

ХИМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ni-P**Е.Г. Винокуров, В.В. Фарафонов, В.Д. Скопинцев, Л.Н. Марголин, Х.А. Невмятулина**

Евгений Геннадьевич Винокуров (ORCID 0000-0002-5376-0586)*

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047

Всероссийский институт научной и технической информации РАН, ул. Усиевича, 20, Москва, Российская Федерация, 125190

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, Ленинский пр-т., 31, к.4, Москва, Российская Федерация, 119071

E-mail: vin-62@mail.ru*, vinokurov.e.g@muctr.ru

Владимир Дмитриевич Скопинцев (ORCID 0009-0000-7198-7621)

Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова, Долгоруковская ул., 4, Москва, Российская Федерация, 127006

E-mail: scopintsev@yandex.ru

Лев Нисонович Марголин (ORCID 0009-0002-0403-864X), Владимир Викторович Фарафонов (ORCID 0009-0007-2792-9951)

Всероссийский институт научной и технической информации РАН, ул. Усиевича, 20, Москва, Российская Федерация, 125190

E-mail: margolinln@mail.ru, vvf-46@mail.ru

Хадия Абдрахмановна Невмятулина (ORCID 0000-0002-5519-467X)

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047

Всероссийский институт научной и технической информации РАН, ул. Усиевича, 20, Москва, Российская Федерация, 125190

E-mail: knevm@mail.ru

Среди покрытий, применяемых для обеспечения эксплуатационных и защитных свойств изделий, особое место занимают покрытия металлами, сплавами и металломатричными композитами на их основе, которые получают электроосаждением или автокаталитическим (химическим) восстановлением. Оба вида покрытий представляют собой сложные системы, в которых природа и соотношение компонентов играют определяющую роль. За 80 лет, прошедших после первой публикации, научный и практический интерес к химическим покрытиям остается стабильно высоким. Много работ посвящено влиянию дисперсной фазы на характеристики композиционных покрытий. Однако, вне внимания исследователей остается большое число возможных сочетаний дисперсных фаз для придания покрытию заданных свойств. Ранее был опубликован обзор по композиционным гальваническим покрытиям, в котором использована специально сформированная проблемно-ориентированная база данных. Учитывая интерес к предложенной системе подачи информации, разработанную технологию распространили на анализ публикаций по химическим покрытиям на основе доступных баз данных за период 2015-2023 гг. В качестве матрицы выбрана Ni-P, а дисперсные фазы разделены по классам (оксиды, нитриды, карбиды, полимеры и т.д.). Обзор

охватывает 247 научных статей. Результаты анализа представлены в виде 8 таблиц с соответствующими ссылками. Как и в случае гальванических покрытий показано, что описана незначительная часть возможных сочетаний в системе матрица-дисперсная фаза. Представленный материал может использоваться не только как справочный, но и как база для поиска новых направлений исследований и инновационных подходов в разработке данного класса покрытий, в том числе с использованием методов машинного обучения.

Ключевые слова: покрытия композиционные, покрытия химические, металломатричные композиты, дисперсная фаза, база данных, ретроспективный анализ

CHEMICAL COMPOSITE COATINGS BASED ON Ni-P ALLOY

E.G. Vinokurov, V.V. Farafonov, V.D. Skopintsev, L.N. Margolin, Kh.A. Nevmyatullina

Evgeny G. Vinokurov (ORCID 0000-0002-5376-0586)*

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya pl., 9, Moscow, 125047, Russia
All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, RAS, Usievicha st., 20, Moscow, 125190, Russia
A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, Leninsky ave., 31, bld. 4, Moscow, 119071, Russia

E-mail: vin-62@mail.ru*, vinokurov.e.g@muctr.ru

Vladimir D. Skopintsev (ORCID 0009-0000-7198-7621)

A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Dolgorukovskaya st., bld.4, Moscow, 127006, Russia

E-mail: scopintsev@yandex.ru

Lev N. Margolin (ORCID 0009-0002-0403-864X), Vladimir V. Farafonov (ORCID 0009-0007-2792-9951)

All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, RAS, Usievicha st., 20, Moscow, 125190, Russia

E-mail: margolinln@mail.ru, vvf-46@mail.ru

Khadiya A. Nevmyatullina

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya pl., 9, Moscow, 125047, Russia
All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, RAS, Usievicha st., 20, Moscow, 125190, Russia

E-mail: knevm@mail.ru

Among the coatings used to ensure the operational and protective properties of products, a special place is occupied by coatings with metals, alloys and metal matrix composites based on them, which are obtained by electrodeposition or autocatalytic (chemical) reduction. Both types of coatings are complex systems in which the nature and the ratio of components play a decisive role. In the 80 years since the first publication, scientific and practical interest in chemical coatings has remained consistently high. Many works are devoted to the influence of the dispersed phase on the characteristics of composite coatings. However, a large number of possible combinations of dispersed phases to give the coating the desired properties remain outside the attention of researchers. Earlier, a review on composite electroplating coatings was published, in which a specially formed problem-oriented database was used. Taking into account the interest in the proposed information submission system, the developed technology was extended to the analysis of publications on electroless coatings based on available databases for the period 2015-2023. Ni-P is chosen as the matrix, and the dispersed phases are divided into classes (oxides, nitrides, carbides, polymers, etc.). The review covers 247 scientific articles. The results of the analysis are presented in the form of 8 tables with corresponding links. As in the case of electroplating coatings, it is shown that an insignificant part of the possible combinations in the matrix-dispersed phase system is described. The presented material can be used not only as a reference, but also as a basis for finding new research directions and innovative approaches in the development of this class of coatings, including using machine learning methods.

Key words: composite coatings, electroless coatings, metal matrix composites, dispersed phase, database, retrospective analysis

Для цитирования:

Винокуров Е.Г., Фарафонов В.В., Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Невмятулина Х.А. Химические композиционные покрытия на основе сплава Ni-P. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7026.

For citation:

Vinokurov E.G., Farafonov V.V., Skopintsev V.D., Margolin L.N., Nevmyatullina Kh.A. Chemical composite coatings based on Ni-P alloy. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 9. P. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7026.

Ежегодные глобальные затраты, связанные с коррозией, составляют 2,5 триллиона долларов, что эквивалентно примерно 3,4% мирового валового внутреннего продукта. Внедрение передовых методов защиты от коррозии позволит сэкономить до 15-35% этих затрат.

Одним из наиболее востребованных способов для решения этих проблем является формирование на поверхности металлических изделий неорганических защитных покрытий, включающих в свой состав металлы, оксиды, карбиды, нитриды и т.п. Известны и широко используются в промышленных масштабах такие методы, как электроосаждение (гальванические покрытия), химическое восстановление (автокаталитические или химические покрытия), плазменно-термическое напыление, химическая конверсия (конверсионные покрытия), газотермическое распыление (физическое и химическое осаждение из паровой и газовой фазы), ионная имплантация, микродуговое оксидирование, поверхностное лазерное легирование. Несмотря на различия в природе механизмов образования защитное действие покрытий основано на создании барьера на пути коррозионно-активных субстанций к металлическим подложкам.

Среди приведенных выше материалов особое место принадлежит покрытиям металлами, сплавами и металломатричными композитами на их основе, которые получают электроосаждением и химическим восстановлением. Оба метода обладают рядом преимуществ. Покрытия наносятся из растворов при минимальном расходе энергии. Гальванические покрытия образуются путем восстановления ионов металла на катоде под действием электрического тока. Химические никелевые покрытия наносятся автокаталитическим методом в присутствии восстановителя. Существенно, что оба метода позволяют регулировать толщину защитного слоя (получать покрытия заданной толщины). Преимуществом химического покрытия является возможность наносить равномерные слои на изделия сложной формы.

В 2020 г. опубликован обзор [1] по исследованным комбинациям металлических и дисперсных фаз в композиционных покрытиях, получаемых электроосаждением. С использованием технологии формирования проблемно-ориентированных баз был проведен анализ информационного массива ВИНТИ РАН, который показал, что изучено не более 15-20% возможных сочетаний металл-дисперсная фаза, поэтому сохраняется широкая перспектива для поиска новых защитных материалов, возможно, с нестандартными эксплуатационными характеристиками.

Учитывая интерес к предложенной системе подачи информации, авторы посчитали полезным распространить эту методику на анализ публикаций по химическим покрытиям за 2015-2023 гг. с использованием баз данных Scopus и ВИНТИ РАН.

Бестоковые (химические) покрытия на основе никеля впервые запатентованы в 1946 г. [2], и почти за восемь десятилетий уровень научного интереса к ним не снижается. Хотя экспоненциальный рост числа публикаций (характерный наукометрический показатель для «модных» направлений исследований) отсутствует, ежегодно более 5% публикаций по металлическим покрытиям относятся к химическим покрытиям. В данном конкретном случае это может быть связано с отсутствием разрыва по времени между исследованиями и практическим применением описываемых объектов. Сложилась довольно редкая ситуация, когда предложенный технологически простой и мало затратный процесс создал продукт, удовлетворяющий требованиям широкого круга потребителей – Ni-P-покрытие.

На данный момент никель-фосфорные покрытия, осажденные автокаталитически из растворов, содержащих гипофосфит в качестве восстановителя, занимают до 95% всех применяемых в промышленности химических покрытий. На рисунке представлены данные о применении покрытий в различных отраслях промышленности [3].

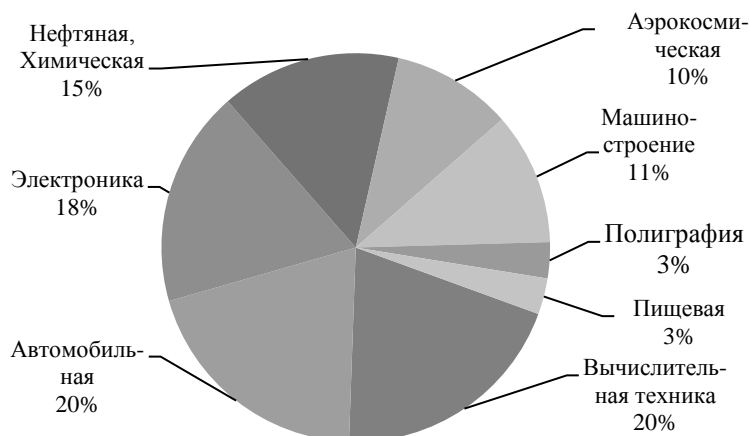


Рис. Применение химических покрытий в промышленности [3]
Fig. Application of electroless coatings in industry [3]

В течение десятилетий испытано и описано большое количество составов для нанесения никелевых пленок, но в промышленности предпочтение отдается гипофосфитному раствору, как наиболее экономичному и обеспечивающему наилучшую коррозионную защиту изделий по сравнению с растворами, содержащими бораны, гидразин и другие восстановители.

