

Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0712840

Шаталов В. К.¹, Штокал А. О.^{1,2}, Рыков Е. В.², Добросовестнов К. Б.²

УДК 621.794.61

¹Россия, КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана

²Филиал ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

vkshatalov@yandex.ru

cuauthemoc1@yandex.ru

rik@laspase.ru

DKB@laspase.ru

Введение

Исходя из того, что в аэрокосмической промышленности значительную долю применяемых конструкционных материалов составляют алюминиевые сплавы, большой интерес представляет улучшение такой эксплуатационной характеристики конструкционных материалов, как износостойкость при больших контактных напряжениях.

При создании любого космического аппарата применяются раскрывающиеся элементы конструкции, в которых используются узлы раскрытия и стопорения.

Существует этап транспортирования – выведение узла раскрытия в сложенном состоянии на орбиту. Во время этого этапа узел раскрытия испытывает значительные вибрационные нагрузки, которые воспринимаются упорами, осуществляющими функцию распора ответвлений балки для того, чтобы уменьшить перемещения в пределах прогиба балки при вибрации (рисунки 3, 4). Так как упоры на данном этапе работают в условиях повышенного износа, обычно в качестве конструкционного материала выбирается сталь или титан. Предлагается, учитывая значительную поверхностную твердость МДО-покрытия, заменить конструкционные материалы упоров с большей плотностью алюминиевым сплавом с МДО-покрытием.

После выхода космического аппарата на расчётную орбиту энергией упругих элементов узла раскрытия осуществляется этап развёртывания, на котором обеспечение требуемого угла раскрытия и осуществление процесса стопорения выполняется с помощью узла качения (рисунок 1), состоящего из конуса с подшипником, перемещающегося по по-

верхности сектора балки и обеспечивающего надёжное стопорение путём захода во внутренний конус сектора балки. Для повышения надёжности изделия и предотвращения на этапе наземной эксплуатации возможности возникновения ложбинки износа на наружной поверхности сектора и заусенцев в месте перехода наружной поверхности во внутренний конус сектора, препятствующих полному вхождению конуса в сектор и надёжному стопорению раскрывшейся балки, желательно повысить твёрдость поверхности сектора, по которому катится подшипник конуса. Возможность использовать другое конструктивно-технологическое решение осложняется по причине, во-первых, сварной конструкции балки из алюминиевого сплава, а, во-вторых, усложнения технологии в случае сборной конструкции узла и дефицита массы изделия. Наиболее рациональным выходом видится нанесение местного МДО-покрытия на поверхность сектора балки (выделено красным).

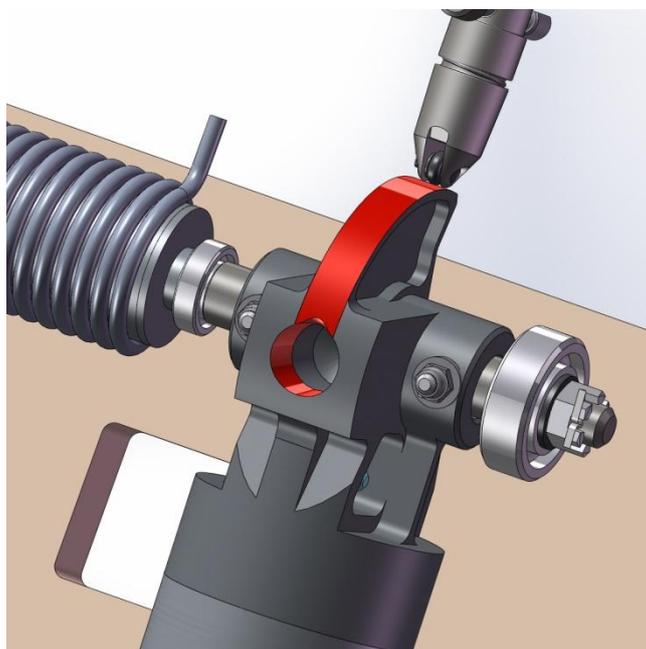


Рисунок 1. Узел качения

1. Основные сведения о покрытии, выполненном микродуговым оксидированием (МДО-покрытии), и перспективы применения МДО-покрытий при конструировании узлов раскрытия космического аппарата

Микродуговое оксидирование (МДО) - сравнительно новый вид поверхностной обработки и упрочнения металлических материалов, берущий свое начало от традиционного анодирования и, соответственно, относится к электрохимическим процессам. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия.

Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате

которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются по сравнению с обычными анодными плёнками.

Технология микродугового оксидирования отработана только для группы вентильных металлов (т.е. металлов, на которых оксидные пленки обладают односторонней проводимостью) и их сплавов, прежде всего алюминиевых. МДО-покрытия находят всё более широкое применение в самых различных областях – от производства товаров бытового назначения и медицины до приборостроения и аэрокосмической промышленности [1].

Структура и состав МДО-покрытий определяются условиями их формирования. Так, например, толстые покрытия на алюминии, полученные в силикатно-щелочном электролите, состоят из трёх слоев: тонкого переходного – 1; основного рабочего, с максимальной твердостью и минимальной пористостью, состоящего в основном из корунда ($\alpha - Al_2O_3$) – 2 и наружного технологического, обогащённого алюмосиликатами – 3 [3].

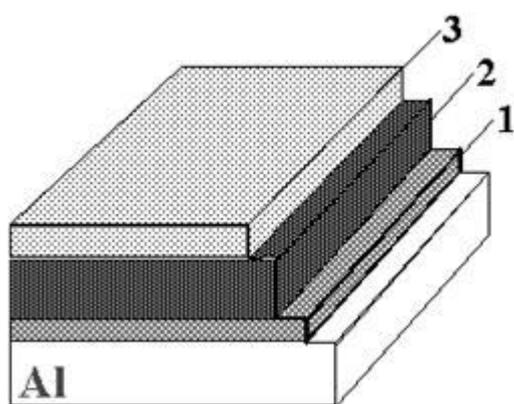


Рисунок 2. Структура МДО-покрытия на алюминии

Свойства МДО-покрытий определяются их составом и структурой, которые, в свою очередь, зависят от материала основы, состава электролита и режима обработки. Для МДО-покрытий, получаемых на алюминиевых сплавах, характерны следующие данные:

- толщина: до 400 мкм,
- микротвёрдость: до 2500 кг/мм²,
- пробойное напряжение: до 6000 В,
- теплостойкость: выдерживает тепловой удар до 2500° С,
- коррозионная стойкость: 1-й балл по десятибалльной шкале,
- износостойкость: на уровне твердых сплавов,
- пористость: от 2 до 50% (регулируемая) [2].

Покажем на примере типового узла раскрытия, как количественно снизится масса при замене металлов с большей плотностью на алюминиевый сплав в тех местах, где это позволяют сделать свойства наносимого МДО-покрытия.

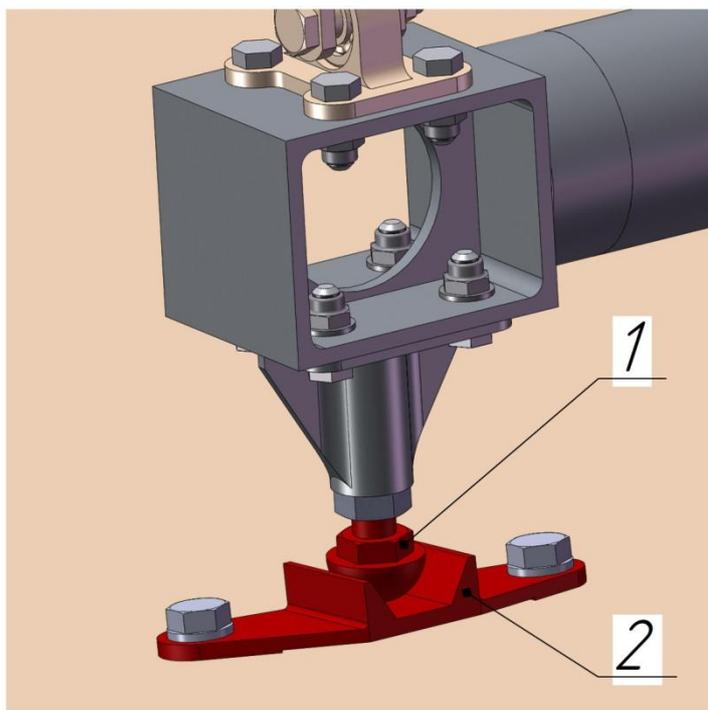


Рисунок 3. Упор балки

На данном рисунке красным выделены детали, которые следует изготовить из алюминиевого сплава АМгб.М и на которые требуется нанести МДО-покрытие: 1 – упор 1, 2 – площадка 1. У балки имеется также аналогичный элемент, в состав которого входят упор 2 и площадка 2.

