

УДК 621.793.7:629.78

Некоторые особенности серебряных покрытий в различных формирования гравитационных условиях

Б. Е. Патон¹, В. Ф. Лапчинский¹, Е. С. Михайловская¹,
А. А. Гордонная¹, В. Н. Сладкова¹, В. Ф. Шулым¹, Л. О. Незнамова²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

²РКК «Енергія», Росія

Надійшла до редакції 17.06.97

Проведені порівняльні дослідження макронапруг і топографії поверхні срібних покрив, отриманих за допомогою універсального ручного інструменту конструкції ПЕЗ ім. Є. О. Патона на Землі та у відкритому космосі. Напруги I роду, що виникають в срібних покривах товщиною 350—500 нм, нанесених на підкладки із сплаву Д16, в земних умовах складають -30 ± 90 МПа. Для аналогічних покривів товщиною 600—800 нм, отриманих у космосі, напруги I роду практично відсутні. Срібні покриви, отримані на навколоземній орбіті, матимуть більший ресурс роботи, ніж отримані на Землі, тому їх доцільно наносити у відкритому космосі.

При осуществлении технологических операций в открытом космическом пространстве требуется широкое использование разного рода покрытий (Патон, 1977; Патон и др., 1984; Никитский, Жуков, 1983; Загребельный и др., 1988). Необходимость применения отражающих, просветляющих и др. покрытий в космосе выделила даже в последнее время из космической технологии отдельное направление — оптическую технологию (Петровский, Воронков, 1984; Космическая оптика, 1980).

Целый ряд практических задач, связанных с нанесением покрытий в космосе, можно успешно решать с помощью универсального ручного инструмента (УРИ), сконструированного сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. В 1984 г. космонавтами С. Е. Савицкой и В. А. Джанибековым инструмент был испытан в открытом космосе (Лапчинский и др., 1985; Paton et al., 1989). Наряду с осуществлением процессов резки, пайки, сварки материалов были получены образцы с серебряными покрытиями. Основной задачей испытаний была демонстрация широких возможностей самого инструмента, поэтому эксперимент по получению серебряных покрытий нельзя считать вполне корректным. Однако в условиях почти полного отсутствия сведений о свойствах покрытий, полу-

ченных в открытом космосе, даже самая малая информация об этом представляет несомненный интерес. Следует отметить также, что исследования, о которых речь пойдет ниже, были проведены сразу же после окончания эксперимента, однако результаты их, учитывая специфику того времени, находились в закрытых отчетах.

Испарение серебра чистоты 99.99 осуществлялось из молибденовых тиглей с помощью внешнего электронно-лучевого нагрева тигля. На орбите покрытие наносилось при давлении $10^{-4} \div 10^{-5}$ Па и уровне микрогравитации $g = 1 \cdot 10^{-5} g_0$, где g_0 — гравитация на поверхности Земли. На Земле покрытие формировалось в вакуумной камере с давлением остаточной атмосферы $5 \cdot 10^{-2}$ Па. Были получены 2 подложки с покрытием из Ag и соответственно 2 наземных аналога. В качестве подложек размером $240 \times 180 \times 2$ мм использовался листовой прокат из сплава Д16. Перед нанесением покрытия каждая подложка прошла следующие этапы обработки: обезжикивание и травление в щелочном растворе, промывка водой, анодирование: H_2SO_4 180 г/л; $T = 20^\circ C$; $i = 1.0 \div 1.5$ А/дм²; $u = 18 \div 20$ В, $t = 40$ мин, промывка водой, окраска согласно ТУ 6-14-515-70; окончательная промывка водой, сушка. В результате такой обработки под-

ложки приобрели черный матовый цвет. Исходное направление текстуры проката довольно отчетливо просматривалось визуально.

Настоящая статья содержит сведения о влиянии условий получения Ag-покрытий на величину напряжений I рода σ , параметр решетки a и топографию их поверхности. Определение напряжений I рода в серебряных покрытиях проводилось по изменению смещения пика линии (420) Ag на дифрактограммах, снятых в С-излучении на установке ДРОН-3 по методике (Баррет, Массальский, 1984). При измерениях имело место сильное уширение линии из-за мелкодисперсной структуры покрытий, что, естественно, несколько снижало точность измерений. Можно считать, что она составляла 20 МПа при определении напряжений I рода. Ошибка измерения параметра решетки составляла 0.00014 нм.

