

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 12Х1МФ¹

© 2022 г. М. К. Даутбеков^{а, с, *}, Б. К. Рахадиллов^с, Л. Г. Журерова^б,
Д. Н. Какимжанов^{а, с}, С. Л. Елистратов^д, Т. А. Сегеда^а

^аВосточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
ул. Д. Серикбаева, д. 19, г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанская обл., 070010 Республика Казахстан

^бВосточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова,
ул. 30-й Гвардейской Дивизии, д. 34, г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанская обл., 070020 Республика Казахстан

^сТоварищество с ограниченной ответственностью PLASMASCIENCE,
ул. Д. Серикбаева, д. 37, г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанская обл., 070010 Республика Казахстан

^дНовосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, д. 20, г. Новосибирск, 630073 Россия

*e-mail: merkhatd@gmail.com

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 01.06.2022 г.

Принята к публикации 06.06.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$, нанесенных способом детонационного напыления на теплоустойчивую сталь 12Х1МФ, в том числе влияния технологических параметров процесса нанесения покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$ на его структуру и свойства. При испытаниях была использована детонационная пушка с одним дозатором. Напыление детонационной пушкой — это один из методов термического формирования защитного слоя на поверхности, отличающийся тем, что позволяет получать твердые, износостойкие и плотные микроструктурированные покрытия. В качестве горючего газа служила ацетилено-кислородная смесь, которая наиболее часто применяется при детонационном напылении порошковых материалов. Импульс азота или воздуха используется для продувки ствола после каждой детонации. Этот процесс повторяется много раз в секунду. Высокая кинетическая энергия частиц горячего порошка при ударе о подложку приводит к образованию очень плотного и прочного покрытия. Полученные покрытия имеют неоднородную слоистую структуру с порами и волнообразным расположением структурных составляющих со слоисто-пористой структурой толщиной 60–120 мкм. На границе раздела подложки и покрытия отсутствуют поры и трещины. В качестве основного параметра измерения шероховатости поверхности выбрано среднее арифметическое отклонение профиля R_a . Установлено, что при 64%-ном заполнении объема ствола детонационной пушки взрывчатой смесью поверхность обработанного образца обладает низкой степенью износа. Приведены результаты исследования влияния детонационного напыления на структурно-фазовый состав и трибологические свойства покрытий методом рентгеноструктурного анализа, согласно которым образуются фазы Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_3O_6 , Cr_{23}C_6 и CrNi_3 , определены микротвердость, шероховатость и трибологические свойства полученных покрытий.

Ключевые слова: $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$, детонационный способ напыления, теплоустойчивая сталь, износостойкость, теплоэнергетика, тепловые электрические станции, надежность

DOI: 10.56304/S0040363622120013

В Республике Казахстан более 79% электроэнергии вырабатывается при сжигании угля, причем более половины тепловых электростанций (ТЭС) имеют средний срок эксплуатации свыше

30 лет. Большая часть оборудования выработала свой проектный и нормативный ресурсы, что обуславливает снижение надежности их эксплуатации. Актуальным остается вопрос предотвращения отказов имеющегося оборудования вследствие накопления его внутренних и внешних повреждений. В работе [1] сделано заключение о

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09261164).

том, что возможна эксплуатация некоторых элементов оборудования, хотя установленный срок их службы существенно превышен, при условии назначения надлежащего контроля в процессе эксплуатации.

В настоящее время актуальной задачей является повышение надежности и долговечности изделий, эксплуатационные характеристики которых определяются свойствами их рабочих поверхностей. Одним из наиболее перспективных способов улучшения эксплуатационных свойств и увеличения долговечности изделий является нанесение на их поверхности функциональных покрытий с использованием различных технологий напыления [2, 3].

На коррозионные и эрозионные процессы на поверхностях нагрева оборудования (наружной поверхности труб) ТЭС влияют составы топлива и газообразных продуктов горения. Характеристики угля, используемого на тепловых электростанциях, не всегда соответствуют их проектным параметрам. При сжигании непроектного угля интенсивнее разрушается основное оборудование, так как его детали спроектированы и изготовлены из сплавов металлов, характеристики которых специально подбирались под химические параметры топлива конкретного вида. В свою очередь, замена проектного топлива приводит к изменению условий функционирования котельных агрегатов и технологической схемы ТЭС [4].

