

Badania nad optymalizacją procesów technologicznych

WSTĘP

Obserwowany w ciągu ostatnich kilkunastu lat bardzo szybki rozwój przemysłu elektronicznego i pewnych pokrewnych mu gałęzi gospodarki narodowej wywiera istotny wpływ na kierunki badań i opracowań naukowych oraz zakres stosowanych metod, ze względu na wzbogacanie bazy aparaturowej. Specyfika rozwoju przemysłu elektronicznego polega na ciągłym unowocześnianiu starych, czy szybkim wprowadzeniu zupełnie nowych technologii, a co się z tym wiąże na wdrażaniu do produkcji przemysłowej coraz nowszych rozwiązań technologicznych i materiałowych. Pociągą to za sobą konieczność intensyfikacji prac badawczych i wdrożeniowych.

Jedną z metod pozwalających na znaczne skrócenie cyklu badań oraz zmniejszenie czasu- i pracochłonności eksperymentów jest zastosowanie metod matematycznego planowania doświadczeń. Metody oparte no planowaniu eksperymentów i matematycznej obróbce ich wyników pozwalają, szczególnie w przypadku braku szerokich podstaw teoretycznych /tzn. znajomości mechanizmu, kinetyki, struktury itp./, na szybkie stworzenie modelu matematycznego procesu, znalezienie optymalnych warunków jego prowadzenia czy wytypowanie najistotniejszych parametrów mających wpływ na jego przebieg [1].

Przedstawione wyżej przyczyny spowodowały, że w trakcie opracowywania technologii nanoszenia rezystywnych warstw metalicznych /Ni-P/ na podłoża ceramiczne na drodze chemicznej, w celu zastosowania jej do produkcji wysokoprecyzyjnych rezystorów niskoomowych, zdecydowano się wykorzystać matematyczne metody planowania eksperymentów w celu zbadania i zoptymalizowania warunków prowadzenia procesów aktywowania powierzchni podłoża ceramicznych przed procesem chemicznego nanoszenia warstw Ni-P będących fragmentem tej technologii.

1. SCHEMAT TECHNOLOGII CHEMICZNEGO OSADZANIA WARSTW Ni-P NA PODŁOŻACH CERAMICZNYCH

Proces chemicznego osadzania warstw Ni-P polega na wykorzystaniu zachodzącej w podwyższonej temperaturze, heterofazowej, outokatalitycznej redukcji jonów Ni^{2+} przez wchodzący w skład roztworu do metalizacji podfosforyn sodowej. Roztwór stabilizowany jest przez dodatki związków buforujących, kompleksujących i stabilizujących [2-5].

W przypadku stosowania jako podłoża ceramiki /lub innych materiałów dielektrycznych/, konieczne jest, oprócz zwykle stosowanych operacji przygotowania /odtłuszczenie, trawienie itp./, naniesienie na powierzchnię podłoża katalizatora umożliwiającego inicjację reakcji chemicznego niklowania.

W związku z tym technologia chemicznej metalizacji dielektryków składa się z szeregu operacji cząstkowych /rys. 1 przedstawia schemat blokowy tej technologii/, które można podzielić na:

- wstępne przygotowanie podłoża,
- zaaktywowanie powierzchni,
- chemiczną metalizację,
- operacje końcowe.

Pomiędzy kolejnymi procesami cząstkowymi stosuje się płukanie międzyoperacyjne.

Podłoża z ceramiki mullitowej R-1



Rys. 1. Schemat blokowy technologii nanoszenia warstw metalicznych na podłoża dielektryczne na drodze chemicznej

2. AKTYWACJA PODŁOŻY DIELEKTRYCZNYCH PRZED CHEMICZNYM OSADZANIEM WARSTW Ni-P

Procesy aktywowania mają na celu osadzenie na powierzchni podłoża mikrozarodków metalu - katalizatora umożliwiającego inicjację reakcji chemicznego niklowania. Spośród wielu metod aktywowania wybrano, jako najbardziej przydatną dla produkcji rezystorów na podłożach ceramicznych, aktywację dwustopniową. Metoda ta polega na przeprowadzeniu kolejno dwóch operacji: sensybilizacji /uczulania/ powierzchni i aktywacji.