В таблице представлены значения σ (средние для 10 образцов) и параметра решетки a в Ag-покрытиях, полученных с помощью УРИ при разных уровнях гравитации.

Значения напряжений I рода и параметр решетки

Номер	Условия получения	$\sigma \pm \Delta\sigma$, мПа	a , нм	$a_{\text{табл}} - a$, нм
1	космос	-16 ± 20	0.40833	0.00027
2	космос	$+25 \pm 20$	0.40805	0.00055
3	Земля	$+72 \pm 20$	0.40770	0.00090
4	Земля	-52 ± 20	0.40800	0.00060

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в покрытиях, полученных в космосе и на Земле, есть как сжимающие, так и растягивающие напряжения, что является скорее всего результатом сильно выраженного рельефа исходной подложки.

Однако по абсолютной величине напряжения I рода в покрытиях, полученных на Земле, составляют $-30 \div +90$ мПа, а в покрытиях, полученных в космосе, находятся в пределах ошибки измерения.

Из приведенных в таблице результатов видно также, что параметр решетки Ag-покрытий, полученных в космосе, меньше отличается от табличного значения, чем таковой для покрытий, нанесенных на Земле. Табличное значение параметра решетки серебра составляет 0.40860 нм.

Изучение топографии поверхности Ag-покрытий проводилось на сканирующем электронном микроскопе СЭМ-515. Образцы размером 10×10 мм вырезали с помощью ножниц типа гильотины. На фотографиях, приведенных на рис. 1, видно, что, испытывая деформационное воздействие при резке, покрытия в местах, прилегающих к краю образцов,

разрушаются. Однако характер разрушения покрытий, нанесенных в космосе и на Земле, различен. В покрытиях, нанесенных на Земле (рис. 1, а), наблюдается густая сеть трещин, имеются многочисленные сколы участков покрытия. Серебряные покрытия, нанесенные в космосе, при резке не имеют сколов вплоть до самого края образца (рис. 1, б, в), а образуемые трещины распространяются преимущественно по параллельным линиям. Поверхность покрытий, полученных в космических условиях, повторяет рельеф подложки (рис. 2, б). На фотографии, выбранной из большого числа подобных, видна исходная текстура подложки. В аналогичных покрытиях, полученных на Земле, этого не наблюдается (рис. 2, а). Причем воспроизведение рельефа подложки у серебряных покрытий, полученных в космосе, имеет место при толщинах (600÷800 нм) — больших, чем у соответствующих покрытий, полученных в земных условиях (350÷500 нм). Уже отмечалось (Лукаш и др., 1985), что при одинаковых режимах испарения покрытия, нанесенные в космосе, имеют толщину большую, чем их земные аналоги, из-за большей скорости испарения материала в условиях невесомости. Толщина покрытий, исследуемых в настоящей статье, оценивалась по поперечным шлифам.

Для серебряных покрытий, полученных в земных условиях, характерно также и то, что трещины при его разрушении имеют характер скола (рис. 3, а), а у аналогичных покрытий, полученных в условиях космоса — характер вязкого разрушения (рис. 3, б). Иллюстрация характера разрушения Ag-покрытий, полученных в космосе и на Земле, подтверждает вывод о том, что покрытия, полученные в условиях невесомости, менее напряженны.

Трудно с полным обоснованием назвать причину наблюдавшихся отличий свойств Ag-покрытий, полученных в различных гравитационных условиях, из-за отсутствия контроля многих параметров при проведении эксперимента. Можно, однако, предположить, что, так как испаряемый материал при формировании покрытия вначале длительное время пребывает в жидкой фазе, затем переходит в паровую fazu и, наконец, конденсируется на подложке в виде твердой пленки, то среда, а также скорость осаждения, толщина покрытия, температура подложки, энергия конденсирующихся частиц (Степченко и др., 1983) и их взаимодействие существенно влияют на свойства получаемых покрытий. Показано (Черемской и др., 1990), что субмикропористость Ag-покрытий, полученных в космосе меньше, чем у соответствующих им земных аналогов. Распределение субмикропор по размерам в космических образцах более однородно, чем в наземных. Поскольку напряжения I рода, являясь макронап-

