

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ХОЛОДНОГО» ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО КОНТАКТА МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ

© 2014 г. Басов А.А.¹, Клочкова М.А.¹, Махин И.Д.²

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва» (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070, e-mail: post@rsce.ru

² ЗАО «Завод экспериментального машиностроения»
РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» (ЗАО «ЗЭМ»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070, e-mail: post@rsce.ru

В работе рассмотрена задача обеспечения теплового контакта между элементами конструкции на примере тепловых труб узлового модуля Российского сегмента Международной космической станции. Описана технология «холодного» газодинамического напыления теплопроводного порошкового материала между трубой и корпусом. На пяти экспериментальных образцах рассмотрены различные схемы расположения теплопроводных швов. Описан порядок экспериментального исследования образцов. Приведены результаты экспериментального исследования. Проведен анализ стойкости порошкового слоя при использовании различных схем. Проведено сравнение значения интегральной характеристики теплопередачи для порошкового слоя с аналогичной величиной, полученной для одного из теплопроводных клеев — клея-герметика марки «Эласил». Показана возможность использования «холодного» газодинамического напыления теплопроводного порошкового материала для обеспечения теплового контакта между элементами конструкции.

Ключевые слова: тепловой контакт, газодинамическое напыление, порошковый материал.

ON THE FEASIBILITY OF USING «COLD» GAS DYNAMIC SPRAYING OF A HEAT-CONDUCTING POWDER TO PROVIDE THERMAL CONTACT BETWEEN STRUCTURAL ELEMENTS

Basov A.A.¹, Klochkova M.A.¹, Makhin I.D.²

¹ S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia, e-mail: post@rsce.ru

² Closed Joint-Stock Company Experimental Machinebuilding Plant
of S.P. Korolev RSC Energia (CJSC EMP)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia, e-mail: post@rsce.ru

The paper discusses the problem of providing thermal contact between structural elements using the heat pipes in the node module of the Russian Segment of the International Space Station as an example. It describes the process for gas dynamic spraying of a heat-conducting powder between the pipe and the primary structure. Illustrated by five experimental samples are various layouts for heat-conducting joints. It describes the procedure for experimental study of the samples. It provides the results of the experimental study. Powder layer durability with the use of different layouts was analyzed. It compares an integral characteristic of heat transfer for the powder layer with a similar value obtained for a heat conductive adhesive – adhesive sealant Elasil. It demonstrates the feasibility of using gas dynamic spraying of a heat-conducting powder to provide thermal contact between structural elements.

Key words: thermal contact, gas dynamic spraying, powder material.



БАСОВ А.А.



КЛОЧКОВА М.А.



МАХИН И.Д.

БАСОВ Андрей Александрович – начальник отделения систем терморегулирования РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru

BASOV Andrey Alexandrovich – Head of thermal control systems Division at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

КЛОЧКОВА Мария Александровна – ведущий инженер-математик отдела теплового проектирования РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru

KLOCHKOVA Maria Alexandrovna – Lead mathematical engineer of thermal design department at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

МАХИН Игорь Дмитриевич – главный сварщик ЗАО «ЗЭМ», e-mail: post@rsce.ru

MAKHIN Igor Dmitrievich – Chief Welder of CJSC EMP, e-mail: post@rsce.ru

Введение

Задача обеспечения теплового контакта между двумя поверхностями часто встречается при разработке систем обеспечения теплового режима (СОТР) различных изделий. Это, например, контакт между прибором и термостатируемой поверхностью, между двумя звеньями цепочки теплопередающих элементов, между теплопередающим элементом и радиационной поверхностью и т. д.