Sensybilizacja polega na zanurzeniu podłoża do kwaśnego roztworu soli cynowych, a aktywacja na zanurzeniu ich do kwaśnego roztworu soli palladowych. Konieczne jest dokładne wypłukanie powierzchni podłoża zarówno pomiędzy tymi operacjami, jak i po zakończeniu aktywacji w celu zapobieżenia rozkładowi kolejnych roztworów.

Analiza danych literaturowych wykazała ogromną różnorodność sposobów i czasu prowadzenia poszczególnych etapów procesu, składu roztworów, stężeń, pH, temperatury itp. Według doniesień literaturowych warunki procesu, przy stosowaniu podłoży ceramicznych, są najczęściej następujące [2-13]:

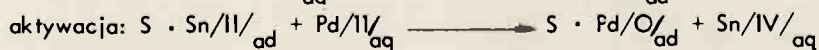
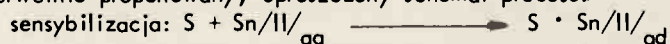
- **Sensybilizacja.** Proces można prowadzić w wodnym roztworze chlorku cynawego o stężeniu 0,0005 - 0,7 mola/dm³, zakwaszonym kwasem chlorowodorowym o stężeniu końcowym 0,02 - 0,6 mola/dm³. Czas trwania operacji 10 - 900 s, temperatura najczęściej pokojowa /ok. 298 K/. Często roztwór zawiera dodatki stabilizujące, zwiększające jego zwilżalność itp.

- **Aktywacja.** Proces można prowadzić w wodnym roztworze chlorku palladawego o stężeniu 0,005 - 0,10 mola/dm³ i pH równym 1,0 - 4,8, doprawionym kwasem chlorowodorowym. Czas zanurzenia 10 - 120 s, temperatura najczęściej pokojowa /ok. 298 K/. Często stosowany jest również szereg dodatków.

- **Płukanie** realizuje się w wodzie redestylowanej z mieszaniem lub w strumieniu wody dejonizowanej w czasie 60 - 300 s, temperatura najczęściej pokojowa /ok. 298 K/.

Obserwowany znaczny rozrzut warunków prowadzenia procesu aktywowania i składu roztworów spowodowany jest w dużej mierze brakiem zgodnego poglądu zarówno na mechanizm przebiegu poszczególnych operacji, jak i postać oraz strukturę produktów każdego etapu.

Pierwotnie proponowany, uproszczony schemat procesu:



gdzie: S - powierzchnia podłoża,

budzi wiele wątpliwości i nie pozwala na interpretowanie szeregu danych eksperymentalnych.

Obserwacje i zdjęcia wykonywane przy użyciu mikroskopu elektronowego wykazują, że w wyniku sensybilizacji na powierzchni podłoża tworzą się równomiernie rozłożone wysepki o średnicy kilkunastu do kilkudziesięciu Å. Materiał, z którego zbudowane są wysepki, identyfikowano na podstawie dyfrakcji elektronowej jako: Sn₄O₂/OH/4 [14], Sn/OH/1,5O_{0.5} [15] i SnO₂ [16]. Należy zaznaczyć, że prądku dyfrakcyjne są bardzo rozmyte, a poddanie próbki działaniu wiązki elektronów może powodować rekrytalizację, dehydratację lub utlenianie zaadsorbowanej warstwy. Bardziej prawdopodobne wydaje się, że na powierzchni podłoża tworzy się warstwo okwo-, chloro- i hydrokompleksów cynawych i cynowych, które w wyniku płukania tworzą nierozpuszczalne uwodnione tlenki i wodorotlenki [17]. Potwierdzają to badania wykonane przy użyciu spektroskopii Mössbauerowskiej [18, 19], wykazujące obecność na powierzchni dotychczas nie wyodrębnionych związków cynawych i cynowych.

