

УДК 621.52

А.Р. Завербний

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронного машинобудування**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ТОВСТИХ ПЛІВОК  
НА РУХОМУ ТЕХНОЛОГІЧНУ ОСНОВУ**

© Завербний А.Р., 2002

**Наведено результати теоретичних досліджень лиття товстих плівок на рухому технологічну основу. Розроблена математична модель процесу лиття. Проведені експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність моделі при литті плівок товщиною від 0,1 до 2,0 мм.**

**The broughted results of basic researches of process lithoes of thick films on moving technological base. Mathematical model of process lithoes is designed. They are organized experimental studies, which confirm adequacy of model at casting of films by thickness from 0,1 before 2,0 mm.**

Товсті керамічні та металізаційні плівки застосовуються для виготовлення деталей і покриттів електронних приладів, конденсаторів, керамічних ізоляційних деталей, основ гібридних інтегральних схем, багатошарових керамічних плат та корпусів, покриттів оксидних катодів.

Ці плівки виготовляються методом лиття на рухому технологічну основу, тобто вони утворюються внаслідок витікання в'язкої пасти (шлікера) з щілини лійки литтєвого пристрою на рухому поверхню.

Фізичні властивості плівок забезпечуються складом (рецептом) шлікера. Товщина плівок, яка у зв'язку зі специфікою електронного виробництва, є одним з найважливіших параметрів, залежить, переважно, від технологічних режимів лиття та конструктивних параметрів литтєвого пристрою.

Вирішення питань, пов'язаних із забезпеченням рівномірності, точності та стабільності товщини плівок різного складу, дасть можливість отримувати точні і якісні деталі та покриття електронних приладів.

Побудова математичної моделі лиття плівок на рухому технологічну основу дає можливість уточнити технологічні та конструктивні фактори та степінь їх впливу на формування товщини плівок. Існуючі моделі процесу лиття плівок мають обмежене застосування і непридатні для практичного застосування при литті порівняно товстих плівок (товщиною понад 200 мкм).

Застосувавши систему рівнянь Нав'є – Стокса разом з рівнянням нерозривності потоку можна математично описати рух в'язкої рідини.

Рівняння Нав'є – Стокса, що описує витікання в'язкої рідини, для випадку течії в тонкій плівці допускає суттєві спрощення. Оскільки товщина плівки мала, то всі похідні від швидкості, що беруться поперек плівки великі порівняно з похідними вздовж плівки. При литті плівки на технологічну основу (ТО) швидкість частинок рідини має тільки одну складову. Направивши вісь  $X$  по напрямку руху, а вісь  $Y$  перпендикулярно до поверхні

плівки, для випадку стаціонарної течії, можна рівняння Нав'є-Стокса звести до одного рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \rho \cdot g \cdot \sin \alpha = 0, \quad (1)$$

де  $\frac{\partial P}{\partial x}$  – похідна тиску за напрямом руху;  $U_x$  – складова швидкості вздовж осі;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\alpha$  – кут нахилу осі  $X$  до горизонту;  $\rho$  – густина рідини.

Похідна тиску  $\frac{\partial P}{\partial x}$  не залежить від координати  $Y$ .

Розглянемо витікання рідини у вузькій щілині (рис. 1) між рухомою і нерухомою стінками. Рухомою стінкою є технологічна основа (ТО), а нерухомою – дно фільтри. Приймаємо, що висота щілини  $b$  значно менша від двох її інших вимірів:

- довжини  $B$  (вздовж напрямку витікання);
- ширини  $L$  (в напрямку, що перпендикулярний площині рисунку).

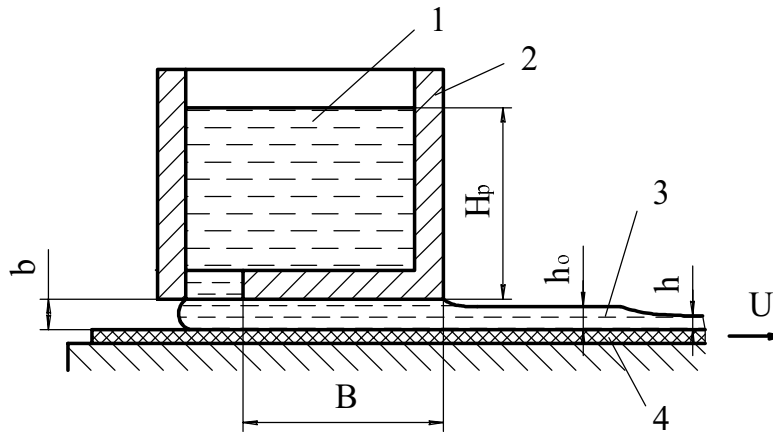


Рис. 1. Принципова схема лиття плівки на рухому технологічну основу:  
1 – шлікер; 2 – литтєва лійка; 3 – рідинний шар шлікера; 4 – технологічна основа (ТО);  
 $H_p$  – висота рівня шлікера в лійці;  $b$  – висота литтєвої щілини;  $h_0$  – товщина відлитого рідинного шару;  $h$  – товщина плівки;  $B$  – довжина литтєвої щілини

