

УДК 621.7937

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**В. И. Большаков, В. И. Харченко, Ф. Ф. Вашкевич, А. Я. Спильник,  
В. И. Журавель, А. Б. Загородний, В. И. Любушкин, \*В. Е. Замковой,  
\*А. Б. Милосердов., \*Ю. Н. Евтерев**

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,  
\*КБ «Прогресс», г. Запорожье*

В настоящее время создание машин нового поколения требует и новых материалов для изготовления деталей этих машин. Конструкционные материалы практически исчерпали свои возможности. Термическая и химико-термическая обработки не всегда могут выполнить поставленные требования.

На помощь приходят поверхностные способы обработки материалов, а именно, создание на поверхности детали покрытия с заданными свойствами: на поверхности мягкой детали создать износостойкое покрытие, повысить жаростойкость огнеупорного кирпича керамическим покрытием, создать антифрикционную прокладку и т. д.

Науке известно много способов получения покрытий: это и наплавки, и напыление, и гальваника, и диффузионное насыщение, но только газотермическое напыление представляет интерес, потому что

- высокая температура пламенной струи ( $10 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3$ ) °С позволяет плавить и наносить на подготовленные поверхности материалы с любой температурой плавления;
- высокая скорость пламенного потока 250–300 м/с позволяет сформировать покрытие с высокой плотностью и прочностью;
- возможность регулировать температуру нагрева подложки сводит к минимуму деформации детали после формирования покрытия;
- процесс плазменного напыления имеет много параметров регулирования, а это позволяет устанавливать более точно технологические параметры при формировании покрытия;
- имеется возможность формировать покрытие как по всей поверхности детали, так и в отдельных местах (вариант восстановления покрытия);
- возможно получение композиционных покрытий из отдельно взятых компонентов при использовании нескольких питателей-дозаторов.

Материалы, которые можно превратить в газопорошковую или газокапельную высокотемпературную струю, можно использовать в виде проволоки или в виде порошков.

Материалы для износостойкой наплавки и напыления сведены в таблице 1.

Таблица 1

Материалы из простых и сложных сплавов для получения  
износостойких покрытий

Материал	Марка материала, ГОСТ, ТУ	Микротвердость Нц кгс/мм <sup>2</sup>	Твердость, HRC
Углеродистая сталь	Сталь 50	3000–3500	48–54*
Углеродистая сталь	Сталь У12А	3700–3900	62–65*
Легированные стали	П4Х13	3100–3200	51–52*
	P18	3500–3600	59–60*
	9ХС	3700–3800	63–64*
Кобальтовые сплавы CoCrNiW	ПГ–АН15 ТУИЭС374–83	3500–3900	58–64
	ПГ–10КО1 ТУУ 322–19– 004–96	2900–3200	46–51
Сплавы на основе никеля NiCrBSi	ПГ–АН7 ТУИЭС374–83	2700–3500	42–56
	ПГ10Н–О1 ТУУ3–22–190– 04–96	3400–3800	56–63
	СНГН	3200–3600	52–61

\*Твердость после закалки с отпуском.

Анализ таблицы 1 показал, что покрытия из металлов и сложных сплавов обладают высокой твердостью (HRC 45–65) и могут быть применены для создания износостойких покрытий. Такие покрытия успешно применяются для восстановления изношенных износостойких поверхностей деталей с сохранением требуемой твердости, а также в качестве подслоя (т. е. промежуточного слоя, улучшающего прочность сцепления) при формировании защитного покрытия.

В настоящее время нашли широкое применение в качестве износостойких материалов при наплавке и напылении тугоплавкие соединения, такие как бориды титана, хрома, циркония и карбиды титана, хрома, вольфрама. Твердость покрытий из этих материалов приведена в таблице 2.

Вследствие высокой твердости, бориды и карбиды металлов, которые приведены в таблице 2, могут служить в качестве самостоятельного компонента в покрытии. Однако при этом твердое, но достаточно хрупкое покрытие и при работе появляются трещины и сколы покрытия. Но в

композиционном покрытии при напылении композиционных порошков эти материалы могут служить износостойким ядром износостойкого покрытия.