Mechanizm adsorpcji powierzchniowej zachodzącej w czasie sensybilizacji także nie został dostatecznie poznany. Proponowany jest szereg różnych modeli: bezpośredniej chemisorpcji jonów cynawych [20], adsorpcji "dwustopniowej" polegającej na wstępnej adsorpcji koloidalnych cząsteczek shydrolizowanych związków cynowych, na których następuje chemisorbcja jonów cynawych [21, 22] czy adsorpcji fizycznej cząstek koloidu zawierających jony cyny na drugim i czwartym stopniu utlenienia [18, 19].

Najbardziej uniwersalny mechanizm, oparty na połączeniu koncepcji chemisorpcji i adsorpcji fizycznej zaproponował D'Amico [23,24]. Według jego teorii w czasie sensybilizacji mogą biec równolegle dwa procesy:

- na powierzchni podłoża adsorbuje się warstewka akwo-, chloro- i hydrokompleksów cyny, która w czasie płukania hydrolizuje tworząc uwodnione tlenki i wodorotlenki,
- na powierzchni podłoża adsorbują się cząsteczki koloidu zawierającego shydroli-zowane związki cyny na drugim i czwartym stopniu utlenienia.

Procesy te biegą równolegle i są współzależne /np. proces drugi zwiększając zwilżalność powierzchni ułatwia przebieg procesu pierwszego/, a wielkość ich udziału w sumarycznym przebiegu sensybilizacji zależy od pH, składu, stężenia i wieku roztworu, sposobu przygotowania powierzchni oraz sposobu realizacji procesu sensybilizacji i płukania.

Koncepcja D'Amico jest niewątpliwie najbardziej uniwersalna i pozwala na łatwą interpretację większości danych eksperymentalnych. Dużą jej wadą jest nieprecyzyjne określenie udziału obu procesów konkurencyjnych.

Równie wiele wątpliwości budzi mechanizm procesu aktywacji i postać, w jakiej występuje katalizator. Powszechny jest pogląd, że w czasie aktywacji zachodzi reakcja red-ox między jonami palladowymi a zoadsorbowanymi związkami cynowymi z utworzeniem mikrozorodków metalicznego palladu. Potwierdzają to badania z użyciem mikroskopu elektronowego wykazujące wyspową strukturę katalizatora, "odbijającą" rozkład sensybilizatora i dyfrakcji elektronowej, na podstawie której stwierdzono obecność na powierzchni podłoża metalicznego palladu. Z drugiej strony wykazano możliwość bezpośredniej aktywacji roztworem zawierającym wyłącznie jony palladu, bez uprzedniej sensybilizacji lub sensybilizacji roztworem związków cynowych, kiedy reakcja red-ox zachodzić nie może [25, 26].

Przedstawione wyżej wątpliwości dotyczące mechanizmu procesów zachodzących w czasie operacji aktywowania i postaci adsorbujących się związków oraz bardzo szerokie przedziały zmienności parametrów procesu wynikające z doniesień literaturowych stworzyły bardzo trudną sytuację przy opracowywaniu warunków technologicznych procesu aktywowania podłoża ceramicznych. W celu poznania natury i kinetyki tego złożonego procesu, a następnie wybrania optymalnych warunków jego prowadzenia, należało wykonać kompleksowe badania podstawowe, co ze względu na ich czasochłonność znacznie opóźniłoby opracowanie technologii chemicznego osadzania rezystywnych warstw Ni-P na podłożach ceramicznych. Zastosowanie w tym przypadku metod planowania doświadczeń i matematycznej obróbki wyników eksperymentów jest klasycznym przykładem korzyści /w postaci zdecydowanego przyspieszenia proc./, jakie można uzyskać, szczególnie w przypadku badań skomplikowanych procesów o nieznanym lub budzącym wątpliwości mechanizmie.

3. SPOSOB PROWADZENIA EKSPERYMENTÓW

Analiza danych literaturowych oraz wstępne prace badawcze [2] pozwoliły przyjąć jako podstawowy proces o następującym schemacie:

- odłuszczenie powierzchni podłoża w acetonie w czasie 600 s,
- płukanie w strumieniu bieżącej wody dejonizowanej w czasie 120 s,
- trawienie próbek w 1% roztworze kwasu fluorowodorowego w czasie 300 s,
- płukanie w strumieniu bieżącej wody dejonizowanej w czasie 120 s,
- sensybilizacja w wodnym roztworze chlorku cynowego o stężeniu $0,066 \text{ mola/dm}^3$, zakwaszonym kwasem chlorowodorowym o stężeniu końcowym $0,25 \text{ mola/dm}^3$ w czasie 900 s.

