

**РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D – МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ
ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК НА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ
ТСЗП-МФ-Р-1000**

© 2006 В.А. Костышев, Г.Г. Шамарина, С.А. Косырев, Ю.А. Баталин, В.В. Казандаев

ОАО «Моторостроитель», г. Самара

В статье раскрыта актуальность использования плазменной технологии нанесения защитных покрытий на рабочие и сопловые лопатки наземных газотурбинных установок. (ГТУ). Кратко рассмотрены условия работы лопаток с покрытиями ($\text{NiCoCrAlY} + \text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$) и требования, предъявляемые к технологии их нанесения.

Показаны преимущества использования компьютеризированного комплекса плазменного напыления ТСЗП-МФ-Р-1000 с роботом KUKA для получения высокоресурсных покрытий на лопатках ГТУ. В связи с тем, что разработка управляющих программ производится в режиме ручного обучения робота и занимает продолжительный период времени, предлагается использовать системы CAD/CAM/CAE для построения виртуальной модели напыления. Это позволит сократить время технологической подготовки производства, снизить себестоимость опытных роботов и повысить ресурс лопаток.

Целью настоящей публикации является обоснование необходимости использования современных систем автоматизации CAD/CAM/CAE для создания управляющих программ (УП) применительно к плазменному напылению на робототехническом комплексе ТСЗП-МФ-Р-1000.

Данная необходимость вызвана непрерывно усиливающейся конкуренцией в секторе создания наземных газотурбинных установок (ГТУ), где важным фактором конкурентоспособности является снижение себестоимости технологической подготовки производства.

С одной стороны постоянно расширяющийся ряд поставщиков предлагающих более гибкие кредитные условия с широким спектром сервисных услуг, а с другой постоянно возрастающие технические требования к изготовлению отдельных деталей, узлов и двигателю в целом. Например, повышение ресурса и КПД авиационного двигателя неразрывно связано с разработкой аэродинамически более совершенных турбинных лопаток и использованием для их изготовления новых жаропрочных сплавов с покрытиями.

Повышение жаропрочности сплавов для рабочих лопаток турбин, как правило, сопровождается снижением жаростойкости и как следствие, ужесточением требований к защитным покрытиям.

Важнейшим назначением покрытий, нанесённых на лопатки турбины, является защита жаропрочного материала лопатки на основе никеля от газовой коррозии при температурах $1000...1100^\circ\text{C}$ в условиях циклического изменения температуры, высоких напряжений и наличия вредных примесей в продуктах сгорания топлива.

Важным условием долговечности защитных жаростойких покрытий является способность довольно продолжительно противостоять химическому разрушению поверхности под действием окислительной газовой среды при высоких температурах. Процесс нанесения покрытий должен обеспечивать получение достаточно равномерных и толстых покрытий с заданной пористостью, минимальными структурными и фазовыми превращениями, а также высокими механическими свойствами и прочностью сцепления. [1].

При этом для стационарных ГТУ толщина плазменного покрытия определяется условиями эксплуатации двигателя [2].

Для того, чтобы незначительные отклонения от средних величин режимов нанесения не оказали существенного влияния на характеристики покрытий, процесс нанесения должен быть технологичным, легко контролируемым и надёжным.

В последнее десятилетие появилось много информации по разработке и широкому внедрению теплозащитных покрытий

(ТЗП) наносимых методом плазменного напыления на лопатки наземных ГТУ.

Несмотря на то, что плазменные покрытия уступают электронно-лучевым по ряду характеристик, существенную роль при выборе данного способа начинают играть экономические показатели. Большое значение имеет высокая производительность современных плазмотехнических комплексов, их привлекательная невысокая стоимость, надёжность в эксплуатации, возможность сервисного обслуживания и доступность на рынке газов и порошков. [3]

Процесс плазменного напыления обладает большими технологическими возможностями т.к. позволяет варьировать параметрами напыления и соответственно изменять свойства покрытий в широких пределах. При использовании роботизированных комплексов (РТК) возможно нанести равномерные покрытия на сложнопрофилированные поверхности типа пера лопатки. При этом реализуется важное преимущество плазменной технологии – строгая ориентация плазменного потока относительно поверхности напыления.

