

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-61-67

УДК (UDC) 620.17:538.951

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ «ПЛЕНКА – ПОДЛОЖКА»

© Виктор Михайлович Маркочев, Григорий Петрович Егоров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;
e-mail: VMMark@yandex.ru; grigory_egorov@mail.ru

Статья поступила 4 мая 2017 г.

Цель данной работы — анализ напряженно-деформированного состояния в консольной системе «пленка – подложка». В балочном приближении проведен анализ деформаций консольной системы «пленка – подложка» под действием напряжений, возникающих при нанесении пленки. Получены общие формулы для вычисления угловой и линейной деформаций системы при различных значениях модулей упругости материалов подложки и пленки. В отличие от известной формулы Стони полученная авторами формула для угловой деформации консольной системы справедлива при различных значениях толщин пленки и подложки. Формула Стони является предельным случаем предложенной формулы при толщинах пленки, на несколько порядков меньших толщины подложки. Оценено влияние различных модулей упругости на угловую и линейную деформацию консоли, а также на распределение напряжений в системе «пленка – подложка». Показано, что если толщина подложки в 100 раз превышает толщину пленки, то угловая деформация изменяется примерно в два раза при двукратном изменении отношения модулей упругости. Проанализированы измерительные возможности консольного преобразователя напряжений в пленке в угловую деформацию конца консоли. Даны оценки чувствительности преобразователя в зависимости от отношения толщин пленки и подложки. Исследовано влияние неравномерности напряжений по толщине пленки на чувствительность консольного преобразователя. Показано, что полученные формулы для перемещений и напряжений применимы для изучения температурных деформаций и напряжений в системе «пленка – подложка». Для этого в полученных формулах напряжение в пленке следует заменить произведением модуля упругости на изменение температуры и разность коэффициентов теплового расширения материалов пленки и подложки.

Ключевые слова: подложка; напыление; пленка; механическое напряжение; консольная балка; угловая деформация; линейная деформация; измерительный преобразователь; чувствительность.

DEFORMATIONS AND STRESSES IN THE CONSOLE SYSTEM “FILM – SUBSTRATE”

© Viktor M. Markochev, Grigoriy P. Egorov

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia; e-mail: VMMark@yandex.ru; grigory_egorov@mail.ru

Submitted May 4, 2017.

The purpose of this publication is analysis of the stress-strain state in the console system “film – substrate.” Deformations of the cantilever system “film – substrate” under the impact of stresses occurring upon film deposition are analyzed in beam approximation. General formulas are derived to calculate the angular and linear deformation of the system at various values of the module of elasticity of the materials of the substrate and film. In contrast to the well-known Stoney formula, the expression obtained in this paper for the angular deformation of the cantilever system is valid for different values of the film and substrate thickness. The Stoney formula is the limiting case of the derived general formula valid when the thickness of the film is several orders of magnitude less than the substrate thickness. The influence of various elastic moduli on the angular and linear deformation of the console, as well as on the stress distribution in the “film – substrate” system, is estimated. It is shown that if the substrate thickness is 100 times larger than the film thickness, the angular deformation changes approximately by a factor of two at 2-fold change in the ratio the moduli of elasticity. The measuring capabilities of the cantilever converter of stresses in the film into the angular deformation of the end of the console are analyzed. The sensitivity of the converter is estimated as a function of the ratio of film and substrate thicknesses. It is shown that the obtained expressions for the displacements and stresses can be used in studying temperature deformations and stresses in the “film – substrate” system. To do this, the stress in the film should be replaced by the product of the modulus of elasticity and the tempera-

ture change and the difference in the coefficients of thermal expansion of the materials of the film and substrate.

Keywords: substrate; deposition, film; mechanical stress; cantilever beam; angular deformation; linear deformation; instrument converter; sensitivity.

