

**ВЫБОР СОСТАВА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

© 2012 И. А. Докукина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Представлены основные методологические принципы проектирования плазменных технологий получения защитных покрытий деталей ГТД. Определены параметры управления состоянием технологической системы и свойствами получаемых покрытий.

*Плазменные защитные покрытия, детали ГТД, технология.*

Разработка технологии получения защитных покрытий, как и любая технология, базируется на определённых методологических принципах, которые позволяют существенно упростить пути достижения конечной цели – повышение ресурса, надёжности и технико-экономической эффективности летательных аппаратов за счёт создания на поверхности деталей этих изделий специальных функциональных слоев [1,2].

Необходимость повышения рабочих характеристик поверхности конкретных узлов и деталей изделий может быть выявлена только из результатов специальных испытаний или их эксплуатации (рис.1, поз.1). Эти результаты являются исходными для технико-экономического обоснования (поз.3) мероприятий по повышению ресурса, надёжности, экономической эффективности и тактико-технических характеристик изделия за счёт использования конструкций специальных функциональных слоёв.

Принятое решение в конечном счёте формулируется в техническом задании (поз.4), полнота и обоснованность которого определяет эффективность разрабатываемых мероприятий. При этом в зависимости от конкретного назначения детали её поверхностный слой должен решать триботехнические, теплозащитные, антикоррозионные, оптические, радиотехнические, радиационные и другие задачи. Так, например, в осевых компрессорах для уменьшения перетекания сжимаемого газа через кромки лопаток минимизируют радиальные зазоры между статором и ротором, при этом допускается динамическое касание торцов лопаток. На поверхность, по которой касаются лопатки, наносится срабатываемое покрытие для уменьшения повреждений лопаток. Однако повреждения всё же остаются.

В процессе касания может происходить локальный нагрев торцевой части лопатки на глубину 0,05...0,10 мм до температур порядка 600...650°C, что приводит к снижению эффекта от предварительного упрочнения.

При этом формируются дефекты – царапины, трещины, выбоины, которые в условиях высоких температур и динамических нагрузок являются значительными концентраторами напряжений и приводят к снижению усталостной прочности лопатки. Для сохранения выносливости при возможных касаниях используют разнообразные методы упрочнения, в том числе и нанесение плазменных защитных покрытий (ЗП).

Преимущества и недостатки используемого метода обработки торцевой поверхности лопаток рассматриваются относительно их стойкости к внешним воздействиям и обеспечению стабильности технологии изготовления.

При разработке ТЗ определяются виды воздействий на рабочие поверхности упрочняемых деталей, например механические. К ним относятся воздействия газового потока и твёрдых частиц на поверхность лопатки, статическая и динамическая деформации лопаток от рабочих нагрузок, повреждение торца пера лопатки при касании о статор. Тепловое воздействие оказывают рабочая температура лопаток и локальная температура торцов при касании лопатки о статор, которая может достигать 800°C. В зависимости от области применения двигателя возможно химическое воздействие атмосферы над акваторией моря, кислорода или водяного пара. Необходимо также учитывать и воздействие технологического процесса нанесения покрытия. Наносимое покрытие не должно ухудшать структуру основного материала и снижать выносливость лопатки.