Способы обеспечения теплового контакта можно условно разбить на два типа. К первому относятся способы, обеспечивающие точечный тепловой контакт, например, сварное или болтовое соединения. В таких случаях получение хорошего теплового контакта обусловлено в т. ч. высокой теплопроводностью материалов (в данном случае металлов), которые используются для соединения. Однако при необходимости обеспечения хорошей тепловой связи между двумя поверхностями относительно большой площади используются способы второго типа, такие как клеевое соединение, применение различных теплопроводящих прокладок и др. При этом теплопроводящие прокладки или пасты используются в сочетании с некоторым набором силовых элементов, которые при этом не решают задачу обеспечения теплового контакта. Недостатком способов второго типа является низкая теплопроводность используемых материалов – более чем в 50 раз ниже по сравнению, например, с теплопроводностью алюминия.

Задача обеспечения теплового контакта между корпусом узлового модуля и тепловой трубой

Подобная задача решалась в ходе разработки системы обеспечения теплового режима узлового модуля (УМ).

Узловой модуль, имеющий шесть стыковочных портов, должен быть доставлен к Международной космической станции (МКС) и пристыкован к надирному порту многоцелевого лабораторного модуля в качестве многоцелевого адаптера для модулей Российского сегмента МКС следующего поколения. Модуль с герметичным объемом 19 м³ и усовершенствованной системой обеспечения теплового режима имеет сферический корпус диаметром 3,3 м, оснащенный активными и адаптивными стыковочными узлами [1].

На этапе проектирования была выбрана пассивная СОТР, построенная с применением тепловых труб для передачи тепла по корпусу модуля. Форма модуля, близкая к сферической, наличие большого количества элементов, устанавливаемых снаружи модуля, а также определенные с помощью тепловых расчетов оптимальные трассы прокладки тепловых труб обуславливали необходимость использования тепловых труб круглого профиля [2]. В этом случае обеспечение теплового контакта между трубой и корпусом невозможно было осуществить стандартными методами, как для труб Ω -образного профиля.

В качестве одного из возможных вариантов обеспечения необходимого теплового контакта был рассмотрен способ «холодного» газодинамического напыления теплопроводного порошкового материала.

Сущность способа «холодного» газодинамического напыления состоит в том, что металлические частицы, разогнанные потоком газа до скорости 500...1 000 м/с и находящиеся в нерасплавленном состоянии, при столкновении с преградой испытывают сильную деформацию и закрепляются на поверхности, образуя толстое покрытие [3]. В Обнинском центре порошкового напыления (ОЦПН) было разработано специализированное оборудование Димет, предназначенное для ручного и автоматического нанесения ряда металлических покрытий [4].

Подобный способ напыления металлических покрытий широко применяется для проведения ремонтных работ, в частности, для восстановления изношенных или поврежденных участков поверхностей и устранения течи, а также — при нанесении электропроводящих покрытий, создании антикоррозионной защиты, восстановлении подшипников скольжения и т. д. [5].

При работе с УМ было принято решение попытаться использовать порошковый слой в качестве материала для создания поверхностного теплового контакта между корпусом модуля и тепловой трубой. В качестве силовых элементов использовались хомуты, отстоящие друг от друга не более чем на 500 мм.

Образцы для экспериментальных исследований

Для обоснования возможности применения вышеописанного способа было проведено экспериментальное подтверждение стойкости получившейся тепловой прокладки к внешним воздействиям. Также требовалось провести сравнение между различными схемами нанесения порошка.

Для этого были созданы экспериментальные образцы, позволяющие провести проверку на стойкость к статическим и динамическим нагрузкам, характерным для различных этапов эксплуатации УМ.

Образцы представляли собой дюралюминиевые пластины специальной формы с механически закрепленными на них алюминиевыми трубками длиной 520 мм. Зазоры между образующей трубки и поверхностью пластины составляли для разных образцов величину 0,5...2 мм.

Было изготовлено пять образцов.

На образцах № 1, 3, 4, 5 было нанесено теплопроводящее покрытие, создаваемое с помощью порошкового материала на основе алюминия и цинка. Для предотвращения коррозии, обусловленной наличием в покрытии цинка, вся поверхность покрытия обрабатывалась порошковым материалом, состоящим из чистого алюминия. Эта обработка создавала тонкий слой плотного алюминиевого покрытия, не допускающего проникания кислорода к основной массе покрытия.

