

Sposób obliczania grubości warstwy emulsji światłoczułej, naniesionej na płyty metodą wyciągania

WPROWADZENIE

Jedną z technik stosowanych do produkcji precyzyjnych wyrobów dla potrzeb elektroniki, jak np.: maski cieniowe, azury do układów scalonych, maski do naparowywania, obwody drukowane, jest proces trawienia kształtowego.

Decydujący wpływ na szereg istotnych parametrów technologicznych procesu trawienia kształtowego ma grubość warstwy emulsji światłoczułej, naniesionej na powierzchnię płyty poddawanej trawieniu. Najbardziej uwidacznia się ten wpływ w przypadku: rozdzielczości, czasu naświetlania, odporności warstwy na działanie czynnika trawiącego. Dlatego też, ze względu na wymaganą wysoką jakość otrzymywanych wyrobów, konieczne jest możliwie dokładne określenie grubości nałożonej warstwy kopiowej. Znacznie bardziej rygorystycznie problem ten występuje podczas wdrażania nowych emulsji światłoczułych dla potrzeb chemigrafii, jak np. w przypadku badania emulsji kazeinowych, gdzie wymagana jest konieczność ciągłego pomiaru grubości warstwy kopiowej, warunkującej możliwości zastosowania danej emulsji.

Ze względu na pracochłonność, uciążliwość, pewną niedokładność pomiaru przyrządem /np. gładkościomierz Talysurf 4/, zaistniała potrzeba opracowania metody teoretycznego obliczania grubości warstwy, bez użycia kłopotliwej i nie zawsze możliwej metody pomiaru przyrządem.

W literaturze podano szereg wzorów do obliczania grubości warstwy, np. w pracy Dieriagina [1] zamieszczono następujące zależności:

- wzór Bingham'a dla grubości cieczy zatrzymanej na ściankach wiskozymetru kapilarnego:

$$D = \sqrt{\frac{2V \mu}{9g \rho}}, \quad /1/$$

- wzór Moreya:

$$D = k/\mu \cdot V^n, \quad /2/$$

gdzie k i n są współczynnikami charakterystycznymi dla różnych rodzajów cieczy,

- wzór Boheme i Gedake:

$$D = \sqrt{\frac{2V\mu}{g \cdot \rho}} \quad /3/$$

W pracy Ławriszczewa /2/ podano wzór:

$$D = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V\mu}{\rho g \sin \alpha}} \quad /4/$$

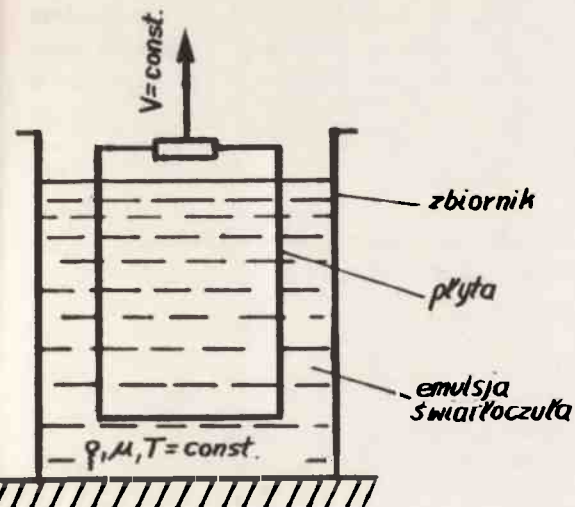
Wzory /1/ - /4/ mogą służyć jedynie do przybliżonych obliczeń grubości warstwy cieczy /np. emulsji światłoczułej/ pozostającej na płycie pokrytej metodą wyciągania z cieczy, gdyż nie uwzględniają faktu, że grubość naniesionej warstwy zależy w bardzo dużym stopniu od wysokości płyty, przyjmując kształt klina /np. dla płyty o wysokości 20 cm rozbieżności grubości warstwy w jej górnej i dolnej części są rzędu 200%/ . W związku z powyższym istnieje potrzeba opracowania wzoru umożliwiającego obliczanie grubości nałożonej warstwy emulsji w funkcji parametrów fizyko-chemicznych emulsji i wymiarów płyty, co pozwoli na ograniczenie pracochłonności wykonywania pomiarów za pomocą przyrządu, a także przyspieszy proces wdrażania nowych typów emulsji dla potrzeb chemigrafii.

Poniżej przedstawiono model matematyczny zjawiska pokrywania płyt emulsją, zaproponowany przez autorów.

