

УДК 621.723

Е.В. АСТРАШАБтехник Центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования¹**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

А.Н. ГРИГОРЧИК, канд. техн. наукстарший научный сотрудник Центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования¹**В.А. КУКАРЕКО**, д-р физ.-мат. наук, проф.начальник Центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования¹

E-mail: v_kukareko@mail.ru

А.В. СОСНОВСКИЙ, канд. техн. наукведущий научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин¹¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.07.2018.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ РАСПЫЛЯЮЩЕГО ВОЗДУХА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАПЫЛЕНИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ НА ЕГО СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Изучено влияние давления воздуха, поступающего на горение горючего газа при высокоскоростном напылении газотермического покрытия из высокохромистой стали 20X13, на структуру и износостойкость покрытия. Показано, что напыленные газотермические покрытия из стали 20X13 в фазовом составе содержат α -Fe и оксиды Fe_3O_4 и FeO. Установлено, что с увеличением давления подачи воздуха, используемого для горения высокоэнтальпийного газа от 0,1 до 0,3 МПа, при газотермическом напылении, количество оксидов в покрытии увеличивается от ≈ 8 до ≈ 15 об.%, а пористость покрытий снижается от 5,0 до 2,5 об.%. Твердость напыленных покрытий из стали 20X13 с увеличением давления воздуха повышается от 220 до 320 HV 10. Увеличение твердости покрытий при возрастании давления воздуха связано с увеличением объемной доли оксидов Fe_3O_4 и FeO, содержащихся в покрытиях. Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения газотермического покрытия из стали 20X13, напыленного при минимальном давлении воздуха 0,1 МПа, в условиях сухого трения составляет $20,2 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Увеличение давления воздуха до 0,3 МПа приводит к понижению износостойкости покрытий в 1,4 раза, что связано с увеличением количества хрупких оксидов в покрытиях. Интенсивность линейного изнашивания в смазочном материале И-20 покрытий, полученных при минимальном давлении распыляющего воздуха в 0,1 МПа, составляет $0,255 \cdot 10^{-9}$. С увеличением давления воздуха при напылении до 0,3 МПа износостойкость покрытий в условиях граничного трения возрастает в $\approx 1,3$ раза, что обусловлено повышением дюротметрических свойств покрытий.

Ключевые слова: высокоскоростная металлизация, давление воздуха, структура, фазовый состав, содержание оксидов, пористость, микротвердость, износостойкость

Введение. Газотермическое напыление (ГТН) является одним из перспективных, интенсивно развивающихся направлений инженерии поверхности. Метод высокоскоростной металлизации основан на распылении горючим газом расплавленных электрической дугой проволоочных материалов. При этом нагретые до температуры 2000–3000 К продукты сгорания газа, исте-

кая через сопло Лавалья, приобретают скорость 900–1500 м/с, а частицы распыляемого материала разгоняются до скоростей порядка 500 м/с [1], что позволяет, по сравнению с обычной электрометаллизацией, формировать покрытия с более высокими прочностными и физико-механическими свойствами, а также с меньшей степенью окисления частиц.

В качестве горючего газа традиционно применяются пропан. В работах [2, 3] показано, что пропан является достаточно подходящим газом для процесса высокоскоростной металлизации (ВМ). При этом, использование более высокоэнтальпийного газа (МАФ), с более высокими параметрами горения по сравнению с пропаном, приводит к повышению таких свойств газотермических покрытий, как плотность, адгезионная прочность и т. п. [4]. Вместе с тем, газотермические покрытия из проволочных материалов, полученные методом ВМ, по ряду физико-механических характеристик уступают монолитным сталям [1, 5–9]. В связи с этим, в целях повышения качества и физико-механических свойств покрытий необходимо исследовать влияние технологии газотермического напыления на свойства покрытий. В частности, одним из малоизученных параметров напыления является давление воздуха, идущего на горение горючего газа и распыление частиц. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния давления распыляющего воздуха при высокоскоростном напылении газотермического покрытия на его структурно-фазовый состав и триботехнические свойства.