Образец № 1 содержал семь односторонних швов длиной 50 мм каждый, расположенных вплотную друг к другу. Образец № 3 содержал три двусторонних шва длиной 50 мм каждый с шагом 100 мм. Образец № 4 содержал три двусторонних шва длиной 70 мм каждый с шагом 70 мм. Образец № 5 содержал три односторонних шва длиной 100 мм каждый, расположенных вплотную друг к другу.

Таким образом, сравнение между различными схемами нанесения порошка с точки зрения прочности можно было провести по следующим критериям:

- по длине шва при использовании односторонних швов, расположенных вплотную друг к другу (образцы № 1 и 5);
- по отношению длины шва к шагу между швами при использовании двусторонних швов (образцы № 3 и 4);
- по использованию односторонних или двусторонних швов при равных величинах площади контакта до испытаний (образцы № 3 и 5).

На образце № 2 было нанесено покрытие, обеспечивающее последующую пайку соответствующими припоями. Первый подслоя данного покрытия представляет собой порошковый материал на основе меди и корунда, второй — оловянный припой в виде специального порошкового состава. Данное покрытие было нанесено по всей длине трубы.

Технология нанесения порошка

Газодинамическое напыление порошкового материала осуществлялось на базе ОЦПН.

Для нанесения покрытия использовалось оборудование Димет-404 и пылезащитная камера ПЗК-С5. В качестве источника сжатого воздуха использовалась стационарная трасса ОЦПН. Описание работы оборудования Димет приведено в [6], схема оборудования представлена на рис. 1.

Для нанесения подслоев под пайку использовался автоматизированный комплекс Димет-С5, обеспечивающий автоматическое перемещение напылительного сопла над поверхностью

обрабатываемой детали. Для очистки воздуха рабочей зоны (пылезащитной камеры) использовалось стационарное оборудование ОЦПН.

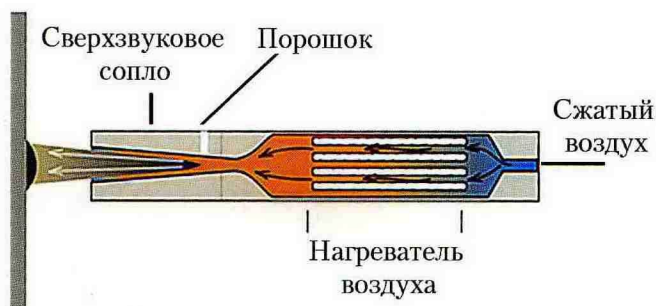


Рис. 1. Схема работы оборудования для «холодного» газодинамического напыления

Обрабатываемая деталь размещалась в пылезащитной камере. Нанесение покрытий осуществлялось ручным способом с учетом влияния формы деталей и их сочетания на аэродинамику напыляющей сверхзвуковой струи. Специальной подготовки для нанесения покрытия не требовалось. На рис. 2 проиллюстрирована особенность нанесения покрытия на участок сопряжения тепловой трубы и пластины.

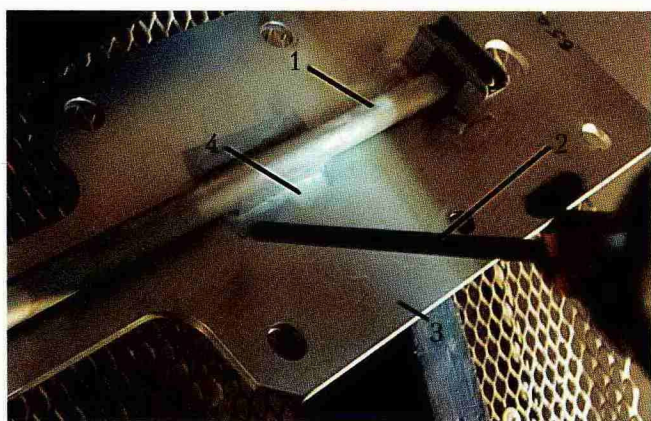


Рис. 2. Нанесение порошкового материала: 1 – тепловая труба; 2 – сопло; 3 – пластина; 4 – слой порошкового материала

Динамические и статические испытания образцов

На базе РКК «Энергия» были проведены динамические и статические испытания образцов.