- płukanie w strumieniu bieżącej wody dejonizowanej w czasie 120 s,
- aktywacja w wodnym roztworze chlorku palladowego o stężeniu 0,0056 mola/dm³, zakwaszonym kwasem chlorowodorowym do pH równego 1,6, w czasie 120 s,
- płukanie w strumieniu bieżącej wody dejonizowanej w czasie 120 s,
- chemiczne osadzanie warstw Ni-P w roztworze bursztynianowym o składzie:
 - uwodniony siarczan nikławy /NiSO₄ · 7H₂O/ - 0,1 mola/dm³
 - podfosforyn sodowy - 0,2 mola/dm³
 - bursztynian sodowy /CH₂COONa/2 - 0,01 mola/dm³
 - kwas bursztynowy /CH₂COOH/2 - 0,001 mola/dm³
 pH roztworu doprowadzone kwasem siarkowym do wartości 4,0, temperatura 333 ± 1 K, czas osadzania - 900 s,
- płukanie w strumieniu bieżącej wody dejonizowanej w czasie 600 s,
- suszenie próbek w promienniku podczerwieni.

Wszystkie procesy cząstkowe poza metalizacją i suszeniem prowadzono w temperaturze pokojowej /ok. 298 K/.

Jako podłoża stosowano wałki z ceramiki mullitowej R-1 o długości 7,3·10⁻³ m i średnicy 2,2·10⁻³ m. Próbkę /średnio 50 szt./ umieszczano w urządzeniu bębnowym z silnikiem elektrycznym umożliwiającym wykonywanie przez bęben ruchu obrotowego z częstotliwością 10 obr/min. Bęben wraz z próbkami umieszczano kolejno w szklanych zbiornikach 300 ml zawierających odpowiednie roztwory lub umożliwiające przepływ wody płuczącej /jedynie zbiornik zawierający roztwór trawiący - 1% HF był wykonany z polipropylenu/. Po zakończeniu procesów aktywowania próbki przenoszono do drugiego urządzenia bębnowego /w wyniku przeprowadzonych procesów ścianki bębna uległy zaaktywowaniu i zostałyby pokryte warstwą Ni-P/ i umieszczano w zbiorniku zawierającym roztwór do metalizacji. Po zakończeniu procesu osadzania i wypłukaniu próbek wysypywano je z urządzenia bębnowego i suszono w promienniku podczerwieni.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Przy wykonywaniu eksperymentów wykorzystano plan Boxa-Behnkena na trzech poziomach ze względu na możliwość uzyskania matematycznego modelu procesu w postaci wielomianu drugiego stopnia ze współdziałaniami dwóch czynników. Plan ten gwarantuje równomierne rozbieżenie informacji w przestrzeni czynnikowej, co pozwala na znalezienie przebiegu badanych funkcji wyjścia przy stosunkowo niewielkiej liczbie doświadczeń.

Według doniesień literaturowych na efektywność zaaktywowania powierzchni podłoży wywiera wpływ znacznie liczba parametrów procesu. Niecelowe jest jednak znajdowanie modelu uwzględniającego działanie wszystkich możliwych czynników ze względu na trudności przy opracowywaniu tak dużej liczby danych oraz analizę otrzymywanych w wyniku równań regresji. Na podstawie analizy literaturowej oraz wstępnych prac badawczych wytypowano więc celem poddania optymalizacji cztery czynniki, których wpływ wydawał się być najbardziej istotny. Wybrane czynniki oraz przedziały ich zmienności przedstawia tabela 1.

Jako funkcje odpowiedzi charakteryzujące efektywność zaaktywowania powierzchni podłoży wybrano: rezystancję próbek i masę niklu osadzonego na powierzchni po stałym czasie osadzania. Są to wielkości charakteryzujące szybkość chemicznego osadzania warstw Ni-P, jako że przy zachowaniu stałych warunków prowadzenia procesu /skład roztworu do chemicznej metalizacji, pH, temperatura itp./, zawartość fosforu w warstwach jest stała.

