

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.3:621.762
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81



ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ MoS₂

Щербаков И.Н.¹, Гасанов Б.Г.²

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), Новочеркасск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Обоснована целесообразность создания двухслойных композиционных антифрикционных модифицированных никель-фосфорных покрытий, полученных методом химического осаждения на образцы из конструкционных улучшаемых сталей. **Используемые методы.** В качестве модификатора выбран дисульфид молибдена, который можно вводить в матрицу покрытия как первого, так и второго слоя. Приведены технологические особенности осаждения никель-фосфорных покрытий, модифицированного MoS₂, на изделия из порошковых сталей П40 и П40Х и предложены схемы возможного распределения модификатора в покрытии. Для испытания адгезии никель-фосфорных покрытий использовали методы, которые применяют для антифрикционных покрытий на изделиях, изготовленных из сталей и сплавов, толщиной не более 3 мм. **Новизна.** Показаны кинетические особенности формирования структуры никель-фосфорных покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, и эффективность нанесения на них химическим осаждением второго слоя на основе фосфата алюминия и хрома. Установлено, что в раствор для химического осаждения необходимо вводить модификатор через 2–3 минуты после начала никелирования с целью повышения адгезии с основой. **Результаты.** Приведены результаты экспериментальных исследований для оценки адгезии никель-фосфорных покрытий, модифицированных MoS₂. Показана эффективность применения предложенного способа нанесения двухслойных композиционных покрытий на изделия из улучшаемых спеченных и горячештампованных порошковых сталей. **Практическая значимость.** На основе результатов экспериментальных исследований предложены технологические варианты получения композиционных покрытий с различным расположением модификатора, позволяющие повысить функциональные свойства конструкционных порошковых сталей, широко применяемых в машиностроении для изготовления деталей различной конфигурации.

Ключевые слова: композиционное покрытие, порошковая сталь, адгезия, модификатор, связующее, никель-фосфор, дисульфид молибдена, коррозионная стойкость, коэффициент трения.

© Щербаков И.Н., Гасанов Б.Г., 2022

Для цитирования

Щербаков И.Н., Гасанов Б.Г. Исследование адгезии антифрикционных композиционных двухслойных коррозионно-стойких никель-фосфорных покрытий, модифицированных MoS₂ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 73–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

RESEARCH ON THE ADHESION OF ANTIFRICTION COMPOSITE DOUBLE-LAYER CORROSION-RESISTANT NICKEL-PHOSPHOROUS COATINGS MODIFIED WITH MoS₂

Shcherbakov I.N.¹, Gasanov B.G.²

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Abstract. Relevance. The paper provides the rationale for creating double-layer composite antifriction modified nickel-phosphorus coatings produced by a chemical deposition on the samples from structural, heat-treatable steels. **Methods Applied.** Molybdenum disulfide was chosen as a modifier, which can be introduced into the coating matrix of both the first and second layers. The paper describes technological features of the deposition of MoS₂-modified nickel-phosphorus coatings on products made of P40 and P40Kh powder steels, and proposes schemes for a possible distribution of the modifier in the coating. To test the adhesion of nickel-phosphorus coatings, the authors used the methods applied for anti-friction coatings on products made of steels and alloys with a thickness of 3 mm or less. **Originality.** The paper shows the kinetic features of shaping the structure of nickel-phosphorus coatings modified with molybdenum disulfide and efficiency of applying a second layer based on aluminum and chromium phosphate onto them by chemical deposition. It has been established that the modifier should be introduced into the solution for chemical deposition 2–3 minutes after the start of nickel plating in order to increase adhesion to the base. **Results.** The experimental studies are presented to evaluate the adhesion of nickel-phosphorus coatings modified with MoS₂. The paper shows efficiency of the proposed method of applying double-layer composite coatings on products made of heat-treatable sintered and hot-stamped powder steels. **Practical Relevance.** Based on the experimental studies, the authors proposed technological options to produce composite coatings with different positions of the modifier, improving the functional properties of structural powder steels, widely used in mechanical engineering for manufacturing parts of various configurations.

Keywords: composite coating, powder steel, adhesion, modifier, binder, nickel-phosphorus, molybdenum disulfide, corrosion resistance, friction coefficient.

