Тополянский П.А., Соснин Н.А., Ермаков С.А. Напыление порошковых покрытий плазмотронами с фиксированной длиной сжатой дуги. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 9-ой практической конференции 10-13.04.2007 г. Санкт-Петербург, Изд. Политехнического ун-та. Санкт-Петербург.2007. ч.1. С. 249-257

НАПЫЛЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМОТРОНАМИ С ФИКСИРОВАННОЙ ДЛИНОЙ СЖАТОЙ ДУГИ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., СОСНИН Н.А., ЕРМАКОВ С.А.
НПФ «ПЛАЗМАЦЕНТР», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено напыление металлических порошковых покрытий при использовании плазмотронов с фиксированной длиной сжатой дуги и с потоком фокусирующего газа, обеспечивающее стабильность процесса, высокие значения коэффициента использования порошка (65…70 %) и прочности сцепления покрытия с основой (от 30 до 60 МПа), минимальную пористость покрытия, достаточно высокую производительность напыления качественных покрытий.

There has been considered spraying of metal powder coatings by plasmatrons with a fixed length compressed arc and focusing gas stream which ensure stable process, high operating ratio of a powder (65 …70%) and hard adhesion of the coating and the base (30-60 MPa), minimal coating porosity, high spraying productivity of premium-quality coatings.

В качестве плазмообразующего газа при напылении, наряду с прочими газами, применяется аргон, дающий следующие преимущества: наибольшую стабильность работы оборудования и повышенную долговечность элементов плазмотрона; малый разогрев подложки за счет быстрого падения температуры по длине плазменной струи; высокие скорости аргоновой плазменной струи; пониженный уровень шума.

Сравнительно низкая напряженность электрического поля сжатой дуги в аргоне (по сравнению с молекулярными газами) определяет преимущества использования плазмотронов с фиксированной длиной сжатой дуги, что достигается специальными межэлектродными вставками (рис. 1).

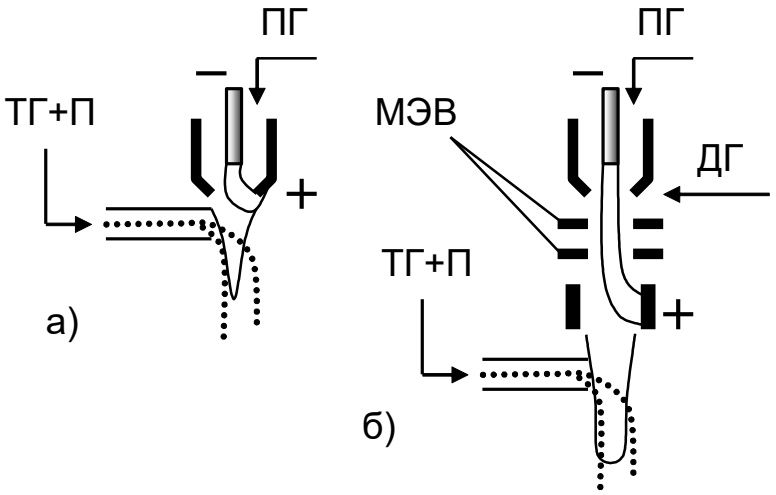

Рис. 1. Схемы плазмотронов для напыления с самоустанавливающейся длиной дуги (а) и с фиксированной длиной дуги (б);
Газы: ПГ – плазмообразующий, ТГ – транспортирующий, ДГ – дополнительный. П – порошок; МЭВ – межэлектродные вставки

В плазмотронах для напыления, имеющих межэлектродные вставки, длина сжатой дуги искусственно увеличена и зафиксирована конструктивными параметрами плазмотрона. Это обеспечивает:

- увеличение надежности и ресурса работы плазмотрона за счет уменьшения тока (до 300–200 А) при высоком напряжении сжатой дуги (до 65 В) без снижения мощности и теплового к.п.д. плазмотрона (доходящим до 60…70 %);
- высокую эффективность и стабильность нагрева и ускорения дисперсных материалов и, как следствие, – повышенное качество напыленных металлических покрытий (высокую адгезию и минимальную пористость);
- гибкость регулирования режимов напыления.