Динамические испытания включали в себя:

- ударные испытания (2 500 ударов для каждого из осевых направлений, не более 120 ударов в минуту с ускорением 9g);
- вибрационные испытания (спектральные плотности виброускорений 0,002...0,050 g²/Гц в диапазоне частот 20...2 000 Гц, длительность действия до 480 с);

- акустические испытания (суммарный уровень акустического нагружения 146 дБ, длительность действия 120 с).

Статические испытания проводились для максимальных местных эксплуатационных нагрузок, достигаемых при железнодорожном транспортировании. Испытания представляли собой нагружение образцов со скоростью 10 кгс/с растягивающим усилием до величины 2 000 кгс с выдерживанием максимального усилия не менее 120 с.

Результаты экспериментального исследования качества нанесенного порошкового слоя

После динамических испытаний был проведен визуальный осмотр образцов, на основании которого была подтверждена целостность контакта между трубой и пластиной: трещины, отслаивания и разрушения визуально обнаружены не были.

После статических испытаний был также проведен визуальный осмотр, и подтверждена целостность контакта между трубой и пластиной для образцов № 1, 2, 3. В образце № 5 на швах 1 и 3 после снятия нагрузки обнаружены нитевидные трещины (рис. 3, а). В процессе нагружения образца № 4 отмечались характерные потрескивания, и при осмотре выявлены нарушения соединений: при нагрузке 1 500 кгс образовалась сквозная трещина в шве 3, через 5-7 с при нагрузке 1 600 кгс образовалась сквозная трещина в шве 2 (рис. 3, б).

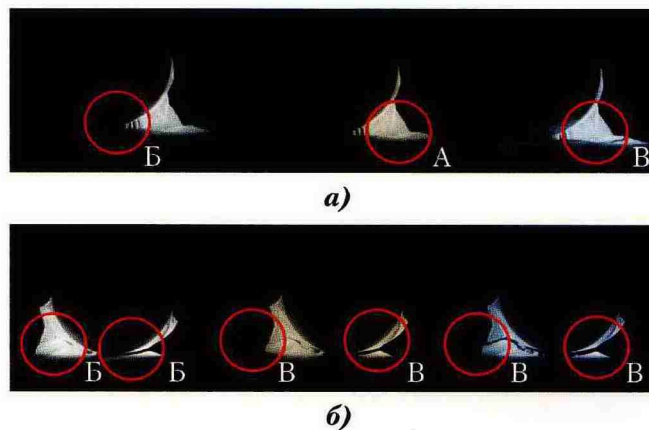


Рис. 3. Поперечное сечение трубы и слоя порошкового материала: а – образец № 5, шов 1; б – образец № 4, шов 3 (слева – вид до испытаний, в центре – вид после динамических испытаний, справа – вид после статических испытаний)

Примечание. А – микротрещина, Б – полость, В – трещина.

На следующем этапе было проведено томографирование образцов на базе ЗАО «ЗЭМ». Каждый образец томографировался отдельно

до испытаний, после динамических испытаний и после статических испытаний. Разрешающая способность полученных томограмм составляет 0,07 мм. К сожалению, результаты томографирования образца № 2 не могли быть проанализированы, поскольку нанесенное покрытие содержит элементы экранирующего вещества.

Томографирование образцов показало наличие трех видов нарушения целостности покрытия: полости, микротрещины (до 0,1 мм) и трещины (от 0,1 мм). На образце № 3 целостность покрытия не нарушена, образец № 1 содержит микротрещину малой длины, образцы № 4, 5 содержат полости, микротрещины и трещины (в т. ч. сквозные на образце № 4).

