



УДК 621.793

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-43-49



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ КАРБИДОВ КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОГО НИКЕЛЬ-ФОСФОРНОГО ПОКРЫТИЯ

Ю. Н. Гойхенберг¹, Д. С. Полухин², Д. А. Жеребцов¹, Е. Г. Бодров²

¹ Южно-Уральский государственный университет (454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76)

² ООО «Научно-технический центр КОНАР» (Россия, 454010, Челябинск, Енисейская ул., 8)

✉ goikhenbergyn@susu.ru

Аннотация. Статья содержит исследования структуры, свойств и коррозионной стойкости в различных кислотах никель-фосфорных покрытий с дисперсными карбидами кремния после кристаллизационного отжига по различным режимам. Установлены температуры начала кристаллизации после нагрева со скоростями 1, 5, 20 °С/мин и процентное содержание образующихся в изотермических условиях кристаллических фаз (фосфида никеля Ni_3P и никеля). Определено, что высокая микротвердость более 1000 HV достигается в композитном никель-фосфорном покрытии с дисперсными частицами карбидов кремния также при длительном низкотемпературном отжиге, сопровождающемся кристаллизацией с образованием уже незначительных (10 %) количеств фосфида никеля. Выявленные дисперсные фосфиды никеля, располагающиеся как в теле, так и по границам зерен, вносят основной вклад в приращение микротвердости. Предел текучести и предел прочности покрытий увеличиваются при кристаллизационном отжиге всего на 12–15 МПа, а относительное удлинение падает до нуля, что обусловлено образованием хрупких соединений фосфида никеля. Отжиг с непродолжительными выдержками при температурах кристаллизации приводит к тому, что карбиды кремния проявляют барьерный эффект, снижая интенсивность образования кристаллического фосфида никеля и коррозионную стойкость, тогда как продолжительные выдержки при более низких температурах кристаллизации формируют порядка 70 % Ni_3P , способствуя стабильно высокой твердости и улучшенным показателям коррозионной стойкости. Коррозионная стойкость композитных покрытий Ni-P + карбиды кремния вне зависимости от режимов термообработки максимальная в уксусной и ортофосфорной кислотах при 70 % фосфида никеля и минимальная в азотной кислоте и ее смесях с другими кислотами.

Ключевые слова: аморфные покрытия, никель-фосфор, карбиды кремния, кристаллизационный отжиг, фосфиды никеля, никель, микротвердость, пластичность, коррозионная стойкость, кислоты

Для цитирования: Гойхенберг Ю.Н., Полухин Д.С., Жеребцов Д.А., Бодров Е.Г. Влияние карбидов кремния на структуру и свойства композитного никель-фосфорного покрытия. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(1): 43–49.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-43-49>

INFLUENCE OF SILICON CARBIDES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL-PHOSPHORUS COMPOSITE COATINGS

Yu. N. Goikhenberg¹, D. S. Polukhin², D. A. Zherebtsov¹, E. G. Bodrov²

¹ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

² Research & Development Center KONAR, LLC (8 Yeniseiskaya Str., Chelyabinsk 455030, Russian Federation)

✉ goikhenbergyn@susu.ru

Abstract. The authors studied the structure, properties, and corrosion resistance in different acids of the nickel-phosphorus coatings with the dispersed silicon carbides after crystallization annealing in different modes. Crystallization onset temperatures after heating at rates of 1, 5, and 20 °C/min and the percentage of crystalline phases formed under isothermal conditions (nickel phosphide Ni_3P and nickel) were determined. It was determined that a high microhardness of more than 1000 HV is achieved in the composite nickel-phosphorus coating with dispersed particles of the silicon carbides also during prolonged low-temperature annealing, accompanied by crystallization with the formation of already insignificant (10 %) amounts of Ni_3P . The revealed dispersed Ni_3P located both inside the grains and along the boundaries of the grains make the main contribution to the increase in microhardness. Yield strength and tensile strength of coatings increase during crystallization annealing by only 12–15 MPa, and elongation drops to zero, due to the formation of the brittle Ni_3P compounds. Annealing with a short-term soaking at crystallization temperatures leads to the fact that the silicon carbides exhibit a barrier effect. This reduces the intensity of the formation of crystalline Ni_3P and corrosion resistance, while a long-term soaking at lower crystallization temperatures forms about 70 % Ni_3P , contributing to consistently high hardness and improved corrosion resistance. Corrosion resistance of the composite Ni-P coatings with the silicon carbides, regardless of heat treatment modes, is maximum in acetic and orthophosphoric acids at the 70 % nickel phosphide and minimum in nitric acid and its mixtures with other acids.

