission of brittle phase at the carbide-metal matrix interface was detected.

Keywords: microstructure, metal-ceramic coating, laser powder surfacing, multi-channel laser.

Поступила в редакцию/received: 19.11.2023; после рецензирования/reviced: 30.11.2023;
принята/accepted: 05.12.2023

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,
О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnvkv@yandex.ru

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2024

Исследованы триботехнические характеристики инновационного материала, представляющего собой композиционное покрытие с матрицей из оксида алюминия и наполнителями из нанодисперсного магнетита и микродисперсных дисульфида молибдена, графита. Установлено, что минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при сохранении высоких прочностных свойств материалов достигаются при концентрации дисперсных частиц в электролите: для

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

магнетита – не более 20 г/л; графита – не более 40 г/л; дисульфида молибдена – 45 г/л. Подчеркнуто, что испытания показали стабильность коэффициента трения исследуемых покрытий в течение 90 часов. Изучено влияние контактного давления на интенсивность линейного износа. Предложен критерий перехода от упругого контакта к пластическому. На основании этого получено расчетное соотношение для оценки перехода от стабильной работы трибосопряжения к его катастрофическому изнашиванию.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, антифрикционные наполнители, керамическое покрытие, трение, износ.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-26-36

ВВЕДЕНИЕ

Успешное развитие космической техники, приборостроения и геодезического оборудования определяет необходимость создания новых твердых смазочных материалов и покрытий [1–3]. Эти материалы особенно востребованы при производстве трибоузлов, работающих длительное время в вакууме, агрессивных газовых средах, при экстремальных температурах, а также при длительном отсутствии технического обслуживания [4–6]. Материалы, первоначально использовавшиеся для узлов сухого трения на основе полимерных связей с твердыми смазочными наполнителями (ТСН), не отвечают повышенным требованиям к несущей способности и долговечности узлов трения. Наиболее перспективной альтернативой полимерным матрицам с ТСН являются оксидные керамические связки, содержащие в своей структуре дисперсные микро- и нанонаполнители с низким сопротивлением сдвигу [7].

В статьях [8, 9] предложена технология получения композиционных материалов, синергетически сочетающих высокие прочностные свойства керамической матрицы с антифрикционными свойствами дисперсного наполнителя. Покрытия образуются на поверхности вентильных металлов, в частности алюминия, под действием искрового разряда. Неоднородное электрическое поле встраивает взвешенные в электролите частицы ТСН в формирующуюся матрицу керамического покрытия. Структура материала представляет собой матрицу из оксида алюминия преимущественно α -модификации, в которую внедрены частицы ТСН. Наполнителями являются микродисперсные частицы графита, дисульфида молибдена и наноразмерные частицы магнетита. Первые два типа наполнителей известны своими антифрикционными свойствами, а частицы магнетита повышают механические свойства покрытий и способствуют уменьшению адгезионных связей между взаимодействующими поверхностями.

Предложенная технология способствовала успешному решению задачи формирования композиционных материалов, связанной с негативным влиянием ТСН с различными диэлектрическими свойствами на процесс электрохимического окисления. Предварительные результаты испытаний показали хорошие антифрикционные характеристики полученных покрытий [8]. Однако влияние концентрации дисперсных частиц ТСН на триботехнические параметры композиционных материалов детально не изучено. Недостаточно данных для определения оптимальных режимов работы новых материалов, поэтому в настоящее время нельзя рекомендовать область применения полученных оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями.

Цели работы заключаются в изучении триботехнических характеристик оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями (графитом, дисульфидом молибдена и магнетитом) в зависимости от их концентрации и определении оптимальных режимов работы покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые образцы имеют материал покрытия, сформированный на основе алюминиевого сплава Д1 (ГОСТ 4784-97). Основной состав электролита: щелочь NaOH, силикат натрия, дистиллированная вода, частицы ТСН. В зависимости от типа наполнителя концентрация ν основных компонентов варьировалась (табл. 1).