Таблица 2  
Твердость покрытий из порошков тугоплавких соединений

Тугоплавкие соединения					
диборид титана TiB <sub>2</sub>	диборид хрома CrB <sub>2</sub>	диборид циркония ZrB <sub>2</sub>	карбид титана TiC	карбид хрома Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	карбид вольфрама WC
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>					
2940	1850	2060	2700	1800	1800

Покрытия, получаемые из порошков оксидов, нашли применение в машиностроительной и металлургической промышленности – как износостойкие, так и теплоизолирующие. В качестве износостойких покрытий применяются покрытия из окиси алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оксида титана (TiO<sub>2</sub>), оксида хрома (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и их соединений: (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>), свойства покрытий из оксидов приведены в таблице 3.

Таблица 3  
Свойства покрытий из порошков оксидов

Напыливаемый материал	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>
Твердость, HRC	60	62	71	68	70-72	55
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,65	4,1	5,0	4,2	5,4	3,4

Анализ таблицы 3 показал, что покрытия из оксидов обладают высокой твердостью (HRC 60–72) и сравнительно невысокой плотностью ( $\rho = 3,4–5,4$  г/см<sup>3</sup>).

Однако для условий газоабразивного изнашивания такие покрытия требуют проверки в конкретных условиях.

Материалы композиционных порошковых смесей для формирования композиционных покрытий могут быть получены плакированием, т.е. нанесением одного материала на поверхность другого в виде оболочки. Другим способом получения композиционного порошка может быть конгломерация, т.е. образование крупной частицы из нескольких более мелких. Состав таких покрытий и их свойства представлены в таблице 4.

При работе материала в абразивной среде его износостойкость определяется не только твердостью карбидов в их составе, но также и прочностью связи компонентов, удерживающих эти карбиды. Плакированные порошки имеют преимущества перед порошками, полученными механическим перемешиванием: повышенная текучесть (равномерная подача порошка при дозировании), равномерное распределение компонентов в покрытии. При этом они имеют недостатки: сложность в изготовлении,

невозможность менять соотношение компонентов в процессе формирования покрытия.

Таблица 4

Состав и свойства покрытий из композиционных материалов

Свой-ства покрытия	10 % Ni + 90 % WC ПКВНС	12 % Co+ 88 %WC	28 % Ni + 72 % (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC)	65 % NiCrBSi+ 35 % WC ПС–12НВК	75 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 25 % Ni
Плотность ρ г/см <sup>3</sup>	4–7	11,8–14	7,8	8,32	7,1
Твердость НRC	57	60–65	60	63,3	58
Условия получения порошков	Порошок плакиро-ван никелем	Поро-шок плаки-рован никелем	Порошок плакиро-ван ко-бальтом	Порошок плакиро-ван никелем	Механи-ческая смесь порошков

Для выбора износостойкого покрытия необходимы исследования по испытанию покрытий на износ в лабораторных условиях с проверкой промышленными испытаниями.

Из всех существующих методов определения износостойкости материала был выбран метод газоабразивного изнашивания. Он позволяет быстро и эффективно производить оценку качества материала (покрытия) и наиболее полно отражает реальный износ в газозвушном тракте ГТД.

Метод основан на определении газоабразивного износа путем измерения потери массы исследуемого материала при обдувке его скоростным потоком газа со взвешенными в нем твердыми абразивными частицами. Износостойкость оценивалась по интенсивности изнашивания, т. е. потери массы покрытия в единицу времени. Испытания проводили на специальной лабораторной установке, схема которой показана на рисунке 1.

Через воздуховод (5) подается сжатый воздух под давлением 0,5 Мпа (давление контролируется манометром (4)). В бункер-питатель насыпается определенный объем абразивного порошка. Через сопло (3) струя воздуха с частицами электрокорунда направляется на поверхность испытываемого материала (2) под углом 30°. Колебание давления воздуха не более ± 0,015 МПа. Объем абразивного материала должен быть достаточным для потери веса покрытия не менее 10 мг за одно испытание и тарируется специальной меркой.

Взвешивание производится на аналитических весах типа ВЛА–200, ВЛР–200 с погрешностью не более ± 0,001 г.

