

## ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ОТРЫВ

Лебедев В.А., д.т.н., проф., ИЭС им. Е.А. Патона НАН Украины  
Лой С.А., доц.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы связанные с надёжностью плазменных покрытий газотурбинных двигателей и установок для обеспечения надёжности их функционирования. Уделено внимание прочностим покрытий, которые исследуются с использованием испытаний на отрыв напылённого слоя (слоёв). Для этого вида испытаний разработана специальная установка. Показано, что стойкость напыления в условиях вибраций существенно снижается.

*Ключевые слова:* плазменное напыление, установка, прочность, исследования на отрыв слоя, прочность при вибрациях.

## МІЦНІСТЬ ПОКРИТТІВ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГАЗОТУРБИННИХ ДВИГУНІВ І УСТАНОВОК ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ НА ВІДРИВ

Лебедев В.О., д.т.н., проф., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
Лой С.А., доц.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

*Анотация.* Розглядаються питання пов'язані з надійністю плазмових покриттів газотурбінних двигунів і установок для забезпечення надійності їх функціонування. Приділено увагу міцності покриттів, які досліджується з використанням випробувань на відрив напиляним шару (шарів). Для цього виду випробувань розроблена спеціальна установка. Показано, що стійкість напилення в умовах вібрацій істотно знижується.

*Ключові слова:* плазмового напилення, установка, міцність, дослідження на відрив шару, міцність при вібраціях.

## STRENGTH OF COATINGS AT PLASMA SPRAYING OF WORKING BODIES OF GAS TURBINE ENGINES AND PLANTS PURPOSE TESTS

Lebedev V.A, Doctor of Technical Sciences, Prof.,  
Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine  
Loy S.A., Assoc. Prof., National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov

*Abstract.* The issues related to the reliability of plasma coatings of gas turbine engines and installations to ensure the reliability of their operation are considered. Attention is paid to the strength of the coatings, which is investigated using tests for detachment of the sprayed layer (s). A special installation has been developed for this type of testing. It is shown that the resistance of the spraying under vibration conditions is significantly reduced.

*Key words:* plasma spraying, installation, strength, layer separation studies, vibration strength.

Одними их основных в настоящее время и в обозримом будущем будут технологии упрочнения и восстановления узлов и деталей, среди которых электродуговая наплавка и различные виды напыления.

Во многих случаях восстанавливаемые или упрочняемые узлы и детали работают в условиях повышенных температур, давлений, вибраций, т.е. в экстремальных условиях. Это в полной мере относится к рабочим органам газотурбинных двигателей и установок, надёжное функционирование которых невозможно без обеспечения качественной обработки (за-

щиты или восстановления) поверхности.

Достаточно распространёнными способами восстановления и упрочнения узлов и деталей газотурбинных двигателей и установок является плазменное напыление, которое может быть реализовано как в контролируемой атмосфере, так и в нормальной среде с применением различного состава напыляемых материалов, режимов, различных по конструкции установок и др. При этом можно отметить, что одной из основных задач которые решаются при выборе алгоритма напыления является получение прочного напылённого слоя или нескольких слоёв, которые могут эффективно работать в указанных выше экстремальных условиях [1].

Одной из основных характеристик покрытия является прочность на отрыв [2].

Сравнительное испытание покрытия на отрыв для ряда образцов выполнялось методом вытягивания штифтов на специально разработанной установке. Установка проста и эффективна при проведении сравнительных испытаний и имеет современный вентильный электропривод с регулятором скорости вытягивания штифтов, который обеспечивает точность позиционирования штифта, что важно при определении точности получения результатов испытаний на любом этапе движения. Разработка современного вентильного электропривода с высоким уровнем быстродействия выполнена в Украине [3]. Важной особенностью работы установки является возможность создания на ней вибрационных нагрузок с регулируемыми параметрами, что соответствует реальным условиям эксплуатации. Электропривод установки позволяет получать импульсы частотой до 50...60 Гц с регулируемым шагом движения.

Прочность сцепления определяется как частица отделения разрушающей нагрузки на площадь торцевой поверхности в виде следующего выражения

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

где  $\sigma$  - прочность сцепления с основой;  $P$  - растягивающая сила;  $F$  - площадь поперечного сечения исследуемого образца.

В таблице 1 для примера приведены результаты исследований прочности на отрыв покрытий из бронзы с различным легированием и различными способами растягивающих воздействий. Использовался режим отрыва с установлением соответствующей программы системы управления вентильным электродвигателем с частотой порядка 25 Гц и шагом воздействия 0,1 мм.

Следует отметить, что в таблице 1 разрушающая нагрузка показана как предельное значение растягивающей силы  $P$  в момент отрыва напыленного слоя от основы. Результат усреднялся по трём измерениям и может быть использован как критерий, учитывающий как статические так и частично динамические аспекты прочности. Заметим, что измерение растягивающего усилия производилось двумя способами: с применением пружинного динамометра и с применением тензометрических датчиков с электронной обработкой сигнала.

Таблица 1 - Результаты исследований прочности покрытий

№	Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Площадь покрытия, мм	Разрушающая нагрузка, кН		Прочность сцепления МПа	
				Обычная	Импульсная	При обычном движении	При импульсном движении
1	БрОФ 10-7	1.4	48.3	1.5	1.2	31.0	24.8
2	БрА 10	1.1	48.3	1.8	1.4	37.3	28.9
3	БрОФ 8.5-3	1.2	48.3	1.0	0.8	20.7	16.6
4	БрОФ 10-1	1.2	48.3	1.6	1.3	33.1	26.9
5	ПГ-10К-01	0,8	48,3	2,5	2,2	51,8	45,5

Тенденции снижения величины сцепления напылённого слоя с основой при импульсном воздействии прослеживаются и для других типов покрытий и зачастую бывают столь значимыми, что обязательно должны учитываться при выборе материалов для плазменного напыления, так как импульсные и пульсирующие нагрузки характерны для эксплуатации рабочих органов газотурбинных двигателей и установок. Важным является то, что с ростом прочности сцепления напылённого слоя снижается относительные величины разрушающего усилия при импульсном воздействии. Это необходимо учитывать при выборе напыляемых материалов и установке режимов плазменного напыления.

Полагаем, что величину разрушающей нагрузки можно использовать в виде критерия предельного состояния наплавленного слоя, учитывающего как статические, так и динамические аспекты прочности.

### Литература

1. Лашенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев : *Екотехнологія*, 2003. 64 с.
2. Лебедев В.А., Лой С.А., Ермолаев, Г.В., Матвиенко М.В. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. №12. С. 8-12.
3. Лебедев В.А. Электроприводы в современном механизированном и автоматизированном оборудовании для дуговой сварки. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2013. № 11 (87). С. 7 – 16.