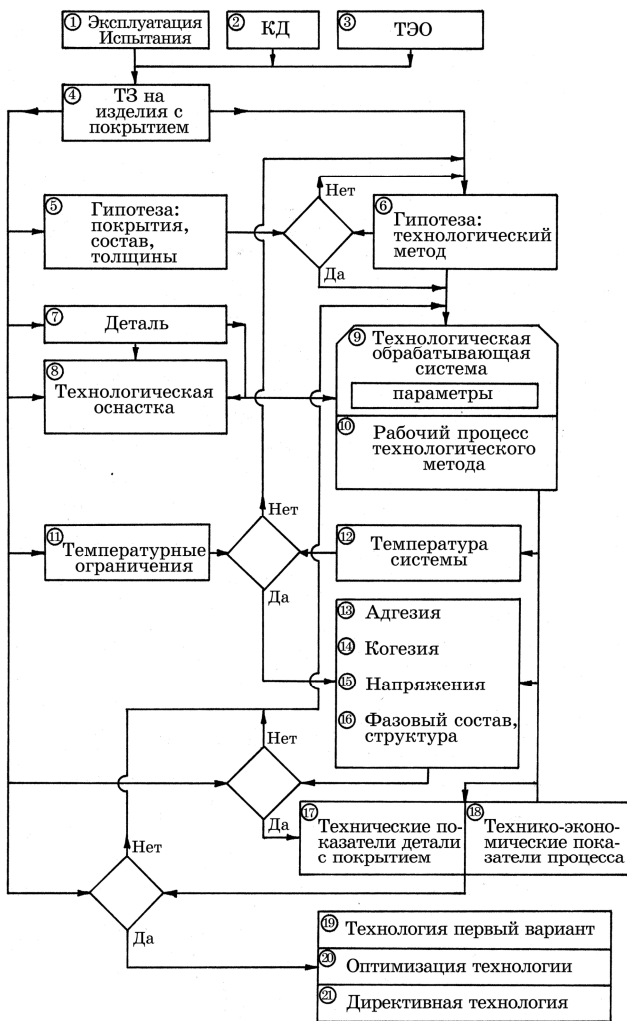


Рис. 1. Схема процесса проектирования технологии получения изделия с покрытием

Наряду с требованиями по внешним воздействиям к покрытиям предъявляется ряд технологических и эксплуатационных требований. Исходя из рассмотренных выше условий, формулируются требования к обработке поверхности лопатки и модифицированному слою. Например: поверхность должна быть стойкой к эрозии, иметь хорошую трещиностойкость, материал покрытия должен быть жаростойким и теплопроводным, поверхностный слой должен обеспечивать защиту детали от высокотемпературной коррозии, покрытие должно быть непроницаемым для элементов, находящихся во внешней среде и быть химически нейтральным, химические и физические свойства материала покрытия и переходной зоны должны быть стабильными в течение ресурса.

Перечисленные требования должны быть положены в основу сравнительной оценки разных вариантов покрытий.

Однако в абсолютном большинстве

практических случаев невозможно выделить единственную физико-химическую причину снижения или потери работоспособности изделия при эксплуатации. В связи с этим важным является определение чётких критериев эффективности проводимых мероприятий без проведения дорогостоящих исследований, в том числе с оценкой этих мероприятий по различным косвенным критериям.

Практика показывает, что в основном разработка ТЗ на проектирование функционального слоя ложится на технолога, т.е. он вынужден в каждом конкретном случае заниматься фундаментальными и прикладными проблемами различных научных направлений, осуществляя выбор материалов и конструкции многослойных функциональных слоёв (рис 1, поз.5), в том числе с возможностью внесения конструктивных изменений в деталь.

При этом необходимо иметь в виду, что не существует универсальных материалов для функциональных слоёв даже одного технического назначения. Например, триботехнические материалы, хорошо зарекомендовавшие себя при одних температурах и в условиях жидких смазок, могут быть совершенно неэффективными при других температурах, других смазках или их отсутствии.

Кроме того, говоря о функциональном слое, необходимо иметь в виду, что в абсолютном большинстве случаев речь должна идти о необходимости создания многослойной и многофазной системы, в которой каждый компонент системы решает свои функциональные задачи. Причём в понятие функциональный слой необходимо включать приповерхностный слой детали, подвергнутый специальной обработке перед нанесением покрытия.

Создание такой многокомпонентной системы определяется не только условиями эксплуатации наружного слоя, а и необходимостью согласования термомеханических, химических, электрических и других свойств каждого из слоёв между собой и конструкционным материалом детали.

