

Радиационная стойкость покрытий на основе порошков титаната бария, модифицированных нанопорошками, до 20 % больше по сравнению с радиационной стойкостью покрытий на основе порошков  $BaTiO_3$ , модифицированных микропорошками. Увеличение радиационной стойкости определяется релаксацией электронных возбуждений на поверхности наночастиц и меньшей концентрацией образованных центров поглощения.

Таким образом установлено, что модифицирование пигментов на основе титаната бария нанопорошками  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$  вместо соответствующих микропорошков является достаточно эффективным методом повышения радиационной стойкости термостабилизирующих покрытий, изготавливаемых на их основе.

#### Библиографические ссылки

1. Михайлов М. М., Соколовский А. Н. Пигменты для термостабилизирующих покрытий // Известия вузов. Физика. 2007. № 12. С. 90–91.
2. Elektronical properties of  $(Ba,Sr)TiO_3$  on  $(Sr,Ca)RuO_3$  electrode / Seung Yong San [et al.] // J. Mater. Sci. 1999. Vol. 34. P. 6115–6119.
3. Ларин В. К., Кондаков В. М., Дедов Н. В. Плазмохимический способ получения ультрадисперсных (нано) порошков оксидов металлов и перспективы их применения // Известия вузов. Цветная металлургия. 2003. № 5. С. 59–64.
4. Установка для исследования спектров диффузного отражения и люминесценции твердых тел в вакууме / Л. Г. Косицин [и др.] // ПТЭ. 1985. № 4. С. 176–180.
5. Johnson F. S. The solar constant // J. Metrological. 1954. Vol. 11. № 6. P. 431–439.

М. М. Mikhailov, A. N. Lapin

### RADIATION RESISTANCE OF THERMO STABILIZING BARIUM TITANATE COATINGS FOR SPACE AIRCRAFTS

*Comparative analysis of diffuse reflectance spectra, integral absorption factors and their change after electron irradiation ( $E = 30 \text{ keV}$ ) for barium titanate coatings doped with aluminum oxide and zirconium oxide ( $Ba_{0.6}Al_{0.4}TiO_3$  and  $BaTi_{0.7}Zr_{0.3}O_3$ ) was carried out. It was found out that the use of  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  nano powders instead of micro powders for doping  $BaTiO_3$  increases radiation resistance of the coatings.*

*Keywords: barium titanate, reflectance spectra, radiation resistance, coatings, nano powders.*

© Михайлов М. М., Ланин А. Н., 2010

УДК 538.971

А. С. Паршин, Г. А. Александрова, О. П. Вайтузин, Е. П. Березицкая,  
Р. Е. Тихомиров, А. А. Чернятина, В. А. Харламов, Р. А. Ермолаев, В. В. Миронович

### ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ\*

*Представлены результаты исследования топографии поверхности радиопрозрачных терморегулирующих покрытий методом атомно-силовой микроскопии.*

*Ключевые слова: радиопрозрачное терморегулирующее покрытие, атомно-силовая микроскопия.*

При движении космического аппарата (КА) по орбите происходит изменение освещенности Солнцем элементов антенн, что приводит к колебаниям температуры элементов антенн в пределах до  $\pm 140$  °С. Это способно вызывать деформации рефлекторов и излучателей антенн и изменение диаграммы направленности электромагнитного излучения антенны КА. Для выполнения требований по температурным деформациям, предъявляемых к

антеннам ( $\leq 0,25$  мм), необходимо уменьшение перепада температур по поверхности элементов антенн.

Эффективным способом уменьшения перепада температур на конструкции антенны является использование светоотражающего терморегулирующего экрана из радиопрозрачного материала. Температурный режим покрытия экрана обеспечивается отношением коэффициента поглощения солнечного излучения освещенной

\*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (номер контракта П590).

поверхности  $A_s$  к коэффициенту излучения  $\epsilon$ . Чем меньше это отношение, тем эффективнее работает покрытие класса «солнечный отражатель».

