

В спектрах N1s в области 395,0-398,0 эВ наблюдаются пики, соответствующие соединениям азота с цирконием ZrN_x. Пик в низкоэнергетической области с энергией связи ~398,8 эВ соответствует N-C связи, ~399,9 эВ N=C связи [3].

В спектрах C1s наблюдаются несколько максимумов, наиболее интенсивный из которых приходится на энергию межатомных связей 284,3±0,1 эВ, соответствующую связям C-C в углеводородных поверхностных загрязнениях или графите. Пик в области (281,4–282,7) эВ соответствует связи углерода с металлом (Zr-C, Zr-C-N). Достоверно установить принадлежность этой связи карбиду или карбонитриду циркония невозможно из-за близости энергий связи Zr3d в этих соединениях. Пик в области 285,1 эВ свидетельствует о наличии sp³-гибридизированных связей и формировании алмазоподобной фазы.

Результаты исследований механических и трибологических характеристик представлены в таблице 2. Можно видеть, что сформированные покрытия обладают высокой твердостью. С ростом содержания углерода в покрытии твердость падает, что вероятно связано с преобладанием sp² гибридизированных связей между атомами углерода.

Таблица 2 – Характеристики покрытий ZrCN-DLC

№ процесса	Твердость покрытия, ГПа	Коэффициент бесшумного трения
1	43	0,86
2	30	0,38
3	18	0,17

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abadías, G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 2223-2235.
2. Binder, S. Phase equilibria in the systems Ti-C-N, Zr-C-N and Hf-C-N / S. Blinder, W. Lengauer, P. Ettmayer, J. Bauer, J. Debuigne, M. Bohn // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 217. – Issue 1. – P. 128-136.
3. Zocco. Mechanical and tribological properties of CN_x films deposited by reactive laser ablation / A. Perrone, E. Broitman, Z. Czigany, L. Hultman, M. Anderle // Diam. Relat. Mater. – 2002. – Vol. 11. – P. 98-104.

УДК 539.30

ПРОДОЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В АДГЕЗИОННОМ ПОКРЫТИИ СТЕРЖНЯ

Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет,

Брест, Республика Беларусь

Для решения задачи используется модель в виде стержня длиной L с круглым поперечным сечением радиуса R , с модулями упругости первого и второго рода E_c и G_c , коэффициентом линейного теплового расширения α_c с нанесенным на него слоем покрытия постоянной толщины. Покрытие имеет толщину h , модули E_n и G_n , коэффициент линейного теплового расширения α_n . Так как процесс нанесения покрытия занимает достаточно продолжительный период, на момент

его окончания температуры стержня и покрытия принимаются одинаковыми (T_n). После завершения процесса происходит охлаждение материалов до температуры T_k , так что в них имеет место перепад температур $T = T_k - T_n$, вызывающий остаточные напряжения, уровень которых зависит от физико-механических параметров материалов и координат точек тела. Продольная координата - x , радиальная координата - r . Сечение стержня с покрытием при $x=0$ - неподвижно, при $x=L$ - свободно. Так как предполагается, что при эксплуатации стержня с покрытием оба материала будут испытывать неоднократное нагружение, то задача далее ставится в упругой постановке. Ввиду того, что толщина адгезионного слоя сравнительно с радиусом стержня очень мала ($h \ll R$), а внешняя поверхность покрытия (при $r=R+h$) свободна от нагрузок, радиальными напряжениями пренебрегаем. Учет окружных напряжений производится отдельно.

Для смещений точек поперечных сечений примем некоторые законы в виде зависимостей по радиальному и осевому направлениям так, чтобы, с одной стороны, обеспечивалось равенство перемещений на границе слоев и имела возможность удовлетворить граничным условиям на торцах и внешней поверхности объекта, а с другой, чтобы задача приводилась к аналитическому решению и позволяла проводить наглядный анализ влияния различных параметров на уровень напряженного состояния материалов стержня и покрытия. С этой целью для перемещений точек стержня используем выражение

$$U_c = U_0(x) + K(x) \cdot r^2 / 2 + a_c T x, \quad r \leq R \quad (1)$$

а для точек покрытия -

$$U_n = U_0(x) + K(x) \cdot R^2 / 2 + \gamma_1(x) \cdot (r - R) + \gamma_2(x) \cdot (r - R)^2 / 2 + a_n T x + V_0 x, \quad r > R \quad (2)$$

где $U_0(x), K(x), \gamma_1(x), \gamma_2(x), V_0$ - функции и константа, подлежащие определению.

Слагаемое $V_0 x$ выделено из $U_0(x)$ для удобства и наглядности с тем, чтобы при $r=R$ значения перемещений точек стержня и покрытия при различных значениях коэффициентов теплового расширения их материалов были бы во всех точках оси x одинаковыми. При этом найдем, что $V_0 = (a_c - a_n) T$.

В соответствии с (1) и (2) распределение продольных напряжений по радиусу является квадратичным, касательных - линейное (рис.1).

Задача об определении законов распределения напряжений вдоль продольной оси сводится к определению функции

$K(x)$.