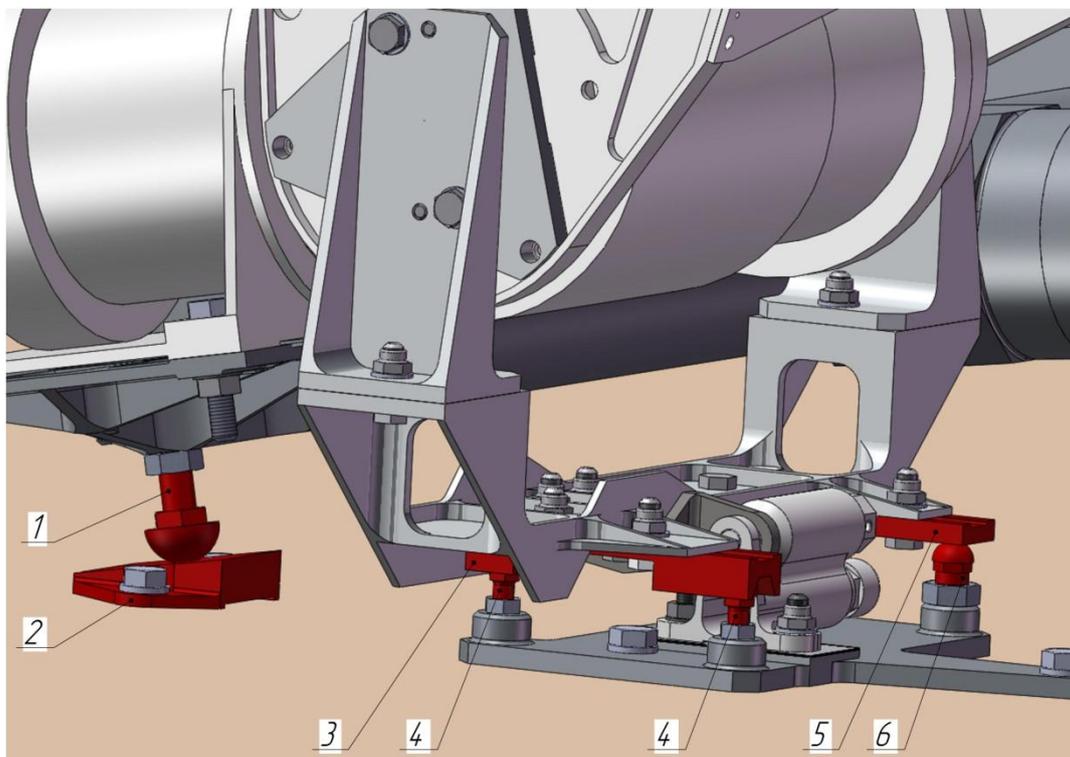


Рисунок 4. Упор узла зачековки привода

На данном рисунке красным выделены детали, которые следует изготовить из алюминиевого сплава АМг6.М и на которые требуется нанести МДО-покрытие: 1 – упор 1, 2 – кронштейн, 3 – площадка 3, 4 – упор 3, 5 – площадка 4, 6 – упор 4.

Сведём в таблицу 1 данные о деталях, материал которых подвергается замене.

Таблица 1 – Детали, материал которых подвергается замене

деталь	материал	плотность, кг/м ³	масса, кг
площадка 1	сталь 45	7826	0,05
упор 1	титан ВТ6С	4500	0,014
площадка 2	сталь 45	7826	0,051
упор 2	титан ВТ6С	4500	0,017
кронштейн	сталь 45	7826	0,08
упор 1	титан ВТ6С	4500	0,014
площадка 3	сталь 45	7826	0,044
упор 3	сталь 30ХГСА	7900	0,005
упор 3	сталь 30ХГСА	7900	0,005
площадка 4	сталь 45	7826	0,062
упор 4	сталь 30ХГСА	7900	0,009
Итого	-	-	0,351

Детали будут изготовлены из алюминиевого сплава АМг6.М, имеющего плотность $\rho = 2640$ кг/м³. Вычисление новой массы деталей будет произведено по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^n m_{\partial i} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_{mi}},$$

где $m_{\partial i}$ - масса детали до замены материала, кг;

ρ_a - плотность алюминиевого сплава АМг6.М, $\rho_a = 2640$ кг/м³;

ρ_{mi} - плотность материала, из которого изготовлена деталь, кг/м³;

n - количество деталей, материал которых подвергается замене, шт.