Уголь низкого сорта может содержать ванадий, натрий и серу в качестве примесей. В процессе горения сера и натрий вступают в реакцию друг с другом с образованием Na_2SO_4 . Ванадий взаимодействует с кислородом, в результате чего образуются V_2O_5 и комплекс ванадата (зола). Эти соединения накапливаются на поверхностях нагрева и приводят к их коррозии. Золотые отложения могут разрушить защитный оксидный слой, который образуется на материалах естественным путем, и вызывают деградацию материала вследствие горячей коррозии. Последствия данного процесса — прекращение работы оборудования и необходимость его ремонта. В целях преодоления этих негативных проявлений возможны замена материала, используемого в энергетических установках ТЭС, или формирование на поверхности нагрева нерастворимого покрытия, которое защищает материалы от коррозии.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОКРЫТИЯ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$

Покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$ обладает стойкостью к окислению и коррозии и потому широко применяется для снижения износа элементов оборудо-

вания при воздействии высоких температур (500–900°C) и агрессивных сред [5]. Для нанесения покрытий из порошка $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$ можно использовать различные методы газотермического напыления, такие как HVOF, Cold Spraying, детонационное напыление, атмосферное плазменное напыление и др. Однако вследствие пористости и недостаточной твердости покрытия возможен преждевременный выход из строя элементов конструкции работающих частей оборудования в условиях интенсивного эрозионно-коррозионного износа и адгезии [6]. Тем не менее покрытия, нанесенные методом детонационного напыления, по сравнению с покрытиями, полученными газотермической обработкой поверхности [7], более эффективно защищают от эрозии и коррозии, а также обладают повышенной жаропрочностью. С помощью детонационного напыления можно получать покрытия при меньшем нагреве подвергаемой обработке детали, что позволяет избежать деформации подложки в процессе напыления, а также исключить неблагоприятные явления, сопутствующие нагреву детали, такие как насыщение поверхности газами [8].

Авторы работы [9] обнаружили, что после нанесения покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$ методом детонационного напыления значительно уменьшается интенсивность эрозионно-коррозионных процессов и окисления по сравнению с покрытиями, полученными методом HVOF. Это может быть связано с образованием оксидной пленки Cr_2O_3 . При изучении покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$, полученных методом детонационного напыления [10, 11], определено влияние оксидной пленки Cr_2O_3 на окислительно-эрозионные свойства котельных сталей. Обнаружено, что образование богатой оксидом хрома накипи способствует лучшему сопротивлению котельной стали процессам окисления и эрозии.

Целью данной работы является исследование влияния технологических параметров детонационного напыления на фазовый состав, твердость и трибологические свойства покрытий на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$ на поверхностях деталей энергетического оборудования тепловых электрических станций.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе приведены результаты исследования покрытий из порошка $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—NiCr}$, нанесенных детонационным комплексом CCDS2000 (computer-controlled detonation spraying), включающим в себя систему электромагнитных газовых кла-