For citation

Shcherbakov I.N., Gasanov B.G. Research on the Adhesion of Antifriction Composite Double-Layer Corrosion-Resistant Nickel-Phosphorous Coatings Modified with MoS₂. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 73–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81>

Введение

Эксплуатационная надежность узлов трения зависит от химического состава и структуры материалов подвижных сопряжений, характеристик используемых смазочных материалов, условий работы машин и многих других факторов [1–3]. Поэтому существует большое количество технологических методов повышения износостойкости сталей, сплавов и композиционных материалов, применяемых для изготовления деталей узлов трения и уплотнения [4–6]. Перспективным направлением развития трибоматериаловедения является создание композиционных материалов на стальной подложке с никель-фосфорным покрытием (НФП), у которого матрицей является химически восстановленное соединение никеля и фосфора, а в качестве модификаторов применяют твердофазные частицы

различной химической природы [5–8]. Экспериментальные результаты исследования химически восстановленных НФП, проведенные авторами работ [9–15], показали, что большинство получаемых покрытий обладают относительно высоким коэффициентом трения, недостаточной коррозионной стойкостью и сравнительно небольшой адгезией с подложкой.

Несмотря на то, что исследованию технологии нанесения НФП уделяется большое внимание, мало работ посвящено созданию композитов с учетом прогнозируемых структурных состояний матрицы и модификаторов НФП, в том числе и при трении. Недостаточно изучены кинетические особенности фазовых превращений при трении, механизм перестройки структуры поверхностного слоя, модифицированного НФП. Кроме этого для химически восстановленных композиционных НФП необходимо проводить

всесторонние теоретические и практические исследования для оценки их адгезионной прочности при использовании в качестве подложки конструкционных порошковых сталей.

Целью работы является исследование кинетики структурообразования никель-фосфорных покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, при различных способах их нанесения на улучшаемые порошковые стали, широко применяемые для производства деталей машин сложной конфигурации.

Материалы и методы исследований

Поскольку конструкционные и инструментальные стали, полученные методами порошковой металлургии, отличаются относительно низкой стоимостью изготовления из них деталей различной конфигурации и возможностью варьирования химическим составом и физико-механическими свойствами, то для нанесения НФП использовали спеченные и горячештампованные порошковые углеродистые и легированные хромом улучшаемые конструкционные стали П40, П40Х (ГОСТ 28378-89) и из листовой стали 40Х. Пористость спеченных в диссоциированном аммиаке (1120°C, 2 ч) сталей из порошка ПЖРВ 2.200.28 варьировали в пределах 15–20%, а у полученных горячей штамповкой пористых заготовок она не превышала 2–3%.

Технология нанесения композиционного химически восстановленного покрытия включает следующие операции: подготовка поверхности детали к нанесению покрытия; приготовление рабочего раствора; нанесение покрытия на изделие; термическую обработку; контроль качества.

Состав раствора для получения химически осажденных покрытий, г/л: никель хлористый – 20–22, натрий уксусно-кислый – 10–15, гипофосфит натрия – 21–25, тиомочевина – 0,02, дисульфид молибдена – 5–6. Раствор готовили по следующей последовательности. В стеклянную емкость с нагретой до 50°C дистиллированной водой вводили расчетное количество соли никеля, добавок и модификатора. При температуре раствора 80°C добавляли необходимое количество гипофосфита натрия. Покрытие осаждали при температуре 90–92°C в течение 1 ч. В процессе нанесения НФП раствор перемешивали в магнитной мешалке со скоростью 30 об/мин. Толщина покрытия на образцах составляла 20–25 мкм. Термическую обработку (ТО) образцов с НФП проводили в лабораторной печи (SNOL,

производитель АВ UMEGA-GROUP) в интервале 350–450°C в течение одного часа. Первоначальный контроль качества НФП проводили визуально. Покрытия с вздутиями, порами, скоплениями конгломератов и с непокрытыми участками отбраковывались. Толщины НФП измеряли на приборе Константа К6 с преобразователем ИД0/90, погрешность измерения не превышала ± 1 мкм.

Адгезию первого слоя композиционных покрытий оценивали путем выборочных испытаний контрольных образцов в соответствии с ГОСТ 9.302-88. Для этого пластинки с НФП изгибали с помощью плоскогубцев под углом 90° в одну сторону, затем в другую до излома. Для оценки адгезии другую часть образцов с двухслойным покрытием испытывали на растяжение на разрывной машине ТМЭ-10 при скорости нагружения 2 мм/мин. Дополнительно адгезию второго слоя проверяли методом нанесения сетки царапин по ГОСТ 15140 – 78 по трехбальной системе.

