

УДК 629.7.023.224

Н.И. Артеменко¹, С.А. Мубояджян¹**ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОДНОСЛОЙНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЯХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-25-35

Предложена инженерная методика оценки внутренних напряжений, возникающих в покрытиях после напыления, а также в процессе эксплуатации при повышенных температурах. Выявлены зависимости величины и характера внутренних напряжений от температур плавления материалов покрытия и основы, а также верхний и нижний пределы температуры плавления материала покрытия, обеспечивающие предельно допустимые деформации в покрытии. Рассмотрено влияние толщины покрытия на величину внутренних напряжений, получена формула для определения внутренних напряжений в покрытии в зависимости от температур плавления материалов покрытия и основы, их толщин и модулей упругости.

Ключевые слова: внутренние напряжения, покрытие, теория Линдемана, выбор покрытий, предельно допустимые деформации.

In the paper an engineering technique of estimating the internal stresses arising in the coating after deposition and also during operation at elevated temperatures is proposed. The dependences of magnitude and character of the internal stress on the melting temperature of coating and base materials are revealed as well as upper and lower limits of the melting temperature of the coating material ensuring the maximum allowable strain in the coating. The influence of the coating thickness on the magnitude of the internal stresses is reviewed, a formula for determination of the internal stress in the coating after deposition depending on the melting temperature of the coating and base materials, their thickness and elastic modulus is found.

Keywords: internal stresses, coating, Lindemann theory, the choice of coatings, the maximum allowable strain.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В современном авиадвигателестроении все большее внимание уделяется проблеме продления ресурса деталей, увеличению срока службы, повышению надежности и долговечности. Одним из актуальных вопросов является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различные защитные и упрочняющие покрытия, позволяющие продлить ресурс деталей авиационной техники [1–4].

При защите деталей, подверженных различным видам изнашивания (износ при трении, фреттинг-износ, эрозионное изнашивание), используют упрочняющие покрытия. Существуют различные методы нанесения упрочняющих покрытий (атмосферно-плазменный, детонационный, ионно-плазменный) и виды наплавки (газопламенная, лазерная). Особое место занимает ионно-плазменный метод нанесения покрытий. В ВИАМ разработан оригинальный метод получения ионно-плазменных покрытий – вакуумно-плазменная технология высоких энергий (ВПТВЭ). Полученные покрытия от-

личаются высокой адгезией, хорошим качеством поверхности, высокими эксплуатационными характеристиками [5–14].

При нанесении ионно-плазменных покрытий материал катода испаряется вакуумной дугой и конденсируется на поверхности деталей, образуя плотное и практически беспористое покрытие. Однако полученные покрытия после нанесения не всегда обладают высокой адгезией к материалу подложки. Основной вклад в разрушение покрытия вносят внутренние напряжения. В настоящей работе рассматривается метод оценки внутренних напряжений в однослойных ионно-плазменных упрочняющих конденсированных покрытиях для предотвращения их разрушения за счет внутренних напряжений еще на стадии выбора материала упрочняющего покрытия [15, 16].

Материалы и методы, результаты Природа внутренних напряжений

В процессе нанесения покрытий ионно-плазменным методом в вакуумной камере покрытие конденсируется из двухфазного потока плазмы на материал детали. В первом приближении можно считать, что природой возникновения внутренних напряжений в покрытии является разница в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) материалов подложки и покрытия. При нанесении упрочняющих покрытий на подложку (деталь) из титановых сплавов и сталей температура подложки для разных композиций «материал подложки–покрытие» составляет 450–600°C [7]. В процессе нанесения конденсированное покрытие и материал подложки находятся в ненапряженном состоянии. По окончании процесса нанесения покрытия и при охлаждении композиции «материал–покрытие» до комнатной температуры происходит уменьшение размеров детали и покрытия по линейному закону, образуется размерное несоответствие покрытия и подложки. На рис. 1 рассмотрен простейший одномерный случай.



