

ВЫВОДЫ

1. Разработаны два варианта конструкции и технологии изготовления переходных соединений «нержавеющая сталь—кварцевое стекло», работающих при криогенных температурах.

2. Проведены эксперименты и показан положительный эффект от наложения при сварке в твердой фазе кварца с медью поли высокого напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов М. Л. Спай стекла с металлом. М., Госэнергиздат, 1957.
2. Копылов Ю. П. Получение соединений кварца с металлом. Ж. «Обмен опытом в электронной промышленности» М., 1968, № 1, стр. 46—56.
3. Метелкин И. И., Поздеева И. П. Влияние пластичности конструкционного металла и релаксации напряжений в припои на величину механических напряжений в торцовых спаих керамики с металлами. Труды конференции по электронной технике. М., 1966, № 1, стр. 17—40.
4. I. Appl. Phys¹¹ 1969 Vol 40, No 13. 5396—5397.
5. Kramer Irvin B. Burrows Charles Diffnsien. bonding [Mortin Marietta Corp]. Пат. США кл. 290 484, № 3 256 598, заявл. 25.07.63.

Ф. И. Китаев, Ю. Г. Лекарев, А. Г. Цидулко, Л. А. Наумов,
А. В. Шавкунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ УПЛОТНЯЮЩИХ СЛОЕВ $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$

Металлокерамические материалы, применяемые для уплотнений в рабочем тракте авиадвигателей, должны обладать достаточными прочностными свойствами, высокой эрозионной стойкостью жаро- и термостойкостью при температурах работы изделия. Кроме того, уплотняющий материал должен иметь хорошую прирабатываемость, низкий коэффициент трения и не должен наволакиваться на поверхности контактирующих с ним деталей. Столь разнообразные и порой противоречащие друг другу требования поставили задачу исследования технологии плазменного напыления многокомпонентных смесей применительно к уплотнениям компрессора.

В настоящей работе представлены результаты исследования свойств напыленного слоя $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$ в зависимости от параметров режима напыления.

Для исследований была выбрана композиция $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$ с весовым содержанием углерода — 8,9%, нитрида бора — 18,8%, кремния — 21%, остальное — никель. Исходная шихта пред-

Таблицей смеси компонентов, скрепленных жидким стеклом. Температурно-физические свойства основных компонентов, входящих в состав шихты, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Плотность, г/см ³	T плавления, °C	T возгонки, °C	Литературный источник
C	2,25	—	3652—3697	[1]
BN	2,27	2983	3000	[2]
Ni	8,85	1435—1446	3075*	[1]

* Температура кипения.

Соотношение между компонентами с такими различными свойствами, распределение по объему частиц, степень нагрева в плазменной струе и в момент контакта с напыляемой поверхностью определяют свойства нанесенного уплотняющего слоя. Иначе говоря, свойства напыленной композиции BN+C+Ni определяются как составом исходного материала, так и условиями напыления. В связи с этим исследование свойств уплотнительного слоя BN+C+Ni в зависимости от параметров режима напыления проводилось в следующей последовательности:

- исследование влияния теплосодержания плазменной струи;
- определение влияния состава плазмообразующего газа;
- исследование влияния гранулометрического состава (дисперсности) исходной шихты;
- определение свойств напыленной композиции от дистанции напыления;
- определение коэффициента использования материала в зависимости от параметров режима напыления и конструктивных особенностей плазменной горелки.

Опыт плазменного напыления металлокерамических уплотнений показывает, что в первом приближении работоспособность слоя определяется его твердостью и содержанием в нем твердой смазки [3]. На данном этапе работы при анализе свойств напыленной композиции BN+C+Ni ограничились определением химического состава и твердости уплотнительного слоя.

Покрытие наносилось на плоские образцы 70×70×2 мм из сплава ЭП693ВД (5 образцов в каждом эксперименте), предварительно опескоструенные и обезжиренные. Толщина напыленного слоя 1,5—2 мм. Твердость измерялась на каждом образце в 9 точках, равномерно распределенных на поверхности. Для определения химсостава с каждого образца со всей поверхности снималась проба.