Пористость покрытий определяли согласно ГОСТ 9.302-88 методом погружения образцов в раствор, содержащий 3 г/л $K_3[Fe(CN)_6]$ и 10 г/л NaCl на 5 мин, после чего подсчитывали количество пор, проявляющихся в виде окрашенных точек на поверхности образца. Среднее число пор вычисляли по формуле $N_{cp} = N_{общ} / S$, где $N_{общ}$ – общее число пор на контролируемой поверхности, S – площадь контролируемой поверхности, см².

Ускоренные коррозионные испытания проводили согласно ГОСТ 9.308-85 в 3%-м растворе NaCl при pH 3 в течение 510 ч. Испытаниям подвергались термообработанные образцы. Коррозионную стойкость оценивали по изменению массы путем взвешивания высушенных и очищенных от продуктов коррозии образцов на аналитических весах «ВЛР-200».

Триботехнические свойства определяли на торцевой машине трения, позволяющей при одновременном вращении со скоростью скольжения 0,048 м/с развивать удельные нагрузки на поверхность исследуемого материала до 300 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования показали, что во всех способах нанесения покрытия после осаждения имеют аморфную структуру и относительно легко отслаиваются при испытании на изгиб и растяжении. Предполагаемый характер распределения НФП, осажденных на пластинки из стали 40Х, схематично показан на **рис. 1**. При осаждении

НФП с добавкой в исходный раствор MoS_2 он достаточно равномерно распределяется в покрытии (рис. 1, б), имеет сравнительно низкую адгезионную прочность до термической обработки

(рис. 2, а), а на месте изгиба появляются трещины (табл. 1). В покрытии, нанесенного на сталь П40, в зоне изгиба обнаружены только микро-трещины.

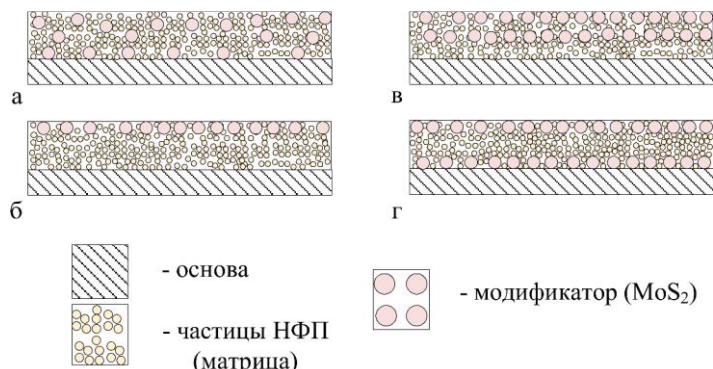


Рис. 1. Схемы формирования НФП + MoS_2 : а – после осаждения в растворе, содержащем MoS_2 ; б – после осаждения в двух растворах – без MoS_2 в течение 55 мин и в дальнейшем с MoS_2 в течение 5 мин; в – то же в течение 5 и 55 мин; г – после осаждения в начале и в конце в растворе с MoS_2 по 5 мин, а в растворе без MoS_2 50 мин

Fig. 1. Formation of Ni-P coatings modified with MoS_2 : а is after deposition in a solution containing MoS_2 ; б is after deposition in two solutions: without MoS_2 for 55 min and further with MoS_2 for 5 min; в is the same for 5 and 55 minutes; г is after deposition at the beginning and at the end in a solution with MoS_2 for 5 min, and in a solution without MoS_2 for 50 min

