

INSTYTUT
TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW
ELEKTRONICZNYCH

PRACE ITME

METODY POMIARU PARAMETRÓW APLIKACYJNYCH PAST I WARSTW GRUBYCH

Część I

1982

Zeszyt 4

**INSTYTUT TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH**

**Dariusz SZYMAŃSKI
Barbara SZCZYTKO**

**METODY POMIARU
PARAMETRÓW APLIKACYJNYCH
PAST I WARSTW GRUBYCH**

Część I

Opiniodawca: doc. dr inż. Stanisław NOWAK
Redaktor naczelny PRAC ITME: dr inż. Mieczysław FRĄCKI
Redaktor działowy zeszytu: dr inż. Jan BEKISZ

Sekretarz redakcji: dr inż. Łukasz KACZYŃSKI
Redaktor techniczny: mgr inż. Leszek KRÓL

Adres redakcji:
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 6
tel. 43-74-61

PL ISSN 0208-0066

Dariusz Szymański, Barbara Szczytko: "Metody pomiaru parametrów aplikacyjnych past i warstw grubych".

W pracy dokonano kompleksowego przeglądu parametrów charakteryzujących pasty przewodzące, rezystywne i dielektryczne oraz wykonywane z nich warstwy grube. Omówiono metody pomiaru tych parametrów, podano zasady projektowania i wykonywania testów pomiarowych.

Dariusz Szymański, Barbara Szczytko: "Methods of Measuring Application Parameters of the Pastes and Thick Films".

This paper presents a complex review of conductive, resistive and dielectric pastes parameters and properties as well as thick films prepared from the pastes. Methods of measuring these parameters have been discussed. The basic principles of designing test patterns and their preparation methods have been described.

Д.ШИМАНЬСКИ, В.ШЧИТКО: Методы измерения параметров аппликационных паст и толстых пленок.

В работе представлены комплексные параметры, характеризующие свойства паст и изготовленные из них толстые пленки: проводящие, резистивные и диэлектрические. Обсуждены методы измерения указанных параметров, описаны принципы проектирования и выполнения измерительных тестов.

1. WSTĘP

W pracy omówiono parametry charakteryzujące pasty i warstwy grube oraz przedstawiono metody ich pomiarów. Parametry takie nazywane aplikacyjnymi lub eksploatacyjnymi mają bezpośredni związek z funkcjami, jakie spełnia pasta i warstwa gruba w podzespolu elektronicznym i procesie jego wytworzenia.

Celem opracowania było zebranie i usystematyzowanie metod pomiarowych tych parametrów. Potrzebę taką odczuwa się coraz bardziej, ze względu na rozszerzanie zakresu zastosowań past i wzrostu ich produkcji. Do tradycyjnego zastosowania, jakim są podzespoły elektroniczne dochodzą nowe dziedziny takie jak: mikroukłady hybrydowe, elementy optoelektroniczne, ogniwa słoneczne, obudowy mikroukładów, elementy grzejne, elementy ozdobne.

Przyjęcie różnych metod pomiarowych przez producenta past i użytkowników prowadzi bardzo często do nieporozumień, ponieważ wyniki pomiarów parametrów aplikacyjnych, w większości przypadków zależą od przyjętej metody, wyboru testu lub sposobu przygotowania próbki.

Jednym z kłopotów występujących przy wyborze odpowiednich metod pomiarowych jest interdyscyplinarny charakter problematyki past i warstw. Parametry charakterystyczne i metody ich pomiarów zaczerpnięte zostały z wielu dziedzin. Stosuje się tu przykładowo pomiary fizyczne i chemiczne, mechaniczne czy elektryczne. Specyfika warstw grubych sprawia, że bezpośrednio przeniesienie metod pomiarowych z tych dziedzin bez odpowiedniej adaptacji i omówienia prowadzi może do poważnych błędów w pomiarach.

