

СРАБАТЫВАЕМЫЕ, ИЗНОСОСТОЙКИЕ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВОГО ТРАКТА ТУРБИНЫ, КОМПРЕССОРА И КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

© 2009 В. А. Барвинок¹, И. Л. Шитарев¹, В. И. Богданович¹, И. А. Докукина¹, В. М. Карасёв²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²ОАО «Металлист-Самара»

Рассмотрены основные закономерности и особенности нанесения срабатываемых, износостойких и жаропрочных покрытий на детали газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД газотермическим плазменным и ионно-плазменным вакуумными методами. Показаны основные доработки и элементы модернизации оборудования для газотермического и ионно-плазменного вакуумного метода. Для расчета температур, текущих и остаточных напряжений рассмотрены реальные случаи и приемы при напылении.

Напыление, покрытие, оборудование, модернизация, температура, напряжения

Общеизвестно, что повышение надежности, экономичности и ресурса ГТД постоянно требует усовершенствования существующих, разработки и внедрения новых материалов и технологий. В связи с тем, что многие физико-механические свойства деталей ГТД определяются состоянием поверхностного слоя, использование дефицитных и дорогих материалов во всем объеме изделия нецелесообразно, а в некоторых случаях и невозможно. Данная проблема на сегодня решается нанесением на детали специальных покрытий. Однако известные методы низкотемпературной химии и металлургии в процессах получения покрытий (алитирование, анодирование, гальваника и т.д.) ограничены законами термодинамики равновесных процессов, уровнем достижимых температур и энергией частиц. Более широкими возможностями обладают плазменные (газотермические) и ионно-плазменные вакуумные покрытия. Так, например, для двигателей необходимо разработать теплозащитные покрытия, обеспечивающие работоспособность при повышенных температурах и нагрузках, стойкие против высокотемпературной коррозии, эрозии и износа. Особенно актуальна эта проблема для деталей камеры сгорания и лопаток первой ступени турбины авиационных двигателей новых поколений и конверсионных газотурбинных агрегатов с большими ресурсами эксплуатации. Для снижения расхода топлива и повышения

КПД двигателей необходимо внедрение новых срабатываемых уплотнительных материалов, способных снизить до минимума радиальные зазоры между элементами статора и ротора газового тракта турбины и компрессора. Для двигателей, работающих в морских условиях, материалы лопаток компрессора должны обладать повышенной коррозионной и эрозионной стойкостью из-за воздействия солей морской воды, так как известны случаи, когда ресурс двигателей по этой причине снижался в 3 раза.

Вопросами газотермического, ионно-плазменного вакуумного и электронно-лучевого напыления занимались и занимаются многие организации России. Наиболее значительных результатов достигли следующие: институт металлургии им. Байкова; МАТИ; ВИАМ; МГТУ им. Баумана; институт электросварки им. Патона; Харьковский физико-технический институт и др.

Следует отметить, что большое внимание технологии нанесения покрытий уделяется в США, Англии, Японии, Германии и др. странах. В 1980 г. фирма MultiArc Vacuum Systems Inc США купила у СССР лицензию на производство установки «Булат-3» и теперь поставляет на международный рынок установки под названием «Jon Bond» для упрочнения режущего инструмента.

Работы по плазменному газотермическому напылению в КуАИ-СГАУ были начаты в 1962г., а работы по ионно-плазменному вакуумному напылению – в 1970г. в НИГ-1

«Физика», а затем в ОНИЛ-7, НИИ технологий и проблем качества.

Прежде, чем говорить о видах получаемых покрытий рассмотрим оборудование для газотермического и ионно-плазменного вакуумного напыления.

Оборудование для газотермического напыления

Оборудование для плазменного напыления принято подразделять на основное и вспомогательное. Основным оборудованием принято считать собственно установку, а к вспомогательному относят устройство для перемещения напыляемого изделия относительно распылителя или наоборот (манипулятор), оборудование для подготовки, распыла по фракциям, сушки и хранения порошка, оборудование для подготовки поверхности изделия к напылению и т.д.

В настоящее время для плазменного напыления в основном применяются отечественные установки УПУ-3, УПУ-3Д, УПУ-8М, УМП-5-68, УМП-7 и др. Из них неплохо зарекомендовала себя универсальная ус-

тановка УПУ-3 с различными модификациями. На рис.1 представлена блок-схема такой установки с нашими доработками (А.С. №989974, 1152132). Установка дополнительно оснащена манометрами 2, измеряющими давление газа на входе в ротаметры, что позволяет точно измерять расход плазмообразующих газов. В состав установки введены специально разработанные малогабаритные датчики температуры охлаждающей воды 25, размещенные в месте подключения тоководящих шлангов к распылителю. Специальная схема защищает датчики от воздействия разряда осциллятора зажигания дуги. Указанные изменения позволяют достаточно точно фиксировать значение энтальпии струи основного энергетического параметра, определяющего нагрев распыляемого материала.

Порошковые дозаторы установки 14 заменены разработанными дозаторами, которые имеют стабилизированный привод вращения дозирующей перфорированной шайбы с обратной связью по оборотам и стрелочный прибор, регистрирующий объемный расход порошка.

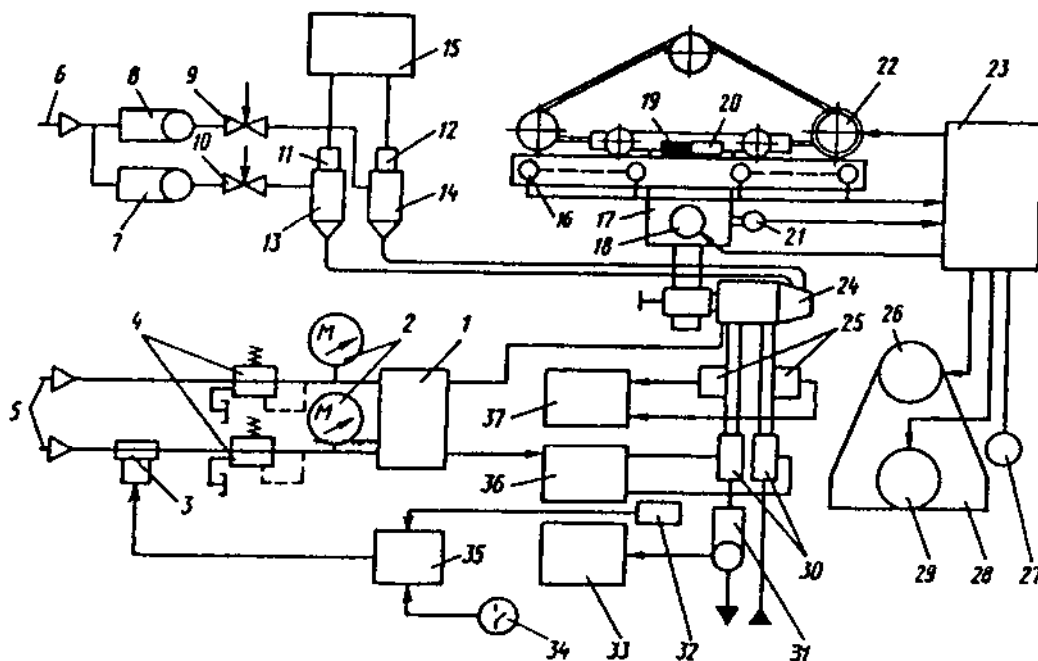


Рис.1. Блок-схема установки для плазменного напыления УПУ-3Д с нашими доработками

Как показали исследования, созданные дозаторы (рис. 2) обеспечивают высокую стабильность подачи материалов и по этому показателю превосходят дозаторы, выпускаемые промышленностью (А. с. №379155, 1557765 и патент №2162748 от 21.08.2000 г.).

Разработанные дозаторы обеспечивают: диапазон регулирования подачи порошка в пределах 1-25 см³/мин с точностью до 5%; лёгкость замены ёмкости с напыляемым материалом; возможность программного управления работой дозаторов; малую массу; высокий ресурс работы.