Таким образом, новая масса деталей равна 0,13 кг.

Можно также определить абсолютное и относительное снижение массы изделия.

$$0,351 - 0,13 = 0,221 \text{ кг}$$

$$\frac{0,221}{25,9} \cdot 100\% \approx 0,85\%$$

2. Оборудование для нанесения МДО-покрытия на выбранные детали

Режимы и оборудование для нанесения МДО-покрытия на детали типа "упор" в виду их небольших габаритов и невысокой точности не являются уникальными. Может применяться широко используемая установка, состоящая из:

- источника питания;
- рабочей ванны (ванны оксидирования) с системой поддержания температуры и перемешивания электролита, материал ванны - нержавеющая сталь, полипропилен, фторопласт;
- ванны приготовления электролита с ТЭНами для нагрева воды;
- ванны промывки проточной водой;
- системы крепления деталей, подвеска имеет индивидуальную конструкцию и разрабатывается под конкретную деталь.

При необходимости линия комплектуется дистиллятором, датчиками температуры, расходомерами, фильтрами для очистки электролита.

Подобная установка изображена на рисунке 5.

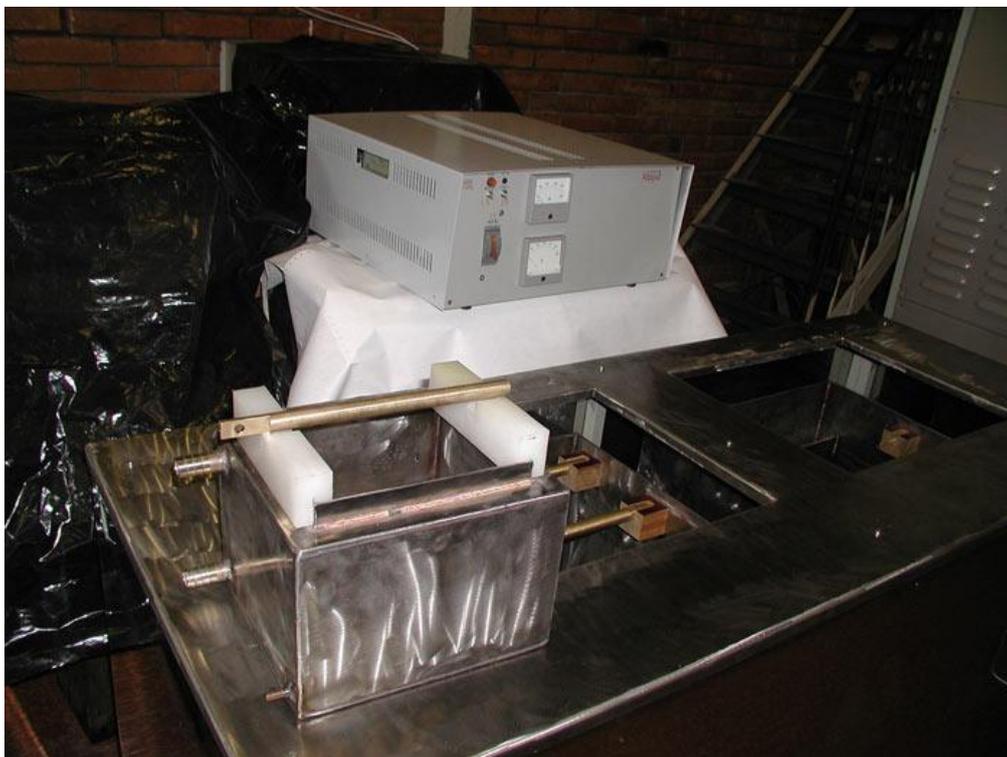


Рисунок 5. Установка для нанесения МДО-покрытия на поверхность деталей типа "упор"

Нанесение же МДО-покрытия на поверхность сектора балки представляет определённые трудности. Во-первых, сектор приварен к балке, вся конструкция имеет существенные габариты, что потребует в свою очередь внушительных габаритов ванны. Во-вторых, наличие МДО-покрытия требуется только в определённом месте (смотрите рисунок 1). Нанесение покрытия на всю поверхность балки нецелесообразно как с точки зрения излишнего расхода электрической энергии, так и с точки зрения сложности рассеива-

ния большого количества тепла, выделяющегося на значительной поверхности при требуемой для протекания процесса плотности тока.

