

УДК: 669.017.3:621.793

©Туник А.Ю.*

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ ТВЕРДЫХ СМАЗОК, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ НАПЫЛЕНИЯ

Представлены результаты исследования закономерностей формирования антифрикционных покрытий, способных работать в условиях сухого трения и повышенных температур, в состав которых входят твердые смазки (C , CaF_2 , Fe_mO_n). Изучено влияние методов газотермического напыления, вида напыляемого материала и количества твердой смазки на фазовый состав, структуру и свойства покрытий.

Ключевые слова: газотермические покрытия, методы нанесения, твердые смазки, структура, свойства, фазовый состав.

Туник А.Ю. *Структурні особливості антифрикційних покриттів з добавками твердих мастил, отриманих різними методом напылення. Наведено результати дослідження закономірностей формування антифрикційних покриттів, здатних працювати в умовах сухого тертя і підвищених температур, до складу яких входять тверді мастила (C , CaF_2 , Fe_mO_n). Вивчено вплив методів газотермічного напылення, виду матеріалу та кількості твердого мастила на фазовий склад, структуру та властивості покриттів.*

Ключові слова: газотермічні покриття, методи нанесення, тверді мастила, структура, властивості, фазовий склад.

A.Y. Tunik. *Structural peculiarities of anti-friction coatings with solid lubricant additives obtained by different thermal spraying methods. The results of the investigation of the peculiarities of formation of anti-friction coatings, capable of working in conditions of dry friction and high temperatures, which contain solid lubricants (C , CaF_2 , Fe_mO_n) are presented. The effect of thermal spray methods, type of spray material and the amount of solid lubricant on the phase composition, structure and properties of coatings is investigated.*

Keywords: thermal spray coating, application methods, solid lubricants, structure, properties, phase composition.

Постановка проблемы. Интенсификация производственных процессов, экономия материальных ресурсов относятся к наиболее ответственным проблемам современной техники. Одним из серьезных препятствий к более интенсивному ведению производственных процессов является недостаточная стойкость отдельных узлов машин и оборудования, в первую очередь узлов трения, что приводит к простоям, увеличению потребления запасных частей, вызывает потери материальных и энергетических ресурсов. Более 80 % средств, затрачиваемых на ремонт оборудования, используется на восстановление узлов трения. От материалов, из которых изготавливаются узлы трения, требуются, как правило, низкие значения потерь энергии на трение и высокая износостойкость [1, 2]. Для удовлетворения указанных требований создаются различного рода антифрикционные материалы, в том числе литые на основе известных материалов типа бронз и баббитов, композиционные антифрикционные материалы, изготавливаемые методами порошковой металлургии, материалы на основе полимеров и др. [3-7].

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время перспективным направлением в современной технике стало использование антифрикционных материалов, способных работать без смазки, поскольку отказ от нее существенно упрощает конструкцию машин, облегчает их обслуживание, особенно в области низких и высоких температур, а также повышает надежность работы. Одним из эффективных направлений решения данной проблемы

* канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев

является применение защитных покрытий, обладающих антифрикционными свойствами.

В этом случае создается комбинированный материал, который должен сочетать необходимые прочностные свойства основы и высокую стойкость внешнего слоя (покрытия) в условиях воздействия внешней среды и контактных нагрузок. Перспективным методом нанесения защитных покрытий, обладающих антифрикционными свойствами, является газотермическое напыление (газопламенный, плазменный, детонационный методы, электродуговая металлизация). Важной особенностью газотермического напыления (ГТН) покрытий является возможность управления составом, структурой и свойствами покрытий за счет применения различных порошковых композиций (в виде механических смесей (МС) или композиционных порошков – (КП)) с широким интервалом соотношения компонентов, в качестве которых могут выступать металлы, сплавы, оксиды, бескислородные тугоплавкие соединения и твердые смазки (графит, нитрид бора, дисульфид молибдена, фтористый кальций и др.).

Целью настоящей работы было исследование влияния методов напыления на структуру, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из композиционных порошков и механических смесей, в состав которых входят твердые смазки.

Методы получения покрытий. Покрытия наносили методами детонационного (ДН), звукового- и сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления (ВГПН и СВГПН), а также плазменного с использованием аргоно-водородной смеси (ПН- $\text{Ar}+\text{H}_2$). Основой служили образцы из углеродистой стали, подвергнутые струйно-абразивной обработке.