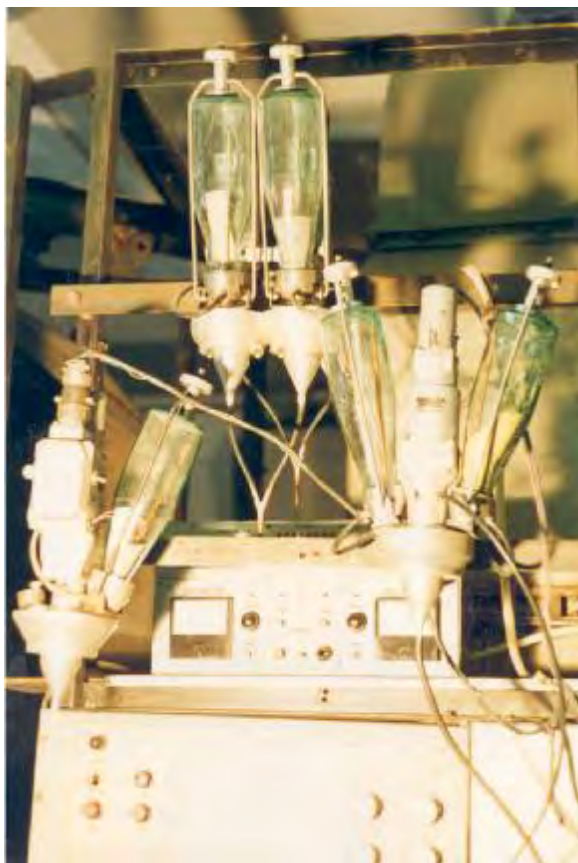


Рис. 2. Внешний вид дозирующих устройств и пульта управления при напылении, разработанных в НИИ

Основным инструментом плазменной технологии является электродуговой плазмотрон. Для напыления высокотемпературных теплозащитных и износостойких покрытий на внутреннюю сложнопрофилированную поверхность изделий из жаропрочных сталей и сплавов с размерами полости менее 70 мм и протяжённостью до 1-2 м, а также с размерами полости до 40 мм при её протяжённости до 80 мм, в НИИ технологий и проблем качества при СГАУ разработана целая гамма малогабаритных плазмотронов с минимальными размерами 27×35×50 мм и мощностью более 40 кВт (А.с. №152715, 211242, 211264, 211640, 233396, 311539, 733396 и патент №31897 от 27.08.2003г.) (рис.3). Необходимость разработки плазмотронов была вызвана тем, что выпускаемые промышленностью плазмотроны имеют большие габариты и массу, а также недостаточную эффективность нагрева порошковых материалов.

Вспомогательное оборудование включает специальную защитную камеру и размещенные в ней манипуляторы для перемещения деталей и плазмотрона.

При напылении плоских поверхностей деталь остается неподвижной, а движение вдоль напыляемой поверхности и движение подачи сообщается плазмотрону. Преимуществом такой схемы является независимость мощности привода от массы деталей, что повышает его универсальность.



Рис. 3. Плазмотроны, разработанные нами

Процесс нанесения покрытий, проводится с использованием разработанной компьютерной системы управления и контроля параметров. При этом решаются следующие задачи:

- управление движением и работой плазмотрона и движением напыляемой детали от ЭВМ по заранее составленной программе при подготовке технологического процесса,
- контроль параметров технологического процесса, влияющих на качество напыления.

Разработанный комплекс для управления и контроля технологическим процессом газотермического плазменного напыления построен на базе ЭВМ промышленного исполнения типа РС-5000. В состав ЭВМ, кроме системного блока, входят дисплей типа Gold Star и струйный принтер типа Desk Jet.

Системный блок оснащен платами ввода-вывода информации. Структурная схема комплекса приведена на рис. 4.

В состав комплекса входят 5 идентичных блоков управления: 4 - для управления движением плазмотрона - по осям X, Y, Z и угловым перемещением, пятый блок необходим для управления угловым перемещением напыляемой детали. Подобная система управления движением позволяет производить напыление деталей со сложными поверхностями, например, лопаток авиационных двигателей.

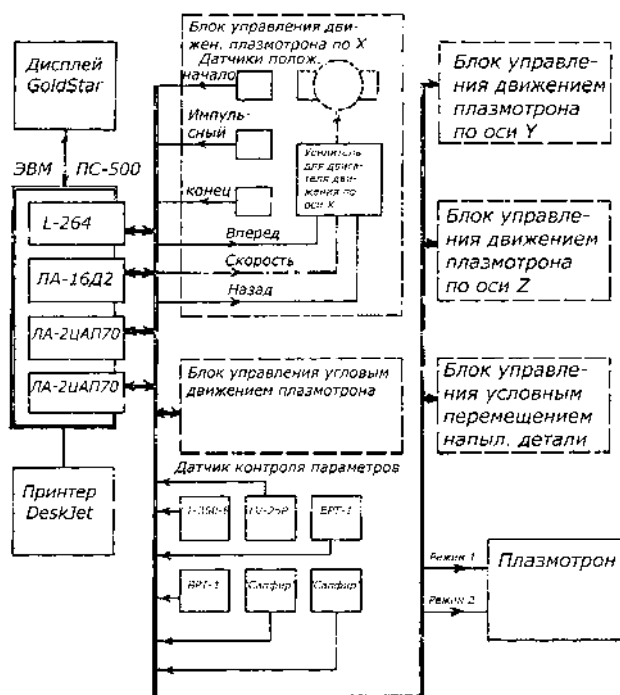


Рис. 4. Структурная схема компьютерной системы управления и контроля установкой газотермического плазменного напыления

Включение плазмотрона производится дискретными сигналами "Режим 1" и "Режим 2". Кроме блоков управления плазмотроном в состав комплекса входят датчики контроля параметров технологической ус-

тановки: напряжения и тока плазмотрона, давления и расходов транспортных газов.

В системе предусмотрены резервные каналы ввода и вывода на ЭВМ, что позволяет расширить возможности системы.

Контроль перемещения осуществляется тремя бесконтактными датчиками положения.

Дальнейшее повышение ресурса и экономичности ГТД привело к разработке теплозащитных (ТЗП) металлокерамических покрытий, которые могли бы работать при температурах до 1700 К и выше. С этой целью нами была разработана технология плазмодинамического упрочнения ТЗП на оборудовании, разработанном институтом Курчатова на ОАО «Авиаагрегат». Схема установки представлена на рис. 5.

Установка плазмодинамического импульсного ускорителя плазмы состоит: из электродинамического ускорителя плазмы, инжектора импульсного напуска газа; плазмопровода; вакуумной камеры с технологической оснасткой; вакуумной системы; источников высокого импульсного напряжения, коммутирующей, синхронизирующей и диагностической аппаратуры.

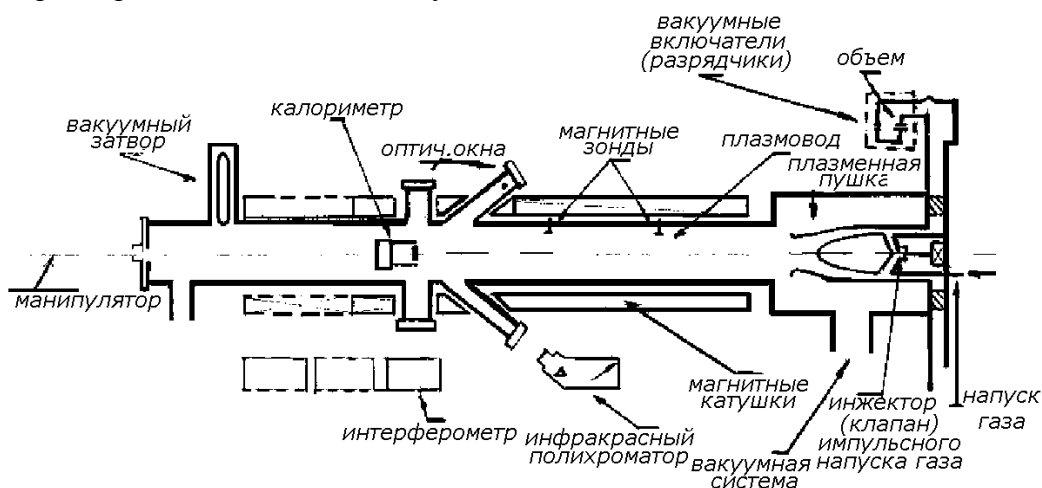


Рис. 5. Схема электродинамического импульсного ускорителя плазмы

Установка работает следующим образом. В предварительно откаченный зазор ускорителя с помощью инжектора вводится рабочий газ. При подаче высокого напряжения от конденсаторных батарей на катод ускорителя происходит ионизация газа и пробой межэлектродного промежутка. Под действием электромагнитных сил образованная токовая перемычка начинает уско-

ряться вдоль электродов в направлении к плазмопроводу. При своем движении токовая перемычка увлекает и разгоняет оставшуюся часть газа, выпущенного из инжектора, формируя плазменный сгусток между электродами специальной геометрии. Через время 10^{-5} с плазменный сгусток вылетает из электродной системы и входит в продольное магнитное поле плазмопровода, по которому

транспортируется до рабочей камеры, где и взаимодействует с обрабатываемым изделием.

Обработка покрытий производится на плазмодинамическом ускорителе, характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики плазмодинамического ускорителя

Температура плазмы	(1...3)10 ⁶ К
Диаметр плазменной струи (плаз. сгусток)	70...300 мм
Плотность ионов в плазменной струе	10 ²⁰ - 10 ²⁴ 1/м ³
Скорость ионов	10 ⁵ ... 10 ⁶ м/с
Время воздействия плазменного сгустка	10 ⁻⁵ ... 10 ⁻⁷ с
Максимальная мощность	20 кВт
Максимальное напряжение	50 кВ
Производительность обработки	12 имп/час

Оборудование для ионно-плазменного вакуумного напыления

Как уже отмечалось, в настоящее время вакуумная плазменная технология высоких энергий (ВПТВЭ) модифицирования поверхности изделий и получения специальных покрытий из высокоионизированных потоков "металлической" плазмы в атмосфере реакционных газов нашла достаточно широкое применение во всех экономически развитых странах мира благодаря пионерским работам ученых СССР,

выполненных в середине 70-х годов в области создания электродуговых генераторов и ускорителей таких потоков [1].