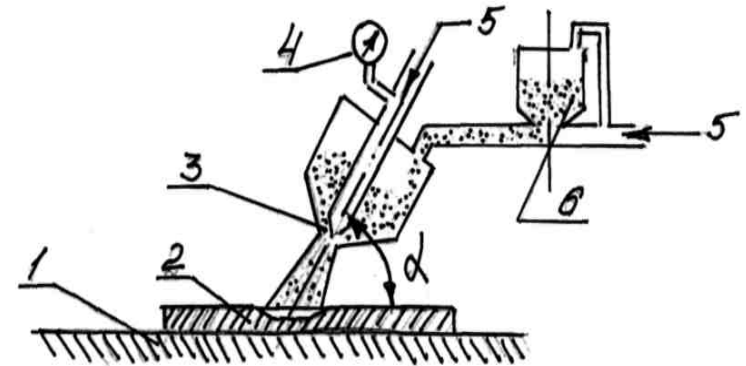


Рис. 1. Схема установки для испытания на газоабразивный износ:  
 1 – основание; 2 – образец с покрытием; 3 – сопло; 4 – манометр;  
 5 – воздуховод; 6 – бункер-питатель;  $\alpha$  – угол наклона.

Постоянство эксперимента обеспечивается контролем следующих параметров:

- временем истечения абразива из воронки;
- количеством абразива, участвующего в износе;
- углом встречи абразивной струи с покрытием;
- давлением сжатого воздуха.

В качестве образцов использовались пластины испытуемого материала толщиной не менее 2 мм.

В качестве абразивного материала применяли порошок электрокорунда №10 ГОСТ3647–71.

Потери массы образца при испытаниях определяли по формуле:

$$\Delta G = G_0 - G_1, \quad (1)$$

где  $G_0$  – начальная масса образца, г;

$G_1$  – конечная масса образца после обдува, г.

Газоабразивная стойкость определялась как отношение веса изношенного материала к весу испытуемого материала:

$$\beta = \frac{\Delta G}{G_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta G$  – потери массы испытуемого материала, г;

$G_0$  – начальная масса образца, г.

За интенсивность изнашивания принимается износ покрытия за единицу времени.

При проведении экспериментов угол атаки « $\alpha$ » составлял  $10^\circ$  и  $30^\circ$ , а дистанция «L» – 210 мм.

За результат испытания принималось среднее арифметическое из трех измерений.

В связи с невозможностью смоделировать все условия работы деталей в двигателе, оценка газоабразивной стойкости по этой методике является относительной и носит качественный характер.

Технология получения износостойких покрытий сводится к проведению четырех технологических операций:

- подготовка порошковых материалов;
- подготовка поверхностей деталей перед напылением;
- плазменное напыление;
- механическая обработка деталей с покрытием.

Подготовка порошковых материалов проводится с целью придания порошку сыпучести, необходимого фракционного состава, ликвидации влаги и получения необходимой композиции (для композиционных материалов).

Для применяемых при плазменном напылении плазмотронов типа ПП–25, исходя из их мощности 15–30 кВт, оптимальной считается фракция порошков от 50 до 100 мкм. Оптимизация проведена из условия нагрева частицы порошка в плазменной струе до жидко-пластического состояния и образования покрытия.

При крупности порошка свыше 100 мкм нагрев его недостаточный и формирование покрытия затруднено. Коэффициент использования порошка при этом низкий.

При крупности порошка меньше чем 50 мкм при высокой температуре плазмы (8 000 – 15 000 °С) он сгорает, т. е. окисляется не образуя покрытия. Особенно это характерно для порошков из титана, молибдена и вольфрама, приведенных в таблице 1.

Рассев порошков по фракциям производили на виброситах стандартного образца.

Для придания порошкам сыпучести их просушивали в сушильном шкафу при температуре 150 – 200 °С в течение 2 часов на противнях из нержавеющей стали при слое толщиной 10–15 мм. Проверку на сыпучесть (текучесть) производили по ГОСТ 20899–75. Для порошковых материалов, приведенных в таблицах 1 и 2, сыпучесть составляет 8–18 с.