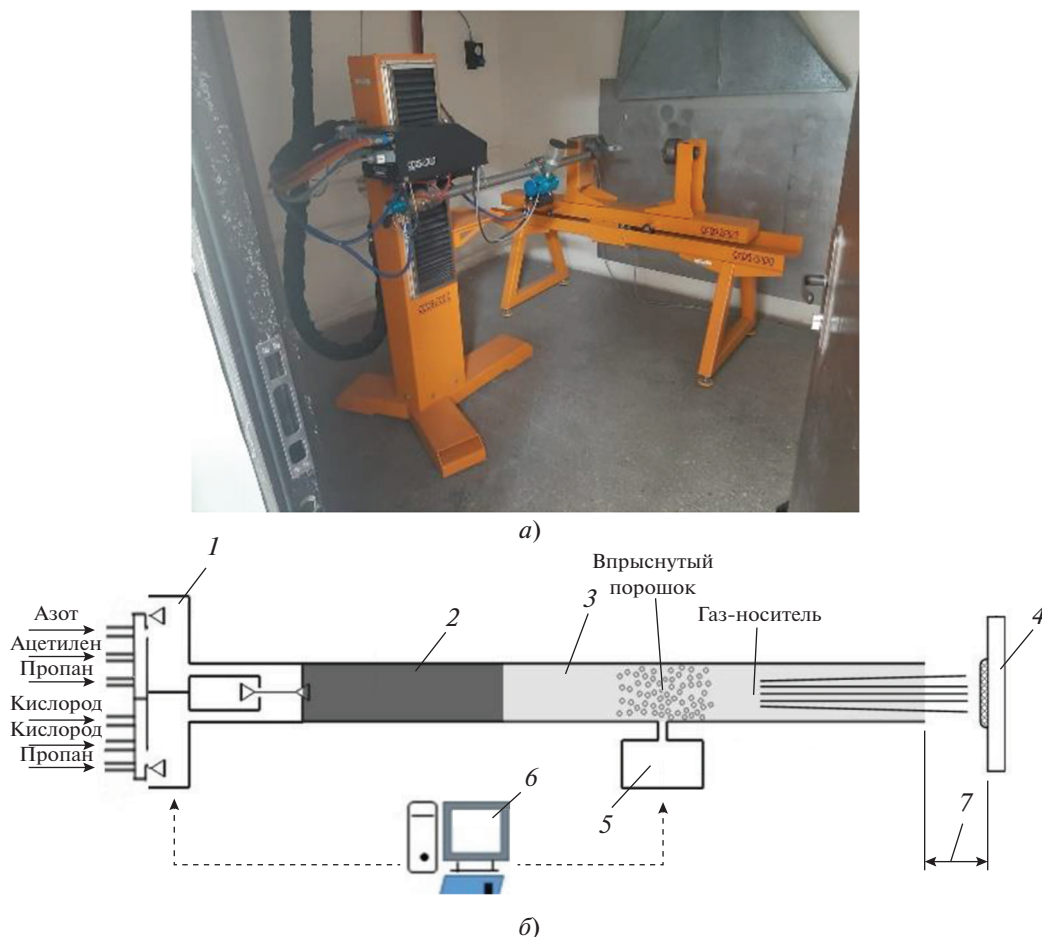


Рис. 1. Общий вид детонационного комплекса CCDS2000 (а) и принципиальная схема установки (б).

1 – газораспределительная система; 2 – воспламенительная камера; 3 – ствол; 4 – манипулятор для подложки; 5 – дозатор порошка; 6 – компьютер; 7 – дистанция напыления

панов, которые контролируют количество взрывчатой смеси, расходуемой на каждый выстрел пушки, расход кислорода, а также управляют продувкой системы [12].

Общий вид детонационной пушки и ее принципиальная схема показаны на рис. 1. Ствол детонационной пушки заполняется газами, расход которых контролируется с помощью встроенного компьютера. После заполнения ствола в него подают определенную порцию взрывчатой смеси таким образом, чтобы образовалась слоистая газовая среда, состоящая из заряда взрывчатого вещества и газа-носителя (азота). При впрыскивании в ствол порошка (с помощью управляемого компьютером питателя) образуется газопорошковая среда. После того как часть порошка впрыснута в ствол, компьютер выдает сигнал на инициирование детонации с помощью электрической искры. Во взрывчатой смеси образуется детонационная волна, которая переходит в ударную

волну. Продукты детонации, нагретые до 3500–4500°C, и газа-носителя, нагретого ударной волной до 1000–1500°C, направляются к выходу из канала ствола со сверхзвуковой скоростью. Время взаимодействия газов с распыляемыми частицами составляет 2–5 мс. Диаметр прямого ствола детонационной пушки равен 20 мм. В качестве напыляемого материала использовали композитный порошок фирмы H.C. Starck 584.054 Cr_3C_2 –NiCr с частицами размером 10–45 мкм [12–14].

Образцы подложки были изготовлены из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ следующего химического состава, % [15]:

Углерод.....	0.10–0.18
Кремний.....	0.15–0.35
Марганец.....	0.30–0.60
Никель.....	До 0.3

Сера.....	До 0.035
Фосфор.....	До 0.035
Хром.....	0.9–1.2
Молибден.....	0.50–0.65
Ванадий.....	0.25–0.35
Медь.....	До 0.2
Железо.....	96

Такая сталь используется для изготовления деталей, работающих в нагруженном состоянии в течение длительного времени, в том числе и для производства энергетического оборудования тепловых электростанций (поверхности нагрева котлов). Образцы перед нанесением покрытия подвергали пескоструйной обработке.

Для реализации восстановительных условий напыления при неполном сгорании с образованием интерметаллида было выбрано соотношение содержания $O_2/C_2H_2 = 1.856$. По мере увеличения объема взрывчатой смеси (от 51 до 64% объема ствола) повышается температура нагрева частиц во время их движения внутри ствола [14]. При дистанции напыления 150 мм и количестве выстрелов 20 объем заполнения ствола составил: 51% для образца № 1, 58% для образца № 2, 64% для образца № 3.