Работа этих устройств основана на использовании так называемой "вакуумной" дуги катодной формы, горящей в продуктах эрозии интегрально холодного катода и формирующей плазменные потоки, состоящие из атомов, ионов и микрокапель материала катода [2]. При этом принципиально новым было то, что в компактном низковольтном вакуумном устройстве удалось получить интенсивные плазменные потоки металла с расходом массы $dm/dt = mJ$ (где $m = (0,4...1,5) \cdot 10^{-7}$ кг/К - коэффициент электроэрозии катода, J - ток дуги), содержащие (30...80)% ионов различной кратности ионизации со средней кинетической энергией (30...150) эВ. Поэтому технические характеристики первых же образцов электродуговых ускорителей, получивших название "Пуск" по первым буквам словосочетания "плазменный ускоритель" (разработчик МВТУ им. Баумана), и электродуговых генераторов, получивших название "Булат" (разработчик Харьковский физико-технический институт), были принципиально недостижимы на разрабатываемых в тот период на западе устройствах, работающих на газовых разрядах. Некоторые технические характеристики выпускаемых установок приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Технические характеристики установок

Наименование показателя	Булат-3Т	Булат-9	ННВ6.6-И1	ЮНИОН, УРМЗ 279-048	Пуск 83	ВУ-2Б	ННИ39-5-И1	Булат-6К
1. Габариты вакуумной камеры, мм	Ø500××500	Ø600××650	Ø600××6500	240××530×550	Ø360××250	240××550×550	Ø900××500	Ø500××500
2. Число генераторов плазмы	3	4	3	2	2 несмеш.	2	4	3
3. Скорость роста покрытия, мкм/с	до 10...20	до 40	до 40	до 40	30...60	10...20	до 40	40
4. Время типового технологического цикла, мин	120...150	60...90	60...90	60...90	20...30	75	20...60	90
5. Диапазон регулирования напряжения на детали, В	0...250 (плавно) 700...1200 (ступ.)	30...1700 (плавно)	0...280 (плавно) 100...1700 (плавно)	1...180 (плавно) 1000	0...1200 (плавно)	0...200 (плавно) 700...1000 (ступ.)	0...280 (плавно) 200...1700 (ступ.)	0...380 (плавно) 100...1700 (ступ.)
6. Диапазон регулирования средней энергии однократных ионов, эВ	до 1200	до 1700	до 1700	до 180 1000	до 1200	до 1000	До 1700	до 1700
7. Габариты оборудования, м	2,17××1,95××2,16	2,2××2,1××2,2	3,9××3,6××2,07	2,2××2,0××2,0	1,87××0,69××1,85	1,4××1,5××1,6	3,9××3,6××2,07	2,4××1,7××2,1

Разработка плазменных генераторов и плазменных ускорителей для технологии обработки поверхности изделий машиностроения базировалось на использовании результатов, полученных при создании электрореактивных ускорителей двигателей космических аппаратов, электродуговых аппаратов разделения изотопов и получения особо чистых материалов для атомной промышленности, электродуговых гетерных вакуумных насосов и вакуумных электродуговых переключателей электрических токов большой величины [1-3].

Достигнутые к концу 70-х годов технические показатели оборудования для вакуумной плазменной технологии высоких энергий, а также высокая адгезионная прочность покрытий и открытый эффект получения покрытия из нитрида титана при температурах существенно более низких ($300 \dots 400^\circ\text{C}$), чем температуры, вытекающие из законов равновесной химической термодинамики ($800 \dots 1000^\circ\text{C}$) и предопределили интенсивное развитие этой технологии.

В 1978 г. нами запущена в эксплуатацию установка вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий, собранная на базе вакуумного поста установки распыления материалов (УРМ 3.279.029) по схеме «Пуск-77» с электродуговым принципом генерации плазмы металлов в вакуумной дуге катодной формы и холловским ускорением плазменных потоков (так называемый холловский торцевой ускоритель металлической плазмы).

На рис. 6 представлена блок-схема такой установки с доработками, выполненными нами. В установке модернизирована вакуумная камера; улучшена система охлаждения и обогрева вакуумной камеры и плазмотрона, что позволяет значительно сократить время на подготовку вакуумной камеры к работе; изготовлен и установлен в вакуумную камеру привод для перемещения напыляемых деталей. За счет модернизации блока холловского ускорителя предусмотрено использование двух новых подрежимов работы установки (узкая и широкая плазменная струя), что позволяет путем варьирования ширины плазменной струи наиболее эффективно достигать равномерности покрытия на деталях различных раз-

меров, повысить КПД использования катода и интенсифицировать процесс нанесения покрытия.

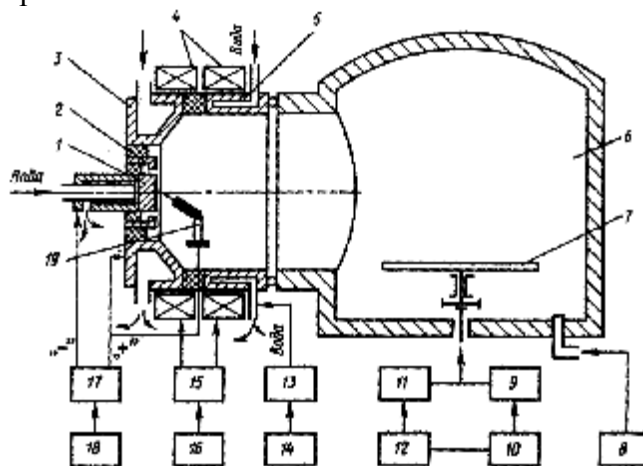


Рис. 6. Блок-схема установки для получения покрытий в вакууме, изготовленная нами по схеме "Пуск-77": 1 — катод; 2 — экран; 3 — анод 1; 4 — электромагниты; 5 — анод 2; 6 — камера; 7 — механизм вращения и перемещения детали; 8 — механизм напуска реактивного газа; 9 — низковольтный блок питания; 10 — блок управления напряжением напыляемой детали; 11 — высоковольтный блок питания; 12 — блок стабилизации разряда; 13 — блок питания анода 2; 14 — блок управления анода 2; 15 — блок питания магнитов ускорителя; 16 — блок управления магнитами ускорителя; 17 — блок питания дуги; 18 — блок управления дугой; 19 — устройство поджига дуги

В течение 78 - 79 г. и ряда последующих лет на основании экспериментальных исследований и полученных результатов математического моделирования были проведены основные этапы модернизации этого оборудования, содержащие новые технические решения (А.С. 214033, 222984, 234308, 240768, 262403, патент № 31782) и приведшие к созданию торцевого холловского ускорителя с названием "Пуск-КуАИ" (рис.7).

По сравнению с известными схемами торцевого холловского ускорителя было изменено геометрическое взаимоположение торцевой поверхности катода, соленоида и анода ускорителя. Профиль внутренней поверхности выходного сечения анода (сопла) был максимально приближен к профилю эквипотенциальной поверхности силовых линий магнитного поля в этом месте при величине индукции магнитного поля ($3,0 \dots 4,5$) мТл на оси соленоида около катода. Изменены геометрические параметры катода и условия его охлаждения в соответствии с нашими расчетами по минимизации микрокапельной фазы. Введен дополнительный анод, создающий эффект электростати-

ческой линзы для ионного потока, что позволило реализовать три различных режима работы ускорителя. С целью снижения температуры нитридообразования и повышения стабильности горения вакуумной дуги на малых токах подача реакционного газа осуществлена через зону генерации и ускорения металлической плазмы. Выходное сечение ускорителя укомплектовано жалюзиями и кольцевой заслонкой для улавливания микрокапельной фазы. Для повышения эффективности и скорости ионного травления регулируемое напряжение смещения доведено до 2,5 кВ и существенно улучшена система защиты высоковольтного выпрямителя от возникновения или развития микродуговых привязок на детали. Созданный ускоритель обеспечивает уменьшение микрокапельной фазы, по сравнению с известными схемами более чем 2...4 раза и на 20...30 % увеличивает степень ионизации плазменного потока.