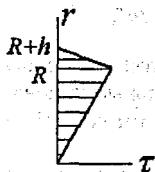


Рисунок 1 - Распределение касательных напряжений по сечению

Обозначив $\lambda^2 = 2 \frac{G_c}{E_c \left(\frac{R^2}{4} - A \right)}$,

где $A = \frac{R^4 E_c}{4} + E_n \frac{(2R+h)h}{2} R^2 + \frac{E_n G_c}{G_n} \frac{2Rh^2 \left(R + \frac{5h}{8} \right)}{3}$,
 $B = R^2 E_c + (2R+h)h$,

получаем для K разрешающее уравнение задачи

$$\frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \lambda^2 K = 0.$$

В рассматриваемом случае $\lambda^2 < 0$, поэтому с учетом граничных условий решение имеет вид:

$$K(x) = (\alpha_c - \alpha_n) T \cdot \frac{(2R+h)hE_n}{\lambda \left(\frac{R^2}{4} - \frac{A}{B} \right) B} \cdot \frac{Sh(\lambda x)}{Ch(\lambda L)},$$

$$U_0(x) = -\frac{A}{B} K(x) - \frac{E_n(2R+h)h}{B} V_0 x.$$

Выражения для интересующих нас напряжений следующие:

- продольные напряжения в стержне

$$\sigma_c(r, x) = (\alpha_c - \alpha_n) T \cdot \frac{E_c E_n (2R+h)h}{B} \cdot \left[i - \frac{r^2}{4} \frac{A}{B} \frac{Ch(\lambda x)}{Ch(\lambda L)} \right],$$

- продольные напряжения в покрытии

$$\sigma_n(r, x) = \left[1 - \frac{E_n(2R+h)h}{B} \left(1 - \frac{1}{R^2} \frac{A}{B} \left(\frac{R^2}{2} + \frac{A}{B} + R \frac{G_c}{G_n} (r - R_c) \left(1 - \frac{r-R}{2h} \right) \right) \frac{Ch(\lambda x)}{Ch(\lambda L)} \right) \right],$$

- касательные напряжения на границе стержень-покрытие

$$\tau_{nc}(x) = (\alpha_c - \alpha_n) T G_c \frac{(2R+h)h R E_n}{\lambda \left(\frac{R^2}{2} - \frac{A}{B} \right) B} \cdot \frac{Sh(\lambda x)}{Ch(\lambda L)}.$$

Как видно из приведенных выражений, все напряжения ограничены, а компоненты напряженно-деформированного состояния пропорциональны разности температуры напыления и финишной температуры остывания стержня. Вопрос о времени релаксации данных напряжений не рассматривается.

При расчетах использованы следующие числовые данные:

$$T_n = 303^\circ K, T_c = 293^\circ K, E_c = 210 \text{ ГПа}, E_n = 350 \text{ ГПа}, \alpha_c = 12.7 \cdot 10^{-6}, \alpha_n = 6.2 \cdot 10^{-6}, \\ \nu_c = \nu_n = 0.3, R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, L = (3.25-4.0) \cdot 10^{-2} \text{ м}, h = (1.0-2.0) \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Максимальные значения продольных напряжений в покрытии при варьировании h и L изменялись незначительно ($\sigma_n \approx 22.7 \text{ МПа}$), касательные изменялись от $\tau_n \approx 0.5 \text{ МПа}$ при толщине слоя $h = 1 \text{ мк}$ и длине стержня 32.5 мм до $\tau_n \approx 1.0 \text{ МПа}$ при $h = 4 \text{ мк}$ и $L = 40.0 \text{ мм}$.

Во всех случаях длина участка стержня с повышенными напряжениями не превышала одного миллиметра. С ростом толщины покрытия длина этого участка возрастает.

Характер изменения напряжений иллюстрируется кривыми на рис.2 и рис.3.

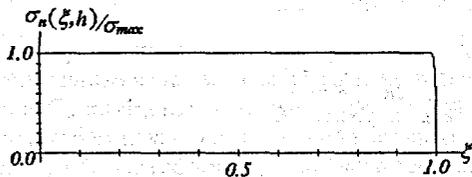


Рисунок 2 – Продольные напряжения в покрытии на уровне его внешней поверхности

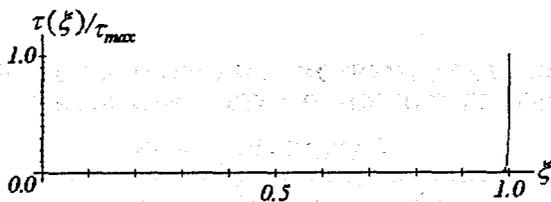


Рисунок 3 – Касательные напряжения на поверхности контакта покрытия со стержнем

В целом, характер напряженного состояния соответствует решениям для двухслойных пластин при остывании или усадке материалов. В зоне, прилегающей к свободному торцу стержня, имеет место резкое изменение напряженного состояния и возникновение больших касательных напряжений на поверхности контакта материалов стержня и покрытия. Проявившаяся особенность данной задачи – высокие осевые напряжения в самом стержне в примыкающей к торцевой поверхности зоне, хотя соответствующие им продольные силы невелики. Объясняется данный факт знакопеременным по радиусу стержня распределением этих напряжений возле его торца. Для уточнения решения необходимо удовлетворение условию равенства нулю касательных напряжений на торце стержня. Решения подобного рода известны, но по максимальному уровню возникающих напряжений вносимая ими поправка не является значительной.