

УДК 621.793.74

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ДИСКРЕТНЫХ СТРУКТУР УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ,
НАНЕСЕННЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ***канд. техн. наук, доц. В.А. ЛОЙКО, Е.В. СЁМИН**(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

Представлен анализ влияния температурного режима процесса вакуумно-плазменного нанесения упрочняющих покрытий на прецизионные детали. Рассмотрены факторы, влияющие на разрушение поверхностного слоя покрытия, также рассмотрены виды разрушений и предложена зависимость между допустимой протяжённостью дискретного участка и предельной величиной напряжения сжатия. Опробована методика расчета величины остаточных напряжений в зависимости от прикладываемого к подложке в процессе конденсации отрицательного потенциала, обеспечивающего заданный тепловой режим.

Из условий функционирования прецизионных пар и опыта эксплуатации топливных агрегатов следует, что практически все отказы и неисправности вызываются повышением трения или износом деталей. В зависимости от условий внешнего трения и связанных с ним параметров и особенностей упругопластической деформации производные процессы, возникающие в поверхностных слоях металла, могут иметь различную интенсивность: в одних условиях преобладающее значение могут иметь химико-механические процессы, к которым относятся упругопластическая деформация поверхностного слоя металла и его обеление; в других – максимальное развитие получают теплофизические процессы и схватывание металлов; кроме этого, могут возникать условия для развития усталостных процессов, абразивного разрушения и др.

Общепризнанным для прецизионных соединений любого типа является положение о ведущем и сопутствующих видах изнашивания. В зависимости от условий трения сочетание таких факторов, как механическое воздействие, среда, материал и состояние поверхностей, складывается более благоприятно для развития одного процесса и менее благоприятно для развития других. Поэтому процессы имеют различные скорости и, следовательно, развивается преимущественно тот процесс, для которого складывается наиболее благоприятное сочетание факторов. Следовательно, в любых условиях трения существует ведущий вид износа. В некоторых трущихся парах детали подвержены нескольким видам изнашивания, что объясняется прежде всего неравномерным нагружением поверхностей трения одной детали. Однако каждая деталь имеет наиболее изнашиваемый участок поверхности, где преобладает только один вид изнашивания.

Основная часть. Необходимость защиты и упрочнения поверхности даже при использовании конструкционных материалов с улучшенным комплексом физических и механических свойств вытекает из того, что поверхностные слои нагруженных твердых тел – самостоятельная подсистема, в которой развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме тела. Отсюда следует, что отказы изделий вследствие износа, коррозионных и эрозионных процессов, трещинообразования при различных видах эксплуатационного нагружения определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя. Синергетический эффект при нанесении тонких покрытий обеспечивает достаточный уровень функциональных характеристик в необходимом масштабе путем объединения свойств двух и более материалов с получением композитов, обладающих характеристиками, которые не могут быть достигнуты при использовании одного материала.

Вместе с тем поверхность со сплошным покрытием неизбежно разрушается путем растрескивания покрытия (когезионное разрушение) или отслоения по интерфейсу (адгезионное разрушение). Такое разрушение может наступать как под действием остаточных либо эксплуатационных напряжений, так и в результате их совместного действия. В итоге, подобно процессам в живой природе, происходит самоорганизация новых, более устойчивых структур. Исходя из принципов самоорганизации была предложена концепция создания композита с поверхностью, имеющей дискретную топографию, архитектура которой изначально подобна той, которая будет сформирована в результате приработки под действием остаточных напряжений и напряжений от эксплуатационного нагружения, например, от приложенной к основе растягивающей нагрузки [1–3]. Такой подход позволяет на проектировочном и технологическом уровне обеспечивать качество и эксплуатационные свойства изделия с покрытием.

Таким образом, определение допустимой протяжённости дискретного участка происходит исходя из недопущения вспучивания (потери устойчивости) при действии остаточных напряжений сжатия в по-

крытии. Напряжениям растяжения в покрытии $\sigma(z)$ соответствуют касательные напряжения $\tau(z)$ на границе раздела фаз (покрытие – основа):

$$\sigma z = \frac{1}{h_{\Pi}} \int_0^z \tau z dz, \quad (1)$$

где z – текущая координата вдоль продольной оси; h_{Π} – толщина покрытия.