Следующий этап исследований характеризовался смещением научного интереса с поиска и описания новых систем в сторону изучения связи состава и структуры покрытий с их эксплуатационными характеристиками (свойствами). Успехам поисковых работ в этом направлении посвящены несколько больших обзоров [3, 4]. Результатом интенсивных исследований этого периода стало установление строгой связи между содержанием фосфора и уровнем некоторых эксплуатационных характеристик. Так, например, при низкой концентрации фосфора (1-4%) получали покрытия с высоким значением твердости. Высокой коррозионной стойкостью обладали покрытия с содержанием фосфора выше 10,5%. В интервале от 4 до 10% возможно создание оптимальных или заданных соотношений нескольких характеристик, в т.ч. износостойкости, высокотемпературного поведения, механических свойств и др.

Первые упоминания о химических покрытиях, как полноценной альтернативе гальваническим, встречаются в работе Gutzeit G. [5]. Ученый обобщил накопленный десятилетний экспериментальный опыт, существенно расширил спектр используемых для восстановления растворов и, главное, добился их стабильности и контролируемости процесса осаждения.

В дальнейшем основное внимание было уделено поискам способов улучшения отдельных

характеристик, для чего стали использовать дополнительные методы обработки поверхности, как до нанесения покрытий, так и после него. Однако эффект в большинстве случаев достигался за счет повышенных энергетических затрат или неэкологических процедур, что резко снижало очевидные преимущества химического (бестокового) метода защиты металлов. На сегодняшний день число работ в этом направлении уменьшилось, и акцент сместился в сторону более перспективного метода регулирования свойств покрытий – разработки металломатричных композиционных покрытий (ММКП), в первую очередь, с матрицей Ni-P.

В 1966 г. в патенте США было впервые зафиксировано создание композита никель-фосфор-оксид хрома [6]. Позднее появились сообщения об использовании в качестве второй фазы полимеров оксида алюминия и карбида кремния. Несмотря на недостатки структуры и неравномерность распределения второй фазы из-за агломерации дисперсных частиц, интенсивные поиски новых легирующих добавок продолжались до 80-х годов [7], когда появилась возможность использовать дисперсии субмикронных и наноразмерных частиц, а различными активными органическими добавками ингибировать процессы нежелательной агломерации. Также, как и в случае исходного никель-фосфорного сплава, в это время было осуществлено первое коммерческое использование композиционных химических покрытий, содержащих SiC, алмаз и политетрафторэтилен. Этот период можно считать началом в разработке нового поколения композиционных покрытий, которые содержат в своей структуре не только дисперсные фазы оксидов, карбидов, полимеров, но и металлы, такие, как свинец, кадмий, таллий и др., вводимые в различной форме в раствор.

С конца 80 гг. научные исследования этого типа химических покрытий стали одним из приоритетных направлений с хорошей перспективой практического применения.

Для эффективного улучшения характеристик покрытий в раствор для химического восстановления и осаждения вводили дисперсные фазы (ДФ) разной природы. Большинство обзоров за последнее десятилетие посвящено анализу отдельных теоретических и практических аспектов в исследовании композиций [4, 8]. Быстрое практическое применение новых покрытий определило главную цель большинства работ в указанный период – установление связи структуры, регулируемой условиями осаждения, со свойствами конечного продукта. Однако, несмотря на расширение в последнее время данных по влиянию состава электролита, размера и концентрации микро- или наночастиц на характеристики осажденного слоя, механизм их действия остается неясным. Как отмечено в [9], это является следствием большого числа противоречивых экспериментальных данных, что, в свою очередь, обусловлено отсутствием четких протоколов проведения экспериментов и анализа свойств. На этот вывод, связанный с отсутствием единой базы для сравнения, хотелось бы обратить особое внимание, т. к. в последние годы он все чаще появляется в обзорах, касающихся различных многокомпонентных металлических систем, где проводится сравнение свойств большого числа объектов (например, обзор по высокоэнтропийным сплавам [11]).

При анализе публикаций, использованных в настоящем обзоре, и сопоставлении их с дан-

ными, опубликованными в [1], нам показался достойным внимания факт схожести в подходах к разработке гальванических и химических покрытий, которые, в первую очередь, касаются выбора дисперсной фазы как определяющей составной части композиций. Накопленный опыт использования ДФ в гальванике расширяет спектр применяемых добавок для создания покрытий с прогнозируемыми свойствами.

В табл. 1 приведены статистические данные о количестве публикаций в период 2012-2020 гг. для композиционных гальванических никелевых покрытий (КГП), и в период 2015-2022 гг. для композиционных химических покрытий Ni-P (КХП). В целом, набор и частота использования ДФ для обоих типов покрытия близки, а имеющиеся различия нивелируются, если учитывать материалы патентов и некоторые другие источники информации (тезисы докладов, краткие сообщения и др.). Внутри каждой группы дисперсных фаз различия более очевидны. Например, для КГП с оксидами абсолютное первенство у оксида алюминия, а для КХП к нему добавляются оксиды кремния и титана. В КГП чаще других вводят металлические Al и Cr, в химические – Ti, W, Cu. В своих классах карбид кремния, алмаз и углеродные нанотрубки чаще других используются и в КГП, и в КХП. Таким образом, разница в применении классов (групп) дисперсных фаз (но не их конкретных представителей) несущественна и обусловлена, в первую очередь, технологическими параметрами осаждения покрытия и степенью их влияния на структуру и свойства.

Таблица 1

Доля публикаций по различным видам ДФ в композиционных покрытиях
Table 1. Share of publications on various types of DF in composite coatings

Композиционные покрытия (ср. ежемесячное число публикаций)	Дисперсные фазы (% от общего числа публикаций)						
	оксиды	карбиды	нитриды	углеродные материалы	металлы, сплавы	полимеры	другие
Гальванические (23)	38	17	3	19	12	6	5
Химические (28)	30	14	12	12	18	12	2

Насколько нам известно, на данный момент отсутствуют обзоры, в которых собраны и систематизированы по дисперсным фазам полные сведения о никель-фосфорных КХП. Обзоры, опубликованные за последние 20 лет (например, [8, 10] и другие из приведенных в списке литературы), подробно рассматривают вопросы состава, строения и свойств композиций, которые уже применяются

в разных сферах, углубляя знания о конкретных системах. В результате значительное число поисковых работ осталось несистематизированным, а полученные в них положительные или отрицательные результаты (например, о влиянии введения дополнительной дисперсной фазы взамен термообработки на структуру и свойства), как правило, остаются без внимания.

Как и в случае предыдущего обзора [1], нам представлялось интересным систематизировать данные о полученных в 2015-2022 гг. химическим восстановлением композиционных покрытиях на базе Ni-P, приняв за основу природу дисперсной фазы. Полученный материал достаточно наглядно выявляет системы, слабо исследованные или потерянные в процессе развития тематики и, как мы надеемся, поможет при планировании новых направлений исследования и применения инновационных материалов.

Перед каждым разделом дана краткая справка о действии каждого из известных типов дисперсных фаз на матрицу и ее основные параметры.

ОКСИДЫ КАК ДИСПЕРСНЫЕ ФАЗЫ КХП

Структура КХП сильно зависит от состава раствора, а также от природы и условий введения ДФ. Оксиды, как правило, влияют на скорость осаждения и, имея отрицательный заряд на поверхности, благоприятствуют осаждению ионов металла, меняя соотношение Ni:P, которое, как отмечено выше, определяет эксплуатационные характеристики. Из табл. 2 следует, что в анализируемый период наиболее изучаемыми оставались покрытия с оксидами алюминия и титана, на основе которых были получены первые КХП. На данный момент установлено, что, изменяя концентрацию наиболее изученного оксида Al_2O_3 в растворе, можно регулировать силу (прочность) связи между никелем и фосфором, которая определяет пористость осажденной пленки, а следовательно, механические и

коррозионные свойства. Однако, эти закономерности и разработанные технологические приемы не всегда удается перенести на другие оксиды. Это связано с тем, что большинство оксидов в стандартных электролитах имеют предельно допустимую концентрацию, превышение которой вызывает отрицательные эффекты, вплоть до нарушения процесса восстановления никеля. Вторая возникающая сложность связана с агломерацией ДФ, что приводит к нарушению равномерности покрытия и нестабильности структурных характеристик. Во многих случаях эту проблему решают за счет введения дополнительных реагентов и изменения состава раствора, однако, это не всегда целесообразно с практической точки зрения. Возникающие ограничения в каждой конкретной системе преодолеваются путем подбора режимов термообработки или введения второй ДФ. Из представленных в таблице оксидов в значительной степени только диоксид кремния лишен указанных недостатков. Благодаря своим физико-химическим свойствам диоксид кремния лучше других оксидов противостоит агломерации и равномерно распределяется в матрице вне зависимости от соотношения никеля и фосфора. Принято считать SiO_2 наиболее предпочтительным армирующим компонентом для покрытий, в т.ч. и при использовании в качестве второй ДФ. Отсутствие большого числа работ по исследованию КХП с SiO_2 говорит не об отсутствии интереса к этим системам, а об интенсивном накоплении материала в предыдущие периоды. Более подробную информацию можно найти в [3, 4, 8, 9].

Таблица 2

Дисперсные фазы-оксиды и их сочетания в КХП (матрица Ni-P)
Table 2. Dispersed oxide phases and their combinations in CCP (Ni-P matrix)

ДФ-1/ДФ-2	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	CeO ₂	TiO ₂	SiO ₂	NiO	ZnO	MoO ₂	Fe ₃ O ₄	CuO
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8		A9
Al ₂ O ₃					A10		A11			
ZrO ₂		A12		A13						
Y ₂ O ₃	A14									
ZrO ₂ +Y ₂ O ₃				A15						
CeO ₂	A16	A17								
WO ₃	A18								A19	

Ниже (и далее по тексту после таблиц) приводится перечень номеров источников (согласно списку литературы) для каждого вида ДФ.