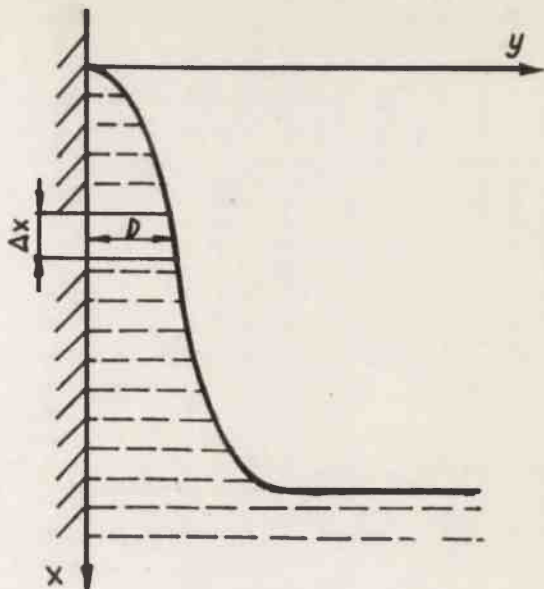
MODEL MATEMATYCZNY OPISUJACY ZJAWISKO NANOSZENIA EMULSJI ŚWIATŁOCZUŁEJ

Metoda zanurzeniowa nanoszenia emulsji światłoczułej polega na wyciąganiu ze stałą szybkością umieszczonych w zbiorniku z emulsją płyt /rys. 1/ za pomocą wyciągarki pneumatycznej typu Dip-coating o regulowanej szybkości i wysokości zanurzenia płyty. Pokryte tą metodą płyty nie posiadają jednakowej na całej powierzchni grubości warstwy emulsji. Największą grubość powłoki osiąga się w dolnej części, a najmniejszą na górze płyty. Identyczny efekt otrzymamy w przypadku, jeżeli unieruchomimy płytę, a powierzchnia emulsji będzie opuszczać się ze stałą szybkością równą szybkości wyciągania płyty, osiągniętą przez opuszczenie zbiornika lub wypływ cieczy.

Bilansując przepływ masowy emulsji spływającej po płycie /rys. 2/ w obrębie warstwy o wysokości Δx i jednostkowej szerokości, uwzględniając zmianę grubości warstwy, otrzymamy przechodząc do wielkości nieskończenie małych następujące równanie:



Rys. 1. Zasada działania wyciągarki pneumatycznej - metoda zanurzeniowa nanoszenia emulsji światłoczułej



Rys. 2. Rozkład grubości warstwy emulsji na płycie podczas spływu grawitacyjnego

$$- \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial D}{\partial t} \quad /5/$$

uzależniające objętościowe natężenie przepływu Q od grubości warstwy na płycie, dla składowej x , w chwili t . Rozwiązanie równania /5/ wymaga określenia zależności $Q = f/D$. Wykorzystując równanie ruchu we współrzędnych prostokątnych dla składowej x , po przyjęciu założeń: stacjonarności, laminarności przepływu, nieściśliwości cieczy, spływu pionowego jedynie pod działaniem sił ciężkości, a nie ciśnienia, równanie ruchu przyjmuje postać:

$$\frac{d^2 v_x}{dy^2} = - \frac{g \rho}{\mu} \quad /6/$$

Dla podanego układu /przy przesunięciu układu współrzędnych o wielkość D dla ułatwienia obliczeń/ obowiązują następujące warunki brzegowe:

$$v_x = 0 \text{ dla } y = D \text{ /brak poślizgu na ściance/} \quad /7/$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \text{ dla } y = 0 \text{ /maksimum prędkości/} \quad /8/$$

Uwzględniając kolejne stałe całkowania ($C_1=0$, $C_2 = \frac{\rho g}{2\mu} D^2$), równanie rozkładu prędkości można zapisać w ostatecznej postaci:

$$v_x = \frac{\rho g D^2}{4\mu} / 1 - \sqrt{v}^2 / \quad /9/$$

Obliczenie prędkości średniej \bar{v} , tzn. średniej całkowej po przekroju prostokątnym do kierunku przepływu, umożliwia określenie za pomocą prostego wzoru szukanej zależności objętościowego natężenia przepływu Q w funkcji grubości warstwy na płycie

$$Q = \frac{\rho g v^3}{3\mu} \quad /10/$$

a w konsekwencji zastąpienie równania /5/ równaniem różniczkowym /11/, opisującym zjawisko nakładania emulsji na płytę:

$$- \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\rho g}{\mu} D^2 \frac{\partial D}{\partial x} \quad /11/$$

z następującymi warunkami brzegowymi:

$$\begin{aligned} 1^0 D &= 0 \text{ dla } x \text{ dowolnego i } t \rightarrow \infty \\ 2^0 D &= 0 \text{ dla } x = 0 \text{ i } t \text{ dowolnego} \end{aligned} \quad /12/$$

Przyjęcie takich warunków brzegowych jest jednak pewnym uproszczeniem, gdyż w rzeczywistości nawet po nieskończone długim czasie na powierzchni płyty pozostanie bardzo cienka "graniczna" warstewka emulsji, związana z siłami adhezji emulsji do podłoża, a nie uwzględnionymi w modelu.