Рис. 1. Схема изменения размеров композиции «материал–покрытие» при охлаждении до комнатной температуры для случая $\alpha_{\text{п}} > \alpha_{\text{м}}$: l_0 – линейный размер покрытия и подложки при температуре напыления, мм; $l_{\text{м}}$ – линейный размер образца подложки после охлаждения без учета покрытия, мм; $l_{\text{п}}$ – линейный размер покрытия после охлаждения без учета связи его с подложкой, мм

Изменения линейных размеров материала и покрытия описываются следующими формулами:

$$l_{\text{п}} = l_0(1 - \alpha_{\text{п}} \Delta T), \quad (1)$$

$$l_{\text{м}} = l_0(1 - \alpha_{\text{м}} \Delta T), \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ и $\alpha_{\text{м}}$ – ТКЛР покрытия и материала подложки соответственно, K^{-1} ; ΔT – разность температур подложки (при напылении и комнатной), К; l_0 – линейный размер покрытия и подложки при температуре напыления, мм; $l_{\text{м}}$ – линейный размер образца подложки после охлаждения без учета покрытия, мм; $l_{\text{п}}$ – линейный размер покрытия после охлаждения без учета связи его с подложкой, мм.

В первом приближении считаем, что толщины покрытия и основного материала несоизмеримы. Принимая то, что основной материал является абсолютно жестким, а адгезия покрытия с подложкой весьма прочная (>100 МПа), то покрытие претерпевает деформацию для достижения размера l_m . Следовательно, в покрытии возникают внутренние напряжения, а ее деформация определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{l_m - l_n}{l_n} = \frac{1 - \alpha_m \Delta T}{1 - \alpha_n \Delta T} - 1. \quad (3)$$

Теория Линдемана

В физике твердых тел существует эмпирическая теория, связывающая прочность межатомных связей с температурой плавления. Более всего эта теория известна как правило Линдемана: произведение температуры плавления вещества и его температурного коэффициента линейного расширения является величиной постоянной для большой группы веществ, иначе говоря $T_{пл} \cdot \alpha = \text{const}$. Однако в действительности зависимость температуры плавления от $1/\alpha$ является линейной функцией [17]. В табл. 1 указаны ТКЛР, температуры плавления и величина, обратная ТКЛР, для некоторых чистых веществ и соединений. На рис. 2 установлена аппроксимирующая зависимость $T_{пл}(1/\alpha)$.

Таблица 1

Физические характеристики элементов (соединений)

Элемент (соединение)	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	$1/\alpha, K$	$T_{пл}, K$
Cd [18]	30	33333,33	594
Pb [18]	28	35714,29	600
Mg [18]	25	40000	923
Al [18]	22,2	45045,05	933
Ba [18]	20,6	48543,69	1002
Ca [18]	22,3	44843,05	1112
Ag [18]	19,5	51282,05	1235
Au [18]	14,2	70422,54	1337
Mn [18]	22	45454,55	1517
Be [18]	11,5	86956,52	1551
Gd [18]	9	111111,1	1586
Ni [18]	13	76923,08	1726
Co [18]	12	83333,33	1768
Fe [18]	12	83333,33	1812
Pd [18]	11,8	84745,76	1827
Pt [18]	9	111111,1	2041
Zr [18]	6,8	147058,8	2125
Cr [18]	6,8	147058,8	2130
V [18]	8	125000	2160
Cr ₃ C ₂ [19]	11,7	85470,09	2168
Rh [18]	8	125000	2239
Ru [18]	9,1	109890,1	2334
Hf [18]	5,8	172413,8	2506
Ir [18]	6,4	156250	2739
Nb [18]	7	142857,1	2741
Mo [18]	5	200000	2890
WC [19]	4,6	217391,3	3058
TiN [19]	4,5	222222,2	3223
ZrN [19]	5,6	178571,4	3253
HfN [19]	5,5	181818,2	3273
Ta [18]	5,4	185185,2	3290
Re [18]	5,2	192307,7	3459
TiC [19]	4,4	227272,7	3530
W [18]	4,3	232558,1	3695
ZrC [19]	4,2	238095,2	3803
NbC [19]	3,9	256410,3	3886
HfC [19]	3,7	270270,3	4163
TaC [19]	3,6	277777,8	4258

