

С. Н. БЕЛЯЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ НАПЫЛЕНИЯ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

Рассматриваются основные принципы выбора материалов покрытий и методов их напыления на узлы гиросприборов, исходя из технических требований к изделию, его геометрических и функциональных особенностей, а также в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств материала покрытия. Представлены основные параметры процессов нанесения покрытий методами магнетронного напыления и термического испарения в вакууме для различных материалов.

Ключевые слова: тонкопленочное покрытие, магнетронное напыление, термическое испарение в вакууме, датчик положения, гиросприбор.

Введение. При разработке современных изделий точного приборостроения, в том числе гироскопических приборов, большое значение имеют технологические процессы нанесения покрытий, реализуемые различными методами напыления. При технологическом проектировании процессов вакуумного напыления определяющим фактором является выбор материалов покрытий, обеспечивающих рабочие характеристики изделия. При этом техническим требованиям, например, по таким показателям, как магнитные или электрические свойства, механические характеристики и т.д., могут соответствовать различные материалы. Очевидно, что выбор материала покрытия должен осуществляться исходя из максимальной технологичности процесса его нанесения.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, цель которых заключалась в выявлении и систематизации по значимости критериев выбора материала функциональных покрытий и в определении режимов и методов их напыления на прецизионные элементы узлов гиросприборов.

Технологические особенности выбора материалов. Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявление исходных условий и основных принципов выбора материалов и методов напыления, исходя из технических требований к изделию и свойств материала;
- определение и сравнительная оценка основных параметров и характеристик технологических процессов нанесения покрытий для различных конструкционных материалов применительно к конкретным узлам гиросприборов.

В качестве наиболее наглядных примеров использования вакуумных покрытий при изготовлении деталей и узлов гироскопов можно привести формообразование массивного армирующего элемента в конструкции ротора бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) и нанесение тонкопленочных электродов на узлы датчика положения чувствительного элемента гравитационного вариометра (ЧЭ ГВ).

Реализация ротора БЭСГ (рис. 1) осуществляется посредством диффузионной сварки в вакууме охватывающей втулки 2 и охватываемого цилиндра 1 с профилированной кольцевой проточкой, заполненной материалом армирующего элемента 3 путем напыления, с последующим формообразованием сферы ротора 4 диаметром $D+\Delta$ [1].

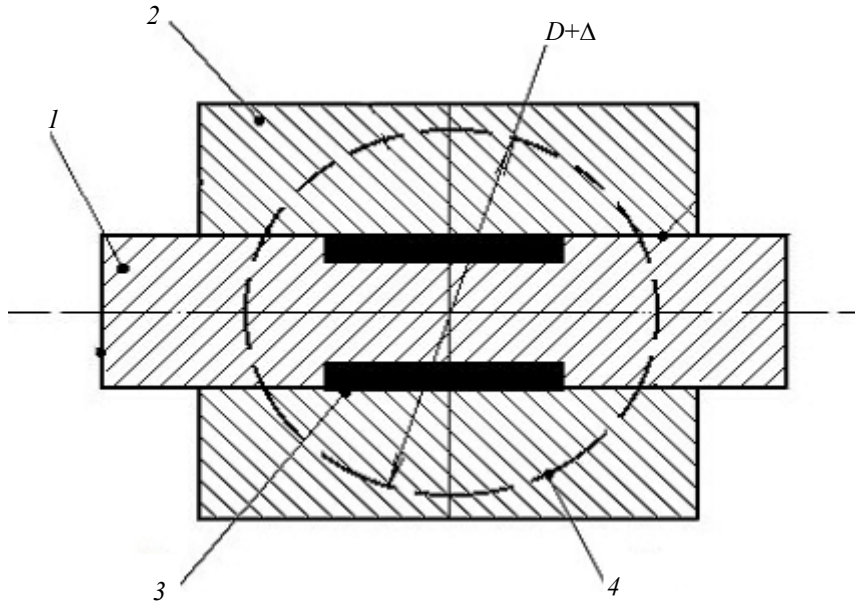


Рис. 1

К данному ротору предъявляется ряд технических требований, основное из которых — обеспечение относительной разности моментов инерции ротора (ε), определяемой в диапазоне (0,030—0,034), что и достигается наличием в его составе армирующего элемента. Эта разность определяется как