Кроме электромагнитного излучения Солнца, на внешнюю поверхность космических аппаратов воздействует корпускулярное излучение – потоки электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ). Под их действием на диэлектрических поверхностях космических аппаратов скапливается неоднородный электростатический заряд. Периодически между областями поверхности с разными электрическими потенциалами происходят разряды, способствующие ухудшению характеристик оптических поверхностей и вызывающие помехи или даже сбои бортовой электронной аппаратуры [1–5]. Для защиты от электризации необходимо нанесение на внешнюю поверхность покрытия радиопрозрачных электропроводных слоев, не ухудшающих характеристики  $A_s$  и  $\epsilon$  покрытия.

Решение проблем электризации, повышения стабильности свойств терморегулирующих материалов (ТРМ) и разработка перспективных радиотехнических защитных материалов входит в задачи Федеральной космической программы России на период до 2015 г. и в планы работ ведущих предприятий космической отрасли, что подтверждает актуальность настоящей работы, результаты которой направлены на исследование свойств и технологических процессов изготовления многофункциональных композитных покрытий с наноразмерными рабочими слоями для КА с длительным сроком службы.

Применявшиеся ранее светозащитные экраны из нескольких слоев стеклоткани имеют большую массу (~300 г/м<sup>2</sup>), выделяют частицы (стекловолокно), сорбируют и выделяют загрязнения, накапливают электростатический заряд.

В качестве перспективного материала светозащитных экранов может быть использовано покрытие на основе радиационнотойкой полимерной пленки с напыленным на нее полупроводниковым материалом с высоким показателем преломления ( $n > 3$ ) и высоким электрическим сопротивлением (~10<sup>7</sup> Ом).

В отечественной технике аналогичных покрытий нет. За аналог может быть принят радиопрозрачный терморегулирующий материал фирмы Alenia, представляющий собой полиимидную пленку (каптон), толщиной 25 мкм, напыленную германием.

Среди серийно выпускаемых в России полимерных пленок наибольшей радиационной и термостойкостью обладает полиимидная пленка. Полиимидные пленки марок ПМ и ПМ-1ЭУ толщиной 40 и 20 мкм, удовлетворяют требованиям к светозащитным экранам антенн по радиопрозрачности (радиопоглощение менее 0,1 дБ в рабочем диапазоне частот). Нанесение германия на полиимидную пленку методом термического испарения в вакууме позволило получить образцы покрытий с характеристиками:

- оптические  $A_s = 0,40–0,50$ ;  $E_n = 0,62–0,75$ ;
- потери радиоионизации менее 0,1 дБ;
- поверхностное сопротивление  $\rho_s = 2 \cdot 10^8–1 \cdot 10^9$  Ом/квadrat поверхности.

Данные характеристики соответствуют требованиям к светозащитным экранам. Однако величина поверхностного сопротивления германиевого покрытия превышает

максимальное значение сопротивления, рекомендуемое для обеспечения снятия электростатического заряда 1·10<sup>8</sup> Ом/квadrat поверхности [2]. Согласно литературным данным и опыту работы с аналогичными полупроводниковыми покрытиями во время хранения происходит увеличение поверхностного сопротивления. Применение дополнительных электропроводящих слоев позволит уменьшить начальное сопротивление и сохранить требуемое сопротивление при хранении и эксплуатации материала. В качестве такого электропроводящего слоя может быть использован оксид индия.

Опробовано изготовление образцов германиевого покрытия с подслоем на основе оксидных полупроводников (прозрачное электропроводное покрытие (ПЭП)) методом термического испарения и реактивного магнетронного распыления.

В результате достигнуто поверхностное сопротивление  $\rho_s = 1 \cdot 10^7–1 \cdot 10^8$  Ом/квadrat поверхности, чего достаточно для эффективного снятия накопленного электростатического заряда, и что не вызывает снижения радиопрозрачности покрытия.

В отработке технологии получения таких покрытий большую роль играют методы исследования свойств полученных материалов, в частности, методы исследования поверхности покрытия. Одними из наиболее современных и широко используемых методов в настоящее время являются методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), которые позволяют визуализировать, диагностировать и модифицировать вещество с нанометровым уровнем пространственного разрешения [6]. Среди методов СЗМ можно особо выделить атомно-силовую микроскопию (АСМ), с помощью которой стало возможным изучать свойства не только проводящих, но и диэлектрических материалов. В представленной работе методом АСМ изучена топология поверхности радиопрозрачных терморегулирующих покрытий для КА.