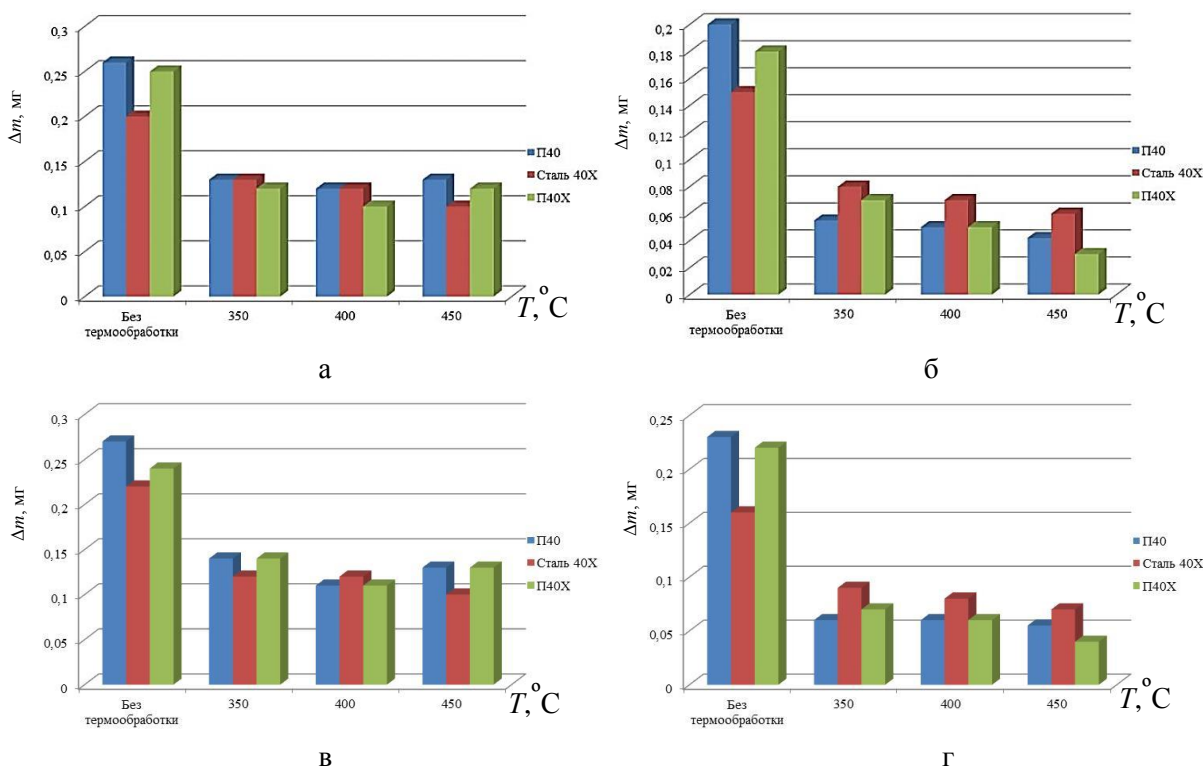


Рис. 2. Изменение массы образцов с НФП+ MoS_2 после испытания на разрывной машине образцов, полученных до и после термообработки: а – после осаждения в растворе, содержащем MoS_2 ; б – после осаждения в двух растворах – без MoS_2 в течение 55 мин и в дальнейшем с MoS_2 в течение 5 мин; в – то же в течение 5 и 55 мин; г – после осаждения в начале и в конце в растворе с MoS_2 по 5 мин, а в растворе без MoS_2 50 мин

Fig. 2. Change in the mass of the samples with Ni-P coatings modified with MoS_2 after tensile testing of the samples produced before heat treatment and after it: а is after deposition in a solution containing MoS_2 ; б is after deposition in two solutions: without MoS_2 for 55 min and further with MoS_2 for 5 min; в is the same for 5 and 55 minutes; г is after deposition at the beginning and at the end in a solution with MoS_2 for 5 min, and in a solution without MoS_2 for 50 min

Таблица 1. Результаты макроскопического анализа НФП до и после термообработки после изгиба образцов на 90°
Table 1. Macroscopic analysis of Ni-P coatings before and after heat treatment after bending the samples at 90°

Вид покрытия	Термообработка	Подложка	Состояние покрытия
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, а)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Трещины, следы отслаивания
	400°С		Сетка мелких трещин
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, б)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Отслаивание
	400°С		Не растрескивается
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, в)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Следы отслаивания
	400°С		Макротрещины не обнаружены
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, г)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Трещины, следы отслаивания
	400°С		Сетка мелких трещин

При осаждении MoS₂ на поверхность первоначально нанесенного слоя НФП, как это показано схематично на **рис. 1, в**, потери массы при испытании на растяжение заметно меньше до и после термообработки (**рис. 2, г**), по сравнению с образцами с никель-фосфорным покрытием без модификатора. В этом случае на месте изгиба образцов до и после термообработки макротрещины отсутствуют (см. **табл. 1**). В случае добавления дисульфида молибдена в раствор для дополнительного нанесения НФП, содержащего MoS₂, не удалось заметно повысить адгезию такого покрытия на поверхности порошковых сталей.