У цьому випадку швидкість частинок рідини вдалині від країв щілини має тільки одну складову і витікання описується рівнянням (1). Інтегруючи його при граничних умовах:  $U = V$  при  $y = 0$ ;  $U = 0$  при  $y = b$ , отримаємо вираз для розподілу швидкості витікання  $U$  по  $y$ :

$$U = U \cdot \frac{y}{b} - \frac{y \cdot b}{2 \cdot \mu} \left( 1 - \frac{y}{b} \right) \left( \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \right). \quad (2)$$

Вираховуючи витрати шлікера на одиницю ширини щілини і враховуючи, що градієнт тиску від'ємний в напрямі витікання рідини, отримаємо

$$Q = \int_0^b U dy = U \cdot \frac{b}{2} + \frac{b^3}{12\mu} \left( \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \right). \quad (3)$$

Умовою нерозривності потоку є  $Q = \text{const}$  для будь-якого поперечного перерізу щілини. Оскільки кількість пасти  $Q_n$ , що пройшла литтєву щілину, рівномірно розташована

на технологічній основі, що рухається з швидкістю  $V$ , утворюючи рідкий шар, то для перерізу шару

$$Q = V \cdot h_0. \quad (4)$$

З умови нерозривності потоку шлікера і рівності витрат у виразах (3), (4) визначаємо товщину рідкого шару

$$h_0 = \frac{b}{2} + \frac{1}{12 \cdot \mu \cdot V} \cdot b^3 \left( \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \right). \quad (5)$$

При довжині щілини  $B$ , надлишковому тиску  $P_H$  в литтєвій лійці отримаємо

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_H}{B}. \quad (6)$$

При закритій щілині, перед нею буде розвиватися тиск  $P$ , що дорівнює статичному тиску на дні литтєвої лійки. Коли рідина буде витікати через відкриту щілину, тиск перед нею впаде до  $P_1$ . Визначити його можна, склавши рівняння Бернуллі для дна лійки і вихідної щілини

$$P_H = P_1 = P - \rho_0 \cdot g \left( \frac{W^2}{g} + Z \right) = \rho_0 \cdot g \cdot H_p - \rho \cdot g \left( \frac{W^2}{g} + Z \right), \quad (7)$$

де  $W$  – швидкість витікання;  $Z$  – опір щілини.

Швидкість витікання визначається за виразом  $W = \frac{\rho_0 \cdot g \cdot b^2}{3 \cdot \mu}$ , а опір щілини

$Z = \frac{\Delta P}{g \cdot \rho_0}$ , де  $\Delta P$  – втрата тиску. Її можна визначити з виразу

$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot W \cdot B}{D^2}, \quad (8)$$

де  $D$  – діаметр трубопроводу, який у разі плоскої щілини можна виразити через висоту щілини:  $D = 4 \cdot b$ .

Підставивши вираз (8) у формулу визначення опору щілини, отримаємо

$$Z = 2 \cdot B/3$$

Тоді вираз (7) можна записати

$$P_1 = \rho_0 \cdot g \cdot H_p - \rho_0 \cdot g \left( \frac{\rho_0 \cdot g \cdot b^4}{9 \cdot \mu^2} + \frac{2}{3} B \right) = \rho_0 \cdot g \left[ H_p - \left( \frac{\rho_0^2 \cdot g \cdot b^4}{9 \cdot \mu} + \frac{2}{3} B \right) \right]. \quad (9)$$

Враховуючи умови на вході і на виході литтєвої щілини, замінімо її довжину  $B$  ефективною довжиною щілини  $B_e$ , що визначається як:

$$B_e = B + N \cdot b,$$

де  $N$  – коефіцієнт втрат на вході литтєвої щілини.

При литті плівки на горизонтально розташовану технологічну основу кут  $\alpha = 0$ . Після цих перетворень вираз товщини рідинного шару набуде вигляду

$$h_0 = \frac{b}{2} + \frac{\rho \cdot g \cdot \left[ H_p - \left( \frac{\rho_0^2 \cdot g \cdot b^4}{9 \cdot \mu^2} + \frac{2}{3} \cdot (B + b \cdot N) \right) \right] \cdot b^3}{12 \cdot \mu \cdot V \cdot (B + b \cdot N)}. \quad (10)$$

Внаслідок випаровування розчинника з рідинного шару шлікера товщиною  $h_0$  відбувається його усадка і перетворення в плівку товщиною  $h$ , що містить наповнювач і пластичні речовини (зв'язку та пластифікатор).

Коефіцієнт усадки – це відношення товщини плівки  $h$  до товщини шару шлікера  $h_0$ , з якого ця плівка утворилась

$$k_y = \frac{h}{h_0} = \frac{1}{\rho} (\rho_0 - x_p \cdot \rho_p), \quad (11)$$

де  $\rho, \rho_0, \rho_p$  – густина відповідно плівки, шлікера і розчинника;

$$x_p = V_p / V_0,$$

де  $V_p$  – об'єм розчинника в шлікері,  $V_0$  – об'єм шлікера.