Tabela 1

Przestrzeń czynnikowa i funkcje odpowiedzi

-	Nr zmiennej	Nazwa zmiennej	Przedział zmienności	Jednostki
Czynniki optymalizowane	x_1	Stężenie chlorku cynawego, / SnCl_2 / w roztworze do sensybilizacji	0,044-0,088	mol/dm^3
	x_2	Czas sensybilizacji	120 - 720	s
	x_3	Stężenie chlorku palladowego / PdCl_2 / w roztworze do aktywacji	0,0084-0,0120	mol/dm^3
	x_4	Stosunek molowy stężeń SnCl_4 / SnCl_2 w roztworze do sensybilizacji	0 - 10	%
Funkcje odpowiedzi	Y_1	Masa osadzonego niklu na jednostkę powierzchni podłoża		g/m^2
	Y_2	Rezystancja próbek		Ω

Tabela 2

Zmiany zawartości fosforu w warstwach Ni-P dla kolejnych osadzeń prowadzonych w tych samych warunkach

Nr próbki	I	II	III	IV	V	VI
Zawartość fosforu w warstwie Ni-P /% wag/	10,00	10,96	10,15	10,81	11,34	10,74

Wyniki oznaczeń zawartości fosforu w warstwach Ni-P osadzanych przy zachowaniu stałości parametrów prowadzenia procesu przedstawia tabela 2. W przypadku zastosowania dostatecznie krótkich czasów osadzania wielkości wybrane jako funkcje odpowiedzi charakteryzują początkowe stadium wzrostu warstw, którego kinetyka w sposób istotny zależy od efektywności zaaktywowania powierzchni.

Wyniki eksperymentów wykonanych według losowego planu Boxa-Behnkena poddano opracowaniu matematycznemu z zastosowaniem algorytmu Gaussa, co pozwoliło na uproszczenie uzyskanych równań regresji przez eliminację nieistotnych współczynników. W rezultacie uzyskano równania regresji w postaci:

- masa osadzanego niklu

$$Y_1 = 1,092 + 0,0548x_4 - 0,0515x_4^2 - 0,0585x_1x_2.$$

Wartości odchyłeń standardowych współczynników regresji / S_{a_i} / i poziom prawdopodobieństwa, z jakim je wyznaczono, przedstawia tabela 3, błąd modelu wyznaczony przy poziomie prawdopodobieństwa 0,963 wynosił 0,0772, a współczynnik korelacji wielokrotnej 0,69.

- rezystancja próbek

$$Y_2 = 8,48533 - 0,664x_4 + 0,656x_4^2 + 0,588x_{1x_2} + 0,23x_1.$$

Wartość odchyłeń standardowych współczynników regresji / S_{a_i} / i poziom prawdopodobieństwa, z jakim je wyznaczono, przedstawia tabela 3, błąd modelu wyznaczony przy poziomie prawdopodobieństwa 0,982 wynosił 0,806, a współczynnik korelacji wielokrotnej 0,66.

Analiza równań regresji oraz dwuwymiarowych przekrojów przestrzeni czynnikowej pozwala na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