Большое влияние на процесс напыления оказывает схема ввода порошка в плазменную струю. Как показали проведенные исследования, наилучшим способом ввода металлических порошков в плазменную струю является ввод порошков с использованием, кроме транспортирующего, еще и фокусирующего газа (рис. 2).

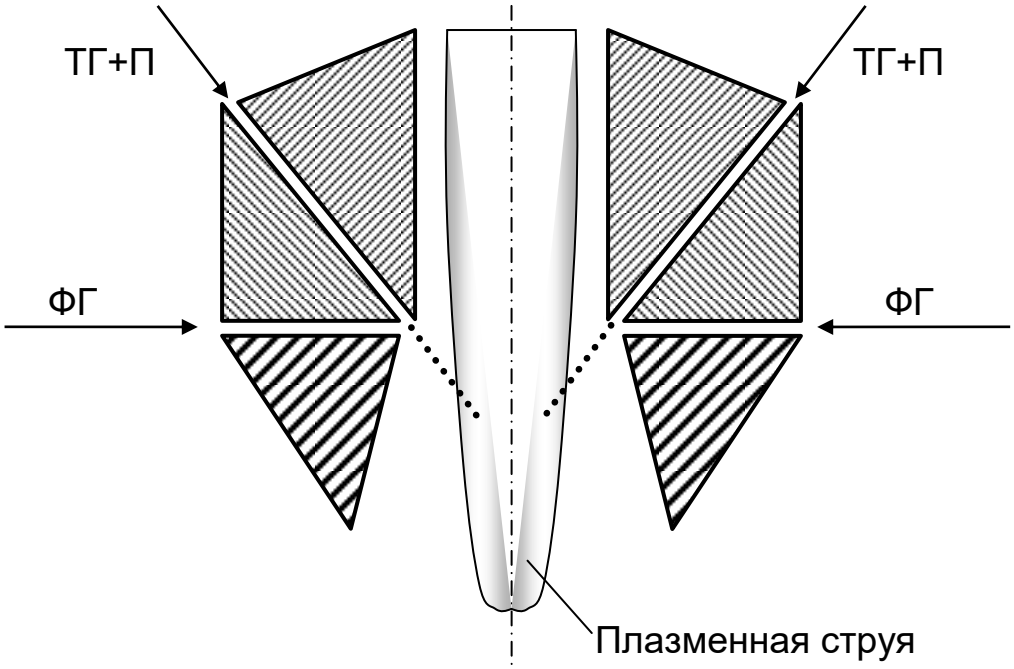

Рис. 2. Схема подачи порошка с фокусирующим газом;
ТГ+П – транспортирующий газ и порошок, ФГ – фокусирующий газ

Анализируя обычно применяемые режимы напыления порошковых материалов [1, 2], следует отметить, что, как правило, мощность плазмотрона не превышает 25 кВт при тепловом к.п.д. от 10 до 70 %. В ряде случаев при мощности плазменной струи больше 7–9 кВт уменьшается коэффициент использования порошка (КИП) и особенно – коэффициент использования энергии струи [2], который определяется отношением термической мощности $Q_{т}$, затраченной на нагрев порошка, из которого сформировано покрытие, к мощности плазменной струи $Q_{пл}$:

$$\eta_{т} = \frac{Q_{т}}{Q_{пл}} = \frac{G_{н.п}\,\Delta H_{п}}{Q_{пл}},$$

где $G_{н.п}$ – масса нанесенного в единицу времени покрытия, т.е. производительность напыления, кг/с или кг/ч; $\Delta H_{п}$ – удельное теплосодержание покрытия, в котором учитывается теплота фазовых превращений (в первую очередь – теплота плавления), Дж/кг.

Тепловой к.п.д. плазмотрона зависит от конструкции плазмотрона и режима напыления. Тепловой к.п.д. $\eta_{пл}$ показывает какая часть мощности сжатой дуги $P_{д}$ расходуется на нагрев плазмообразующего газа $Q_{пл}$:

$$\eta_{пл} = \frac{Q_{пл}}{P_{д}}$$

На рис. 3 приведены зависимости напряжения сжатой дуги $U_д$, теплового к.п.д. плазмотрона с межэлектродными вставками и мощности $P_д$ сжатой дуги от тока при расходе плазмообразующего аргона 12,2 л/мин.

