

**СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ И АНТИОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ  
И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТОЙКОСТИ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ**

**Г.В. Ермалаев, О.Б. Ковалев, В.М. Фомин, С.П. Ващенко,  
В.И. Кузьмин, А.Н. Шиплюк**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, Новосибирск, Россия*

Из всех существующих, на сегодняшний день, методов газотермического напыления термобарьерных покрытий наиболее предпочтительным является плазменное напыление, что подтверждается мировым опытом нанесения порошковых керамических материалов.

В ИТПМ СО РАН разработаны и прошли промышленные испытания самые современные, на сегодняшний день, генераторы термической плазмы (плазмотроны). Применение линейной схемы с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) в конструкции плазмотронов позволило обеспечить, хорошую осевую симметрию плазменной струи, минимальный уровень пульсаций рабочих параметров, высокую температуру и удельную энтальпию плазменной струи. Оснащение плазмотронов узлом кольцевого ввода с газодинамической фокусировкой порошка обеспечивает стабильное гарантированное проплавление частиц любых, в том числе керамических, материалов.

В качестве плазмообразующего газа для напыления, как керамики, так и металлов используется воздух с небольшим добавлением пропана, что существенно удешевляет технологию и сокращает срок окупаемости оборудования. Возможность работы на технически чистых газах, при технологической необходимости для конкретного процесса сохранена.

Указанные особенности установки позволяют производить нанесение различных покрытий с уникальными свойствами. Например, пористость керамических и металлических покрытий может составлять менее 1% (стандартные покрытия, получаемые плазменным напылением, имеют, по данным разных источников, пористость 8-15%). Реализованы режимы напыления, позволяющие существенно повысить твердость покрытий по сравнению с паспортными данными исходного порошкового материала.

Из различных керамических материалов, которые используются в качестве теплового барьера, необходимо выделить оксид алюминия и оксид циркония. Наилучшими характеристиками для термобарьерных покрытий обладает керамическое покрытие из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ).

К настоящему времени в институте выполнен цикл работ по созданию термобарьерных покрытий с высоким комплексом физико-механических свойств методом атмосферного воздушно-плазменного напыления вышеуказанных керамических порошковых материалов.

В ИТПМ СО РАН создан экспериментальный стенд для разработки и испытаний генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов), а также для проведения исследований взаимодействия потоков плазмы с веществом и материалами различного назначения. Стенд оснащён электродуговыми плазмотронами постоянного тока, которые со-

здают высокую концентрацию энергии в малом объёме, обеспечивают стабильность параметров плазменных потоков, и одновременно обладают простой и удобной в эксплуатации схемой электропитания.

Плазмотроны выполнены по линейной схеме и рассчитаны на работу в турбулентном, переходном и ламинарном режимах истечения плазменных струй, что позволяет с высокой эффективностью проводить термообработку как монолитных, так и дисперсных материалов. В частности, к.п.д. нагрева поверхности при натекании ламинарной струи воздушной плазмы на нормально установленную преграду может превышать 90 %.

В состав плазменного стенда входят плазмотроны с номинальной мощностью от 2 кВт до 4,8 МВт. Рабочие давления в плазменных каналах плазмотронов составляют от до 50 атм. Мощность плазменных струй лежит в диапазоне 1,4 кВт – 3,8 МВт. Средне-массовая температура в потоке воздушной плазмы на срезе сопла регулируется в диапазоне 700 – 7000 К. Расходы плазмообразующего газа от 0,5 г/с до 5 кг/с.

В качестве плазмообразующего газа могут быть использованы воздух, смесь воздуха с газообразными углеводородами (продукты сгорания углеводородов), азот, аргон, кислород, водяной пар, и т.д. В случае необходимости может быть обеспечен нагрев водорода и гелия. Энергетические, газодинамические и расходные характеристики стенда позволяют исследовать стойкость материалов и покрытий аэрокосмического назначения, узлов и деталей ЛА в условиях близких к полетным.

В настоящее время проведена реконструкция стенда с расширением его возможностей в части исследований стойкости конструкционных материалов в высоконапорных потоках нагретого газа, в том числе термической плазмы.