Материалы и методики испытаний. В качестве объекта исследований были выбраны газотермические покрытия из проволочной высокохромистой стали 20X13, напыленные с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ при различных давлениях воздуха.

Для напыления газотермических покрытий методом ВМ использовалась установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [2]. Давление воздуха, идущего на горение горючего газа и распыление частиц, составляло 0,1, 0,2, 0,3 МПа. Покрытия подвергались механической шлифовке с финишной обработкой на абразивной бумаге (P320). Толщина напыленных покрытий составляла $\approx 1,0$ – $1,2$ мм.

Исследование фазового состава осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась с использованием программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Измерение твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при

нагрузках на индентор 50 г и 10 кг. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ с помощью программного обеспечения AltamiStudio 3.3.

Сравнительные триботехнические испытания проводились в режиме сухого и граничного трения. Триботехнические испытания в условиях трения без смазочного материала проводились на трибометре АТВП, по схеме возвратно-поступательного движения призматического образца ($8 \times 6 \times 5$ мм) по контртелу при средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с. В качестве контртела использовалась пластина ($90 \times 30 \times 3$ мм), изготовленная из закаленной углеродистой стали У8, с твердостью 700 HV10. Номинальная удельная нагрузка испытаний P составляла 1,5 МПа. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались ацетоном и высушивались. Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось весовым методом. Путь трения L составлял ≈ 1200 м, с промежуточными взвешиваниями.

Испытания в среде смазочного материала И-20 осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения призматического образца ($10 \times 6 \times 5$ мм) по пластинчатому контртелу при максимальной скорости взаимного перемещения $\approx 0,15$ м/с. В качестве контртела использовалась пластина ($75 \times 25 \times 5$ мм), изготовленная из закаленной углеродистой стали У8, с твердостью 700 HV10. Номинальная удельная нагрузка испытаний P составляла 50 МПа. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались ацетоном и высушивались. На поверхности контртела изготавливалась ванна, в которую наливался смазочный материал И-20. Путь трения L составлял ≈ 1200 м.

Результаты исследований и их обсуждение. При ГТН проволочной стали 20X13 расплавленные частицы разогреваются свыше 2000 °С, что приводит к окислению железа и выгоранию легирующих элементов содержащихся в исходной проволоке. Химический состав газотермических покрытий, напыленных с использованием высокоэнтальпийного горючего газа МАФ по различным технологическим режимам, представлен в таблице 1.

Из данных, приведенных в таблице 1, можно видеть, что в газотермических покрытиях из стали

Таблица 1 — Химический состав газотермических покрытий, полученных по различным режимам напыления
Table 1 — Chemical composition of gas-thermal coatings obtained by different spraying regimes

Материал покрытия и давление воздуха при металлизации	Содержание элемента, масс. %								
	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
20X13, 0,1 МПа	0,181	0,400	0,040	0,012	13,464	0,331	85,015	0,336	0,187
20X13, 0,2 МПа	0,314	0,401	0,038	0,051	13,187	0,282	85,320	0,308	0,088
20X13, 0,3 МПа	0,168	0,317	0,071	0,035	13,114	0,276	85,518	0,338	0,152