Keywords: amorphous coatings, nickel-phosphorus, silicon carbides, crystallization annealing, nickel phosphides, nickel, microhardness, plasticity, corrosion resistance, acids

For citation: Goikhenberg Yu.N., Polukhin D.S., Zhrebtsov D.A., Bodrov E.G. Influence of silicon carbides on the structure and properties of nickel-phosphorus composite coatings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 43–49. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-43-49>

ВВЕДЕНИЕ

Основными применяемыми технологиями нанесения металлических покрытий являются хромирование и никелирование. В настоящее время никельсодержащие покрытия занимают лидирующие позиции в технологическом процессе защиты деталей [1]. Так композитные никель-фосфорные покрытия обладают значительным сопротивлением износу [2, 3], высокой коррозионной стойкостью [4–7], хорошими адгезией [8] и декоративными свойствами [1]. Перспективным методом упрочнения и защиты деталей несложной формы является метод лазерной наплавки покрытий на основе никеля, обеспечивающий высокие трибологические свойства при высоких температурах (порядка 1000 °C) [9, 10]. Изучаются и совершенствуются методы получения покрытий сверхзвуковой электродуговой металлизацией [11]. Согласно работам [12, 13], наиболее часто применяемые никель-фосфорные покрытия, содержащие порядка 10 % (по массе) фосфора в своем составе, после нанесения аморфны. Последующая термическая обработка в конечном итоге переводит такие покрытия в кристаллическое состояние, которое обеспечивает необходимый уровень свойств.

Как правило, композитные никель-фосфорные покрытия имеют слоистую структуру, в поверхностном слое которой присутствуют дисперсные частицы (карбиды кремния, титана, циркония, алмазного микропорошка [15–18]), способствующие увеличению служебных характеристик. В настоящее время при изготовлении ответственных деталей, используемых в транспортировке нефти и газа, внедряются композитные никель-фосфорные покрытия с дисперсными карбидами кремния, которые увеличивают долговечность изделий.

Цель настоящей работы заключалась в установлении фазового состава композитных никель-фосфорных покрытий с частицами карбидов кремния, который обеспечивает высокую микротвердость более 1000 HV в сочетании с высокой коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На подготовленную шлифованную поверхность стали 09Г2С размером 300×100 и толщиной 4 мм химическим способом с применением гипофосфит-ионов [19, 20] наносили двухслойное никель-фосфорное покрытие толщиной 60 мкм (30 мкм слой Ni-P, 30 мкм слой Ni-P + карбиды кремния), либо однослойное – 60 мкм слой Ni-P следующего состава % (по массе): 89,32 – 90,15 Ni; 9,71 – 10,14 P; 0,10 – 0,22 Si; 0,15 – 0,43 Cu. Кроме

того, на шлифованные листы из нержавеющей стали 08Х18Н10Т толщиной 3 мм наносили в ванне химического никелирования покрытия, которые затем путем изгиба отделяли для дальнейшего исследования.

Процесс кристаллизации отделенных покрытий при непрерывном нагреве в нейтральной атмосфере аргона со скоростями 1, 5 и 20 °C/мин изучали на синхронном термоанализаторе Netzsch STA 449 F1 «Jupiter». По полученным кривым методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) определяли температуры начала кристаллизации и оценивали тепловые эффекты. В изотермических условиях термическую обработку никелированных и отделенных от подложки образцов покрытия производили по заданным режимам в лабораторной муфельной печи LOIP LF-15/11-G1 в окислительной атмосфере.

Микротвердость по Виккерсу измеряли при нагрузке 100 г на полированной поверхности образцов вдавливанием алмазного наконечника на твердомере DuraScan-50 со встроенным программным обеспечением ECOS Workflow по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Погрешность измерений микротвердости составляла ±35 HV. Испытание на растяжение со скоростью 5 мм/мин отделенного от подложки материала покрытия выполняли на плоских образцах размером 20×250×0,06 мм с применением электромеханической разрывной машины Instron усилием 250 кН. Предел прочности и условный предел текучести определяли с погрешностью ±5 МПа, относительное удлинение – с точностью 0,1 %.

Оценку стойкости покрытий к воздействию крайне агрессивных сред осуществляли гравиметрическим методом. Испытание заключалось в помещении материала покрытия на 24 ч в концентрированные кислоты или их растворы при комнатной температуре. До начала эксперимента и после него образцы промывали в этиловом спирте, просушивали и взвешивали с применением лабораторных весов ВЛР-200 с допустимой погрешностью $0,25 \cdot 10^{-3}$ г. Затем рассчитывали потери веса покрытия в процентах.