Теплозащитные покрытия, полученные методом плазменного напыления, как правило, состоят из внешнего керамического слоя и жаростойкого подслоя [4]. Проведенные исследования показывают, что внешний керамический слой должен иметь пористость порядка 5...10%, которая способствует улучшению стойкости к тепловому удару и повышению теплоизоляционных характеристик керамического слоя.

В качестве жаростойкого подслоя могут быть использованы NiAl, NiAlY, NiCr, NiCrAlY, NiCoCrAlY. Наибольшее распространение в качестве подслоя получили сплавы NiCrAlY, NiCoCrAlY. Многочисленные исследования свидетельствуют, что стойкость теплозащитного покрытия повышается с увеличением содержания в промежуточном слое хрома и алюминия. Введение в покрытие Со позволяет повысить его пластичность.

В качестве керамической составляющей используется диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия ($ZrO_2 + Y_2O_3$). Диоксид циркония, благодаря меньшему значению модуля Юнга и большому

коэффициенту термического линейного расширения (ТКЛР) более совместим с жаропрочными сплавами, чем другие оксиды, поскольку в нем при охлаждении возникают меньшие термические расширения. Оксид иттрия необходим в качестве стабилизатора для подавления полиморфных превращений в интервале температур 1000...1205⁰С.

Учитывая сложность получения оксидных покрытий на жаропрочных сплавах из-за большой разницы ТКЛР, разработаны и запатентованы покрытия градиентного типа [5]. Такие покрытия состоят из нескольких слоев материалов с уменьшающимся ТКЛР от подслоя к керамическому слою. Это достигается путем плавного увеличения содержания стабилизированной керамики от 0 до 100%.

Также возможно введение дополнительных слоев для снижения потока агрессивных компонентов внутри покрытия и увеличения адгезионной прочности керамического слоя. Например, некоторые фирмы между металлическим подслоем и керамикой вводят прослойку платины, которая ограничивает доступ кислорода в подслоя. В некоторых случаях вводят барьерные слои, между материалом лопатки и подслоем, для стабилизации состава и в качестве препятствия диффузионному обмену элементами.

В патентной литературе представлено большое количество вариантов конструкций многослойных, жаростойких, теплозащитных покрытий, имеющих противодиффузионные, противокислородные, термозащитные слои и подслоя различного состава, толщины и пористости.

Рассмотренные примеры сложны в технологическом исполнении, требуют дополнительного оборудования и введения промежуточных операций механической и термической обработки.

Выбор конструкции покрытия определяется в каждом конкретном случае, исходя из условий эксплуатации и обеспечения требуемого ресурса.

В то же время решающим условием при выборе той или иной конструкции покрытия для использования в массовом производстве имеет экономический фактор.

На ОАО «Моторостроитель» внедрена технология нанесения покрытий на рабочие

и сопловые лопатки методом плазменного напыления на установке «УПУ-3Д».

На данной установке применяется элементарная система автоматизации запуска и остановки процесса, и основное управление процессом осуществляет оператор.

В связи с расширением производства наземных ГТУ для газоперекачки возникла необходимость в использовании более современного, и производительного, роботизированного плазменного оборудования.

Использование РТК плазменного напыления позволяет снизить себестоимость продукции, обеспечить оптимальное использование расходных материалов и энергоресурсов, а также исключить человеческий фактор, влияющий на качество процесса.

Применение компьютеризированных систем управления РТК на основе программируемых логических контроллеров позволяет контролировать и изменять до 100 параметров процесса. [3]

Таким образом, опираясь на неоспоримые преимущества использования РТК, было принято решение использовать его на

ОАО «Моторостроитель». На основе тщательного маркетингового исследования было выяснено, что наиболее оптимальным по критерию цена-качество является робототехнический комплекс, укомплектованный роботом фирмы KUKA и плазменной установкой ТСЗП-МФ-Р-1000.

Процесс напыления с помощью робота обеспечивает:

- устойчивость кинетики процесса напыления,
- кинематически сложное движение по траектории с различной скоростью,
- точность позиционирования сопла над поверхностью детали,
- повторяемость результатов нанесения покрытия независимо от количества проходов,
- безопасные условия труда для человека-оператора (химическую, акустическую, механическую, пожарную и т. д.)