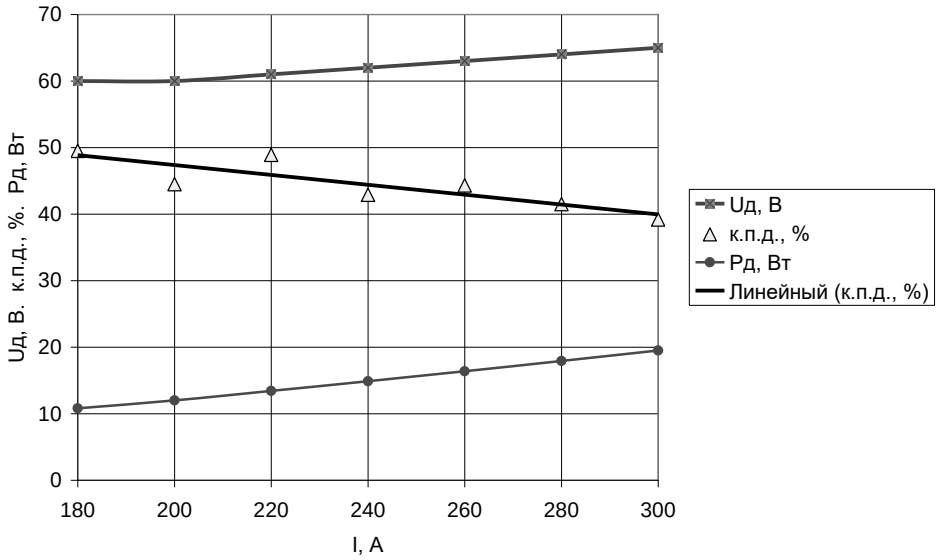

Рис. 3. Зависимость напряжения сжатой дуги $U_д$, теплового к.п.д. плазмотрона и мощности $P_д$ сжатой дуги от тока при $G_{п.г}$ = 12,2 л/мин.

Несмотря на сравнительно низкий расход плазмообразующего газа (см. рис. 3), тепловой к.п.д. плазмотрона достаточно большой – 40…50 %.

С увеличением расхода плазмообразующего газа напряжение и мощность сжатой дуги растут. Тепловой к.п.д. плазмотрона также возрастает (свыше 50…55 %).

Для достаточного прогрева в плазменной струе частиц напыляемого порошка необходимо обеспечить их стабильную подачу в высокотемпературную осевую область плазменной струи. Использование фокусирующего газа (см. рис. 2) способствует решению этой задачи, уменьшая потери порошка и обеспечивая, тем самым, повышение коэффициента использования порошка (КИП). КИП определяется как отношение массы напыленного покрытия к массе порошка, подаваемого в плазменную струю. Как видно на рис. 4, существует оптимальный диапазон расхода фокусирующего газа: 1…3,5 л/мин., повышающий коэффициент использования порошка до значений выше 60 % (это предельное значение для плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги [2]).

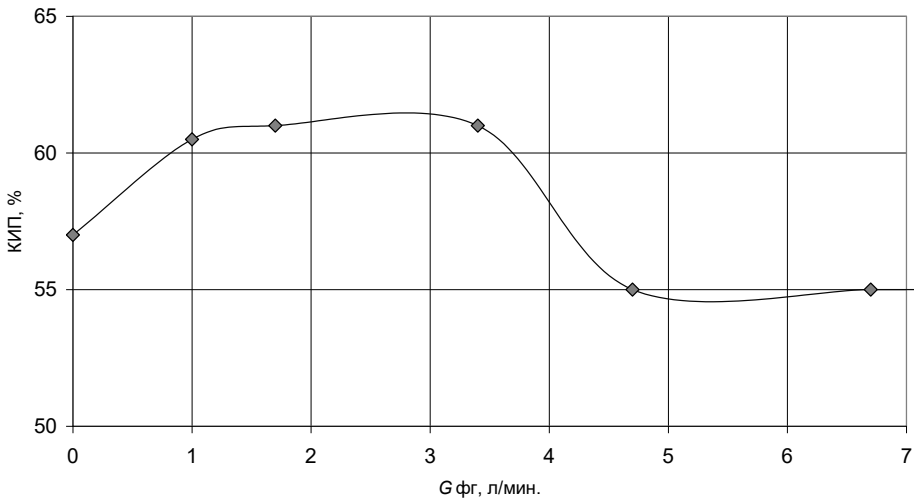

Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка ПН85Ю15 от расхода фокусирующего газа (размер частиц порошка 50…63 мкм; ток 240 А; $G_{п.г}$ = 20 л/мин.; $G_{т.г}$ = 6,5 л/мин)