Однако практика показывает, что выбор материалов функционального слоя определяет только потенциальные возможности этого слоя. Степень же достижения этих возможностей определяется технологическим методом его получения. Практика так-

же показывает, что не существует универсального технологического метода, в достаточной степени пригодного для большинства задач создания функциональных слоев. Каждый метод имеет свою область эффективного применения как по виду и структуре материала в слое, так и по технико-экономическим показателям. Следовательно, под каждую конкретную задачу должен подбираться оптимальный технологический метод напыления (рис.1, поз.6). Таким образом, разработка технологии получения ЗП должна базироваться на многовариантности решений по составам покрытий и методам их получения, а также учитывать зависимость служебных характеристик покрытий от технологического метода его получения, свойств поверхности, на которую оно наносится, и условий эксплуатации изделия.

В абсолютном большинстве случаев покрытия наносятся на готовые детали, прошедшие соответствующую термообработку. Это приводит к необходимости соблюдения ограничений на диапазон изменения температуры  $\{T\}$  при напылении (рис.1, поз.7). Температурные ограничения и возможности технологического метода (ТМ) приводят к термодинамическим ограничениям на скорость и полноту протекания топокхимических, гетерогенных и плазмохимических реакций образования химических связей и химических соединений. Такие ограничения могут приводить к тому, что выбранный ТМ перестанет удовлетворять задачам ТЗ по качеству покрытия и технико-экономическим показателям по производительности, себестоимости и т.д.

В связи с этим возникает необходимость решения двух фундаментальных проблем технологии напыления.

Первая проблема – создание высокоинформативных экспериментальных методов и математических моделей определения температурных полей в многослойных системах в период их формирования (рис.1, поз.12) [1,2].

Вторая проблема – разработка физических принципов получения покрытий, при которых возникает возможность преодолевать термодинамические и теплофизические ограничения за счёт активации протекания реакций, применения специальных физико-химических эффектов и технологических

приёмов.

Однако решение этих двух проблем ещё не позволяет перейти к проектированию технологии напыления, поскольку получаемые покрытия могут самопроизвольно разрушаться под действием временных и остаточных напряжений как в процессе напыления, так и остывания детали с покрытием или на ранних стадиях испытания и эксплуатации изделия.

Действительно, только после установления диапазона управляющих параметров ТМ (рис. 1, поз.9), при которых температура в системе «покрытие – основа» не превышает допустимых для данных материалов ограничений (поз.11), а покрытие не отслаивается и не разрушается под действием механических временных и остаточных напряжений, возникающих при напылении (поз.13-15), можно переходить к оптимизации процесса для обеспечения нужных эксплуатационных свойств изделия с покрытием.

Это приводит к необходимости решения третьей проблемы технологии напыления – создание высокоинформативных экспериментальных методов и математических моделей определения остаточных напряжений, возникающих в многослойных системах в период их формирования (поз.15).

Следовательно, в методологическом плане при разработке технологии напыления можно выделить специфические проблемы, характеризующие конкретную деталь и конкретный функциональный слой, а также две общие проблемы, которые в математическом плане являются подобными для разных материалов и методов напыления.

В соответствии с приведённой итерационной схемой (рис.1) только после решения перечисленных задач можно переходить к получению функциональных слоёв заданного состава и структуры, к выявлению уровня получаемых физико-механических и эксплуатационных показателей с последующей их оптимизацией и разработкой директивных технологий (поз.17-21).

Технологический процесс нанесения покрытий, как и любой технологический процесс, представляет собой сложную систему, разработка которой должна проводиться с привлечением системного анализа [2,3]. При таком подходе создание математической

модели технологического процесса базируются на создании ряда частных, но взаимосвязанных моделей, описывающих определённые стороны сложной системы.