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{ос}} - I_{\text{рад}}}{I_{\text{ос}}},$$

где $I_{\text{ос}}$ и $I_{\text{рад}}$ — моменты инерции цилиндра вдоль и перпендикулярно оси вращения для армирующего элемента, вычисляемые по соответствующим формулам:

$$I_{\text{ос}} = \gamma_{\text{Ве}} \pi \frac{h}{2} (R^4 - r^4) = m \frac{R^2 + r^2}{2};$$

$$I_{\text{рад}} = \gamma_{\text{Ве}} \pi \frac{h}{4} (R^2 - r^2) \left(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3} \right) = m \frac{R^2 + r^2 + h^2/3}{4},$$

где h — ширина прослойки армирующего элемента; R и r — внешний и внутренний радиусы кольцевого армирующего элемента; m — масса армирующего элемента; $\gamma_{\text{Ве}}$ — удельный вес бериллиевого ротора.

Таким образом, для того чтобы подобрать необходимую относительную разность моментов инерции ротора, следует оперировать такими взаимообусловленными параметрами, как ширина h и разность радиусов R и r (толщина) кольцевого армирующего элемента, а также удельный вес γ его материала.

В качестве предполагаемых материалов для армирующего элемента были рассмотрены применяемые в гироскопии такие материалы, как медь, молибден, тантал, титан, ниобий, золото, серебро, вольфрам и хром. Выбор материала определяется по следующим критериям, расположенным в порядке убывания их сравнительной значимости.

1. Температура плавления ($T_{пл}$) материала армирующего элемента.
2. Немагнитность материала армирующего элемента.
3. Упругость паров (P) напыляемого материала армирующего элемента при определенной температуре сварки ($T_{св}$).
4. Удельный вес материала армирующего элемента (с учетом величины превышения удельного веса материала γ_m над удельным весом бериллия γ_{Be}).
5. Согласованность материала армирующего элемента и бериллия по значениям термических коэффициентов линейного расширения — ТКЛР (соотношение Δ).
6. Адгезия материала армирующего элемента к бериллиевой подложке.
7. Наличие и ширина (s) переходных зон твердофазного взаимодействия между бериллием и материалом армирующего элемента при определенном времени сварки ($t_{св}$).
8. Скорость (v) процесса напыления.
9. Экономичность процесса напыления (стоимость материала — n).

Для наглядного представления о значимости критериев составлена таблица, в которой приведены некоторые свойства материалов и геометрические характеристики армирующего элемента ротора БЭСГ (см. табл. 1) [2, 3]. В табл. 1 для каждого элемента представлены совокупность критериев выбора материалов и данные о геометрической конфигурации проточки под армирующий элемент, которые могут варьироваться в пределах, определяемых геометрией сферы ротора.

Критерии 1—3 (см. приведенный выше перечень) обусловлены однозначно необходимыми требованиями, определяющими принципы работы прибора, и фактически являются ограничительными. При этом упругость паров материала (критерий 3) не должна превышать определенного значения, составляющего примерно 1,3 Па; при этом чем меньшим значением P обладает материал, тем он предпочтительнее. Очевидно, что при равнозначности представленных в табл. 1 материалов по ограничительным критериям возможно их ранжирование с определением предпочтительности использования по сравнительным признакам, которые характеризуются критериями 4—7. Далее рассматриваются технологические критерии 8 и 9, связанные с особенностями проведения процесса напыления. Эти критерии весьма важны, поскольку обеспечивают возможность практической реализации процесса и характеризуют его производительность, воспроизводимость результатов, а также стоимость-затратные показатели.

