

ПОЛЕТ

11

2002

*Scientific and technical
journal "Polyot" ("Flight")*



**Недайвода**

Анатолий Константинович – генеральный конструктор КБ "Салют" ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, заместитель генерального директора ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, действительный член Международной академии астронавтики, заслуженный деятель науки РФ, профессор, доктор техн. наук

**Бахвалов**

Юрий Олегович – заместитель генерального конструктора КБ "Салют" ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

**Михеев**

Владимир Иванович – ведущий специалист КБ "Салют" ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

**Половцев**

Валентин Андреевич – начальник комплекса КБ "Салют" ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, кандидат техн. наук

УДК 629.7.023.2

А.К. Недайвода, Ю.О. Бахвалов, В.И. Михеев, В.А. Половцев

Композитные покрытия в космической технике, получаемые "холодным" газодинамическим напылением

В статье представлены результаты отработки и внедрения технологии газодинамического нанесения металлокерамического высокотемпературного теплоизлучающего (коэффициент теплового излучения $\epsilon \geq 0,75$) покрытия на защитные экраны из нержавеющей стали 12X18H10T и герметизирующего покрытия на микротечи сварных соединений топливных баков ракетно-космической техники. Показана принципиальная возможность герметизации кольцевых стыков из разнородных материалов.

A.K. Nedayvoda, Yu.O. Bakhvalov, V.I. Mikheyev, V.A. Polovtzev. Composite Coatings Produced By "Cold" Gas Dynamic Spraying For Space Technology

This article presents the results of test and implementation of technique of gas dynamic spraying of metal ceramic high-temperature heat radiating ($\epsilon \geq 0,75$) coating onto protection shields of stainless steel 12X18H10T and sealing coatings onto micro-leaks in welded joints of space technology fuel tanks and shows the principle possibility to seal annular joints of dissimilar materials.

Нанесение металлических и металлокерамических покрытий широко используется в различных отраслях промышленности для получения на поверхностях деталей из различных материалов специальных свойств. В настоящее время разработано

множество различных способов нанесения покрытий. Они имеют как преимущества, так и недостатки и в силу этого свои области применения. В таких известных способах нанесения покрытий, как газопламенный, плазменный, электродуговой, дестонационный, использу-

ют высокотемпературные двухфазные потоки, что приводит к плавлению частиц напыляемых порошков и их взаимодействию с газовой средой с образованием различных соединений (окислов, нитридов и т.п.), вызывающих в ряде случаев нежелательное изменение исходных свойств порошков и самого покрытия. К существенным недостаткам этих способов следует также отнести значительный разогрев деталей и их деформацию, вызванную высокими остаточными напряжениями, недостаточную прочность сцепления частиц между собой и с подложкой, высокую пористость получаемого покрытия, использование взрывоопасных газов, сложность в обслуживании оборудования, высокую стоимость оборудования и т.п. Использование "холодного" газодинамического способа нанесения покрытий [1] позволяет избежать перечисленных недостатков.

Газодинамический метод нанесения покрытий является относительно новым и в настоящее время начинает внедряться в производственную практику, находя все новые и новые области применения. Метод заключается в нанесении на обрабатываемую поверхность порошков металлов или их смесей с керамическими порошками, ускоренных с помощью сверхзвукового газового потока, который создается подачей газа высокого давления на вход сверхзвукового сопла. Для ускорения частиц можно использовать различные сжатые газы. В рассматриваемом в статье случае использовался сжатый воздух как наиболее дешевый газ. Для увеличения скорости воздушного потока, а значит и скорости частиц порошка, подводящий воздух в напылительном блоке подогревался до определенных температур (423...573 К). При столкновении частиц порошка, обладающих высокой кинематической энергией, с поверхностью детали происходит их внедрение в поверхность детали, а также интенсивная взаимная активация поверхностей частиц порошка и поверхности обрабатываемой детали, что обеспечивает их плотный физический контакт. Вероятность внедрения отдельной частицы в поверхность обрабатываемой детали увеличивается с ростом ее скорости. Поэтому в газодинамическом методе для ускорения частиц порошка используются сверхзвуковые потоки газа. Внедрившиеся в поверхность детали частицы, подвергаясь ударам последующих частиц, вбиваются в подложку и претерпевают дополнительную пластическую деформацию. Таким образом, формируется слой, который имеет плотную структуру из сильно деформированных и внедренных в поверхность подложки частиц, обладающих высокой адгезией с ней. Использование смесей порошков металлов с высокопрочными керамическими материалами обеспечивает наряду с напылением покрытия повышенной прочности подготовку поверхности подложки путем ее абразивной обработки высокопрочными частями смеси. Присутствие в смеси порошков твердых частиц в полтора-два раза увеличивает прочность сцепления покрытия с подложкой, а также обеспечивает значительную деформацию и