Исследование структуры покрытий в исходном и отожженном при разных режимах состояниях выполняли с помощью инвертированного микроскопа Olympus GX-51. Поверхность подготовленных шлифов подвергали травлению в течение 10 с методом капли в смеси концентрированных азотной и уксусной кислот.

Электронно-микроскопические исследования структуры проводили на сканирующем растровом электронном микроскопе Jeol JSM-7001F, снабженном энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80, который позволяет определять химический состав

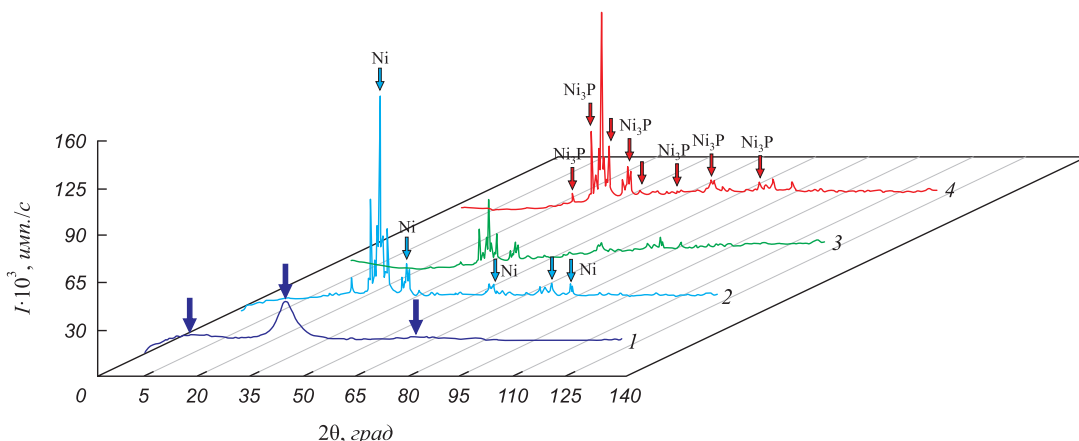


Рис.1. Дифрактограммы композитных покрытий Ni-P + карбиды кремния, подвергнутых отжигу при различных температурах и времени выдержки:
1 – без т/о; 2 – 450 °C (0,5 ч); 3 – 420 °C (1 ч); 4 – 390 °C (2 ч)

Fig. 1. X-ray diffractograms of the composite Ni-P coatings with the silicon carbides annealed at different temperatures and for different soaking time:
1 – without heat treatment; 2 – 450 °C (0.5 h); 3 – 420 °C (1 h); 4 – 390 °C (2 h)

отдельных структурных составляющих и строить карты распределения в них различных элементов.

Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометрах ДРОН-4-07 в железном излучении и Rigaku “Ultima IV” в излучении медного анода. Качественный и количественный фазовый анализ осуществляли по методу Ритвельда [21] после оптимизации интерференционных максимумов. Точность количественного фазового анализа составляла $\pm 5\%$. Размеры областей когерентного рассеивания (ОКР) определяли методами Вильямсона-Холла и Гальдера-Вагнера [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что после нанесения на стальные подложки покрытия, содержащие около 10 % (по массе) фосфора и порядка 1,0 % дисперсных частиц карбидов кремния, находятся в аморфном состоянии. На дифрактограмме таких покрытий, не подвергавшихся термической обработке (т/о), интерференционные максимумы отсутствуют, а фиксируются лишь несколько гало (обозначены стрелками) разной интенсивности в широком диапазоне углов отражения 2θ (рис. 1, кривая 1).

Микротвердость исходных Ni-P покрытий составляет около 400 HV, а при добавлении в раствор 1 % частиц карбидов кремния увеличивается до 600 HV, что также ниже требуемых по техническим условиям значений 1000 HV [23]. Прочностные свойства и свойства пластичности покрытий (табл. 1) после их нанесения низкие (относительное удлинение изменяется от 0 до 1,5 %).

Нагрев никель-фосфорных покрытий приводит к кристаллизации и росту микротвердости до требуемых значений (более 1000 HV).

Температура начала кристаллизации композитного Ni-P покрытия с частицами карбидов кремния нахо-

дится выше 300 °C при непрерывном нагреве и в значительной мере зависит от скорости нагрева, а существенный экзотермический тепловой эффект при этом изменяется незначительно (рис. 2).

При нагреве образцов выше температуры кристаллизации на дифрактограммах появляются дифракционные максимумы (см. рис. 1), что свидетельствует о возникновении кристаллических фаз в покрытии. Их идентификация показала, что после кристаллизации, кроме карбидов SiC и Si_3C_3 , в покрытии присутствуют закристисталлизовавшийся никель и выделившееся соединение Ni_3P . Наблюдаемая структура покрытия однородная, мелкозернистая с размером зерен 6 – 14 мкм и размером частиц карбидов кремния 0,5 – 1,5 мкм (рис. 3, а).