Отслоению покрытия от основы (рис. 1, а) соответствует превышение касательных максимальных напряжений τ_{\max} величины прочности сцепления основы с покрытием $\tau_{\text{сц}}$:

$$\tau_{\text{сц}} \leq \tau_{\max}. \quad (2)$$

По имеющимся данным остаточные напряжения сжатия в покрытиях повышают предел текучести, пределы прочности при растяжении и изгибе их материала. С высоким уровнем остаточных напряжений сжатия в покрытиях связывают также повышение их трещино-, износо- и коррозионной стойкости. Вместе с тем остаточные напряжения сжатия в зависимости от уровня могут привести к вспучиванию покрытия с последующим растрескиванием (рис. 1, в). Исходя из значений прочности сцепления во избежание разрушения отрывом и вспучиванием предложено ограничивать величину остаточных напряжений сжатия в покрытии. Считается, что вспучивание покрытия на плоской поверхности будет иметь место при наличии исходного местного нарушения адгезии покрытия с основой, когда напряжения сжатия достигают критической величины:

$$\sigma_{\text{кр}}^{\text{ост}} = \frac{\pi^2 E_{\Pi}}{3} \left(\frac{h_{\Pi}}{l} \right)^2, \quad (3)$$

где l – протяжённость участка покрытия; E_{Π} – модуль упругости первого рода материала покрытия.

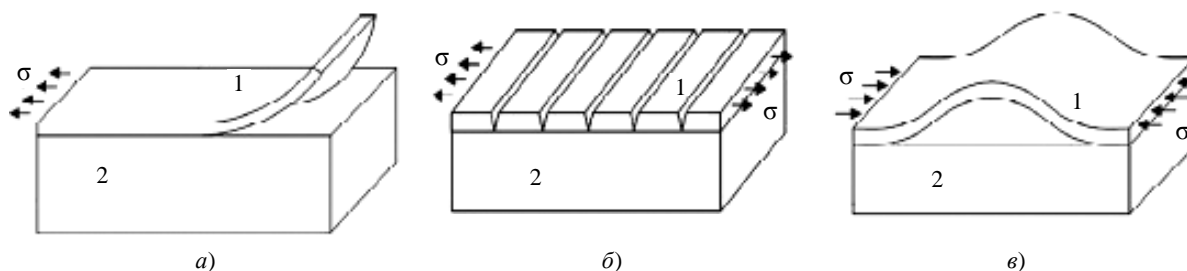


Рис. 1. Типы разрушения покрытия под воздействием остаточных напряжений: растяжение (а), сжатие (в), отслоение (а), растрескивание (б), вспучивание (в); 1 – покрытие, 2 – основа

Таким образом, логично найти максимально допустимую протяжённость участка дискретного покрытия D исходя из недопущения вспучивания (потери устойчивости) при действии остаточных напряжений сжатия в покрытии:

$$D = l \leq \frac{\pi}{h_{\Pi}} \sqrt{\frac{E_{\Pi}}{3\sigma_{\text{кр}}^{\text{ост}}}}. \quad (4)$$

Показано, что покрытия, характеризующиеся высоким уровнем остаточных напряжений сжатия, могут разрушаться еще до начала их эксплуатации в результате вспучивания, приводящего к последующему разрушению поверхности. Избежать такого вида разрушения можно путем формирования покрытий дискретного типа с заданными параметрами, ограничив протяжённость дискретного участка и увеличив его толщину. Вместе с тем толстые покрытия больше склонны к отслоению с образованием трещины на граничной поверхности, поэтому вопрос выбора толщины необходимо оптимизировать.

Ввиду наличия термической составляющей остаточных напряжений общий уровень остаточных напряжений сжатия в покрытии зависит от материала основы. Предельно допустимая протяжённость дискретного участка покрытия при прочих равных условиях будет различна на основах из различных материалов.

Композиционное дискретное покрытие $Ti_{0,5}(C, N)_{0,5}$ было нанесено методом низкотемпературной вакуумно-плазменной конденсации при помощи установки «Булат-3Т». Перед нанесением образцы были подготовлены по стандартной технологии, включающей механическую обработку, полировку и очистку в ультразвуковой установке УЗУ-025. Процесс формирования покрытия протекал в две стадии. На первом этапе к образцу было приложено напряжение порядка 1,3 кВ при давлении в вакуумной камере по-

рядка 10^{-3} Па. В результате ионной бомбардировки происходила очистка, активация и разогрев поверхности инструмента до температуры $150...180$ °С. На втором этапе в камеру поступал реактивный газ азот, напряжение было снижено до $100...200$ В, процесс осаждения покрытия осуществлялся за счет протекания плазмохимических реакций на поверхности образца.

На физико-механические свойства покрытия оказывает значительное влияние его микроструктура, формирование которой в свою очередь зависит также от технологических факторов – давления реакционного газа, температуры процесса и скорости осаждения. В работе [2] в зависимости от температуры процесса предлагается трёхзонная модель структуры покрытия (рис. 2).