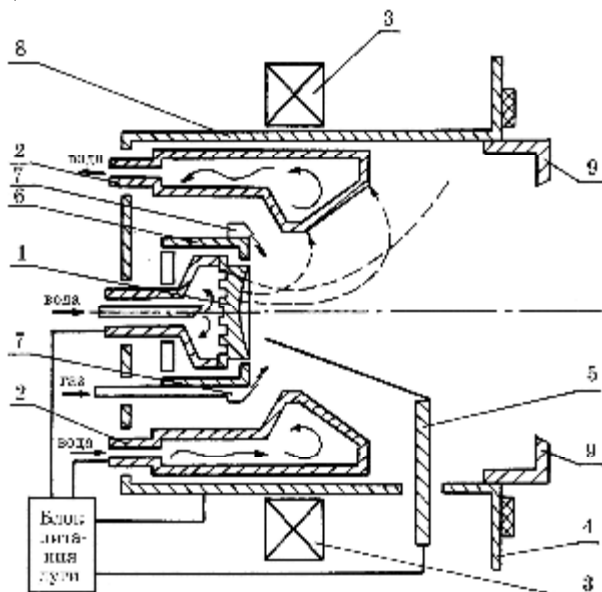


Рис.7. Схема плазменного ускорителя "Пуск-КуАИ": 1 - катод; 2 - анод; 3 - соленоид; 4 - фланец крепления генератора к вакуумной камере; 5 - электрод поджига дуги; 6 - система защиты от сброса дуги на боковую поверхность катода; 7 - канал подачи реакционных газов; 8 - дополнительный анод; 9 - съёмный кольцевой экран. Пунктиром проведены силовые линии электрического и магнитного поля

Для того, чтобы управлять процессами напыления, получать качественные покрытия необходимо было разработать теоретические методы определения температурных полей и полей напряжений в телах с изменяемой геометрией. Данные методы были

разработаны и представлены в наших работах [1-3], а некоторые особенности, возникающие при газотермическом и ионно-плазменном вакуумном напылении предусмотрены в данной статье.

Напыление подвижными источниками тепла (рис. 8)

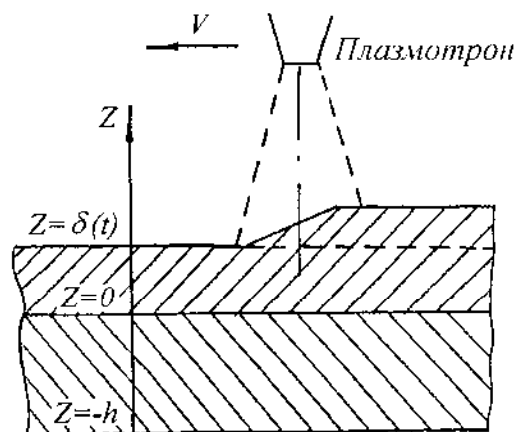


Рис. 8. Схема напыления подвижным источником тепла

Математическое моделирование процесса напыления покрытий осуществляется за счёт представления теплового воздействия плазменной струи в виде:

$$q(t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \{ \theta[t - (n-1)t_1] - \theta[t - (n-1)t_1 - t_2] \},$$

$$q_n(t) = q_{2,0} \exp \left\{ -kV^2 [t - (n-1)t_1 - 0,5t_2]^2 \right\},$$

кинетика наращивания покрытия описывается соотношениями:

$$\frac{d\delta}{dt} = V_z(t) \{ \theta[t - (n-1)t_1] - \theta[t - (n-1)t_1 - t_2] \},$$

$$\delta(t) = \begin{cases} (n-1)\delta_0 + \int_{(n-1)t_1}^t V_z(\tau) d\tau, & t \in [(n-1)t_1, (n-1)t_1 + t_2] \\ n\delta_0, & t \in [(n-1)t_1 + t_2, nt_1] \end{cases}$$

$$\delta_0 = \int_0^{t_2} V_z(\tau) d\tau - \text{толщина покрытия после прохода плазматрона};$$

n - количество проходов плазматрона;

$\theta(t)$ - ассиметрическая единичная функция;

$$t_2 = d_H / V.$$

Трансформация распределения Гаусса при напылении на наклонную поверхность

При нанесении покрытий на наклонные поверхности (рис.9) плотность теплового потока двухфазной плазменной струи описывается нормальным распределением Гаусса:

$$(x=0, y, z) \quad q = \frac{N}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{z^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\};$$

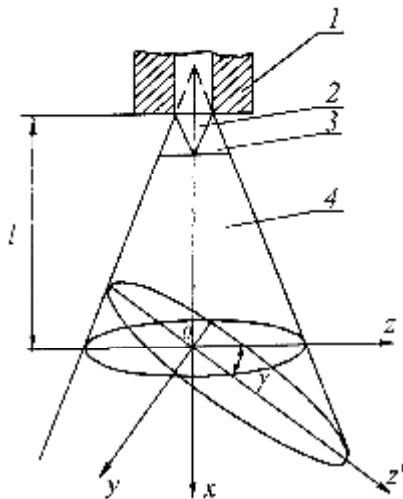


Рис. 9. Схема напыления на наклонную поверхность

и принимает следующий вид:

$$(x=l, y, z') \quad q = \frac{N}{2\pi\sigma_z\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{z'}{\sigma_z}\right)^2 + \left(\frac{y'}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\};$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{\cos\gamma} \left(1 + \frac{z'}{l} \sin\gamma\right), \quad \sigma_y = \sigma \left(1 + \frac{z'}{l} \sin\gamma\right).$$

Получены аналитические и численные решения, обеспечивающие оценку и управление тепловой напряжённостью процесса напыления подвижными источниками тепла на поверхности при произвольном угле падения плазменной струи.

Напыление на внутреннюю малоразмерную цилиндрическую поверхность

Математическое моделирование процесса нагрева при нанесении покрытий на цилиндрические изделия проводится на основе следующих соотношений:

$$\frac{1}{\sigma_i^2} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2},$$

$i=1$ – покрытие; $i=2$ – основа.

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2, \quad r = R; \quad \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0, \quad z = 0; \quad z = H;$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_2 (T_{cp,2} - T_2),$$

$$r = R_2, \quad T_i(r, z, \varphi, t) = T_i(r, z, \varphi + 2\pi, t),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -q(z, \varphi, t); \quad r = R_1,$$

$$q(z, \varphi, t) = \frac{N}{2\pi\sigma_z\sigma_\varphi} \exp\left\{-\left(\frac{z-Vt}{4\sigma_z}\right)^2 + \left(\frac{R(\varphi-\omega t)}{4\sigma_\varphi}\right)^2\right\},$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{\cos\gamma} \left(1 + \frac{z-Vt}{l} \sin\gamma\right), \quad \sigma_\varphi = \sigma_0 \left(1 + \frac{z-Vt}{l} \sin\gamma\right),$$

$$T_i(r, z, \varphi, 0) = T_0.$$

Получены аналитические и численные решения, обеспечивающие оценку и управление тепловой напряжённостью процесса напыления на цилиндрические поверхности (детали типа камер сгорания ДВС, РПД и ГТД).

Нагрев и плавление плакированной частицы при транспортировке в плазменной струе (рис. 10)

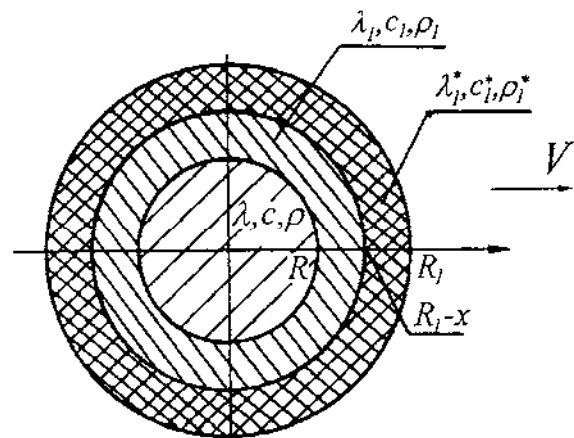


Рис. 10. Схема нагрева и плавления плакированной частицы при транспортировке в плазменной струе

Математическое моделирование процесса нагрева и плавления плакированного композиционного материала при его транспортировке в плазменной струе проводится на основе следующих соотношений:

1 стадия – твёрдая фаза

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T_1), \quad r \in [R, R_1];$$

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad r \in [0, R];$$

$$T_1(R, t) = T(R, t), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad r = R,$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha \left(\frac{H_{\Pi}}{C} - T_1 \right) - \varepsilon \sigma T_1^4, \quad r = R_1,$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad T(0, t) < \infty; T_1(r, 0) = T(r, 0) = T_0.$$

2 стадия - плавление

$$c_1^* \rho_1^* \frac{\partial T_1^*}{\partial t} = \text{div}(\lambda_1^* \text{grad} T_1^*), \quad r \in [R_1 - x(t), R_1],$$

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T_1), \quad r \in [R, R_1 - x(t)],$$

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad r \in [0, R],$$

$$T_1(R, t) = T(R, t), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad R = r,$$

$$T_1^*(R_1 - x(t), t) = T_1(R_1 - x(t), t) = T_{nl}^{(1)},$$

$$\lambda_1^* \frac{\partial T_1^*}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = L \rho_1 \frac{dx}{dt}, \quad r = R_1 - x(t),$$

$$\lambda_1^* \frac{\partial T_1^*}{\partial r} = \alpha^* \left(\frac{H_{\Pi}}{C} - T_1^* \right) - \varepsilon \sigma (T_1^*)^4,$$

$$r = R_1, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad T(r, 0) = T_0(r);$$

$$T_1(r, 0) = T_{1,0}(r); \quad T(0, t) < \infty.$$

Получены аналитические и численные решения, обеспечивающие оценку и управление тепловой напряжённостью и проплавлением многослойной плакированной частицы при ее транспортировке в плазменной струе.