Учитывая предыдущие положения, предлагается установка, схема которой изображена на рисунке 6.

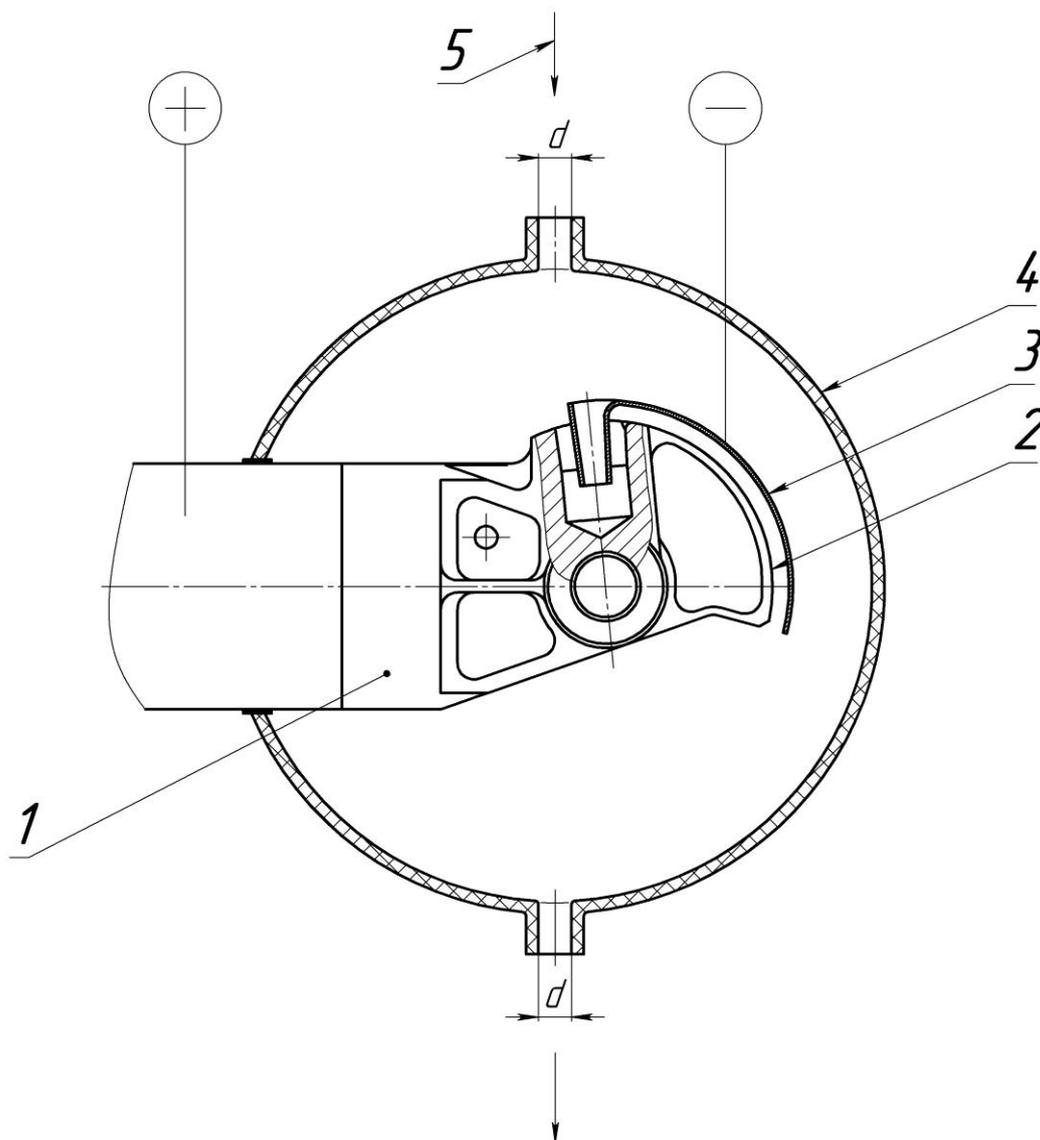


Рисунок 6. Схема установки для нанесения МДО-покрытия на поверхность сектора балки