Przedstawione w niniejszym opracowaniu metody zostały wybrane z wielu a po sprawdzeniu przez autorów zaproponowane jako odpowiednie dla techniki grubowarstwowej.

W zakończeniu pracy omówiono zasady projektowania i wykonania próbek testowych. Zagadnienia te na równi z wyborem odpowiedniej metody pomiarowej mają podstawowy wpływ na wynik pomiaru.

2. PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE WŁAŚCIWOŚCI PAST

Ta grupa parametrów, jak i sposób ich pomiarów, w dużym stopniu zaczerpnięte zostały z techniki farb i lakierów. Wynika to z faktu, że zarówno w tej dziedzinie, jak i w technologii past stosowane są bardzo podobne procesy wytwarzania.

Parametry opisujące właściwości past są jednakowe dla past przewodzących, rezystywnych i dielektrycznych.

2.1. Wygląd zewnętrzny

Wzrokowa ocena wyglądu pasty jest badaniem wstępnym, bardzo orientacyjnym.

Badanie to może nasunąć jedynie pewne przypuszczenia, co do właściwości pasty, jest ono mało obiektywne, ponieważ jest prawie niemożliwe ustalenie precyzyjnych kryteriów oceny. Pewnym ułatwieniem przy ocenie może być posłużenie się wzorcem pasty o znanych właściwościach, uznanej za dobrą. Oceny wzrokowej powinien dokonywać pracownik o dużym doświadczeniu.

Podczas badania można wstępnie ocenić: rozwarstwienie pasty, stopień ujednorodnienia, kolor, występowanie aglomeratów, zanieczyszczenia, zapowietrzenie itp. Samo badanie polega na obserwacji okiem nieuzbrojonym pasty znajdującej się w pojemniku, zanurzeniu w niej bagietki, zamieszczeniu i obserwacji pasty spływającej z bagietki.

2.2. Skład

Pełny skład pasty znany jest jedynie producentowi i dla ogół nie interesuje użytkownika. Określenie dokładnego składu metodami analiz chemicznych jest bardzo trudne, a często niemożliwe. Metody te pozwalają określić pierwiastki i niektóre związki chemiczne wchodzące w skład pasty, nie mogą jednak podać postaci, pod którą zostały do niej wprowadzone. Niektórzy użytkownicy mimo to zastrzegają sobie skład pasty i wówczas badanie takie jest przeprowadzane. Dotyczy ono najczęściej past przewodzących i ogranicza się do określenia procentowej zawartości głównego składnika metalicznego (przeważnie jest to metal szlachetny). Analizę taką przeprowadza się metodą wolumetryczną. Poniżej podano jako przykład sposób wykonania oznaczenia zawartości srebra w paście przewodzącej.

Zawartość srebra w paście przewodzącej oznacza się metodą miareczkową za pomocą rodanku amonowego i wykonuje następująco. Należy odważyć 0,2 ± 0,25 g pasty z dokładnością 0,0001 g. Wysuszyć próbkę w temperaturze 200^o ± 5^oC przez 2 godziny i wyprażyć w piecu muflowym o temperaturze 600^o ± 10^oC. Po wyprażeniu i ostudzeniu próbkę rozpuścić w 10 cm³ kwasu azotowego, dodać kilka kryształków siarczanu żelazowo-amonowego i miareczkować 0,1 normalnym roztworem rodanku amonowego do uzyskania trwałego pomarańczowego zabarwienia. Zawartość srebra oblicza się ze wzoru:

$$x [\%] = \frac{V n 0,10788}{G} 100$$

gdzie V [cm³]- objętość zużytego do miareczkowania rodanku amonowego,

n [mol/l]- normalność roztworu rodanku amonowego,

G [g]- masa próbki do analizy,

0,10788 g - masa 1 milimola srebra.

Analiza jakościowa i ilościowa pozwala określić zasadnicze składniki pasty, ale nie określi postaci, pod którą oznaczany pierwiastek lub związek występuje w paście. Samo wykrycie np. dodatków tlenkowych w paście może nie sprawiać trudności, ale ustalenie czy wchodzą one w skład szkliska, czy występują jako odrębne składniki może okazać się niemożliwe.