Дифракционные исследования образцов выполняли с использованием традиционных методов рентгеновской дифракции — определения угловых положений, интенсивностей и профилей дифракционных отражений методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре X'PertPRO. Съемку дифрактограмм проводили с использованием CuK_{α} -излучения ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) при напряжении в трубке 40 кВ, токе в трубке 30 мА, времени экспозиции 1 с, шаге съемки 0.02° . Расшифровку

результатов проводили с помощью программы HighScore. Шероховатость поверхности покрытий оценивали с использованием среднего арифметического отклонения профиля R_a по ГОСТ [16] с помощью профилометра модели 130 на отрезке длиной 7 мм на поверхности образца. Микротвердость образцов измеряли в соответствии с [17] по методу Виккерса на микротвердомере “Метолаб-502” при нагрузках на индентор 1 Н и времени выдержки 10 с. Трибологические испытания на трение и скольжение проводили на трибометре TRB³ с использованием стандартной методики шар — диск (стандарты ASTM G 133-95 и ASTM G 99). В качестве контртела применяли шарик диаметром 6.0 мм из стали ШХ15. Испытание выполняли при нагрузке 10 Н, линейной скорости 2 см/с, радиусе кривизны износа 3 мм и пути трения 22 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлены микроснимки поперечных сечений детонационного покрытия образцов на основе Cr_3C_2-NiCr , полученные с помощью металлографического микроскопа модели “Альтами MET 5S”, которые демонстрируют высокую плотность на границе раздела подложки с покрытием. Наблюдаются слоисто-пористая структура толщиной 60–120 мкм и отсутствие пор и трещин на границе раздела.

Графики распределения микротвердости по толщине покрытий Cr_3C_2-NiCr при разном объеме заполнения ствола пушки взрывчатой смесью приведены на рис. 3. Средняя микротвердость покрытий на основе Cr_3C_2-NiCr составляет $(1130 \pm 55) \text{ HV}$ для образца № 1, $(1006 \pm 60) \text{ HV}$ для образца № 2 и $(1004 \pm 60) \text{ HV}$ для образца № 3.

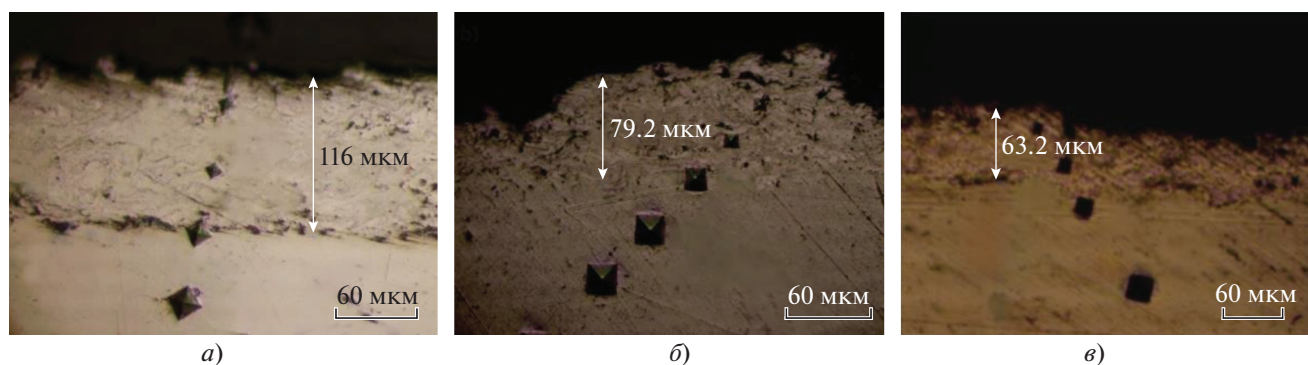


Рис. 2. Микроснимки поперечного сечения образцов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в). Плотность покрытия, %: а — 51; б — 58; в — 64