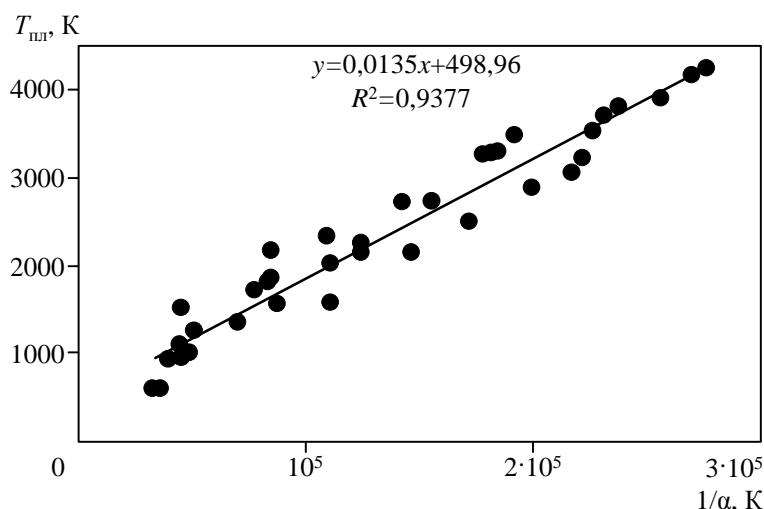


Рис. 2. Зависимость температуры плавления вещества от величины, обратной ТКЛР: ● – справочные данные; — линейная аппроксимация справочных данных

Выражение $T_{\text{пл}}=0,0135/\alpha+500$ получено путем аппроксимации массива точек $T(1/\alpha)$ с величиной достоверности аппроксимации $R=0,938$ и достаточно точно (с погрешностью не более 15%) описывает зависимость температуры плавления материала от температурного коэффициента линейного расширения в диапазоне температур плавления 1000–5000 К. Таким образом, температурный коэффициент линейного расширения для любого конденсированного вещества в рамках данной задачи может быть выражен через температуру плавления:

$$\alpha = \frac{0,0135}{T_{\text{пл}} - 500}. \quad (4)$$

Определение деформаций в покрытии

С учетом вышеизложенного деформация покрытия рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{0,0135 \Delta T}{T_m - 500}}{1 - \frac{0,0135 \Delta T}{T_n - 500}} - 1, \quad (5)$$

где T_n и T_m – температуры плавления покрытия и материала соответственно, К.

Тогда:

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{0,0135 \Delta T}{T_m - 500}}{1 - \frac{0,0135 \Delta T}{T_n - 500}} - 1 = \frac{T_n - 500}{T_m - 500} \cdot \frac{(T_m - 500 - 0,0135 \Delta T)}{(T_n - 500 - 0,0135 \Delta T)} - 1 = \frac{(T_m - T_n)}{(T_m - 500)} \cdot \frac{0,0135 \Delta T}{(T_n - 500 - 0,0135 \Delta T)}. \quad (6)$$

Выражение деформации покрытия было получено для простейшего случая (одномерной детали). Покрытие следует рассматривать как двухмерный объект, в котором действуют напряжения во взаимно перпендикулярных плоскостях, как указано на рис. 3.

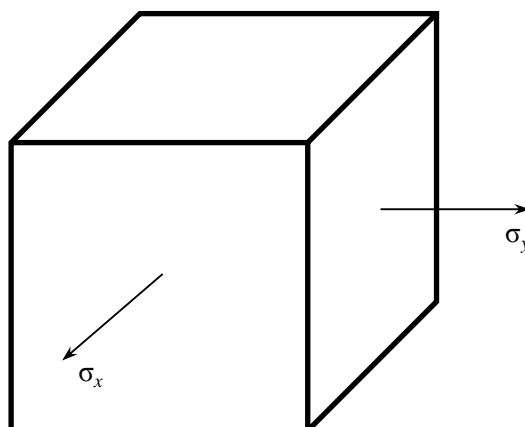


Рис. 3. Напряженное состояние элемента покрытия

Напряжения σ_x и σ_y предполагаются равными с учетом изотропии структуры получившегося покрытия. Таким образом, данное напряженное состояние является двухосным.