Вираз для визначення товщини плівки набуде вигляду

$$h = k_y \left\{ \frac{b}{2} + \frac{\rho_0 \cdot g \left[ H_p - \left[ \frac{\rho^2 \cdot g \cdot b^4}{9 \cdot \mu^2} + \frac{2}{3} (B + b \cdot N) \right] \right] \cdot b^3}{12 \cdot \mu \cdot V \cdot (B + b \cdot N)} \right\}. \quad (12)$$

Отримане рівняння – це залежність, яка зв'язує товщину плівки, що відливається, з показниками литтєвого шлікера ( $\rho_0, \mu, x_p$ ), конструктивними параметрами литтєвої машини ( $V, B$ ) та технологічними режимами лиття ( $H_p, b$ ).

Рівняння можна використати для вибору технологічних режимів лиття для отримання плівки заданої товщини з шлікера з певними показниками, якщо відомі значення коефіцієнта усадки  $k_y$  і коефіцієнта втрат тиску на вході в литтєву щілину  $N$ . Для їх визначення була проведена серія дослідів.

На графіку (рис. 2) показані розрахункові та експериментальні значення товщин плівок, отриманих при таких показниках шлікера, технологічних та конструктивних параметрах:  $\rho_0 = 1,86 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 230 \text{ спз}$ ,  $B = 34 \text{ мм}$ ,  $H_p = 40 \text{ мм}$ ,  $V = 1-3 \text{ мм/с}$ ,  $b = 1-2 \text{ мм}$ .

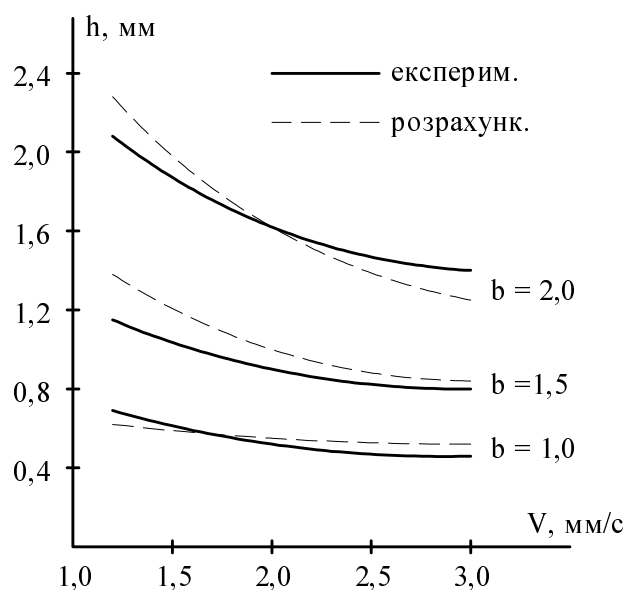


Рис. 2. Залежність товщини плівки від швидкості руху TO при різних висотах литтєвої щілини

Розрахункове значення коефіцієнта усадки  $k_y = 0,63$ ; експериментально визначений коефіцієнт втрат тиску на вході в литвеву щілину  $N = 10,5; 13,0; 15,0$  при висоті щілини відповідно  $b = 2,0; 1,5; 1,0$  мм.

Розрахункові та експериментальні значення товщин плівок відрізняються не більше ніж на 14 %, що дає можливість зробити висновок про адекватність математичної моделі лиття плівки.

1. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии. – Л., 1967. 2. Пляновский А.Н., Рамм В.М., Каган С. 3. Процессы и аппараты химической технологии. – М., 1967. 3. Пальчевский Б.А. Исследование процесса литья пленок для получения покрытий электронных приборов // Электронная техника. Сер. 7. – 1975. – Вып. 4.

УДК 621.9.048.6

Я.М. Кусий, О.Р. Баранецька\*

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

\*кафедра нарисної геометрії та графіки

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЮВАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ДОВГОМІРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

© Кусий Я.М., Баранецька О.Р., 2002

У статті досліджено вплив технологічних параметрів методу ВВЗО стосовно довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів. Наведено методику досліджень, принципові схеми зміцнювального інструмента з електромагнітним приводом та обладнання для реалізації методу ВВЗО. Проаналізовано математичні та графічні залежності впливу технологічних параметрів методу ВВЗО стосовно фізичних параметрів якості довгомірних циліндричних деталей із конструкційних матеріалів.

The influence of technological parameters of a vibratory-centrifugal strengthening treatment (VCST) for hardening of long-sized cylindrical details, which are manufactured of constructional materials, is explored in this article. The procedure of research examinations, principle diagrams of the hardening instrument with an electromagnetic drive and mechanisms for embodying a vibratory-centrifugal strengthening treatment is suggested. The mathematical equations and pictorial diagrams of technological parameter's influence of a method VCST for physical properties quality of long-sized cylindrical details, which are manufactured of constructional materials, are analysed.

Успішне вирішення одного із основних завдань народного господарства, загалом, та машинобудування, зокрема, забезпечення експлуатаційних характеристик довгомірних деталей форми тіл обертання технологічними методами, тісно пов'язане із вдосконаленням технології виготовлення цих виробів та управлінням показниками якості оброблюваних поверхонь, зокрема