Напыление производилось на установках УПУ-3М. Использовались плазменные горелки ПГН-4 и ПГН-5. Плазмообразующий

газ — аргоноводородная смесь и азот. Дистанция напыления на аргоноводородной смеси — 100 мм, на азоте — 165 мм.

При исследовании зависимости свойств напыленного слоя от теплосодержания плазменной струи в качестве плазмообразующего газа использовалась аргоноводородная смесь (10—15% содержания водорода по объему). Среднемассовое теплосодержание (энтальпия) изменялось за счет регулирования мощности дуги. Энтальпия определялась по мощности дуги и расходу рабочего газа с учетом потерь на нагрев электродов, которые замерялись калориметрированием охлаждающей водой. Режимы напыления представлены в табл. 2, 3, 5.

Для исследования влияния состава плазмообразующего газа на свойства покрытий проводилось напыление аргоно-водородной смесью с разным содержанием водорода (при неизменной энтальпии) и азотом. Напыление на азоте было проведено для двух значений энтальпии, при этом использовалась горелка ПГН-5в, предназначенная для работы с азотом.

Для исследования влияния гранулометрического состава (дисперсности) исходной шихты на химсостав и твердость напыленного слоя предварительно порошок был рассеян на наборе сит (ГОСТ 3647—59). У отдельных фракций определялся химсостав <40 ; 71—90; >315 мкм. Из-за необходимости получения достаточного количества шихты для напыления слоя толщиной 1,0—1,5 мм использовались фракции более широкого состава: <71 ; 71—100; >100 мкм. Напыление этих трех фракций велось на одном режиме со средним теплосодержанием (см. табл. 3).

Чтобы установить причину уменьшения содержания твердой смазки в напыленном слое по сравнению с исходной шихтой, определялся коэффициент использования материала для разных теплосодержаний аргоноводородной струи и на одном режиме — для азотной струи [3]. Определялось также влияние конструктивных параметров (способа ввоза плазмообразующего газа, места ввода в сопло порошка, наличия конусной расточки у среза сопла) горелки на коэффициент использования материала.

Как известно, большое влияние на сцепление напыляемого материала с основой оказывает состояние частиц в момент удара о поверхность. Для схватывания и образования межатомных связей частицы должны быть в состоянии высокой пластичности.

Трудно предположить, что компоненты твердой смазки (ВН и С), входящие в состав частиц шихты, достигают такого состояния при прохождении через плазму. Связь композиции с основой и внутри слоя обеспечивается никелем, который распределен равномерно по объему частиц. В одних случаях значительное количество никеля выходит на поверхность частиц, в других — недостаточное для образования связи с основой в момент контакта с напыляемой поверхностью. Это явление усугубляется тем, что часть частиц дробится в результате прохождения через плазму, и, вероятнее всего, этот распад происходит между никелем и твер-

Зависимость свойств напыленного слоя от granulометрического состава шихты

№ серии	Параметры режима напыления						Свойства напыленного слоя				
	ток I, а	напряже- ние U, в	мощность N, квт	расход газа G, л/сек	% содержа- ния H ₂	Температур- ное поле T, град C	Дисперсность шихты, мкм	твердость В _H	химсостав, %		
									C	BN	Si
1	360	50	18	3,81	15,0	4,96	71	$\frac{30,8}{25,5-35,6}$	$\frac{2,7}{2,0-3,5}$	$\frac{6,7}{6,5-6,8}$	1,8
2	360	50	18	3,77	13,5	5,40	71-100	$\frac{13,6}{11,2-16,3}$	$\frac{6,2}{6,0-6,3}$	$\frac{9,8}{9,4-10,0}$	1,8
3	360	50	18	3,65	14,8	5,6	100	$\frac{13,1}{9,1-17,2}$	$\frac{6,46}{6,0-7,0}$	$\frac{9,92}{9,87-10,0}$	1,53

ной смазкой. Кроме того, не исключена возможность выгорания углеводорода в плазменной струе, а при определенных условиях — и возгонка нитрида бора. По указанным причинам в напыленном слое остается меньшее количество твердой смазки по сравнению с исходной шихтой. Причем процентное содержание ее в напыленном слое может колебаться как от состава шихты, так и от условий напыления.