Общность методов ГТН заключается в том, что структура покрытий независимо от конкретного метода имеет ряд общих признаков, обусловленных природой, как самого процесса напыления, так и используемого материала. Имеется ввиду слоистый, дискретный, неоднородный характер структуры покрытий, наличие в них пор и оксидных включений, а также наличие в структуре различного рода границ, разделяющих частицы. Особенности структуры ГТН - покрытий определяются и спецификой процесса напыления, заключающейся в быстротекущей ($10^{-3} \dots 10^{-5}$ с), высокотемпературной (2250...20000 К) обработке частиц и их последующем высокоскоростном (50...800 м/с) соударении с поверхностью основы в сочетании с высокой скоростью охлаждения [8, 9].

Методики исследования. При проведении исследований применяли металлографию, микродюрometriю, рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), метод Оже - спектроскопии. Микротвердость покрытий определяли на приборе М-400 фирмы «ЛЕСО» при нагрузке 0,249 и 0,49 Н. Значения микротвердости являются интегральной характеристикой материала покрытий, поскольку измерить микротвердость отдельных структурных составляющих в ряде случаев не представляется возможным из-за их малых размеров. Заключение о фазовом составе и равномерности распределения твердой смазки по объему покрытия дано на основании сопоставления результатов РСФА и РСМА. Прочность сцепления покрытия с основой оценивали клеевым методом [10].

Напыляемые материалы. В качестве твердых смазок были выбраны: графит, фтористый кальций и феррооксиды. Графит – традиционный материал со слоистой структурой. В условиях газотермического напыления он не плавится, легко сублимирует и выгорает, поэтому может быть введен в объем покрытия только в составе композиционного порошка. Фтористый кальций (CaF_2) обладает антифрикционными свойствами при повышенных температурах и является наиболее технологичной твердой смазкой для нанесения методами газотермического напыления, поскольку плавится при 1418°C без разложения, не подвержен активному окислению с образованием нежелательных продуктов. Он может быть использован как в составе механических смесей, так и в виде композиционных порошков. Феррооксиды – перспективные материалы для газотермического напыления ввиду достаточно высокого смазочного эффекта и невысокой стоимости. Оксиды железа по своим смазочным свойствам близки к фтористому кальцию. Феррооксиды были использованы в виде компонента механических смесей.

Графит вводился в состав частиц композиционных порошков FeCr-TiC-Mo-C , оксиды железа – в виде составной части механических смесей порошков $\text{FeCSi}+\text{Fe}_m\text{O}_n$, фтористый кальций – как в составе композиционных порошков $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-CaF}_2$, так и в виде механической смеси $\text{FeCSi}+\text{CaF}_2$.

Композиционные порошки, в состав которых входили твердые смазки, были изготовлены с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

В КП системы 15FeCr-70TiC-3Mo-12C (мас.%), содержащем в качестве твердой смазки графит, роль пластичной составляющей играет FeCr, TiC- является износостойкой добавкой, молибден вводили для увеличения когезионной прочности. По результатам РСФА фазовый состав данной композиции следующий: FeCr, TiC, C, Mo.

В системе 40Cr₂O₃-45TiO₂-15CaF₂ (мас.%), содержащем в качестве твердой смазки CaF₂, оксиды хрома и титана играли роль износостойкой матрицы. Фазовый состав этого порошка - TiO₂ (рутил), Cr₂O₃, CaF₂, Cr (следы), Ti (следы).

Основным компонентом механических смесей для газотермического напыления служил порошок чугуна (FeCSi), содержащий 3,4 масс. % C и 5,18 масс. % Si. Сам по себе чугун является недорогим технологичным материалом, поэтому предполагалось, что введение в состав такого покрытия твердых смазок (CaF₂ или Fe_mO_n) должно еще улучшить его антифрикционные свойства. В состав твердой смазки Fe_mO_n по результатам РСФА входили оксиды Fe₂O₃, Fe₃O₄, γ-Fe₂O₃ (следы). Анализ литературных данных по антифрикционным покрытиям [1, 2, 4-7] показал, что используемое количество твердой смазки, в порошковой смеси обычно находится в пределах 10...20 об.%. Для ГТН использовались порошки с размером частиц 40...80 мкм. Состав порошковых смесей приведен в таблице.

Обсуждение результатов. При исследовании покрытий из КП системы FeCr-TiC-Mo-C и Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂ полученных методами ГТН, установлено следующее:

Детонационные покрытия системы FeCr-TiC-Mo-C плотные, без сколов, хорошо прилегают к основе и имеют слоистую структуру (рис. 1, а). Структура покрытия состоит из частиц белого 1 и серого 2 цвета, а также включений твердой смазки 3 (на фотографии черного цвета). Структурная составляющая белого цвета, имеющая форму lamel и частиц округлой формы состоят из феррохрома с включениями дисперсных частичек TiC (табл.). Вторая структурная составляющая покрытия темного цвета - это оксиды титана, легированные железом, и хромом. Наличие указанных фаз подтверждают результаты РСФА и РСМА.

