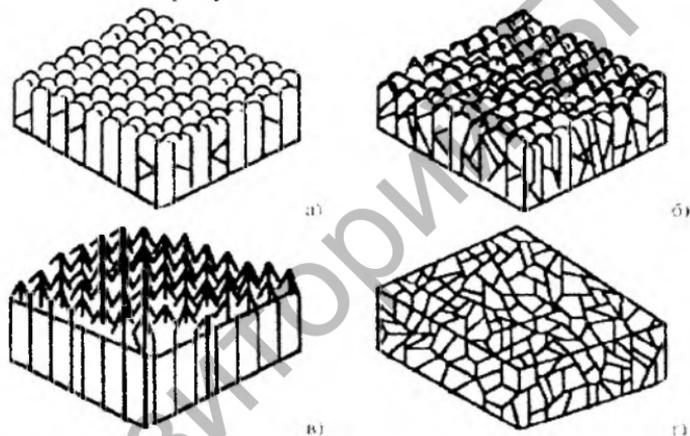


## АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОДЛОЖКИ НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*Лойко В.А., к.т.н., доцент; Сёмин Е.В., ассистент*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск*

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 трехзонная модель структуры покрытия, показанная на рисунке 1.



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

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

крытия. Модель, предложенная Мовчаном и Демчишиным, была впоследствии изменена с учетом влияния газовой среды, а затем – модифицирована Торнтоном, включившим в нее дополнительную переходную зону (зона Т), формирующуюся между зонами 1 и 2 и представляющую 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 2 схематично показано изменение структуры покрытия в зависимости от температуры процесса и давления реакционного газа [2].

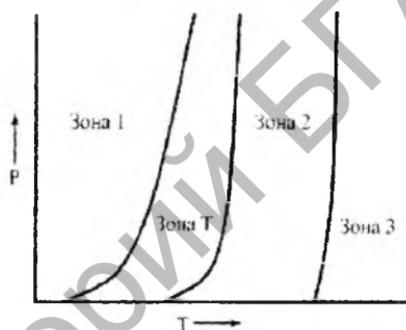


Рис. 2. Влияние температуры подложки Т и давления реакционного газа Р на структуру конденсата

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 даже и знаки. Так, согласно [2], в пленках, полученных методами испарения и осаждения, возникают растягивающие напряжения, а в пленках, полученных распылением, они 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, и, кроме того, в зоне краевого эффекта они при-

водят 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 оправданы, 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 сформирована следующим образом:

$$C_1(T)\rho_1 \frac{dT(x,t)}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \lambda_1(T) \frac{dT}{dx} \right), 0 < x < l(t_0), t_0 < t \leq x < t_k, \quad (1)$$

$$(T)\rho_2 \frac{dT(x,t)}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \lambda_2(T) \frac{dT}{dx} \right), l(t_0) < x < l(t), t_0 < t \leq x < t_k, \quad (2)$$

$$T(x, 0) = T_0$$

$$T(l(t_0), t) = T(l(t_0), t) = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_2(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l}, \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda_2 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l(t)} = q, \\ \lambda_1 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x} = 0. \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $T(x, t)$  – температура;  $C_1, \rho_1, \lambda_1$  – соответственно коэффициенты теплоемкости, плотность 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:

$$C_1(T) \rho_1 \frac{T^\wedge - T}{\Delta x} = \frac{1}{h} \left( \lambda_1'(T^\wedge)_{i+1} \frac{T_{i+1}^\wedge - T_i^\wedge}{h_{i+1}} - \lambda_1'(T^\wedge)_i \frac{T_i^\wedge - T_{i-1}^\wedge}{h_i} \right), \quad (6)$$

$$C_2(T) \rho_2 \frac{T^\wedge - T}{\tau} = \frac{1}{h} \left( \lambda_2'(T^\wedge)_{i+1} \frac{T_{i+1}^\wedge - T_i^\wedge}{h_{i+1}} - \lambda_2'(T^\wedge)_i \frac{T_i^\wedge - T_{i-1}^\wedge}{h_i} \right), \quad (7)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (8)$$

$$-\lambda_2 \frac{T_N^\wedge - T_{N-1}^\wedge}{h_N} = q, \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{T_1^\wedge - T_0^\wedge}{h_1} = 0. \quad (10)$$

Здесь для обозначения приближенного значения температуры используют то же обозначение:

$$\lambda'(T)_i = \frac{\lambda(T_i) + \lambda(T_{i-1})}{2}. \quad (11)$$

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. 3). Температурное поле образца в любой момент времени можно рассчитать по формулам (6)–(9). Если толщина напыленного слоя растет в процессе нанесения покрытия, то моменту образования любого слоя соответствует вполне опре-

деленное температурное поле в образце  $T(x, t)$ . К концу процесса напыления поверхностные напряжения отсутствуют, а температурное поле имеет распределение  $T(x, t)$ .

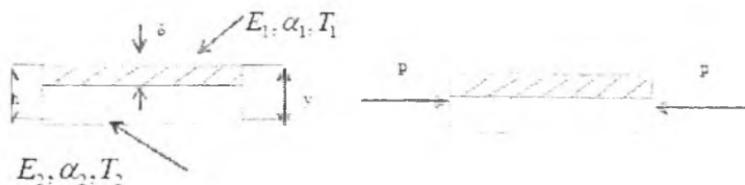


Рис. 3. Схема образования остаточных напряжений

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:

$$\sigma_{\text{ост}} = - \left[ d_p T_p + \left( -\frac{P}{b} + \int_0^h E(y) \alpha(y) T(y) dy \right) \right] \cdot E_p, \quad (12)$$

$$\int_0^h E(y) dy$$

где  $\alpha$  – 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  $y$  (рис.3) можно воспользоваться следующими формулами:

а) при полном стеснении деформацией:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha_1 E_1 T_y; \quad (13)$$

б) при свободном расширении:

$$\sigma_{\text{ост}} = (\alpha_1 T_y - \alpha_2 T C_2) E_1, \quad (14)$$

где  $T C_2$  – средняя температура подложки.

При вычислении в качестве покрытия использовался  $T_{105}(CH)_{0,5}$ . В качестве подложки  $Fe$ .

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

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

Некоторые результаты расчетов остаточных напряжений в покрытии, полученном вакуумно-плазменным напылением при силе тока 80А, приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Зависимость остаточных напряжений в покрытии от напряжения

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

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

*Список использованных источников*

1. Верешака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верешака. – 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. Фуке, 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, Д.К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве: монография / В.А. Лойко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 192 с.: ил. ISBN 978-985-6770-84-8.

УДК 674:621.928.93

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ МЕТОДОМ МИКРОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ВЛАЖНОГО ПРЕССОВАНИЯ**

**Войтов В.А., д.т.н., проф., Буецкий В.А., аспирант,  
Кравцова Н.В., аспирант**

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков, Украина*

В последние годы все более остро становится проблема, связанная с нехваткой традиционных источников энергии. Одним из актуальных и экономически выгодных направлений решения данной проблемы является изготовление из биомассы твердого топлива в виде брикетов или пеллет.