*Результаты исследования микрорельефа поверхности радиопрозрачных терморегулирующих покрытий методом АСМ.* Проведено исследование микрорельефа поверхности многослойного радиопрозрачного терморегулирующего покрытия, содержащего функциональные слои германия и ПЭП. Образец представлял собой структуру, состоящую из полиимидной пленки (подложки) толщиной 40 мкм с напыленным на нее с одной стороны подслоем ПЭП и слоем германия (лицевая сторона покрытия), с другой стороны – только слоем германия (тыльная сторона покрытия). Схема поперечного сечения исследуемого образца приведена на рис. 1.

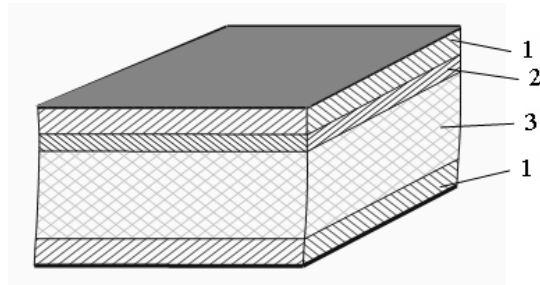


Рис. 1. Схема поперечного сечения исследуемого образца: 1 – германий; 2 – слой ПЭП; 3 – полиимидная пленка

Визуально сторона образца с подслоем ПЭП материала более гладкая и блестящая. Поверхность обратной стороны матовая. Исследование рельефа поверхности проводилось с обеих сторон в нескольких областях в зависимости от удаления от края образца. Также была изучена поверхность полиимидной подложки. Исследования проводились на сканирующей зондовой нанолaborатории ИНТЕГРА-аура методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме.

Полученные АСМ-изображения, отражающие топографию поверхности полиимидной подложки, представлены на рис. 2, 3. Размер сканируемой области  $10 \cdot 10$  мкм. Светлым цветом показаны более высокие участки поверхности, темные тона соответствуют более низким областям рельефа. Цветовая шкала высот приведена справа от 2D-изображения.

Видно, что одна сторона полиимидной пленки более гладкая, чем другая (рис. 3). Перепад высот на этой стороне составляет значение около 5 нм. Другая сторона подложки (рис. 2) имеет волнистую структуру, средняя высота которой  $\sim 40$  нм.

Топографию поверхности германиевого покрытия, нанесенного на полиимидную подложку, отражает АСМ-изображение (рис. 4). Как видно, рельеф поверхности на данной площади также представлен волнистой структурой с высотой, достигающей 30 нм. Подобная волнистая

структура на этой стороне образца наблюдалась и на двух других исследованных областях.

Изображения, полученные на поверхности германия с промежуточным слоем ПЭП, существенно отличаются от изображений поверхности германия без подслоя (рис. 5). Здесь не существует каких-либо особенностей, поверхность довольно гладкая, а перепад высот в данной области сканирования составляет всего 5 нм.

Все полученные АСМ-изображения были обработаны с помощью модуля обработки изображений программы NOVA. Для каждой области сканирования была определена шероховатость поверхности. Средняя шероховатость ( $R$ ) вычисляется по формуле

$$R = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \text{Average}|, \quad (1)$$

где Average – средняя высота, которая определяется по выражению

$$\text{Average} = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l), \quad (2)$$

где  $M, N$  – число точек;  $x, y$  – координаты в плоскости изображения.

Численные значения шероховатости исследуемого образца для каждой исследованной области представлены в таблице.