Из результатов испытания образцов с НФП, модифицированных MoS₂, приведенных на **рис. 2**, видно, что определенное влияние на адгезию НФП к поверхности порошковых сталей оказывает характер распределения MoS₂ в покрытии, способ его осаждения и температура термической обработки. Потеря массы у образцов, покрытие которых модифицировано дисульфидом молибдена по всему объему, несколько больше, чем у образцов, у которых MoS₂ содержится только в наружном слое (см. **рис. 2, а и б**). С увеличением температуры ТО с 350 до 450°С адгезионная прочность покрытия на образцах из сталей П40 и П40Х заметно возрастает в случае, когда MoS₂ содержится только в поверхностном слое НФП. Снижение адгезии НФП с поверхностью подложки при модифицировании MoS₂, по-видимому, можно объяснить блокировкой взаимной диффузии никеля и железа на межслойной границе дисульфидом молибдена при ТО.

Экспериментальные исследования показали, что изменение массы термообработанных образцов после испытания на разрывной машине в среднем на 100–120% меньше, чем у образцов НФП+MoS₂ без термообработки (см. **рис. 2**).

Наилучшие результаты по адгезии показали НФП+MoS₂, нанесенные на образцы из спечен-

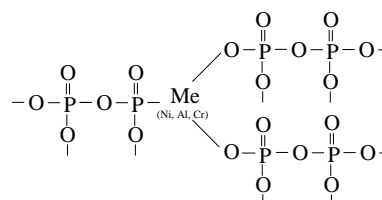
ных сталей П40 и П40Х с остаточной пористостью 15–17%. Это связано с тем, что спеченные в защитной среде образцы обладают более развитой поверхностью. Поэтому при ТО образцов с НФП преобладающую роль играет поверхностная гетеродиффузия и когезия покрытий с открытыми порами, соответственно, адгезионная прочность НФП с поверхностью пористых сталей существенно выше, чем у образцов, полученных горячей штамповкой и из проката стали 40Х.

Известно, что для повышения коррозионной стойкости, исключения появления оксидов никеля при термообработке и уменьшения пористости НФП целесообразно покрыть НФП слоем фосфата алюминия и хрома [16].

Общая формула фосфатного связующего для второго слоя Al₂O₃·Cr₂O₃·yP₂O₅·nH₂O при мольном соотношении можно показать в следующем виде:

$$\frac{Al_2O_3}{Cr_2O_3} = 2,76 \text{ и } \frac{P_2O_5}{Cr_2O_3 + Al_2O_3} = 2,46.$$

Ниже схематично показан принцип формирования химической связи первого и второго слоев композиционного НФП. Второй слой с фосфатной неорганической структурой, полученный за счет межмолекулярного выделения воды при нагреве образцов с покрытием, заполняет микрорельеф первого слоя НФП+MoS₂. Схема образования устойчивой фосфатной неорганической структуры:



После термообработки образцов с двухслойным покрытием формируется слоистая структура, которая схематично показана на **рис. 3**.