2.3. Lepkość

Lepkość pasty jest to jej właściwość fizyczna, która określa miarę oddziaływania wewnętrznego cząstek w paście podczas przemieszczania się względem siebie umownych warstewek pasty.

Duże znaczenie tego parametru wynika z faktu, że decyduje on o możliwości prawidłowego przeprowadzenia procesu nakładania warstwy. Ponieważ wszystkie pasty mają właściwości płynów nienewtonowskich, zagadnienie określenia ich lepkości znacznie się komplikuje.

Dla scharakteryzowania lepkości pasty, a raczej jej pełnych właściwości reologicznych, konieczna jest znajomość podstawowych charakterystyk płynięcia pasty:

$$\eta = f(D) \quad \eta = f(t) \quad \eta = f(T) \quad \text{gdzie:}$$

η - lepkość pozorna

D - szybkość ścinania

t - czas ścinania

T - temperatura

Na rysunku 1 pokazano podstawowe zależności reologiczne dla dwóch past przewodzących srebrowych.

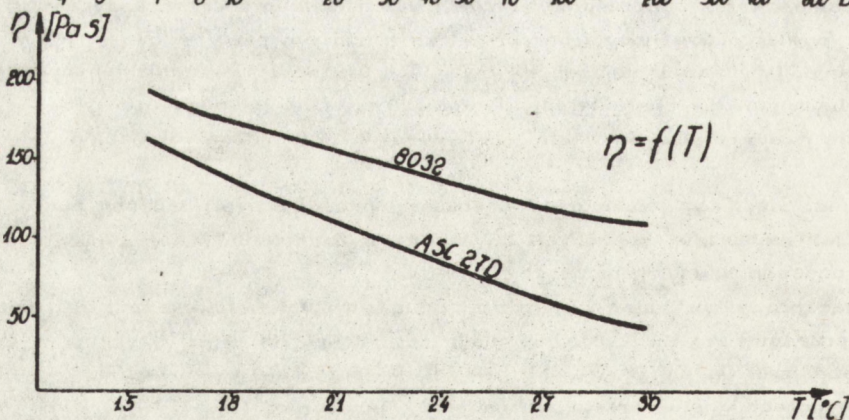
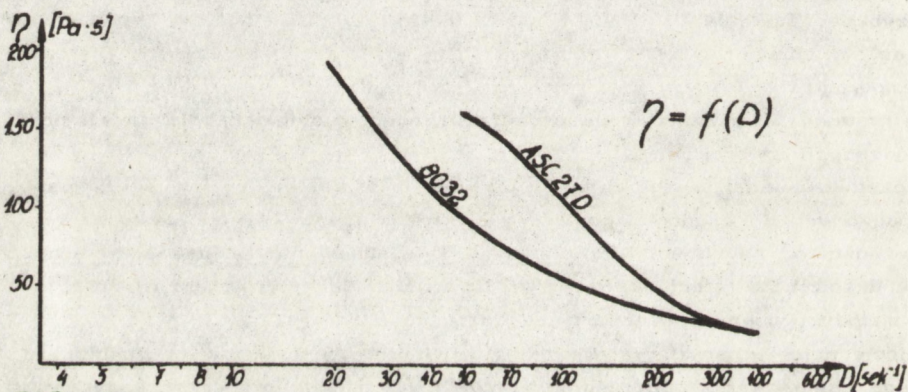
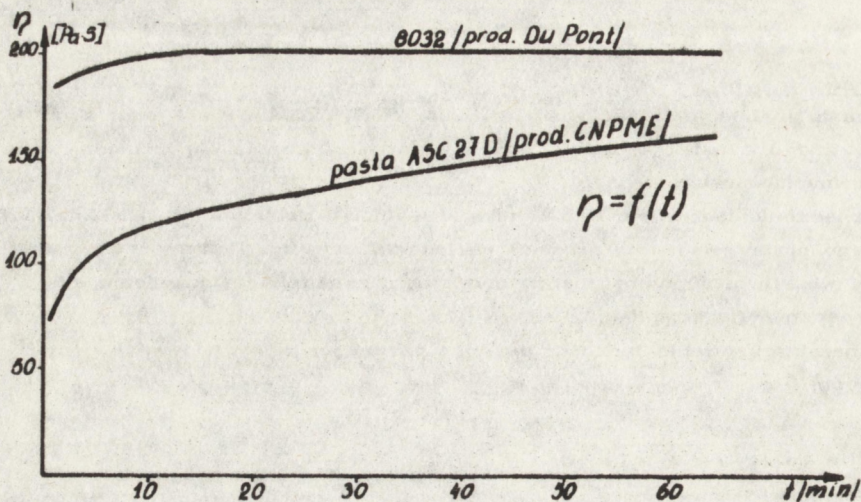
Szczegółowa analiza charakterystyk płynięcia wykazuje, że większość past przeznaczonych do sitodruku posiada właściwości płynów pseudoplastycznych. W zależności od szybkości i czasu ścinania te same pasty mogą zachowywać się jak tiksotropowe i antytiksotropowe. Dowodzi to jak ważny jest właściwy dobór metody pomiaru i warunków jego wykonania. [8].