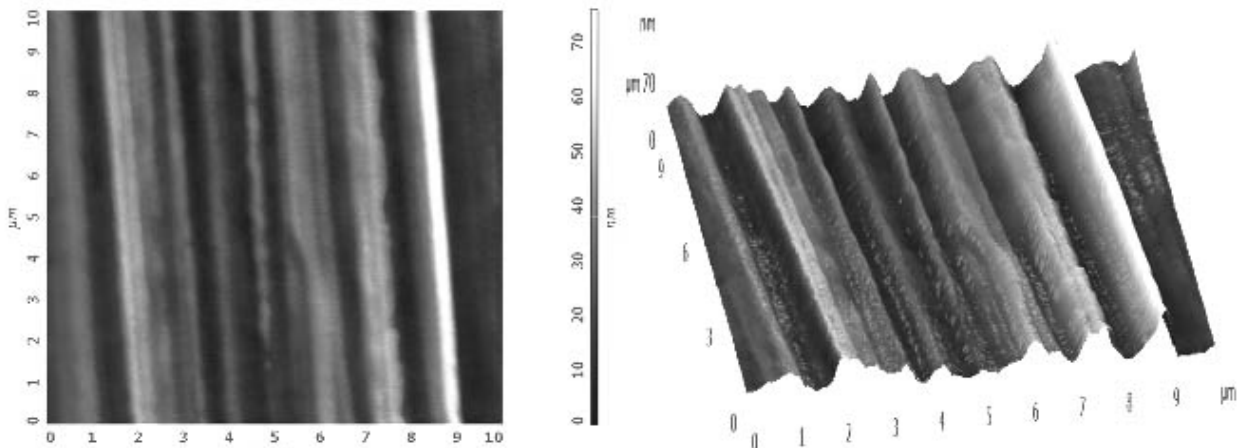


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности полиимидной подложки с тыльной стороны в двумерном (слева) и трехмерном (справа) виде

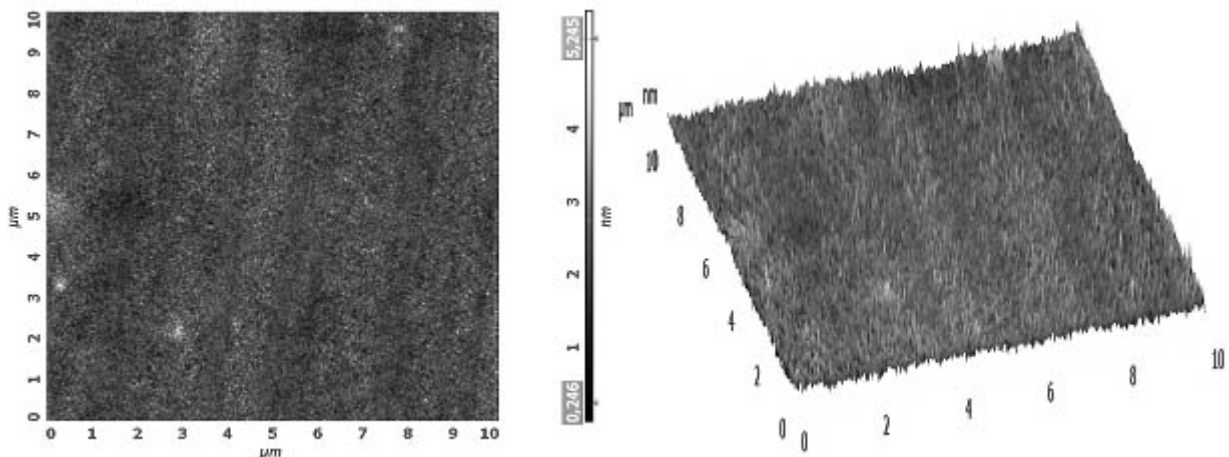


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности полиимидной подложки с лицевой стороны в двумерном (слева) и трехмерном (справа) виде

Как и следовало ожидать, шероховатость поверхности подложки с тыльной стороны пленки существенно больше шероховатости поверхности лицевой стороны. В таблице показано, что эти значения отличаются более чем на порядок. Та же самая зависимость наблюдается и на образцах с нанесенным покрытием. Несмотря на то, что шероховатость на тыльной стороне здесь несколько меньше шероховатости подложки, она также более чем на порядок превышает шероховатость лицевой стороны образца с подслоем ПЭП. Значения шероховатости покрытия с подслоем ПЭП для всех рассмотренных областей совпадают с шероховатостью подложки.