Меньшее число относится к порошкам, которые получены методом распыления из расплава (сплавы на основе NiCrBSi), а большие значения – для тугоплавких порошков, которые получены методом спекания ( $WC$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ZrB_2$ ).

С целью придания порошкам из карбидов, боридов и окислов сыпучести их плакируют, т. е. на поверхность одной частицы наносят другой материал (обычно металл); при этом повышается и когезионная прочность полученного покрытия.

Плакирование осуществлялось карбонильным способом по ТУ 48–3–150/0–84. Составы применяемых композиций представлены в таблице 4.

Основной технологической операцией перед нанесением защитного покрытия является подготовка поверхности, т. е. создание шероховатости. При создании шероховатости поверхность также очищается от масел и грязи. Величина шероховатости и ее форма значительно влияют на прочностные характеристики, такие, например, как адгезия покрытия.

Шероховатость можно создать механически путем снятия стружки резцами различной формы. Этот способ имеет большой недостаток – ослабляет сечение детали. Химическим травлением можно создать шероховатость. Однако этот процесс очень длительный и трудоемкий.

Наиболее просто использовать абразивоструйную подготовку, при которой абразивному материалу сообщается скорость и при встрече с поверхностью он оставляет на ней неровности.

В качестве абразивного материала в настоящее время используется электрокорунд марки Э14 ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) или карбид кремния (SiC), которые при очистке не образуют пыль. Следует отметить, что SiC нельзя использовать для никелевых сплавов из-за образования легкоплавкой эвтектики при температуре  $\approx 920^\circ\text{C}$ .

Проведенные исследования по оптимизации технологического процесса пневмоочистки детали позволили выявить зависимости шероховатости поверхности от крупности абразива (рис. 2).

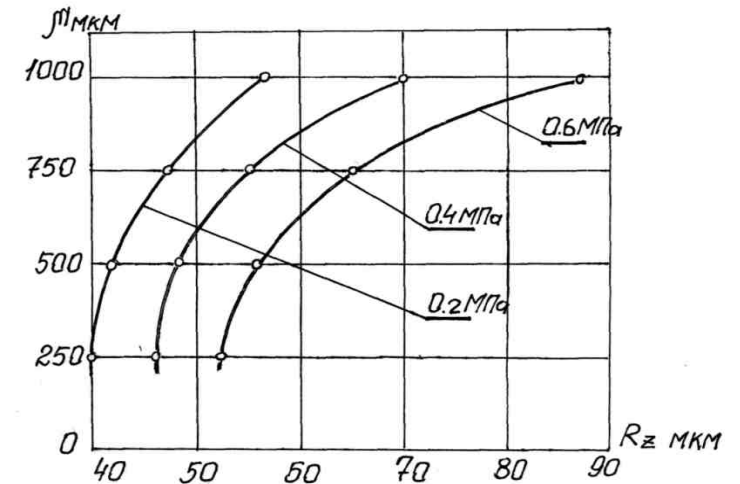


Рис. 2. Влияние крупности абразивных частиц ( $\mu$ ) и давления сжатого воздуха на шероховатость обрабатываемой поверхности. Дистанция обработки 100 мм

При малом угле встречи абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью (особенно для пластичных материалов) наблюдается перемещение материала без образования заметной шероховатости ( $R_z$  не превышает 40 мкм). Увеличение угла  $\alpha$  приводит к интенсификации пневмообработки и увеличению шероховатости. Угол встречи абразивных частиц с поверхностью детали равный  $75^\circ$  – наилучшее условие для создания шероховатости.

Оптимальной дистанцией для пневмообработки является дистанция равная 90–100 мм. Увеличение или уменьшение дистанции (рис. 3) приводит к ухудшению поверхности: большие неровности уменьшают общую площадь контакта напыленного слоя с поверхностью, а малые неровности уменьшают эффект механического зацепления.