Дисперсные компоненты графита и дисульфида молибдена имели средний размер частиц 2...10 мкм. Чтобы нивелировать влияние электрических свойств ТСН на формирование композиционного материала, авторы выбрали метод модификации активной поверхности дисперсных частиц полярной жидкостью, в качестве которой выступал глицерин [10].

Частицы магнетита Fe₃O₄, использованные как ТСН, имели средний размер около 7 нм. Наноразмерный размер Fe₃O₄ обеспечивается технологией получения магнитных частиц методом химического осаждения Элмора [11]. Приготовление ТСН включало защиту магнитных частиц от окисления и предотвращение их коагуляции [12].

Таблица 1. Состав электролитов

Дисперсная фаза ТСН	Концентрации элементов в электролите, масс.%				
	Едкий натрий NaOH	Жидкое стекло Na ₂ SiO ₃	ТСН	Глицерин	Дистиллированная вода
Графит	0,1	1,5	4...40	2	
Дисульфид молибдена	0,1	1,1	4...50	3	
Магнетит	0,1	1,5	3...20	–	

Технология получения антифрикционного покрытия реализована на оборудовании [13], используемая плотность тока – 10 А/дм². Триботехнические испытания проводились на установке МТП [14], реализующей схему трения «штифт с тестовым покрытием – контрообразец в виде диска». Материалом контрообразца является инструментальная легированная сталь ХВГ (твердость 50...55 HRC). Дополнительная смазка не применялась. Конструкция машины трения обеспечивает относительную погрешность не более 17 % для определения линейного износа и 10 % для определения коэффициента трения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Увеличение концентрации ν ТСН всех типов значительно улучшает антифрикционные свойства композитных покрытий. Коэффициент трения f и линейная скорость износа I_h линейно уменьшаются с увеличением концентрации графита и магнетита (рис. 1). Дальнейшее увеличение тестируемого содержания ТСН ограничено нарушением процесса электролитического формирования покрытия. Линейная кривая скорости износа для материала, содержащего дисульфид молибдена в матрице, имеет экстремальный характер. Когда концентрация MoS₂ в электролите превышает 45 г/л, процесс формирования композиционного материала возможен, но его физико-механические свойства значительно снижаются. Уменьшение твердости материала и прочности адгезии клея к алюминиевой основе приводит к увеличению линейной скорости износа.

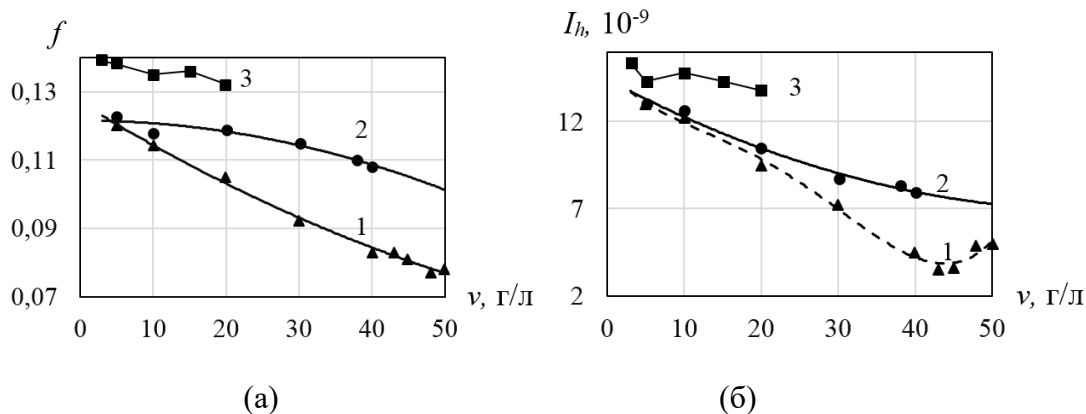


Рис. 1. Влияние концентрации ТСН в электролите на коэффициент трения (а) и интенсивность линейного износа (б).

