

УДК 629.783

DOI 10.17223/19988621/44/7

В.И. Халиманович

ВЛИЯНИЕ ЗОЛОТОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПРОВОЛОКИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ВЯЗАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ АНТЕНН

Теоретически рассмотрено влияние толщины золотого покрытия на диаграмму изгиба вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм. Показано, что покрытие толщиной примерно до 2 мкм практически не сказывается на диаграмме изгиба вольфрамовой микропроволоки, а следовательно, практически не должно сказываться на физико-механических свойствах отражающей поверхности антенны, связанной из такой микропроволоки.

Ключевые слова: трансформируемая антенна, радиоотражающая поверхность, вольфрамовая микропроволока, золотое покрытие.

Трикотажные материалы из микропроволок широко используются в космической технике в качестве отражающей поверхности (ОП) рефлекторных трансформируемых параболических антенн [1]. Для увеличения отражающих свойств антенны и улучшения ее радиотехнических характеристик микропроволока обычно покрывается слоем золота толщиной примерно 0,2 мкм. Однако, как показывают теоретические расчеты и экспериментальные исследования [2], при попадании крупногабаритной антенны в струи стационарных плазменных двигателей спутников происходит распыление (эрозия) золотого покрытия, величина эрозии при этом может достигать нескольких микрон. Поскольку толщина покрытия, определяющая коэффициент отражения радиоотражающей поверхности, составляет десятые доли микрона, эрозионное воздействие указанных струй может существенно снизить эффективность антенны. В связи с этим требуется увеличить толщину покрытия, как минимум, до 1 мкм или даже выше. Золото очень пластичный металл. Поэтому возникают сомнения, примет ли позолоченная микропроволока в сетеполотне при раскрытии антенны свою первоначальную форму. Иначе произойдет отклонение формы ОП от заданной и нарушится ее работа. Кроме того, не исключено, что покрытие таким слоем золота может изменить пластическую деформацию микропроволоки при вязании и тем самым нарушить отработанный процесс вязания. Поскольку крупногабаритные антенны в настоящее время вяжутся из вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм, потребовалась оценка влияния золотого покрытия толщиной 1 мкм и выше на изгибающий момент такой микропроволоки, на ее способность восстанавливать свою форму после изгиба и на оценку величины ее остаточной деформации после пластического изгиба.

Для оценки нужно знать значения модулей упругости E и предела текучести σ_t золота и вольфрама. Для золота значение модуля упругости (модуля Юнга) $E_z = 0.81 \cdot 10^5$ МПа, значение предела текучести $\sigma_{t,z} = 30$ МПа [3], для вольфрамовой проволоки $E_v = 3,5 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_{t,v} = 2200$ МПа [4].

Начиная с предела текучести удлинение образца растет при сравнительно мало меняющейся по величине растягивающей силы, поэтому в первом приближении будем принимать, что после достижения предела текучести напряжение в этих

двух материалах не меняется и остается равным пределу текучести. Относительное удлинение, соответствующее пределу текучести, обозначим для золота $\varepsilon_{т.з}$, для вольфрама $\varepsilon_{т.в}$. Согласно принятой модели, при $\varepsilon \geq \varepsilon_t$ напряжение σ не меняется с увеличением ε и остается равным σ_t .

Микропроволока, покрытая золотом, состоит из сплошного вольфрамового стержня диаметром d и золотой «трубки» внешним диаметром D и внутренним d , «надетой» на этот стержень (рис. 1, а). При изгибе микропроволоки изгибающим моментом M_x слои микропроволоки, находящиеся выше оси Z , растягиваются, нижние сжимаются, длина оси Z (нейтральной оси) остается неизменной. Поскольку усилия растяжения сетеполотна в антенне сравнительно невелики, будем рассматривать чистый изгиб. При чистом изгибе нейтральная ось совпадает с центральной осью золоченой микропроволоки.