Анализ результатов исследования говорит о существенной зависимости химсостава и твердости напыленного слоя от энтальпии струи (табл. 2). Увеличение энтальпии аргоноводородной струи с $3,8 \cdot 10^6$ дж/кг до $6,65 \cdot 10^6$ дж/кг приводит к возрастанию средней твердости с 11,3 до 19,5 Н_в, аналогично и для азотной струи: при $10,4 \cdot 10^6$ дж/кг твердость составляет 10,5Н_в, при $15,1 \cdot 10^6$ дж/кг — 15,9Н_в. Изменение твердости слоя можно объяснить изменением плотности напыленного слоя (пористости). Обращает на себя внимание тот факт, что твердость слоев, напыленных азотной струей, даже при больших значениях энтальпии, значительно ниже, чем слоев, напыленных аргоноводородной плазмой.

С увеличением энтальпии струи содержание углерода в слое снижается, а содержание нитрида бора увеличивается. Однако содержание компонентов твердой смазки остается в пределах норм, предусмотренных техническими условиями (по ТУ С=3—7%, VN=6—10%).

Увеличение содержания водорода в плазменной струе приводит к получению слоя с пониженной твердостью и более высоким содержанием графита и нитрида бора (табл. 2).

Анализ влияния гранулометрического состава шихты на свойства покрытий показал, что использование шихты различной дисперсности может существенно повлиять на твердость и химсостав напыленной композиции (табл. 3). Твердость слоя, напыленного шихтой с размером частиц <71 мкм, значительно выше предусмотренной по техническим условиям (по ТУ Н_в <20), содержание же углерода и нитрида бора приближается к нижним границам норм. Структура слоя плотная, мелкоячеистая с малым количеством мелкодисперсных включений С и VN. Структура слоя, напыленного шихтой с размером частиц 71—100 мкм, менее плотная с равномерным распределением VN и С. У слоя, напыленного шихтой с размером частиц >100 мкм, структура пористая с крупными включениями графита и равномерным распределением нитрида бора. У всех слоев, напыленных шихтой с размером частиц >71 мкм, твердость и химсостав имеют значения, близкие к оптимальным.

Поскольку режимы напыления колебались незначительно, различие в структуре, твердости и химсоставе напыленных слоев следует искать, в первую очередь, в химсоставе исходной шихты. Мелкие фракции шихты имеют пониженное содержание компонентов твердой смазки, тогда как для фракции крупнее 71 мкм

химсостав колеблется незначительно и близок к составу нерастворимой шихты (табл. 4).

Результаты исследований показали, что увеличение расстояния до напыляемой поверхности приводит к снижению содержания

Таблица 4

Химсостав шихты по фракциям

Размер фракции	Химсостав, %	
	C	BN
<40 мкм	2,0	13,6
71—90 мкм	9,4	17,0
>315 мкм	9,2	18,2

углерода и нитрида бора. Содержание Si в нанесенной композиции BN+C+Ni изменяется от 1,53 до 2,2% и не зависит от условия напыления. Вероятнее всего, количество Si в слое определяется содержанием его в исходной шихте, т. е. количеством жидкого стекла, введенного в нее при изготовлении. Оно может зависеть

от дисперсности и смачиваемости исходных компонентов шихты (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость свойств уплотнительного слоя от дистанции напыления

Параметры режима напыления					Теплосодержание H, 10 ⁶ Дж/кг	Дистанция напыления, мм	Свойства напыленного слоя			
I, а	U, в	N, квт	G, м ³ /час	%, H ₂			твердость H _v	химсостав, %		
								C	BN	Si
						14,8	5,4	8,5		
360	50	18	3,84	15,1	4,67	11,6—19,1	5,3—5,6	8,4—8,6	2,0	
						15,5	3,9	6,5	2,0	
360	48	17,3	3,95	14,6	4,25	12,8—21,5	3,7—4,0			

Коэффициент использования шихты BN+C+Ni зависит от теплосодержания плазменной струи и состава плазмообразующего газа. Поскольку об оплавлении графита не приходится говорить, а для нитрида бора возможно оплавление только при определенных условиях (например, под давлением азота [4]), то невысокие значения коэффициента использования шихты можно объяснить тем, что у определенного процента частиц недостаточное количество никеля, обеспечивающего связь частиц с основой, выходит на поверхность.