A1: 50, 59, 107, 108, 140, 159; **A2:** 56, 114, 131, 142, 163, 171, 178, 187, 196, 199, 211, 238, 239, 242; **A3:** 185, 241; **A4:** 21, 36, 60, 72, 80, 101, 130, 166, 184, 198, 202, 203, 214, 228, 233, 243; **A5:** 186,212; **A6:** 62; **A7:** 86, 94, 126, 169, 173, 192, 236; **A8:** 111, 228, 229; **A9:**125; **A10:** 73; **A11:** 168; **A12:** 204; **A13:** 117; **A14:**12; **A15:** 33; **A16:** 66; **A17:** 70; **A18:** 233; **A19:** 121.

Below (and further in the text after the tables) is a list of source numbers (according to the list of references) for each type of DF.

КАРБИДЫ КАК ДИСПЕРСНЫЕ ФАЗЫ КХП

Адсорбционные процессы, протекающие на подложке до и в процессе осаждения пленки, во многом определяют механизм ее формирования и

свойства. В отличие от оксидов карбиды с положительным зарядом на поверхности адсорбируют анионы гипофосфита, что отражается на составе матрицы полученных КХП. Добавки карбидов при-

дают покрытиям повышенную твердость, коррозионную стойкость, адгезионную прочность, как правило, более высокую, чем оксиды, при этом свойства сильно зависят от размера твердых керамических частиц и их концентрации. Наиболее изучены свойства КХП с карбидом кремния, который наряду с оксидом использовался в пионерских работах и до настоящего времени чаще других применяется в областях, где требуется стабильно высокая степень защиты от коррозии и износостойкость. Карбиды востребованы и в качестве фазы, дополнительной к оксидной. Как и в случае оксидов, для улучшения рабочих характеристик используют различные методы термообработки, оптимизации которых посвящено немало работ, особенно вне рамок изучаемого периода.

Таблица 3

ДФ– карбиды в КХП (матрица Ni-P)
Table 3. DF – carbides in CCP (Ni-P matrix)

ДФ1	SiC	TiC	WC	ZrC	B ₄ C	TaC	HfC
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7

B1: 34, 52, 64, 78, 88, 93, 118, 133, 141, 149, 156, 160, 174, 181, 189, 200, 201, 208, 209, 210, 213, 215, 240; **B2:** 22, 78, 122; **B3:** 91, 151; **B4:** 23; **B5:** 194; **B6:** 89; **B7:** 14.

НИТРИДЫ И СУЛЬФИДЫ КАК ДИСПЕРСНЫЕ
ФАЗЫ КХП

Эти два класса добавок ожидаемо востребованы при разработке покрытий с высокой износостойкостью и хорошими трибологическими характеристиками, но в большинстве современных обзоров они по неизвестным нам причинам не выделяются в отдельные разделы и указываются как «другие дисперсные фазы», несмотря на то, что нитриды титана, бора и кремния используются как самостоятельно, так и в качестве активных добавок в более сложных композициях. Предполагаемый

механизм их действия базируется на тех же предположениях, что и в случае гальванических покрытий. Нитриды часто используются в качестве дополнительной фазы в биметаллических КХП.

Таблица 4

ДФ– нитриды, сульфиды в КХП (матрица Ni-P)
Table 4. DF – nitrides, sulfides in CCP (Ni-P matrix)

ДФ1	TiN	AlN	Si ₃ N ₄	BN	C ₃ N ₄	WS ₂	MoS ₂
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7

C1: 30, 84, 121, 146, 216; **C2:** 28, 104; **C3:** 40, 41, 49, 54, 174, 195; **C4:** 76, 90, 157, 170, 197; **C5:** 119, 162; **C6:** 30, 104, 105, 208; **C7:** 19, 61, 71, 81, 121, 129, 134, 241.

УГЛЕРОД И ПОЛИМЕРЫ КАК ДИСПЕРСНЫЕ
ФАЗЫ КХП

Эти два типа добавок объединены нами не только вследствие их небольшого ассортимента, но и ввиду частого совместного применения системы углерод – полимер, начало изучения которой было положено в пионерских работах 80-х годов, где использовалась пара алмаз-политетрафторэтилен. Углероды и полимеры наиболее востребованы для покрытий с особыми трибологическими характеристиками, эффектами самосмазывания, механической прочностью и др. В изученный период наибольшее внимание уделяется ДФ на основе углеродных нанотрубок различного класса. Отдельным развивающимся направлением можно считать исследование полимерных дисперсных частиц с покрытием из нанотрубок, причем не только углеродных. Термообработка пока остается приоритетным методом улучшения свойств КХП на основе углеродов и полимеров. Набор этих добавок мало отличается от используемых в аналогичных гальванических покрытиях, а при описании механизма действия используются похожие аргументы.

Таблица 5

ДФ– углерод, полимеры для КХП (матрица Ni-P)
Table 5. DF – carbon, polymers for CCP (Ni-P matrix)

ДФ1/ДФ2	Алмаз	Нанотрубки (CNT)	Графит	Графен	Графен Оксид	ПТФЭ, фторопласт	Найлон	ПА6
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8

D1: 46, 77, 152, 161, 175, 180, 188; **D2:** 37, 51, 106, 128, 155, 182, 217; **D3:** 67; **D4:** 58, 98, 99, 109, 150, 205, 220, 229; **D5:** 17, 48, 53, 113, 205, 221; **D6:** 18, 24, 43, 57, 63, 64, 85, 92, 103, 127, 144, 146, 153, 158, 172, 206, 207, 219, 231; **D7:** 97, 224; **D8:** 13.

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ КАК ДИСПЕРСНЫЕ
ФАЗЫ КХП

Действие металлов и сплавов в качестве фазы КХП изучено мало и практически не анализируется в обзорных работах за последние 20 лет.

Возможно, это связано с отсутствием удовлетворительных протоколов подготовки ДФ этого класса и скептицизма в отношении полученных результатов. Хотя с научной точки зрения влияние второго металла, внедренного непосредственно в матрицу или в виде дисперсной фазы, несомненно интересно.

Таблица 6

ДФ– наночастицы металлов и сплавов для КХП (матрица Ni-P)
 Table 6. DF – nanoparticles of metals and alloys for CCP (Ni-P matrix)

ДФ	W	Ti	Ni	Cu	Zn	Sn	Ag	Ni-P	Zr-P	Ti-Ni	Ni-B	ZrB ₂	Co-Fe	HEA
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14

E1: 168, 225, 226, 235, 243, 247; **E2:** 68, 74, 75, 82, 96, 155, 232; **E3:** 132; **E4:** 132, 136, 145, 164, 230, 241, 242; **E5:** 132, 218, 237; **E6:** 116, 222, 234; **E7:** 112, 244; **E8:** 15, 65, 95, 177; **E9:** 20; **E10:** 39, 44, 100, 110, 115; **E11:** 196; **E12:** 69; **E13:** 87; **E14:** 176.

Таблица 7

Две дисперсные фазы (сочетание двух дисперсных фаз) для КХП (матрица Ni-P)
 Table 7. Two dispersed phases (combination of two dispersed phases) for CCP (Ni-P matrix)

ДФ 1/ ДФ 2	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	SiO ₂	CeO ₂	ZnO	Fe ₃ O ₄	TiN	BN	Si ₃ N ₄	CNT	Графит	ПТФЭ
SiC	F1					F2							
WS	F3												
MoS ₂	F4			F5			F6						
W	F7	F8	F9									F10	F11
Co		F12						F13			F14		
Cu					F15			F16					F17
Mo											F18		
B	F19												
Ni												F20	
Re								F21					
Ag									F22				
Zn										F23			
GO			F24										
Ni-P		F25	F26										

F1: 174; **F2:** 95; **F3:** 105; **F4:** 19, 129; **F5:** 61, 81; **F6:** 121; **F7:** 123, 223; **F8:** 154; **F9:** 32; **F10:** 83; **F11:** 102, 139; **F12:** 27; **F13:** 193; **F14:** 35; **F15:** 29; **F16:** 148; **F17:** 227; **F18:** 196; **F19:** 26; **F20:** 79; **F21:** 45; **F22:** 42; **F23:** 69; **F24:** 113; **F25:** 154; **F26:** 65.

Таблица 8

Применение ДФ для улучшения свойств химических покрытий
 Table 8. Application of DF to improve the properties of chemical coatings

Добавка Свойство	Оксиды	Карбиды	Нитриды	Сульфиды	Металлы Сплавы	Углерод	Полимеры
1	2	3	4	5	6	7	8
Коррозионная стойкость	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Износостойкие смазывающие свойства	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
1	2	3	4	5	6	7	8
Высокотемпературное поведение	M1	M2			M5	M6	M7
Каталитические свойства	V1	V2		V4	V5		

K1: 12, 25, 26, 29, 32, 38, 50, 59, 65, 66, 72, 80, 86, 88, 94, 107, 108, 111, 112, 113, 117, 123, 124, 125, 126, 132, 118, 140, 154, 159, 163, 166, 167, 168, 171, 173, 177, 178, 184, 187, 192, 198, 204, 211, 212, 214, 223, 229, 236, 238, 239, 241, 243; **K2:** 20, 31, 34, 48, 78, 91, 95, 122, 133, 142, 151, 174, 196, 208, 209, 241; **K3:** 22, 23, 28, 41, 49, 54, 119, 146, 148, 157, 162, 170, 193, 197, 208, 241; **K4:** 61, 81, 123, 134; **K5:** 16, 17, 29, 32, 44, 69, 82, 87, 110, 112, 136, 139, 144, 145, 148, 154, 155, 167, 174, 176, 193, 223, 226, 237, 243, 246; **K6:** 48, 51, 53, 58, 79, 98, 106, 128, 179, 182, 217; **K7:** 57, 103, 127, 144, 206, 207, 219, 224, 231;

L1: 12, 24, 25, 26, 33, 36, 62, 65, 88, 101, 113, 114, 129, 132, 138, 140, 159, 163, 168, 171, 177, 186, 187, 202, 203, 211, 223, 229; **L2:** 52, 64, 85, 89, 93, 149, 156, 174, 189, 194, 200, 201, 208, 240; **L3:** 22, 23, 28, 30, 42, 45, 76, 84, 90, 104, 120, 193, 195, 216; **L4:** 19, 30, 61, 71, 81, 104, 121, 129, 208; **L5:** 16, 30, 42, 45, 71, 92, 115, 116, 136, 155, 158, 174, 193, 216, 223, 230, 232, 241, 244; **L6:** 58, 67, 98, 109, 113, 161, 165, 175, 180, 205, 220, 221; **L7:** 13, 18, 57, 85, 92, 97, 143, 153, 158, 169, 172, 190, 224, 231

M1: 27 **M2:** 17 **M5:** 68 **M6:** 27 **M7:** 23, 63;

S1: 21, 24, 35, 37, 56, 60, 77, 96, 105, 124, 131, 141, 167, 199, 218, 226, 229, 238; **S2:** 14, 17, 151, 160, 181, 196, 201, 209, 213; **S4:** 19, 105; **S5:** 16, 17, 75, 100, 102, 150, 164, 167, 222, 234, 235, 243; **S6:** 73, 74, 150, 152, 188, 224; **S7:** 102, 103

V1: 70, 130, 185, 228, 233; **V2:** 118; **V4:** 15; **V5:** 89.