Zdjęcie pełnej charakterystyki reologicznej pasty jest bardzo pracochłonne i wymaga zastosowania odpowiednio precyzyjnych i kosztownych wielkozymetrów. Dlatego też pomiary takie naogół przeprowadza producent pasty w czasie jej opracowywania. Użytkownik najczęściej ogranicza się do sprawdzenia jej lepkości w jednym punkcie charakterystyki reologicznej i na tej podstawie podejmuje decyzję o ewentualnej korekcie lepkości pasty przez dodanie rozcieńczalnika.

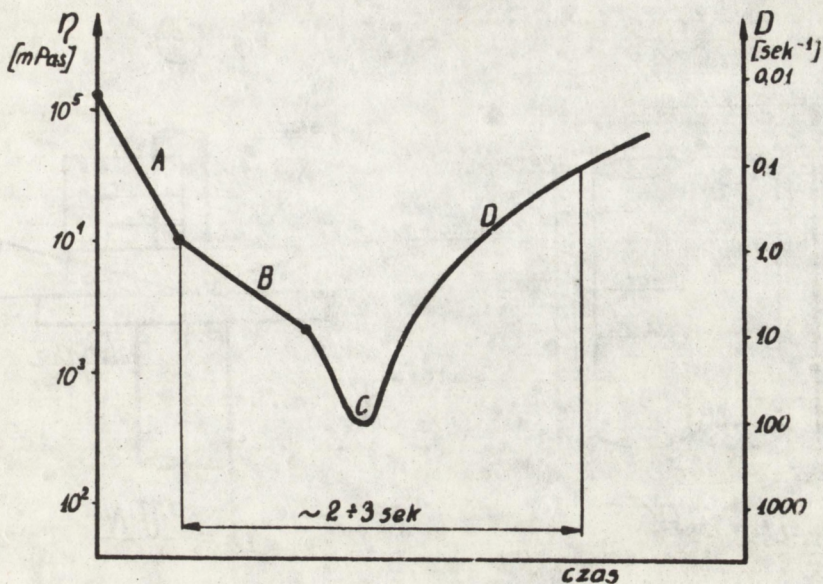
Istotne jest więc, aby jednopunktowy pomiar lepkości przeprowadzony był w warunkach jak najbardziej zbliżonych do warunków nakładania pasty w procesie wykonania podzespołu elektronicznego.