С учетом упругих свойств материалов при растяжении на величину ε_x в продольном направлении материал сжимается в поперечном направлении на величину $\mu\varepsilon_x$ (где μ – коэффициент Пуассона). Соответственно, при растяжении материала на величину ε_y в поперечном направлении материал сжимается в продольном направлении на величину $\mu\varepsilon_y$, то есть относительная деформация материала в продольном направлении составляет $\varepsilon_x - \mu\varepsilon_y$, а в поперечном $\varepsilon_y - \mu\varepsilon_x$. Так как $\sigma_x = \sigma_y$, то $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, а значит:

$$\varepsilon_n = \sqrt{((1-\mu)\varepsilon_x)^2 + ((1-\mu)\varepsilon_y)^2} = \sqrt{2}(1-\mu)\varepsilon. \quad (7)$$

Так как для большинства материалов коэффициент Пуассона составляет 0,25–0,35, то $\varepsilon_n = 0,919–1,061\varepsilon$. Для простоты расчета можно принять, что $\varepsilon_n = \varepsilon$:

$$\varepsilon_n = \frac{(T_M - T_n)}{(T_M - 500)} \cdot \frac{0,0135\Delta T}{(T_n - 500 - 0,0135\Delta T)}. \quad (8)$$

Величина ΔT обычно составляет 450–600°C, а для большинства упрочняющих покрытий 600°C, соответственно $0,0135 \cdot \Delta T = 8,1$ К. Очевидно, что знаменатель в выражении (8) является положительной величиной, поэтому для определения знака внутренних напряжений достаточно сравнить температуры плавления материалов покрытия и основы: при $T_M > T_n$ в покрытии растягивающие внутренние напряжения, при $T_M < T_n$ – сжимающие.

Величина внутренних напряжений должна быть такая, чтобы не вызывать в материале покрытия пластического течения, так как накопление пластических деформаций в покрытиях приводит к их ускоренному разрушению. Некоторые упрочняющие покрытия являются хрупкими, поэтому пластическое течение в них недопустимо. В связи с этим следует ограничить деформацию материала покрытия $-0,002 < \varepsilon_n < 0,002$ (где 0,002 – условная деформация начала текучести ($\sigma_{0,2}$ – предел текучести)) [20].

$$\left| \frac{(T_M - T_n)}{(T_M - 500)} \cdot \frac{0,0135\Delta T}{(T_n - 500 - 0,0135\Delta T)} \right| \leq 0,002. \quad (9)$$

Данное выражение не поддается упрощению, поэтому решение было получено численными методами (табл. 2).

Таблица 2

Нижние и верхние пределы плавления материала покрытия

материала	Температура, К	
	покрытия	
	нижний предел (при $\varepsilon_{п} < 0,002$)	верхний предел (при $\varepsilon_{п} > -0,002$)
1000	946	1069
1100	1024	1203
1200	1098	1345
1300	1169	1495
1400	1238	1655
1500	1304	1825
1600	1367	2007
1700	1428	2202
1800	1486	2411
1900	1542	2635
2000	1597	2878
2100	1649	3140
2200	1700	3424
2300	1749	3734
2400	1796	4072
2500	1841	4443
2600	1886	4853
2700	1928	5307
2800	1970	5812
2900	2010	6379
3000	2049	7019

При выборе упрочняющего покрытия следует руководствоваться данными, представленными на рис. 4. Температура плавления выбранного покрытия должна лежать между нижним и верхним пределом температуры плавления материала покрытия для обеспечения деформаций в покрытии менее допустимого значения.