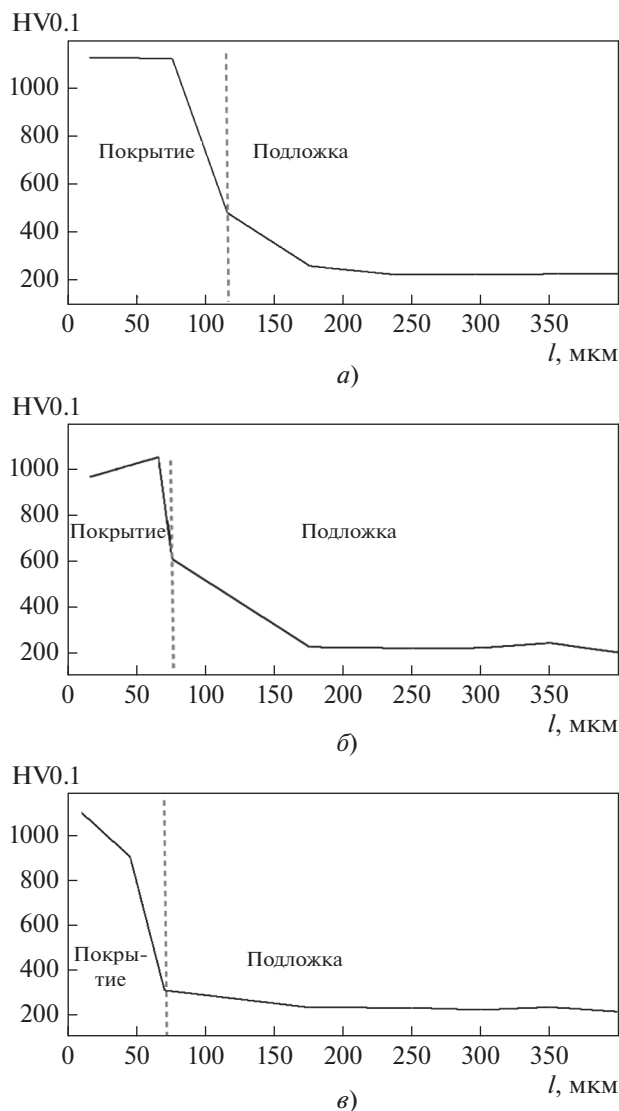


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине покрытия в зависимости от расстояния от поверхности покрытия l .
Номер образца: а – 1; б – 2; в – 3

Наблюдается неравномерность микротвердости по глубине покрытия в разных режимах заполнения ствола. Незначительное снижение микротвердости установлено на поверхности покрытия образца № 2, а у образца № 1 микротвердость равномерная по толщине покрытия. В образце № 3 имеется небольшое увеличение микротвердости на поверхности покрытия. В образце № 2 на границе раздела подложки с покрытием средняя микротвердость составила 607.5 HV, что выше микротвердости покрытия образцов № 1, 3.

Данные измерения шероховатости покрытий на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ приведены на рис. 4. По-

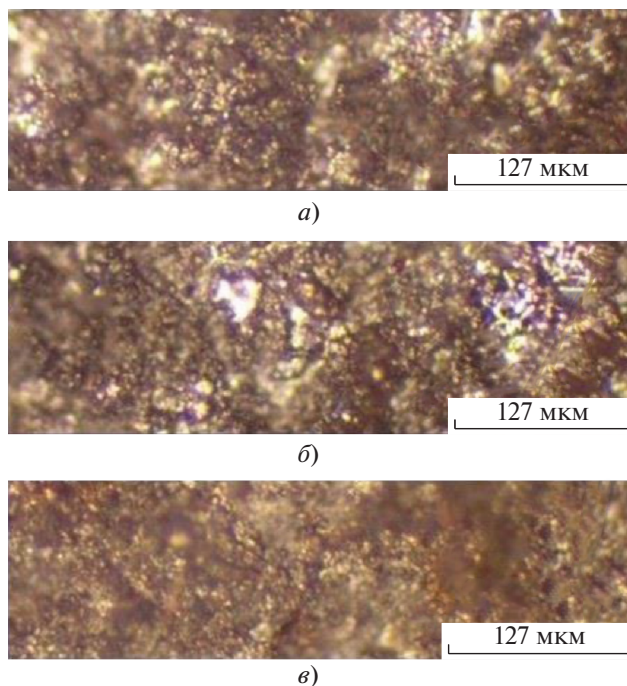


Рис. 4. Микроснимки поверхности покрытий на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$, полученных методом детонационного напыления образцов № 1 (а), № 2 (б), и № 3 (в).
 R_a : а – 5.34; б – 4.64; в – 5.12

верхности всех покрытий имеют неоднородную слоистую структуру с порами и волнообразным расположением структурных составляющих. В качестве основного параметра измерения шероховатости поверхности было выбрано среднее арифметическое отклонение профиля R_a . Разные значения этого показателя, возможно, связаны с различием воздействия ударной волны, которая приводит к уплотнению покрытия.

Результаты рентгенограммы поверхности представлены на рис. 5. В покрытиях образцов обнаружены Cr_3C_2 , Cr_3O_4 , Cr_2O_3 и Cr_{23}C_6 . В зависимости от степени заполнения ствола газовой смесью интенсивность фазовых составов покрытий изменяется. К примеру, на дифрактограммах образца № 3 наблюдается увеличение интенсивности фаз Cr_3C_2 , Cr_{23}C_6 и CrNi_3 . Это, возможно, обусловлено высокой температурой порошка при напылении, которая зависит от степени заполнения ствола. При высокой степени заполнения ствола температура в зоне реакции достигает 3000–4000°C в зависимости от расстояния от ствола детонационной пушки до подложки.