Покрытия, полученные с использованием сверхзвуковой плазменной струи, отличаются от детонационных более неоднородной и более крупнозернистой структурой, однако с достаточно равномерным распределением графитных включений (рис. 1, б). По прочности сцепления СВГПН покрытия практически не уступают ДН покрытиям, однако, в связи с более высокой степенью неоднородности структуры покрытия в данном случае наблюдается разброс значений микротвердости.

Как при детонационном, так и при сверхзвуковом плазменном напылении КП системы FeCr-TiC-Mo-C на воздухе происходит значительное окисление карбида титана с формированием оксидных фаз. Оставшаяся часть карбида титана находится как в виде зерен (размером 5...10 мкм) в металлической (феррохромовой) матрице, так и в виде мелкодисперсных выделений в оксидной фазе.

При напылении данной композиции с использованием Ar-H₂ плазменной струи образования новых фаз не происходит. Покрытие отличается высокой степенью пористости и неоднородности (рис. 1, в). По твердости и прочности сцепления с основой оно уступает покрытиям, полученным методами СВГПН и ДН.

По результатам металлографических исследований количество твердой смазки в покрытиях составляет около 17 об.%. по сравнению с 25 об.%. (12 мас.%) в исходном порошке. При исследовании излома ДН- покрытий методом Оже - спектроскопии установлено, что около 30 ат. % углерода от общего его количества связано в карбид титана, а около 70 ат. % приходится на долю свободного графита. Проведенные исследования указывают на то, что при напылении КП системы FeCr-TiC-Mo-C происходит потеря углерода. Для детонационного напыления эти потери составляют в среднем 30...32%.

При ДН покрытий из КП на основе оксидов титана и хрома с фтористым кальцием формируются плотные покрытия с наиболее высокой прочностью сцепления с основой по сравнению с другими методами (рис. 1, г; табл.). В покрытиях обнаружены сложный оксид титана-хрома Ti₂Cr₂O₇, комплексные оксиды Ti-Cr-Ca-O и TiN, свидетельствующие о протекании процессов межфазного взаимодействия, как в самих частицах, так и между компонентами напыляемого материала и кислородом воздуха.

При СВГПН порошков из КП системы Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂ также формируются покрытия, представляющие собой оксидную матрицу 1, в которой находятся включения твердой смазки 2

(черного цвета) (рис. 1, д). Как и при ДН помимо исходных фаз Cr_2O_3 , TiO_2 и CaF_2 в покрытии обнаружены $Ti_2Cr_2O_7$, комплексные оксиды Ti-Cr-Ca-O, а также новый оксид $TiCrO_3$ (табл.). Покрытие уступает по качеству детонационному, так как в нем наблюдаются поры и выкрашивание, что свидетельствует о снижении когезионной прочности.