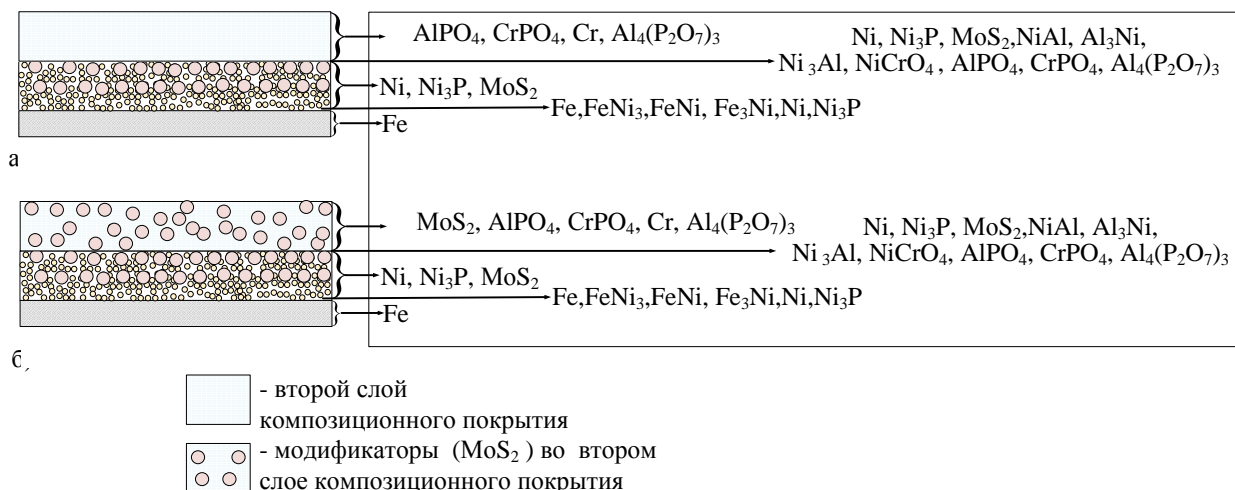


Рис. 3. Предполагаемый фазовый состав двухслойных покрытий после термообработки ($T=400^{\circ}\text{C}$): а – НФП+MoS₂+Ф; б – НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂)
 Fig. 3. Estimated phase composition of double-layer coatings after heat treatment ($T=400^{\circ}\text{C}$): а is Ni-P coatings modified with MoS₂+F; б is Ni-P coatings modified with MoS₂ + (F + MoS₂)

Нанесение второго слоя на НФП+MoS₂ и дополнительная термообработка полученного двухслойного покрытия позволяет создать на поверхности покрытия пленки оксида алюминия, так как при температуре 400–500°C на границе НФП+MoS₂ со вторым слоем образуют алюминиды [16]. Данные фазы обладают высокой твердостью и прочностью и должны повысить износостойкость НФП+MoS₂.

Кроме этого при ТО возможен процесс насыщения поверхности НФП+MoS₂ хромом, с образованием фазы NiCrO₄. Хромат никеля является хорошим ингибитором коррозии и оказывает пассивирующее действие на подложку [17]. Исследования показали, что на поверхности НФП+MoS₂ появляются микрослой устойчивого неорганического фосфатного дисульфида молибдена с полимерной матрицей.

В табл. 2 представлены результаты исследования на разрывной машине ТМЭ-10 адгезии двухслойных НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) после ТО при 400–410°C в течение 40–45 мин. Толщина второго слоя покрытия составляла 10–12 мкм.

Масса отслоившегося покрытия НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) у образцов с подложкой из горячештампованной стали П40Х и листовой стали 40Х практически одинакова, но масса отслоившихся покрытий меньше на образцах из спеченных порошковых сталей П40 и П40Х с остаточной пористостью 15–17%.

Результаты измерения адгезии второго слоя по методу параллельных надрезов и визуальной

оценке состояния покрытия по трехбалльной системе показал, что все исследуемые покрытия (НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂)) на подложках из спеченных сталей П40, П40Х и катанной 40Х соответствуют баллу - 2.

Таблица 2. Результаты исследований адгезии, проводимых на разрывной машине ТМЭ-10
 T a b l e 2. Studies on adhesion carried out on tensile testing machine TME-10

Материал подложки	Вид покрытия	Потеря массы Δm, мг
П40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	11
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	18
Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	13
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	22
П40	НФП+MoS ₂ +Ф	12
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	2

Защитные свойства покрытий определяются как собственной химической стойкостью осаждаемого покрытия, так и особенностями его строения, а именно наличием трещин, пор, других дефектов, нарушающих сплошность покрытия.

В связи с этим были проведены исследования по определению пористости НФП различного состава. Для этого бумагу накладывали таким образом, чтобы между поверхностью детали и бумагой не оставалось пузырьков воздуха. После снятия бумагу (через пять минут) с отпечатками пор в виде точек или пятен промывали струей дистиллированной воды и просушивали на чистом стекле. Подсчет числа пор производился следующим образом: на высушенную фильтро-

вальную бумагу с отпечатками пор накладывали стекло, на котором нанесена сетка с квадратами, равными 1 см^2 . Число пор подсчитывали в каждом квадрате и определяли среднее значение. В **табл. 3** указаны результаты подсчета числа пор на поверхности НФП.

Таблица 3. Результаты подсчета числа пор НФП
Table 3. Calculated number of pores of Ni-P coatings

Материал подложки	Вид покрытия	Количество пор, шт.
П40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,5-1,2
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,9-1,3
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
П40	НФП+MoS ₂ +Ф	0,2-1,1
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
	НФП+MoS ₂ +Ф	
П40Х, сталь 40Х, П40	НФП	5-7

Как видно из данных, приведенных в **табл. 3**, НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) имеют в среднем не более 1,3 поры, что предопределяет низкую пористость поверхностей антифрикционных композиционных двухслойных НФП, модифицированных MoS₂.