эффективное уплотнение пластичного компонента более твердым компонентом.

Развитие современной техники, и в особенности авиакосмической, ставит все новые требования к покрытиям, условиям их нанесения и применения.

В статье представлены результаты работы, проведенной КБ "Салют" Государственного космического научно-производственного центра им. М.В. Хруничева совместно с Обнинским центром порошкового напыления, по использованию нового способа нанесения покрытий для решения следующих конкретных задач:

- разработка технологии нанесения термостойкого теплоизлучающего покрытия на защитные экраны из нержавеющей стали с коэффициентом теплоизлучения $\epsilon \geq 0,7$;
- разработка технологии герметизации ("залечивания") микротрещин в сварных швах топливных баков, изготавливаемых из алюминиевых сплавов;
- исследование возможности герметизации соединения деталей из разнородных материалов;
- разработка технологии ремонта поверхностных дефектов (раковин) на литых деталях, забони и т.п. и восстановления размеров для деталей из алюминиевых сплавов.

Отработка технологии нанесения различных покрытий производилась на опытно-промышленных установках для газодинамического напыления ДИМЕТ-200 и ДИМЕТ-401 (рис. 1).

Основные технические характеристики установок ДИМЕТ-200 и ДИМЕТ-401

	ДИМЕТ-200	ДИМЕТ-401
Параметры подводящего к установке воздуха:		
давление, кг/см ²	4,5...16	5...10
максимальный расход, м ³ /мин	1,5	0,5
Параметры воздуха в установке:		
рабочее давление, кг/см ²	4...6	5...7
максимальная температура нагрева, К	573	573
Производительность по порошку, г/с		
До 1,1	До 1,1	До 0,2
Габаритные размеры установки, мм:		
длина	850	485
ширина	500	630
высота	1500	1290
Масса установки, кг	=40	=30
Масса напылительного блока, кг		
=5	=5	=1,2
Уровень шума, дБ		
До 80	До 80	До 80
Максимальная потребляемая мощность, кВт		
8	8	1,5

Для повышения защитных характеристик экранов в процессе их эксплуатации в космосе и снижения трудоемкости изготовления разрабатывались технологии нанесения теплоизлучающего покрытия на экраны из нержавеющей стали 12Х18Н10Т методом газодинамического напыления. Поскольку экраны во время работы контактируют с высокотемпературным газовым потоком корректирующего двигателя космического аппарата и нагреваются до температуры около 1300 К, необходима их защита с помощью теплоизлучающих



а)



б)

Рис. 1. Установки для "холодного" газодинамического напыления:
а – "ДИМЕТ-200"; б – "ДИМЕТ-401"

покрытий, которые должны обеспечивать высокий коэффициент теплоизлучения ($\epsilon \geq 0,7$) при указанной температуре и иметь прочное сцепление с основой. До настоящего времени для нанесения теплоизлучающих покрытий на защитные экраны изделий предприятия использовался в основном плазменный метод. Однако покрытия, получаемые этим методом, имели низкие пластичность и адгезию, и при сборке конструкции, которая осуществлялась с использованием клепки, достаточно часто имели место случаи отслаивания покрытия. А это приводило к дополнительным сложностям при ремонте тепловых экранов. Кроме того, плазменный метод нанесения покрытий весьма чувствителен даже к незначительным отклонениям от требуемых технологических параметров процесса, дорогостоящ, требует высокой квалификации работающего персонала.