МУЛЬТИДИСПЕРСНЫЕ КХП

Как указывалось выше, в качестве методов оптимизации и улучшения свойств химических покрытий используются различные методы обработки, обычно термические. Альтернативой энергозатратным процедурам является создание композиций на основе двух и более дисперсных фаз одинаковой или разной природы. Из табл. 7 видно, что возможные сочетания не исчерпываются приведенным списком.

СВОЙСТВА КХП

В приведенной табл. 8 собраны данные о влиянии (в основном положительном) добавок на свойства покрытий.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Винокуров Е.Г., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 4-38. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 8. P. 4-38 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6212.
2. Brenner A., Riddell G.E. // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1946. V. 37. P. 31.
3. Imtiaz Ahmed Shozib, Azlan Ahmad, Ahmad Majdi Abdul-Rani, Mohammadali Beheshti, Abdul'Azeez Abdu Aliyu. // *Corros. Rev.* 2022. V. 40. N 1. P. 1-37. DOI: 10.1515/corrrev-2020-0091.
4. Eman M. Fayyad, Aboubakr M. Abdullah, Mohammad K. Hassan, Adel M. Mohamed, George Jarjoura, Zoheir Farhat. // *Emergent Mater.* 2018. V. 1. P. 3-24. DOI: 10.1007/s42247-018-0010-4.
5. Gutzzeit G. // *Plating*. 1959. V. 10. P. 1158-1161.
6. Odekerken J.M. // *US Patent*. 3,282,810, 1966.
7. Feldstein N., Lancsek T, Lindsay D, Salerno L. // *Metals Finish.* 1983. V. 81. P. 35-41.
8. Jiang Cong-cong, Cao Yan-ke, Xiao Gui-yong, Zhu Rui-fu, Lu Yu-peng. // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 7531.
9. Imtiaz Ahmed Shozib, Azlan Ahmad, Ahmad Majdi Abdul-Rani, Mohammadali Beheshti, Abdul'Azeez Abdu Aliyu. // *Corros. Rev.* 2022. V. 40. N 1. P. 1-37. DOI: 10.1515/corrrev-2020-0091.
10. Vinod Babu Chintada, Ramji Koonna, M. V. A. Raju Bahubalendruni. // *J. Bio Tribo-Corros.* 2021. V. 7. P. 134. DOI: 10.1007/s40735-021-00568-7.
11. Steurer W. // *Mater. Charact.* 2020. V. 162. N 110179.
12. He Y., Zhang S., He Y., Song R., Zhang Z., Liu B., Li H., Shangguan J. // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. V. 654. N 130059. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130059.
13. Zhang W., Qi X., Yang X., Dong Y., Fan B., Liang L. // *Friction*. 2022. V. 10. N 12. P. 1985-1999. DOI: 10.1007/s40544-021-0560-y.
14. Farhan M., Fayyaz O., Nawaz M., Radwan A.B., Shakoore R.A. // *Mater. Chem. Phys.* 2022. V. 291. 126696. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126696.

Представленный в настоящем обзоре материал, на наш взгляд, может использоваться не только как справочный, но и как база для новых подходов в разработке данного класса покрытий, в том числе с использованием методов машинного обучения. Вполне оптимистичные результаты применения искусственного интеллекта к разработке сложных многокомпонентных систем, в том числе КХП, описаны в [245].

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

15. Cui M., Yan Z., Zhang M., Jia S., Zhang Y. // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. V. 652. 129851. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129851.
16. Zhang Z., Bai Y., He Y., Li H., He T., Song R., He Y., Song J., Liu B. // *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 448. 128934. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128934.
17. Zhong J., Zhang S., He Y., Zhang Z., Li H., Song R. // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2022. V. 651. 129704. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129704.
18. Vasconcelos B., Serra R., Oliveira J., Fonseca C. // *Coatings*. 2022. V. 12. N 10. 1410. DOI: 10.3390/coatings12101410.
19. Mohanty S., Jamal N., Das A.K., Prashanth K.G. // *Materials*. 2022. V. 15. N 19. 6806. DOI: 10.3390/ma15196806.
20. He Y., Zhang S., He Y., Li H., He T., Song R., Liu B., Zhang Z., Fan Y. // *Mater. Character.* 2022. V. 192. 112150. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112150.
21. AnthoniSagaya Selvan R., Thakur D.G., Seeman M., Muraliraja R., Ansari M.I. // *Sadhana – Acad. Proceed. Eng. Sci.* 2022. V. 47. N 3. 116. DOI: 10.1007/s12046-022-01890-7.
22. Zhou H.-M., Jia Y., Li J., Yao S.-H. // *Rare Metals*. 2022. V. 41. N 9. P. 3233-3238. DOI: 10.1007/s12598-015-0663-6.
23. He Y., Zhang S., He Y., Li H., Fan Y., Zhang Y., Xiang Y., He T., Song R., Liu B., Zhang Z. // *Thin Solid Films*. 2022. V. 756. 139364. DOI: 10.1016/j.tsf.2022.139364.
24. Lee M., Park J., Son K., Kim D., Kim K., Kang M. // *Coatings*. 2022. V. 12. N 8. 1199. DOI: 10.3390/coatings12081199.
25. Rajabalizadeh Z., Seifzadeh D., Khodayari A., Sohrabnezhad S. // *J. Magn. Alloys*. 2022. V. 10. N 8. P. 2280-2295. DOI: 10.1016/j.jma.2021.08.013.
26. Lakavat M., Bhaumik A., Gandhi S., Parne S.R. // *Surf. Topogr. Metrol. Proper.* 2022. V. 10. N 2. 025021. DOI: 10.1088/2051-672X/ac68fd.
27. Saeidpour F., Khaleghian-Moghadam R. // *Oxid. Met.* 2022. V. 97. N 5-6. P. 493-507. DOI: 10.1007/s11085-022-10107-5.
28. Badihehaghdam M., Mousavi Khoie S.M., Khast F., SafarzadehKhosrowshahi M. // *Met. Mater. Int.* 2022. V. 28. N 6. P. 1372-1385. DOI: 10.1007/s12540-021-00994-9.
29. Yang Q., Lü X.-H., Liu D.-F., Yao Z. // *Cailiao-RechuliXuebao/Transact. Mater. Heat Treat.* 2022. V. 43. N 5. P. 177-185. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0585.