Плазмодинамическое упрочнение импульсными ускорителями

Процесс плазмодинамического упрочнения покрытий осуществляется на основе решения следующей системы дифференциальных уравнений:

1 стадия - твёрдые фазы

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right),$$

$i = 1$ - оксидное покрытие, $z \in [0, h_1]$;

$i = 2$ - металлическое покрытие, $z \in [h_1, h_2]$;

$i = 3$ - основа, $z \in [h_2, \infty]$,

$$T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad z = h_1$$

$$T_2 = T_3, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad z = h_2,$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = q(t) - \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_{cm}^4), \quad z = 0,$$

$$T_3 = T_0, \quad z \rightarrow \infty, \quad T_1 = T_2 = T_3 = T_0, \quad t = 0.$$

2 стадия - плавление оксидного покрытия

тия

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad z \in [0, \eta(t)],$$

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right), \quad z \in [\eta(t), h_1],$$

$$T_1 = T = T_{nl}, \quad z = \eta(t),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \rho \frac{d\eta}{dt}, \quad z = \eta(t),$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q(t) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{cm}^4) - q_s(T),$$

$$q_s(T) = \frac{\sigma_{II} \Phi}{\sqrt{2\pi RT(0, t)}} P_s \exp \left[\frac{\sigma_{II}}{RT_s} \left(1 - \frac{T_s}{T(0, t)} \right) \right].$$

Получены численные решения, обеспечивающие оценку и управление тепловой напряжённостью и зоной проплавления при импульсном плазмодинамическом и лазерном упрочнении многослойных систем покрытий.

Математические модели плазмохимического синтеза соединений переменного состава при ионно-плазменном вакуумном напылении (рис. 11)

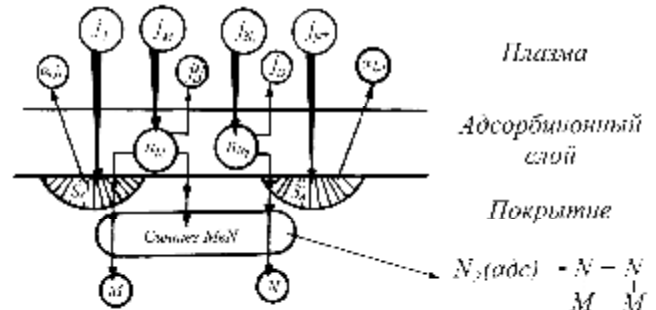


Рис. 11. Модель плазмохимического синтеза соединений переменного состава при ионно-плазменном вакуумном напылении

Уравнение кинетики заполнения адсорбционного слоя:

$$\begin{cases} \frac{dn_M}{dt} = j_{Me} \left(\frac{n_r - 2n_{N_2} - n_M}{n_r} \right) - \frac{n_M}{\tau_D} - \frac{n_M}{\tau_X} - \frac{n_M}{\tau_H} \\ \frac{dn_{N_2}}{dt} = \alpha_T j_{N_2} \left(\frac{n_r - 2n_{N_2} - n_M}{n_r} \right) - \frac{n_{N_2}}{\tau_{1,D}} - \frac{n_{N_2}}{\tau'_H} \end{cases}$$

Уравнения кинетики роста покрытия

$$\begin{cases} (j_M)_H = \frac{n_M}{\tau_X} + \frac{n_M}{\tau_H} + j \\ (j_{N_2})_H = \frac{n_{N_2}}{\tau_{X,N}} + \frac{n_{N_2}}{\tau'_H} + j_N^+ \\ j_{TiN} = 2(j_{N_2})_H \\ V = \rho^{-1} (m_{TiN} j_{TiN} + m_M [(j_M)_H - 2(j_{N_2})_H]) \end{cases},$$

где $\tau_H^{-1} = S_A [(1 - \alpha_{P,1}) j_i + (1 - \alpha_{P,2}) j_N^+]$,

$$\tau_D = \tau_0 \exp \left\{ \frac{E_D}{kT} \right\}; \tau_X = \sigma \tau_0 \exp \left\{ \frac{E_d}{kT} \right\}$$

Оптимальное покрытие

$$(j_M)_H = 2(j_{N_2})_H.$$

Получены аналитические и численные решения, обеспечивающие получение покрытий из нитридов, карбидов и окислов с заданной стехиометрией состава.

Срабатываемые уплотнительные покрытия

Величина радиальных зазоров лабиринтных уплотнений между элементами ротора и статора газотурбинного агрегата существенно влияет на его КПД и экономичность [1,3]. Величина этого зазора при сборке агрегата должна выставляться такой, чтобы исключить возможность соприкосновения поверхностей ротора и статора при эксплуатации и возможность разрушения роторной части уплотнения, приводящей к выходу из строя всего агрегата. С учетом того, что величина оптимального зазора должна составлять миллиметры на диаметре ротора более метра, возникает необходимость использовать на поверхности статорной части существенно менее прочный материал, чем на роторе. Однако, закрепление на поверхности статора уплотнений, изготавливаемых из металлокерамического проката, спеченных вставок или сотовых элементов, является трудоемкой технологиче-

ской операцией, не позволяющей в должной степени минимизировать эти зазоры. Наиболее эффективным технологическим приемом является нанесение на поверхность лабиринтного уплотнения статора специальных срабатываемых уплотнительных покрытий, стойких к воздействию высокотемпературных (от 877 до 1073 К) газовых потоков и, вместе с тем, обладающих малой прочностью на врезание при случайных соприкосновениях с ротором как на этапе приработки, так и на этапе эксплуатации агрегата.

Работа по этому направлению были начаты в 1972 г. и привели к созданию первого отечественного материала (А.С. № 317297, 611573) и первой в СССР плазменной технологии нанесения срабатываемых уплотнительных покрытий на лабиринтные торцевые уплотнения статора, внедренной в производство. В дальнейшем происходило совершенствование композиционного материала и технологии его напыления.

Напыляемый композиционный материал представляет собой мелкодисперсную механическую смесь металлов и твердой смазки, гранулированных по специальной технологии на связующем из натриевосиликатного стекла. В зависимости от вида газотурбинного агрегата и температуры газового потока в уплотнении нами были разработаны следующие гранулированные смеси:

Al(74...76%) + BN(24...26%);
Ni(83...85%) + BN(17...15%);
X20H80(74...76%) + BN(26...24%);
X20H80(81...83%) + CaF₂(19...17%) [1].

Эти покрытия обеспечивают весь температурный диапазон (от 877 до 1073К) эксплуатации ГТА и ГТД. Покрытия и технологии их нанесения были внедрены на всех двигателях и агрегатах серии НК и успешно применяются в их производстве.

Износостойкие плазменные покрытия

Выбор материала износостойкого покрытия определяется условиями эксплуатации конкретного узла (температурой, давлением, скоростью перемещения и т.д.), материалом ответной пары, видом трения и механизмом изнашивания поверхностей. В связи с большим разнообразием этих условий выбор материала покрытия является достаточно сложной технологической задачей.

За более, чем 40-летний период работы группа плазменного напыления успешно решила проблемы повышения износостойкости: кинематических пар трения, работающих в условиях жидких смазок маслами и топливом, в условиях граничного или сухого трения; разъемных соединений, работающих в условиях фреттинг-коррозии; свободных поверхностей, работающих в условиях абразивного, кавитационного и коррозионно-окислительного изнашивания в газовых потоках, потоках продуктов сгорания топлива, в двухфазных паровых потоках и потоках химически активных жидкостей [1-3].

Для обеспечения высокой износостойкости кинематических пар разъемных соединений обязательным условием является соблюдение правила "положительности градиента сдвигового сопротивления" материала покрытия [3] во всем диапазоне параметров эксплуатации узла трения. Реализация этого условия обеспечивается нами напылением механической смеси металла и плакированного порошка твердого соединения. Широкий комплекс исследований различных видов металлов и различных видов твердых соединений (карбидов, нитридов, окислов, боридов и т.д.), плакированных различными металлами, в том числе, легированных, позволил выбрать для различных условий эксплуатации следующие составы покрытий: TiC , плакированный (34...36%)Ni, в механической смеси Ni; двойной карбид $TiCrC$, плакированный (28...30%)Ni, в механической смеси с Ni; карбид хрома Cr_3C_2 , плакированный (28-30)Ni, в механической смеси с Ni; HA67 в механической смеси с Ni. В качестве матричного материала механической смеси также использовались порошки хромоникелевого X20H80 и термореагирующего сплава HA67, в том числе и в механической смеси с никелем [1-3].

Регулированием содержания матричного материала обеспечивается оптимизация износа обеих поверхностей трения по минимуму скорости увеличения зазора пары трения. Материалы с карбидом титана эффективных до температур 873K, с двойным карбидом титана-хрома от 773 до 973K, а с карбидом хрома от 973 до 1200K. Материа-

лы на основе чугуна являются дешёвым износостойким покрытием с температурами эксплуатации до 673K, хотя и уступающим по износостойкости в этой области карбиду титана.

Эти технологии также успешно применяются для восстановления работоспособности изношенных деталей, ранее изготовленных без покрытий, а также для восстановления ресурса деталей с покрытиями. Так в газотурбинных двигателях и агрегатах серии НК используются разработанные нами технологии повышения износостойкости колец и корпусов сопловых аппаратов, дефлекторов диска турбины, деталей реверса тяги, посадочных мест под подшипники и лопатки и т.д. Срок службы таких деталей с покрытиями возрастает от 2 до 7 раз.