Важнейшим этапом математического моделирования является структуризация сложной системы и корректное выделение входных, управляющих, возмущающих и выходных параметров для всей системы в целом и для каждого выделенного структурного элемента. В качестве входных параметров общей системы при разработке технологии с конкретным типом средств технологического оснащения можно выбрать параметры, описывающие эксплуатационные свойства детали без покрытия (геометрические размеры, микротвёрдость, шероховатость, износостойкость, коэффициент трения, предел прочности, предел выносливости, коэффициент отражения электромагнитных волн). Тогда выходными будут параметры, описывающие эти эксплуатационные свойства, но уже детали с покрытием. Важным элементом управления сложной технологической системы является то, что к группе выходных параметров необходимо отнести также параметры, описывающие технико-экономические свойства самой технологической системы (энергоёмкость, производительность, вероятность выполнения технологического задания по данному параметру). На основе выходных технологических параметров детали и технико-экономических параметров системы может быть составлена управляющая целевая функция, с помощью которой проводятся комплексная оптимизация самой технологической системы и выбор значений управляющих параметров для достижения целей оптимизации. Формирование выходных параметров и изменение их значений осуществляются в результате воздействия управляющих параметров на состояние технологической системы и физико-химический механизм протекания конкретных процессов изменения свойств детали с наращиваемым на ней покрытием [4].

Управляющие параметры могут быть разбиты на две группы: регулируемые и нерегулируемые. Регулируемые параметры – это параметры режима обработки, т.е. технологические параметры, значение которых можно оперативно изменить при управлении

процессом.

Нерегулируемые управляющие параметры – это такие параметры, которые описывают свойства конкретной детали и свойства конкретной технологической обрабатываемой системы. Эти параметры при получении покрытия на конкретной детали и конкретном оборудовании невозможно изменить оперативно, но они оказывают большое влияние на свойства получаемого изделия с покрытием.

Влияние свойств детали и обрабатываемой системы, которые должны быть формализованы и выделены в управляющие нерегулируемые параметры, является сложной конструкторско-технологической задачей, без решения которой невозможно дальнейшее совершенствование технологии получения ЗП.

Возмущающие факторы приводят, с одной стороны, к статистическому разбросу управляющих и выходных параметров, а с другой – могут приводить к таким систематическим изменениям в свойствах детали с покрытием, которые относят к нестабильности самой технологии.

В соответствии с задачами системного анализа на следующем этапе выделяются структурные блоки технологического метода, проводится системный анализ этих структурных блоков и выделяются входные, выходные и управляющие параметры для каждого структурного блока. При этом выходные параметры одного блока должны быть входными для следующего блока. На этом этапе при системном анализе конкретного блока необходимо перейти от технологических управляющих параметров к физическим. Такой переход определяется тем, что большинство технологических управляющих параметров имеют косвенное отношение к реальным физико-химическим механизмам технологического метода. Действительно, например, ток дуги при плазменном газотермическом напылении влияет на температуру (энтальпию) плазменной струи и, следовательно, на температуру нагрева порошка. Но энтальпия плазменной струи также зависит от состава и расхода плазмообразующего газа. Поэтому анализ нагрева порошка удобнее проводить, выделив в качестве управляющего физического параметра энтальпию плазменной струи, а её зависи-

мость от тока дуги, состава и расхода плазмообразующего газа рассматривать в отдельном структурном блоке. Важное значение имеет и дистанция напыления покрытия, которая определяет как температуру, так и скорость частиц при формировании покрытия и оказывает существенное влияние на температуру материала основы детали. Таким образом, только после выделения физических управляющих параметров возникает возможность перехода к математическому моделированию реального процесса. Физические управляющие параметры по такому же принципу, как и технологические управляющие параметры, подразделяются на регулируемые и нерегулируемые. Нерегулируемые физические параметры часто называют параметрами состояния системы.

Проведённая структуризация технологического метода получения ЗП позволяет перейти к разработке математических моделей подсистем технологического метода и выделению с их помощью минимально достаточного количества управляющих воздействий и безальтернативных рекомендаций. Безальтернативные рекомендации в качестве требований к деталям, покрытиям и процессу должны дополнять исходные данные для постановки задач проектирования. В то же время минимизированное количество управляющих воздействий должно обеспечить эффективное управление эксплуатационными свойствами деталей с покрытием в рамках решения либо прямых задач математического моделирования, либо задач оптимального проектирования.