Теплосодержание плазменной струи, в значительной степени определяемое током сжатой дуги, может обеспечить разогрев ограниченного количества порошка подаваемого в плазменную струю. Можно ожидать, что коэффициент использования порошка с увеличением расхода порошка (т.е. с увеличением массы порошка, подаваемого в плазменную струю) должен уменьшаться. Результаты экспериментов, представленные на рис. 5, подтверждают это. Видно, что при токе сжатой дуги 240 А с увеличением расхода порошка от 1 до 7,5 кг/ч КИП снижается с 70 до 35 %. Повышение тока до 300 А ведет к росту коэффициента использования порошка до 50 % при тех же расходах порошка.

Важнейшим показателем качества напыленных покрытий является прочность сцепления (адгезия) покрытия с подложкой. Определение прочности сцепления покрытия с подложкой чаще всего проводится с помощью штифтовой пробы [2], представляющей собой металлический цилиндр диаметром 20…30 мм со вставленным по оси коническим штифтом диаметром порядка 2 мм. Отрыв конического штифта от напыленного покрытия позволяет количественно оценить прочность сцепления покрытия с основой.

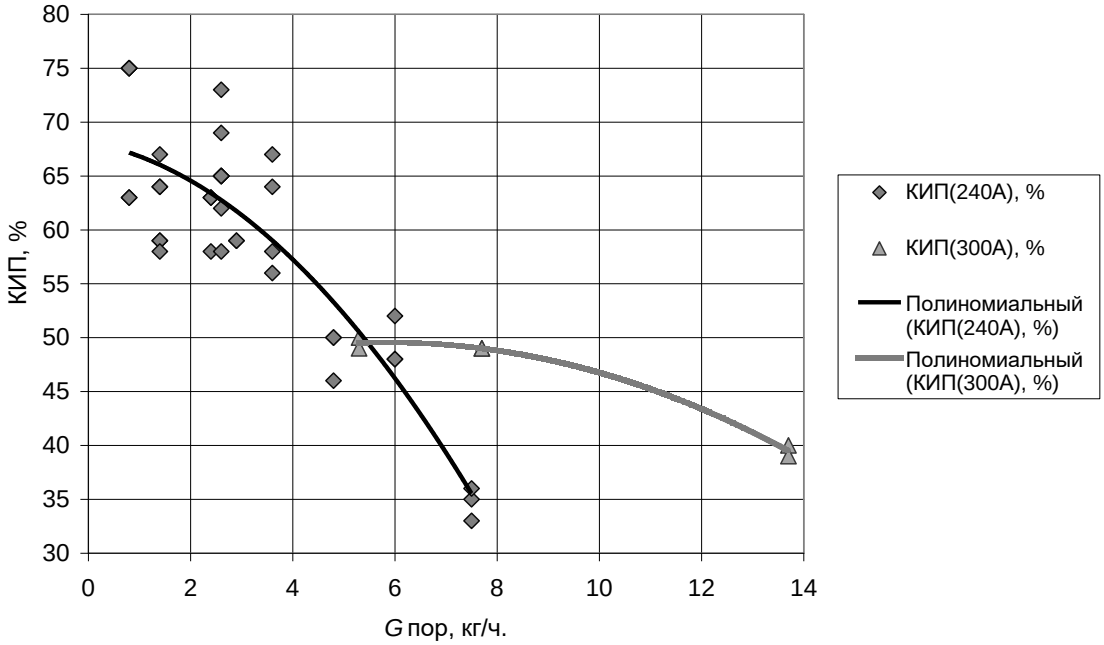

Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка (КИП) от расхода напыляемого порошка ПР-Н73Х16С3Р3 (размер частиц 50…63 мкм; $G_{п.г}$ = 20 л/мин.; $G_{т.г}$ = 6,5 л/мин.; $G_{ф.г}$ =3 л/мин.)