Для авиационной и автомобильной промышленности в середине 80-х годов решена важная народно-хозяйственная задача по замене чугунных деталей роторно-поршневого двигателя на алюминиевые с покрытием. Покрытия наносятся на боковые крышки и эпित्रаходу камеры сгорания двигателя. Это позволило снизить массу двигателя почти в 2 раза при повышении ресурса работы этих поверхностей почти в 2,5 раза. Покрытие было внедрено на вертолетном двигателе (г. Воронеж), автомобильном двигателе (г. Тольятти, РПД ВАЗ) и двигателе мотоциклов (г. Пермь). Кроме того на РПД ВАЗ (г. Тольятти) создан производственный участок и передана наша технология.

Нами впервые в мировой практике была создана технология плазменного напыления износостойкого покрытия на внутреннюю поверхность малоразмерной полости камеры сгорания. Это позволило по сравнению с гальваническим производством, хорошо разработанным в Японии и ФРГ по нанесению никель-карбид-кремниевого покрытия (никосил) снизить стоимость оборудования в 14 раз, уменьшить производственные площади в 30 раз, уменьшить длительность процесса с 24 часов до 20 минут, снизить энергоёмкость процесса с 100 кВт до 0,8 кВт на единицу изделия, ликвидировать токсичность производства и существенно поднять эксплуатационные свойства покрытий (рис. 12,13).



Рис.12. Серийно выпускаемый двигатель ПО-32 для сверхлегких летательных аппаратов. Разработанные покрытия использованы: на внутренней поверхности алюминиевой камеры сгорания ($\text{HA67}+(\text{TiC})\text{Ni}$); на дне поршня ($\text{HA67}+\text{ZrO}_2$); на поршневых кольцах ($\text{TiN}+\text{Mo}$); в отверстиях для пальцев в алюминиевом поршне ($\text{TiN}+\text{Mo}$); в отверстиях для свеч зажигания (бронза)

Кроме того, на этом изделии были внедрены технологии плазменного напыления теплозащитных покрытий системы окись циркония-никель на алюминиевом дне поршня, а также наши три технологии вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий.

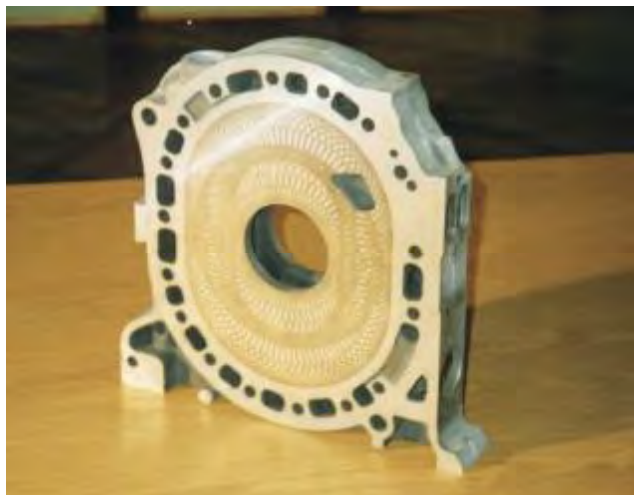


Рис.13. Боковая крышка серийно выпускаемого роторно-поршневого двигателя из сплава Al-25 с покрытиями HA67 и $(\text{TiC})\text{Ni}$

Технология и покрытие защищены А.С. № 821063, 830235, 107315 и 12791119. В 2003 г. на международном аэрокосмическом салоне "МАКС-2003" был продемонстрирован беспилотный сверхлёгкий летательный аппарат "Пчёлка" для авиаразведки

с разработанным двигателем ПО-32, который выпускается по нашей технологии.

Теплозащитные плазменные покрытия

Первые исследования в ОНИЛ-7 по получению теплозащитных покрытий (ТЗП) были начаты в 1963 г. Исследования проводились применительно к элементам ракетных двигателей изготовленных из меди, стали 12Х2НВФА и жаропрочных хромоникелевых сплавов. В качестве материалов покрытий, обеспечивающих защиту от высокотемпературной газовой коррозии были выбраны окислы ZrO_2 и Al_2O_3 . На этих порошковых материалах с очень высокой температурой плавления наглядно проявились все потенциальные возможности плазменной технологии. Однако, наибольшая прочность сцепления, которая была получена на перечисленных материалах основы, составила не более (10...13) МПа на грануляции порошка (40...60) мкм. Для повышения прочности сцепления были разработаны способы напыления с попутным потоком газа и с отсечением периферийных слабо прогретых частиц (А.С. № 268843, 329803), позволившие повысить прочность сцепления на 30%. Существенно более высокие результаты (19...23) МПа были достигнуты при использовании подслоя из терморегулирующего никель-алюминиевого порошка (А.С. №361224). Результаты этих исследований позволили разработать двухслойное ТЗП системы $\text{Ni-Al}+\text{ZrO}_2$, которое было внедрено на поверхности сопла ракетного двигателя НК-33 (ракетоноситель Н-1, лунный проект, г. Самара), на поверхности сопла из трубчатых теплообменников и малоразмерное сопло ракетных двигателей производства Южного машиностроительного завода (г. Днепропетровск, Украина.).

На эти предприятия был передан комплект малогабаритных плазмотронов ПГН-М, разработанных в лаборатории, документация на их изготовление, оказана помощь в создании плазменного участка, помощь в освоении технологии и помощь в освоении выпуска промышленной партии этих плазмотронов на Украине.

В этих исследованиях было выявлено, что разработанные ТЗП имеют низкую термостойкость (10...20 циклов) и приме-

нимы для изделий при небольшом числе циклов изменения температуры, например, ракетные двигатели. Такие же результаты были получены в тот период и в других странах мира и они показали, что физическая природа низкой термовыносливости систем окисел-металл определяется возникновением больших градиентов напряжений на границе слоёв и развитием термоусталостных трещин при циклическом изменении температуры и интенсификации диффузионных процессов [3].

Поиск решения этой проблемы путем сглаживания градиента коэффициента температурного расширения по толщине системы привёл к созданию материала покрытий состава Me-Cr-Al-Y (где Me-Ni-Co или их комбинации) для жаропрочных хромоникелевых сплавов. Это покрытие, образующее в период технологического рекристаллизационного отжига стойкие высокотемпературные окислы Al_2O_3 и Y_2O_3 и имеющие плавное изменение коэффициента термического расширения по толщине от значений характерных для окисла (на поверхности) до значений характерных для хромоникелевого сплава (на их границе), в течение ряда лет было основным ТЗП для лопаток турбин. Однако, необходимость повышения температур в камере сгорания и необходимость повышения ресурса ГТД привело к созданию многослойной системы покрытий, в которой внешний слой состоит из окислов $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, а нижележащий слой из однослойного покрытия Me-Cr-Al-Y или из их комбинации с различным процентным содержанием компонент. В течение ряда лет это ТЗП получали электронно-лучевой технологией или вакуумной плазменной технологией высоких энергий, при этом считалось, что плазменная газотермическая технология не сможет обеспечить такие же пределы выносливости, термовыносливости, жаростойкости и т.д. системы, как вакуумные технологии.

Проведенные нами исследования показали [3], что это не так. Более того расположение границ зерен в плазменных покрытиях параллельно защищаемой поверхности позволяет достичь более высоких эксплуатационных показателей системы покрытие-основа при существенно большей техноло-

гичности процесса, чем в электронно-лучевых покрытиях, у которых расположение границ зерен перпендикулярно защищаемой поверхности (столбчатая структура). Кроме того, в силу наследственной природы формирования электронно-лучевых покрытий, эти границы зерен пронизывают всю толщину покрытия и служат каналом для снижения работоспособности ТЗП. К тому же на внутренние поверхности некоторых малоразмерных деталей ГТД с малыми диаметрами (жаровая труба и др.) покрытия можно нанести только газотермическим плазменным методом. В результате проведенных исследований нами были разработаны высокопроизводительные плазменные технологии нанесения ТЗП в атмосферных условиях как на отдельные детали горячего тракта ГТД (рабочие лопатки турбины, секции сопловых лопаток, жаровые трубы и т.д.), так и на внутренние поверхности камер сгорания ГТД и ГТА в сборе (НК-14ст, НК-36ст, НК-38ст, GT-10 и др.)

ТЗП разработанные нами для нанесения на рабочие лопатки турбины ГТД состоят из внутреннего слоя толщиной (140-170) мкм, полученного из порошка Ni-Co-Cr-Al-Y дисперсностью (40...80) мкм и двух слоев внешнего керамического слоя толщиной (280...320) мкм, полученного из порошка $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ дисперсностью (40...60) мкм.

На рис. 14 представлены покрытия, разработанные для деталей газового тракта турбины и компрессора ГТД.

В настоящее время разработкой ТЗП активно занимается целый ряд ведущих аэрокосмических и авиационных фирм.