Оценка коррозионной стойкости по потере массы показала, что двухслойные покрытия НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) в три раза эффективнее по отношению к НФП и в 1,5 раза по отношению к НФП+MoS₂+Ф. Было установлено, что материал подложки не влияет на коррозионную стойкость покрытий. Нанесение второго слоя на НФП+MoS₂ и дополнительной термообработки полученного двухслойного покрытия позволяет также снизить коэффициент трения, особенно в режиме сухого трения (**табл. 4**).

Таблица 4. Результаты измерения коэффициента трения
Table 4. Friction coefficient measurement results

Материал подложки	Вид покрытия	Коэффициент трения
П40Х, П40, Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,12
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	0,08

Композиционные двухслойные НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂), наносимые на поверхности порошковых сталей, обладают более повышенными адгезионными, коррозионными и антифрикционными свойствами, по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной технологии осаждения НФП.

Заключение

Проведённые исследования показали, что на адгезию никель-фосфорных покрытий влияет материал подложки и способ его осаждения. Обосновано, что адгезия покрытий зависит в основном от природы поверхности, способа введения модификатора в раствор для химического осаждения и химического состава покрытий. Нанесение второго слоя на НФП способствует повышению его коррозионной стойкости и триботехнических свойств.

Потеря массы у образцов, покрытие которых модифицирован дисульфидом молибдена по всему объему, значительно больше, чем у образцов, у которых MoS₂ содержится только в наружном слое. С увеличением температуры термической обработки с 350 до 450°C адгезионная прочность покрытия на образцах из спеченных сталей П40 и П40Х заметно возрастает в случае, когда MoS₂ содержится только в поверхностном слое НФП, что объясняется блокировкой взаимной диффузии никеля и железа на межслойной границе дисульфидом молибдена.

Выявлено, что в случае нанесения второго слоя на НФП+MoS₂ и после ТО полученного двухслойного покрытия на поверхности изделий на границе НФП+MoS₂ со вторым слоем формируются пленки алюминидов и создаются условия насыщения поверхности НФП+MoS₂ хромом с образованием фазы NiCrO₄, который является хорошим ингибитором коррозии и оказывает пассивирующее действие на подложку и повышает коррозионную стойкость и триботехнические свойства модифицированных MoS₂ НФП, нанесенных на изделия из порошковых конструкционных сталей.

Список литературы

1. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2021. 236 с.
2. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
3. Композиционные материалы: справочник / Л.Р. Вишняков, Т.В. Грудина, В.Х. Кадыров [и др.]; под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
4. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Композиционные материалы: учеб. пособие для вузов; под ред. А.А. Ильина. Москва: Изд-во Юрайт, 2021. 253 с.
5. Получение наноструктурных топокомпозитных покрытий на основе каскадного перекрестного эффекта / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Орлов П.В., Вер-

- шинин Г.А., Тарасов Е.Е., Иванова Е.В. // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, №2. С. 171–177.
6. Кинетика формирования диэлектрического покрытия на порошки железа для получения композиционных магнитно-мягких материалов / Гасанов Б.Г., Тамадаев В.Г., Богачев В.О., Махмудова Е.Р. // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. №4. С. 44–54. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-44-54.
 7. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystallochemistry of composition antifriction coatings ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021.
 8. Ivanov V.V., Popov S.I., Selemeneva E.M., Babazhanov N.T. Study of technological characteristics of the process of formation of vibration mechanochemical oxide coating // XV International scientific-technical conference «Dynamics of technical systems» (DTS-2019): AIP Conference Proceedings, 2019. Vol. 2188, pp. 020015, doi.org/10.1063/1.5138389 (Rostov-on-Don, Russia, 11–13 September 2019).
 9. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050(1). 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012037.
 10. Gennady I. Shulga, Alex O. Kolesnichenko, Paul V. Sirotin, Ilya Yu. Lebedyn's'kyi, Eugene V. Skrynnikov and Maxim A. Vasilyev 01028. Published online: 07 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601028>
 11. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystallochemistry of composition antifriction coatings ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021
 12. Shcherbakov I.N. Composite antifriction coating modified with copper complex and fluoropolymer. Dynamics of Technical Systems (DTS 2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1029 (2021), 012028, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012028
 13. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.
 14. Сайфулин Р.С. Композиционные покрытия и материалы. М.: Химия, 1977. 272 с.
 15. Пат. 24555391 Российская Федерация, МПК С23С 28/00, С23С 18/36. Способ получения композиционного антифрикционного покрытия на изделии из стали / Трофимов Г.Е., Щербачков И.Н., Шевченко М.Ю., Логинов В.Т., Дерлугян П.Д., Дерлугян Ф.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Особое конструкторско-технологическое бюро "ОРИОН"». №2011100572/02; заявл. 11.01.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.
 16. Синельникова В.С., Подергин В.А., Речкин В.Н. Алюминиды. Киев: Наукова думка, 1965. 242 с.
 17. Глинка Н.Л. Общая химия. М.: КноРус, 2019. 360 с.