Для оценки износостойкости покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ были выполнены трибологические испытания. Объем износа, мм³, покрытия на образце № 1

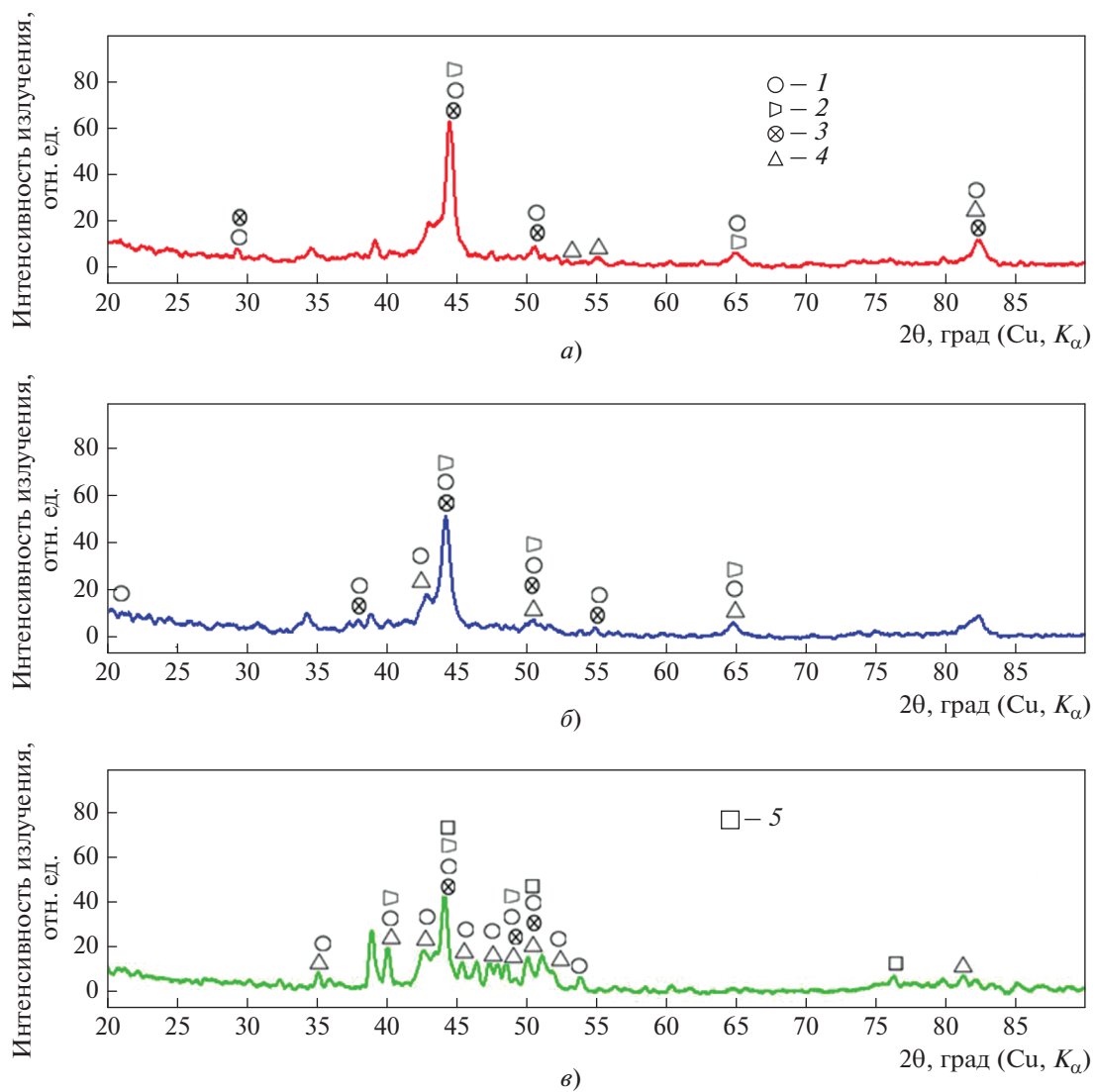


Рис. 5. Рентгенограммы покрытий Cr_3C_2 –NiCr на поверхности образцов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в).
1 – Cr_7C_3 ; 2 – Cr_3O ; 3 – $Cr_{23}C_6$; 4 – Cr_3C_2 ; 5 – $CrNi_3$