Твердые смазочные наполнители: 1 – MoS_2 ; 2 – графит; 3 – магнетит.
Скорость скольжения – 0,47 м/с, давление на контакте – 1,5 МПа

Авторы настоящей статьи провели исследование скорости линейного износа полученных антифрикционных покрытий в зависимости от давления в зоне контакта P (рис. 2). В диапазоне давлений от 0,3 до 6 МПа материал, модифицированный частицами дисульфида молибдена, показал наилучший результат. Меньшее значение линейного износа этого материала, если сравнивать с покрытиями с модифицированным графитом и магнетитом, обусловлено лучшими смазывающими свойствами MoS_2 . Положительный эффект также оказывает более высокая технологически возможная концентрация MoS_2 в композиционном материале. Базовое покрытие без антифрикционного наполнителя имеет самую высокую линейную скорость износа.

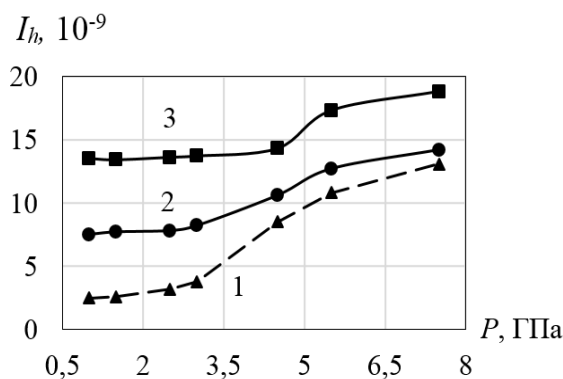


Рис. 2. Влияние контактного давления на интенсивность линейного износа.

Твердые смазочные наполнители: 1 – MoS_2 ; 2 – графит; 3 – магнетит.
Скорость скольжения – 0,47 м/с, концентрация графита и MoS_2 в электролите – около 40 г/л, магнетита – 20 г/л

Немонотонная форма линейных зависимостей износа, показанная на рис. 2, позволяет предположить изменение типа деформации композиционных материалов покрытия с увеличением контактного давления. Анализ микрогеометрии трибоповерхностей образцов с исследуемым покрытием на нескольких этапах испытаний дал возможность уточнить механизм контактного взаимодействия в зоне трения.

На профилограмме рабочей поверхности образца, имеющего композиционное покрытие с графитовым наполнителем, видны микрошероховатости, характеризующиеся периодичностью и значительным перепадом высот (рис. 3а). После 4 секунд с начала испытаний периодичность неровностей существенно нарушилась, на профилограмме (рис. 3б) видно существенное выглаживание профиля поверхности. По окончании приработки (по истечении времени около 20 секунд) профиль поверхности трения стал практически гладким (рис. 3в).

Анализ профилограмм и результаты трибоиспытаний оксидных покрытий с антифрикционными наполнителями позволяют описать процессы, происходящие в зоне трения. Достаточно малая начальная шероховатость композитного материала за счет предварительного тонкого шлифования позволяет сблизить контактирующие поверхности до такой степени, что нагрузка на наиболее выступающие микрошероховатости распределяется относительно равномерно. Во время фрикционного контакта вершины керамических микрошероховатостей и антифрикционных частиц изнашиваются, в результате чего образуются участки, вдоль которых происходит дальнейший контакт.