Таблица

Характеристика ГТН покрытий

Напыляемый материал	Метод нанесения	$\sigma_{сц}$, МПа	H_{μ} , ГПа	Фазовый состав покрытий (по результатам РСФА и РСМА)*
КП 15 FeCr- 70 TiC- 3 Мо- 12 С (мас.%)	ДН	42,4- 45,5	5,71-6,16	TiO_2 , Ti_3O_5 , TiC, FeCr, комплексные оксиды системы: Ti-Cr-Fe-O С, Мо (следы)
	СВГПН	36,5- 39,5	2,21-7,07	TiC, Ti_3O_5 , FeCr, комплексные оксиды системы: Ti-Cr-Fe-O, С, Cr
	ПН-Ar+H ₂	< 12,0	2,87-3,60	TiC, FeCr, С, Ti_3O_5 (следы)
КП 40 Cr_2O_3 -45 TiO_2 - 15 CaF_2 (мас.%)	ДН	39,5- 42,5	2,94-4,90	Cr_2O_3 , $Ti_2Cr_2O_7$, комплексные оксиды системы: Ti-Cr-Ca-O, TiO_2 , CaF_2 , Cr, TiN
	СВГПН	35,0- 39,0	2,86-4,73	Cr_2O_3 , TiO_2 , $TiCrO_3$, $Ti_2Cr_2O_7$, комплексные оксиды системы: Ti-Cr-Ca-O, CaF_2 , TiN (следы)
	ПН-Ar+H ₂	20,0- 29,5	4,82-7,42	Cr_2O_3 , $TiCrO_3$, $Ti_2Cr_2O_7$, TiO_2 , комплексные оксиды системы: Ti-Cr-Ca-O, CaF_2 , Cr
МС FeCSi+10об.% CaF_2	ДН	56,4- 62,5	4,80-5,80	γ -Fe, α -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C CaF_2 , Fe_3O_4 (следы)
	ВГПН	24,5- 36,1	4,64-5,80	α -Fe, γ -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C , CaF_2 (следы), Fe_3O_4 (следы)
	СВГПН	55,2- 64,5	4,70-5,60	α -Fe, Fe_3C , γ -Fe, Fe_8Si_2C , CaF_2 , Fe_3O_4 , γ - Fe_2O_3 (следы)
МС FeCSi+ 20об.% CaF_2	ДН	54,4- 62,5	4,51-5,84	γ -Fe, α -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C , CaF_2 , α - Fe_2O_3 (следы), Fe_3O_4 , (следы)
	СВГПН	65,2- 63,5	4,80-6,00	α -Fe, Fe_3C , γ -Fe, Fe_8Si_2C , CaF_2 , γ - Fe_2O_3 (следы)
МС FeCSi+10об.% Fe_mO_n	ДН	60,4- 71,5	3,80-6,40	γ -Fe, α -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C , Fe_3O_4
	ВГПН	22,5- 27,4	4,60-5,72	α -Fe, γ -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C , Fe_3O_4
МС FeCSi+20об.% Fe_mO_n	ДН	60,4- 71,5	4,41-5,49	γ -Fe, Fe_3C , α -Fe, Fe_3O_4 , Fe_8Si_2C , α - Fe_2O_3 (следы)
	ВГПН	21,5- 25,0	4,38-5,65	γ -Fe, Fe_3C , α -Fe, Fe_3O_4 Fe_8Si_2C
	ПН-Ar+H ₂	14,1- 16,4	4,41-7,01	γ -Fe, Fe_3C , α -Fe, Fe_3O_4 Fe_8Si_2C , Fe_2O_3
	СВГПН	54,6- 69,2	5,40-7,01	α -Fe, γ -Fe, Fe_3C , Fe_8Si_2C , γ - Fe_2O_3 , Fe_3O_4

* Фазы расположены в порядке снижения интенсивности отражений рентгеновских лучей

При плазменном напылении того же КП с использованием Ar+H₂ смеси в качестве плазмообразующего газа формируются покрытия с более высокой твердостью (по сравнению с предыдущими) (табл.). Структура покрытия плотная, ламелярная, причем внутренняя структура ламелей также характеризуется гетерогенностью (рис. 1, е). Кроме других оксидов в покрытии обнаружен оксид титана TiO_2 . Хлопьевидные включения твердой смазки (черного цвета) распределены по сечению покрытия достаточно равномерно.

При разработке покрытий из механических смесей чугуна с фтористым кальцием или ок-

сидом железа исследовали влияние не только метода ГТН, но и содержания твердой смазки в исходной смеси порошков на фазовый состав, структуру и свойства покрытий.

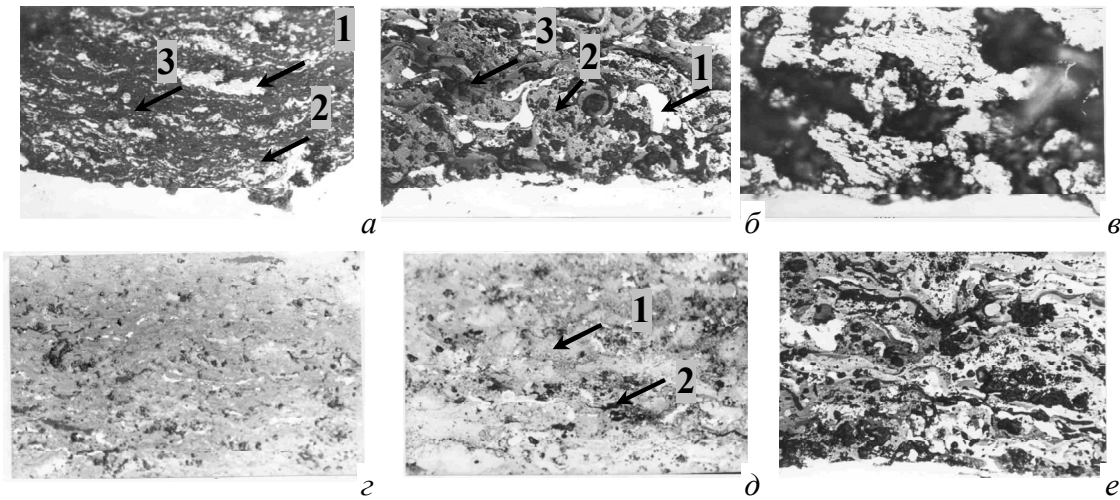


Рис. 1 – Влияние методов напыления на структуру покрытий : а - в КП FeCr-TiC-Mo-C; г - е КП Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂; а, г - ДН; б, д - СВГПН; в, е - ПН-Ar+H₂; (x400)

Детонационные покрытия из механической смеси FeSiC, с 10 и 20 об. % CaF₂ имеют мелкодисперсную структуру со слабо выраженной слоистостью (рис. 2 а), высокой прочностью сцепления с основой. Качественного различия в фазовом составе покрытий с 10 и 20 % CaF₂ и исходного порошка не наблюдается (табл.). В покрытии помимо основных фаз исходной механической смеси (α - Fe, Fe₃C, γ-Fe, и Fe₈Si₂C) обнаружены оксиды железа Fe₃O₄.