30. Yang F., Lan X., Shen S., Huang Y., Zheng X. // *ZhongguoBiaomianGongcheng/China Surf. Eng.* 2022. V. 35. N 1. P. 183-190. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210331001.
31. Shozib I.A., Ahmad A., Abdul-Rani A.M., Beheshti M., Aliyu A.A. // *Corros. Rev.* 2022. V. 40. N 1. P. 1-37. DOI: 10.1515/corrrev-2020-0091.
32. Su P., Liu H., Wang X.-H., Long W., Jiang Y.-G., Li Z.-S., Wang Q. // *CailiaoRechuliXuebao/Trans. Mater. Heat Treat.* 2022. V. 43. N 1. P. 166-174. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0304.
33. Shaisundaram V.S., Balambica V., Sendil Kumar D., Nithish S., Chandrasekaran M., Shanmugam M., Likassa D.M. // *J. Nanomater.* 2022. V. 2022. 4934926. DOI: 10.1155/2022/4934926.
34. Murali P., Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Karthikeyan M. // *Mater. Today: Proceed.* 2022. V. 68. N 5. P. 1707-1710. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.364.
35. Gao C., Wei M., Wang Q., Tian J., Zhao L., Fan H., Wei Y., Ma Q. // *Ceram. Int.* 2022. V. 48. N 24. P. 36748-36757. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.236.
36. Melinescu A., Volceanov E., Eftimie M., Batalu D., Volceanov A., Popescu L.G. // *Rev. Rom. Mater.* 2022. V. 52. N 2. P. 99-107.
37. Kumar Srivastwa A., Sarkar S., De J. Majumdar G. // *Mater. Today: Proceed.* 2022. V. 66. P. 3769-3774. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.106.
38. Sayyad D.F., Sayyad D.S., Ansari D.M.I. // *Mater. Today: Proceed.* 2022. V. 62. P. 2926-2929. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.496.
39. Zhang P., Nie P., Wang G., Wang Z., Zhang B. // *FuheCailiaoXuebao/Acta Mater. Compos. Sin.* 2022. V. 39. N 1. P. 213-221. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210320.002.
40. Khdair A.I., Ibrahim A., Karthick S., Elanchezian C., Ramnath B.V., Saravanan M., Giridharan K. // *Biomass Conv. Biorefinery.* 2022. 13(1). 1-10. DOI: 10.1007/s13399-021-02138-w.
41. Dhakal D.R., Kshetri Y.K., Chaudhary B., Kim T.-H., Lee S.W., Kim B.S., Song Y., Kim H.S., Kim H.H. // *Coatings.* 2022. V. 12. N 1. P. 9. DOI: 10.3390/coatings12010009/
42. Uday Venkat Kiran K., Ratna Sunil B., Dumpala R. // *Tribol. – Mater. Surf. In.* 2022. V. 16. N 1. P. 23-33. DOI: 10.1080/17515831.2021.1951543.
43. Shen X., Wang J., Xin G. // *ACS Omega.* 2021. V. 6. N 48. P. 33122-33129. DOI: 10.1021/acsomega.1c05490.
44. Fayyad E.M., Rasheed P.A., Al-Qahtani N., Abdullah A.M., Hamdy F., Sharaf M.A., Hassan M.K., Mahmoud K.A., Mohamed A.M., Jarjoura G., Farhat Z. // *Arab. J. Chem.* 2021. V. 14. N 12. P. 103445. DOI: 10.1016/j.arabjc.2021.103445.
45. Chen B., Yan F., Guo J., Yan M.F., Zhang Y. // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 565. N 150472. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.150472.
46. Xiang C., Zhang F., Wang J., Tang H. // *Jingangshiyu-MoliaoMojuGongcheng/Diam. Abras. Eng.* 2021. V. 41. N 5. P. 14-20. DOI: 10.13394/j.cnki.jgszz.2021.5.0003.
47. Li J., Zeng H., Luo J.-L. // *Chem. Eng. J.* 2021. V. 421. 127752. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127752.
48. Khodaei M., Gholizadeh A.M. // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. N 18. P. 25287-25295. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.05.250.
49. Czapczyk K., Zawadzki P., Wierzbicka N., Talar R. // *Materials.* 2021. V. 14. N 16. 4487. DOI: 10.3390/ma14164487.
50. Su Q., Liu J.-S., Liu D.-F., Lü X.-H. // *Cailiao-RechuliXuebao/Trans. Mater. Heat Treat.* 2021. V. 42. N 6. P. 163-171. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2020-0516.
51. de Oliveira M.C.L., Correa O.V., da Silva R.M.P., de Lima N.B., de Oliveira J.T.D., de Oliveira L.A., Antunes R.A. // *Metals.* 2021. V. 11. N 6. 982. DOI: 10.3390/met11060982.
52. Khodaei M., Gholizadeh A.M. // *Mater. Res. Express.* 2021. V. 8. N 5. 055009. DOI: 10.1088/2053-1591/ac021e.
53. Hanachi M., Seyedraoufi Z.S., Samiee M., Shajari Y. // *J. Bio Tribo-Corros.* 2021. V. 7. N 1. 30. DOI: 10.1007/s40735-020-00468-2.
54. Dhakal D.R., Kshetri Y.K., Gyawali G., Kim T.-H., Choi J.-H., Lee S.W. // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 541. 148403. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148403.
55. Volceanov E., Eftimie M., Melinescu A., Volceanov A., Surdu A. // *Rev. Rom. Mater.* 2021. V. 51. N 4. P. 485-494.
56. Melinescu A., Volceanov E., Eftimie M., Volceanov A., Popescu L., Truşcă R. // *Rev. Rom. Mater.* 2021. V. 51. N 4. P. 475-484.
57. Bin X., Jian-Cai Q., Yun-Liang X., Hong-Qing Z., Hou-Chang W., Ji-Cheng L., Min F. // *Surf. Technol.* 2021. V. 50. N 9. 1001-3660(2021)09-0261-08. P. 261-268. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.027.
58. Khan Rana A.R., Li Z., Umer J., Farhat Z. // *Mater. Perform. Charact.* 2021. V. 10. N 1. P. 594-606. DOI: 10.1520/MPC20200132.
59. Sundaraj M., Subramani V. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2021. V. 16. N 7. 210757. P. 1-12. DOI: 10.20964/2021.07.31.
60. Shozib I.A., Ahmad A., Rahaman M.S.A., Abdul-Rani A.M., Alam M.A., Beheshti M., Taufiqurrahman I. // *J. Mater. Res. Technol.* 2021. V. 12. P. 1010-1025. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.063.
61. Azadi M., Tavakoli H., Haghhighatkhah S., Eranegh F.A. // *Trans. Indian Inst. Met.* 2021. V. 74. N 1. P. 137-147. DOI: 10.1007/s12666-020-02125-1.
62. Rajabi M.R., Tahmasebi K., Ehteshamzadeh M., Soroushian S. // *Tribology – Mater. Surf. In.* 2021. V. 15. N 4. P. 243-251. DOI: 10.1080/17515831.2020.1840208.
63. Liu Z., Chen Z., Li W., Ding Z., Xu Z. // *Heat Transfer Eng.* 2021. V. 42. N 22. P. 1877-1888. DOI: 10.1080/01457632.2020.1834202.
64. Ma S., Wang J., Luo Q., Si F., Yang M., Chen N., Zhang X., Li B. // *FangzhiXuebao/J. Text. Res.* 2020. V. 41. N 12. P. 151-156. DOI: 10.13475/j.fzxb.20200306706.
65. Carrillo D.F., Bermudez A., Gómez M.A., Zuleta A.A., Castaño J.G., Mischler S. // *Surf. Interfaces.* 2020. V. 21. 100733. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100733.
66. Chinchu K.S., Riyas A.H., Ameen Sha M., Geethanjali C.V., Saji V.S., Shibli S.M.A. // *Surf. Interfaces.* 2020. V. 21. 100704. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100704.
67. Thakur I.S., Pandey V.S., Rao P.S., Tyagi S., Goyal D. // *Met. Powder Rep.* 2020. V. 75. N 6. P. 344-349. DOI: 10.1016/j.mprp.2019.12.001.
68. Shahzad K., Fayyad E.M., Nawaz M., Fayyaz O., Shakoor R.A., Hassan M.K., Adeel Umer M., Baig M.N., Raza A., Abdullah A.M. // *Nanomaterials.* 2020. V. 10. N 10. 1932. P. 1-19. DOI: 10.3390/nano10101932.
69. Kilanko O., Fayomi O.S.I., Sode A.A. // *J. Bio- and Tribo-Corrosion.* 2020. V. 6. N 3. 95. DOI: 10.1007/s40735-020-00392-5.
70. Krishnan A., Sha M.A., Basheer R., Riyas A.H., Shibli S.M.A. // *Mater. Sci. Semicond. Proc.* 2020. V. 116. 105138. DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105138.
71. Jiang J., Sun Y., Chen Y., Zhou Q., Rong H., Hu X., Chen H., Zhu L., Han S. // *Surf. Eng.* 2020. V. 36. N 8. P. 889-899. DOI: 10.1080/02670844.2020.1726012.

72. Liu Z., Li S., Xing W., Xu Z. // *HuagongXuebao/CIESC J.* 2020. V. 71. N 8. P. 3535-3544. DOI: 10.11949/0438-1157.20200175.
73. Mayanglambam F., Russell M. // *Int. J. Min. Met. Mater.* 2020. V. 27. N 8. P. 1147-1156. DOI: 10.1007/s12613-020-2071-7.
74. Li Z., Farhat Z., Jarjoura G., Fayyad E., Abdullah A., Hassan M. // *J. Eng. Mater. Technol., Transact. ASME.* 2020. V. 142. N 3. 031006. DOI: 10.1115/1.4046404.
75. Li Z., Farhat Z. // *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 2020. V. 51. N 7. P. 3674-3691. DOI: 10.1007/s11661-020-05795-0.
76. Kiran K.U.V., Arora A., Sunil B.R., Dumpala R. // *SN Appl. Sci.* 2020. V. 2. N 6. 1101. DOI: 10.1007/s42452-020-2920-z.
77. Zhou T., He Y., Yu Q., Liang Z., Li S., Liu X., Dong X., Wang X. // *J. Mater. Proc. Technol.* 2020. V. 279. 116561. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116561.
78. Dhakal D.R., Gyawali G., Kshetri Y.K., Choi J.-H., Lee S.W. // *Nanotechnology.* 2020. V. 31. N 10. P. 104001. DOI: 10.1088/1361-6528/ab5a13.
79. Qin W., Fan Y., Han X., You W., Xu Y. // *Corros. Protect.* 2020. V. 41. N 3. 1005-748X(2020)03-0043-05. P. 43-47. DOI: 10.11973/fsyfh-202003008.
80. Amjad-Iranagh S., Zarif M. // *J. Nanostruct.* 2020. V. 10. N 2. P. 415-423. DOI: 10.22052/JNS.2020.02.019.
81. FreshtehAmjadiEranegh, Azadi M., Tavakoli H. // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2020. V. 56. N 2. P. 171-183. DOI: 10.3103/S1068375520020064.
82. Li Z., Farhat Z., Islam M.A. // *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. V. 29. N 3. P. 1671-1685. DOI: 10.1007/s11665-020-04722-z.
83. Wang K., Sun K., Li Z., Lv Z., Yu T., Liu X., Wang G., Xie G., Jiang L. // *Electron. Mater. Lett.* 2020. V. 16. N 2. P. 164-173. DOI: 10.1007/s13391-019-00197-w.
84. Chen B., Guo J., Yan M.F., Wang F., Liu F. // *Appl. Surf. Sci.* 2020. V. 504. 144116. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144116.
85. Yang Y., Li W., Liu P., Zhang K., Ma F., Liu X., Chen X., He D. // *CailiaoDaobao/Mater. Rep.* 2020. V. 34. N 2. P. 04153-04157. DOI: 10.11896/cldb.19020155.
86. Chintada V.B., Koona R. // *Mater. Res. Innovat.* 2020. V. 24. N 2. P. 67-74. DOI: 10.1080/14328917.2019.1582740.
87. Hasani R., Tahmasebi K., Ehteshamzadeh M., Soroushian S. // *Adv. Powder Technol.* 2020. V. 31. N 2. P. 827-834. DOI: 10.1016/j.apt.2019.11.037.
88. Ghavidel N., Allahkaram S.R., Naderi R., Barzegar M., Bakhshandeh H. // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 382. 125156. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125156.
89. Dhakal D.R., Gyawali G., Kshetri Y.K., Choi J.-H., Lee S.W. // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 381. 125135. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125135.
90. Li S., Pu S., You Z., Sun C., Li S., Zhang J. // *Transact. Inst. Met. Finish.* 2020. V. 98. N 1. P. 21-29. DOI: 10.1080/00202967.2020.1694769.
91. Zhang X.-S., Wang Q.-Y., Tang Y.-R., Guo H.-C., Xi Y.-C., Dong L.-J., Zheng H. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2020. V. 15. P. 11821-11832. DOI: 10.20964/2020.12.10.
92. Sadeq B.R., Sahib B.S., Abid Ali A.K. // *J. Mechan. Eng. Res. Develop.* 2020. V. 44. N 1. P. 66-74.
93. Kandevas M., Svoboda P., Nikolov N., Todorov T., Sofronov Y., Pokusová M., Vencel A. // *J. Environ. Protect. Ecol.* 2020. V. 21. N 4. P. 1314-1325.
94. Chintada V.B., Koona R., Rao Gurugubelli T. // *Adv. Mater. Proc. Technol.* 2020. V. 8. N 1. P. 945-958. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1835017.
95. Chintada V.B., Uppada S., Uppada S. // *Crit. Rev.* 2020. V. 7. N 19. P. 268-271. DOI: 10.31838/jcr.07.19.30.
96. Li Z., Farhat Z. // *Surf. Eng.* 2020. V. 37. N 4. P. 1-9. DOI: 10.1080/02670844.2020.1794212.
97. Jayaraj M., Siddharthan A., Mohanavel V. // *J. Balkan Tribolog. Assoc.* 2020. V. 26. N 1. P. 110-122.
98. Abid Ali A.R.K., Abd A.S. // *Crit. Rev.* 2020. V. 7. N 1. P. 531-537. DOI: 10.31838/jcr.07.01.105.
99. Kumari S., Panigrahi A., Singh S.K., Mohapatra M., Khanna A.S., Mishra S.K., Pradhan S.K. // *J. Appl. Electrochem.* 2019. V. 49. N 12. P. 1157-1166. DOI: 10.1007/s10800-019-01333-y.
100. MacLean M., Farhat Z., Jarjoura G., Fayyad E., Abdullah A., Hassan M. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 378. 125064. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125064.
101. Carrillo D.F., Santa A.C., Valencia-Escobar A., Zapata A., Echeverría F., Gómez M.A., Zuleta A.A., Castaño J.G. // *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2019. V. 105. N 1-4. P. 1745-1756. DOI: 10.1007/s00170-019-04381-y.
102. Ren L., Cheng Y., Wang Q., Yang J. // *Surf. Topogr.* 2019. V. 7. N 4. 045009. DOI: 10.1088/2051-672X/ab47a1.
103. Byoun Y.-M., Seo S.-K., Yoon J.-D., Na S.-J. // *J. Ceram. Proc. Res.* 2019. V. 20. N 5. P. 556-562. DOI: 10.36410/jcpr.2019.20.5.556.
104. Ni M., Wang S., Li W., Huang W. // *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 11. 116413. DOI: 10.1088/2053-1591/ab4643.
105. Taye D., Mohanty S., Das A.K., Singh N.K. // *Trans. Indian Inst. Met.* 2019. V. 72. N 9. P. 2281-2292. DOI: 10.1007/s12666-019-01677-1.
106. de Oliveira M.C.L., Correa O.V., da Silva R.M.P., de Lima N.B., de Oliveira J.T.D., de Oliveira L.A., Antunes R.A. // *J. Mater. Eng. Perform.* 2019. V. 28. N 8. P. 4751-4761. DOI: 10.1007/s11665-019-04245-2.
107. Ma J., Gao Y., Li J.-H. // *ZhongguoYouseJinshuXuebao/Chinese J. Nonferrous Met.* 2019. V. 29. N 8. P. 1616-1621. DOI: 10.19476/j.yxb.1004.0609.2019.08.06.
108. Sabzi M., Dezfuli S.M., Balak Z. // *Int. J. Miner. Met. Mater.* 2019. V. 26. N 8. P. 1020-1030. DOI: 10.1007/s12613-019-1805-x.
109. Rana A.R.K., Farhat Z. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 369. P. 334-346. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.043.
110. Fayyad E.M., Hassan M.K., Rasool K., Mahmoud K.A., Mohamed A.M.A., Jarjoura G., Farhat Z., Abdullah A.M. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 369. P. 323-333. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.064.
111. Fayomi O.S.I., Akande I.G., Popoola A.P.I., Popoola S.I., Daramola D. // *J. Sci.: Adv. Mater. Devices.* 2019. V. 4. N 2. P. 285-289. DOI: 10.1016/j.jsamd.2019.04.001.
112. Shahbazi H., Mahdavi M., Alirezai S., Tabatabaei F. // *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 8. 085076. DOI: 10.1088/2053-1591/ab1fcd.
113. Uysal M. // *Met. Trans. A Phys Metall Mater Sci* 2019. V. 50. N 5. P. 2331-2341. DOI: 10.1007/s11661-019-05161-9.
114. León-Patiño C.A., García-Guerra J., Aguilar-Reyes E.A. // *Wear.* 2019. V. 426-427. P. 330-340. DOI: 10.1016/j.wear.2019.02.015.
115. MacLean M., Farhat Z., Jarjoura G., Fayyad E., Abdullah A., Hassan M. // *Wear.* 2019. V. 426-427. P. 265-276. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.058.
116. Jiang Z., Xu X., Cheng H., Liu Q.-J., Zhang X., Zhou K.X., Huang J. // *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 7. 076573. DOI: 10.1088/2053-1591/ab1697.
117. Wang Q.-Y., Liu S., Tang Y.-R., Pei R., Xi Y.-C., Zhang D.-X. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2019. V. 14. N 4. P. 3740-3751. DOI: 10.20964/2019.04.11.