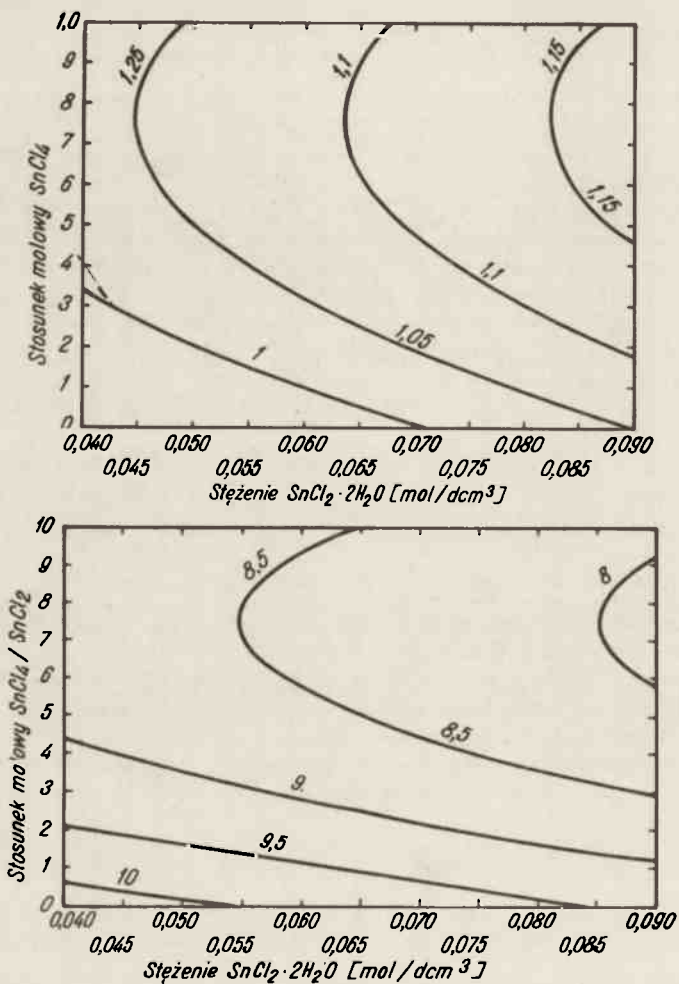
- Przedziały zmienności badanych parametrów zostały dobrane prawidłowo - współczynniki a_i danego równania mają zbliżone wartości liczbowe.
- Stwierdzono dużą zgodność postaci równań regresji obu funkcji odpowiedzi. Ponieważ funkcje odpowiedzi są ze sobą związane /wzrost masy osadzonego niklu, czyli wzrost średniej grubości warstw powoduje spadek rezystancji próbek/, uzyskanie tego typu zgodności generalnie potwierdza prawidłowe wykonanie eksperymentu.
- Stwierdzono znaczny wpływ, jaki na proces aktywowania powierzchni ceramicznych wywierają czynniki nie uwzględnione w badaniach optymalizacyjnych. Wskazuje na to wartość współczynnika korelacji modelu wynosząca odpowiednio 0,66 i 0,69.
- Uzyskane duże wartości współczynników stałych równań regresji / a_0 / wskazujące na małą czułość procesu na zmiany badanych parametrów, spowodowane są pośrednimi metodami pomiaru efektywności zaaktywowania powierzchni podłoża.
- Zmiany stężenia PdCl₂ w roztworze do aktywacji, w badanym zakresie zmienności nie wpływają na efektywność procesu /czynnik x_2 nie występuje w równaniach regresji/. Wskazuje to na podstawowe znaczenie, jakie posiada sensybilizacja - gęstość powierzchniowa i aktywność zarodków katalitycznych limitowana jest zatem przez ilość, postać i strukturę adsorbujących się na powierzchni podłoża związków cynowych i cynowych.

Tabela 3

Wartości współczynników regresji i ich odchyłeń standardowych oraz poziom prawdopodobieństwa, z jakim zostały wyznaczone dla kolejnych funkcji odpowiedzi

-	Współczynnik regresji	Odchylenie standardowe	Poziom prawdopodobieństwa
A Y_1 - masa osadz. niklu	$a_0 = 1,0920$	0,019077	0,999999
	$a_4 = 0,0548$	0,021329	0,9829
	$a_{14} = 0,0515$	0,028616	0,915
	$a_6 = 0,0585$	0,036943	0,87
B Y_2 - rezystancja próbek	$a_0 = 8,48533$	0,198715	1,0
	$a_4 = -0,664$	0,222170	0,9932
	$a_{14} = 0,656$	0,298072	0,961
	$a_6 = 0,588$	0,384809	0,86
	$a_1 = 0,23$	0,22217	0,68