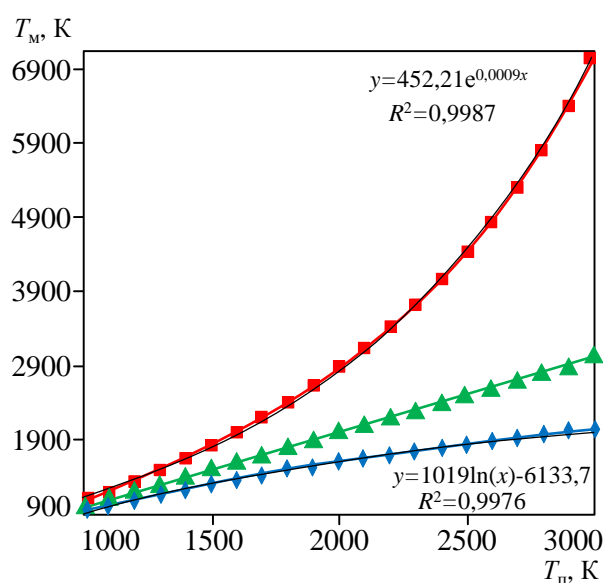


Рис. 4. Нижние и верхние пределы температуры плавления материала покрытия: \blacklozenge – верхний предел температуры плавления материала покрытия, К; \blacksquare – нижний предел температуры плавления материала покрытия, К; \blacktriangle – температура плавления материала основы, К; — логарифмическая аппроксимация расчетных данных (предел температуры плавления материала покрытия, К)

Зависимость $T_{\text{п}}=452,21\exp(0,0009T_{\text{м}})$ достаточно точно описывает верхний предел температуры плавления материала покрытия, при котором внутренние напряжения в покрытии являются сжимающими и величина деформации $\varepsilon_{\text{п}}>-0,002$.

Зависимость $T_{\text{п}}=1019\ln(T_{\text{м}})-6133,7$ достаточно точно описывает нижний предел температуры плавления материала покрытия, при котором внутренние напряжения в покрытии являются растягивающими и величина деформации $\varepsilon_{\text{п}}<0,002$.

Влияние толщины покрытия на величину внутренних напряжений

Ранее было сделано допущение, что материал подложки является абсолютно жестким, толщина покрытия и материала несоизмеримы и внутренние напряжения в покрытии составляли $\sigma_{\text{п}}=\varepsilon_{\text{п}}E_{\text{п}}$, а в материале – $\sigma_{\text{м}}=0$. В реальности при возникновении в покрытии после напыления, например, растягивающих напряжений происходит сжатие композиции «материал–покрытие» в соответствии с условием совместности деформаций $\varepsilon_{\text{п}}=\varepsilon_{\text{м}}$:

$$\frac{\sigma_1}{E_{\text{п}}} = \frac{\sigma_{\text{м}}}{E_{\text{м}}}, \quad (10)$$

где σ_1 – напряжение, которое дополнительно возникло в покрытии при достижении заданной деформации $\varepsilon_{\text{п}}$; $\sigma_{\text{м}}$ – напряжение, возникшее в материале при достижении заданной деформации $\varepsilon_{\text{м}}$; $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{м}}$ – модули упругости первого рода покрытия и материала соответственно.

По закону сохранения энергии сумма работ, затрачиваемых на деформирование покрытия и основного материала в состоянии равновесия равна нулю, тогда:

$$(\sigma_{\text{п}}+\sigma_1)h_{\text{п}}S_{\text{п,м}}(1+\varepsilon_{\text{п}})+\sigma_{\text{м}}h_{\text{м}}S_{\text{п,м}}(1+\varepsilon_{\text{м}})=0, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{п}}+\sigma_1=\sigma_{\text{внут}}$ – внутренние напряжения в покрытии в состоянии статического равновесия; $h_{\text{п}}$ и $h_{\text{м}}$ – толщины покрытия и материала соответственно; $S_{\text{п,м}}$ – площадь контакта покрытия и основы.