Analizując proces nakładania pasty metodą sitodruku łatwo wykazać, że przy szybkości przesuwu rakli 10 cm/s dla siatki o gęstości 200 mesh szybkość ścinania pasty zmienia się w szerokim zakresie i przyjmuje wartość 100 s^{-1} w momencie przechodzenia przez sito na płytkę podłożową (rys. 2) [7, 20].

Dlatego też ustalając warunki pomiaru jednopunktowego dla past przeznaczonych do sitodruku wskazane jest dobrać je tak, aby pomiar odbywał się przy szybkościach ścinania zbliżonych do 100 s^{-1} .



Rys. 1. Charakterystyki reologiczne past przewodzących srebrowych: 8032 produkcji Du Pont i ASC27D produkcji CNPME. Charakterystyki zdjęte na wiskozymetrze typu Rheotest 2



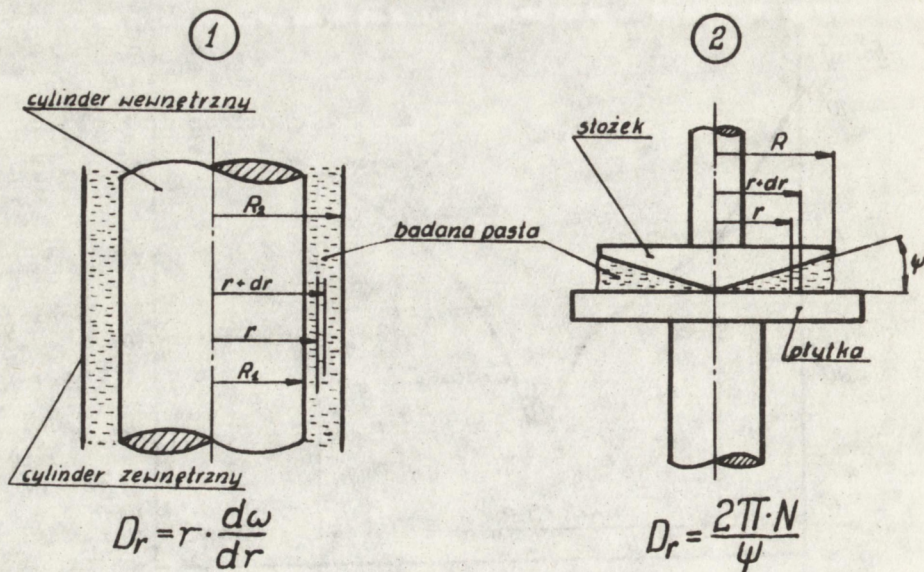
Rys. 2. Typowa zmiana lepkości pasty w różnych etapach procesu sitodruku.
 Obszar A - podczas mieszania pasty
 Obszar B - w czasie ruchu rakli po sicie
 Obszar C - w czasie przechodzenia pasty na podłoże przez oczka siatki
 Obszar D - podczas regeneracji pasty po cyklu drukowania

Pomiary lepkości wiskozymetrami

Jak wynika z rozważań teoretycznych reometrii [8] uzyskanie ścisłych ilościowych danych reologicznych dla płynów nienewtonowskich możliwe jest jedynie za pomocą wiskozymetrów kapilarnych i rotacyjnych. Takie też wiskozymetry znajdują przede wszystkim zastosowanie w pomiarach past. Wiskozymetry tego typu najczęściej posiadają dwa wymienne systemy głowic pomiarowych: układ cylindrów współosiowych i układ stożek - płytka. Szczególnie ten drugi układ jest godny uwagi w zastosowaniach do pomiaru past. Posiada on dwie istotne zalety w stosunku do układu cylindrów współosiowych:

- Ilość pasty konieczna do wykonania pomiaru w układzie stożek - płytka jest mała $\sim 0,2$ ml, co jest bardzo korzystne, ponieważ często operuje się drogimi pastami w małych ilościach nie wystarczających do wykonania pomiaru inną metodą.

- Sam pomiar odbywa się w korzystnych warunkach. W całym obszarze mierzonej próbki pasty szybkość ścinania jest stała (nie zależy od promienia r). Jest to cecha wyłącznie układu pomiarowego stożek - płytka (rys. 3).