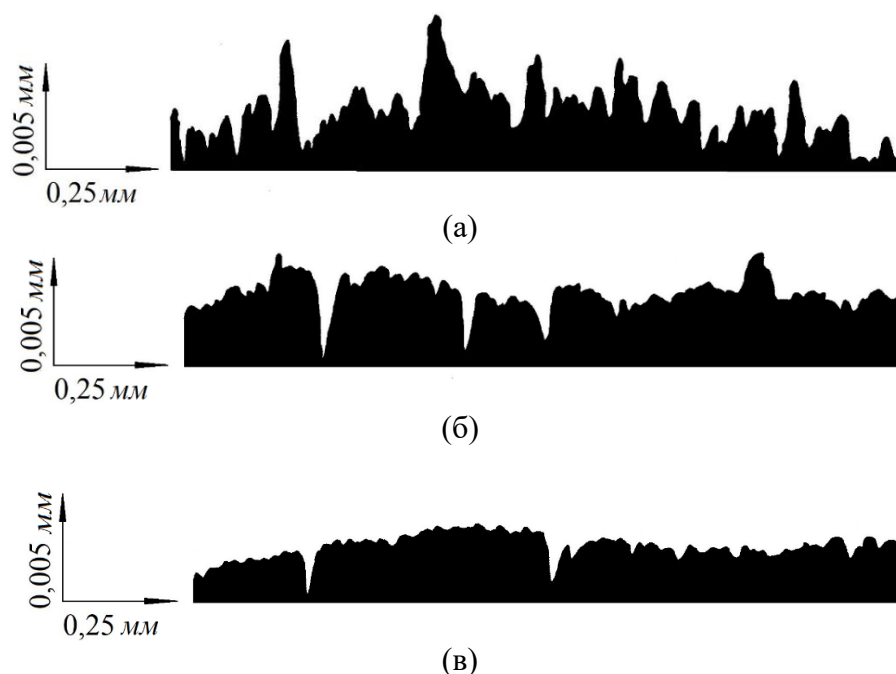


Рис. 3. Профилограммы поверхности трения керамического материала с графитовым наполнителем: до испытаний (а); в процессе приработки (б); при установившемся режиме работы (в)

В процессе трения горизонтальные участки взаимного контакта увеличивают площадь, формируя плоскость, нормальную к прикладываемой нагрузке. Частицы графита, дисульфида молибдена или магнетита, окружающие микрошероховатости из оксида алюминия, частично разрушаются на вершинах выступов, распределяются по поверхности материалов пары трения, играя роль твердой смазки. В установившемся режиме трения контур контробразца также выравнивается, обе контактирующие поверхности выглаживаются до глянцевого блеска, взаимная деформация микронеровностей носит преимущественно упругий характер. При дальнейшем увеличении нагрузки на поверхности трения появляются очаги разрушения в виде трещин. Когда контактное давление превышает некоторое критическое значение, скорость

разрастания микроочагов разрушения поверхности трения увеличивается, что приводит к ее катастрофическому износу.

Известно, что в случае усталостного износа достижение высокой твердости контактирующих поверхностей довольно проблематично, поскольку увеличение твердости обычно сопровождается исчерпанием запаса пластичности и способностью к дальнейшему накоплению деформаций. При применении предлагаемых авторами покрытий повышенная износостойкость и низкий коэффициент трения сочетаются с высокой твердостью материалов. Для керамических материалов этот факт известен, однако предлагаемые оксидные покрытия с антифрикционными наполнителями (графитом, дисульфидом молибдена или магнетитом) показывают наилучшие результаты по износостойкости. При введении в состав керамического композиционного материала низкомолекулярных смазочных компонентов происходит снижение прочностных характеристик материала по мере приближения к поверхности трения и реализуется правило «положительного градиента механических свойств». Это позволяет локализовать деформационные процессы в тонком поверхностном слое твердой смазочной пленки, не снижая конструкционную прочность узла в целом.

Морфологические исследования поверхности трения композиционных покрытий подтверждают сделанные выводы. На рис. 4 представлены микроструктурные изображения антифрикционного покрытия, модифицированного частицами дисульфида молибдена, перед испытанием и после испытания, а также контрольного образца после испытания. На рис. 4б и 4в показаны темные области, образованные твердой смазочной пленкой MoS_2 , нанесенной на соприкасающиеся поверхности.