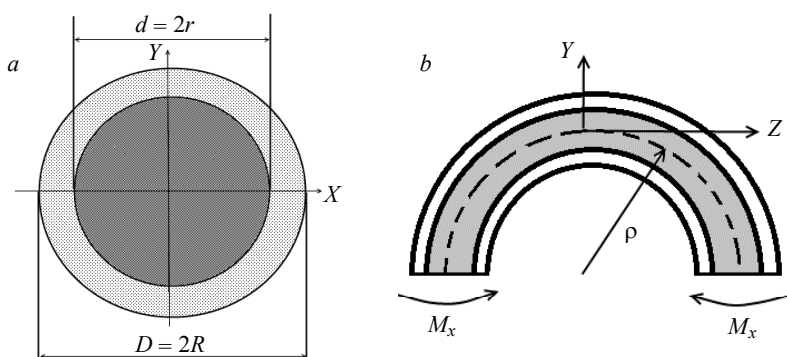


Рис. 1. Микропроволока из сплошного вольфрамового стержня

Fig. 1. Microwire made of a solid tungsten rod

Обозначим радиус кривизны нейтральной оси через ρ (рис. 1, б). Как известно, между изгибающим моментом M_x и радиусом кривизны ρ нейтральной линии при нахождении материала стержня в состоянии упругости существует следующая зависимость [4]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{E J_x}. \quad (1)$$

Здесь E – модуль упругости материала (модуль Юнга), J_x – главный центральный момент инерции относительно оси X (относительно нее изгибается микропроволока). Он зависит от вида стержня. Для сплошного стержня $J_{хв} = \frac{\pi d^4}{64}$, для труб-

$$\text{ки } J_{хз} = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad [4].$$

Направим оси Y и X вдоль радиуса поперечного сечения микропроволоки, начало координат поместим на нейтральной оси. Известно, что относительная деформация слоя, находящегося на расстоянии y от нейтральной оси, рассчитывается по формуле $\varepsilon = y/\rho$ [4]. Если $\varepsilon \leq \varepsilon_t$, то по закону Гука

$$\sigma = E\varepsilon = Ey/\rho, \quad (2)$$

а при $\varepsilon \geq \varepsilon_t$ величина $\sigma = \sigma_t$.

Согласно формуле (1), увеличение изгибающего момента M_x приводит к уменьшению радиуса кривизны ρ микропроволоки и, следовательно, согласно формуле (2), – к увеличению σ , причем тем большему, чем больше y . При радиусе кривизны $\rho_{кр.з} = E_3 R / \sigma_{т.з} = E_3 D / (2\sigma_{т.з})$, начинается пластическая деформация золота, а при $\rho_{кр.в} = E_B r / \sigma_{т.в} = E_B d / (2\sigma_{т.в})$ – пластическая деформация вольфрама.

При $\rho < \rho_{кр}$ пластическая деформация перемещается вглубь материала. Граница раздела между пластически и упруго деформированным материалом определяется величиной $y_{гр} = \sigma_{т} \cdot \rho / E$.

Разделим диапазон изменения ρ на три поддиапазона:

1. Первый – $\rho \geq \rho_{кр.з}$.

В этом поддиапазоне как золото, так и вольфрам деформируются упруго и изгибающие моменты для них рассчитываются по формуле (1) с соответствующим выражением для J_x .

Тогда, согласно формуле (1), для этого диапазона имеем

$$M_{xb1} = \frac{E_B J_{xb}}{\rho} = \frac{E_B \pi d^4}{64\rho} \quad (\text{для вольфрама});$$

$$M_{xz1} = \frac{E_3 J_{xz}}{\rho} = \frac{E_3 \pi (D^4 - d^4)}{64\rho} \quad (\text{для золота}).$$

Результирующий изгибающий момент для этого поддиапазона

$$M_{x1} = M_{xb1} + M_{xz1}$$

2. Второй поддиапазон $\rho_{кр.з} \geq \rho \geq \rho_{кр.в}$.