Rys. 3. Schemat najczęściej stosowanych układów pomiarowych wiskozymetrów rotacyjnych:

1. o cylindrach współosiowych, 2. stożek - płytka, D_r - szybkość ścinania w odległości r od osi obrotu, ω - prędkość kątowna wirowania cylindra, N - częstość obrotów.

Do pomiaru lepkości past najczęściej używa się następujących typów wiskozymetrów:

Ferranti-Shirley produkcji firmy Ferranti Anglia,

Rotovisko produkcji Gebrüder Haake Berlin Zachodni,

Rheotest 2 produkcji VEB Prüfgeräte-Werk Medingen NRD,

Brookfield produkcji Brookfield USA.

Wszystkie wymienione typy wiskozymetrów mogą być wyposażone w dwa typy głowic pomiarowych: cylindry współosiowe i stożek - płytka. Do celów badawczych ze względu na wysoką klasę i szerokie możliwości pomiarowe, szczególnie zalecany jest wiskozymetr Ferranti-Shirley (możliwości programowania zmian szybkości ścinania, możliwość dołączenia rejestratora x , y , t).

Do pomiarów technicznych, jednopunktowych powszechnie stosowany jest (szczególnie przez użytkowników past) wiskozymetr Brookfielda. Jego zaletą jest prosta obsługa i niska cena. Niestety wiąże się z tym również mała dokładność.

Porównanie wyników pomiarów lepkości wykonanych na różnych typach wiskozymetrów wykazuje dużą zależność wyników od typu wiskozymetru i warunków

pomiaru (szczególnie dla pomiarów jednopunktowych). Z tego też względu producent, precyzując lepkość pasty musi bardzo dokładnie scharakteryzować metodę pomiaru, aby użytkownik pasty mógł ją odtworzyć u siebie.

Firma Du Pont w swoich katalogach [20] podaje w następujący sposób warunki pomiaru jednopunktowego:

Pasta 9428 Lepkość: 170 ± 230 Pa·s, wiskozymetr Brookfield, typ RVT,
wrzeczono nr 7, 10 obr/min, temp. pasty $25^{+1} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Inne metody pomiaru lepkości

W wielu zastosowaniach (wiąże się to najczęściej z metodą nakładania pasty przez malowanie, natryskiwanie, zanurzanie) nie jest tak ważna sama lepkość określona za pomocą wiskozymetru. Bardziej istotny może okazać się zespół kilku cech fizycznych pasty (np. charakterystyka reologiczna, napięcie powierzchniowe, zwilżalność), który decyduje o jej zachowaniu w czasie formowania warstwy. W takim przypadku wystarczy na ogół wykonanie pomiaru prostymi narzędziami, w swej zasadzie pomiaru zbliżonymi do rzeczywistych warunków aplikacji pasty. Można tu wymienić dwie najczęściej stosowane metody pomiaru tzw. lepkości umownej: metoda kubka wypywowego i metoda szczeliny.

Obydwa sposoby nie podają charakterystyki lepkości pasty, lecz złożoną funkcję kilku parametrów tj.

- w przypadku kubka: lepkości i gęstości pasty
- w przypadku szczeliny: lepkości, napięcia powierzchniowego, szybkości wysychania.

Pomiar lepkości umownej za pomocą kubka wypywowego powszechnie używany jest w lakiernictwie. Zasada pomiaru polega na napełnieniu kubka badaną pastą i zmierzeniu czasu wyptywu pasty z kubka przez otwór w dnie. Czas ten jest miarą lepkości umownej. Na rysunku 4 pokazano wygląd kubka wypywowego typu Forda wg PN-75/C-81508 [36].