Кристаллизация покрытия Ni-P + карбиды кремния получает заметное развитие в изотермических условиях при более низкой, чем при непрерывном нагреве, температуре. Так после 24 ч выдержки при 280 °C в покрытиях, находящихся на стальной подложке, выявляется около 10 % Ni_3P (табл. 2). При повышении температуры или увеличении времени отжига количество выделив-

Таблица 1

Механические свойства отделенных от подложки Ni-P покрытий с карбидами кремния

Table 1. Mechanical properties of the Ni-P coatings with the silicon carbides separated from the substrate

Микротвердость, HV	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	δ , %
до т/о			
600	177	172	0 – 1,5
после т/о			
1012 – 1080	189	187	0

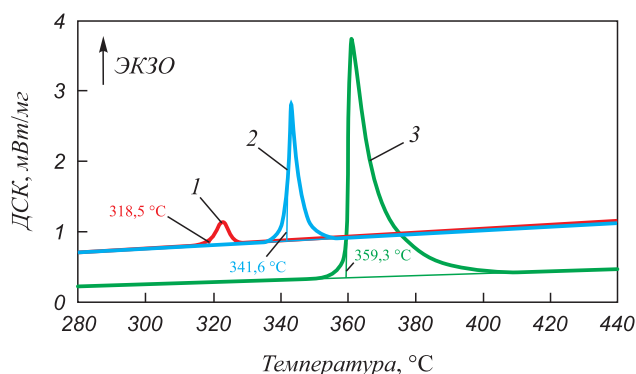


Рис. 2. Кривые ДСК, полученные при нагреве в аргоне со скоростями:
1 – 1 °C/мин (89,1 Дж/г); 2 – 5 °C/мин (87,2 Дж/г);
3 – 20 °C/мин (87,3 Дж/г)

Fig. 2. DSC curves for heating in argon at the following rates:
1 – 1 °C/min (89.1 J/g); 2 – 5 °C/min (87.2 J/g);
3 – 20 °C/min (87.3 J/g)

шегося кристаллического фосфида никеля увеличивается почти до 70 % (табл. 2).

Заметим, что в покрытиях, содержащих дисперсные частицы карбидов кремния, доля последних не превышала 1 % и потому при количественном анализе фазового состава в расчете они не учитывались.

При увеличении содержания фосфида никеля в составе покрытия после 15 мин выдержки при температуре 390 °C микротвердость увеличивается от исходных значений в 600 HV до средних 976 HV и до 1057 HV после выдержки 120 мин, когда образуется 71 % Ni_3P (табл. 3).

При повышении температуры до 420 °C аналогичная высокая твердость образцов достигается за меньшее время. Во всех диапазонах выдержек при указанной температуре обеспечивается твердость со стабильно получаемыми значениями более 1000 HV.

Таблица 2

Размер ОКР, количество кристаллического никеля (C_{Ni}) и процентное содержание фосфида никеля ($C_{\text{Ni}_3\text{P}}$) в покрытии после различных режимов т/о

Table 2. SCR size, amount of crystalline nickel (C_{Ni}), and percentage of nickel phosphide ($C_{\text{Ni}_3\text{P}}$) in the coating after different heat treatment modes

Режим отжига	Размер ОКР, нм	C_{Ni} , %	$C_{\text{Ni}_3\text{P}}$, %
280 °C – 24 ч	13,5	89	10
390 °C – 1,0 ч	20,9	75	24
390 °C – 2,0 ч	18,7	28	71
420 °C – 0,5 ч	16,0	78	21
420 °C – 1,0 ч	15,9	34	65
420 °C – 2,0 ч	25,5	32	67
450 °C – 0,5 ч	18,4	68	31

При повышении температуры отжига до 450 °C микротвердость оказывается максимальной после 30 мин выдержки, а затем наблюдается ее снижение за счет коагуляции фаз и выгорания фосфора с поверхности с образованием характерного синеватого оттенка. В случае суточной выдержки при 280 °C формирующаяся структура создает столь же высокую твердость $\text{HV}_{\text{сред}} = 1016$ (1033, 1004, 1023, 1033, 985) HV.

Высокой микротвердости покрытий после т/о соответствуют низкие показатели предела текучести и предела прочности, которые увеличиваются всего на 12 – 15 МПа. В результате термической обработки покрытия становятся настолько хрупкими, что их пластичность падает до нуля. Такие изменения свойств покрытий при т/о обусловлены в основном образованием имеющих высокую микротвердость, но хрупких соединений фосфида никеля.