118. Zhou H.-Z., Wang W.-H., Gu Y.-Q., Bai Y.-Q., Xue Y.-J. // *Surf. Rev. Lett.* 2019. V. 26. N 3. 1850157. DOI: 10.1142/S0218625X18501573.
119. Fayyad E.M., Abdullah A.M., Mohamed A.M.A., Jarjoura G., Farhat Z., Hassan M.K. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 362. P. 239-251. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.087.
120. Premkumar A., Elayaperumal A., Arulvel S., Jagatheeshwaran M.S. // *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 6. 066409. DOI: 10.1088/2053-1591/ab0934.
121. Xu Y., Zheng Q., Geng J., Dong Y., Tian M., Yao L., Dearn K.D. // *Wear.* 2019. V. 422-423. P. 201-211. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.064.
122. Czagańy M., Baumli P. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 361. P. 42-49. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.046.
123. Taşci S., Özden R.C., Anik M. // *Met. Mater. Int.* 2019. V. 25. N 2. P. 313-323. DOI: 10.1007/s12540-018-0199-z.
124. Safonov V., Shishurin S., Gorbushin P., Kolomeichenko A., Kuznetsov Y., Kalashnikova L., Zakharevich A. // *Tribol. Ind.* 2019. V. 41. N 1. P. 14-22. DOI: 10.24874/ti.2019.41.01.02.
125. Muraliraja R., Sudagar J., Elansezhian R., Raviprakash A.V., Dhinakaran R., Shaisundaram V.S., Chandrasekaran M. // *Arab. J. Sci. Eng.* 2019. V. 44. N 2. P. 821-828. DOI: 10.1007/s13369-018-3300-5.
126. Chintada V.B., Koon R. // *Mater. Res. Express.* 2019. V. 6. N 2. 025030. DOI: 10.1088/2053-1591/aaeee8.
127. Tajbakhsh M., Yaghibizadeh O., Farhadi Nia M. // *Proc. Inst. Mechan. Eng. Part E: J. Process Mech. Eng.* 2019. V. 233. N 1. P. 94-103. DOI: 10.1177/0954408917744159.
128. Abidali A.R.K., Wais A.M.H. // *Int. J. Mechan. Prod. Eng. Res. Develop.* 2019. V. 9. N 6. P. 573-584. DOI: 10.24247/ijmperddcc201949
129. Liu P., Zhu Y., Shen Q., Jin M., Zhong G., Hou Z., Zhao X., Wang S., Yang S. // *Coatings.* 2019. V. 9. N 2. 116. DOI: 10.3390/COATINGS9020116.
130. Nijpanich S., Kamimoto Y., Hagio T., Ichino R. // *J. Water Environ. Technol.* 2019. V. 17. N 3. P. 131-140. DOI: 10.2965/jwet.18-039.
131. Gyawali G., Dhakal D.R., Joshi B., Choi J.-H., Lee S.W. // *J. Ceram. Proc. Res.* 2019. V. 20. N 1. P. 84-89. DOI: 10.36410/jcpr.2019.20.1.84.
132. Lakavat M., Sharma P.K., Saxena M., Diwan P. // *Int. J. Recent Technol. Eng.* 2019. V. 7. N 5. P. 60-66.
133. Chintada V.B., Koon R. // *J. Bio Tribo-Corros.* 2018. V. 4. N 4. 68. DOI: 10.1007/s40735-018-0186-4.
134. Du S., Li Z., He Z., Ding H., Wang X., Zhang Y. // *Tribol. Int.* 2018. V. 128. P. 197-203. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.07.026.
135. Pancracious J.K., Ulaeto S.B., Ramya R., Rajan T.P.D., Pai B.C. // *Int. Mater. Rev.* 2018. V. 63. N 8. P. 488-512. DOI: 10.1080/09506608.2018.1506692.
136. Anijdan S.H.M., Sabzi M., Zadeh M.R., Farzam M. // *Tribol. Int.* 2018. V. 127. P. 108-121. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.05.040.
137. Xiao M., Huang S., Wu H., Chen K., Wu D., Yang H. // *Dig. J. Nanomater. Biostruct.* 2018. V. 13. N 4. P. 1019-1029.
138. Ansari M.I., Thakur D.G. // *Proc. Inst. Mechan. Eng. Part E.* 2018. V. 232. N 5. P. 613-621. DOI: 10.1177/0954408917731937.
139. Akyol A., Algul H., Uysal M., Akbulut H., Alp A. // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 453. P. 482-492. DOI: 10.1016/j.apusc.2018.05.152.
140. Ma J., Li Q., Li J. // *XiyouJinshuCailiao Yu Gongcheng/Rare Met. Mater. Eng.* 2018. V. 47. N 9. P. 2723-2727.
141. Zhang X.-Z., Wu X.-L., Liu G.-W., Luo W.-Q., Guo Y.-J., Shao H.-C., Qiao G.-J. // *Trans. Nonfer. Metal Soc. China (Engl. Ed.).* 2018. V. 28. N 9. P. 1784-1792. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64822-8.
142. Zheng X., Liu H., Chen L., Zhang L., Zhang J., Shen T., Yang F. // *XiyouJinshuCailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Mater. Eng.* 2018. V. 47. P. 171-176.
143. Arulvel S., Elayaperumal A., Jagatheeshwaran M.S. // *Eng. Fail. Anal.* 2018. V. 90. P. 310-323. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.004.
144. Yang Y., Li W., Liu P., Zhang K., Ma F., Chen X. // *Gongneng-Cailiao/J. Funct. Mater.* 2018. V. 49. N 7. P. 07082-07087. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2018.07.013.
145. Sabzi M., Anijdan S.H.M., Roghani Zadeh, M., Farzam M. // *Canad. Metall. Q.* 2018. V. 57. N 3. P. 350-357. DOI: 10.1080/00084433.2018.1444367.
146. Gao P., Xie, Z., Ouyang C., Tao T., Wu X., Huang Q. // *J. Solid State Electrochem.* 2018. V. 22. N 7. P. 1971-1981. DOI: 10.1007/s10008-018-3896-0.
147. Fayyad E.M., Abdullah A.M., Hassan M.K., Mohamed A.M., Jarjoura G., Farhat Z. // *Emergent Mater.* 2018. V. 1. N 1-2. P. 3-24. DOI: 10.1007/s42247-018-0010-4.
148. Zhou H.-M., Hu X.-Y., Li J. // *J. Centr. South Univer.* 2018. V. 25. N 6. P. 1350-1357. DOI: 10.1007/s11771-018-3831-7.
149. Liu Y. // *JinshuRechuli/Heat Treat. Met.* 2018. V. 43. N 4. P. 204-207. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2018.04.041.
150. Yu Q., Zhou T., Jiang Y., Yan X., An Z., Wang X., Zhang D., Ono T. // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 435. P. 617-625. DOI: 10.1016/j.apusc.2017.11.169.
151. Ren X., Zhang C., Zhao R., Wang C. // *JinshuRechuli/Heat Treat. Met.* 2018. V. 43. N 3. P. 91-95. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2018.03.019.
152. Fan Q. Gao Y., Zhao Y., Yang Q., Guo L., Jiang L. // *Mater. Lett.* 2018. V. 215. P. 242-245. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.065.
153. Dong S.-F., Li W., Liu P., Zhang K., Ma F.-C., Liu X.-K., Chen X.-H., He D.-H. // *ZhongguoYouseJinshuXuebao/Chinese J. Nonferr. Met.* 2018. V. 28. N 3. P. 579-587. DOI: 10.19476/j.yxb.1004.0609.2018.03.17.
154. Luo H., Leitch, M., Zeng, H., Luo J.-L. // *Mater. Today Phys.* 2018. V. 4. P. 36-42. DOI: 10.1016/j.mphys.2018.03.001.
155. Wang C., Farhat Z., Jarjoura G., Hassan M.K., Abdullah A.M. // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 334. P. 243-252. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.074.
156. Hashemi S.H., Ashrafi A. // *Trans. Inst. Met. Finish.* 2018. V. 96. N 1. P. 52-56. DOI: 10.1080/00202967.2018.1403161.
157. Kandeve M., Kamburov V., Zadorozhnaya E., Kalitchin Z. // *J. Environ. Protect. Ecol.* 2018. V. 19. N 4. P. 1690-1703.
158. Karaguiozova Z.K. // *Int. J. Surf. Sci. Eng.* 2018. V. 12. N 5-6. P. 496-506. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2018.096776.
159. Tabatabaei F., Vardak S., Alirezaei S., Raeissi K. // *Kov. Mater.* 2018. V. 56. N 6. P. 379-387. DOI: 10.4149/km-2018-6-379.
160. Zhou H., Gu Y., Wang W., Liu R., Bai Y., Zhang B., Mao X. // *Medziagotyra.* 2018. V. 24. N 4. P. 382-386. DOI: 10.5755/j01.ms.24.4.19128.
161. Kandeve M., Penyashki T., Kostadinov G., Kalitchin Z.H., Kaleicheva J. // *J. Environ. Protect. Ecol.* 2018. V. 19. N 3. P. 1200-1214.
162. Fayyad E.M., Abdullah A.M., Hassan M.K., Mohamed A.M., Wang C., Jarjoura G., Farhat Z. // *Coatings.* 2018. V. 8. N 1. 37. P. 152. DOI: 10.3390/coatings8010037.