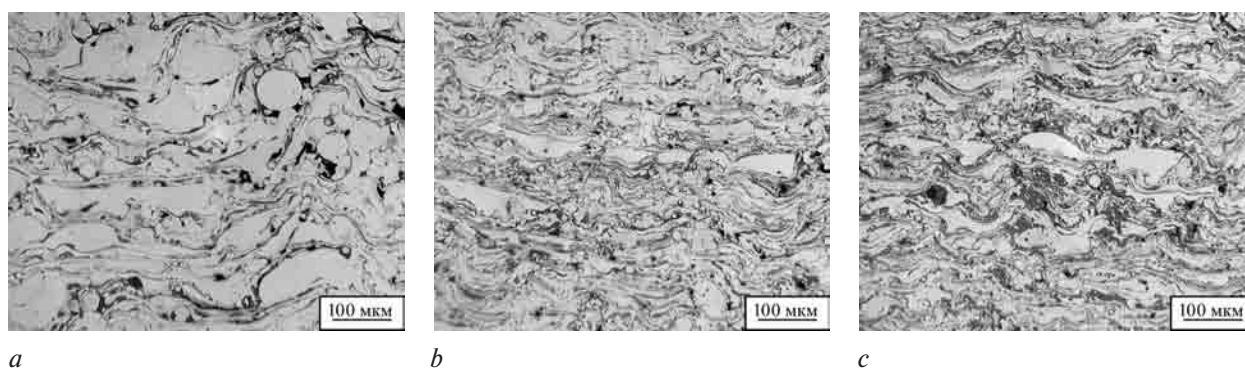


Рисунок 1 — Характерные микроструктуры ГТП из проволоочной стали 20Х13, напыленных по различным режимам:
 a — 0,1 МПа; b — 0,2 МПа; c — 0,3 МПа
 Figure 1 — Characteristic microstructures of gas-thermal coatings of 20Kh13 wire steel sprayed in different modes:
 a — 0.1 MPa; b — 0.2 MPa; c — 0.3 MPa

20Х13 с увеличением давления подачи воздуха, использующегося для горения рабочего газа, содержание легирующих элементов (таких как Cr, Mn, Si) уменьшается. Понижение концентрации легирующих элементов в напыленных покрытиях связано с их окислением в процессе металлизации.

Характерные микроструктуры газотермических покрытий, напыленных по различным режимам представлены на рисунке 1.

Из представленных на рисунке 1 микроструктур можно сделать вывод, что с увеличением давления воздуха при газотермическом напылении, размеры закристаллизованных на подложке частиц уменьшаются. В таблице 2 и на рисунке 2 приведено содержание оксидов и пористость газотермических покрытий из стали 20Х13, напыленных по различным режимам с использованием горючего газа МАФ.

На рисунке 2 можно видеть, что с увеличением давления подачи воздуха, использующегося для горения газа МАФ с 0,1 до 0,3 МПа, при газотермическом напылении, количество оксидов увеличивается с ≈8 до ≈15 об.%. Увеличение количества оксидов в газотермическом покрытии при повышении давления воздуха связано с уменьшением размера частиц и повышением удельной площади поверхности частиц, что сопровождается их более интенсивным окислением. В то же время пористость покрытий, напыленных с использованием повышенного давления, существенно уменьшается (рисунок 2).

Таблица 2 — Содержание оксидов и пористость ГТП из стали 20Х13, полученных при различном давлении воздуха при металлизации
 Table 2 — Content of oxides and porosity of gas-thermal coatings of 20Kh13 steel, obtained at different air pressure during metallization

Материал ГТП и давление воздуха при напылении		Содержание оксидов, об. %	Пористость, об. %
20Х13	0,1 МПа	8	5
	0,2 МПа	12	3
	0,3 МПа	15	2,5

Исследование фазового состава газотермических покрытий из высокохромистой стали 20Х13, напыленных по различным режимам показало, что в покрытии содержится преимущественно α-Fe, а также различное количество оксидов Fe₃O₄ и FeO (рисунок 3).

В связи с замедленным охлаждением напыляемых частиц стали на подложке при напылении и, как следствие, их выдержкой при повышенных температурах ≈250–300 °С [7–8] представляло интерес изучить распределение микротвердости по глубине сформированных покрытий, напыленных по различным технологическим режимам (рисунок 4).

Из рисунка 4 можно видеть, что микротвердость газотермических покрытий из стали 20Х13 составляет ≈400–550 HV_{0,05} в поверхностных слоях и более низкие значения микротвердости (≈300–400 HV_{0,05}) отвечают более глубоким слоям покрытий.