Были изготовлены и исследованы покрытия более 10 различных типов с составами на основе порошков Ti, TiN, TiC, SiC, ZrO₂ и др. Измерение коэффициента теплового излучения ϵ осуществлялось с помощью терморадиметра модели ТРМ-М. Адгезионная прочность контролировалась методом изгибания образца с нанесенным покрытием на 90° с радиусомгиба 5 мм с последующим разгибом. Проведенные эксперименты показали, что наибольший коэффициент теплового излучения ($\epsilon = 0,7...0,78$) имели образцы с покрытием из

смеси порошков ZrO₂ и SiC в соотношении 1:1 [2]. Натурные тепловые экраны из нержавеющей стали 12X18Н10Т с теплоизлучающим покрытием на основе порошков ZrO₂ и SiC показаны на рис. 2.

Другая важная проблема, решенная с использованием газодинамического напыления, – герметизация сварных швов на алюминиевых топливных баках ракет-

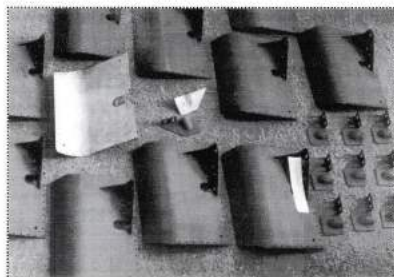


Рис. 2. Защитные экраны из нержавеющей стали 12X18Н10Т с теплоизлучающим покрытием на основе керамических порошков SiC и ZrO₂



Рис. 3. Микроструктура образца из алюминиевого сплава АМг6 с искусственной микротрещиной и напыленным на нее герметизирующим композитным покрытием Al-SiC ($\times 200$)

носителей. В процессе изготовления сваркой герметичных емкостей из алюминиевых сплавов периодически возникают проблемы устранения микротрещин в зоне сварных швов, которое до последнего времени осуществлялось подваркой. Однако алюминиевые сплавы и в особенности термоупрочняемые сплавы типа 1201 обладают низкой ремонтной способностью и допускают не более двух подварок, так как каждая подварка сопряжена со значительным тепловложением, что приводит к изменению структуры, снижению механических свойств, коррозионной стойкости и других свойств материала.

При отработке технологии герметизации микротрещин газодинамическим напылением производили нанесение герметизирующего композитного слоя на основе алюминия на специальные образцы с искусственно полученными электроэрозионным прожиганием сквозными дефектами диаметрами 80...100 мкм. В процессе отработки варьировались состав рабочего порошка, режим его предварительной термообработки,



Рис. 4. Образцы для определения прочностных характеристик порошковых покрытий

температура рабочего газа (воздуха) и другие параметры газодинамического напыления. После нанесения герметизирующего слоя разной толщины образцы на специальном стенде методом "шупа" испытывались на герметичность воздушно-тепловой смесью при избыточном давлении от 15 до 150 атм. В результате проведенных исследований были установлены оптимальная толщина слоя (1,0...1,5 мм) и состав композитного покрытия на основе порошков алюминия и металлокерамики (SiC или Al_2O_3), позволяющие надежно герметизировать микротрещины [4]. Образцы также испытывались на герметичность после проведения термоциклирования (5 циклов) по режиму 293 К - 373 К - 293 К - 77 К - 293 К ... с выдержкой при каждой температуре в течение 1 ч. Негерметичности в местах расположения искусственных микротрещин после напыления покрытия при чувствительности схемы испытаний 10^{-5} л·ммк рт.ст./с не выявлено. Микроструктура образца с искусственной микротрещиной и напыленным на нее герметизирующим покрытием представлена на рис. 3.

Исследование прочностных характеристик разработанного покрытия с подложками из алюминиевых сплавов АМг6, 1201 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т и самого покрытия проводили на специальных составных образцах (рис. 4) при нормальной и криогенной (77 К) температурах, а также после термоциклирования по указанному выше режиму с использованием методики руководства, разработанного Всероссийским институтом авиационных материалов [3]. Рабочие поверхности образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т перед нанесением покрытия оптимального состава подвергались предварительной обработке высокодисперсным корундом. Процесс нанесения покрытия на образцы показан на рис. 5. Результаты исследований прочности герметизирующего покрытия и прочности сцепления его с подложкой (τ -предел прочности сдвига покрытия относительно подложки, σ -предел прочности отрыва покрытия от подложки) представлены в таблице.