Выявить места расположения фосфидов никеля помогла карта распределения фосфора в микрообъемах, на которой видны участки его локализации, а фосфор в данном покрытии входит в соединение Ni_3P . Таким образом по местам локализации фосфора было установлено, что фосфиды никеля располагаются как в теле, так и по границам зерен. При этом после часового отжига при 420 °C на всех границах зерен наблюдаются выделения фосфидов никеля. Видимые на электронно-микроскопическом изображении внутри и на границах зерен фосфиды никеля обозначены стрелками (рис. 3, б).

Анализ тонкой структуры покрытий после кристаллизационного отжига по разным режимам свидетельствует о том, что размеры ОКР, определенные методами Вильямсона-Холла и Гальдера-Вагнера, близки и изменяются в кристаллическом никеле от 10 до 25 нм (см. табл. 2), а в фосфиде никеля они немного больше и колеблются в пределах 15 – 30 нм. В соответствие с данными табл. 2, чем ниже температура отжига и меньше время выдержки, тем меньше размер образовавшихся ОКР.

При изучении коррозионной стойкости покрытий к воздействию различных агрессивных сред в виде

Таблица 3

Микротвердость покрытий Ni-P + карбиды кремния после отжига при различных температурах и времени выдержки (τ)

Table 3. Microhardness of the Ni-P coatings with the silicon carbides after annealing at different temperatures and for different soaking time (τ)

τ , мин	Микротвердость, $\text{HV}_{\text{ср}}$		
	390 °C	420 °C	450 °C
15	976	1047	1002
30	989	1049	1061
60	1047	1062	1021
120	1057	1039	1018

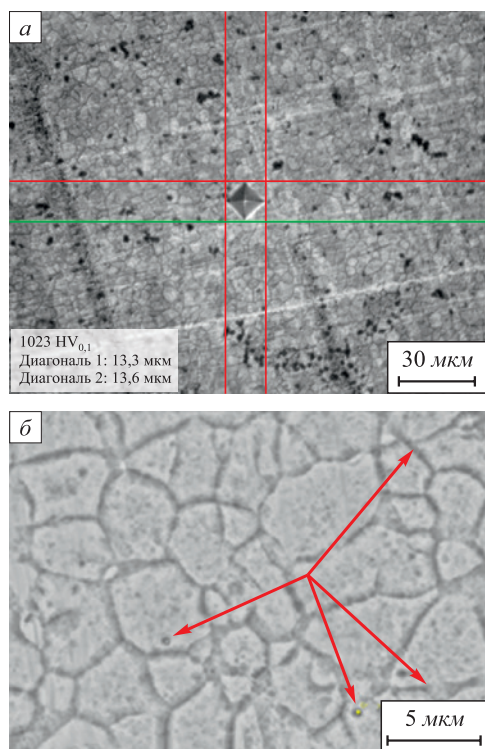


Рис. 3. Микроструктура покрытия Ni-P + карбиды кремния после отжига при 420 °С в течение 1 ч: а – $\times 400$; б – РЭМ, $\times 5000$

Fig. 3. Microstructure of the Ni-P coating with the silicon carbides after annealing at 420 °C for 1 h: а – $\times 400$; б – SEM, $\times 5000$

кислот и их растворов, являющейся, наряду с высокой твердостью, важнейшим показателем качества, установлено, что исследуемое покрытие Ni-P + карбиды кремния наибольшей коррозионной стойкостью обладает против уксусной и ортофосфорной кислот вне зависимости от проведенной т/о. Наиболее агрессивной средой для таких покрытий после суточных испытаний является азотная кислота и ее смесь с другими кислотами или даже ее разбавленный дистиллированной водой раствор. При суточных испытаниях в азотной кислоте и ее растворах происходит полное растворение покрытий (рис. 4, кривая 5). В то же время максимальные суточные потери массы при выдержке в серной кислоте меньше и составляют 5,3 %, а в соляной – 11,2 %, что также меньше, чем в азотной.