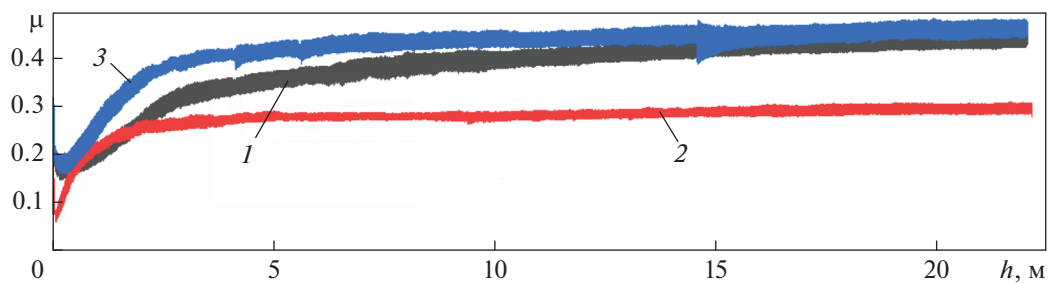


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения μ от длины участка трения h покрытий Cr_3C_2 –NiCr образцов № 1 (1), № 2 (2) и № 3 (3)

составил примерно 0.12, на образце № 2 – 0.124, на образце № 3 – 0.115. Объем износа сравнительно низкий для образца № 3, что, согласно результатам рентгеноструктурного анализа, может быть вызвано интенсивностью фазы Cr_3C_2 и наличием интерметаллической фазы CrNi_3 .

Значение коэффициента трения покрытия находится в интервале 0.06–0.45 (рис. 6). Кривые коэффициента трения покрытий в начале процесса испытания (до наработки) имеют скачки. Это, видимо, связано с тем, что покрытия имели высокие значения шероховатости ($R_a = 4.64\text{--}5.34$).

ВЫВОДЫ

1. Основными структурными составляющими детонационных покрытий на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ на поверхности теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ являются Cr_3C_2 , Cr_3O_4 , Cr_2O_3 , Cr_{23}C_6 и CrNi_3 .

2. Увеличение степени заполнения ствола газовой смесью $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$ с 51 до 64% может привести к формированию CrNi -фазы.

3. В зависимости от степени заполнения ствола покрытия имеют следующие характеристики: коэффициент трения 0.06–0.45, микротвердость 944–1185 HV, шероховатость $R_a = 4.64\text{--}5.34$, толщина слоисто-пористой структуры 60–120 мкм.