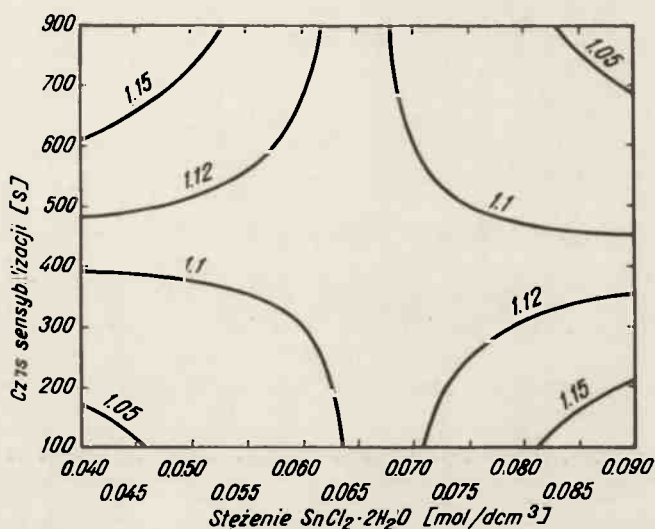
- Wykazano występowanie optymalnej zawartości dodatku chlorku cynowego do roztworu do sensybilizacji. Optymalny stosunek molowy jonów Sn IV do Sn II wynosi 7,5% /rys. 2a i b/. Dodatek jonów Sn/IV/ wpływa w sposób istotny na mechanizm adsorpcji związków cynowych i często jest polecany celem modyfikacji roztworu.



Rys. 2a. Masa osadzonego Ni /linie jednakowej wartości/ w funkcji stężenia chlorku cynowego w roztworze do sensybilizacji $/x_1/$ i stosunku molowego stężeń $\text{SnCl}_4/$ $/\text{SnCl}_2$ w roztworze do sensybilizacji $/x_4/$. Przekrój przestrzeni czynnikowej dla czasu sensybilizacji $/x_2/ = 120$ s i stężenia chlorku palladowego w roztworze do aktywacji $/x_3/ = 0,01$ mola/dm³

Rys. 2b. Rezystancja próbki /linie jednakowej wartości/ w funkcji stężenia chlorku cynowego w roztworze do sensybilizacji $/x_1/$ i stosunku molowego stężeń $\text{SnCl}_4/$ $/\text{SnCl}_2$ w roztworze do sensybilizacji $/x_4/$. Przekrój przestrzeni czynnikowej dla czasu sensybilizacji $/x_2/ = 120$ s i stężenia chlorku palladowego w roztworze do aktywacji $/x_3/ = 0,01$ mola/dm³

- Stwierdzono, że przy optymalnej wartości czynnika x_1 /stosunku molowego Sn IV do Sn II równego 7,5%/ występuje korelacja między stężeniem chlorku cynawego w roztworze do sensybilizacji a czasem prowadzenia tego procesu. Analiza rys. 3 wykazuje, że niekorzystne jest prowadzenie procesu zarówno przy niskich stężeniach SnCl_2 i krótkich czasach /prawdopodobnie ze względu na małą jego szybkość/, jak i przy wysokich stężeniach SnCl_2 i długich czasach trwania procesu /w tych warunkach zachodzą mogą procesy i przemiany powodujące powstawanie no powierzchni struktur niekorzystnych z punktu widzenia aktywacji podłoża/. Uzyskana zależność pozwala na optymalny dobór parametrów x_1 i x_2 /stężenia SnCl_2 i czasy sensybilizacji/ oraz no sterowanie przebiegiem procesu.



Rys. 3. Masa osadzonego Ni /linie jednakowej wartości/ w funkcji stężenia chlorku cynawego w roztworze do sensybilizacji x_1 i czasu sensybilizacji x_2 .

Przekrój przestrzeni czynnikowej dla stężenia chlorku palladowego w roztworze do aktywacji $x_3 = 0.01 \text{ mol/dm}^3$ i stosunku molowego $\text{SnCl}_4/\text{SnCl}_2$ w roztworze do sensybilizacji $x_4 = 7,5\%$

Należy podkreślić, że celem wyjaśnienia stwierdzonych zależności /np. braku wpływu zmian stężenia PdCl_2 , czy występowania optymalnej wartości stosunku molowego Sn/IV/ /Sn/II/ itp./, konieczne jest przeprowadzenie szerszych badań podstawowych, które są obecnie realizowane i będą przedmiotem oddzielnej publikacji.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie statystycznych metod planowania eksperymentów i optymalizacji procesu pozwoliło na:

- dokładne przebadanie założonej przestrzeni czynnikowej przy minimalnej ilości wykonanych doświadczeń,
- pełną analizę błędów modelu i eksperymentów,
- uzyskanie modeli matematycznych procesu w postaci analitycznej i graficznej.