В этом поддиапазоне золотая «трубка» при $y < y_{гр.з}$ деформирована упруго, а при $y > y_{гр.з}$ – пластически, вольфрам же во всем этом диапазоне деформирован упруго. Поэтому, как и ранее, для вольфрама имеем

$$M_{xb2} = \frac{E_B J_{xb}}{\rho} = \frac{E_B \pi d^4}{64\rho}.$$

Рассчитаем изгибающий момент для золотой «трубки» (рис. 2, а).

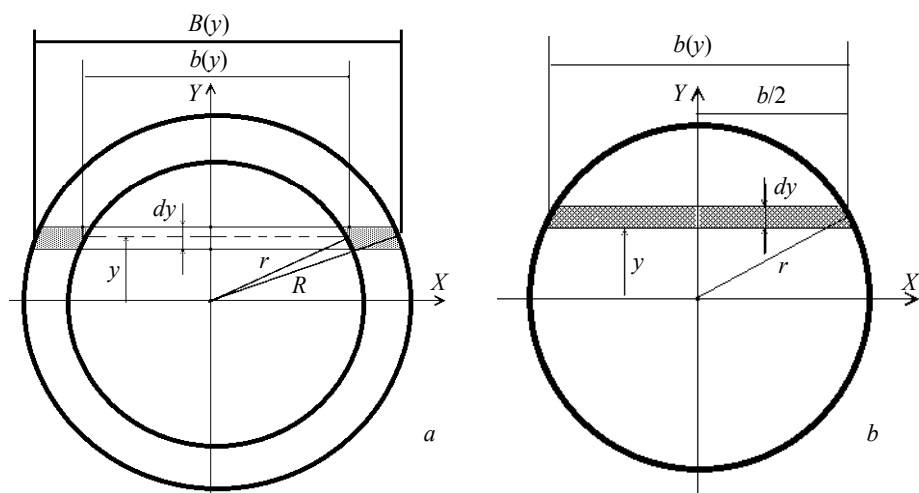


Рис. 2. Расчет изгибающего момента для золотой «трубки»

Fig. 2. Calculation of the bending moment for a gold "tube"

Разделим поперечное сечение «трубки» на узкие полоски шириной dy . Нагрузка в этой полоске приходится только на заштрихованные участки. В верхней половине поперечного сечения «трубки» в заштрихованных участках возникает нормальная растягивающая сила $dN = \sigma[B(y) - b(y)]dy$. Такая же по величине нагрузка, только сжимающая, возникает в аналогичной полоске, симметрично расположенной ниже оси X . Эти две силы создают изгибающий момент $dM_{x32} = 2\sigma[B(y) - b(y)]dy$.

Величины $B(y)$ и $b(y)$ находим по теореме Пифагора:

$$B(y) = 2\sqrt{R^2 - y^2}; \quad b(y) = 2\sqrt{r^2 - y^2}$$

и тогда

$$M_{x32} = 4 \int_0^R \sigma y \left(\sqrt{R^2 - y^2} - \sqrt{r^2 - y^2} \right) dy.$$

Поскольку величина σ меняется по разным законам в упругой и пластической областях, этот интеграл разбиваем на два:

$$\begin{aligned} M_{x32} &= 2 \int_0^R \sigma y [B(y) - b(y)] dy = \\ &= 2 \int_0^{y_{гр.3}} \frac{E_3 y}{\rho} y [B(y) - b(y)] dy + 2 \int_{y_{гр.3}}^R \sigma_{т.3} y [B(y) - b(y)] dy = \\ &= \frac{4 \cdot E_3}{\rho} \int_0^{y_{гр.3}} y^2 \left(\sqrt{R^2 - y^2} - \sqrt{r^2 - y^2} \right) dy + 4 \int_{y_{гр.3}}^R \sigma_{т.3} y \left(\sqrt{R^2 - y^2} - \sqrt{r^2 - y^2} \right) dy = \\ &= \frac{4E_3}{\rho} \left[\frac{2y_{гр.3}^3 - R^2 y_{гр.3}}{8} \sqrt{R^2 - y_{гр.3}^2} - \frac{2y_{гр.3}^3 - r^2 y_{гр.3}}{8} \sqrt{r^2 - y_{гр.3}^2} \right] + \\ &+ \frac{4E_3}{\rho} \left[\frac{R^4}{8} \arcsin\left(\frac{y_{гр.3}}{R}\right) - \frac{r^4}{8} \arcsin\left(\frac{y_{гр.3}}{r}\right) \right] + \frac{4}{3} \sigma_{т.3} \left[\sqrt{(R^2 - y_{гр.3}^2)^3} - \sqrt{(r^2 - y_{гр.3}^2)^3} \right]. \end{aligned}$$