Материал подложки	Условия проведения испытаний	Прочность, МПа		
		на разрыв σ_b	на сдвиг τ	на отрыв $\sigma_{отр}$
Алюминиевые сплавы АМг6, 1201	293 К	82	53	55
	77 К	170	90	91
	После термоциклирования	88	55	64
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	293 К	88	57	50
	77 К	160	127	96
	После термоциклирования	85	76	59

Из таблицы видно, что после проведения термоциклирования происходит незначительное увеличение проч-

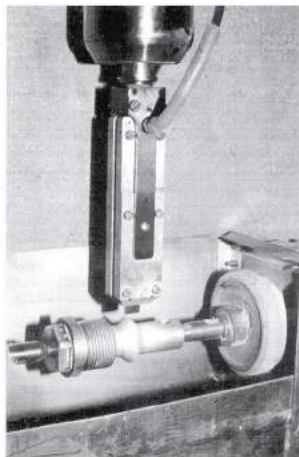


Рис. 5. Процесс нанесения герметизирующего покрытия на образец для определения прочностных характеристик

ностных характеристик, что можно объяснить снижением внутренних напряжений, и при криогенной температуре в 2 раза повышается прочность. Металлографические и электронно-микроскопические исследования зон разрушения образцов при механических испытаниях показывают, что разрушение носит адгезионный характер. А это свидетельствует о качественной связи покрытия с подложкой.

При измерении температуры подложки в зоне нанесения было установлено, что она не поднималась выше 373 К. Это гарантировало отсутствие изменений



Рис. 6. Микроструктура границы раздела герметизирующего композиционного покрытия Al-SiC и подложки из алюминиевого сплава (~ 850)



Рис. 7. Процесс нанесения герметизирующего покрытия на микротечь в сварном соединении топливного бака разгонного блока ракеты-носителя

в структуре материала, что подтверждено металлографическими и электронно-микроскопическими исследованиями. При оптимальных параметрах режима нанесения соединения герметизирующего слоя с подложкой плотное, дефекты в виде трещин и расслоений отсутствовали (рис. 6).

Положительные результаты, полученные при разработке состава герметизирующего порошкового покрытия, отработке режимов нанесения и исследовании его свойств, позволили разработать серийную технологию герметизации ("залечивания") микротечей в сварных соединениях топливных баков диаметром 3000 мм для разгонных блоков ракет-носителей, а также технологию ремонта дефектных мест на деталях из алюминиевых сплавов методом "холодного" газодинамического нанесения с использованием специально разработанных малогабаритных ручных напылительных блоков и пылезащитных камер [4]. Работоспособность герметизирующих покрытий на микротечах в сварных соединениях топливных баков подтверждена, она сохранялась после многократных (до 8 раз) нагружений внутренним давлением до 2,6...3,1 атм при опрессовках, до 1,7...2,1 атм при испытаниях на герметичность в процессе изготовления, а также после криогенных испытаний жидким азотом и криогенных моек. Процесс нанесения герметизирующего слоя на микротечь в сварном соединении на топливном баке



а)



б)

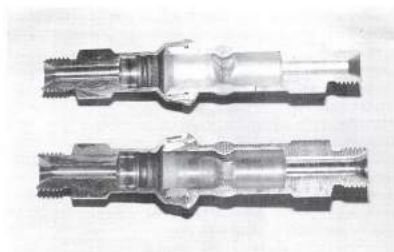
Рис. 8. Дефектное место в виде раковины на детали из алюминиевого сплава:

а – до ремонта; б – после ремонта

разгонного блока ракеты-носителя с использованием малогабаритного напылительного блока и локальной пылезащитной камеры показан на рис. 7.

Была также отработана технология ремонта поверхностных дефектов и восстановления размеров деталей из алюминиевых сплавов. На рис. 8 показан дефект в виде раковины на детали из алюминиевого сплава до и после ремонта.