С учетом условия совместности деформаций получаем:

$$(\sigma_{\text{п}}+\sigma_1)h_{\text{п}} = -\sigma_{\text{м}}h_{\text{м}}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{м}} = -\frac{(\sigma_{\text{п}}+\sigma_1)h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}}. \quad (13)$$

Подставляя в выражение (10) уравнения (12) и (13), получаем:

$$\frac{\sigma_1}{E_{\text{п}}} = -\frac{(\sigma_{\text{п}}+\sigma_1)h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}E_{\text{м}}}, \quad (14)$$

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_{\text{п}}h_{\text{п}}E_{\text{п}}}{h_{\text{м}}E_{\text{м}}+h_{\text{п}}E_{\text{п}}}. \quad (15)$$

Таким образом, можно найти внутренние напряжения, возникающие в покрытии, с учетом взаимодействия с основным материалом:

$$\sigma_{\text{внут}} = \sigma_{\text{п}} + \sigma_1 = \sigma_{\text{п}} - \frac{\sigma_{\text{п}}h_{\text{п}}E_{\text{п}}}{h_{\text{м}}E_{\text{м}}+h_{\text{п}}E_{\text{п}}}, \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{внут}} = \sigma_{\text{п}} \frac{1}{1 + \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{м}}} \cdot \frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}}}. \quad (17)$$

Из уравнения (17) видно, что основной вклад в динамику функции внутренних напряжений вносит отношение $h_{\text{п}}/h_{\text{м}}$, так как отношение модулей упругости является

величиной порядка единицы. Общий вид единичной функции $\tilde{\sigma}_{\text{внут}}(h_n, h_m) = \frac{1}{1 + \frac{h_n}{h_m}}$ представлен на рис. 5.

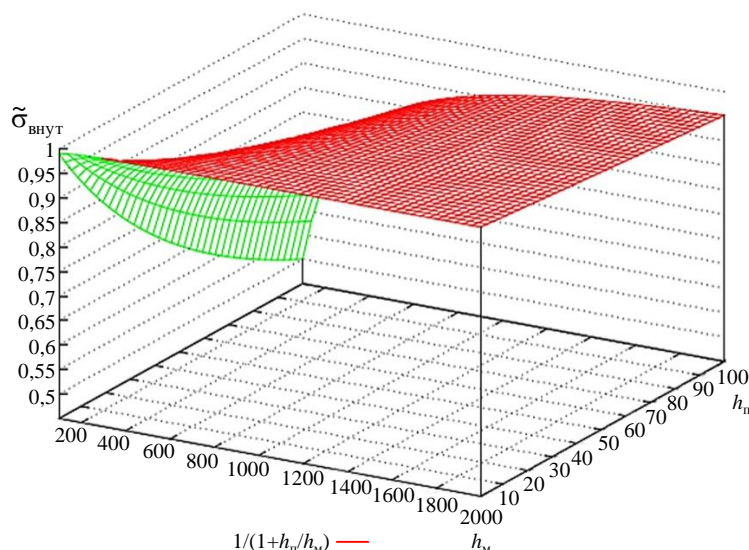


Рис. 5. Вид единичной функции внутренних напряжений в покрытии

Видно (рис. 5), что внутренние напряжения в тонких покрытиях (1–20 мкм) при толщине образца более 1000 мкм практически не отличаются от внутренних напряжений, возникающих в покрытии без учета взаимодействия с материалом образца. В то же время в толстых покрытиях (50–100 мкм) влияние толщины образца на величину внутренних напряжений существенно: при толщине образца 1000 мкм напряжения ниже на 5–10%, чем с тонким покрытием.