В процессе разработки технологии нанесения ТЗП на рабочие лопатки турбины ГТД были исследованы следующие защитные покрытия:

1. Двухслойное покрытие: первый слой - хромоалитирование; второй слой - $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (разработчик ВВИА им. Жуковского).
2. Трёхслойное покрытие: первый слой - Me-Cr-Al-Y ; второй слой - Me-Co-Cr-Al-Y ; третий слой - $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (разработчик ИЭС им. Патона).
3. Трёхслойное покрытие: первый слой - Me-Ni-Cr-Al-Y ; второй слой - $\text{Me-Ni-Cr-Al-Y} + \text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$; третий слой - $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (разработчик НПО ВИАМ).

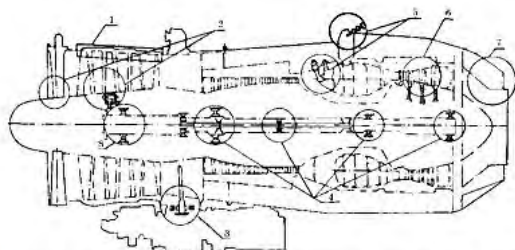
4. Трёхслойное покрытие: первый слой – жаростойкое покрытие системы Me-Co-Cr-Al-Y ; два слоя - теплозащитных керамических системы $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (вариант, рекомендованный нами).

Первый и второй варианты защитных покрытий наносились с помощью, электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме, третий с помощью вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, четвертый – газотермическим плазменным напылением + плазмодинамическое упрочнение.

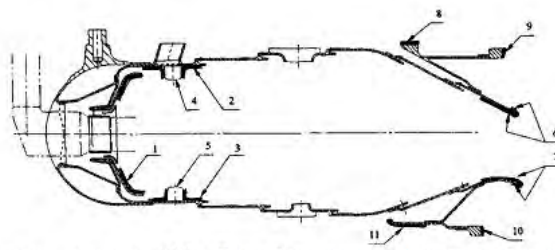
Поскольку в двигателе термодинамические нагрузки лопаток превалируют над

стационарными, то при лабораторных испытаниях основное внимание уделялось термостойкости керамического слоя, определяемой испытаниями на термоудар.

Исследования проводились на лопатках турбины, представляющих собой тонкостенную литую конструкцию из сплава типа ЖС-6. Стационарные испытания на термоудар проводились до появления отслоения керамического слоя на специальном стенде по режиму: нагрев до $T = 1250^\circ\text{C}$ за 3 мин, выдержка 10 мин; охлаждение до 200°C за 40 с.



Продольный разрез двигателя с указанием деталей и узлов с плазменными покрытиями: 1 – места соединения наружного кольца ВНА с корпусом компрессора и наружных колец спрямляющих аппаратов; 2 – узлы крепления лопаток КНД к дискам; 3 – привод агрегатов и их детали; 4 – опоры КНД и турбины, втулки и крышки лабиринтов, торцевые уплотнения; 5 – сочленения жаровых труб, форсунок и воспламенителей; 6 – узлы крепления лопаток к дискам турбины и места соединения лопаток соплового аппарата с внутренними кольцами; 7 – детали реверсатяги, корпуса подшипников, коллектора, крышки.



Камера сгорания ГТД. Термобарьерное покрытие: Связующее покрытие Ni-Co-Cr-Al-Y . Нанесение покрытия в составе головки камеры сгорания на поверхности: 1.Стабилизатор; 2. Кольцо наружное; 3. Кольцо внутреннее; 4. Патрубок наружный; 5. Патрубок внутренний. Верхнее покрытие $\text{ZrO}_2/8\text{Y}_2\text{O}_3$. Нанесение покрытия в составе камеры сгорания на поверхности: 6. Кожух наружный; 7. Кожух внутренний. Износостойкое покрытие "Метко" 8VF-NS. Нанесение покрытия в составе камеры сгорания на поверхности: 8. Наружное телескопическое уплотнение; 9. Наружное радиальное уплотнение; 10. Внутреннее радиальное уплотнение; 11. Внутреннее телескопическое уплотнение.



Камера сгорания ГТД с теплозащитным покрытием $\text{Ni-Co-Cr-Al-Y} + \text{ZrO}_2/8\text{Y}_2\text{O}_3$ и износостойким карбидным покрытием на наружной поверхности кольца.



Труба жаровая двигателя НК-36СТ с теплозащитным покрытием.



Блок соплового аппарата 1 ступени турбины двигателя НК-38СТ и НК-93 с теплозащитным покрытием ($\text{Ni-Co-Cr-Al-Y} + \text{ZrO}_2/8\text{Y}_2\text{O}_3$ + плазмодинамическое упрочнение).

Внедрение срабатываемых, теплозащитных и износостойких покрытий на деталях горячего тракта турбины и компрессора позволило повысить ресурс серийных авиационных двигателей на 30-40%, а ресурс конверсионных довести до 100000 часов.

Рис. 14. Покрытия, разработанные для деталей газового тракта турбины и компрессора ГТД как для авиационного, так и для конверсионного назначений, которые могут работать от нормальной температуры 293 K до температуры 1700 K

При этом установлено, что лопатка, изготовленная по предлагаемой нами технологии, снята со стенда после выполнения 1300 циклов без отслоений и других замечаний к керамическому слою. Лопатки других вариантов сняты с испытания в пределах 600...950 циклов с разрушениями.

Важным показателем защитных покрытий является жаростойкость и термостабильность металлического покрытия (под-

слоя), сохранение этих свойств после длительных изотермических испытаний при температуре $1050...1100^\circ\text{C}$. По результатам лабораторных изотермических испытаний в течение 500 часов и рентгеноструктурных исследований фазового состава разных вариантов технологии ТЗП установлено, что лучший показатель жаростойкости получен на деталях с трёхслойным защитным покрытием

и последующей обработкой ВТиП (плазмотермодинамическое упрочнение).

Жаростойкость оценивалась по состоянию β (NiAl) и γ^1 (Ni₃Al) фаз и снижению защитных свойств покрытия при высокой температуре, что связано с распадом жаростойкой β -фазы. Из-за сложной конструкции лопатка турбины при эксплуатации может претерпеть термодинамические нагрузки, вызывающие отслоение внешнего керамического слоя. Кроме того, в связи с применением низкосортных топлив и наличия агрессивной среды возможны коррозионные повреждения. Поэтому, применение ВТиП для уплотнения и упрочнения верхнего керамического слоя, позволяет устранить данное явление.

Упрочнение теплозащитного покрытия высокотемпературной импульсной плазмой позволило получить также положительные результаты при испытаниях на термостойкость и коррозионную стойкость.

При разработке технологии защитных покрытий особое внимание уделяется их влиянию на прочностные свойства защищаемых сплавов. Длительные испытания лопаток проводились на воздухе при $T=975^\circ\text{C}$ и $\sigma=270$ МПа, а испытания на циклическую прочность - при $T=20^\circ\text{C}$ с базой циклов $N=2\cdot 10^7$.

Сравнительный анализ результатов испытаний на длительную и циклическую прочность сплавов типа ЖС-6 с металлическими и теплозащитными покрытиями показал, что наибольшую долговечность и циклическую прочность имеют лопатки с напыленным защитным покрытием, рекомендуемым нами (вариант 4).

Рассматриваемые варианты технологии нанесения ТЗП апробированы стендовыми испытаниями. По результатам стендовых испытаний в составе изделия за 1500 часов работы установлено, что долговечность защитного покрытия с последующим упрочнением высокотемпературной импульсной плазмой имеет преимущество по сравнению с другими вариантами напыления и полностью удовлетворяет эксплуатационным требованиям. После окончания длительных испытаний рекомендуемое защитное покрытие сохранило высокие теп-

лозащитные, жаростойкие, эрозионно и коррозионностойкие свойства.

Таким образом, более чем сорокалетние исследования в области плазменных технологий позволили: разработать большую гамму срабатываемых уплотнительных, износостойких, эрозионностойких и теплозащитных покрытий; разработать методы управления их свойствам; разработать гамму оригинальных плазмотронов различного назначения, в том числе и для напыления на внутренние поверхности малоразмерных полостей; разработать компьютеризированную систему управления процессом и специальные манипуляторы для напыления на сложные поверхности; создать малогабаритную установку с автоматизированной системой управления для нанесения покрытий на крупногабаритные агрегаты без их полного демонтажа; внедрить около 150 технологических процессов в производство изделий авиационно-космического назначения, машиностроения, нефтегазовой и химической промышленности; создать более 20 производственных участков для реализации этих процессов и производства порошков для напыления.

Библиографический список

1. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий [Текст]: монография / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
2. Барвинок, В.А. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков [Текст]: монография / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, И.А. Докукина, А.Н. Плотников. – М.: Международный центр научной и технической информации, 1998. – 96 с.
3. Барвинок, В.А. Высокоэффективные технологические процессы в производстве лопаток турбин и камер сгорания ГТД [Текст]: монография под ред. чл.-корр. РАН В.А.Барвинка / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, И.А. Докукина. – М.: Наука и технологии, 2004. – 640 с.
4. Мотовилов, В.А. Анализ математической модели плазмотрона для нанесения покрытий [Текст] / В.А. Мотовилов //Прогрессивные процессы сварки и напыле-

ния покрытий в производстве летательных аппаратов: сборник научных трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1987. – С. 55-64.