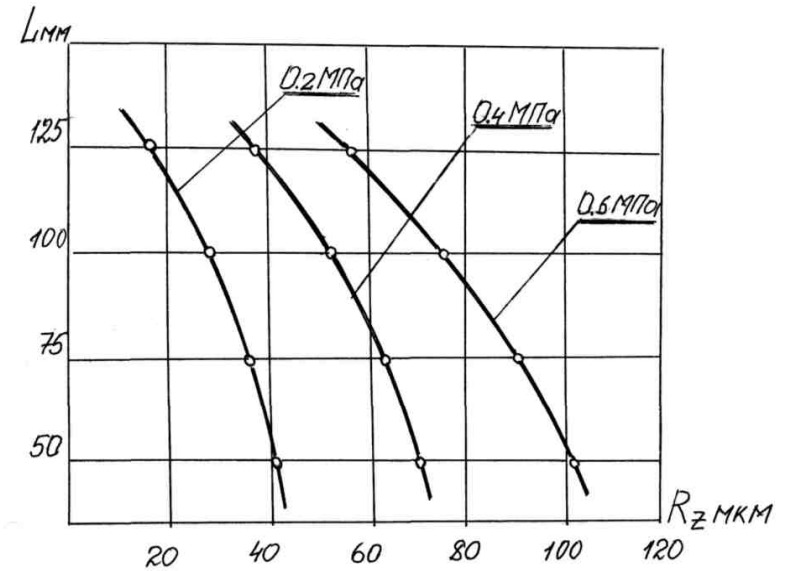


Рис. 3. Влияние дистанции напыления (L) и давления сжатого воздуха на конечную шероховатость обработанной поверхности (Rz); абразивный материал – электрокорунд крупностью 750 мкм

Крупность абразивных частиц существенно влияет на шероховатость.

Слишком мелкие абразивные частицы хорошо очищают поверхность от окислов, но не создают шероховатой поверхности.

Абразивные частицы больших размеров создают технологические трудности при транспортировке и грубую поверхность, не позволяющую получать такое покрытие на детали.

Оптимальной крупностью абразивных частиц является 750–800 мкм.

Технологические режимы пневмообработки сведены в таблицу 5.

К технологическим режимам плазменного напыления относятся: сила тока, напряжение, расход плазмообразующих газов, дистанция напыления, расход порошка и транспортирующего газа, а также давление охлаждающей воды с заданной температурой на выходе.



Таблица 5

Оптимальные режимы пневмоподготовки поверхности перед плазменным напылением

Дистанция обработки, мм	Давление воздуха, МПа	Крупность абразивных частиц, мкм	Угол встречи абразивных частиц с поверхностью, град	Высота микронеровностей, мкм
90–100	0,5	750–800	75	70–80

Тепловая мощность плазменной струи определяется силой тока, напряжением, родом плазмообразующих газов и их расходом. Она находится в зависимости от вида распыляемого порошка (керамика, металл, кермет), его крупности, а поэтому величина конкретная в конкретном случае.

Частичка материала должна достигнуть поверхности детали, имея высокую скорость 200–300 м/с и высокую температуру – до 0,9 Тпл.

Недогретая частичка отскакивает от поверхности, уменьшая коэффициент использования порошка, а слишком разогретая частица сильно окисляется, ухудшая прочность сцепления.

Исходя из вышесказанного, при напылении материалов, представленных в таблицах 1–4, использовался ток величиной 300–390 А, напряжение 40–70 В, при расходе плазмообразующего газа азота 8 л/мин, а аргона 20 л/мин, давление газов при этом составляло 0,4 МПа.

Изменяя дистанцию напыления, можно изменять температуру нагрева подложки. Перегрев подложки обычно сопровождается и перегревом покрытия, а это чаще всего приводит к отслоению самого покрытия.

Керамический порошок, имея высокую температуру плавления при увеличенных дистанциях напыления, успевает охладиться, что приводит к снижению прочностных характеристик. Дистанция напыления в пределах 120–130 мм является оптимальной.

Сопло плазмотрона, изготовленное из меди, выдерживает большие тепловые нагрузки только в том случае, когда оно интенсивно охлаждается водой. Однако в этом случае вода уносит большое количество тепла, охлаждая пламенный поток. Поэтому оптимальной температурой воды является 45–50 °С при ее расходе в пределах 7–8 л/мин.

Все технологические параметры представлены в таблице 6.

Напыленные по разработанной технологии покрытия из материалов, представленных в таблицах 1–4, были исследованы на композиционную прочность и износостойкость в условиях газоабразивного изнашивания на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Результаты исследования когезионной прочности представлены на рисунке 4.