Оценка влияния конструктивных параметров плазмообразующего канала горелки на коэффициент использования материала показала, что лучшие результаты достигаются в случае примене-

Коэффициент использования шихты $BN + C + NI$ в зависимости от параметров режима напыления

№ серии	Плазмообразующий газ	Конструктивные параметры горелки	Параметры режима напыления				Расход шихты, г/сек	Коэффициент использования материала, %
			I, a	$U, в$	$N, квт$	$G, л^3/час$		
1	Ar + N ₂	Горелка ПГН-4, осевая, конусная рас- точка с $\varnothing 7,2$ мм, угол 5°, длина сопла 31 мм, ввод порошка в 4 мм от среза сопла.	220	53	11,65	3,6	0,78	31,3
2			370	50	18,5	3,6	1,26	38,1
3			490	50	24,5	3,6	0,61	43,1
4	Ar + N ₂	Горелка ПГН-4, осевая, конусная рас- точка с $\varnothing 7,8$ мм, угол 5°, длина сопла 35 мм, ввод порошка в 8 мм от среза сопла	360	55	19,8	3,6	0,602	42,2
5			360	53	19,1	3,6	0,637	41,4
6	N ₂	Горелка ПГН-5, осевая, конусная рас- точка с $\varnothing 7,8$ мм, угол 5°, ввод порошка в 8 мм от среза сопла	360	80	28,8	3,6	0,446	46,0

ния сопла с вводом порошка в канал в 8 мм от среза сопла. Влияние других факторов — способа ввода газа или наличия конусной расточки у среза сопла — оказалось незначительным, (табл. 6).

Таким образом, стабильные свойства напыленной композиции $VN+C+Ni$ можно получить за счет четкого контроля следующих параметров: исходного химсостава шихты, ее гранулометрического состава и режима напыления — тока и напряжения дуги, расхода плазмообразующего газа. Изменение режима напыления в широком диапазоне не вызывает отклонений химсостава и твердости напыленного слоя за пределы норм технических условий. Однако следует иметь в виду, что при чрезмерном увеличении теплосодержания плазменной струи (выше $6,65 \cdot 10^6$ Дж/кг) значения твердости напыленного слоя приближаются к верхнему пределу, допустимому по ТУ. Повышенное содержание мелких фракций в шихте приводит к получению напыленного слоя с низким содержанием твердой смазки и высокой твердостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разбери Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии. М., «Энергия», 1972.
2. Самсонов Г. В. Неметаллические нитриды. М., Металлургияздат, 1969.
3. Исследование процессов плазменного напыления. Отчет КуАИ, 1967.
4. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. М., 1963.

А. Г. Цидулко, Ф. И. Китаев, Э. А. Пугач

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ И ЖАРОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЯ НА67

Покрытие НА67, полученное напылением терморезирующего никель-алюминиевого порошка, имеет прочное сцепление со сталями, сплавами меди, алюминия, титана, индия. Применение его в качестве подслоя под термозащитные покрытия из окислов позволяет существенно повысить прочность их сцепления с металлами. Однако работоспособность таких покрытий при повышенных температурах и теплосменах, при воздействии агрессивных сред (например, продуктов сгорания топлива) зависит от ряда других факторов — величины внутренних напряжений в системе «покрытие — подложка», жаростойкости покрытия, способности его защищать подложку от окисления.

Величина напряжений в системе «покрытие — подложка» при нагреве будет зависеть от многих причин, прежде всего от коэффициентов термического расширения покрытия и подложки, характера их зависимости от температуры, фазовых превращений в покрытии. С этой точки зрения оптимальной является система, в которой коэффициенты термического расширения покрытия и