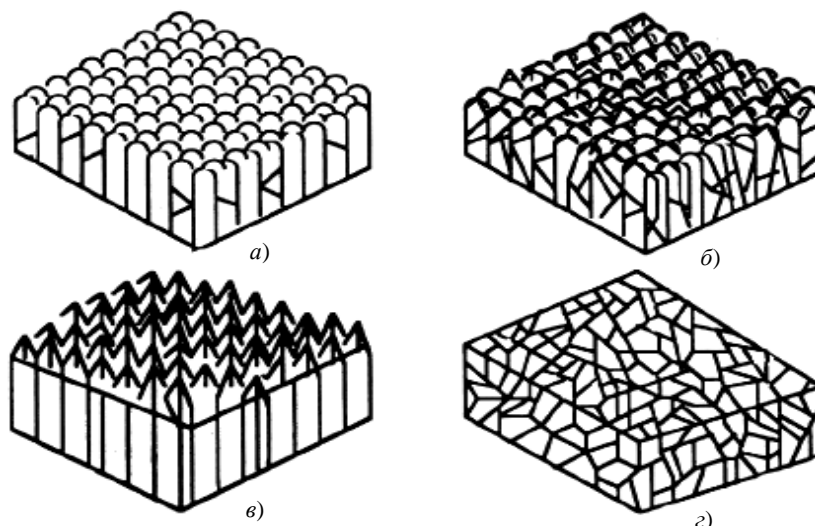


Рис. 2. Структурные зоны вакуумных конденсатов по классификации Мовчана – Демчишина: а – зона 1; б – зона Торнтонна; в – зона 2; г – зона 3

При низких температурах подвижность атомов при осаждении на инструментальную подложку ограничена, структура покрытия столбчатая, с коническими наростами и слабыми открытыми границами. Такая структура называется также «ботириодальной» и соответствует зоне 1. При увеличении температуры, хотя структура остается столбчатой, происходит более равновесное формирование покрытия, что ведет к его уплотнению и упрочнению межзёренных границ (зона 2). При дальнейшем увеличении температуры процесса структура покрытия приобретает морфологию равноосных зёрен (зона 3). Переход между структурами разных зон происходит плавно. Формирование структуры зоны 2 связано с усилением поверхностной диффузии, а зоны 3 с объемной диффузией в покрытии.

Модель, предложенная Мовчаном и Демчишиным, впоследствии претерпела изменения с учетом влияния газовой среды, а затем усовершенствована Торнтоном – в нее была включена дополнительная переходная зона Т, формирующаяся между зонами 1 и 2 и представляющая собой столбчатую структуру, сходную со структурой зоны 1, но с более мелкими волокнистыми кристаллитами и достаточно плотными границами, обеспечивающими хорошие механические свойства покрытия.

Из вышесказанного следует, что в зависимости от функционального назначения покрытия необходимо стремиться к получению оптимальной структуры, обеспечивающей наилучший комплекс механических свойств. На рисунке 3 схематично показано изменение структуры покрытия в зависимости от температуры процесса и давления реакционного газа.

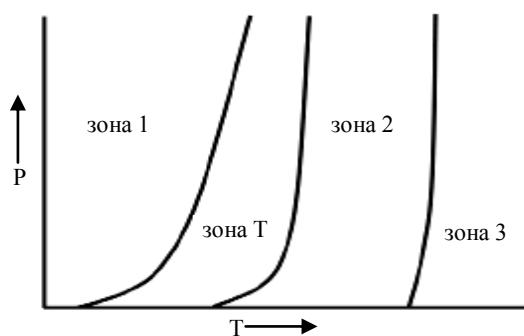


Рис. 3. Влияние температуры подложки Т и давления реакционного газа Р на структуру конденсата

В процессе конденсации покрытия в нем возникают остаточные напряжения. Возникновение внутренних напряжений в тонких пленках, согласно [2; 4; 5], связано с различием коэффициентов термического расширения материалов подложки и покрытия, механизмом кристаллизации (поатомного осаждения, ионной бомбардировки) покрытия, механизмом непрерывного наращивания толщины покрытия, наличием закрепляющего приспособления.

При конденсации покрытия методами физического осаждения напряжения в покрытиях имеют не только разные значения, но и знаки. Так, согласно [2], в пленках, полученных методами испарения и осаждения, возникают растягивающие напряжения, а в пленках, полученных распылением, – сжимающие.