Исследования механических напряжений, возникающих в тонкой пленке, наносимой на поверхность некоторой подложки, стали актуальными в связи с развитием микроэлектроники, полупроводниковой пленочной тензометрии, технологий антикоррозионных покрытий и наплавов [1 – 3]. Вопрос о разрушающих напряжениях в гальванических покрытиях рассматривали еще в начале XIX века [4, 5]. Основные методы определения напряжений в пленках — косвенные, основаны они на измерении деформаций системы «пленка – подложка» [6, 7], обусловленных этими напряжениями. Для применения таких методов необходимы обоснованные математические соотношения, связывающие напряжения и деформации системы при разных физико-механических свойствах и толщинах пленки и подложки [8].

Цель данной работы — получение в балочном приближении общих зависимостей между исходными напряжениями в пленке и линейными и угловыми деформациями консольной системы, в которых не наложены ограничения на толщины и физико-механические свойства (модули упругости, коэффициенты теплового линейного расширения). Другой задачей явилось получение общей формулы для описания уравновешенных напряжений в пленке и подложке в состоянии после нанесения пленки, когда напряжения в ней релаксируют в результате вызванной ими деформации системы.

На рис. 1 показана балка толщиной h , жестко заделанная с двух сторон. На верхнюю поверхность балки нанесена пленка толщиной t , меньшей, чем толщина подложки. Поскольку деформация балки запрещена, то напряжения σ_0 — внутренние, «монтажные» — возникают только

в пленке в процессе напыления. Для определенности примем, что эти напряжения сжимающие и постоянны по толщине и длине пленки. Опорные реакции не равны нулю. Для устранения влияния веса балки плоскость, на которую наносят пленку, располагают вертикально, изгиб балки происходит в горизонтальной плоскости.

Рассмотрим задачу с разными модулями упругости пленки E_t и подложки E_h . Для удобства анализа примем, что $E_t = E$, $E_h = \beta E$.

Если убрать правую заделку AB , то сжатая пленка начнет распрямляться и деформировать систему «пленка – подложка», как показано на рис. 2. Балка — подложка под действием пленки начнет изгибаться и растягиваться в направлении своей оси. Сечение AB переместится в положение A_1B_1 . В силу гипотезы плоских сечений оно останется плоским, но сместится вдоль центральной оси на Δ_0 и повернется на угол θ . Опорные реакции исчезнут. Состояние системы будет равновесным — напряжения в пленке уравновесятся напряжениями в подложке.

Каждое волокно с координатой y претерпит удлинение (или сжатие) на Δ , причем

$$\Delta = \Delta_0 + \theta y. \quad (1)$$

Исходное напряжение в пленке σ_0 станет равным σ_x , но останется отрицательным. В подложке возникнут напряжения σ_{x1} и σ_{x2} , причем напряжения в верхних слоях, примыкающих к пленке, будут положительными, а в нижних слоях — отрицательными (см. рис. 2).

Чтобы описать напряженное состояние в балочной системе «пленка – подложка», достаточно определить значения Δ_0 и θ в связи с напряжени-

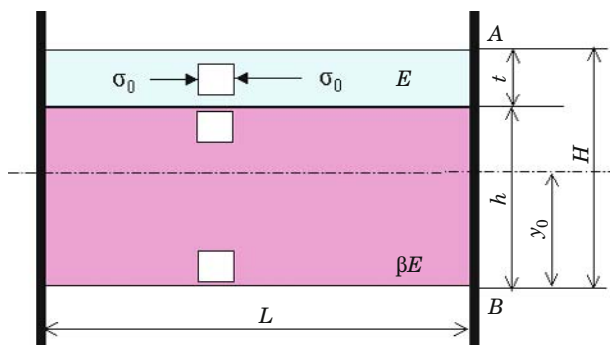


Рис. 1. Состояние системы «балка – подложка» в процессе нанесения пленки

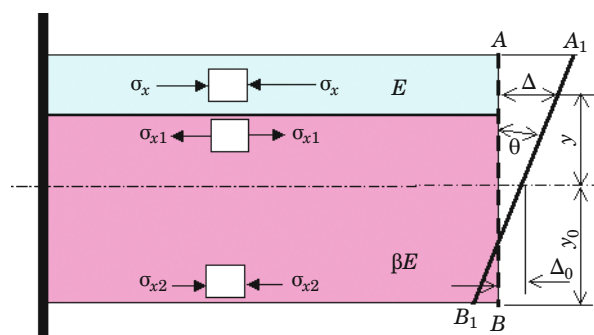


Рис. 2. Равновесное состояние консольной системы «балка – подложка» после освобождения жесткого защемления с одной стороны