С увеличением толщины покрытия более 0,8…1 мм внутренние остаточные напряжения в покрытии растут, что уменьшает прочность сцепления покрытия с основой и может даже привести к самопроизвольному отслаиванию покрытия. Как показали проведенные исследования с покрытием ПН85Ю15 (рис. 6), наибольшая прочность сцепления покрытия с основой достигается при толщине покрытия 0,6…0,7 мм (более 50…55 МПа), хотя и при малой толщине, менее 0,4 мм, прочность сцепления покрытия с основой остается достаточно высокой – порядка 40 МПа.

Частицы порошка по мере движения в плазменной струе ускоряются и прогреваются, однако, при значительной дистанции l напыления частицы порошка, особенно мелкие, остывают, что в итоге приводит к снижению прочности сцепления покрытия с основой (рис. 7-а). Максимальная прочность сцепления покрытия с основой достигается при дистанции напыления 100…120 мм.

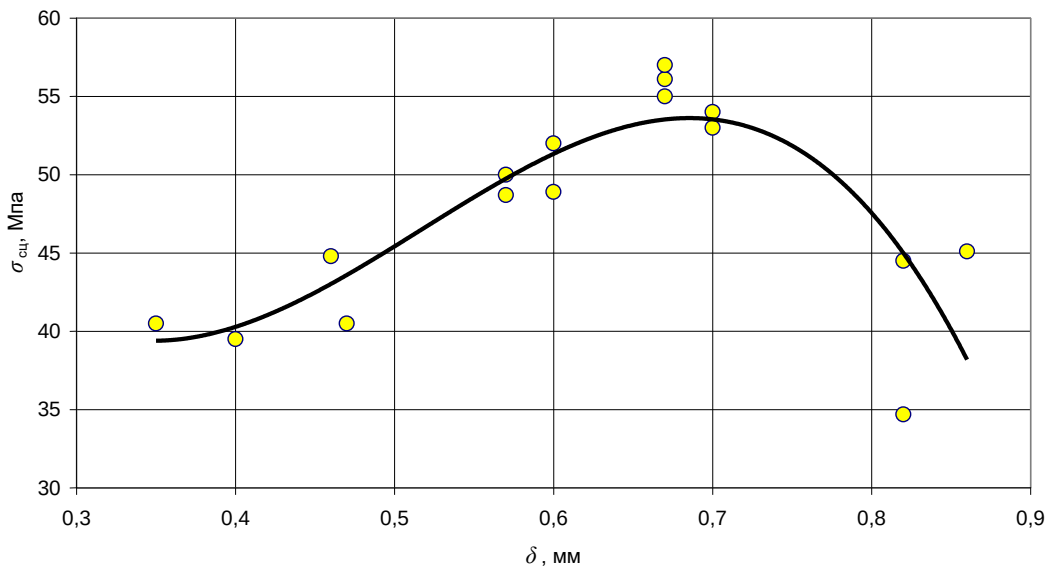

Рис. 6. Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от толщины покрытия ПН85Ю15 (размер частиц порошка 50…63 мкм; ток 240 А; $G_{п.г}$ = 20 л/мин.; $G_{т.г}$ = 6,5 л/мин.; $G_{ф.г}$ = 3 л/мин.; l = 120 мм)

Увеличение расхода плазмообразующего газа $G_{п.г}$ приводит к двум противоположным результатам, влияющим на прочность сцепления покрытия с основой:

- возрастает скорость частиц порошка, что ведет к росту прочности сцепления,
- уменьшается время пребывания частиц в плазменной струе, что снижает температуру нагрева частиц, а это ведет к снижению прочности сцепления.

При таком воздействии на частицы напыляемого порошка можно ожидать экстремальной зависимости прочности сцепления покрытия с основой от расхода плазмообразующего газа, что и подтверждается экспериментами (рис. 7-б). Наибольшая прочность сцепления наблюдается при расходах плазмообразующего газа 18…19 л/мин., т.е. в 2…2,5 раза меньших по сравнению с напылением плазмотронами с самоустанавливающейся длиной дуги [2].