Твердость газотермических покрытий из стали 20Х13, напыленных по различным режимам представлена в таблице 3.

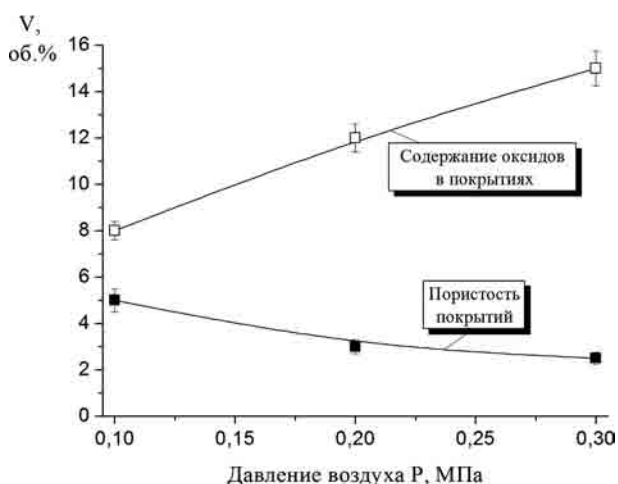


Рисунок 2 — Зависимость пористости и количества оксидов в покрытии от давления воздуха при напылении
 Figure 2 — Dependence of porosity and amount of oxides in coating on air pressure during spraying

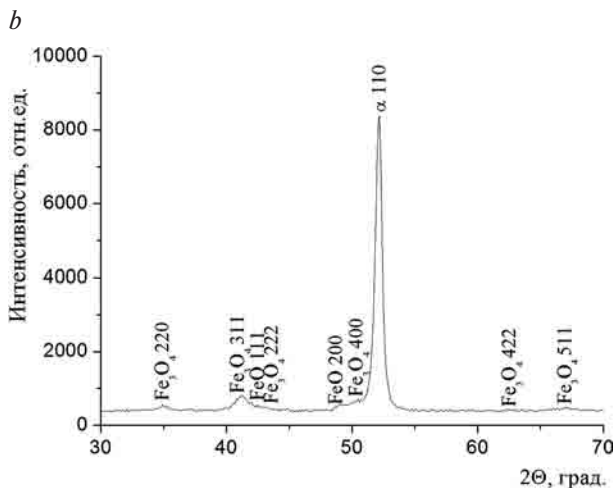
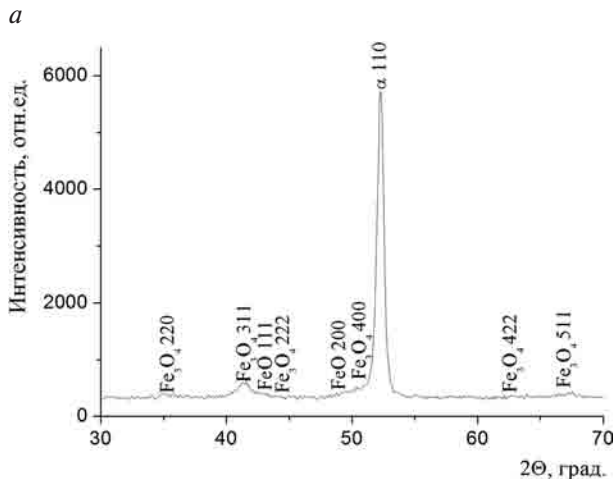
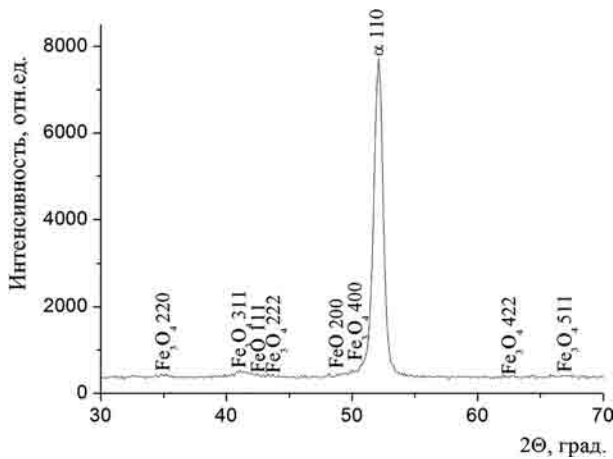