Напряжения сжатия являются более выгодными, так как позволяют повысить когезионную прочность и трещиностойкость покрытия. Однако сжимающие напряжения могут приводить к потере устойчивости слоя, в котором они действуют, более того, в зоне краевого эффекта они приводят к возникновению расслаивающих напряжений [3]. На величину внутренних напряжений влияют как химический состав покрытия, его структура, так и технологические параметры. Для пленок, осажденных методами распыления, повышение давления в камере, температуры и дополнительное распыление под небольшими углами приводят к снижению внутренних напряжений [3]. Величина остаточных напряжений зависит и от толщины покрытия.

Прочность напыленного покрытия и его сцепление с подложкой в значительной мере зависят от величины и знака остаточных напряжений. Поскольку покрытие и подложка обладают различными теплофизическими свойствами, даже при равномерном подогреве детали с покрытием в последнем возникнут напряжения. Процесс плазменного напыления вызывает возникновение нестационарных температурных полей в покрытии и подложке, поэтому в результате совместного охлаждения системы «покрытие – подложка» в покрытии возникнут усадочные сжимающие напряжения.

Напыленное покрытие рассматривается как сплошная среда в связи с невысокой пористостью покрытия. В первую очередь представляют интерес те остаточные напряжения, которые характеризуют покрытие как сплошную среду, так как именно они являются причиной разрушения покрытия. В этом случае расчеты можно вести на основе существующих теорий физики сплошной среды (сопротивление материалов, теория упругости, теория теплопроводности). Такие расчеты тем более оправданны, что для оценки свойств напыленных слоев обычно пользуются такими величинами, как предел прочности, модуль упругости, коэффициент теплопроводности и т.д. [6].

Чтобы рассчитать величину остаточных напряжений в покрытии, необходимо знать распределение температур в детали в момент времени, соответствующий нулевым напряжениям в покрытии, т.е. в момент их образования.

Считая, что формирование температурных полей в системе «покрытие – подложка» осуществляется путем теплопроводности, задача распределения температурных полей математически может быть сформулирована следующим образом:

$$C_1 T \rho_1 = \frac{dT}{dt} \Big|_{x,t} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_1(T) \frac{dT}{dx} \right), \quad 0 < x < l(t_0), \quad t_0 < t \leq x < t_k; \quad (5)$$

$$(T)\rho_2 \frac{dT(x,t)}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_2(T) \frac{dT}{dx} \right), \quad l(t_0) < x < l(t), \quad t_0 < t \leq x < t_k; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T(x,0) &= T_0, \\ T(l(t_0),t) &= T(l(t_0),t) = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\lambda_1(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_2(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l(t)}, \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} -\lambda_2 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l(t)} &= q, \\ \lambda_1 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\infty} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Здесь $T(x,t)$ – температура; C_i, ρ_i, λ_i – соответственно коэффициенты теплоемкости, плотности и коэффициенты теплопроводности материала подложки и покрытия; q – величина теплового потока. Тепловое воздействие частиц покрытия на свободную поверхность подложки принимается эквивалентным разогреву этой поверхности тепловым потоком мощности q ; t – время; x – пространственная координата.

Для решения задачи теплопроводности был использован конечно-разностный метод (метод сеток). Система уравнений аппроксимировалась следующей разностной схемой:

$$C_1 T \rho_1 \frac{T^{\wedge} - T}{\Delta x} = \frac{1}{h} \left(\lambda'_1 T^{\wedge}_{i+1} \frac{T^{\wedge}_{i+1} - T^{\wedge}_i}{h_{i+1}} - \lambda'_i T^{\wedge}_i \frac{T^{\wedge}_i - T^{\wedge}_{i-1}}{h_i} \right), \quad (10)$$

$$C_2 T \rho_2 \frac{T^{\wedge} - T}{\tau} = \frac{1}{h} \left(\lambda'_2 T^{\wedge}_{i+1} \frac{T^{\wedge}_{i+1} - T^{\wedge}_i}{h_{i+1}} - \lambda'_i T^{\wedge}_i \frac{T^{\wedge}_i - T^{\wedge}_{i-1}}{h_i} \right), \quad (11)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (12)$$

$$-\lambda_2 \frac{T_N^{\wedge} - T_{N-1}^{\wedge}}{h_N} = q, \quad (13)$$

$$\lambda_1 \frac{T_1^{\wedge} - T_0^{\wedge}}{h_1} = 0. \quad (14)$$

Здесь для обозначения приближенного значения температуры используют то же обозначение:

$$\lambda' T_i = \frac{\lambda(T_i) + \lambda(T_{i-1})}{2}. \quad (15)$$

При расчете остаточных напряжений температурный градиент в направлении ширины образца не учитывается.