References

1. Khopin P.N., Shishkin S.V. *Tribologiya: uchebnik dlya vuzov* [Tribology: textbook for universities]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2021, 236 p. (In Russ.)
2. Frolov K.V. *Metody sovershenstvovaniya mashin i sovremennye problemy mashinovedeniya* [Methods for improving machines and modern problems of mechanical engineering]. Moscow: Mechanical Engineering, 1984, 224 p. (In Russ.)
3. Vishnyakov L.R., Grudina T.V., Kadyrov V.Kh. et al. Ed. by Karpinos D.M. *Kompozitsionnye materialy: spravochnik* [Composite materials: reference book]. Kyiv: Naukova dumka, 1985, 592 p. (In Russ.)
4. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. Ed. by Ilina A.A. *Kompozitsionnye materialy: ucheb. posobie dlya vuzov* [Composite materials: study guide for universities]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2021, 253 p. (In Russ.)
5. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Producing nanostructured topocomposite coatings by cascade cross effect. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines], 2018, vol. 6, no. 2, pp. 171–177. (In Russ.)
6. Gasanov B.G., Tamadaev V.G., Bogachev V.O., Makhmudova E.R. Kinetics of the dielectric coating formation on iron powders to produce soft magnetic composite materials. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Proceedings of Universities. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2019, no. 4, pp. 44–54. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-44-54
7. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystallochemistry of composition antifriction coatings. ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021)
8. Ivanov V.V., Popov S.I., Selemeneva E.M., Babazhanov N.T. Study of technological characteristics of the process of formation of vibration mechanochemical oxide coating. The 15th International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Technical Systems” (DTS-2019): AIP Conference Proceedings, vol. 2188, pp. 020015, 2019. doi.org/10.1063/1.5138389 (Rostov-on-Don, Russia, 11–13 September 2019).
9. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050(1), 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012037

10. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Sirotn P.V., Lebedinsky I.Yu., Skrynnikov E.V., Vasilyev M.A. Optimization of technology for production of products of deep drawing sheet steels with the use of lubricants in universal software system ANSYS Workbench. Published online on 07 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822601028>.
11. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystalchemistry of composition antifriction coatings. ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021
12. Shcherbakov I.N. Composite antifriction coating modified with copper complex and fluoropolymer. Dynamics of Technical Systems (DTS 2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1029 (2021), 012028, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012028
13. Kostetsky B.I., Natanson M.E., Bershadsky L.I. *Mekhanokhìmicheskie protsessy pri granichnom trenii* [Mechanochemical processes with boundary friction]. Moscow: Science, 1972, 170 p. (In Russ.)
14. Sayfulin R.S. *Kompozitsionnye pokrytiya i materialy* [Composite coatings and materials]. Moscow: Chemistry, 1977, 272 p. (In Russ.)
15. Trofimov G.E., Shcherbakov I.N., Shevchenko M.Yu., Loginov V.T., Derlugyan P.D., Derlugyan F.P. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo antifriktsionnogo pokrytiya na izdelii iz stali* [A method of producing a composite anti-friction coating on a steel product]. Patent RU, no. 24555391, 2012.
16. Sinelnikova V.S., Podergin V.A., Rechkin V.N. *Aluminidy* [Aluminides]. Kyiv: Naukova dumka, 1965. 242 p. (In Russ.)
17. Glinka N.L. *Obshchaya khimiya* [General chemistry]. Moscow: KnoRus, 2019, 360 p. (In Russ.)

Поступила 04.02.2022; принята к публикации 29.03.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 04/02/2022; revised 29/03/2022; published 28/06/2022

Щербаков Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия.
Email: bdd-don@mail.ru. ORCID 0000-0002-3129-078X

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), Новочеркасск, Россия.
Email: gasanov.bg@gmail.com

Igor N. Shcherbakov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.
Email: bdd-don@mail.ru. ORCID 0000-0002-3129-078X

Badrudin G. Gasanov – DrSc (Eng.), Professor,
South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.
Email: gasanov.bg@gmail.com