Chociaż wpływ tej warstewki na otrzymany wynik jest niewielki, zostanie jednak uwzględniony w korelacji empirycznej podanej w dalszej części pracy.

Rozwiązując równanie /11/ z warunkami brzegowymi /12/ za pomocą metody rozdzielania zmiennych i wprowadzając oznaczenie $t = h/v$, otrzymano wzór na grubość warstwy emulsji w zależności od położenia x na płycie:

$$D = \left(\frac{\mu v}{\rho g h} \right)^{1/2} \cdot x^{1/2} \quad /13/$$

W przypadku, gdy pokrywana płyta jest nachylona do pionu pod kątem α , to w kierunku przepływu działać będzie nie przyspieszenie ziemskie, ale jego składowa $g \sin \alpha$. Wtedy wzór /13/ przyjmie postać:

$$D = \left(\frac{\mu v}{\rho g h \sin \alpha} \right)^{1/2} \cdot x^{1/2} \quad /14/$$

Wykorzystując wzór /13/ można obliczyć masę emulsji zatrzymanej po obu stronach płyty podczas procesu pokrywania:

$$m = \frac{4}{3} \rho \left(\frac{\mu v \rho}{g} \right)^{1/2} \cdot h \quad /15/$$

Istotnym ograniczeniem stosowania równania /13/, jak również innych jego postaci, może być niezachowanie warunków laminarności przepływu, któ-

re określa liczba kryterialna Reynoldsa-Re. Dla spływu grawitacyjnego cieczy warunkiem laminarności jest $Re < 25$. W zakresie $25 < Re < 100$ można spodziewać się przepływu "pseudowarstwowego", związanego z pojawianiem się na powierzchni cieczy wyraźnych fal. W przypadku dużej nierównomierności /chropowatości/ powierzchni powstawanie wirów burzliwych może jednak nastąpić przy dużo niższych wartościach liczby Reynoldsa. Ponieważ płyty pokrywane emulsją światłoczułą posiadają gładką powierzchnię i są dokładnie odtłuszczone /zgodnie z technologią fotolito-graficzną/, a obliczona wartość liczby Re dla stosowanych warunków pokrywania jest mniejsza od jedności, więc omawiany przepływ jest jak najbardziej laminarny /uwarstwiony/.

WYNIKI POMIARÓW GRUBOSCI WARSTWY EMULSJI, UZYSKANE ZA POMOCĄ PRZYRZĄDU I OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH

W celu sprawdzenia stosowalności wyprowadzonego wzoru /13/ w praktyce, pokryto szereg płyt emulsją światłoczułą na bazie kazeiny. Stosowane roztwory różniły się rodzajem użytej kazeiny, gęstością i lepkością otrzymanej emulsji kazeinowej. Następnie obliczono wartość grubości emulsji w poszczególnych punktach płyty, posługując się wzorem /13/. W analogicznych punktach płyty zmierzono grubość warstwy za pomocą gładkościomierza Talysurf 4 firmy Taylor-Hobson. Wyniki przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Porównawcze zestawienie wyników pomiarów grubości warstwy, uzyskanych za pomocą gładkościomierza Talysurf 4 i obliczonych teoretycznie dla kolejno stosowanych emulsji światłoczułych

Gęstość ρ g/cm ³	Lepkość $\mu \times 10^2$ g/cm·s	Szybkość wyciągania v cm/s	Wysokość płyty h cm	Miejsce pomiaru x, cm	Grubość zmierzona D ^x , μ m	Grubość obliczona D, μ m	$\frac{D^x - D}{D^x} \cdot 100$ bez korek- tacji /%/	Grubość obli- czona z wz. /18/ D ^x , μ m	$\frac{D^x - D}{D^x} \cdot 100$ po kore- tacji /%/
1,0425	20,1	0,25	20	4	2,4	3,13	30,4	2,52	5,0
1,043	22,3	0,25	20	5	3,1	3,69	19,0	3,04	1,9
1,048	17,0	0,25	20	5	2,6	3,21	23,5	2,59	0,4
1,0435	29,4	0,25	20	5	2,8	3,36	20,0	2,73	2,5
1,043	14,2	0,20	18	4	2,0	2,55	24,2	1,99	0,5
1,045	18,3	0,20	20	5	2,1	2,61	33,8	2,04	2,9
1,0405	18,0	0,25	20	5	2,6	3,32	27,6	2,69	3,5

ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Otrzymane wyniki grubości warstwy kopiowej dla stosowanych emulsji światłoczułych, w porównaniu z analogicznymi wynikami pomiarów za pomocą gładkościomierza, dają błąd bezwzględny wynoszący przeciętnie około 25%, który dopuszcza możliwość stosowania tej metody, a tym samym w dużym stopniu rezygnację z konieczności ciągłego prowadzenia żmudnych i nie zawsze dokładnych pomiarów przyrządem.

Znajomość podstawowych wielkości występujących we wzorze na grubość warstwy /proste metody pomiaru/ umożliwia szybkie znalezienie grubości pokrycia emulsją na całej powierzchni płyty. Z drugiej strony istnieje możliwość określania za pomocą wyprowadzonego wzoru gęstości i lepkości emulsji, czy też szybkości wyciągania płyty, które by gwarantowały osiągnięcie żądanej grubości powłoki, wymaganej ze względu na warunki prowadzenia procesu trawienia i zalecenia stosowanej technologii.

Zastosowanie płyt o jednakowych wymiarach /np. 200x100 mm/ i tej samej szybkości wyciągania /np. 0,25 cm/s /upraszcza zależność /13/ do postaci: $D = 0,357 \cdot \sqrt{v \cdot x}$. /16/

Wyprowadzona zależność na masę emulsji koniecznej do pokrycia jednej płyty /wzór 15/ może być wykorzystywana do oceny zużycia emulsji podczas pokrywania określonej ilości płyt. Otrzymane różnice grubości warstwy kopiowej pomiędzy wynikami teoretycznymi /wzór 13/, a wynikami uzyskanymi za pomocą gładkościomierza biorą się z nieuwzględniania w podanym rozwiązaniu grubości emulsji pozostającej na płycie po nieskończeniście długim czasie /założenie 1⁰ równania 12/ i warunków utwardzania emulsji.

Pomiar grubości warstwy emulsji na płytach za pomocą przyrządu może być przeprowadzony jedynie po wstępnym utwardzeniu w temperaturze minimum 90⁰C. W wyniku utwardzania emulsji następuje równocześnie zmniejszanie się jej grubości wskutek odparowania wody, zależne od temperatury i czasu utwardzania /3/. Stąd grubość warstwy obliczona /D/ zawsze będzie większa od zmierzonej /D^x/. Obie te wielkości można powiązać następującą zależnością liniową:

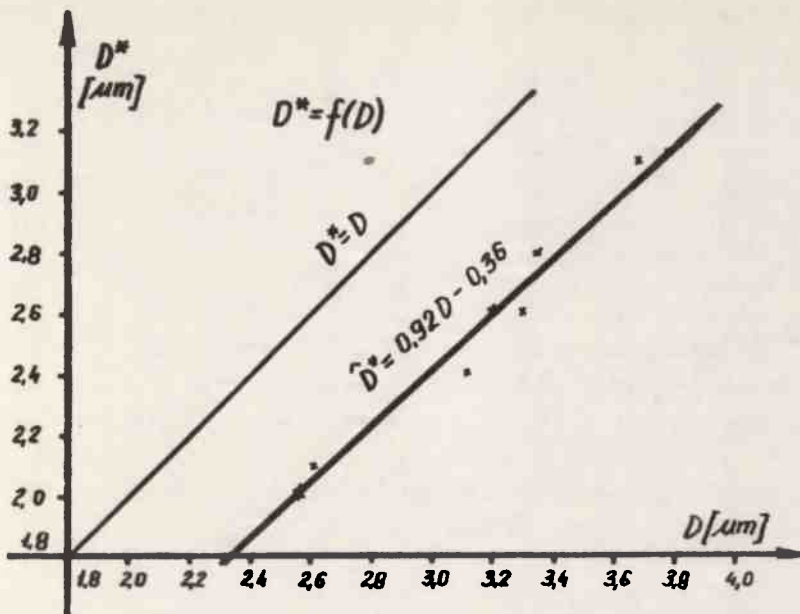
$$D^x = wD + c, \quad /17/$$

a współczynnikom w i c nadać określony sens fizyczny:

w - współczynnik związany ze zmianą grubości warstwy podczas procesu utwardzania emulsji,

c - współczynnik uwzględniający grubość warstwy po nieskończeniście długim czasie ściekania emulsji.