Средняя прочность сцепления покрытия с основой на оптимальных режимах напыления при использовании плазмотронов с фиксированной длиной дуги для порошковых материалов со средним размером частиц не более 50 мкм составляет:

- ПН85Ю15 – 40…60 МПа,
- ПР-Н73Х16С3Р3 – 25…40 МПа,
- ПР-К60Х30ВС (ВЗК) – 30…40 МПа (по подслою ПН85Ю15 толщиной 0,05…0,10 мм).

а) б)

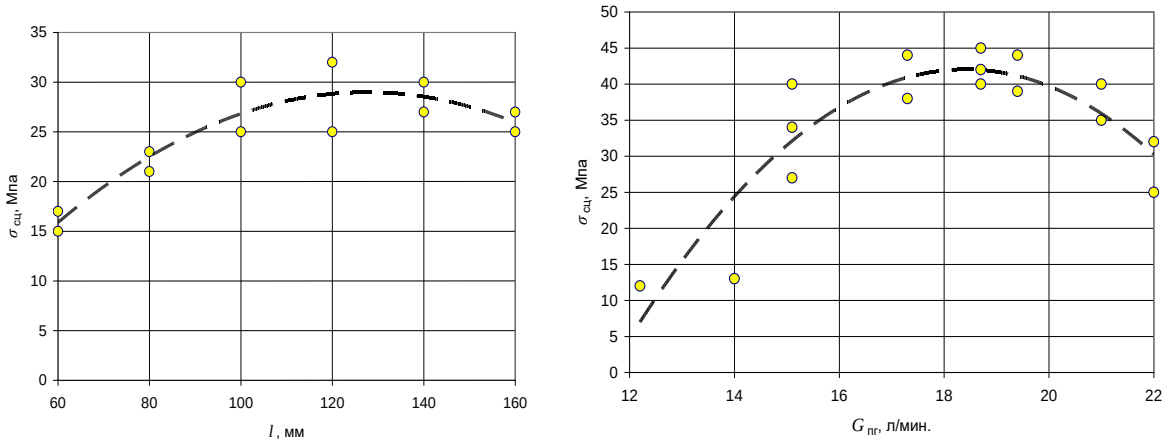

Рис. 7. Прочность сцепления покрытия ПР-Н73Х16С3Р3 с основой (размер частиц порошка не более 50мкм; ток 240 А; толщина покрытия 0,6…0,7 мм; $G_{т.г}$ = 6,5 л/мин.; $G_{ф.г}$ = 3 л/мин.): а) при расходе плазмообразующего газа $G_{п.г}$ 22 л/мин.; б) при дистанции l = 120 мм

Покрытия, полученные методами порошкового напыления, как правило, характеризуются определенной пористостью (для металлических порошков – до 10…12 % [3, 5]). Пористость металлических покрытий, напыленных плазмотронами с фиксированной длиной дуги и определенная металлографическим методом на установке «Omnimet» (США) и гидростатическим методом [2] составила в среднем 4…6 %.

Рассмотрим в качестве примера напыление эрозионностойкого покрытия на вентиляционные лопатки турбогенератора.

Профилированные вентиляционные лопатки отливаются из стали 27ГСЛ (рис. 8). Лопатки при эксплуатации подвергаются эрозионному износу. При этом главным образом изнашиваются лобовая и набегающая поверхности крыла лопатки от основания до середины крыла.

Условия, в которых работают лопатки:

- водород с относительной влажностью до 60 %;
- давление от 2,0 до 4,5 кгс/мм^2;
- максимальная температура рабочей среды +110 °С;
- номинальное напряжение на поверхности лопаток 6,1 кгс/мм^2.