Основная цель проведенных исследований – определить наиболее износостойкие материалы, выбрать их состав и рекомендовать для применения в производстве.

Таблица 6

Режимы пламенного напыления покрытий		
Параметры	Ед.измерения	Параметры
Сила тока	ампер	300–390
Напряжение	вольт	40–70
Расход плазмообразующих газов:		
азота	л/мин	20
аргона	л/мин	8
Рабочее давление газов:		
азота	л/мин	4
аргона	л/мин	4
Дистанция напыления	мм	120–130
Расход порошка	кг/час	2–3
Расход охлаждающей воды	л/мин	7–8
Расход транспортирующего газа азота	л/мин	1

Из простых веществ были выбраны, как наиболее твердые – хром и легированная сталь 4X13, а также сплав ПГ10Н01; из карбидов – карбид титана TiC и карбид хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; из оксидов – корунд Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; из композиционных материалов – Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> + TiC (ПКХТН–20) и NiCrBSi с 33 % WC (ПС12НВК), выпускаемые отечественной промышленностью.

Были проведены исследования по влиянию мощности плазмотрона при формировании покрытия на интенсивность изнашивания. Мощность плазмотрона изменялась в пределах от 10 до 30 кВт.

Анализ графиков, представленных на рисунках 4 и 5, показывает, что увеличение силы тока при образовании плазмы приводит к повышению скорости струи, а значит и частиц порошка, поэтому когезионная прочность для всех испытуемых материалов увеличивается с увеличением силы тока. Наибольшую прочность показало покрытие из композита ПКХТН 30, что подтверждает его высокую износостойкость. Никелевая связка прочно удерживает карбиды титана и хрома при высокой твердости этих карбидов.

Для всех исследованных материалов увеличение мощности плазмотрона при напылении приводит к уменьшению интенсивности изнашивания (рис. 5). Для покрытий из хрома (Cr), корунда (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), сплава ПГ10Н01 в процессе изнашивания наблюдается хрупкое разрушение с выкрашиванием частиц покрытия.

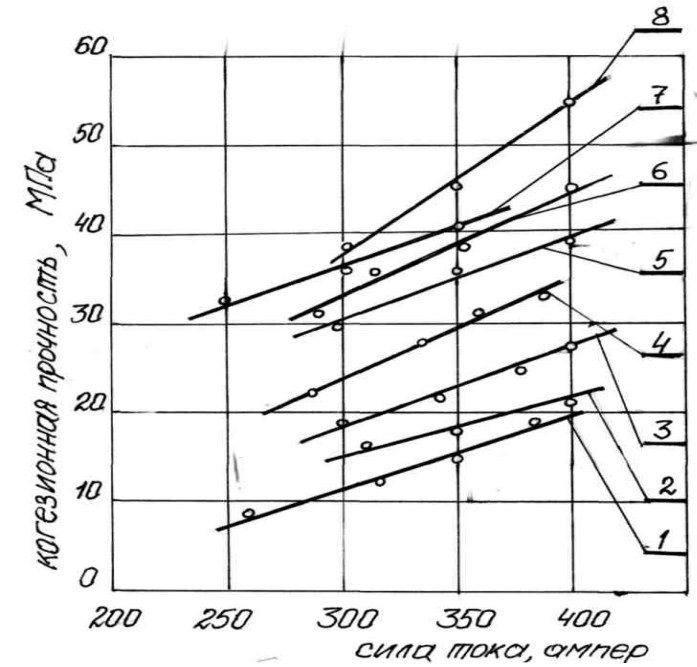


Рис. 4. Влияние силы тока плазменной струи на когезионную прочность покрытий:

- 1 – покрытие из хрома Cr; 2 – покрытие из корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – покрытие из композита ПС12НВК; 4 – покрытие из сплава ПГ10Н01; 5 – покрытие из карбида титана TiC; 6 – покрытие из карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 7 – покрытие из легированной стали П4Х13; 8 – покрытие из композита ПКХТН30

Для покрытия из легированной стали ПЧХ13 и композита ПС12НВК имело место микрорезание абразивными частицами покрытия.