ем σ_0 [9 – 11]. Резонно предположить, что напряжения, возникающие в пленке, будут инвариантны по отношению к направлению на поверхности подложки. Поэтому исходное напряженное состояние пленки — двухосное сжатие. В силу этого допущения в направлении оси балки исходное сжатие пленки будет равно

$$\Delta_t = \frac{\sigma_0(1-\mu)L}{E}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Запишем уравнение для вычисления расстояния y_0 от центральной оси до нижнего края подложки (см. рис. 2):

$$\int_{-y_0}^{h-y_0} \beta y dy + \int_{h-y_0}^{t+h-y_0} y dy = 0. \quad (3)$$

Прибавим к этому уравнению уравнение равновесия для продольных сил

$$\int_{-y_0}^{h-y_0} \frac{\beta E(\Delta_0 + \theta y)}{L} dy + \int_{h-y_0}^{t+h-y_0} \left[\frac{E}{L} (\Delta_0 + \theta y) - \sigma_0(1-\mu) \right] dy = 0 \quad (4)$$

и уравнение равновесия для изгибающих моментов

$$\int_{-y_0}^{h-y_0} \frac{\beta E(\Delta_0 + \theta y)}{L} y dy + \int_{h-y_0}^{t+h-y_0} \left[\frac{E}{L} (\Delta_0 + \theta y) - \sigma_0(1-\mu) \right] y dy = 0. \quad (5)$$

Из системы уравнений (3), (4) и (5) получим

$$y_0 = \frac{\beta h^2 + 2ht + t^2}{2(\beta h + t)}, \quad (6)$$

$$\Delta_0 = \frac{\sigma_0 t L (1-\mu)}{E(\beta h + t)}, \quad (7)$$

$$\theta = \frac{6\beta \sigma_0 h t L (h+t)(1-\mu)}{E Y(\beta, h, t)}, \quad (8)$$

где

$$Y(\beta, h, t) = t^4 + \beta^2 h^4 + 6\beta h^2 t^2 + 4\beta h^3 t + 4\beta h t^3. \quad (9)$$

Отметим, что формулы для y_0 , Δ_0 и θ получены без каких-либо ограничений на размеры h и t .

Оценим влияние различия модулей упругости $\beta = 0,3 - 3,0$ на положение центра тяжести y_0 , удлинение Δ_0 и угол θ , приняв, что $h = 0,1$ мм, $t = 0,001$ мм, $L = 50$ мм, $\sigma_0 = 200$ МПа, $\mu = 0,3$ и $E = 10^5$ МПа. На рис. 3, а показано влияние β на положение центральной оси y_0 , отнесенное к толщине подложки h . Из него следует, что при заданных значениях h и t относительное положение y_0/h центра тяжести изменяется от 0,5 до 0,516. Из рис. 3, б видно влияние β на относительное удлинение Δ_0/t центральной оси консольной системы. Изменение β от 0,3 до 3,0 приводит к уменьшению Δ_0/t от 2,3 до 0,23.

Влияние β на угловую деформацию θ показано на рис. 3, в: угловая деформация изменяется от 0,8 до 7,1 градусов.