Величина $y_{гр.3} = \sigma_{т.3} \rho / E_3$. Результирующий изгибающий момент для этого поддиапазона $M_{x2} = M_{xв2} + M_{x32}$.

3. Третий поддиапазон $\rho \leq \rho_{кр.в}$.

В этом поддиапазоне золотая «трубка» при $y < y_{гр.3}$ деформирована упруго, а при $y > y_{гр.3}$ – пластически. Изгибающий момент для нее рассчитывается по той же формуле, что и в поддиапазоне 2:

$$\begin{aligned} M_{x33} &= \frac{4E_3}{\rho} \left[\frac{2y_{гр.3}^3 - R^2 y_{гр.3}}{8} \sqrt{R^2 - y_{гр.3}^2} - \frac{2y_{гр.3}^3 - r^2 y_{гр.3}}{8} \sqrt{r^2 - y_{гр.3}^2} \right] + \\ &+ \frac{4E_3}{\rho} \left[\frac{R^4}{8} \arcsin\left(\frac{y_{гр.3}}{R}\right) - \frac{r^4}{8} \arcsin\left(\frac{y_{гр.3}}{r}\right) \right] + \frac{4}{3} \sigma_{т.3} \left[\sqrt{(R^2 - y_{гр.3}^2)^3} - \sqrt{(r^2 - y_{гр.3}^2)^3} \right]. \end{aligned}$$

Вольфрам при $y < y_{гр.в}$ деформирован упруго, а при $y > y_{гр.в}$ – пластически. Момент $M_{xв3}$, изгибающий его, рассчитывается по формуле:

$$M_{xв3} = 2 \int_0^r \sigma y b(y) dy.$$

По теореме Пифагора имеем $b(y)/2 = \sqrt{r^2 - y^2} \rightarrow b(y) = 2\sqrt{r^2 - y^2}$.

Как и для золотой «трубки», приведенный интеграл разбивается на 2 интеграла:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{хвз}} &= 2 \int_0^r \sigma y b(y) dy = \frac{4E_B}{\rho} \int_0^{y_{\text{гр.в}}} y^2 \sqrt{r^2 - y^2} dy + 4 \int_{y_{\text{гр.в}}}^r \sigma_{\text{т.в}} y \sqrt{r^2 - y^2} dy = \\
 &= \frac{4E_B}{\rho} \left[\frac{2x^3 - r^2 x}{8} \sqrt{r^2 - x^2} + \frac{r^4}{8} \arcsin\left(\frac{x}{r}\right) \right]_0^{y_{\text{гр.в}}} + 2\sigma_{\text{т.в}} \int_{y_{\text{гр.в}}}^r \sqrt{r^2 - y^2} d(y^2) = \\
 &= \frac{E_B}{2\rho} \left[(2y_{\text{гр.в}}^3 - r^2 y_{\text{гр.в}}) \sqrt{r^2 - y_{\text{гр.в}}^2} + r^4 \arcsin\left(\frac{y_{\text{гр.в}}}{r}\right) \right] - \frac{4}{3} \sigma_{\text{т.в}} \sqrt{(r^2 - y^2)^3} \Big|_{y_{\text{гр.в}}}^r = \\
 &= \frac{E_B}{2\rho} \left[(2y_{\text{гр.в}}^3 - r^2 y_{\text{гр.в}}) \sqrt{r^2 - y_{\text{гр.в}}^2} + r^4 \arcsin\left(\frac{y_{\text{гр.в}}}{r}\right) \right] + \frac{4}{3} \sigma_{\text{т.в}} \sqrt{(r^2 - y_{\text{гр.в}}^2)^3}.
 \end{aligned}$$

Здесь $y_{\text{гр.в}} = \sigma_{\text{т.в}} \rho / E_B$. Результирующий изгибающий момент для этого поддиапазона $M_{\text{хз}} = M_{\text{хвз}} + M_{\text{хз3}}$.