На данном рисунке 1 - сектор балки; 2 - поверхность, на которую требуется нанести МДО-покрытие; 3 - электрод из нержавеющей стали, повторяющий форму поверхности 2; 4 - кожух на поверхности балки, в который поступает сверху и сливается снизу электролит 5. Рассчитаем скорость течения электролита, достаточную для рассеивания тепла, выделяющегося на поверхности сектора в процессе МДО.

Определим, исходя из закона Джоуля-Ленца, количество теплоты, выделяющееся на поверхности сектора в процессе МДО:

$$Q = UI t ,$$

где U - напряжение, подводимое к сектору и электроду, $U = 600 \text{ В}$;

I - сила тока,

$$I = iS,$$

где i - плотность тока, $i = 90 \frac{\text{А}}{\text{дм}^2}$;

S - площадь поверхности сектора, на которую наносится МДО-покрытие, $S = 0,125 \text{ дм}^2$;

t - время, в течение которого наносится МДО-покрытие.

С другой стороны, количество теплоты, поглощённое электролитом, определяется по формуле

$$Q = Cm\Delta T,$$

где C - массовая теплоёмкость электролита; т.к. основная составляющая электролита -

вода, примем для расчётов $C = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

m - масса нагреваемого электролита,

$$m = \rho V,$$

где ρ - плотность электролита, $\rho \approx 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V - объём электролита, который можно представить как объём цилиндра, площадь основания которого равна площади сечения входного отверстия установки диаметром d (смотрите рисунок 6), а высота которого равна произведению скорости течения электролита v на время t , в течение которого наносится МДО-покрытие, таким образом

$$V = \pi \frac{d^2}{4} vt,$$

где d - диаметр входного отверстия установки, $d = 13 \text{ мм}$;

v - скорость течения электролита, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

ΔT - допустимое изменение температуры электролита, примем $\Delta T = 20 \text{ К}$.

Если пренебречь количеством теплоты, расходуемым на нагрев кожуха установки и сектора балки, тогда

$$UiSt = C\rho\pi \frac{d^2}{4} vt\Delta T$$

Выразим искомую скорость течения электролита

$$v = \frac{4UiS}{C\rho\pi d^2 \Delta T}$$

Подставим в получившуюся формулу имеющиеся значения

$$v = \frac{4 \cdot 600 \cdot 90 \cdot 0,125}{4200 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot 0,013^2 \cdot 20} = 0,61 \frac{м}{с} = 4,86 \frac{л}{мин}$$

Определённую сложность представляет выбор электролита. Проблема в том, что перед нанесением покрытия внутренние конуса сектора и корпуса стопора уже разделаны совместно начисто. Поэтому изменение геометрических размеров внутреннего конуса сектора в процессе нанесения МДО-покрытия не допускается.

В данном случае, исходя из опыта, следует выбрать электролит, содержащий 2 г/л щёлочи и 8-10 г/л жидкого стекла, т.к. щелочной раствор растворяет алюминиевую основу, компенсируя, таким образом, рост кристаллического слоя МДО-покрытия. Глубина МДО-покрытия должна быть около 100 мкм, раствор электролита при этом должен быть незагрязнённым.

Заключение

В результате применения микродугового оксидирования алюминиевых сплавов и изучения его особенностей:

- 1) удалось снизить массу типового узла раскрытия;
- 2) удалось повысить надёжность функционирования узла качения;
- 3) были разработаны схемы и выбраны режимы нанесения МДО-покрытия на детали типового узла раскрытия.