Рисунок 3 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев ГТП из стали 20X13, напыленных при различном давлении воздуха:

a — 0,1 МПа; b — 0,2 МПа; c — 0,3 МПа

Figure 3 — Fragments of x-ray diffractograms from surface layers of gas-thermal coatings of 20Kh13 steel sprayed at different air pressure: a — 0.1 MPa; b — 0.2 MPa; c — 0.3 MPa

На основании проведенных исследований структурно-фазового состояния и дюротрических свойств газотермических покрытий, напыленных с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ по различным режимам, можно сделать вывод, что с увеличением давления воз-

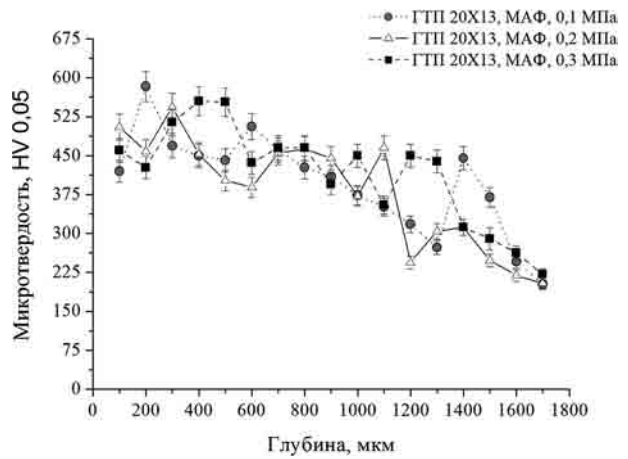


Рисунок 4 — Распределение микротвердости по глубине газотермических покрытий из стали 20X13

Figure 4 — Distribution of microhardness on the depth of the gas-thermal coatings of steel 20Kh13

Таблица 3 — Твердость газотермических покрытий напыленных по различным режимам

Table 3 — Hardness of gas-thermal coatings sprayed in various regimes

Материал покрытия и давление воздуха, используемого для горения газа МАФ	Интенсивность массового изнашивания, $I_q \cdot 10^{-3}$, мг/м
20X13, 0,1 МПа	20,2
20X13, 0,2 МПа	26,0
20X13, 0,3 МПа	28,3

духа, используемого для горения рабочего газа, количество оксидов в сформированных газотермических покрытиях возрастает, а пористость покрытий и размер напыленных металлических частиц понижаются.

Сравнительные триботехнические испытания образцов газотермических покрытий из стали 20X13 в условиях трения без смазочного материала проводились при удельном давлении испытаний 1,5 МПа. Результаты триботехнических испытаний приведены в таблице 4.

Из данных, представленных в таблице 4, можно видеть, что с увеличением давления воздуха, используемого для горения рабочего газа МАФ при напылении, интенсивность мас-

Таблица 4 — Интенсивность массового изнашивания газотермических покрытий на стадии установившегося изнашивания в условиях трения без смазочного материала

Table 4 — Intensity of mass wear of gas-thermal coatings at stage of steady-state wear under friction without lubricant

Материал покрытия и давление воздуха, используемого для горения газа МАФ	Интенсивность массового изнашивания, $I_q \cdot 10^{-3}$, мг/м
20X13, 0,1 МПа	20,2
20X13, 0,2 МПа	26,0
20X13, 0,3 МПа	28,3