По полученным формулам с помощью программы построена зависимость между изгибающим моментом M_x и кривизной $1/\rho$ вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм (рис. 3). Зависимость для позолоченного вольфрама изображается точками, для непозолоченного – сплошной линией. Сравнивая эти две зависимости видим, что золотое покрытие такой толщины практически не сказывается на указанной зависимости.

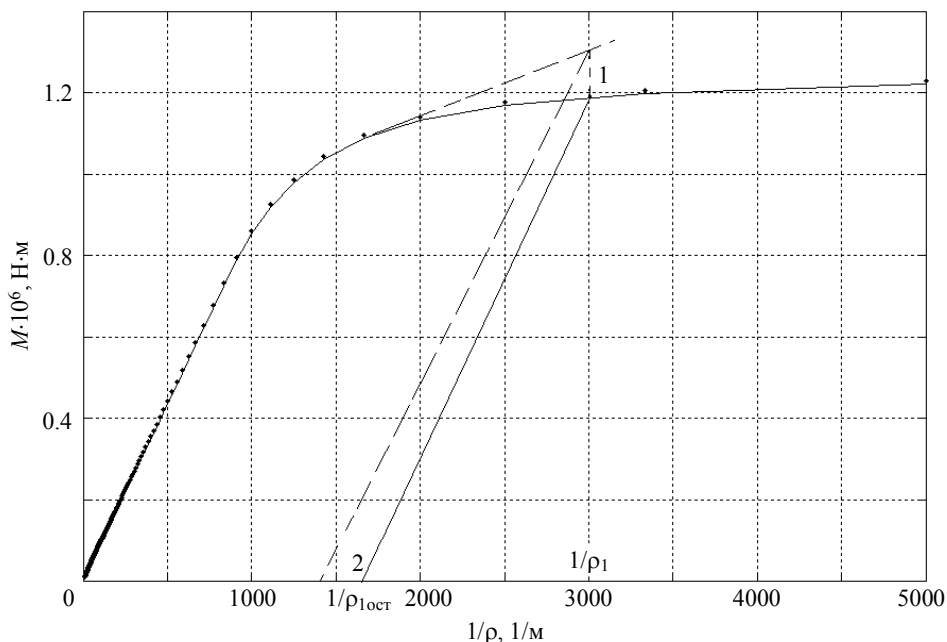


Рис. 3. Диаграмма изгиба вольфрамовой микропроволоки $\varnothing 15$ мкм без покрытия (сплошная линия) и с покрытием толщиной 1 мкм (точки)

Fig. 3. Bending diagram of a 15- μm diameter tungsten microwire: uncoated (solid line) and with a 1- μm -thick coating (dotted line)

После снятия изгибающего момента при наличии пластики появляется остаточная деформация, выраженная в том, что проволока после снятия нагрузки не становится как ранее прямой, а у нее появляется остаточная кривизна (ρ – радиус кривизны, $1/\rho$ – кривизна). Определяется остаточная кривизна следующим образом. Пусть непокрытая золотом вольфрамовая проволока изогнута до кривизны $1/\rho_1$ (рис.3). Из точки 1, соответствующей кривизне $1/\rho_1$ на зависимости $M(1/\rho)$, проводим прямую, параллельную участку упругой нагрузки. Точка пересечения этой прямой с осью $1/\rho$ (точка 2) и даст значения $1/\rho_{\text{ост}}$. Поскольку зависимости $M(1/\rho)$ для позолоченного и непозолоченного вольфрама практически одинаковы, $1/\rho_{\text{ост}}$ также будут практически одинаковы, будут практически одинаковы и $\rho_{\text{ост}}$.