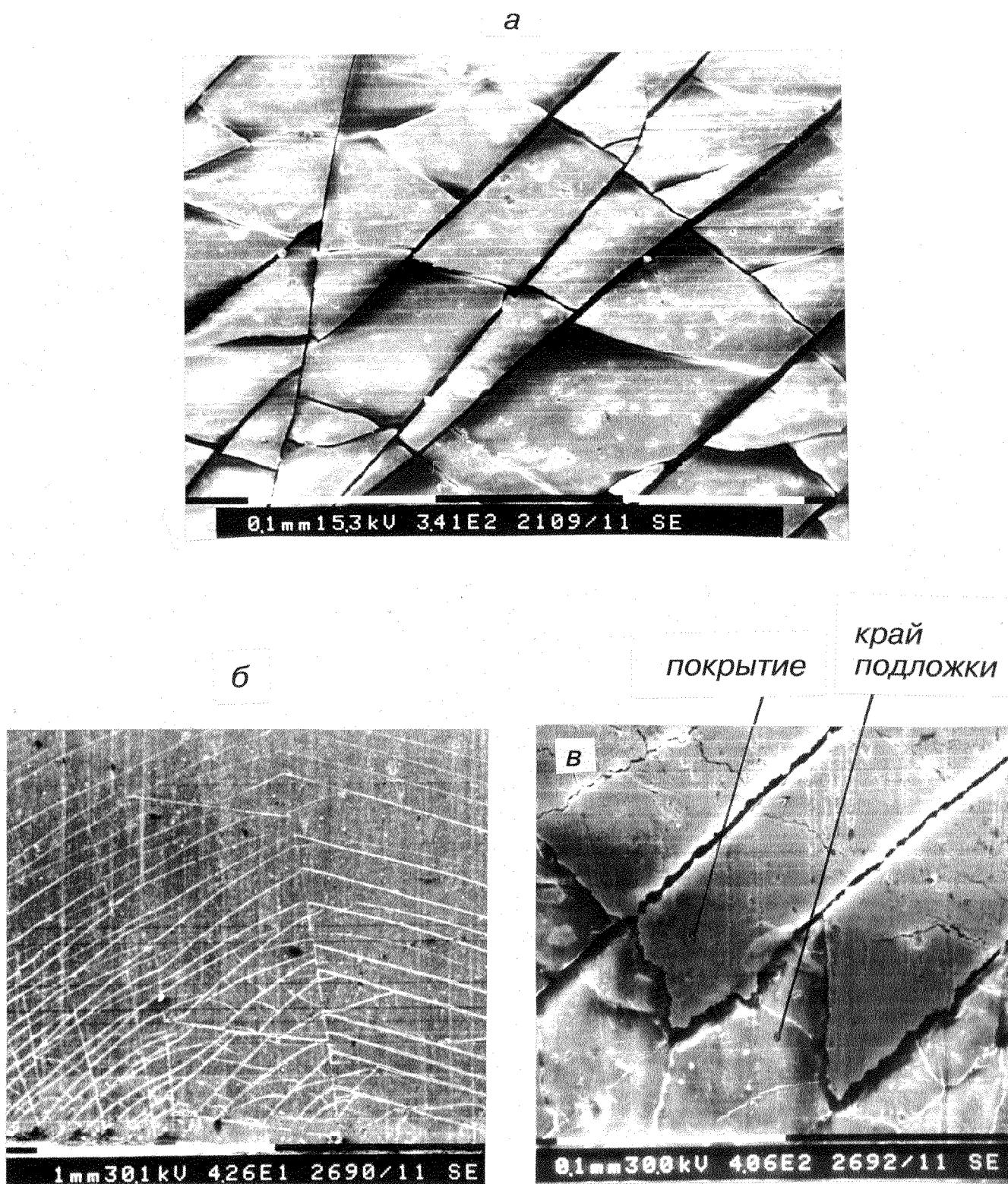
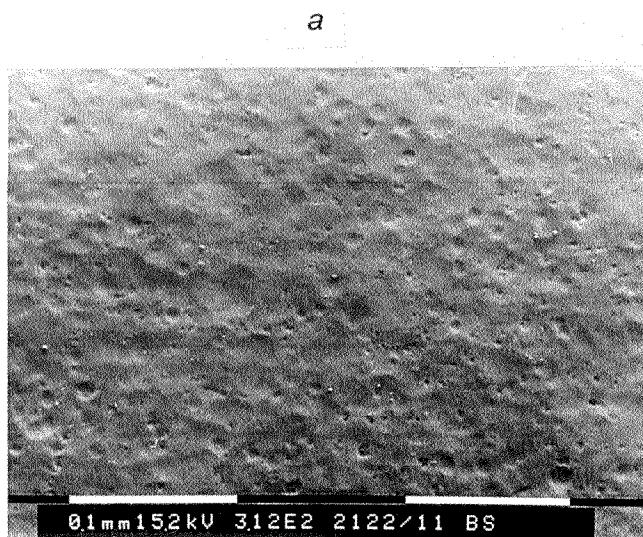
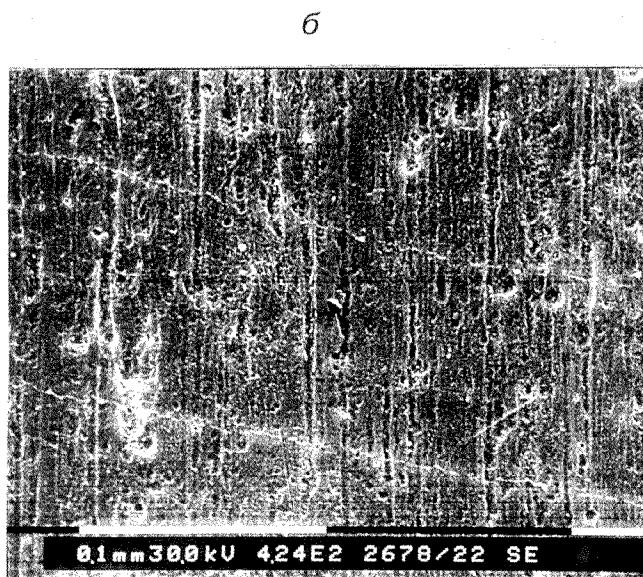