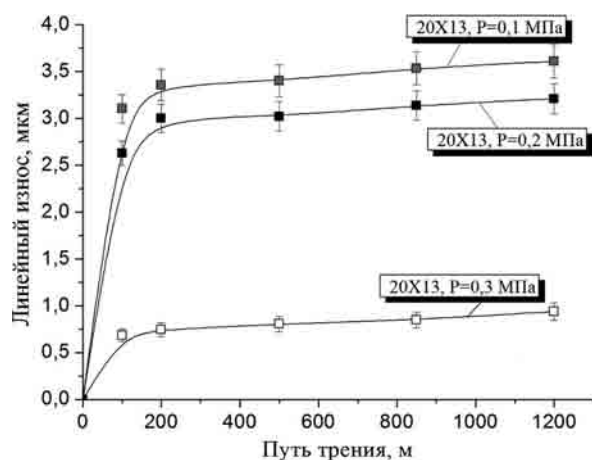


Рисунок 5 — Зависимость линейного износа газотермических покрытий, напыленных по различным режимам от пути трения
 Figure 5 — Dependence of linear wear of gas-thermal coatings sprayed under different regimes on friction path

сового изнашивания I_q напыленных покрытий увеличивается. В частности, интенсивность массового изнашивания газотермического покрытия из стали 20X13, напыленного при давлениях воздуха 0,1 и 0,3 МПа, составляет 20,2 и 28,3 мг/м соответственно. Увеличение I_q газотермических покрытий из стали 20X13 при увеличении давления воздуха, используемого при напылении, связано с повышением количества оксидов в сформированных покрытиях, которые располагаются преимущественно на границах стальных напыленных частиц и способствуют отслаиванию и разрушению частиц покрытия в условиях трения без смазочного материала.

Сравнительные триботехнические испытания образцов газотермических покрытий из стали 20X13 при трении в смазочном материале И-20 проводились при удельном давлении испытаний 50 МПа. Результаты триботехнических испытаний приведены на рисунке 5 и в таблице 5.

Из данных триботехнических испытаний, представленных на рисунке 5 и в таблице 5, можно видеть, что с увеличением давления воздуха, используемого при газотермическом напылении, от 0,1 до 0,3 МПа износостойкость покрытия из стали 20X13 в среде смазочного материала увеличивается в $\approx 1,3$ раза. При этом, интенсивность линейного изнашивания покрытия из стали 20X13 при давлении воздуха 0,1 и 0,3 МПа составляет $0,255 \cdot 10^{-9}$ и $0,195 \cdot 10^{-9}$ соответственно.

Таким образом, по результатам триботехнических испытаний можно сделать вывод, что износостойкость газотермического покрытия из стали 20X13 в условиях сухого трения повышается с уменьшением давления воздуха. В частности, при уменьшении давления с 0,3 до 0,1 МПа износостойкость покрытия повысилась в 1,4 раза. Износостойкость покрытия из стали 20X13 при трении в смазочном материале повышается с увеличением давления подачи воздуха, ис-

Таблица 5 — Интенсивность линейного изнашивания при трении в смазочном материале И-20, рассчитанная без учета пути трения приработки
 Table 5 — Intensity of linear wear by friction in I-20 lubricant calculated without taking into account friction path of running-in

Материал покрытия и давление воздуха, используемого для горения газа МАФ	Интенсивность линейного изнашивания, $I_q \cdot 10^{-9}$
20X13, 0,1 МПа	0,255
20X13, 0,2 МПа	0,210
20X13, 0,3 МПа	0,195

пользуемого для горения высокоэнтальпийного горючего газа МАФ и при увеличении давления воздуха при напылении с 0,1 до 0,3 МПа. Износостойкость покрытия из стали 20X13 увеличивается в $\approx 1,3$ раза.