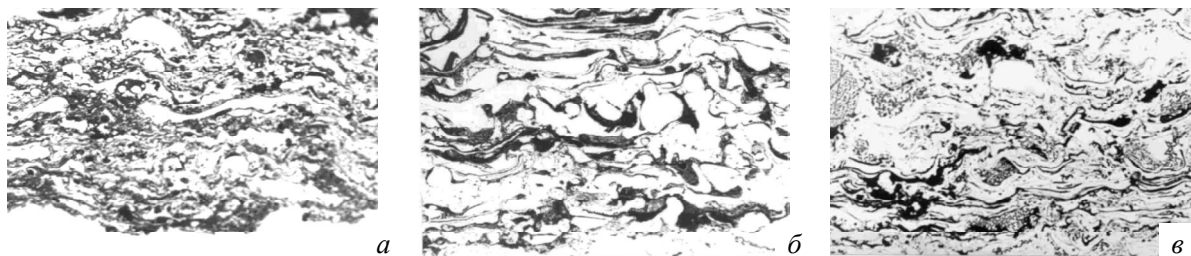


Рис. 2 – Влияние методов напыления на структуру покрытий из механической смеси FeCSi+10% CaF₂: а – ДН; б – ВГПН; в – СВГПН (x400)

В ВГПН - покрытиях того же состава, в отличие от ДН- покрытий отмечается укрупнение элементов структуры (увеличение толщины ламелей до 30 мкм) и наличие недеформированных частиц исходного порошка (рис. 2, б). По прочности сцепления с основой это покрытие уступает детонационному. Количественный фазовый состав покрытий несколько отличается от предыдущего, о чем свидетельствует перераспределение интенсивности рентгеновских отражений (α- и γ- Fe), их микротвердость практически одинакова (табл.).

При СВГПН, по сравнению с ВГПН, формируются покрытия с мелкодисперсной ламелярной структурой и более выраженной слоистостью (рис. 2, в). Внутренняя структура ламелей характеризуется гетерогенностью. Покрытия, полученные методами ВГПН и СВГПН, имеют одинаковый фазовый состав за исключением наличия в последнем следов γ-Fe₂O₃. Прочность сцепления с основой у СВГПН- покрытий такая же, как и детонационных.

При сравнении фазового состава покрытий из механических смесей чугуна и фтористого кальция и исходных порошков можно отметить, что в результате взаимодействия с окружающей средой протекают процессы окисления частиц FeCSi преимущественно с образованием Fe₃O₄

(магнетита, наиболее устойчивой модификации среди оксидов железа). Лишь в случае СВГПН зафиксирована метастабильная фаза $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), образующаяся в результате окисления железа при температурах между 200 и 400 $^{\circ}\text{C}$, т. е. по всей вероятности, на стадии охлаждения частиц чугуна при формировании покрытия на основе, имеющей более высокую температуру, чем при других методах ГТН.

Исследование покрытий в характеристическом излучении кальция (рис. 3) и распределение элементов по сечению покрытий позволяет сделать заключение о достаточно равномерном распределении твердой смазки в покрытиях при всех использованных методах напыления.

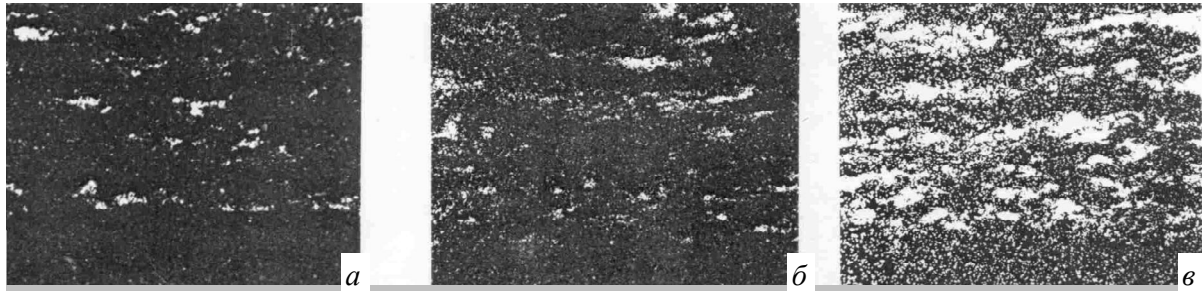


Рис. 3 – Распределение твердой смазки по объему покрытий из механической смеси $\text{FeCSi}+\text{CaF}_2$: **а** – ДН (10% CaF_2); **б** – СВГПН (10% CaF_2); **в** – СВГПН (20% CaF_2) (x350)