163. **Hu R., Su Y., Liu Y., Liu H., Chen Y., Cao C., Ni H.** // *Nanoscale Res. Lett.* 2018. V. 13. P. 198. DOI: 10.1186/s11671-018-2608-0.
164. **Mousavi Anijdan S.H., Sabzi M., Zadeh M.R., Farzam M.** // *Mater. Res.* 2018. V. 21. N 2. e20170973. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-0973.
165. **Wang J., Zhang F.-L., Zhang T., Liu W.-G., Li W.-X., Zhou Y.-M.** // *Int. J. Refract. Hard Met.* 2018. V. 70. P. 32-38. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.09.012.
166. **Shen Y.-J., Liu D.-F., Shi L.-Y., Ye T., Zhang H., Fang S.** // *CailiaoRechuliXuebao/Trans.. Mater. Heat Treat.* 2017. V. 38. N 12. P. 84-90. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2017-0343.
167. **Bao R., Yan S., Wang R., Li Y. Sun W.-C., Xu J.-M., Wang Y., Guo F., Jia Z.-W.** // *J. Mater. Eng. Perform.* 2017. V. 26. N 12. P. 5753-5759. DOI: 10.1007/s11665-017-3038-3.
168. **Ansari M.I., Julka S., Thakur D.G.** // *J. Molec. Liq.* 2017. V. 247. P. 22-33. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.09.030.
169. **Jagatheeshwaran M.S., Elayaperumal A., Arulvel S.** // *Mater. Sci. Eng. B: Solid-State Mater. Adv. Technol.* 2017. V. 225. P. 160-172. DOI: 10.1016/j.mseb.2017.08.026.
170. **Ranganatha S., Venkatesha T.V.** // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2017. V. 53. N 5. P. 449-455. DOI: 10.3103/S106837551705009X.
171. **Gadhari P., Sahoo P.** // *Silicon.* 2017. V. 9. N 5. P. 761-774. DOI: 10.1007/s12633-016-9452-6.
172. **Sheu H.-H., Jian S.-Y., Lin M.-H., Hsu C.-I., Hou K.-H., Ger M.-D.** // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2017. V. 12. N 6. P. 5464-5482. DOI: 10.20964/2017.06.30.
173. **Ansari M.I., Thakur D.G.** // *Surf. Interfaces.* 2017. V. 7. P. 20-28. DOI: 10.1016/j.surfint.2017.02.004.
174. **Hu J., Fang L., Liao X.-L., Shi L.-T.** // *Surf. Eng.* 2017. V. 33. N 5. P. 362-368. DOI: 10.1080/02670844.2016.1230975.
175. **Xi X., Zhang R., Sun F.** // *Diam. Relat. Mater.* 2017. V. 74. P. 164-172. DOI: 10.1016/j.diamond.2017.03.010.
176. **Heydari H., Monirvaghefi S.M., Hadipour A.** // *J. Mater. Eng. Perform.* 2017. V. 26. N 3. P. 1404-1413. DOI: 10.1007/s11665-017-2537-6.
177. **Luo H., Wang X., Gao S., Dong C., Li X.** // *Surf. Coat. Technol.* 2017. V. 311. P. 70-79. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.12.075.
178. **Chen Y., Hao Y., Huang W., Ji Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Ling X.** // *Surf. Coat. Technol.* 2017. V. 310. P. 122-128. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.12.089.
179. **Chakarova V., Georgieva M., Petrova M.** // *Bulgarian Chem. Commun.* 2017. V. 49. P. 30-36.
180. **Karaguiozova Z., Kaleicheva J., Mishev V., Nikolcheva G.** // *Tribol. Ind.* 2017. V. 39. N 4. P. 444-451. DOI: 10.24874/ti.2017.39.04.03.
181. **Zhou H.Z., Wang W.H., Gu Y.Q., Fang X.X., Bai Y.Q.** // *Strength Mater.* 2017. V. 49. N 1. P. 101-108. DOI: 10.1007/s11223-017-9847-7.
182. **Wang Q., Huang Y., Ba G., Cheng C.** // *Corros. Sci. Protect. Technol.* 2017. V. 29. N 1. P. 59-62. DOI: 10.11903/1002.6495.2016.210.
183. **Jiang C.-C., Cao Y.-K., Xiao G.-Y., Zhu R.-F., Lu Y.-P.** // *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 12. P. 7531-7539. DOI: 10.1039/c6ra25841g.
184. **Kim S., Kim J.W., Kim J.H.** // *J. Alloy. Compd.* 2017. V. 698. P. 267-275. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.12.027.
185. **Shibli S.M.A., Riyas A.H., Ameen Sha M., Mole R.** // *J. Alloy. Compd.* 2017. V. 696. P. 595-603. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.238.
186. **Sadeghzadeh-Attar A., Ayubi Kia G., Ehteshamzadeh M.** // *Surf. Coat. Technol.* 2016. V. 307. P. 837-848. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.10.026.
187. **Julka S., Ansari M.I., Thakur D.G.** // *J. Mar. Sci. Appl.* 2016. V 15. N 4. P. 484-492. DOI: 10.1007/s11804-016-1385-3.
188. **Hou J.Y., Gao H.J.** // *Transact. Inst. Met. Finish.* 2016. V. 94. N 6. P. 305-312. DOI: 10.1080/00202967.2016.1209293.
189. **Hashemi S.H., Shoja-Razavi R.** // *Opt. Laser Technol.* 2016. V. 85. P. 1-6. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.05.018.
190. **Jagatheeshwaran M.S., Elayaperumal A., Arulvel S.** // *Surf. Coat. Technol.* 2016. V. 304. P. 492-501. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.053.
191. **Zhou H., Gu Y., Wang W., Gu M., Fang X., Bai Y.** // *Mater. China.* 2016. V. 35. N 10. P. 799-803. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.07.
192. **Sharma S., Sharma S., Sharma A., Agarwala V.** // *J. Mater. Eng. Perform.* 2016. V. 25. N 10. P. 4383-4393. DOI: 10.1007/s11665-016-2292-0.
193. **Shi L.T., Hu J., Fang L., Wu F., Liao X.L., Meng F.M.** // *Mater. Corros.* 2016. V. 67. N 10. P. 1034-1041. DOI: 10.1002/maco.201608844.
194. **Ren X., Zhang C., Xuan Z., Zhao R.** // *JinshuRechuli/Heat Treat. Met.* 2016. V. 41. N 9. P. 66-68 and 69. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2016.09.014.
195. **Matik U.** // *Surf. Coat. Technol.* 2016. V. 302. P. 528-534. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.054.
196. **Subramanian C., Palaniradja K.** // *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. V. 11. N 16. P. 10084-10090.
197. **Hsu C.-I., Wang G.-L., Ger M.-D., Hou K.-H.** // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2016. V. 11. N 6. P. 4352-4361. DOI: 10.20964/2016.06.19.
198. **Sahayaraj M.E., Jappes J.T.W., Siva I., Rajini N.** // *Sci. Eng. Compos. Mater.* 2016. V. 23. N 3. P. 309-314. DOI: 10.1515/secm-2014-0134.
199. **Karthikeyan S., Vijayaraghavan L., Madhavan S., Almeida A.** // *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2016. V. 47. N 5. P. 2223-2231. DOI: 10.1007/s11661-016-3413-y.
200. **Franco M., Sha W., Aldic G., Malinov S., Çimenoğlu H.** // *Tribol. Int.* 2016. V. 97. P. 265-271. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.047.
201. **Chang C.-S., Hou K.-H., Ger M.-D., Chung C.-K., Lin J.-F.** // *Surf. Coat. Technol.* 2016. V. 288. P. 135-143. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.01.020.
202. **Gadhari P., Sahoo P.** // *Surf. Rev. Lett.* 2016. V. 23. N 1. P. 1550082. DOI: 10.1142/S0218625X15500821.
203. **Tamilarasan T.R., Rajendran R., Sivashankar M., Sanjith U., Rajagopal G., Sudagar J.** // *Wear.* 2016. V. 346-347. P. 148-157. DOI: 10.1016/j.wear.2015.11.015.
204. **Kumar R., Sharma S., Sharma A.** // *Indian J. Sci. Technol.* 2016. V. 9. N 44. P. 98981. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i44/98981.
205. **Jiang J., Chen H., Zhu L., Qian W., Han S., Lin H., Wu H.** // *RSC Adv.* 2016. V. 6. N 110. P. 109001-109008. DOI: 10.1039/c6ra22330c.
206. **Васильева Н.А.** // *Изв. вузов. Сев.-кавказ. рег. Техн. науки.* 2015. № 4. С. 133-137. **Vasilieva N.A.** // *Izv. Vuzov. Sev.-Kavkaz. Reg. Tekhn. Nauki.* 2015. N 4. P. 133-137 (in Russian).
207. **Миккус Н.** // *Мир гальваники.* 2017. № 2. С. 54-59. **Mikius N.** // *Mir Gal'vaniki.* 2017. N 2. P. 54-59 (in Russian).
208. **Ying Lixia, Liu Ying, Liu Guannan, Li Zhenghui, Wang Guixiang.** // *Xiyoujinshucailiaoyugongcheng.* 2015. V. 44. N 1. P. 0028-0031
209. **Xu Hui, Liu Hui, Qiao Chun-yu, Cao Mao-sheng, Yuan Xiao-yu, Wang Xiao-dan, Cui Xu-guang, Hu Ming-xing.** // *Dianduyujingshi.* 2014. V. 36. N 4. P. 5-8, 37.
210. **Song Zhen-xing, Yao Su-wei, Wang Hong-zhi, Zhang Weiguo.** // *Dianduyujingshi.* 2014. V. 36. N 12. P. 1-5.