Analizując otrzymane modele:

- wyznaczono obszary optymalnych wartości badanych parametrów,
- stwierdzono istnienie czynników mających istotny wpływ na proces aktywowania, a nie uwzględnionych w badaniach oraz oszacowano ilościowo wielkość tego wpływu.

Literatura

1. Achazarowa A.S., Kafarow W.W.: *Optimizacja w chemii i chemicznej technologii*, W. Sz., Moskwa, 1978
2. Przyłuski J., Bieliński J., Bielińska A., Gluszewski W., Kasprzak M.: *Sprawozdanie z pracy "Opracowanie technologii bezprądowego /chemicznego/ osadzania rezystywnych warstw metalicznych" IChOITN PW, 1975-79*
Przyłuski J., Bieliński J., Bielińska A.: Zgl. pat. nr P-209546, 12.9.1978; Zgl. pat. nr P-209547, 12.9.1978; Zgl. pat. nr P-209548, 12.9.1978 r; Przyłuski J., Bieliński J., Galdon A.: Zgl. pat. nr P-214640, 3.4.1979; Przyłuski J., Bieliński J., Gluszewski W.: Zgl. pat. P-214479, 29.3.1979
3. Goldie W.: *Metallic Coating of Plastic*, Electrochem., Public. Lim., Hatch End, Middlesex, 1968
4. Saubestre E.B.: *Metal Finishing*, v. 60 no. 6, 67 no 7, 49, no 8, 45, no 9, 59, 1962
5. Szatkauskas M., Vaszkielis A.: *Chemiczskajo metallizacija plastmas*, Chimia, Leningrad, 1972
6. Schneble F.W., Zebliksy R.J., Mc Cormac J.F., Williamson J.D.: US Pat. 3269861. 30.8.1966
7. Stefano D.: US Pat. 3640765, 8.2.1972
8. Marton J.P.: US Pat. 3676213, 11.7.1972
9. Edge J.: Brit. Pat. 1149512, 23.4.1969
10. Lussow R.O., Wirtz L.H.: Ger. Offer. 2007314, 10.9.1970
11. Fr. Pat. 1530135, 21.6.1968
12. Neth. Appl. 6400876 24.8.1964
13. Branovic R.: *Tekhnika /Belgrade/*, v 22, no 7, 1250, 1967 C.A.v.68, 101108o
14. Sharp D.J.: *Plating*, v.58, no 8, 786, 1971
15. Sadokow G.A., Moisiejew W.P., Gorbunowa K.M.: *Zasc. Met.*, v. 5, no 6, 692, 1969
16. Sard R.: *J. Electrochem. Soc.*, v.117, no 7, 864, 1970
17. Feldstein N., Weiner J.A.: *ibid*, v. 119, no 6, 668, 1972
18. Cohen R.L., D'Amico J.F.: *West K.W.*, *ibid*, v. 118, no 12, 2042, 1971
19. Cohen R.L. *West K.W.*: *ibid*, v. 119, no 4, 433, 1972
20. Minjer C.H.: *v.d.Boom P.F.J.*, *ibid*, v.120, no 12, 1644, 1973
21. Feldstein N.: *Plating*, v. 60, no 6, 611, 1973
22. Feldstein N., Weiner J.A.: *J. Electrochem. Soc.*, v. 120, no 4, 475, 1973
23. D'Amico J.F.: *ibid*, v. 118, no 10, 1695, 1971
24. D'Amico J.F., De Angelo M.A.: *ibid*, v. 120, no 11, 1469, 1973
25. Baylis B.K.W., Busuttill A., Hedgecock N.E.: *Schlesinger M.*, *ibid*, v.123, no 3, 348, 1976
26. Rantell A.: *Electroplating Metall Finishing*, v. 24, no 10, 5, no 11, 5, 1971