По результатам томографирования образцов видно, что образование критических трещин на образцах № 4 (швы 1 и 3) и № 5 (шов 1) имеет причиной наличие полостей в напыленном слое, появившихся на этапе нанесения порошка.

Вычисление величины теплового контакта

Каждая схема нанесения порошкового слоя характеризуется следующими величинами:

s_1 , м — длина одного участка порошкового слоя;

s_2 , м — расстояние между участками;

n , шт. — количество участков порошкового слоя;

a , м — ширина участка порошкового слоя;

$F_{ПК}$, м² — суммарная площадь потерянного контакта для образца (данная величина рассчитывается по результатам томографического исследования).

Таблица 1

Результаты томографирования и расчета доли сохраняемого теплового контакта для образцов № 1, 3, 4, 5

Образец	№ 1	№ 3	№ 4	№ 5
Длина шва s_1 , м	0,05	0,05	0,07	0,10
Длина шага между швами s_2 , м	0,00	0,10	0,07	0,00
Количество швов n , шт.	7	3	3	3
Ширина шва $a \cdot 10^3$, м	6,13	12,30	12,30	6,13
$F_{ПК} \cdot 10^3$, м ² (до испытаний)	0,00	0,00	0,04	0,18
$F_{ПК} \cdot 10^3$, м ² (после динамических испытаний)	0,00	0,00	0,42	0,19
$F_{ПК} \cdot 10^3$, м ² (после статических испытаний)	0,03	0,00	2,56	1,20

Значения указанных величин для каждой схемы нанесения порошкового слоя приведены

в табл. 1. В ней также приведены значения площадей потери контакта, вычисленные по результатам томографирования до начала испытаний и после проведения динамических испытаний. Схемы нанесения порошкового материала и результаты томографирования для образцов № 1, 4, 5 представлены на рис. 4.