211. Zhou Changhai, Liu Ailian, Xu Yurong, Li Fengchun. // *Heilongjiang kejidaxuexuebao*. 2015. V. 25. N 3. P. 261-264, 279.
212. Islam Mohammad, Azhar Muhammad Rizwan, FredjNarges, David Burleigh T., OloyedeOlamilekan R., Almajid Abdulhakim A., Ismat Shah S. // *Surf. Coat. Technol.* 2015. V. 261. P. 141-148.
213. Nanis L. // *Galvanotechnik*. 2015. V. 106. N 12. P. 2403.
214. Shoeib M.A., Kamel M.M., Rashwan S.M., Hafez O.M. // *Surf. Interface Anal.* 2015. V. 47. N 6. P. 672-680.
215. Wu Tao, Liu Gang, Li Suo-zhi, Pan Bing-suo. // *Cailiaobaohu*. 2016. V. 49. N 1. P. 56-58.
216. Shi L.T., Hu J., Fang L., Wu F., Liao X.L., Meng F.M. // *Mater. Corros.* 2016. V. 67. N 10. P. 1034-1041.
217. Ma Honglei, Zhu Yanqing, Zhu Sen, Ning Yao. // *Dianduyujingshi*. 2017. V. 39. N 2. P. 14-18.
218. Liu Ting, Jiang Boquan, Zou Youqin, Liu Xianxiang. // *Dianduyujingshi/Plating Surf. Finish.* 2015. V. 37. N 11. P. 7-10, 19.
219. Wu Di, Yang Zhong-dong. // *Cailiaobaohu*. 2017. V. 50. N 3. P. 38-42.
220. Huang Yan-bin, Wang Qi-chao, Lu Shi-yong, Huang Jun-xiong. // *Dianduyutushi*. 2017. V. 36. N 9. P. 445-449.
221. Tamlarasani T. R., Sanjith U., Siva Shankar M., Rajagopal G. // *Wear: Int. J. Sci. Technol. Frict. Lubricat. Wear*. 2017. V. 390-391. P. 385-391.
222. Wang Yurong, Tang Rongjun, Yang Caihong, Xu Tianyu, MitsuzakiNaotoshi, Chen Zhidong. // *Thin Solid Films*. 2019. V. 669. P. 72-79.
223. Taşci Selim, ÖzdenReşat Can, Anik Mustafa. // *Met. Mater. Int.* 2019. V. 25. N 2. P. 313-323.
224. Щербачков И.Н. // *Изв. вузов. Сев.-кавказ. рег. Техн. науки*. 2019. № 2. С. 19-25. DOI: 10.17213/0321-2653-2019-2.
224. Scherbakov I.N. // *Izv. vuzov. Sev.-kavkaz. reg. tekhn. nauki*. 2019. N 2. P. 19-25 (in Russian). DOI: 10.17213/0321-2653-2019-2.
225. Peng Jiashan, Zhang Yonghui. // *Dianduyujingshi*. 2019. V. 41. N 5. P. 4-8.
226. Zhou Peng, Cai Weibo, Yang Yuebo, Li Xuejie, Zhang Tao, Wang Fuhui. // *Surf. Coat. Technol.* 2019. V. 374. P. 103-115.
227. Sun Wei-ming, Li Bin, Yuan Xiao, Liu Cui, Shen Chun-yin, Dai Gan-ce. // *Gaoxiaohuaxuegongchengxuebao*. 2019. V. 33. N 6. P. 1394-1400.
228. Shibli S. M. A., Ameen Sha M., Anisha B. L., PonnammaDeepalekshmi, Sadasivuni Kishor Kumar. // *J. Electroanal. Chem.* 2018. V. 826. P. 104-116.
229. Uysal M. // *Metall. Mater. Trans. Sec. A*. 2019. V. 50. N 5. P. 2331-2341.
230. Meng Maozhou, Leech Andrew, Le Huirong. // *Tribol. Int.* 2019. V. 139. P. 59-66.
231. Shen Yuejun, Luo Huajiang, Wang Shaoying, Liu Jingfei. // *Dianduyujingshi*. 2019. V. 41. N 8. P. 1-4.
232. Zhi Li, Zoheir Farhat, Md. Aminul Islam. // *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. V. 29. N 3. P. 1671-1685.
233. Krishnan Athira, Aboobakar Shibli Sheik Muhammadhu. // *J. Ind. Eng. Chem.* 2020. V. 87. P. 198-212
234. Liu Chenhong, Gan Xueping, Zhou Kechao. // *Mater. Corros.* 2020. V. 71. N 6. P. 924-930.
235. Дровосеков А.Б. // *Практика противокорроз. защиты*. 2020. Т. 25. № 2. С. 66-71. Дровосеков А.Б. // *Praktika protivokorroz. zaschity*. 2020. V. 25. N 2. P. 66-71 (in Russian).
236. Sharifalhoseini Zahra, Entezari Mohammad H., Davoodi Ali, Shahidi Mohsen. // *Corros. Sci.* 2020. V. 172. P. 108743.
237. Мухамадиев Н.К., Мирзаева М.А., Катнов В.Е., Холмуродов Т.А., Мирзаев О.О. // *Вестн. КГТУ*. 2020. Т. 23. № 10. С. 55-63. Mukhamadiev N.K., Mirzaeva M.A., Katnov V.E., Kholmurodov T.A., Mirzaev O.O. // *Vestn. KGTU*. 2020. V. 23. N 10. P. 55-63 (in Russian).
238. Скопинцев В.Д., Винокуров Е.Г. // *Хим. технология*. 2020. Т. 21. № 10. С. 434-440. DOI: 10.31044/1684-5811-2020-21-10-434-440. Skopintsev V.D., Vinokurov E.G. // *Khim. Tekhnol.* 2020. V. 21. N 10. P. 434-440 (in Russian). DOI: 10.31044/1684-5811-2020-21-10-434-440.
239. Omar Refaie, OrabyElsayed, Abdelrhman Yasser, Aboraia Mohammed. // *Anti-Corros. Meth. Mater.* 2020. V. 67. N 6. P. 593-603.
240. Fu Xiuqing, Wang Feixiang, Chen Xinxin, Lin Jinran, Cao Hongbing. // *RSC Adv.: Int. J. Further Chem. Sci.* 2020. V. 10. N 56. P. 34167-34176.
241. Мухаметова Г.М., Абрашов А.А., Винокуров Е.Г., Скопинцев В.Д. // *Упрочн. Технол. и покрытия*. 2021. Т. 17. № 2. С. 86-89. Mukhametova G.M., Abrashov A.A., Vinokurov E.G., Skopintsev V.D. // *Uprochn. Tekhnol. Pokrytiya*. 2021. V. 17. N 2. P. 86-89 (in Russian).
242. Sanjay Tikale, Narayan Prabhu K. // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2021. V. 32. N 3. P. 2865-2886.
243. Sajjad Sadeghi, HadiEbrahimifar. // *J. Mater. Eng. Perform.* 2021. V. 30. N 4. P. 2409-2421.
244. Guo Liangshuai, Yu Baoxing, Zhou Peng, Zhang Tao, Wang Fuhui. // *Corros. Sci.* 2021. V. 183. 109329.
245. Shozib I.A., Ahmad A., Rahaman M.S.A., Abdul-Rani A. majdi, Mohammad A.A., Beheshti M., Taufiqurrahman I. // *J. Mater. Res. Technol.* 2021. V. 12. P. 1010-1025.
246. Мухаметова Г.М., Бурухина Т.Ф., Васильев В.В., Винокуров Е.Г., Скопинцев В.Д. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 88-97. Mukhametova G.M., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Vasil'ev V.V., Skopintsev V.D. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 88-97 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216405.6359.
247. Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Напеденина Е.Ю. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 73-81. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Napedenina E.Yu. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 73-81 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6341.

Поступила в редакцию 05.12.2023

Принята к опубликованию 15.01.2024

Received 05.12.2023

Accepted 15.01.2024