Покрытия из карбидов хрома и титана изнашивались вследствие их недостаточной когезионной прочности.

Наиболее износостойким из исследованных материалов является композит ПКХТН-20, состоящий из карбидов хрома и титана с никелевой связкой. У этого материала интенсивность изнашивания в 6 раз меньше, чем у легированной стали ПЧХ13.

Таким образом, проведенные исследования позволили выбрать наиболее износостойкий материал (это композит ПКХТН-30) и технологические режимы формирования износостойкого покрытия методом плазменного напыления.

Результаты исследований представлены графически на рисунке 5.

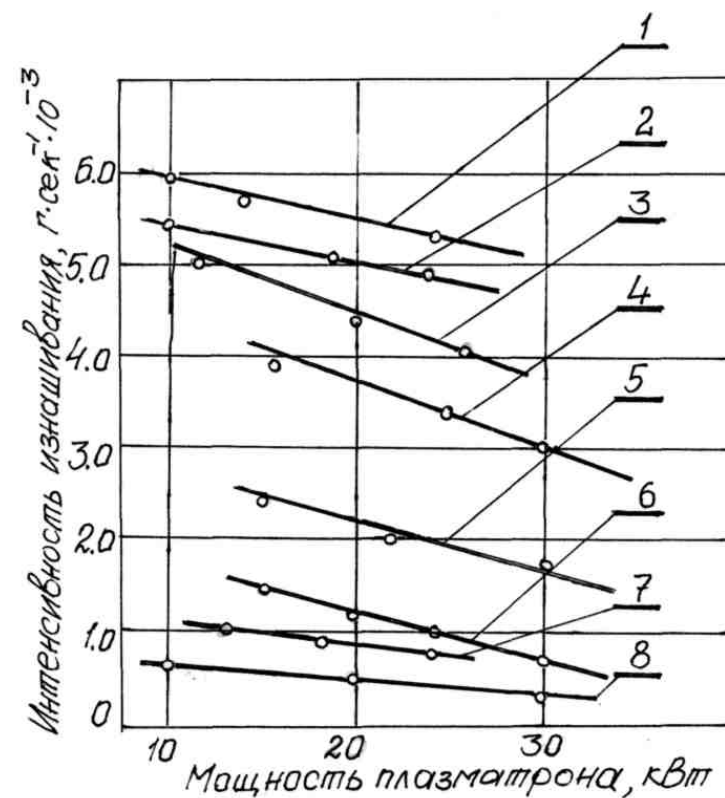


Рис. 5. Интенсивность изнашивания покрытий из представленных материалов: 1 – корунд  $Al_2O_3$ ; 2 – сплав ПГ10Н01; 3 – карбид титана TiC; 4 – легированная сталь 4X13; 5 – ПКХТН-30; 6 – карбид хрома  $Cr_3C_2$ ; 7 – сплав ПГ10Н01; 8 – композит ПК12НВК

Для восстановления и защиты деталей ГТД, рабочих лопаток вентилятора, переходников, обойм, посадочных мест корпусов и др. (изделия Д18Т, Д36, Д136, Д27, АИ222 и др.) на ГП «Ивченко-Прогресс» использовался композит ПКХТН-30, который наносился плазменным способом. Нарботка вышеуказанных деталей после восстановления значительно превысила ресурс эксплуатации этих деталей до ремонта по посадочным местам (в среднем он составлял 6000 ч). Предполагаемый ресурс эксплуатации восстановленных деталей указанным материалом должен превышать ресурс вновь изготовленных более чем в 2–3 раза.

### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили выбрать наиболее износостойкий материал (композит ПКХТН-30), а приведенные технологические режимы формирования износостойкого покрытия методом плазменного напыления позволяют создать покрытия на деталях, работающих в абразивной среде.

### Литература

1. Мулякаев Л. М. Защитные покрытия деталей газотурбинных двигателей// Технология металлов. – 2000. – № 9. – С. 41–48.
2. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. – 270 с.
3. Плохов А. В., Тушинский Л. И. Конструктивная прочность композиции основной металл–покрытие// Технология металлов. – 2006. – № 12. – С. 39–45.