Таким образом, конечный вид зависимости внутренних напряжений от температур плавления материала и покрытия с учетом взаимодействия покрытия и основы будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_{\text{внут}} = \frac{(T_m - T_n)}{(T_m - 500)} \cdot \frac{0,0135\Delta T}{(T_n - 500 - 0,0135\Delta T)} \cdot \frac{E_n}{1 + \frac{E_n \cdot h_n}{E_m \cdot h_m}} \quad (18)$$

Изменение внутренних напряжений в покрытии в процессе эксплуатации

В рамках данной задачи был определен механизм возникновения внутренних напряжений: при нанесении конденсированного покрытия при некоторой температуре T_n внутренние напряжения в покрытии отсутствуют. При охлаждении образца до температуры T_0 вследствие разницы температурных коэффициентов линейного расширения возникают внутренние напряжения в покрытии, величина которых определяется формулой (18), из которой видно, что величина внутренних напряжений в покрытии при прочих равных условиях зависит от величины $\Delta T = T_n - T_0$.

Температура эксплуатации многих деталей с упрочняющими покрытиями превышает комнатную температуру, в таком случае, величина ΔT будет определяться как $\Delta T = T_n - T_{\text{экс}}$, где $T_{\text{экс}}$ – температура эксплуатации.

В таком случае формула (18) приобретает вид:

$$\sigma_{\text{внут}} = \frac{(T_{\text{м}} - T_{\text{п}})}{(T_{\text{м}} - 500)} \cdot \frac{0,0135 (T_{\text{п}} - T_{\text{эксп}})}{(T_{\text{п}} - 500 - 0,0135 (T_{\text{п}} - T_{\text{эксп}}))} \cdot \frac{E_{\text{п}}}{1 + \frac{E_{\text{п}} h_{\text{п}}}{E_{\text{м}} h_{\text{м}}}} \quad (19)$$

Очевидно, что все величины в уравнении (19) являются постоянными для конкретной пары «материал–покрытие» кроме температуры эксплуатации, тогда график функции $\sigma_{\text{внут}}(T_{\text{эксп}})$ будет иметь вид, представленный на рис. 6.

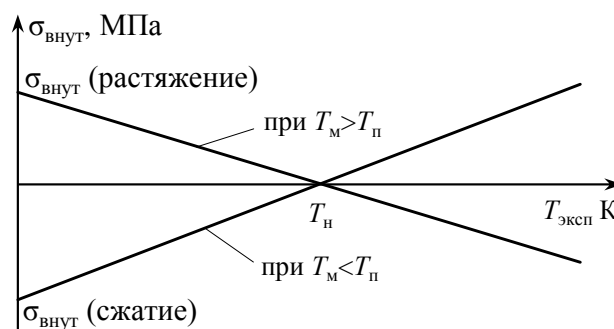


Рис. 6. Зависимость внутренних напряжений в покрытии от температуры эксплуатации

Видно (рис. 6), что в покрытиях, в которых при комнатной температуре внутренние напряжения являются напряжениями растяжения, при температуре эксплуатации выше температуры напыления внутренние напряжения становятся напряжениями сжатия. Очевидно также и обратное: в покрытиях, в которых при комнатной температуре внутренние напряжения являются напряжениями сжатия, при температуре эксплуатации выше температуры напыления внутренние напряжения становятся напряжениями растяжения.

Примеры применения

При механической обработке материалов с высокой твердостью применяется неперетачиваемый металлообрабатывающий инструмент из твердых сплавов (ВК6, Р6М5 и др.). При упрочнении поверхности наносят покрытие из нитрида титана (TiN). В качестве примера будет рассмотрена твердосплавная пластина из сплава ВК6 с упрочняющим покрытием из нитрида титана. Температура плавления сплава ВК6 составляет 2922 К [21], а нитрида титана: 3223 К.

Нижний и верхний пределы температуры плавления материала покрытия для сплава ВК6 рассчитываются следующим образом:

$$T_{\text{п,ниж}} = 1019 \ln(2922) - 6133,7 = 1998 \text{ К}, \quad (20)$$

$$T_{\text{п,верх}} = 452,21 \exp(0,0009 \cdot 2922) = 6273 \text{ К}. \quad (21)$$

Очевидно, что $T_{\text{п,ниж}} < 3223 < T_{\text{п,верх}}$, следовательно покрытие из нитрида титана удовлетворяет условиям, предъявляемым к покрытиям по значениям внутренних напряжений.