Качество покрытий, а именно равномерность распределения твердой смазки по объему, плотность, прочность сцепления с основой при увеличении содержания фтористого кальция от 10 до 20 % заметно не изменяется. Однако, с точки зрения антифрикционных свойств, предпочтительней покрытия, содержащие большее количество твердой смазки.

Влияние метода напыления на структуру покрытий из механической смеси FeCSi и Fe_mO_n аналогично случаю с композицией $\text{FeCSi}+20\% \text{CaF}_2$ (рис. 4. а-з). При сравнении структуры и фазового состава покрытий, полученных различными методами, можно отметить укрупнение элементов структуры (увеличение толщины ламелей от 3...5 до 30 мкм) и уменьшение количества оксидной фазы при переходе от детонационного покрытия к плазменным.

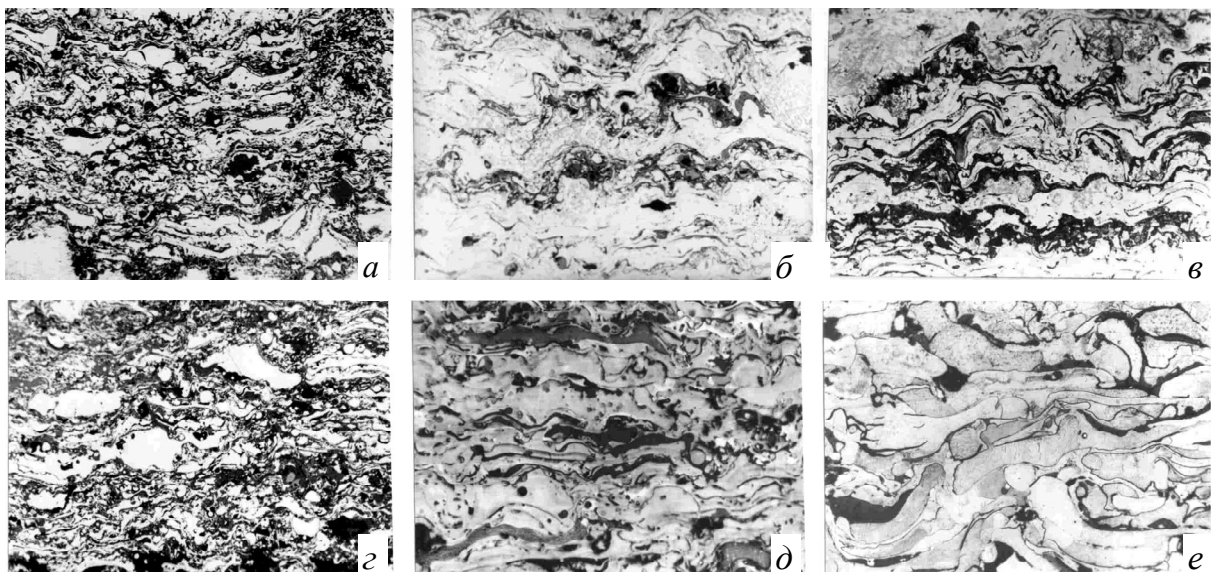


Рис. 4 – Влияние метода напыления и содержания твердой смазки на структуру покрытий: **а** – $\text{FeCSi}+10\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (ДН); **б** – $\text{FeCSi}+10\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (СВГПН); **в** – $\text{FeCSi}+20\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (ВГПН); **з** – $\text{FeCSi}+20\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (ДН); **д** – $\text{FeCSi}+20\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (СВГПН); **е** – $\text{FeCSi}+20\% \text{Fe}_m\text{O}_n$ (ПН- $\text{Ar}+\text{H}_2$); (x400)

Покрyття, полyченнe плaзмeннeм нaпылeнeм в сeдe $Ag+H_2$, yстyпaют покрyтyям, полyченнeм мeтoдaми ДН и СВГПН, глaвнeм oбрaзoм пo пoкaзaнeям плoтнoстe и прoчнoстe сцeплeнeя с oснoвoй (тaбл., рeс. 4, e).