При равных модулях упругости материалов подложки и пленки ($\beta = 1$) формула (9) преобразуется в

$$Y(h, t) = (h + t)^4, \quad (10)$$

а формулы (6), (7) и (8) приобретают соответственно вид

$$y_0 = \frac{1}{2}(h + t), \quad (11)$$

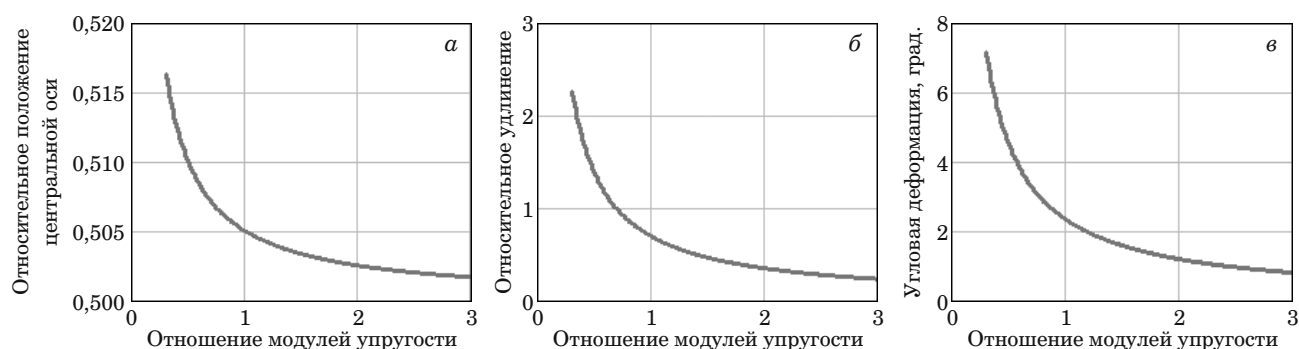


Рис. 3. Влияние отношения модулей упругости на положение центра тяжести поперечного сечения «пленка – подложка» (а), осевое удлинение консольной системы «пленка – подложка» (б), угловое перемещение свободного конца консольной системы «пленка – подложка» (в)

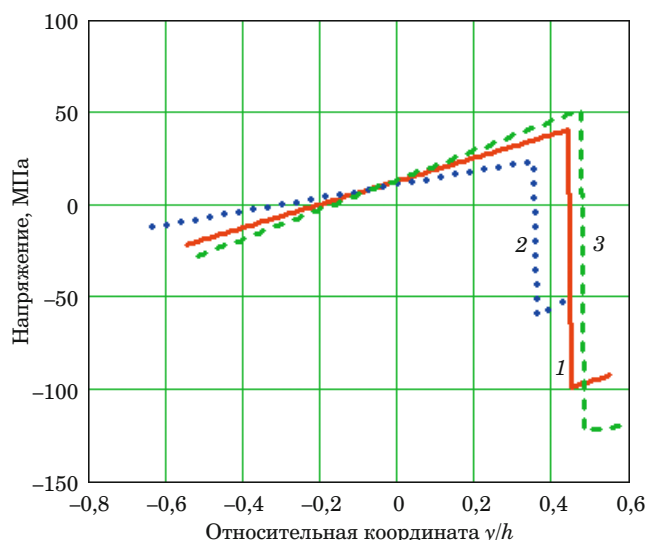


Рис. 4. Влияние отношения модулей упругости на эпюру осевых напряжений в поперечном сечении консольной системы «пленка – подложка»: β равно 1,0 (1), 0,3 (2), 3,0 (3)

$$\Delta_0 = \frac{\sigma_0 t L (1 - \mu)}{E(h + t)}, \quad (12)$$

$$\theta = \frac{6\sigma_0 h t L (1 - \mu)}{E(h + t)^3}. \quad (13)$$

Осевые напряжения в равновесной системе (см. рис. 2) вычисляются по формулам

$$\sigma(y) = \begin{cases} \frac{\beta E}{L} (\Delta_0 + \theta y), & \text{если } -y_0 \leq y < h - y_0, \\ \frac{E}{L} (\Delta_0 + \theta y) - \sigma_0 (1 - \mu), & \text{если } h - y_0 \leq y \leq t + h - y_0, \end{cases} \quad (14)$$

где y_0 , Δ_0 и θ — функции, определяемые уравнениями (6), (7) и (8) соответственно.