В большинстве случаев при разработке технологического процесса нанесения покрытия на конкретные детали проектируется специальная технологическая оснастка (поз. 8), обеспечивающая выполнение таких требований, как равномерность слоя покрытия и обеспечение охлаждения напыляемой детали в процессе нанесения покрытия.

При разработке технологии нанесения износостойкого покрытия необходимым предварительным условием разработки является выбор совокупности параметров, определяющих уровень служебных характеристик поверхностного слоя. При анализе влияния параметров на ресурс изделия целесообразно разделить их на две группы. В одну внести свойства, определяющие характер

взаимодействия изделие – контртело, а в другую – свойства, определяющие изнашивание собственно поверхности.

Первая группа определяет потенциально достижимый уровень износостойкости и связана в основном с физико-механическими особенностями материала: твёрдость, шероховатость, химическая инертность. Накопленные теоретические знания позволяют в этом случае прогнозировать износостойкость.

Ко второй группе характеристик относятся уровень напряжений и дефекты, возникающие на поверхности при напылении и эксплуатации покрытия и определяющие реальную скорость её износа.

Как показывают исследования динамики износа, свойства второй группы имеют большее значение для результирующей износостойкости, так как износ определяется в большинстве случаев не непрерывным износом, а локальным разрушением, инициируемым остаточными напряжениями и дефектами покрытия. Таким образом, параметры второй группы определяют, в какой степени потенциальные возможности параметров первой группы могут быть реализованы.

Технические показатели (поз. 17) деталей с покрытиями определяются не только составом нанесённого покрытия и теплофизическими показателями процесса его получения, но и структурой нанесённого слоя. Большое влияние на значения эксплуатационных характеристик нанесённых слоёв оказывает их пористость и особенности сформированной при напылении структуры. Монолитная структура по всей толщине плазменного покрытия приводит к существенному снижению его долговечности эксплуатации при знакопеременных механических и термических напряжениях по сравнению с типовой структурой покрытия.

Возможности получения покрытий с заданными показателями пористости и структуры обеспечиваются проведением комплексных исследований и математического моделирования процесса нанесения покрытий [5].

Таким образом, проектирование технологии нанесения плазменных защитных покрытий на детали ГТД представляет собой комплекс сформулированных задач, решение которых позволяет получить требуемые экс-

платационные характеристики деталей и комплекс технологических решений, обеспечивающих решение поставленных задач.

#### **Библиографический список**

1. Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надёжность, ресурс [Текст] / В.А. Барвинок. – М.: Наука и технологии, 2005. -452 с.

2. Барвинок, В.А. Термомеханика формирования напряжений и тепловых полей в телах с изменяемой геометрией [Текст] / В.А. Барвинок. –М.: Наука и технологии, 2007. - 306 с.

3. Математическое моделирование и физика процесса нанесения плазменных покрытий из композиционных лакированных материалов [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Бо-

Богданович, А.Н. Плотников [и др.]. - Межд. центр науч. и техн. информации, М.: 1998. - 98 с.

4. Физическое и математическое моделирование нагрева цилиндрической поверхности при плазменном напылении [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, И.А. Докукина [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН, Спец. Выпуск. - 2008. – Т. 3.- С. 162-170.

5. Докукина, И.А. Теоретические исследования формирования мезоструктурноупорядоченных кластерных структур в плазменных покрытиях [Текст] / И.А. Докукина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. - №4.- С. 106-112.

## **SELECTION OF THE DESIGN AND APPLICATION OF PLASMA TECHNOLOGY PROTECTIVE COATINGS PARTS GAS TURBINE ENGINES**

© 2012 I. A. Dokukina

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The basic methodological principles for the design of plasma technology for protective coatings gas-turbine engines. The parameters of the control system and the technological properties of the coatings.

*Plasma protective coating, details gas-turbine engines, technology.*

#### **Информация об авторах**

**Докукина Ирина Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Область научных интересов: плазма, плазменные покрытия, упорядоченные структуры с заданным свойством, математическое моделирование.

**Dokukina Irina Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Area of research: plasma, plasma coverings, the ordered structures with the set property, mathematical modeling.