Заключение. Проведено исследование влияния давления воздуха при высокоскоростном напылении газотермического покрытия из высокохромистой стали 20X13 на структуру и износостойкость покрытия. Показано, с увеличением давления подачи воздуха, используемого для горения газа МАФ с 0,1 до 0,3 МПа, при газотермическом напылении, количество оксидов в покрытии увеличивается от ≈ 8 до ≈ 15 об.%, а пористость покрытий понижается от 5,0 до 2,5 об.%. Фазовый состав покрытия включает в себя α -Fe, а также оксиды Fe_3O_4 и FeO. Твердость газотермических покрытий, напыленных по различным технологическим режимам, с давлением 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа составляет 220 HV10, 275 HV10 и 320 HV10 соответственно.

Установлено, что износостойкость газотермического покрытия из стали 20X13 в условиях сухого трения повышается с уменьшением давления воздуха. В частности, при уменьшении давления с 0,3 до 0,1 МПа износостойкость покрытия повысилась в 1,4 раза. Установлено, что износостойкость покрытия из стали 20X13 при трении в смазочном материале повышается с увеличением давления подачи воздуха, используемого для горения высокоэнтальпийного горючего газа МАФ. В частности, с увеличением давления воздуха при напылении с 0,1 до 0,3 МПа износостойкость покрытия из стали 20X13 увеличивается в $\approx 1,3$ раза.

Список литературы

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 12 — С. 17–23.
2. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск.: Технопринт, 2004. — 200 с.
3. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков /

- М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии. — 1997. — Т. 4. — С. 670–673.
4. Григорчик, А.Н. Структурно-фазовое состояние и трибо-механические свойства газотермического покрытия из высокохромистой стали 40X13, напыленного с использованием высокоэнтальпийного газа МАФ / А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ. — Минск, 2017. — Вып. 38. — С. 157–166.
 5. Витязь, П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильюшенко, А.И. Шевцов. — Минск, 2006.
 6. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 1998. — 583 с.
 7. Закономерности формирования структурно-фазового состояния газотермического покрытия из стали мартенситного класса / В.А. Кукареко [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: А.В. Белый (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2017. — Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 54–62.
 8. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2017. — Т. 13, № 7 (151). — С. 318–322.
 9. Кукареко, В.А. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // ПОЛИКОМТРИБ-2015: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: В.Н. Адериха [и др.]. — Гомель, 2015. — С. 75.

ASTRASHAB Evgeniy V.

Technical Expert of the Center of Structural Research and Tribo-Mechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products¹

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

GRIGORCHIK Alexander N., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Center of Structural Research and Tribo-Mechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products¹

KUKAREKO Vladimir A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Chief of the Center of Structural Research and Tribo-Mechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products¹
E-mail: v_kukareko@mail.ru

SOSNOVSKIY Aleksey V., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening¹

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 July 2018.

EFFECT OF AIR ATOMIZATION PRESSURE AT HIGH-SPEED SPRAYING OF GAS-THERMAL COATING FROM HIGH-CHROMIUM STEEL ON ITS CONSTRUCTION AND WEAR RESISTANCE

The influence of the pressure of the atomizing air at high-speed spraying of the gas-thermal coating from high-chromium steel 20Kh13 on the structure and wear resistance of the coating is studied. It is shown that sprayed gas-thermal coatings from 20Kh13 steel in the phase composition contain α -Fe and Fe_3O_4 and FeO oxides. It is established that with an increase in the pressure of air supply used to burn the MPS gas from 0.1 to 0.3 MPa, with gas-thermal spraying, the amount of oxides increases from ≈ 8 to ≈ 15 vol.%, and the porosity of coatings decreases from 5.0 to 2.5 vol.%. The hardness of sprayed coatings from 20Kh13 steel increases with air pressure from 220 to 320 HV 10. The increase in hardness of coatings with increasing air pressure is associated with an increase in the volume fraction of Fe_3O_4 and FeO oxides contained in the coatings. The intensity of mass wear under conditions of dry friction of a gas-thermal coating of 20Kh13 steel sprayed with a minimum air pressure of 0.1 MPa, under conditions of dry friction is $20.2 \cdot 10^{-3}$ mg/m. The increase in air pressure up to 0.3 MPa leads to the decrease in wear resistance of coatings by 1.4 times, which is associated with the increase in the number of brittle oxides in coatings. The intensity of linear wear in the I-20 lubricant of coatings obtained at a minimum pressure of spraying