Исследуем влияние β на эпюру осевых напряжений, приняв $h = 0,1$ мм и $t = 0,01$ мм. На рис. 4 приведены эпюры, вычисленные для значений β , равных 1,0, 0,3 и 3,0.

Достоверность эпюр на рис. 4 подтверждается тем, что напряжения уравновешены. Приняв, что ширина консольной пластины $b = 5$ мм и $\beta = 3$, получим сумму напряжений в равновесном состоянии, равную $\int_{-y_0}^{h-y_0+t} \sigma(y) b dy = 6 \cdot 10^{-15}$ Н,

а сумму изгибающих моментов, равную $\int_{-y_0}^{h-y_0+t} \sigma(y) b y dy = 9 \cdot 10^{-13}$ Дж. И сумма напряжений,

и сумма моментов практически равны нулю. Отметим, что сила, действующая на систему со

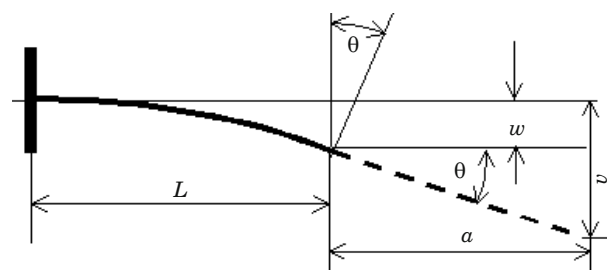


Рис. 5. Удлиненная консольная система

стороны пленки, $P_x = \sigma_0 (1 - \mu) t b = 7$ Н, а изгибающий момент

$$M_z = \frac{1}{2} \sigma_0 (1 - \mu) b h t = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

Эпюры на рис. 4 показывают, что уровень начальных напряжений σ_0 в пленке снижается от исходных 200 до 60 – 120 МПа при отношении толщин пленки и подложки, равном 0,1. Снижение отношения толщин до 0,01, несомненно, приведет к меньшей релаксации напряжений в пленке за счет деформации всей системы «пленка – подложка».

Эпюры (см. рис. 4) сдвинуты относительно друг друга, что обусловлено сдвигами центра тяжести сечения с изменением β и, соответственно, сдвигом начала координат (см. рис. 2).

Формулы (8) и (13) являются статическими характеристиками консольного измерительного преобразователя напряжения σ_0 в угловое перемещение θ . Измерив угол θ , можно оценить уровень напряжений σ_0 в пленке:

$$\sigma_0 = \frac{E(h + t)^3 \theta}{6 h t L (1 - \mu)}. \quad (15)$$

Но чаще измеряют не угол θ , а прогиб конца балки $w = \theta L/2$, поэтому

$$\sigma_0 = \frac{E(h + t)^3 w}{3 h t L^2 (1 - \mu)}. \quad (16)$$

Для повышения чувствительности преобразователя напряжения σ_0 в прогиб w используют балку длиной $(L + a)$, причем пленку наносят только на участок балки длиной L (рис. 5).

Прогиб w конца удлиненной балки зависит от угла θ :

$$w = \theta \left(\frac{L + 2a}{2} \right) \quad (17)$$

и

$$\sigma_0 = \frac{E(h+t)^3 v}{3htL(l+2a)(1-\mu)}. \quad (18)$$

При $a = L$ чувствительность преобразователя увеличивается в три раза.

Для снижения влияния эффектов, связанных с переходом от участка с пленкой к участку подложки без пленки, длина участка консоли с пленкой L должна более чем в 10 раз превышать ширину пленки b .

Чувствительность зависит не только от продольных размеров балки, но и от размеров поперечного сечения системы «пленка – подложка». Из формулы (13) следует, что при $t \ll h$ чувствительность прямо пропорциональна толщине пленки t и обратно пропорциональна квадрату толщины подложки h . Однако выбор оптимальных размеров во многом определяется технологическими возможностями экспериментатора при подготовке подложки.