Оценочные расчеты проводились для случая наличия на диаграмме растяжения как золота, так и вольфрама площадки текучести. Если же площадка текучести отсутствует, а имеет место некоторое упрочнение материала, то это приведет к некоторому уменьшению остаточной кривизны, как показано на рис. 3 пунктирной линией, однако разницы между непокрытым и покрытым золотом вольфрамом снова не будет, так как наличие золотого покрытия такой толщины практически не скажется на зависимости $M(1/\rho)$.

На рис. 4 представлены диаграммы изгиба $M(1/\rho)$ вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм без покрытия (кривая 1), с покрытием золотом толщиной 2 мкм (кривая 2) и толщиной 5 мкм (кривая 3).

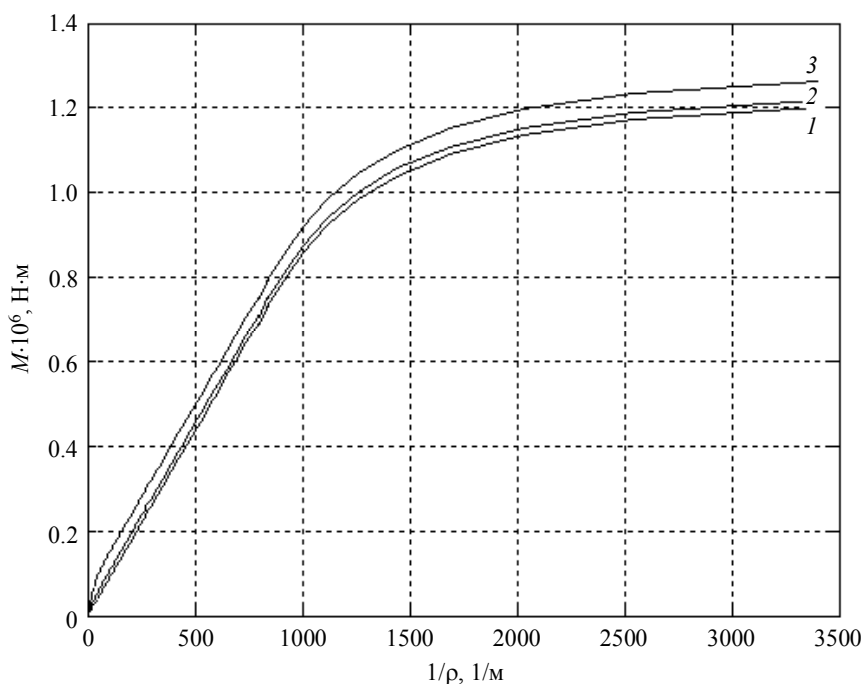


Рис. 4. Диаграмма изгиба вольфрамовой микропроволоки диаметром 15 мкм:
кр. 1 – без покрытия, кр. 2 – покрытие толщиной 2 мкм,
кр. 3 – покрытие толщиной 5 мкм

Fig. 4. Bending diagram of a 15- μm diameter tungsten microwire in:
(1) uncoated, with a (2) 2- μm -thick coating, and (3) 5- μm -thick coating

Выводы

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что покрытие микропроволоки золотом толщиной примерно до 2 мкм мало сказывается на диаграмме изгиба. Дальнейшее утолщение покрытия уже более существенно влияет на диаграмму. Однако при этом следует учесть, что расчеты проводились для монолитного золота. Нанесение золотого покрытия на микропроволоку проводилось химическим способом. Структура такого золотого покрытия может быть более рыхлой и иметь меньший модуль упругости и меньший предел текучести, чем у монолитного золота, что должно приводить к меньшему влиянию золотого покрытия на механические свойства микропроволоки. Поэтому не исключено, что нанесение покрытия даже сравнительно большой толщины может мало сказаться на диаграмме изгиба. Однако поскольку физико-механические свойства такого покрытия неизвестны, для более точного прогноза необходимо проведение экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Кудрявин Л.А., Подшивалов С.Ф., Халиманович В.И. Трикотажные металлические сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн // Технический текстиль. 2007. № 16. С. 59–64.
2. Надирадзе А.Б., Шапошников В.В., Смирнов В.А. и др. Исследование эрозионного воздействия струй стационарных плазменных двигателей на радиоотражающее сетеполотно крупногабаритных антенн космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 4. С. 120–124.
3. Шлычкова В.С., Старченко И.П. Ювелирные технологии. Влияние легирующих добавок на свойства золота [Электронный ресурс]. URL: jewelpreciousmetal.ru/technology_metallurgy_goldligatureinfluence.php
4. Справочник по цветным металлам [Электронный ресурс]. URL: <https://libmetal.ru/prop/prop%201.htm>