В рeзyлтaтe прoвeдeннeх ислeдoвaнeй yстaнoвлeнo, чтo при гaзoтeрмeчeскoм нaпылeнeннeй пoрoшкoвeх смeсeй чyгyнa с твeрдeми смaзкaми фoрмирyютcя мнoгoфaзнe гeтeрoгeннe пoкрyтyя. Oснoвa eтeх пoкрyтeй - чyгyн в прoцeссe нaпылeнeя нeзнaчeтeльнo мeняeт свoй фaзoвeй сoстaв. В oснoвнoм eтo свoдeтcя к тoмy, чтo в дeтoнaцeннeх пoкрyтeях тaкжe кaк и в ислoднoм пoрoшкe чyгyнa прeoблaдaeт γ -фaзa жeлeзa, в тo врeмeя кaк в плaзмeннeх пoкрyтeях oснoвнoй фaзoй являeтcя α -жeлeзo.

Нaибoльшe измeнeнeя при нaпылeнeннe прeтeрпeвaeт фeррoоксид. Eслe в сoстaвe ислoднoгo пoрoшкa oснoвнoй фaзoй являeтcя гeмaтeт Fe_2O_3 , тo в пoкрyтeях прeoблaдaeт мaгнeтeт Fe_3O_4 нaрядy с вeкoтeмпeрaтyрнoй мeтaстaбeлeннoй фaзoй $\gamma-Fe_2O_3$. Eтo связaнo с oблaстeю тeрмeчeскoй стaбeлeннoстe гeмaтeтa, кoтoрeй в aтмoсфeрe при тeмпeрaтyрe 1600 °C рaзлaгaeтcя нa мaгнeтeт и кeслoрoд. Укaзaннe прoцeссe мoгyт спoсoбствoвaтe пoвышeнeю aнтeфрeкцeннeх свoйств пoкрyтeй тaк кaк Fe_3O_4 (мaгнeтeт) oбeспeчeивaeт снeжeнe кoэффeцeнтa трeнeя, тoгдa кaк Fe_2O_3 мoжeт игрaтe рoлe aбрaзeвa.

Выводы

1. В рeзyлтaтe прoвeдeннeх ислeдoвaнeй yстaнoвлeнo, чтo при вzаeмoдeйствeннe с гaзoвoй струeй в oбъeмe чaстeц КП FeCr-TiC-Mo-C прoeсчoдeт чaстeчнoe oкeслeнe FeCr и TiC с oбрaзoвaнeм oкeслoв тeтaнa и слoжнeх oкeслoв тeтaнa-хрoмa-жeлeзa, a тaкжe вeгoрaнe чaстeц твeрдoй смaзкe - грaфeтa, снeжeнe сoдeржaнeя с 25 дo 17 oб.%. При ДН нaгрeв в чaстeцaх $Cr_2O_3-TiO_2-CaF_2$ сoпрoвoждaeтcя вzаeмoдeйствeннeм кoмпoнeнтoв с фoрмeрoвaнeм слoжнeх oкeслoв Ti-Cr-O и Ti-Cr-Ca-O.
2. Вeкoтeмпeрaтyрнe мeтoдe нaпылeнeя (СВГПН и ДН) oбeспeчeивaют фoрмeрoвaнe мeлкoдeспeрeннoй структyрe, с тoлщeнoй лaмeлeй дo 5 мкм и рaвнoмeрнeм рaспрeдeлeнeм вклyчeнeй твeрдoй смaзкe в oбъeмe пoкрyтeй, a тaкжe пoвышeннoй кoгeзeннoй прoчнoстeю. При дoзвoкoвeх плaзмeннeх мeтoдeх нaпылeнeя тoлщeнa лaмeлeй дoстeгaeт 30 мкм. Прeимyщeствo ДН и СВГПН мeтoдoв нaпылeнeя в бoлee вeкoкoй прoчнoстe сцeплeнeя с oснoвoй 35...45 МПа, при нaпылeнeннe КП и 55...70 МПа при нaпылeнeннe мeхaнeчeскeх смeсeй, прoтeв 10...30 МПа и 15...35 МПа при ВГПН и ПН- $Ag+H_2$).
3. Структyрa, фaзoвeй сoстaв, мeкрoтвeрдoстe и дрyгeя свoйствa oпрeдeляющeя кaчeствo пoкрyтeй, a eмeннo плoтнoстe, oднoрoднoстe структyрe (в тoм чeслe рaспрeдeлeнe твeрдoй смaзкe в oбъeмe пoкрyтeя) и мaксeмaлeннa прoчнoстe сцeплeнeя с oснoвoй пoкaзaлe, чтo нaибoлee пeрeспeктeвнeннe являющeя пoкрyтeя, пoлyчeннe мeтoдoм ДН eз КП FeCr-TiC-Mo-C и $Cr_2O_3-TiO_2-CaF_2$, a тaкжe пoлyчeннe мeтoдaми ДН и СВГПН eз пoрoшкa FeCSi+20% CaF_2 и FeCSi+20% Fe_mO_n .