Однако иная ситуация складывается с подготовкой управляющих программ (УП) напыления для робота KUKA. Фирма-производитель предоставляет возможность составления УП только в режиме ручного

обучения робота, что занимает продолжительный подготовительно-заключительный период времени.

Для того, чтобы исключить, или, как минимум, предельно сократить использование робота в конструкторско-технологической подготовке производства, на предприятии предлагается использовать системы CAD/CAM/CAE для построения и исследования виртуальной модели процесса напыления. Таким образом предложена схема подготовки УП не требующая затрат машинного робота KUKA. Схема позволяет разрабатывать УП одновременно на нескольких компьютерах оснащённых системами CAD/CAM/CAE. При этом могут быть задействованы один или несколько специалистов-разработчиков УП, расположенных компактно или территориально удаленных.

Схема разработки УП следующая:

- создаётся объёмная геометрическая модель обрабатываемой детали в системе CAD;
- на основе объёмной модели и при соответствующей настройке параметров инструмента в системе CAM строится траектория движения плазмотрона в пространстве с 6-ю степенями свободы с запрограммированной скоростью, определяемой из требования обеспечения заданной минимальной толщины покрытия поверхности детали;
- на основе объёмной модели и полученной траектории движения инструмента над поверхностью детали с использованием CAE-программы собственной разработки, формируется 3-х мерное поле толщин покрытия на обрабатываемой поверхности объёмной геометрической модели обрабатываемой детали;
- доработка в системе CAM траектории движения плазмотрона по результатам моделирования процесса напыления;

В качестве CAD/CAM системы была выбрана система ADEM. В её составе имеется постпроцессор робота формирующий рабочую УП, делающий привязку траектории движения сопла к кинематике робота.

От внедрения вышеописанной схемы на «Моторостроителе» ожидается:

- существенное сокращение времени технологической подготовки напыления;
- моделирование процесса плазменного напыления CAD/CAM/CAE позволит разра-

батывать УП нанесения покрытий заданной толщины и равномерности в кратчайшие сроки;

- снижение себестоимости технологических работ в связи с сокращением количества лопаток используемых в качестве образцов-свидетелей, уменьшение расхода порошков, газов, уменьшение количества шлифов.

Список литературы

1. Пузряков А.Р. Теоретические основы

технологии плазменного напыления. МГТУ им. Н.Э.Баумана. - 356с.

2. Самсонов А.Л. Структура, свойства и электронно-лучевая технология осаждения жаростойких двухслойных покрытий на лопатки авиационных РТД. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. - 243с.

3. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: 2004. - 129с.

DEVELOPMENT OF UP-TO-DATE MEANS OF AUTOMATION USING 3D - SIMULATION TO DEVELOP CONTROL PROGRAMMES OF TURBINE BLADE PLASMA SPRAYING ABSTRACT

© 2006 V.A. Kostyshev, G.G. Shamarina, S.A. Kosyrev, Ju.A. Batalin,
V.V Kazandaev, T.A. Burykina

Public corporation «Motorostroitel»

The article shows the urgency of using plasma technology of applying protective coatings on runner and nozzle blades of ground-based gas - turbine installations. Conditions of operation of blades coated with NiCoCrAlY+ZrO₂+Y₂O₃ and the demands set for the technology of their being coated is shown in brief. The advantages of using computer - aided complex of plasma spraying TC3P-MJ R - 1000 with a KUKA robot for obtaining high - resource coatings of gas turbine blades are discussed. As the programmes are developed in the mode of manual robot teaching and the process takes a long time we suggest using CAD/CAM/CAB systems to produce a virtual spraying model.

This will make it possible to reduce the time needed for the technological preparation of production and the costs of development as well as to improve the service life of the blades.

Предложена схема подготовки управляющих программ, не требующая затрат машинного робота KUKA. Схема позволяет разрабатывать управляющие программы одновременно на нескольких компьютерах оснащённых системами CAD/CAM/CAE. Разработаны и запатентованы покрытия градиентного типа, состоящие из нескольких слоев материалов с уменьшающимся ТКЛР от подслоя к керамическому слою.