Все ранее приведенные формулы получены в предположении, что напряжение в пленке постоянно и не изменяется по ее толщине. Для оценки влияния неравномерности напряжений в пленке на напряженно-деформированное состояние системы «пленка – подложка» примем, что $\beta = 1$ и рассмотрим два случая. В первом случае предположим, что напряжение в пленке линейно зависит от координаты y (см. рис. 2):

$$\sigma(y) = \sigma_0 + K \left(y - h + y_0 - \frac{t}{2} \right), \quad (19)$$

где K — наклон этой линейной зависимости. Во втором случае примем квадратичную зависимость

$$\sigma(y) = \sigma_0 + A \left[(y - h + y_0)^2 - \frac{t^2}{3} \right], \quad (20)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Выбор вида формул (19) и (20) обусловлен тем, что среднее значение напряжений по этим формулам равно σ_0 и это обеспечивает исследование влияния распределения напряжений по толщине пленки на чувствительность измерительного консольного преобразователя.

На рис. 6 представлены три распределения напряжений в пленке при $h = 0,1$ мм, $t = 0,01$ мм, $\sigma_0 = 100$ МПа, $K = 100$ МПа/т и $A = 150$ МПа/т².

Подставив поочередно $\sigma(y)$ по формулам (19) и (20) в выражения (4) и (5) и решив соответствующие системы уравнений, для угловых пере-

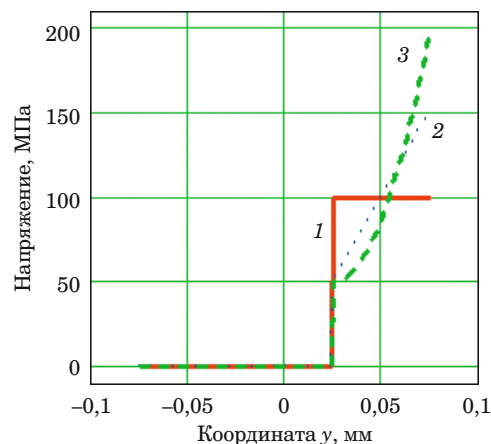


Рис. 6. Распределения исходных напряжений по толщине пленки: 1 – 3 — постоянное, линейно изменяющееся и нелинейно изменяющееся напряжения соответственно

мещений получим общую формулу влияния неравномерности напряжений в пленке:

$$\theta = \frac{(1-\mu)tL(6\sigma_0 h + D)}{E(h+t)^3}, \quad (21)$$

где $D = Kt^2$ для первого случая и $D = At^3$ — для второго. Видно, что исследованная неравномерность напряжений в пленке приводит к росту угла θ . Формулы для y_0 и Δ_0 не изменяются.

Относительное изменение угла θ под действием неравномерности напряжений составляет

$$\lambda = \frac{D}{6\sigma_0 h}. \quad (22)$$

В первом рассмотренном случае $\lambda = 0,17\%$ во втором — $\lambda = 2,5\%$. Значения λ обратно пропорциональны h и нелинейно зависят от толщины пленки t , что необходимо учитывать при анализе экспериментальных данных на предмет возможных погрешностей.

Решения (6), (7) и (8) получены деформационным методом [10, 11], т.е. требовалось найти такие значения y_0 , Δ_0 и θ , которые удовлетворяют системе уравнений (3), (4) и (5). Формулу (13), следствие формулы (8), можно получить также с использованием силового подхода, принятого в сопротивлении материалов. Действительно, при распределении напряжений по сечению в соответствии с рис. 1 изгибающий момент относительно центральной оси

$$M_z = \int_{\frac{h-t}{2}}^{\frac{h+t}{2}} -\sigma_0(1-\mu)b y dy = \frac{\sigma_0 b h t (1-\mu)}{2}. \quad (23)$$

Учитывая, что $\theta = (M_z L)/(EI_z)$, а осевой момент инерции $I_z = b(h+t)^3/12$, получаем с использованием (23) формулу (13) для θ .