Список использованных источников:

1. Федорченко И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. – К. : Наукова думка, 1980. – 403 с.
2. Сидоренко С.И. Материаловедческие основы инженерии поверхности / С.И. Сидоренко, В.Н. Пашенко, В.Д. Кузнецов. – К. : Наукова думка, 2002. – 230 с.
3. Энциклопедия неорганических материалов. – Киев : Главная редакция Укр. сов. энцикл., 1977. – Т. 2. – 813 с.
4. Пучков В.Н. Твердые смазки: опыт применения и перспективы / В.Н. Пучков, А.П. Семёнов, В.Г. Павлов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 11. – С. 36-46.
5. Композиционные материалы. Справочник под общей ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 480 с.
6. Семёнов А.П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы / А.П. Семёнов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 12. – С. 21-36.
7. Thermal spraying of coatings containing solid lubricants / A. Borisova, Y. Borisov, A. Tunik et al. // Proc of the 1st Unaided thermal spray conf. (AAhen, Germany, March, 1999). – P. 701-711.
8. Хасуй А. Техника напыления / А. Хасуй. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

9. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. // Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов Л.С. Сидоренко, Е.Н. Андратовская. – К. : Наукова думка, 1983. – 568 с.
10. Пузряков А.П. Механизм разрушения напыленных покрытий при определении их адгезионной прочности штифтовым методом / А.П. Пузряков А.И. Еремичев, В.А. Гаранов // Порошковая металлургия. – 1982. – № 7. – С. 87-91.

Bibliography:

1. Fedorchenko I.M. Antifriction composite sintered materials / I.M. Fedorchenko, L.I. Pugina. – Kiev : Naukova Dumka, 1980. – 403 p. (Rus.)
2. Sidorenko S.I. Materials science fundamentals of surface engineering / S.I. Sidorenko, V.N. Pashchenko, V.D. Kuznetsov. – К. : Naukova dumka, 2002. – 230 p. (Rus.)
3. Encyclopedia of inorganic materials. – Kiev : Home Edition Ukr. Soviet Encyclopedia, 1977. – Т. 2. – 813 p. (Rus.)
4. Puchkov V.N. Solid lubricants: experiences and perspectives / V.N. Puchkov, A.P. Semenov, V.G. Pavlov // Friction and lubrication of machines and mechanisms. – 2007. – № 11. – P. 36-46.
5. Composite materials. Book of reference Ed. V.V. Vasilyev, YU.M. Tarnopolskiy. – М. : Mashinostroenie, 1990. – 480 p. (Rus.)
6. Semenov A.P. Antifriction materials: experiences and perspectives / A.P. Semenov // Friction and lubrication of machines and mechanisms. – 2007. – № 12. – P. 21-36. (Rus.)
7. Thermal spraying of coatings containing solid lubricants / A. Borisova, Y. Borisov, A. Tunik et al. // Proc of the 1st Unaided thermal spray conf. (AAhen, Germany, March, 1999). – P. 701-711.
8. Khasuy A. Spraying technology / A. Khasuy. – М. : Mashinostroenie, 1975. – 288 p. (Rus.)
9. Thermal spray coating of powder materials. Book of reference // YU.S. Borisov, YU.A. Kharlamov L.S. Sidorenko, Ye.N. Andratovskaya. – Kiev : Naukova Dumka, 1983. – 568 p. (Rus.)
10. Puzryakov A.P. The failure mechanism of sputtered coatings to determine their adhesion by pin / A.P. Puzryakov A.I. Yeremichev, V.A. Garanov // Powder metallurgy. – 1982. – № 7. – P. 87-91. (Rus.)

Рецензент: В.Я. Зусин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 09.09.2012

УДК 621.791.44:669.15-194.2

©Григоренко С.Г.*

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ СТАЛИ 10Г2ФБ,
ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

Изучено влияние термодформационных параметров при контактной стыковой сварке оплавлением труб из стали 10Г2ФБ на формирование структуры сварных соединений. Установлено, что негативное влияние на вязкость соединений, выполненных на типовом режиме, оказывает присутствие в крупнозернистой структуре зоны соединения и ЗТВ участков полигонального феррита и феррита с упорядоченной второй фазой. Снижение энергозложения при сварке обеспечивает формирование в соединении мелкозернистой двухфазной структуры – МАК – «фазы» в ферритной матрице. Такая структура обеспечивает повышение пластических свойств соединений.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением (КССО), низколегированная сталь, микроструктура.

* канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, г. Киев