Кроме того, установлена зависимость коррозионной стойкости покрытий Ni-P + карбиды кремния от количественного фазового состава. Она оказывается максимальной после 2 ч выдержки при 390 °С (рис. 4) или 1 ч выдержки при 420 °С, когда образуется около 70 % Ni_3P , стойкость которого больше, чем у чистого никеля или других его соединений с фосфором. Наличие дисперсных карбидов кремния приводит к снижению потери массы образцов по сравнению с чистым Ni-P покрытием [24]. Введение карбида кремния в качестве дисперсной фазы, создающей барьерный

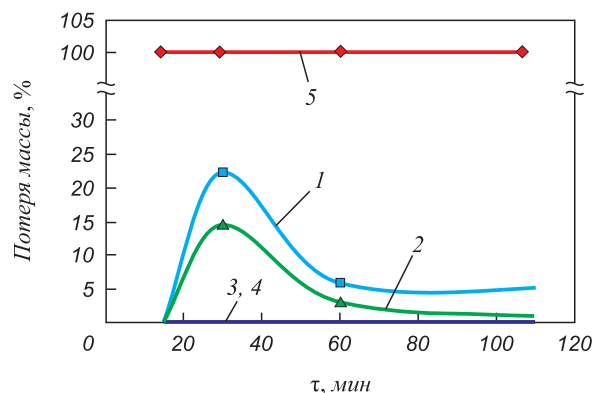


Рис. 4. Потеря массы в зависимости от времени т/о при 390 °С Ni-P покрытий с карбидами кремния после их суточной выдержки в концентрированных соляной (1), серной (2), уксусной (3), ортофосфорной (4) и азотной (5) кислотах

Fig. 4. Weight loss (%) vs. heat treatment period at 390 °C for the Ni-P coatings with the silicon carbides after a 24 h exposure to concentrated hydrochloric (1), sulfuric (2), acetic (3), orthophosphoric (4) and nitric (5) acids

эффект для образования фосфидов никеля, позволяет достичь поставленных целей с применением более длительной обработки при более низких температурах, что также положительно сказывается на основных служебных характеристиках покрытия – высокой микротвердости и коррозионной стойкости.

Выводы

Требуемая по техническим условиям микротвердость 1000 HV достигается в композитном никель-фосфорном покрытии с дисперсными частицами карбидов кремния при длительном низкотемпературном отжиге, сопровождающемся кристаллизацией с образованием незначительных (10 %) количеств фосфида никеля.

Выявленные дисперсные фосфиды никеля, образующиеся при кристаллизации и располагающиеся как в теле, так и по границам зерен, вносят основной вклад в приращение микротвердости.

Максимальная коррозионная стойкость покрытий в различных кислотах в сочетании с высокой микротвердостью реализуется при больших (70 %) содержаниях фосфида никеля, количество которого увеличивается с повышением температуры или увеличением времени отжига.

При значительном повышении микротвердости покрытий с исходных 600 до требуемых 1000 HV после кристаллизационного отжига предел текучести и предел прочности увеличиваются всего на 12 – 15 МПа, а относительное удлинение падает до нуля, что обусловлено образованием хрупких соединений фосфида никеля.