С момента написания классической работы [4] прошло более 100 лет, но ее применимость постоянно подвергается сомнению [5, 8]. Для этого есть некоторые основания. В работе [4, с. 174] первая неоцифрованная формула записана в системе координат, не связанной с центром тяжести сечения, вторая — не учитывает изменения напряжений в пленке в процессе деформирования системы «пленка – подложка». В работе [5, с. 2919] формула (1) для изгибающего момента также записана в системе, связанной с серединой толщины подложки, а не с центром тяжести всего поперечного сечения. Поэтому она отличается от формулы (23), приведенной выше.

На самом деле авторы работ [4, 5] поставили и решили задачу — оценить напряжения в тонких пленках в связи с параметрами деформации системы «пленка – подложка». Расчеты по их формулам дают правильные результаты при очень малых отношениях толщин пленки и подложки. Их формулы совпадают с формулой (16) при пренебрежении в ней толщиной пленки по сравнению с толщиной подложки:

$$\sigma_0 = \frac{Eh^2w}{3tL^2(1-\mu)}. \quad (24)$$

Но формула (16) справедлива для любых толщин пленки t и подложки h , а формула (24) дает не нулевой, а конечный прогиб при значениях толщины t , существенно превышающих толщину h . Поэтому формулы (8), (13) и (16) следует признать более приемлемыми.

В работах [1, 8] справедливо отмечено, что причиной возникновения остаточных напряжений в слоистой системе может быть различие коэффициентов теплового расширения материалов пленки (α_t) и подложки (α_h) при изменении температуры на ΔT при переходе от процесса нанесения пленки к рабочему состоянию. В этом случае роль σ_0 выполняет произведение

$$\Sigma = \frac{(\alpha_t - \alpha_h)E\Delta T}{1 - \mu},$$

которым нужно заменить σ_0 в формулах (8) или (13) для угловых деформаций. Формула (7) для удлинения балки примет вид

$$\Delta_0 = \frac{\Delta TL(\alpha_h \beta h + \alpha_t t)}{t + \beta h}. \quad (25)$$

Для описания распределения температурных напряжений формулу (14) следует записать в следующих видах:

$$\sigma(y) = \begin{cases} \frac{\beta E}{L}(\Delta_0 + \theta y) - E\beta\alpha_h \Delta T, & \text{если } -y_0 \leq y < y_0, \\ \frac{E}{L}(\Delta_0 + \theta y) - E\alpha_t \Delta T, & \text{если } h - y_0 \leq y \leq t + h - y_0. \end{cases} \quad (26)$$

Для совместного учета начальных напряжений σ_0 и разности температур ΔT необходимо σ_0 заменить на $(\sigma_0 + \Sigma)$.

Оценки показывают, что температурные напряжения (26) в тонкой пленке могут достигать $(\alpha_h - \alpha_t)E\Delta T$. Например, напряжения в титановой пленке толщиной 0,001 мм, осажденной на медную подложку толщиной 0,1 мм, при разности коэффициентов теплового расширения $0,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и изменении температуры всего на 1°C равны $\sim 0,8$ МПа. Без учета этого обстоятельства могут возникнуть погрешности в измерениях внутренних напряжений в пленке, обусловленных технологией нанесения пленки. С другой стороны, открывается возможность технологической компенсации истинно внутренних напряжений температурными напряжениями. В связи с этим заметим, что в тонких пленках равновесные напряжения вне зависимости от происхождения не меняют знак (см. рис. 4) и лишь несколько увеличиваются при приближении к поверхности подложки. Напряжения в пределах толщины пленки начинают менять знак лишь при толщине пленки, примерно равной половине толщины подложки.