Рис. 1. Топография поверхности серебряных покрытий, нанесенных с помощью УРИ на Земле (*а*) и в космосе (*б*, *в*) (край вырезанных для исследования образцов)



Толщина покрытия 350 — 500 нм



Толщина покрытия 600 — 800 нм



Рис. 2. Топография поверхности серебряных покрытий, полученных в наземных (а) и космических (б) условиях

Рис. 3. Характер трещин при разрушении серебряных покрытий, нанесенных на Землю (а) и в космосе (б)

ржениями, уравновешиваются во всем объеме исследуемых покрытий, то результаты, полученные в настоящей статье, согласуются с выводами Черемского и др. (1990), так как известно, что (до определенного предела) чем больше в материале дефектов, тем более он напряжен. Образно процесс формирования Ag-покрытий в различных гравитационных условиях можно представить так: силы электромагнитного взаимодействия между атомами серебра под влиянием различных внешних факторов действуют таким образом, что на Земле атомам приходится «втискиваться» в пространство над подложкой, а в космосе они «свободно располагаются».

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Напряжения I рода, которые возникают в Ag-покрытиях толщиной 350 ± 500 нм, нанесенных с помощью УРИ, в земных условиях на подложки из сплава D16 составляют $-30 \pm +90$ мПа. У аналогичных покрытий толщиной 600 ± 800 нм, полученных в космосе, напряжения I рода практически отсутствуют.

2. Параметр решетки серебряных покрытий, полученных в условиях космоса, меньше отличается от параметра решетки монолитного серебра, чем у земных аналогов.

3. Ag-покрытия, полученные в открытом космосе, воспроизводят рельеф подложки, в отличие от земных аналогов, и при толщинах, больших, чем у соответствующих наземных образцов.

4. При разрушении серебряных покрытий, нанесенных на Земле, трещины имеют характер скола, а у нанесенных в открытом космосе — характер вязкого разрушения.