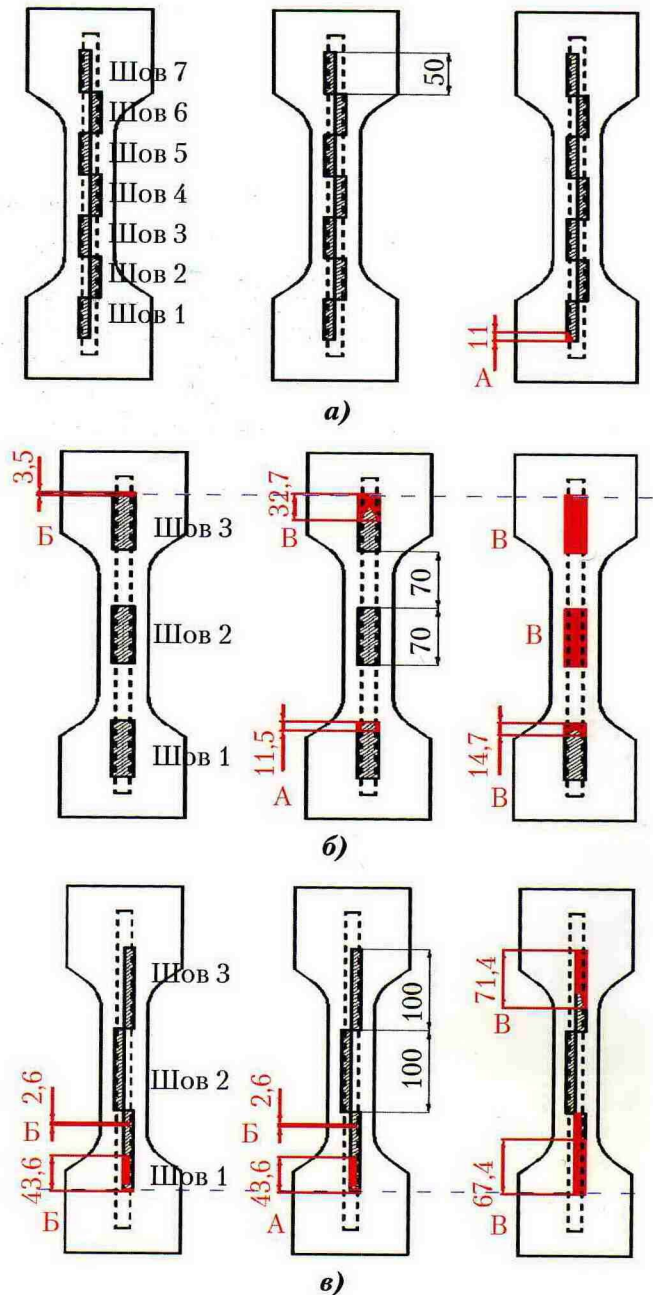


Рис. 4. Результаты томографирования образцов после статических и динамических испытаний: а — образец № 1; б — образец № 4; в — образец № 5 (слева — вид до испытаний, в центре — вид после динамических испытаний, справа — вид после статических испытаний)

Примечание. А — микротрещина, Б — полость, В — трещина.

Для проведения анализа результатов эксперимента необходимо вычислить интегральную характеристику тепловой связи k , позволяющую провести сравнение различных способов

обеспечения теплового контакта при одинаковом зазоре между тепловой трубой и корпусом УМ

$$k = \lambda_{\text{н}} a_{\text{экв}} L_{\text{ТТ}} (s_1 n) / (s_1 n + s_2 (n - 1)),$$

где $\lambda_{\text{н}}$, [Вт/(м·К)] — коэффициент теплопроводности напыленного слоя; $L_{\text{ТТ}} = 2,5$ м — средняя длина тепловой трубы на УМ. Величина $a_{\text{экв}}$ представляет собой эквивалентную ширину участка контакта с учетом потери контакта после испытаний и вычисляется по формуле

$$a_{\text{экв}} = (F_{\text{Б}} - F_{\text{ПК}}) / L,$$

где $F_{\text{Б}} = La$, м² — базовая площадь контакта до проведения испытаний; $L = s_1 n$, м — суммарная длина участков порошкового слоя.

Согласно [3], размер частиц порошка составляет 1...50 мкм, что существенно больше размеров молекул исходного материала. Таким образом можно принять, что теплофизические характеристики порошкового слоя будут отличаться от характеристик исходного материала так же, как единица объема, заполненного шарами, от сплошного объема, что составляет $\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi}{8} \approx 0,5$. Тогда теплопроводность порошкового слоя составит половину теплопроводности исходного материала, и, принимая во внимание, что в состав напыленного слоя входят алюминий и цинк, для расчета «худшего» (наименее теплопроводного) случая было принято $\lambda_{\text{н}} = 0,5\lambda_{\text{zn}} = 30$ Вт/(м·К).

Обсуждение результатов технологического эксперимента

Было проведено сравнение значения указанной интегральной характеристики для порошкового слоя с аналогичной величиной, полученной для одного из теплопроводных клеев — клея-герметика марки «Эласил», имеющего коэффициент теплопроводности 1,6 Вт/(м·К) и нанесенного сплошным слоем по всей длине тепловой трубы.

В табл. 2 приведены значения интегральной характеристики тепловой связи, отношение базовой площади к площади потери контакта, а также отношение интегральных характеристик тепловой связи для образца и клея «Эласил».

Для известной, обусловленной формой сечения трубы, зависимости величины зазора между трубой и плоскостью от поперечной координаты сечения, принимающей значения от нуля до диаметра трубы D , коэффициент тепловой проводимости вычисляется следующим образом:

$$\rho = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta_i},$$

где δ_i , $i = 1, \dots, n$ — кусочно-линейная функция, аппроксимирующая указанную зависимость.