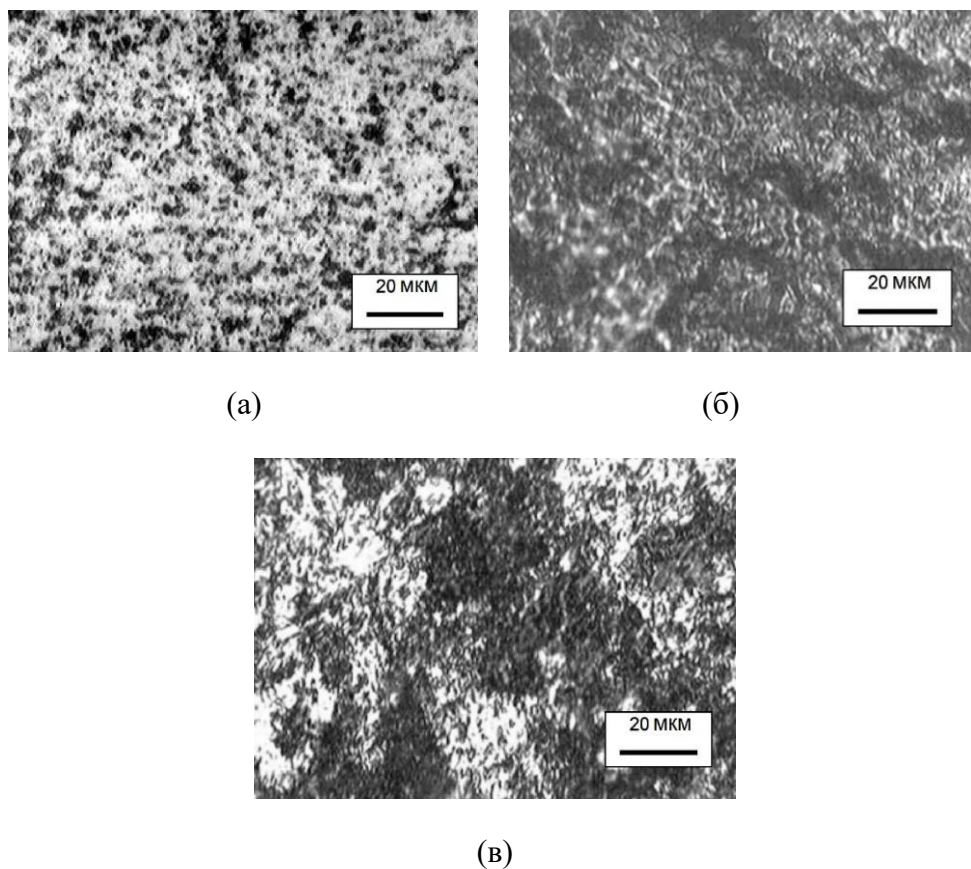


Рис. 4. Поверхность трения образца оксидного покрытия с MoS_2 до испытаний (а), после испытаний (б) и контрольного образца после испытаний (в)

Принимая во внимание проведенный анализ, авторы предполагают, что при превышении определенного значения давления усталостный характер износа при преимущественно упругом деформировании материала сменяется резким увеличением интенсивности износа при пластическом деформировании [15, 16]. Для оценки оптимальных режимов работы полученных антифрикционных материалов необходимо определить режимы нагрузки, соответствующие упругой деформации и усталостному износу материала.

Для определения критического давления в зоне контакта и описания контактного взаимодействия при трении оксидных покрытий с износостойкими наполнителями будем исходить из предположения, что упругий контакт микронеровностей при установившемся режиме изнашивания сменяется пластическим в случае интенсивного разрушения трибоповерхностей [17]. В качестве критерия перехода примем нагрузку, создающую среднее упругое давление на пятне контакта, равное микротвердости материала HV. Переход от нагрузки на единичном пятне контакта к величине критического номинального давления $q_{кр}$ в контакте реального трибосопряжения проведен согласно модели И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина [18]:

$$q_{ax} = \left(\frac{t_m \nu HV \pi^2}{2} \right)^{2\nu+1} \times \left[\frac{1,5\pi I_e}{t_m \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{2\nu},$$

где R_p , ν , t_m , K_3 – параметры шероховатости контактирующих поверхностей [18]; $I_e = \frac{1-\mu_c^2}{E_c} + \frac{1-\mu_k^2}{E_k}$ (E_c , E_k и μ_c , μ_k – модули упругости и коэффициенты Пуассона оксидного покрытия с наполнителями и материала контробразца). Рассчитанные по предложенной формуле теоретические значения критического давления приведены в табл. 2.