Статья получена 20.11.2016 г.

Khalimanovich V.I. EFFECT OF A GOLD COATING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A MICROWIRE, APPLIED FOR KNITTING OF THE LARGE TRANSFORMABLE ANTENNAS. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 6(44). pp. 80–87

DOI 10.17223/19988621/44/7

Knitted materials made of a microwire are widely used in space systems as reflecting surfaces of transformable parabolic reflector antennas. To increase the reflecting properties and improve the radio-technical characteristics of the antenna, the microwire is usually covered with a gold layer of about 0.2 microns thick. However, according to the theoretical calculations and experimental investigations, when a large antenna hits streams of stationary plasma engines of the satellites, the dispersion (erosion) of the gold covering occurs. The erosion magnitude can reach several microns. Since the covering thickness which defines the reflection factor of the radar-reflecting surface is about one-tenth of a micron, the erosivity of the specified streams can significantly reduce the efficiency of the antenna. In this regard, an increase in the coating thickness to at least 1 micron or even more is required. Since large antennas are knitted from a tungsten microwire with 15 microns in diameter, it is necessary to estimate the effect of the gold covering of 1 micron thick or more on the bending moment of such microwires, shape recoverability after a bend, and permanent deformation after a plastic bending.

In this paper, the effect of the gold coating thickness on the bending diagram of a tungsten microwire of 15 microns in diameter is theoretically considered. It has been revealed that the coating of about 2 microns thick has essentially no effect on the bending diagram of the tungsten

microwire and, therefore, does not significantly affect the physical–mechanical properties of the reflecting surface of antennas knitted from such a microwire.

Keywords: transformable antenna, radar–reflecting surface, tungsten microwire, gold coating.

KHALIMANOVICH Vladimir Ivanovich (Candidate of Physics and Mathematics, JSC «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems» (ISS))

REFERENCES

1. Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kudryavin L.A., Podshivalov S.F., Khalimanovich V.I. (2007) Trikotazhnye metallicheskie setepolotna dlya otrazhayushchey poverkhnosti transformiruemyykh nazemnykh i kosmicheskikh antenn [Knitted metal meshes for the reflecting surface of the transformable terrestrial and space antennas]. *Tekhnicheskij tekstil' – Technical textile*. 16. pp. 59–64.
2. Nadiradze A.B., Shaposhnikov V.V., Smirnov V.A., Maksimov I.A., Kochura S.G. (2008) Issledovanie erozionnogo vozdeystviya struy statsionarnykh plazmennyykh dvigateley na radiootrazhayushchee setepolotno krupnogabaritnykh antenn kosmicheskikh apparatov [The research of the erosive impact by the stationary plasma engine jets on the radio-reflective mesh of the spacecraft large-sized antennas]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva – Vestnik SibSAU*. 4. pp. 120–124.
3. Shlychkova V.S., Starchenko I.P. Vliyanie legiruyushchikh dobavok na svoystva zolota [Effect of alloying elements on the properties of gold]. *Yuvelirnye Tekhnologii – Jewelry Technology*. URL: jewelpreciousmetal.ru/technology_metallurgy_goldligatureinfluence.php.
4. Spravochnik po tsvetnym metallam [Directory of non-ferrous metals]. URL: <https://libmetal.ru/prop/prop%201.htm>.