Таблица 2

Характеристика тепловой связи между трубой и корпусом узлового модуля

Образец	№ 1	№ 3	№ 4	№ 5	«Эласил»
Интегральная характеристика тепловой связи k , Вт·м/К	0,453	0,394	0,002	0,158	0,049
Процентное отношение площади потери контакта $F_{\text{ПК}}$ к базовой площади контакта $F_{\text{Б}}$	14,7%	0,0%	99,7%	65,5%	—
Отношение интегральных характеристик тепловой связи для образца и клея-герметика «Эласил»	9,2	8,0	0,0	3,2	1,0

Из табл. 2 видно, что худшим является образец № 4, имеющий почти 100% потери контакта. Образец № 5 после испытаний потерял 2/3 контакта, однако благодаря высокой теплопроводности порошкового материала величина интегральной характеристики тепловой связи все же в три раза больше, чем при использовании клея «Эласил». Только образец № 3 не имеет потери контакта, применение такой схемы в восемь раз эффективнее, чем нанесение сплошного слоя клея. Образец № 1 имеет небольшую потерю контакта, однако за счет конфигурации схемы тепловой контакт в этом случае на 15% лучше, чем у образца № 3, и более чем в девять раз лучше, чем в случае применения клея «Эласил».

При сравнении схем нанесения порошкового слоя по критериям, приведенным выше, можно сделать следующие выводы:

- при использовании односторонних швов, расположенных вплотную друг к другу, швы меньшей длины являются более прочными (образцы № 1 и 5);
- при использовании двусторонних швов меньшее отношение длины шва к шагу между швами приводит к лучшим прочностным характеристикам (образцы № 3 и 4);
- при равных величинах площади контакта приоритетным является использование односторонних швов (образцы № 3 и 5).

Из табл. 1, в свою очередь, видно, что большая потеря контакта у образцов № 4 и 5 обусловлена наличием полостей в порошковом слое, появившихся при осуществлении напыления.

Следует также отметить, что вопросы возможности возникновения электрохимической коррозии напыляемых слоев и работоспособности соединения при циклических температурных нагрузках могут быть предметом дальнейших исследований.

Выводы

По результатам проведенных испытаний можно сказать, что опыт применения «холодного» газодинамического напыления для обеспечения теплового контакта между элементами конструкции оказался успешным. Три из четырех исследуемых образцов показали результат лучше, чем при использовании клея-герметика «Эласил». При потере контакта до 15% под действием внешних нагрузок сохраняются преимущества газодинамического напыления. Большие потери контакта обусловлены наличием полостей, появившихся при осуществлении напыления.

В заключение следует отметить, что для успешного внедрения метода порошкового напыления в качестве способа обеспечения теплового контакта необходимы, во-первых, разработка метода контроля за отсутствием полостей внутри напыленного слоя и, во-вторых, разработка и выпуск нормативной документации по проведению «холодного» газодинамического напыления.

Список литературы

1. Легостаев В.П., Марков А.В., Сорокин И.В. Целевое использование российского сегмента МКС: значимые научные результаты и перспективы // Космическая техника и технологии. 2013. № 2. С. 3–18.
 2. Клочкова М.А. Проектирование системы обеспечения теплового режима узлового модуля Международной космической станции // Космонавтика и ракетостроение. 2013. Вып. 1 (70). С. 46–50.
 3. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 12. С. 22–33.
 4. Каширин А.И. Оборудование Димет и газодинамическая технология нанесения металлических покрытий // Техномир. 2004. № 2 (20). С. 46–48.
 5. Клюев О.Ф., Каширин А.И. «Холодное» напыление металлических покрытий // Наука и жизнь. 2005. № 3. С. 82–85.
 6. Клюев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В., Бuzдыгар Т.В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 3. Оборудование Димет // Сварщик. 2003. № 6 (34). С. 25–27.
- Статья поступила в редакцию 19.05.2014 г.*