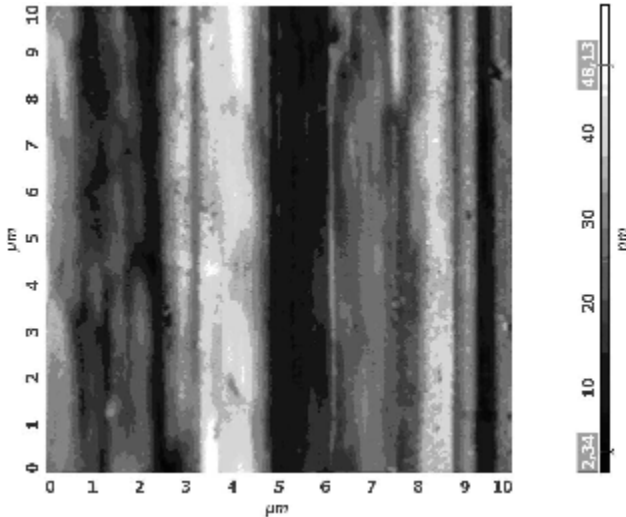


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности образца с тыльной стороны покрытия

Таким образом, можно сказать, что наблюдаемые особенности рельефа исследуемых покрытий являются следствием повторения осаждаемой пленки рельефа подложки. Наблюдаемые различия топологии покрытия и подложки на волнистой стороне, в частности в значениях шероховатости, обусловлены заполнением осаждаемым материалом впадин подложки, поэтому шероховатость поверхности покрытия меньше чем шероховатость подложки.

В дальнейшем планируется проведение исследований влияния шероховатости поверхности подложки на стабильность оптических, электрических и адгезионных свойств покрытия при различных внешних воздействиях.

В ходе экспериментальных исследований методом сканирующей атомно-силовой микроскопии исследована поверхность многослойных покрытий. Показано, что микрорельеф поверхности покрытия сильно зависит от микрорельефа исходной поверхности подложки, поэтому для определения микроструктуры покрытия необхо-

димо тщательное изучение поверхности подложек перед нанесением покрытий.

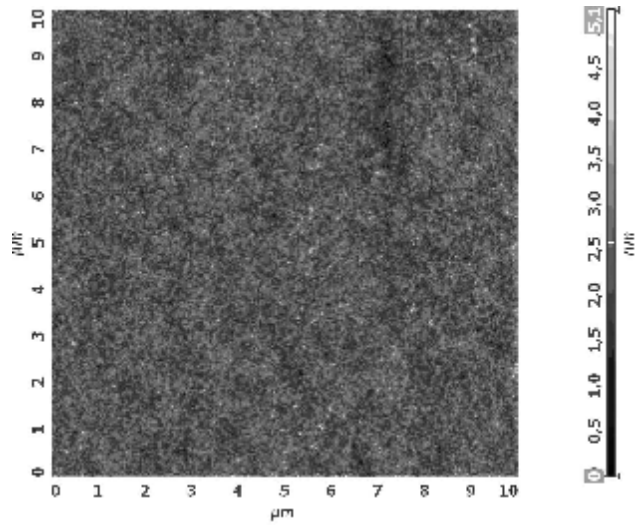


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности образца с лицевой стороны покрытия

Полученные результаты будут использованы при разработке и конструкторско-технологической отработке радиопрозрачного терморегулирующего покрытия, наноразмерных электропроводных покрытий различного назначения, в том числе защитных, терморегулирующих и радиотехнических покрытий для космических аппаратов.

**Библиографические ссылки**

1. Чернявский Г. М., Графодатский О. С., Козлов А. Г. Анализ сбоев бортовой РЭА геостационарных спутников связи. М. : ЦНТИ «Поиск». СИП, 1981. Сер. 1. № 12.
2. Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. Томск : МГП «РАСКО», 1993.
3. Garret H. B. Review of the near-earth spacecraft environment // Optics in adverse environments : Proceedings of the Seminar (Febr. 4, 5. 1980. Los Angeles) (A81-32422 14-19) ; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers ; Bellingham, 1980. P. 109–115.
4. Gard R., Knott K., Pedersen A. Spacecraft charging effects // Space Science Reviews. 1983. Vol. 34. № 3. P. 289–304.
5. Bosma J. Optical solar reflectors technology – recent development and problems // Spacecraft materials. Sp. Environ (Jun. 8–11 1983 Toulouse). Paris, 1983. P. 1–32.
6. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М. : Техносфера, 2005.