Следует подчеркнуть, что разобранные выше случаи являются лишь одним из примеров использования данной технологии. Нанесение МДО-покрытия на алюминиевый сплав значительно увеличивает эксплуатационные характеристики алюминиевого сплава и расширяется область его использования. Благодаря чему алюминиевые сплавы можно использовать в условиях повышенного износа, агрессивной среды, теплового удара, высокого пробойного напряжения, когда обычно от алюминиевых сплавов отказываются в пользу более тяжёлых (титановые сплавы, стали), тем самым проигрывая в массе. Это особенно актуально для аэрокосмической промышленности, где применяется довольно много алюминиевых сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами, а также является предпочтительным максимально возможное снижение массы разрабатываемой конструкции. Также следует учесть, что процесс нанесения МДО-покрытия является довольно технологичным, становясь тем самым наиболее оптимальным решением по сравнению с использованием более дорогих и сложнонаносимых покрытий.

Список литературы

1. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л. Микродуговое оксидирование (обзор) // Приборы. 2001. № 9. С. 13-23.
2. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л. Микродуговое оксидирование (окончание) // Приборы. 2001. № 10. С. 26-36.

3. Эпельфельд А.В. Микродуговое оксидирование // 2-я Всесоюзная научно-техническая конференция «Ресурсо-, энергосберегающие и наукоемкие технологии в машино- и приборостроении» (Нальчик, 21-23 мая 1991 г.): тез. докл. М.: АТН РСФСР, 1991. С. 47-48.

Application of micro-arc oxidation methods in making the structure elements of spacecraft

06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0712840

V.K. Shatalov¹, A.O. Shtokal^{1,2}, E.V. Rykov², K.B. Dobrosovestnov²¹Kaluga Branch of Bauman MSTU. NE Bauman, Kaluga, 248000, Russian Federation²FL FGUP "NPO im.S.A. Lavochkina", Kaluga, 248000, Russian Federationvkshatalov@yandex.rucuauthemocl@yandex.rurik@laspace.ruDKB@laspace.ru

When designing any spacecraft, the opening elements of the structure are applied in which deployment and locking units are used.

There is a transporting step i.e. an insertion of the deployment unit in the folded state into orbit. During this step the deployment unit is under considerable vibratory loads, which are accepted by thrusts. Since the thrusts at this step work under increased wear conditions it is offered, considering a protuberant surface hardness of the micro-arc oxide (MAO) coating, to replace a constructional material of the thrusts with a larger density for the MAO-coated aluminium alloy.

The step of deploying, at which required angle of deployment is provided by the rolling unit, is realized after the spacecraft has been placed into calculated orbit. This unit contains the target sleeve with the bearing, which provides reliable locking by means of the penetration in the inner cone of beam sector. To increase the product reliability and avoid a possibility for occurring the wear slot and burrs it is necessary to increase the hardness of the sector surface on which the target sleeve bearing rolls. The most rational solution is to form the local micro-arc oxide coating on the beam sector surface.

Application of the micro-arc oxidation of aluminium alloys and research of the micro-arc oxidation specificities enable us:

- 1) to decrease the typical deployment unit mass (by 0.221 kg or 0.85 %);
- 2) to increase the rolling unit operation reliability;
- 3) to design the schemes and select the conditions to form the micro-arc oxide coating on the parts of the typical deployment unit.

The micro-arc oxide coating formed on the aluminium alloy is of significance for the aerospace industry that uses a diversity of aluminium alloys and prefers the structure mass decrease as much as possible. It should be appreciated that the process to form the micro-arc oxide coating is production friendly because it does not need the complex expensive equipment and is easily regulated by changing the electrolyte composition and the current conditions.

Publications with keywords: [aluminium alloys](#), [micro-arc oxide coating](#), [spacecraft mass reducing](#)

Publications with words: [aluminium alloys](#), [micro-arc oxide coating](#), [spacecraft mass reducing](#)

References

1. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V., Lyudin V.B., Borisov A.M., Krit B.L. [Micro-arc oxidation (review)]. *Pribory*, 2001, no. 9, pp. 13-23. (in Russian).
2. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V., Lyudin V.B., Borisov A.M., Krit B.L. [Micro-arc oxidation (completion)]. *Pribory*, 2001, no. 10, pp. 26-36. (in Russian).
3. Epel'fel'd A.V. [Micro-arc oxidation]. *2-ya Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Resurso-, energosberegayushchie i naukoemkie tekhnologii v mashino- i priborostroenii": tez. dokl.* [2nd All-Union Scientific-Technical Conference "Resource saving, energy saving and science-intensive technologies in machine building and device building": abstracts], Nal'chik, 21-23 May 1991. Moscow, ATN RSFSR Publ., 1991, pp. 47-48. (in Russian).