Относительные деформации, возникающие в покрытии, рассчитываются следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{(2922 - 3223)}{(2922 - 500)} \cdot \frac{0,0135 \cdot 600}{(3223 - 500 - 0,0135 \cdot 600)} = -0,00037. \quad (22)$$

Из уравнения видно, что внутренние напряжения, возникающие в покрытии, – сжимающие. Для приблизительной оценки их величины, без учета взаимодействия с основой, требуется использовать закон Гука (модуль упругости нитрида титана $E_n=256000$ МПа [19]):

$$\sigma_n = \varepsilon_n E_n = -0,00037 \cdot 256000 = -94,72 \text{ МПа.} \quad (23)$$

Твердосплавные пластины имеют толщину более 2000 мкм, а покрытие на них в сумме по противоположащим сторонам имеет толщину до 15 мкм. Модуль упругости сплава ВК6 составляет $E_m=620000$ МПа [22]. Для расчета внутренних напряжений с учетом взаимодействия с основой требуется использовать формулу (17):

$$\sigma_{\text{внут}} = -94,72 \frac{1}{1 + \frac{256000}{620000} \cdot \frac{15}{2000}} = -94,43 \text{ МПа.} \quad (24)$$

Результаты, обсуждение и заключения

Предложена инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных ионно-плазменных покрытиях после напыления, которая позволяет определить возможность нанесения определенного типа упрочняющего покрытия еще на стадии выбора материала.

В результате проведенного исследования выявлены:

- зависимость температурного коэффициента линейного расширения от температуры плавления материала (это следует из правила Линдемана);
- сжимающие внутренние напряжения в покрытии возникают в том случае, когда температура плавления материала покрытия выше температуры плавления материала основы;
- растягивающие внутренние напряжения в покрытии образуются в том случае, когда температура плавления материала покрытия ниже температуры плавления материала основы;
- зависимость относительной деформации материала покрытия от температур плавления материалов покрытия и основы;
- зависимости верхнего и нижнего пределов температур плавления материала покрытия от температуры плавления материала основы, при которых в покрытии возникают внутренние напряжения, не приводящие к пластическому течению материала покрытия (в пределах упругости);
- влияние толщины покрытия на величину внутренних напряжений. Показано, что тонкие покрытия менее чувствительны к изменению внутренних напряжений при взаимодействии с материалом основы;
- зависимость внутренних напряжений от температуры эксплуатации. Установлено, что в покрытиях, в которых при комнатной температуре внутренние напряжения являются напряжениями растяжения (сжатия), при температуре эксплуатации выше температуры напыления внутренние напряжения становятся напряжениями сжатия (растяжения).

На примере упрочнения поверхности твердосплавной пластины неперетачиваемого режущего инструмента было показано, что технология упрочнения подобрана верно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
2. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.

3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 60–70.
4. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 71–81.
5. Мубояджян С.А. Особенности осаждения потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 20–34.
6. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 12–15.
7. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 3–8.
8. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ // *МиТОМ*. 2011. №1. С. 34–40.
9. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов / В сб. матер. XI Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 473–475.
10. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 17–20.
11. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.09.
12. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Металлы*. 2012. №1. С. 5–13.
13. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; опубл. 31.03.09.
14. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением // *МиТОМ*. 2008. №6. С. 31–36.
15. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 26–37.
16. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. №3. С. 3–11.
17. Lindemann F.A. The calculation of molecular vibration frequencies // *Phis. Z.* 1911. V. 11. P. 609–619.
18. Самсонов Г.В. Свойства элементов. Часть 1. Физические свойства: справочник. 2-е изд. М.: *Металлургия*, 1976. 600 с.
19. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения: справочник. 2-е изд. М.: *Металлургия*, 1976. 560 с.
20. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 590 с.
21. Елютин В.П., Павлов Ю.А. Высокотемпературные материалы. Ч. 1. М.: *Металлургия*, 1972. 264 с.
22. Францевич И.И., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: справочник. Киев: *Наукова думка*. 1982. 286 с.