Термическая обработка покрытий Ni-P + карбиды кремния формирует однородную, мелкозернистую структуру с размером зерен 6 – 14 мкм и размером ОКР: 10 – 25 нм в никеле, 15 – 30 нм в фосфиде никеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Москвитин Г.В., Биргер Е.М., Поляков А.Н., Полякова Г.Н. Современные упрочняющие покрытия критических деталей механизмов и инструмента. *Металлообработка*. 2015; (2(86)): 22–27.
Moskvitin G.V., Birger E.M., Polyakov A.N., Polyakova G.N. Modern reinforcing coatings of critical parts of mechanisms and tools. *Metallrobrabotka*. 2015; (2(86)): 22–27. (In Russ.).
2. Alexis J., Etcheverry B., Beguin J.D., Bonino J.P. Structure, morphology and mechanical properties of electrodeposited composite coatings Ni-P/SiC. *Materials Chemistry and Physics*. 2010; 120: 244–250.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.12.013>
3. Асланян И.Р., Шустер Л.Ш. Изнашивание электролитических Ni-P покрытий при трении скольжения. *Труды ВИАМ*. 2015; (3): 52–61.
Aslanyan I.R., Shuster L.Sh. Wear of electrolytic Ni-P coatings during sliding friction. *Trudy VIAM*. 2015; (3): 52–61. (In Russ.).
4. Дровосеков А.Б., Иванов М.В., Полякова О.А., Цупак Т.Е. Коррозионные свойства и защитная способность химико-каталитических Ni-P покрытий. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2011; 19(4): 41–46.
Drovoisekov A.B., Ivanov M.V., Polyakova O.A., Tsupak T.E. Corrosion properties and protective power of Ni-P coatings. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2011; 19(4): 41–46. (In Russ.).
5. Ahmadkhaniha D., Eriksson F., Leisner P., Zanella C. Effect of SiC particle size and heat-treatment on microhardness and corrosion resistance of Ni-P electrodeposited coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018; 769: 1080–1087.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.013>
6. Bahramian A., Eyraud M., Vacandio F., Knauth P. Improving the corrosion properties of amorphous Ni-P thin films using different additives. *Surface and Coatings Technology*. 2018; 345: 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.075>
7. Afroukhteh S., Dehghanian C., Emamy M. Preparation of the Ni-P composite coating co-deposited by nano TiC particles and evaluation of its corrosion property. *Applied Surface Science*. 2012; 28(7): 2597–2601.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.101>
8. Рябченков А.В., Овсянkin В.В., Зотьев Ю.А. О влиянии термической обработки химически никелированной стали на состав и защитные свойства никель-фосфорных покрытий. *Защита металлов*. 1969; 5: 638–642.
Ryabchenkov A.V., Ovsyankin V.V., Zot'ev Yu.A. On the effect of heat treatment of chemically nickel-plated steel on composition and protective properties of nickel-phosphorus coatings. *Zashchita metallov*. 1969; 5: 638–642. (In Russ.).
9. Makarov A.V., Korobov Yu.S., Soboleva N.N., Khudorozhkova Yu.V., Vopneruk A.A., Balu P., Barbosa M., Malygina I.Y., Burov S.V., Stepchenkov A.K. Wear resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications. *Letters on Materials*. 2019; 9(4): 470–474.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-4-470-474>
10. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малигина И.Ю., Осинцева А.Л. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi–TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013; (11): 38–44.
Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The formation of NiCrBSi–TiC composite coating with increased abrasive wear resistance by gas powder laser cladding. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2013; (11): 38–44. (In Russ.).
11. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Деев В.Б., Дударева Н.Ю. Свойства покрытий, полученных сверхзвуковой электродуговой металлизацией с аэрозольным флюсованием. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022; 65(9): 637–643. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-637-643>
Kolomeichenko A.V., Logachev V.N., Deev V.B., Dudareva N.Yu. Properties of coatings obtained by supersonic electric arc metallization with aerosol fluxing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022; 65(9): 637–643. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-637-643>
12. Pillai A.M., Rajendra A., Sharma A.K. Electrodeposited nickel-phosphorous (Ni – P) alloy coating: An in-depth study of its preparation, properties, and structural transitions. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2012; 9(6): 785–797. <https://doi.org/10.1007/s11998-012-9411-0>
13. Buchtík M., Krystýnová M., Másilko J., Wasserbauer J. The effect of heat treatment on properties of Ni-P coatings deposited on AZ91 magnesium alloy. *Coatings*. 2019; 9(7): 461. <https://doi.org/10.3390/coatings9070461>
14. Горбунова К.М., Никифорова А.А. *Физико-химические основы процесса химического никелирования*. Москва: АН СССР; 1960: 7–194.
Gorbunova K.M., Nikiforova A.A. *Physico-Chemical Basics of Chemical Nickel Plating*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1960: 7–194. (In Russ.).
15. Соцкая Н.В., Доброзракова А.Д., Аристов И.В., Рябинина Е.И. Особенности образования композиционных покрытий с включением алмазного микропорошка методом химического никелирования. *Теория и практика сорбционных процессов*. 1998; (3): 114–120.
Sotskaya N.V., Dobrozrakova A.D., Aristov I.V., Ryabinina E.I. Features of the formation of composite coatings with inclusion of diamond micro-powder by chemical nickel plating. *Teoriya i praktika sorbtionnykh protsessov*. 1998; (3): 114–120. (In Russ.).
16. Mainier F., Fonseca M.C., Tavares S., Pardal J. Quality of electroless Ni-P coatings applied in oil production equipment with salinity. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2013; 1(06): 1–8.
<https://doi.org/10.4236/msce.2013.16001>
17. Joseph A., Narayanasamy M., Kirybasankar B., Angaiah S. Development of MoS₂ nanosheets embedded nickel composite coating and its mechanical properties. *ES Materials & Manufacturing*. 2018; 2: 2–8.
<https://www.doi.org/10.30919/esmm5f152>
18. Osama F., Radwan A.B., Sliem M.H., Abdullah B.M., Hasan A., Shakoor R.A. Investigating the properties of electrodeposited of Ni-P-ZrC nanocomposite coatings. *ACS Omega*. 2021; 6: 33310–33324.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03117>
19. Горбунова К.М., Иванов М.В. *Химические методы осаждения металлов (химическое никелирование и кобальтирование): Справочник*. Москва: Металлургия; 1987: 365–401.