Как показывает анализ свойств рассматриваемых материалов, критериям 1—3 удовлетворяют в той или иной степени все материалы; критерию 4, в порядке предпочтения, — вольфрам, тантал, золото, серебро, молибден и медь; критерию 5 — золото, медь и серебро; критерию 6, в той или иной степени, — титан, серебро и медь; критерию 7 — все материалы; критериям 8 и 9 — медь. (Данные по критериям 8 и 9 представлены в табл. 2.)

По совокупной оценке материалов (см. табл. 1) в качестве наиболее приемлемого материала для формообразования армирующего элемента методом напыления была выбрана медь, которая характеризуется высокой упругостью паров, необходимым удельным весом, хорошей согласованностью с бериллием по ТКЛР, высокой скоростью распыления при минимальных временных затратах и низкой стоимостью.

Технология изготовления датчика положения ЧЭ ГВ включает множество операций, наиболее важной из которых является нанесение электродов посредством напыления на ротор и статор, которые выполнены из корундовой керамики и имеют встречно-ориентированные друг относительно друга рабочие сферические поверхности [4]. Рабочая поверхность ротора представляет собой сплошной электрод, а поверхность статора — три кольцевые дорожки электродов. При этом толщина электродов ($h_{эл}$), в зависимости от напыляемого материала, может быть различной.

Таблица 1

Материал армирующего элемента	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\gamma_n, \text{г/см}^3$	$P, \text{Па},$ при $T_{св} \approx 700 \dots 900 ^\circ\text{C}$	$s, \text{мкм},$ при $T_{св} = 700 \dots 900 ^\circ\text{C}$ и $t_{св} = 1 \text{ ч}$	Δ при $T_{св} = 800 \dots 900 ^\circ\text{C}$	$R, \text{мм}$	$R-r, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	ϵ
Cu	1083	8,96	$10^{-5} - 10^{-3}$	9—12	1,14	4	0,2	1,3	0,033
Mo	2610	10,22	$< 10^{-15}$	0,06—0,44	0,35	4,1	0,1	2	0,032
Ti	1725	4,54	$< 10^{-10}$	0,04—3,6	0,51	4	0,5	1,45	0,031
Au	1063	19,32	$10^{-7} - 10^{-4}$	Нет данных	0,90	4	0,1	1,05	0,034
Ag	960	10,5	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-1}$	Нет данных	1,33	4	0,11	2	0,033
Ta	2996	16,6	$< 10^{-16}$	0,9—2,2	0,37	4	0,06	2	0,034
Nb	2415	8,57	$< 10^{-17}$	0,07—0,2	0,44	4	0,28	1	0,033
W	3400	19,3	$< 10^{-18}$	0,1—0,16	0,29	4,1	0,1	0,95	0,033
Cr	1890	7,19	$10^{-8} - 5 \cdot 10^{-5}$	0,02—2,7	1,79	4	0,2	1,8	0,033

Таблица 2

Материал электрода	σ_b , МПа	ρ , мкОм·м	Δ при $T_H = 300$ °С	θ	$h_{эл}$, мкм	ν , мкм/ч*	n , руб.
Mo	490—981	0,05	0,93	+	2—3	4	4500
Cu	220—400	0,0168	2,52	-	3—4	60	200
Cr	190—200	0,15	1,61	+	1—2	5	300
Ti	392—539	0,58	1,42	+	2—3	0,5	850
Ag	127—156	0,0160	3,20	+	1—3	3,5	450
Au	135—140	0,023	2,36	-	1—2	2	19500
Nb	470—510	0,15	1,17	+	3—4	1,5	3100
Ta	204—349	0,15	1,06	-	2—3	0,9	15100
W	610—660	0,056	0,72	-	2—3	0,4	3700

Примечание: * — приведены значения ориентировочной скорости процесса при использовании магнетронного метода напыления.