5. Анализ результатов измерений напряжений I рода, параметра решетки Ag-покрытий и изучение топографии поверхности покрытий позволяют предположить, что серебряные покрытия, полученные в условиях открытого космоса будут иметь больший ресурс работы, чем аналогичные покрытия, полученные на Земле и доставленные в космос транспортным кораблем.

Учитывая вышеизложенное, есть все основания утверждать, что космическая среда более благоприятна для формирования покрытий, чем земная. Авторы поддерживают мнение (Петровский, Воронков, 1984; Bruns et al., 1977) о целесообразности проведения непосредственно в открытом космосе технологических операций, связанных с нанесением покрытий.

Баррет Ч. С., Массальский Т. Б. Структура металлов: Пер. с англ. в двух частях / Под ред. М. Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1984.—Ч. 2.—555 с.

Загребельный А. А., Лукаш Е. С., Никитский В. П. и др. Развитие техники нанесения тонкопленочных покрытий в

- натурах условиях // Сборник тр. XXII Чтений, посвящ. разраб. науч. исслед. и развития идей К. Э. Циолковского. — М.: ИИЕТ АН СССР, 1988.—С. 134—138.
- Космическая оптика // Тр. IX междунар. конгр. междунар. комиссии по оптике, Санта-Моника, 9—13 окт., 1972 г. / Пер. с англ. А. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1980.
- Лапчинский В. Ф., Никитский В. П., Загребельный А. А. и др. Испытание ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе // Проблемы космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 7—15.
- Лукаш Е. С., Лапчинский В. Ф. и др. Некоторые результаты анализа образцов покрытий, полученных в космосе // Проблемы космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 81—87.
- Никитский В. П., Жуков Г. В. Тонкие пленки в космической технике и технологии // Идеи К. Э. Циолковского и проблемы космического производства: Тр. 18 Чтений, посвящ. разраб. науч. наследия и развития идей К. Э. Циолковского, Калуга, 13—17 сент., 1983. — М., 1984.—С. 78—81.
- Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Сварочные процессы в космосе // Сварка и спецэлектрометаллургия. — Киев: Наук. думка, 1984.—С. 121—129.
- Патон Б. Е. Проблемы космической технологии // Космическое материаловедение и технология. — М.: Наука, 1977.—С. 5—12.
- Петровский Г. Т., Воронков Г. Л. Оптическая технология в космосе. — Л.: Машиностроение, 1984.—158 с.
- Степенко В. В., Мовчан Б. А., Миченко В. А. Структура и отражающие свойства серебряных покрытий, полученных прямым электронно-лучевым испарением и ионным распылением // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1983.—Вып. 19.—С. 47—49.
- Черемской П. Г., Топтыгин А. Л., Незнамова Л. О. Диагностика объемных микронеоднородностей покрытий, конденсированных в условиях полета орбитальных станций // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики: Тез. докл. V Королевских чтений II республ. конф. — Киев, 1990.—С. 50—51.
- Brun A. V., Grechko G. M., Gubariev A. A., et al. Orbiting solar telescope on «Salut-4» station // Acta astronautical.—1977.—4.—P. 1121—1125.
- Paton B. E., Djanibekov V. A., Savitskaya S. E., et al. The test of the versatile hand electron beam tool in space. Welding under extreme conditions processing of the international conference under the auspices of the international institute welding. — Helsinki: Pergamon press, 1989.—P. 189—196.

SOME PECULIARITIES OF FORMATION OF SILVER COATINGS UNDER VARIOUS GRAVITATION CONDITIONS

B. E. Paton, V. F. Lapchinskii, E. S. Mikhailovskaya, A. A. Gordonnaia, V. N. Sladkova, V. F. Shulym, and L. O. Neznamova

Microstrains and topography of silver coatings made under ground-based conditions and in the outer space are compared. The coatings were made with the use of a hand-device constructed at the E. O. Paton Electric Welding Institute, Academy of Sciences of Ukraine. First-kind strains arising in silver coatings 350 ± 500 nm thick on the D16 alloy base are $-30 \pm +90$ MPa when the coatings are made under ground-based conditions. Similar coatings 600 ± 800 nm thick made in the outer space have virtually no first-kind strains. We believe that the silver coatings made in orbiting laboratories will have longer operating time than the coatings made on the Earth.