Исследования по установлению возможности герметизации кольцевых стыков из разнородных материалов проводились на цилиндрических трубчатых образцах, которые состояли из двух частей (алюминиевой и стальной), соединенных между собой внутренней резьбой. Резьбовое соединение обеспечивает прочное механическое скрепление двух частей, но не обеспечивает герметичности их стыка. При отработке способа герметизации таких стыков использовалась, как и в случае герметизации микротечей, композиционная смесь порошков на основе алюминия и карбида кремния. Для нанесения герметизирующего слоя образцы устанавливались перед сопловым блоком на специальное



а)



б)

Рис. 9. Экспериментальные образцы с резьбовым соединением из разнородных материалов (сталь 12Х18Н10Т – алюминиевый сплав АМг6) с герметизирующим покрытием по кольцевому стыку:

а – разрезты образцов; б – образцы после испытания внутренним давлением до разрушения

устройство, которое обеспечивало их вращение. Сопловый блок напылительной установки осуществлял возвратно-поступательное движение вдоль оси образца. Герметизирующий слой наносился как с наружной, так и с внутренней стороны стыка. Следует отметить, что возможность нанесения герметизирующего слоя на внутренний стык зависит от внутреннего диаметра и конструкции стыка. Ширина наружного герметизирующего слоя составляла около 10 мм, а толщина – 1,5...2,5 мм [5]. После нанесения герметизирующего покрытия образцы подвергались испытаниям для определения герметичности методом "шупа" воздушной смесью при избыточном давлении. Негерметичности в местах напыления при чувствительности схемы испытания 10^{-3} л·мкм рт.ст./с не выявлено. На рис. 9 показаны образцы с внутренним диаметром $d_{вн} = 14$ мм после испытания до разрушения внутренним давлением, которое составило для данных образцов 150 атм.

Положительные предварительные результаты по герметизации соединения деталей из разнородных

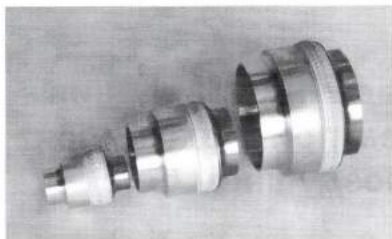


Рис. 10. Экспериментальные образцы биметаллических переходников (сталь 12Х18Н10Т – алюминиевый сплав АМг6) с d_1 , равным 14; 30 и 50 мм, полученные с использованием газодинамического напыления

материалов (сталь – алюминий) позволяют заключить, что рассмотренный способ может найти широкое применение при изготовлении биметаллических переходников, которые используются для соединения сваркой трубопроводов из разнородных материалов, не свариваемых между собой традиционными видами сварки. Биметаллические переходники композиции сталь–алюминиевый сплав, полученные с использованием метода газодинамического напыления, показаны на рис. 10.

В заключение следует отметить, что разработанные и внедренные на предприятии технологии и оборудование для нанесения различных покрытий методом "холодного" газодинамического напыления позволили в 2...3 раза снизить трудоемкость и в 3...4 раза уменьшить цикл ремонта топливных баков, повысить качество и надежность теплоизоляционных покрытий на защитных экранах изделий космического назначения, а также наметить пути разработки новых технологий нанесения различных антикоррозионных покрытий на основе алюминия, цинка и т.п., а также медных покрытий, покрытий для ремонта поверхностных дефектов на литых деталях из алюминиевых сплавов.

Список литературы

1. Алехнов А.П., Косарев В.Ф., Пашурин А.Н. Метод "холодного" газодинамического напыления: Докл. / АН СССР. 1990. Том 315. № 5. С. 1062–1065.
2. Способ повышения теплоизлучательной способности нержавеющей стали / А.И. Каширин, О.Ф. Клюев, Т.В. Булдыгар, В.И. Михеев, В.Н. Косолапов. Патент РФ № 2104326, 1996 г.
3. Определение свойств газотермических покрытий / Методическое руководство МР1. 595-27-001-93, Под ред. Б.М. Захарова, В.Н. Новикова. М.: Изд-е ВИАМ, 1993. 90 с.
4. Способ восстановления изделий / А.К. Недайвода, В.И. Михеев, В.Н. Косолапов, В.А. Половцев, А.В. Школкин, А.И. Каширин, О.Ф. Клюев, Е.А. Перминов: Патент РФ № 2166421, 1999 г.
5. Трубоэталый биметаллический переходник и способ его изготовления / А.К. Недайвода, А.В. Кондратов, В.И. Михеев, В.Н. Косолапов, Е.А. Перминов, В.А. Половцев: Патент РФ № 2156911, 1998 г.