В заключение отметим, что приведенные решения получены в балочном приближении. Для более детального исследования требуется привлечение теории гибких стержней и численных методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кемпбелл Д. С. Механические свойства тонких пленок / В кн.: Технология тонких пленок. Т. 2. — М.: Советское радио, 1997. С. 246 – 304.
2. Tamulevicius S. Stres and strain in vacuum deposited thin films / Vacuum. 1998. Vol. 2. P. 127 – 139.
3. Султонов Ш. Д., Юлдашев Н. Х. Роль внутренних механических напряжений в формировании деформационных характеристик поликристаллических пленок p-(bi0,5sb0,5)2te3 / ФИП. 2009. Т. 7. № 1 – 2. С. 123 – 129.
4. Stoney G. G. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis / Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1909. Vol. 82. N 553. P. 172 – 175.
5. Давиденков Н. Н. Об измерениях остаточных напряжений в электролитических покрытиях / Физика твердого тела. 1960. Т. 2. № 11. С. 2919 – 2922.
6. Primak W., Monahan E. Cantilever and capacitor technique for measuring dilatation / Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54. N 5. P. 544 – 551.

7. **Egorov G. P., Volkov A. A., Golstceev V. U.** Delamination of Cu and Ti thin films deposited by magnetron sputtering on Cu substrate: Analysis of reasons / Material Science Forum Vols. 2012. N 706 – 709. P. 2863 – 2868.
8. **Добрынин А. В.** О применимости формулы Стони для расчета механических напряжений в толстых пленках и покрытиях / Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 32 – 36.
9. **Маркочев В. М., Кравченко И. О., Шамраев Ю. В.** Оценка прочности поврежденных элементов конструкций методом реальных элементов. Основы метода / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1997. Т. 63. № 2. С. 44 – 51.
10. **Markotchev V. M., Shamraev Yu. V.** Assessment of the integrity of pipes containing circumferential defects using the method of the real elements / Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 1999. Vol. 76. P. 581 – 587.
11. **Маркочев В. М., Шамраев Ю. В.** Расчет прочности поврежденных трубопроводов атомных электростанций методом реальных элементов / Известия вузов. Ядерная энергетика. 1999. № 2. С. 26 – 32.
- of polycrystalline films p-(bi0,5sb0,5)2te3 / FIP. 2009. Vol. 7. N 1 – 2. P. 123 – 129 [in Russian].
4. **Stoney G. G.** The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis / Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1909. Vol. 82. N 553. P. 172 – 175.
5. **Davidenkov N. N.** On the measurement of residual stresses in electrolytic coatings / Fiz. Tv. Tela. 1960. Vol. 2. N 11. P. 2919 – 2922 [in Russian].
6. **Primak W., Monahan E.** Cantilever and capacitor technique for measuring dilatation / Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54. N 5. P. 544 – 551.
7. **Egorov G. P., Volkov A. A., Golstceev V. U.** Delamination of Cu and Ti thin films deposited by magnetron sputtering on Cu substrate: Analysis of reasons / Material Science Forum Vols. 2012. N 706 – 709. P. 2863 – 2868.
8. **Dobrynin A. V.** On the applicability of the Stoney formula for calculating the mechanical stresses in thick films and coatings / Pis'ma ZhTF. 1997. Vol. 23. N 18. P. 32 – 36 [in Russian].
9. **Markotchev V. M., Kravchenko I. O., Shamraev Yu. V.** Strength assessment of damaged elements of structures by the method of real elements. Basis of the method / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1997. Vol. 63. N 2. P. 44 – 51 [in Russian].
10. **Markotchev V. M., Shamraev Yu. V.** Assessment of the integrity of pipes containing circumferential defects using the method of the real elements / Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 1999. Vol. 76. P. 581 – 587.
11. **Markotchev V. M., Shamraev Yu. V.** Strength calculation of damaged pipelines of nuclear power plants by the method of real elements / Izv. Vuzov. Yadern. Energet. 1999. N 2. P. 26 – 32.

REFERENCES