Исходя из совокупности технических требований к электродным покрытиям на статоре и роторе, можно определить следующие основные критерии выбора материала электродов.

1. Температура плавления ($T_{пл}$) материала электрода.
2. Немагнитность материала электрода.
3. Удельное электросопротивление материала электрода (ρ).
4. Согласованность материала электрода и керамики по ТКЛР (соотношение Δ) при определенной температуре напыления (T_n).
5. Механическая прочность материала (σ_b).
6. Адгезия материала электрода к керамике, характеризующаяся, в том числе, возможностью трехфазного взаимодействия (θ).
7. Скорость (v) процесса напыления.
8. Экономичность процесса напыления (стоимость 1 кг пруткового материала (n), по данным 2007 г.).

Аналогично предыдущему примеру приведенные критерии можно разделить на ограничительные (1—3), сравнительные (4—6) и технологические (7, 8).

В табл. 2 представлены параметры материалов, являющиеся критериями их выбора, и характеристики электродов датчика положения ЧЭ ГВ [2, 3]. (Значения $T_{пл}$ и γ_m приведены в табл. 1.)

Основываясь на анализе приведенных критериев и данных табл. 2, можно отметить, что критериям 1 и 2 удовлетворяют в той или иной степени все материалы; по критерию 3 наиболее приемлемыми, в порядке предпочтения, являются серебро, медь, золото, молибден и вольфрам; по критерию 4 — вольфрам, молибден, тантал, ниобий и титан, по критерию 5 — молибден, вольфрам, титан, ниобий и тантал; по критерию 6 — титан, молибден, ниобий, хром и серебро; по критериям 7 и 8 — медь.

Сравнительный анализ критериев показал, что наиболее предпочтительным материалом для напыления электродов является молибден, который характеризуется сравнительно низким электросопротивлением, удовлетворительной согласованностью с керамикой по ТКЛР, высокой механической прочностью и хорошей адгезией к керамике.

Технологические особенности методов напыления. Для выбранных материалов были определены методы их нанесения. Для напыления медного армирующего элемента использовался метод термического испарения в вакууме, позволяющий получить покрытие сравнительно большой толщины при минимальных затратах материала. Для нанесения молибденовых электродов выбран метод магнетронного напыления, обеспечивающий минимальную разнотолщинность покрытия.

Основные режимы процессов напыления армирующего элемента ротора БЭСГ и электродов датчика положения ЧЭ ГВ, определенные в результате исследований, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Нанесение меди методом термического испарения в вакууме		Нанесение молибдена методом магнетронного напыления	
Давление в камере, Па	$6,7(\pm 1) \cdot 10^{-2}$	Давление в камере, Па	$2,7(\pm 0,2) \cdot 10^{-3}$
Ток испарителя, А	250±10 —1-й этап, 440±5 —2-й этап	Давление рабочего газа, Па	$1,6(\pm 0,05) \cdot 10^{-1}$
Напряжение испарителя, В	8±0,5	Ток разряда мишени, А	4,2±0,1
Температура нагрева детали, °С	400±10	Напряжение разряда, В	550±5
Расстояние испаритель — деталь, мм	70±5	Температура нагрева детали, °С	310±10
Время напыления, ч	3±0,2	Расстояние мишень — деталь, мм	90±5
Средняя скорость испарения, мкм/ч	60±0,5	Время напыления, ч	0,5±0,05
		Скорость напыления, мкм/ч	4±0,2

В соответствии с выбранными режимами были изготовлены узлы гиросприборов с напыленными покрытиями (рис. 2). На рисунке представлены заготовки ротора БЭСГ под операцию диффузионной сварки (рис. 2, а); шлифы поверхностей роторов в осевом сечении с на-

пыленными армирующими элементами (рис. 2, б); статор датчика положения ЧЭ ГВ с напыленными дорожками электродов (рис. 2, в) и ротор датчика положения с напыленным сплошным электродом (рис. 2, г).