Рассмотрим процесс образования остаточных напряжений на поверхности покрытия и в слое, лежащем на глубине y (рис. 4).

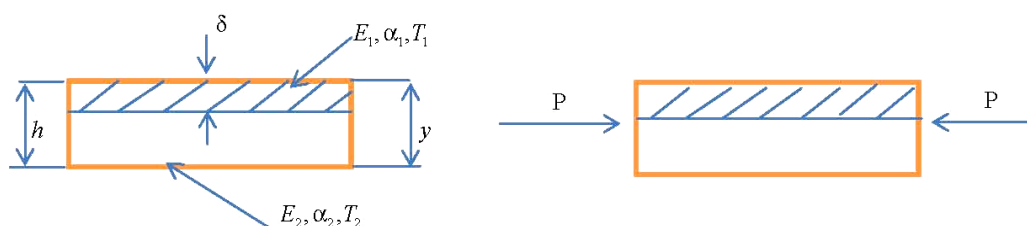


Рис. 4. Схема образования остаточных напряжений

Температурное поле образца в любой момент времени можно рассчитать по формулам (10)–(13). Если толщина напыленного слоя растет в процессе нанесения покрытия, то моменту образования любого слоя соответствует вполне определенное температурное поле в образце $T(x, t)$. К концу процесса напыления поверхностные напряжения отсутствуют, а температурное поле имеет распределение $T(x, t_k)$.

Остаточные напряжения на поверхности покрытия возникают в результате охлаждения образца до температуры окружающей среды. Для их определения можно воспользоваться формулой, позволяющей вычислить температурные напряжения в полосе. Учитывая, что происходит охлаждение, получим следующее выражение для определения остаточных напряжений на поверхности покрытия:

$$\sigma_{\sigma p} = - \left[d_p T_p + \left(-\frac{P}{b} + \int_0^h E(y) \alpha(y) T(y) dy \right) \right] \cdot E_p, \quad (16)$$

где α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости при растяжении; индексом p обозначены величины, относящиеся к поверхности покрытия. Сила P соответствует реакции заделки, при свободном расширении $P = 0$.

Для определения остаточных напряжений в слое y (см. рис. 4) можно воспользоваться следующими формулами:

- при полном стеснении деформацией

$$\sigma_{oy} = \alpha_1 E_1 T_y; \quad (17)$$

- при свободном расширении

$$\sigma_{oy} = (\alpha_1 T_y - \alpha_2 TC_2) E_1, \quad (18)$$

где TC_2 – средняя температура подложки.

При вычислении в качестве покрытия использовался $Ti_{0,5} CN_{0,5}$; в качестве подложки – железо.

$$\alpha_1 = 8,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}; \quad \alpha_2 = 12,15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1};$$

$$E_1 = 4,42 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \quad E_2 = 2,1 \cdot 10^{-11} \text{ Па}.$$

Некоторые результаты расчетов остаточных напряжений в $Ti_{0,5}(C,N)_{0,5}$ покрытии, полученном вакуумно-плазменным напылением при силе тока 80 А, приведены в таблице.

Зависимость остаточных напряжений в покрытии от напряжения

Напряжение, В	200	150	100	50
σ_{oy} , Па	$1,9 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{-15}$

На основании предложенной модели и проведенных расчетов можно сделать **вывод** о принципиальной возможности уменьшения величины остаточных напряжений в покрытиях путем регулирования определенных параметров технологического процесса, влияющих на величину температурного поля системы «покрытие – подложка».

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение: пер. с англ. / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
3. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
4. Палатник, Л.С. Механизмы образования и субструктура конденсированных пленок / Л.С. Палатник, М.Я. Фукс, В.М. Косевич. – М.: Наука, 1972. – 320 с.
5. Анциферов, В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве: моногр. / В.А. Лойко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 192 с.

Поступила 13.01.2014

EVALUATION OF STRESS STATE OF DISCRETE STRUCTURES HARDENING GLOATING'S APPLIED VACUUM PLASMA SPRAYING

V. LOYKO, Y. SIOMIN

In this work the analysis of influence of the temperature regime of the process of vacuum-plasma deposition of hardening coatings on high-precision parts. The paper considers the factors influencing the destruction of the surface layer coating, considers the types of destruction and the proposed relationship between the permissible length of discrete plot and the marginal value of the compressive stress. Tested method of calculating the amount of residual stresses depending on the applied to the substrate in the process of condensation of negative potential that ensures the specified heat mode.