air of 0.1 MPa is $0.255 \cdot 10^{-9}$. With the increase in air pressure during spraying up to 0.3 MPa, the wear resistance of coatings under conditions of boundary friction increases by ≈ 1.3 times, which is caused by the increase in the durometric properties of coatings.

Keywords: high-speed metallization, air pressure, structure, phase composition, oxide content, porosity, microhardness, wear resistance

References

1. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S. Aktivirovannoe gazoplazmennoe i elektrodugovoe napylenie pokrytiy provolochnymi materialami [Activated gas-flame and electric arc spraying of coatings with wire materials]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2006, no. 12, pp. 17–23.
2. Belotserkovsky M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplazmennogo napyleniya antifriktsionnykh pokrytiy* [Technologies of activated gas-flame spraying of anti-friction coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 200 p.
3. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E. Metody i oborudovanie dlya formirovaniya vysokoenergeticheskikh dvukhfaznykh potokov [Methods and equipment for the formation of high-energy two-phase flows]. *Fizika plazmy i plazmennye tekhnologii* [Plasma physics and plasma technologies], 1997, vol. 4, pp. 670–673.
4. Grigorich A.N., Astrashab E.V. Strukturno-fazovoe sostoyanie i tribomekhanicheskie svoystva gazotermicheskogo pokrytiya iz vysokokhromistoy stali 40Kh13, napylenogo s ispolzovaniem vysokoentalpiynogo gaza MAF [Structural-phase state and tribomechanical properties of gas-thermal coating of high-chromium steel 40Kh13, sprayed using high-enthalpy MPS gas]. *Metallurgiya: resp. mezhdved. sb. nauch. tr.* [Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works], 2017, no. 38, pp. 157–166.
5. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I. *Osnovy naneseniya iznosostoykikh, korroziionno-stoykikh i teplozashchitnykh pokrytiy* [Fundamentals of application of wear-, corrosion- and heat-resistant coatings], Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2006. 361 p.
6. Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyushchenko A.F. *Teoriya i praktika naneseniya zashchitnykh pokrytiy* [Theory and practice of application of protective coatings]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1998. 583 p.
7. Kukareko V.A., Grigorich A.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V. Zakonomernosti formirovaniya strukturno-fazovogo sostoyaniya gazotermicheskogo pokrytiya iz stali martensitnogo klassa [The regularities of structure formation of thermal sprayed coating of martensitic steel]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov* [Advanced methods and technologies of materials development and processing], 2017, vol. 2, pp. 54–62.
8. Kukareko V.A., Grigorich A.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V. O prirode formirovaniya metastabilnoy austenitnoy struktury pri gazotermicheskoy napylenii vysokokhromistoy stali martensitnogo klassa 95Kh18 [About the nature of formation of metastable austenitic structure at gas-thermal spraying of high-chromium steel of martensitic class 95Kh18]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2017, vol. 13, no. 7(151), pp. 318–322.
9. Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A., Grigorich A.N. Deformatsionno-aktivirovannoe martensitnoe prevrashchenie v gazotermicheskikh pokrytiyakh iz vysokokhromistoy stali pri sukhom trenii [Deformation-activated martensitic transformation in gas-thermal coatings of high-chromium steels under dry friction]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Polimernye kompozity i tribologiya "POLIKOMTRIB-2015"* [Abstracts of papers of International Scientific and Technical Conference "Polymer Composites and Tribology "POLYCOMTRIB-2015"]. Gomel, 2015, p. 75.