4. В зависимости от технологических режимов детонационного напыления изменяются микротвердость, шероховатость и трибологические свойства покрытия, что позволяет получать покрытия с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zrili M., Aleksi R.** The effect of long term exposure to elevated temperature on steam line steel properties thermal science // *Therm. Sci.* 2003. V. 7. No. 1. P. 33–46. <https://doi.org/10.2298/TSCI0301033Z>
2. **Маркашова Л.И.** Особенности структуры металло-керамических покрытий, полученных детонационным напылением // IX Междунар. симпозиум “Горение и плазмохимия”. Алматы, Казахстан, 13–15 сентября 2017 г. С. 127–130.
3. **Reserach** of the mechanic-tribological characteristics of $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{TiC}$ coatings after annealing / D.B. Buitkenov, B.K. Rakhadilov, Zh.B. Sagdoldina, D. Erbolatuly // *Eurasian J. Phys. and Functional Mater.* 2020. V. 4. No. 1. P. 86–92. <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2020040109>
4. **Gerasimova N.P.** Ash wear of boiler heating surfaces // *Proc. of the Irkutsk State Techn. University.* 2020. V. 24. No. 3. P. 596–605. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>
5. **Bhatia R., Singh H., Sidhu B.S.** Characterization of HVOF sprayed 75% $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--}25\%$ NiCr coating for erosion-corrosion resistance // *J. Emerg. Trends Eng., Sci. Technol.* 2014. V. 1. No. 1. P. 76–85.
6. **Davis J.R.** Handbook of thermal spray technology. ASM Intern. Materials Park, Ohio, USA, 2004.
7. **Room-** and high temperature wear resistance of MCrAlY coatings deposited by detonation gun (D-gun) and supersonic plasma spraying (SSPS) techniques / M. Kilic, D. Ozkan, M.S. Gok, A.C. Karaoglanli // *Coatings.* 2020. V. 10. No. 11. P. 1107. <https://doi.org/10.3390/coatings10111107>
8. **Structure** and properties of detonation coatings based on titanium carbosilicide / B.K. Rakhadilov, D.B. Buitkenov, B.T. Tuyakbaev, Zh.B. Sagdoldina, A.B. Kernesbekov // *Key Eng. Mater.* 2019. V. 821. P. 301–306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.821.301>
9. **Kaur M., Singh H., Prakash S.** Role of detonation gun spray $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coating in improving high temperature corrosion resistance of SAE-213–T22 and SAE-347H steel in presence of $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--}82\%$ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ salt deposits // *Surface. Eng.* 2009. V. 26. Is. 6. P. 428–439. <https://doi.org/10.1179/026708409x12490360425963>
10. **Kumar M., Mudgal D., Ahuja L.** Evaluation of high temperature oxidation performance of bare and coated T91 steel // *Mater. Today: Proc.* 2019. V. 28. P. 620–624. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.232>
11. **Surface** engineering analysis of d-gun sprayed cermet coating in aggressive environment / V.N. Shukla, Trivedi Harshit, Kumar Hemant, Anant Yadav // *Mater. Today: Proc.* 2017. V. 4. P. 10212–10215.
12. **Computer-controlled** detonation spray-ing: flexible control of the coating chemistry and microstructure / V.Y. Uliantitsky, D.V. Dudina, A. Shtertser, I. Smurov // *Metals.* 2019. V. 9. No. 12. P. 1244. <https://doi.org/10.3390/met9121244>
13. **Influence** of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{--NiCr}$ coatings / D.N. Kakimzhanov, B.K. Rakhadilov, Yu. Tyurin, M.K. Dautbekov // *Eurasian J. Phys. and Functional Mater.* 2021. V. 5. No. 1. P. 45–51. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2021050106>
14. **Influence** of the detonation-spraying mode on the phase composition and properties of Ni–Cr coatings / M. Maulet, B.K. Rakhadilov, Zh.B. Sagdoldina, A.B. Kassymov, D.N. Kakimzhanov // *Eurasian J. Phys. and Functional Mater.* 2020. V. 4. No. 3. P. 184–189. <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2020040307>
15. **ГОСТ 20072-74.** Сталь теплоустойчивая. Технические условия. М.: Госстандарт СССР, 1974.
16. **ГОСТ 2789-73.** Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартинформ, 2018.
17. **ГОСТ 9450-76.** Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Изд-во стандартов, 1976.

A Technology for Making Detonation Coatings on Power Equipment Parts Made of Grade 12Kh1MF Steel

M. K. Dautbekov^{a, c, *}, B. K. Rakhadilov^c, L. G. Zhurerova^b, D. N. Kakimzhanov^{a, c},
S. L. Elistratov^d, and T. A. Segeda^a

^a Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Ust-Kamenogorsk, East Kazakhstan oblast, 070010 Republic of Kazakhstan

^b Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, East Kazakhstan oblast, 070020 Republic of Kazakhstan

^c PLASMA SCIENCE Limited Liability Partnership,
Ust-Kamenogorsk, East Kazakhstan oblast, 070010 Republic of Kazakhstan

^d Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

*e-mail: merkhatd@gmail.com

Abstract—The article presents the results obtained from experimental studies of Cr_3C_2 —NiCr coatings applied, using the detonation-spraying method, on grade 12Kh1MF heat-resistant steel, including those on the effect that the Cr_3C_2 —NiCr coating application process technological parameters have on the coating's structure and properties. In the tests, a detonation gun with a single dosing device was used. Detonation gun spraying is one of the methods for thermally producing a protective layer on the surface, characterized by the fact that it allows hard, wear resistant and dense microstructured coatings to be obtained. Acetylene—oxygen mixture served as combustible gas, which is most frequently used for detonation spraying of powder materials. A nitrogen or air pulse is used for purging the gun barrel after each detonation. This process is repeated several times a second. A high kinetic energy of hot powder particles, as they collide against the substrate, results in that a very dense and strong coating is produced. The obtained coatings have a heterogeneous layered porous structure with undulate location of 60–120 μm -thick structural components with the layered-porous structure. There are no pores or cracks at the substrate-to-coating interface. The profile arithmetic mean deviation R_a is selected as the key roughness measurement parameter. It has been determined that, with the gun barrel volume filled by 64% with explosive mixture, the processed sample surface features a low wear degree. The results from studying the effect that the detonation spraying has on the coating structural-phase composition and tribological properties using the X-ray structural analysis method are given, which have shown that the Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_3O_6 , Cr_{23}C_6 , and CrNi_3 phases are produced. The microhardness, roughness, and tribological properties of the obtained coatings have been determined.

Keywords: Cr_3C_2 —NiCr, detonation-spraying method, heat-resistant steel, wear resistance, thermal power industry, thermal power plants, reliability