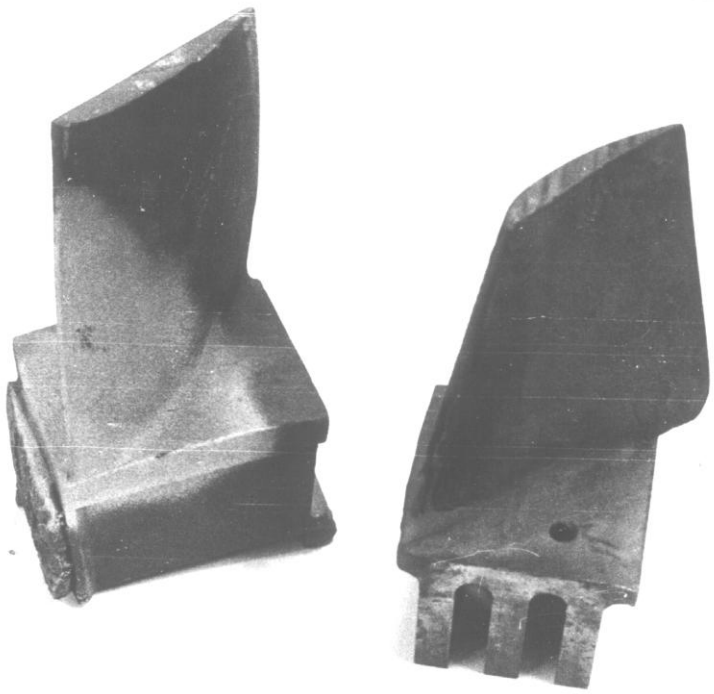

Рис. 8. Вентиляционные лопатки турбогенератора

С целью существенного повышения эксплуатационной надежности изделий, увеличения ресурса их работы и, следовательно, увеличения межремонтного цикла и уменьшения количества, заменяемых при ремонте лопаток целесообразно напыление на лопатки эрозионностойкого покрытия. Ожидаемое повышение стойкости лопаток с напыленным покрытием – с 2-х до 6-и лет. Среди эрозионностойких покрытий хорошие результаты дает стеллит ВЗК (порошок ПР-К60Х30ВС на кобальтовой основе, содержащий 28…32 % хрома, 4…5 % вольфрама, 1,75…2,75 % кремния). В качестве подслоя используется Ni_3Al (порошок ПН85Ю15) толщиной 0,05…0,1 мм.

Технические требования к напыляемому покрытию: толщина покрытия 0,5…0,6 мм; прочность сцепления не менее 30 МПа; минимальная пористость;

Режимы напыления подслоя и основного слоя покрытия следующие: ток сжатой дуги 240 А; напряжение сжатой дуги 65 В; рабочий газ – аргон; расход плазмообразующего газа 19 л/мин.; расход транспортирующего газа 6,5 л/мин.; расход фокусирующего газа 3 л/мин.; дистанция напыления 100…120 мм.

Свойства напыленного покрытия стеллита: толщина покрытия (с подслоем) 0,55…0,70 мм; прочность сцепления 30…40 МПа; средняя пористость покрытия 4 %; микротвердость покрытия HV 630,9 (794,9…463,1).

Испытания на эрозионную стойкость модельных образцов с напыленным покрытием производились на специальном стенде по

отношению изменения веса образца с покрытием к изменению веса образца без покрытия. В качестве эрозионного материала использовался электрокорунд с размером частиц 40…100 мкм. Результаты испытаний на эрозионную стойкость модельных образцов с покрытием показали, что ресурс работы лопаток с напыленным покрытием увеличивается в 3 раза.

Выводы

1. напыление металлических порошковых покрытий при использовании плазмотронов с фиксированной длиной дуги в аргоне и с потоком фокусирующего газа при высокой стабильности процесса и меньшем шуме обеспечивает: повышенный коэффициент использования порошка КИП (65…70 %); повышенную прочность сцепления покрытия с основой (от 30 до 60 МПа); минимальную пористость покрытия (4 %), достаточно высокую производительность напыления качественных покрытий (до 7,5…8 кг/ч при КИП не менее 50 %).
2. Закономерности изменения коэффициента использования порошка и прочности сцепления покрытия с основой при напылении металлических покрытий плазмотронами с фиксированной длиной дуги в зависимости от параметров режима ($G_{п.г}$, $G_{ф.г}$, l) носят экстремальный характер, что необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов напыления.

Литература

1. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
2. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
3. Костиков В.И., Шестерин Ю.А. Плазменные покрытия. – М., Металлургия, 1978. 160 с.
4. Упрочняющие и восстанавливающие покрытия. Гун Г.С., Кривощапов В.В., Чукин М.В., Адамчук В.С., Цун А.М.– Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1991. - 160 с.
5. Хасуй А. Техника напыления. Пер. с японского. М., Машиностроение, 1975.- 288 с.