Na wykresie /rys. 3/ przedstawiono wyniki doświadczalne grubości warstwy kopiowej D^x zmierzonej przyrządem, w funkcji grubości D obliczonej ze wzoru /14/, a także przypadek uwzględniający równość obu tych wielkości /w równe 1 i c równe zero/.



Rys. 3. Wykres zależności grubości D^* warstwy emulsji zmierzonej gładkościomierzem Talysurf 4 w funkcji grubości D obliczonej teoretycznie ze wzoru /14/ i \hat{D}^* obliczonej ze wzoru empirycznego /18/.

Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów dla wyników zamieszczonych w tabelicy 1 i na wykresie /rys. 3/, określono wartości współczynników w i c równania /17/ odpowiednio: $w = 0,92$ i $c = -0,36$, a tym samym końcową postać skorelowanego równania /17/:

$$\hat{D}^* = 0,92D - 0,36 \quad /18/$$

o współczynniku regresji $r = 0,98$, świadczącym że otrzymana korelacja jest właściwa, znacznie poprawiająca uzyskane wyniki grubości /p. tabela 1/.

Empiryczny wzór /18/ dotyczy określonego rodzaju emulsji /emulsja na bazie kazeiny/ i ściśle określonych warunków utwardzania, tzn. temperatury zapiekania 120°C i czasu zapiekania 2 minut. Podane współczynniki w i c równania /18/ dla innych typów emulsji i w innych warunkach utwardzania ulegną zmianie, ale mogą być w analogiczny sposób wyznaczone.

Przeprowadzona analiza otrzymanych wyników wskazuje, że zależność na grubość warstwy emulsji naniesionej na płyty metodą wyciągania, podana wzorem /13/ i /18/, oddaje w pełni charakter zachodzącego zjawiska i może być stosowana w praktyce. Pozwala ona ocenić "klinowatość" warstwy emulsji, jej grubość i zużycie w zależności od warunków wyciągania i parametrów stosowanej emulsji światłoczułej.

STOSOWANE OZNACZENIA

x, y, z	- współrzędne kartezjańskie	
v_x	- prędkość przepływu w kierunku x	cm/s
ρ	- gęstość	g/cm^3
p	- ciśnienie	N/cm^2
g	- przyspieszenie ziemskie	$9,81 m/s^2$
t	- czas spływu emulsji na płycie	s
μ	- lepkość dynamiczna	$g/cm \cdot s$
ν	- lepkość kinematyczna	cm^2/s
D	- grubość warstwy emulsji	μm
D^x	- grubość warstwy emulsji zmierzona przyrządem	μm
D^x	- grubość warstwy emulsji obliczona ze wzoru empirycznego	μm
c_1, c_2	- stałe całkowania	
Q	- objętościowe natężenie przepływu liczone na wymiar liniowy	$cm^3/cm \cdot s$
k, n	- współczynniki charakterystyczne dla różnych rodzajów cieczy	
V	- szybkość wyciągania płyty	cm/s
h	- wysokość płyty	cm
l	- szerokość płyty	cm
r	- współczynnik regresji	
m	- masa emulsji pokrywająca płytę	g
\bar{v}_x	- średnia prędkość przepływu	cm/s
G	- masowe natężenie przepływu	$g/cm \cdot s$
α	- kąt nachylenia płyty do pionu	
Re	- liczba kryterialna Reynoldsa	$Re = 4G/\mu$
w	- współczynnik związany ze zmianą grubości warstwy podczas procesu utwardzania emulsji	
c	- współczynnik uwzględniający grubość warstwy po nieskończeniu długim czasie ściekania emulsji.	

LITERATURA

1. Langan J.P.: Mater. Eng., 76, nr 1, 1972, 36.
2. Patent japoński, kl. 12B223, /B23k/, nr 7604, opubl. 3.3.72.
3. Roberts P.M.: Sub.-Assem. Compon. Fast., 11, 2,3,4, 1973.
4. Lewley A.: The International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology, V 13, nr 3, July 1977, 168-188.
5. Ničiporenko O.S.: Porošková mietallurgia, nr 12, 1967, 10-14.
6. Lubanska H.: Journal of Metals, 22, 45, 1970.
7. Kim K.Y. and Marshall W.R.: AIChEJ, 17, 3, 575, 1971, 45-49.
8. Najda Ju.I.: Porošková mietallurgia, nr 3, 1971, 21-25.
9. Najda Ju.I., Ničiporenko O.S.: Porošková mietallurgia, nr 7, 1967, 23-28.