Таблица 2. Теоретические и экспериментальные значения критического номинального давления оксидных материалов с ТСН

Материал наполнителя	Толщина покрытия, мм	Микротвердость, ГПа	Теоретический расчет, МПа	Экспериментальное значение, МПа
MoS ₂	0,1...0,3	10...12	2,51	2,9
Графит	0,1...0,25	9...11	2,61	2,75
Магнетит	0,1...0,2	11...13	3,82	4,2

Тот факт, что полученные теоретически значения критического номинального давления ниже экспериментальных данных, можно пояснить следующим образом. При номинальной нагрузке, соответствующей расчетному значению, в реальном контакте среднее упругое давление, равное HV, возникает на единичных, более высоких микронеровностях. Катастрофическое разрушение контактирующих поверхностей происходит при увеличении давления в 1,05...1,4 раза выше критического. В табл. 2 также показано, что наполнитель магнетит не только обладает антифрикционными свойствами, но и увеличивает прочностные свойства композиционного материала в целом.

Расчет по предложенной формуле поможет уточнить диапазон рабочих давлений узла трения с композиционными оксидными ТСН-покрытиями. Расчетные значения удовлетворительно коррелируют с экспериментальными результатами, погрешность не превышает 14 %.

Прогнозируемая область применения полученных материалов предполагает длительную эксплуатацию при отсутствии технического обслуживания. В связи с этим важно оценить сохранение триботехнических свойств материалов в течение длительного времени t . Результаты испытаний (рис. 5) показали, что за 90 часов непрерывной работы коэффициент трения композиционных покрытий с ТСН дисульфидом молибдена увеличивается в 1,4 раза, с графитом – в 1,25 раза, магнетитом – в 1,2 раза. Коэффициент трения покрытия без наполнителя существенно не изменяется в течение всего периода испытаний. Незначительное изменение коэффициента трения в течение длительного периода эксплуатации подтверждает возможность использования этих материалов для узлов трения, эксплуатируемых при отсутствии жидкой смазки. Можно отметить, что многие узлы трения космических аппаратов, сложные измерительные приборы не предполагают постоянного активного использования, т.е. они работают непродолжительное время с длительными периодами простоя. Разработанные антифрикционные материалы больше всего подходят для таких узлов трения.

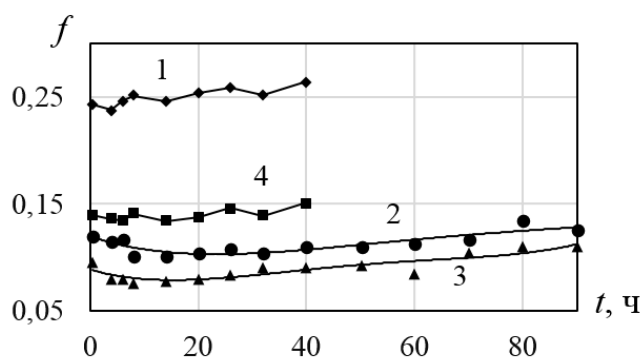


Рис. 5. Реологические изменения коэффициента трения композиционных антифрикционных керамических покрытий.

Твердые смазочные наполнители: 1 – без наполнителя; 2 – графит; 3 – дисульфид молибдена; 4 – магнетит

Были проведены испытания триботехнических характеристик композиционных керамических материалов с ТСН на основе различной температуры в зоне контакта. Максимальная рабочая температура составила 450 °С. Наиболее значимые фрикционные характеристики – коэффициент трения и скорость износа – изменялись под влиянием температуры для покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, и практически не изменялись для покрытий с графитовым наполнителем и традиционных (без наполнителя).