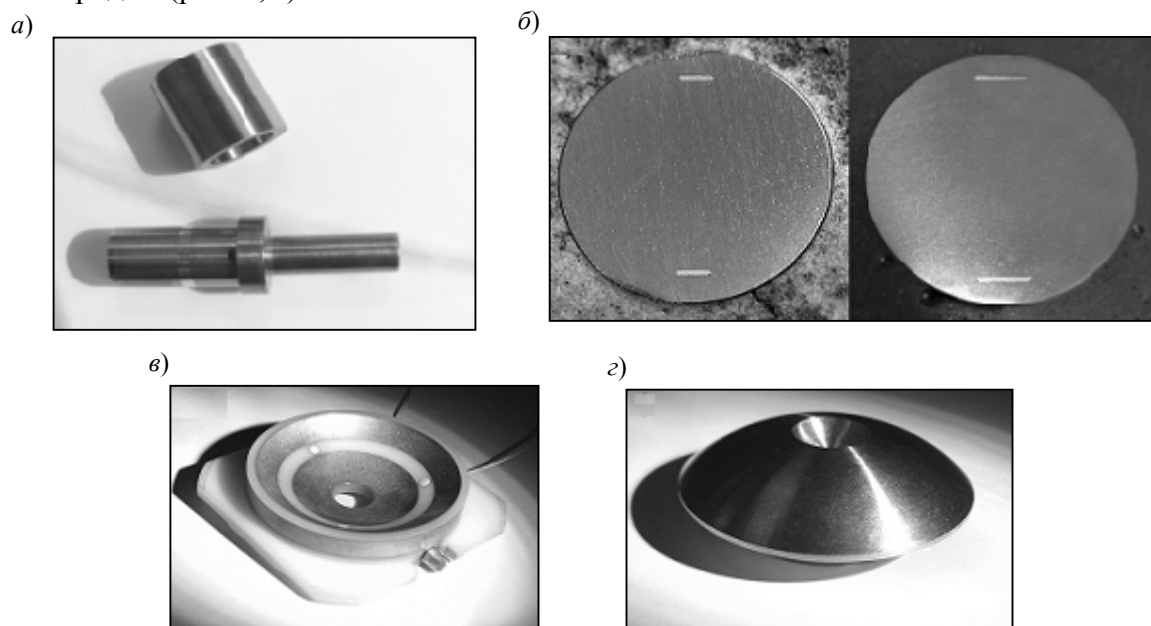


Рис. 2

Заключение. В результате проведенных экспериментов, исходя из сравнительного анализа свойств и характеристик материалов, а также технических требований к изделиям при нанесении покрытий на конкретные узлы гиросприборов, были определены и сгруппированы по ограничительным, сравнительным и технологическим признакам основные критерии выбора материалов с установлением уровня значимости каждого критерия. Для рассмотренных узлов гиросприборов были выбраны материалы покрытий и определены наиболее предпочтительные методы их напыления. По разработанным технологиям изготовлены реальные узлы гиросприборов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 08-08-12032-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ изготовления ротора шарового гироскопа / Б. Е. Ландау, А. Я. Бузык, А. Г. Щербак и др. // Заявка № 2005107600/02. Полож. реш. от 17.05.06.
2. Беляев С. Н. Прецизионная технология формообразования тонкопленочных электродов на элементах изделий точного приборостроения // Материалы IV Междунар. конгресса „Машиностроительные технологии“. Варна, 2004.
3. Свойства элементов. Справочник / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
4. Справочник по вакуумной технике и технологии / Пер. с англ.; Под ред. Ф. Росбери. М.: Энергия, 1972. 456 с.

Сведения об авторе

Сергей Николаевич Беляев

— ФГУП ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург;
E-mail: serenible@mail.ru

Рекомендована
ЦНИИ „Электроприбор“

Поступила в редакцию
19.02.08 г.