- Gorbunova K.M., Ivanov M.V. *Chemical Methods of Metal Deposition (Chemical Nickel Plating and Cobalting): Handbook*. Moscow: Metallurgiya; 1987: 365–401. (In Russ.).
20. Гамбург Ю.Д. *Химическое никелирование (получение никель-фосфорных покрытий путем электрокаталитического восстановления гипофосфитом)*. Москва: РАН; 2020: 82.
- Gamburg Yu.D. *Chemical Nickel Plating (Obtaining Nickel-Phosphorus Coatings by Electrocatalytic Reduction with Hypophosphite)*. Moscow: RAS; 2020: 82. (In Russ.).
21. Кржижановская М.Г., Фирсова В.А., Бубнова Р.С. *Применение метода Ритвельда для решения задач порошковой дифрактометрии: Учебное пособие*. Санкт-Петербургский университет; 2016: 67.
- Krzhizhanovskaya M.G., Firsova V.A., Bubnova R.S. *Application of the Rietveld Method for Solving Problems of Powder Diffractometry. Manual*. St. Petersburg University; 2016: 67. (In Russ.).
22. Izumi F., Ikeda T. Implementation of the Williamson–Hall and Halder–Wagner methods into RIETAN-FP. *Annual Report of Advanced Ceramics Research Center*. 2014; 3: 33–38.
23. Гойхенберг Ю.Н., Полухин Д.С. Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки различного состава. *Черные металлы*. 2022; (4): 46–49.
<http://doi.org/10.17580/chm.2022.04.08>
- Goikhenberg Yu.N., Polukhin D.S. Structure, properties and quality of composite nickel-phosphorus coating applied to steel substrates of various composition. *Chernye metally*. 2022; (4): 46–49. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17580/chm.2022.04.08>
24. Полухин Д.С., Гойхенберг Ю.Н., Бодров Е.Г. Коррозионная стойкость композитного никель-фосфорного покрытия в различных агрессивных средах. *Вопросы материаловедения*. 2022; (3(111)): 98–108.
<http://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-98-108>
- Polukhin D.S., Goikhenberg Yu.N., Bodrov E.G. Corrosion resistance of composite nickel-phosphorus coating in various aggressive media. *Voprosy materialovedeniya*. 2022; (3(111)): 98–108. (In Russ.).
<http://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-98-108>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Нафтулович Гойхенберг, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет
E-mail: goikhenbergyn@susu.ru

Дмитрий Сергеевич Полухин, исполнительный директор, ООО «Научно-технический центр КОНАР»
E-mail: polukhin.dmitriy@konar.ru

Дмитрий Анатольевич Жеребцов, д.х.н., старший научный сотрудник кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет
E-mail: zherebtcovda@susu.ru

Евгений Геннадьевич Бодров, директор, ООО «Научно-технический центр КОНАР»
E-mail: bodrov.evgeniy@konar.ru

Yurii N. Goikhenberg, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Prof. of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
E-mail: goikhenbergyn@susu.ru

Dmitrii S. Polukhin, Executive Director, LLC “Scientific and Technical Centre KONAR”
E-mail: polukhin.dmitriy@konar.ru

Dmitrii A. Zherebtsov, Dr. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
E-mail: zherebtcovda@susu.ru

Evgenii G. Bodrov, Director, LLC “Scientific and Technical Centre KONAR”
E-mail: bodrov.evgeniy@konar.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. Н. Гойхенберг – определение концептуального направления исследования и перечня используемой литературы; консолидация экспериментальных данных; совместная интерпретация результатов и формулировка выводов.

Д. С. Полухин – подготовка материала исследования, изучение и формирование перечня цитируемой литературы; выполнение исследований по механическим свойствам и коррозионной стойкости; совместная интерпретация результатов и формулировка выводов.

Д. А. Жеребцов – разработка и согласование плана и методики выполнения экспериментальной части работы с другими участниками; совместная интерпретация результатов и формулировка выводов.

Е. Г. Бодров – выполнение рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований; совместная интерпретация результатов и формулировка выводов.

Yu. N. Goikhenberg – determination of the conceptual research direction, literary review, consolidation of experimental data, joint interpretation of the results, formulation of the conclusions.

D. S. Polukhin – preparation of the research material, literary review, performing studies on mechanical properties and corrosion resistance, joint interpretation of the results, formulation of the conclusions.

D. A. Zherebtsov – development and coordination of the experimental work, joint interpretation of the results, formulation of the conclusions.

E. G. Bodrov – performing X-ray diffraction and electron microscopic studies, joint interpretation of the results, formulation of the conclusions.

Поступила в редакцию 03.11.2022
После доработки 23.12.2022
Принята к публикации 30.12.2022

Received 03.11.2022
Revised 23.12.2022
Accepted 30.12.2022