Покрытия с антифрикционным дисперсным наполнителем MoS_2 обладают более высокими триботехническими характеристиками при температурах до 150 °С. В диапазоне температур от 200 до 450 °С наилучшие свойства проявляют покрытия с частицами графита. Этот результат объясняется более низкой структурной стабильностью частиц молибдена по сравнению с графитовыми при активирующем воздействии более высоких температур. Помимо снижения антифрикционных свойств из-за окисления частиц молибдена, сказывается их более высокая концентрация (25 об.%) в сравнении с графитовыми (около 20 об.%) в керамической матрице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены триботехнические испытания композиционных материалов с антифрикционными наполнителями из микродисперсного дисульфида молибдена, графита и нанодисперсного магнетита. Установлены оптимальные концентрации дисперсных частиц в электролите: для магнетита – не более 20 г/л, графита – не более 40 г/л; дисульфида молибдена – 45 г/л. В этих условиях обеспечиваются минимальные значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при сохранении высоких прочностных свойств материалов. Наилучшими триботехническими свойствами обладает покрытие, модифицированное частицами дисульфида молибдена. Коэффициент трения покрытий с MoS₂ в 1,3 раза ниже, чем у покрытий с Fe₃O₄, и в 1,15 раза ниже, чем у покрытий с графитом. Коэффициент трения основного покрытия без антифрикционных наполнителей в 1,7...3 раза выше покрытий с ТСН.

Теоретически и экспериментально найден диапазон давлений, при которых полученные антифрикционные покрытия эксплуатируются в условиях упругого контакта и усталостного разрушения. Предложено расчетное соотношение для оценки перехода от стабильной работы трибосопряжения к его катастрофическому изнашиванию.

Экспериментально установлено, что коэффициент трения полученных материалов меняется незначительно в процессе длительных испытаний. Морфологический анализ показал, что частицы наполнителя переносятся на взаимодействующие поверхности трения, образуя антифрикционный слой с низким сопротивлением сдвигу.

Полученные покрытия можно использовать в узлах трения, эксплуатирующихся длительное время в условиях отсутствия смазочного материала и технического обслуживания. В частности, речь идет о технике в отраслях космического машиностроения и прецизионного приборостроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang Q., Shi X., Xue Y., Zhang K., Wu C. Recent Progress on Surface Texturing and Solid Lubricants in Tribology: Designs, Properties, and Mechanisms // *Materials Today Communications*. 2023. V. 35. P. 105854.
2. Yin J., Yan H., Cai M., Song S., Fan X., Zhu M. Bonded Flake MoS₂ Solid Lubricant Coating: An Effective Protection against Fretting Wear // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2023. № 117. P. 450–460.
3. Hudec T., Mikula M., Satrapinsky L., Roch T. Structure, Mechanical and Tribological Properties of Mo-S-N Solid Lubricant Coatings // *Applied Surface Science*. 2019. № 486. P. 1–14.
4. Ouyang J.H., Li Y.F., Zhang Y.Z., Wang Y.M., Wang Y.J. High-temperature Solid Lubricants and Self-lubricating Composites: a Critical Review // *Lubricants*. 2022. V. 10. № 8. P. 177.
5. Sarkar M., Mandal N. Solid Lubricant Materials for High Temperature Application: a Review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. № 66. P. 3762–3768.
6. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
7. Dodun O., Nagiț G., Hrițuc A., Slatineanu L. Optimization of Friction Behavior Characteristics by Coating with Solid Lubricants // *Machines*. 2019. V. 7. № 1. P. 17.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (21), 2024*

9. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.
10. Hrenechen J.M., Duarte C. de A., Filho N.P.M., Ribeiro E. Electrical and Optical Properties of Silicone Oil/Carbon Nanotube Nanocomposites // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2021. V. 21. № 4. P. 2185–2195.
11. Khoperia T., Zedginidze T. Electroless Metallization of Nano-sized Particles, Composites Fabrication // *ECS Transactions*. 2008. № 13. P. 95–109.
12. Ramazanov M.A., Maharramov A.M., Ali-zada R.A., Shirinova H.A., Hajiyeva F.V. Theoretical and Experimental Investigation of the Magnetic Properties of Polyvinylidene Fluoride and Magnetite Nanoparticles-based Nanocomposites // *Journal of Theoretical and Applied Physics*. 2018. № 12. P. 7–13.
13. Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ. 2013. 522 с.
14. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных смазочных сред. Часть 3 // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 66–70.
15. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge etc., Cambridge University Press. V. XII. 1985. 452 p.
16. Tabor D., Bowden F.P. The Friction and Lubrication of Solids. Repr. Oxford: Clarendon press. V. XVIII. 1986. 374 p.
17. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука. 2012. 319 с.
18. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение. 1981. 244 с.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние дисперсных наполнителей на фрикционные свойства керамических покрытий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 26–36.

INFLUENCE OF DISPENS FILLERS ON FRICTIONAL PROPERTIES OF CERAMIC COATINGS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vnvkv@yandex.ru

Tribotechnical characteristics of an innovative material representing a composite coating with a matrix of aluminium oxide and fillers of nanodispersed magnetite and microdispersed molybdenum disulphide and graphite have been studied. It is established that the minimum values of friction coefficient and wear intensity while maintaining high strength properties of materials are achieved at the concentration of dispersed particles in the electrolyte: for magnetite – not more than 20 g/l; graphite – not more than 40 g/l; molybdenum disulphide – 45 g/l. It is emphasised that the tests showed the stability of the friction coefficient of the investigated coatings during 90 hours. The influence of contact pressure on the intensity of linear wear has been studied. The criterion of transition from elastic

contact to plastic contact is proposed. On the basis of it the calculation relation for estimation of transition from stable operation of tribo-conjugation to its catastrophic wear is received.

Keywords: microarc oxidation, antifriction fillers, ceramic coating, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 30.11.2023; после рецензирования/revised: 12.12.2023;
принята/accepted: 15.12.2023

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОГО РЕЗА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

© Барчуков Д.А., 2024

Представлены результаты исследований микроструктуры, микротвердости, микрогеометрии поверхности лазерного реза наплавленной быстрорежущей стали марки Р9М4К8 после алмазного выглаживания. Показано, что шероховатость поверхности лазерного реза уменьшается в 3...4 раза, что позволяет получать рабочую поверхность без последующего механического шлифования. Отмечено, что алмазное выглаживание приводит к измельчению микроструктуры, повышению микротвердости стали до $9\ 700 \pm 130$ МПа.

Ключевые слова: лазерная резка, сталь, алмазное выглаживание, шероховатость, микроструктура, микротвердость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-36-42

ВВЕДЕНИЕ

По масштабам применения лазерная резка занимает лидирующие позиции в мире, если сравнивать с другими видами лазерных технологий, благодаря своим преимуществам: возможности разделения широкого класса материалов независимо от их твердости и теплофизических характеристик; отсутствию механического воздействия на материал во время разделения; высокой производительности с возможностью автоматизации и контроля процесса, а также некоторым другим [1–6].

Основными показателями качества поверхности реза металлов являются точность, шероховатость, протяженность зоны термического влияния, ширина реза, количество грата [1]. Поверхность лазерного реза имеет специфическую бороздчатую структуру, и ее шероховатость зависит от тепловых характеристик лазерного излучения, параметров струи газа, погрешности устройства перемещения [1–4]. Снижение шероховатости поверхности реза является важной задачей, так как значения параметров шероховатости оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства функциональных поверхностей деталей и инструментов, например на интенсивность износа, несущую способность, контактные деформации и контактную жесткость, скорость коррозии поверхностного слоя и некоторые другие [5, 6]. Наименьшие параметры шероховатости поверхности достигаются при резке на