**Значения средней шероховатости для различных областей образца (S – расстояние исследуемой области от края)**

№	S, см	R, нм	
		Ge	ПЭП + Ge
1	4,5	8,3	0,4
2	7,5	5,0	0,4
3	11,5	4,8	0,4
Полиимидная подложка		10,5	0,4

A. S. Parshin, G. A. Alexandrova, O. P. Vaituzin, E. P. Berezitskaya,  
R. E. Tikhomirov, A. A. Chernyatina, V. A. Kharlamov, R. A. Ermolaev, V. V. Mironovich

## RESEARCH OF MULTIPURPOSE NANOCOATINGS FOR SPACECRAFTS BY METHOD OF SCANNING PROBE MICROSCOPY

*This work is devoted to research of topography of a surface of radiotransparent thermoregulating coatings by a method of Atomic Force Microscopy.*

*Keywords: radiotransparent, thermoregulating coatings, atomic force microscopy.*

© Паршин А. С., Александрова Г. А., Вайтузин О. П., Березицкая Е. П.,  
Тихомиров Р. Е., Чернятина А. А., Харламов В. А., Ермолаев Р. А., Миронович В. В., 2010

УДК 621.38

Л. И. Оборина, Б. Н. Исмаилов, И. В. Стерехов, И. В. Трифанов

## ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБ ВОЛНОВОДОВ КВЧ-ДИАПАЗОНА

*Представлены результаты дилатометрического определения температурного коэффициента линейного расширения после изготовления волноводов из сплава 32 НКД.*

*Ключевые слова: температурный коэффициент линейного расширения, волноводы, дилатометрические исследования, пластические деформации.*

Для изготовления полосовых фильтров диапазона крайне высоких частот с требуемыми рабочими характеристиками необходимо использовать материалы с низким температурным коэффициентом линейного расширения ТКЛР  $(1 \div 2) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  в диапазоне рабочих температур [1]. Таким требованиям может отвечать сплав 32НКД и др. (см. таблицу). Температурный коэффициент линейного расширения связан с упругостью металлов  $E$ , а также зависит от строения кристаллической решетки металлов [2]. Для металлов ГЦК (гранецентрированная решетка) и ОЦК (объемцентрированная решетка) решетками выполняется зависимость

$$\alpha V = K \chi_T, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;  $V$  – объем;  $\chi_T$  – коэффициент изометрической сжимаемости;  $K$  – константа Больцмана.

Лучшей характеристикой по  $\alpha$  обладает сплав 32НКД.

Известно, что температурный коэффициент линейного расширения зависит от ряда факторов, например, от пластической деформации. Влияние пластической деформации на коэффициент температурного расширения описывается соотношением

$$\alpha = \alpha_0 (1 + A \epsilon), \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент расширения недеформированного металла.

Коэффициент  $A$  рассчитывается по формуле

$$A = \chi_T E \gamma / 3, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\gamma$  – параметр Грюнайзена;  $\epsilon$  – степень деформации.

Параметр Грюнайзена может быть представлен следующим образом:

$$\gamma = \frac{\partial \ln \theta}{\partial \ln V}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – температура Дебая;  $V$  – объем.

Параметр  $\gamma$  слабо зависит от температуры, однако значение  $A$  в выражении (3) для ряда металлов находится в пределах 1,3...2,3.

Из этого следует, что деформация увеличивает коэффициент термического расширения металлов. При многостороннем деформировании труб волноводов малого сечения изготавливаемых из сплава 32НКД возникают напряжения в каждом сечении очага деформации при обжатии заготовки роликковой фильерой (рис. 1, 2).

### Основные характеристики сплавов с низким температурным коэффициентом линейного расширения

Сплав	$\alpha_{\text{ср}} \cdot 10^5, K^{-1}$ (20 ÷ 100 °C)	Точка Кюри, °C	$\rho$ , мкОм	$E$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$H_C$ , А/м
36Н	1,5	220	0,82	14800	447	45	12,7
32НКД	1	220	0,78	14100	451	41	12,7
35НКТ	3,5	210	0,85	–	1110	17,5	15,1