5. Китаев, Ф.И. Свойства покрытий при плазменном напылении терморегулирующего никель-алюминиевого порошка [Текст] / Ф.И. Китаев, А.Г. Цидулко, Г.Д. Никифоров // В кн.: Защитные покрытия на металлах – Киев: 1974. – вып.8. – С. 167-172.

6. Ващенко, В.В. Плакирование порошков тугоплавких соединений методами химического осаждения [Текст] / В.В. Ващенко, О.Н. Голубев, А.Г. Цидулко. // В кн.: Температуростойчивые покрытия. – Л.: Наука, 1985. – С.131-134.

7. Цидулко, А.Г. Плазменные покрытия из плакированных порошков [Текст] / А.Г. Цидулко, В.В. Ващенко, О.Н. Голубев и др. // В кн.: Температуростойчивые покрытия. – Л.: Наука, 1985. – С.135-138.

8. Сивиркин, Ф.Д. Теоретическое и экспериментальное исследование турбулентной плазменной струи [Текст] / Ф.Д. Сивиркин, Н.М. Рогачев // Инж.-физ. Журнал. – 1969. – Т.17. – №3. – С.437-446.

9. Китаев, Ф.И. О скорости частиц напыляемого материала в плазменной струе [Текст] / Ф.И. Китаев, Ю.Г. Лекарев // Вопросы технологии производства летательных аппаратов: Труды Куйбышевского авиационного института. – Куйбышев. – 1970. – вып.41. – С.124-134.

10. Барвинок, В.А. Определение остаточных напряжений в покрытиях плазменного напыления [Текст] / В.А. Барвинок, Л.И. Борисов, В.Г. Фокин // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1974. – №5. – С.115-119.

11. Барвинок, В.А. Определение упругих характеристик плазменных покрытий акустическим методом [Текст] / В.А. Барвинок // Изв. ВУЗов, Машиностроение. – 1980. – №6. – С.90-103.

12. Барвинок, В.А. Определение остаточных напряжений в многослойных кольцах [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Г.М. Козлов // Изв. ВУЗ: Машиностроение. – 1980. – №4 – С.31-35.

13. Барвинок, В.А. Определение остаточных напряжений в напыленных покрытиях [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович // Изв. ВУЗ: Машиностроение. – 1981. – №9. – С.100-103.

14. Barvinok, V.A. Application of nanopowders in the thermal spraying technology of protective coating [Текст] / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich // Book of abstracts. Advanced research workshop NATO-Russia “Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened Coatings”. – 2003. – Decem. 8-10. – P.7.

References

1. Barvinok, V.A. Management of a tension and properties of plasma coverings [Text]: monograph / V.A. Barvinok. – M.: Mechanical engineering, 1990. – 384 p.

2. Barvinok, V.A. Mathematical modelling and the physicist of processes of putting of plasma coverings from the composite plated powders [Text]: monograph / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, I.A. Dokukina, A.N. Plotnikov – M.: The international centre of the scientific and technical information, 1998. – 96 p.

3. Barvinok, V.A. Highly effective technological processes in manufacture of blades of turbines and combustion chambers of gas turbine engines [Text]: the monograph under edition of the Corresponding Member of the RAS V.A. Barvinok / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, I.A. Dokukina. – M.: Science and technologies, 2004. – 640 p.

4. Motovilov, V.A. The analysis of mathematical model of plasmatrone for drawing of coverings [Text] / V.A. Motovilov // Progressive processes of welding and spraying of coverings in manufacture of aircrafts: the collection of scientific works. – Kuibyshev: KuAI, 1987. – P. 55-64.

5. Kitaev, F.I. Properties of coverings at a plasma spraying of a powder thermoreacting nickel-aluminium [Text] / F.I. Kitaev, A.G. Cidulko, G.D. Nikiforov // Protective coatings on metals – Kiev: 1974. – Publication 8. – P. 167-172.

6. Vashenko, V.V. Cladding of powders of refractory combination by methods of chemical sedimentation [Text] / V.V. Vashenko, O.N. Golubev, A.G. Cidulko // Temperature resistance coverings. – L.: Science, 1985. – P.131-134.

7. Cidulko, A.G. Plasma coverings from the plated powders [Text] / A.G. Cidulko, V.V. Vashenko, O.N. Golubev and others // Temperature resistance coverings. – L.: Science, 1985. – P.135-138.

8. Sivirkin, F.D. Theoretical and an experimental research of a turbulent plasma stream [Text] / F.D. Sivirkin, N.M. Rogachev // Engineering-physical Magazine. - 1969. - V.17. - №3. - P.437-446.

9. Kitaev, F.I. About speed of particles of evaporation material in plasma jet [Text] / F.I. Kitaev, U.G. Lekarev // Questions of the technology of aircraft manufacture: Works of Kuibyshev aviation institute. – Kuibyshev. - 1970. – Publication 41. – P.124-134.

10. Barvinok, V.A. Definition of residual pressure in coverings of a plasma spraying [Text] / V.A. Barvinok, L.I. Borisov, V.G. Fokin // News HIGH SCHOOL: Mechanical engineering. - 1974. - №5. – P.115-119.

11. Barvinok, V.A. Definition of elastic characteristics of plasma coverings by an acoustic method [Text] / V.A. Barvinok // News HIGH

SCHOOL: Mechanical engineering. - 1980. - №6. – P.90-103.

12. Barvinok, V.A. Definition of residual pressure in multilayered rings [Text] / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, G.M. Kozlov // News HIGH SCHOOL: Mechanical engineering. - 1980. – №4 – P.31-35.

13. Barvinok, V.A. Definition of residual pressure in the spraying coverings [Text] / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich // News HIGH SCHOOL: Mechanical engineering. - 1981. – №9. – P.100-103.

14. Barvinok, V.A. Application of nanopowders in the thermal spraying technology of protective coating [Text] / V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich // Book of abstracts. Advanced research workshop NATO-Russia “Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened Coatings”. – 2003. – Decem. 8-10. – P.7.

WEARABILITY, WEARPROOF AND HEAT-SHIELDING COVERINGS FOR DETAILS OF THE GAS PATH OF THE TURBINE, THE COMPRESSOR AND THE CHAMBER OF COMBUSTION OF GAS TURBINE ENGINE

© 2009 V. A. Barvinok¹, I. L. Shitarev¹, V. I. Bogdanovich¹, I. A. Dokukina¹, V. M. Karasev²

¹Samara State Aerospace University

²“Metallist-Samara”

The basic laws and features of plotting of wearability, wearproof and heat-resisting coverings on a detail of a gas path of the turbine, the compressor and the combustion chamber of gas turbine engine by gas-thermal plasma and ionic-plasma vacuum methods are considered. The basic updates and elements of modernisation of the equipment for gas-thermal and an ionic-plasma vacuum method are shown. For calculation of the temperatures, flowing and residual pressure real cases and receptions at spraying are considered.

Gas-thermal spraying, ionic-plasma vacuum spraying, wearability, wearproof, heat-resisting coverings, equipment, modernization, gas turbine engine, temperature, flowing pressure, residual pressure

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: barvinok@ssau.ru. Область научных интересов: физика плазмы, математическое моделирование, тепловые процессы, деформационные процессы, газотермическое напыление, вакуумное напыление, надежность, ресурс, авиакосмическая техника.

Шитарев Игорь Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: pdla@ssau.ru. Область научных интересов: двигателестроение.

Богданович Валерий Иосифович – доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Область научных интересов: плазма, плазменные покрытия, скорость реакций, упорядоченные структуры с заданным свойством, гетерогенные процессы, математическое моделирование, надежность.

Докукина Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Область научных интересов: поверхность, плазменные покрытия, структура и свойства покрытий.

Карасёв Вячеслав Михайлович - исполнительный директор ОАО «Металлист-Самара». E-mail: ms@sama.ru. Область научных интересов – двигателестроение.

Barvinok Vitaly Alekseevich - Corresponding Member of the RAS, DSc, professor, chief of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering at Samara State Aerospace University, barvinok@ssau.ru. Area of research: Physics of plasma, mathematical modelling, thermal processes, deformation processes, gas-thermal spraying, vacuum spraying, reliability, a resource, the avia-space technics.

Shitarev Igor Leonidovich - DSc, professor, chief of the Department of aircraft engines manufacture at Samara State Aerospace University. E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: propulsion engineering.

Bogdanovich Valery Iosifovich - DSc, professor of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering at Samara State Aerospace University, bogdanovich@ssau.ru. Area of research: plasma, plasma coverings, speed of the reactions, the ordered structures with the set property, heterogeneous processes, mathematical modelling, reliability.

Dokukina Irina Aleksandrovna - PhD, associate professor of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering at Samara State Aerospace University, bogdanovich@ssau.ru. Area of research: surface, plasma coating, structure and characteristics coating.

Karasev Vyacheslav Mihailovich - The chief executive of Public Corporation “Metallist-Samara”. E-mail: ms@sama.ru. Area of research: propulsion engineering.