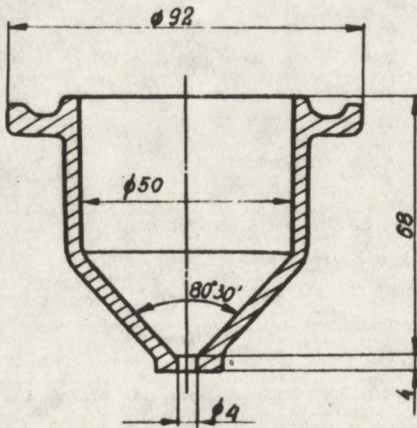
Zasada pomiaru metodą szczeliny jest następująca. Płaskownik wykonany ze stali kwasoodpornej, wypolerowany z naciętą szczeliną jak na rysunku 5, zanurza się do badanej pasty na określoną głębokość zaznaczoną na płaskowniku. Po wyjęciu z pasty mierzy się czas do chwili pęknięcia błony utworzonej przez pastę w szczelinie.

2.4. Gęstość

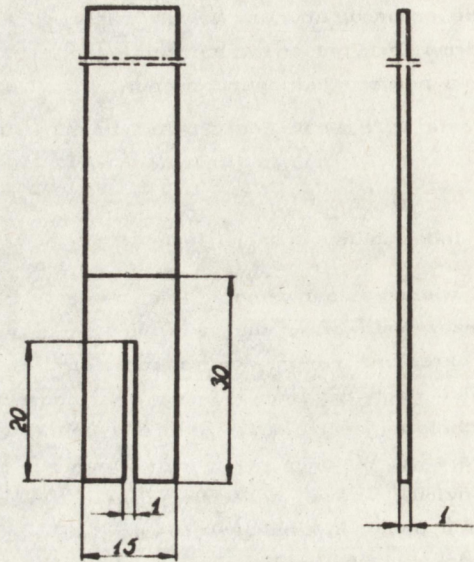
Gęstość pasty najłatwiej zmierzyć metodą opisaną w normie BN-64/6110-11 [50] postępując się kubkiem pomiarowym (rys. 6).

Pomiar należy wykonać w sposób następujący:

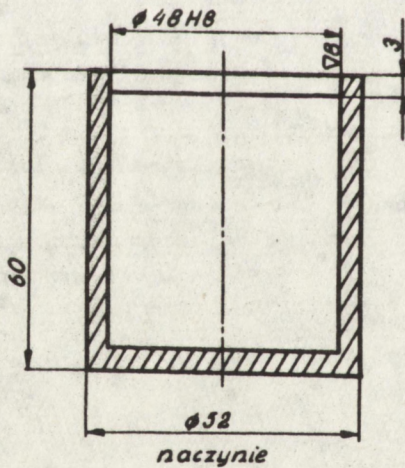
- Zważyć pusty kubek - G_0 [g]



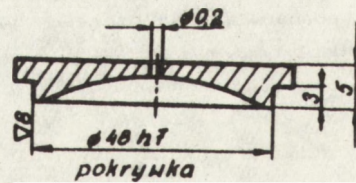
Rys. 4. Kubek wyptywowy typu Forda do pomiaru lepkości umownej (wg PN-75/C-81508)



Rys. 5. Płaskownik ze szczeliną do pomiaru lepkości umownej



Rys. 6. Kubek do pomiaru gęstości pasty



- Zważyć kubek napęczniony wodą destylowaną o temp. 20°C - G_1 [g]
- Wyznaczyć objętość kubka ze wzoru:

$$X_1 \text{ [cm}^3\text{]} = \frac{G_1 - G_0}{0,9982} \quad \text{gdzie } 0,9982 \text{ g/cm}^3 \text{ gęstość wody w temp. } 20^\circ\text{C}$$

- Osuszyć kubek z wody i napęczyć go badaną pastą o temp. 20°C
- Zamknąć pokrywkę, docisnąć mocno do krawędzi. Nadmiar pasty wypływający przez otworek w pokrywie usunąć
- Zważyć kubek z dokładnością 0,005 g
- obliczyć gęstość pasty ze wzoru

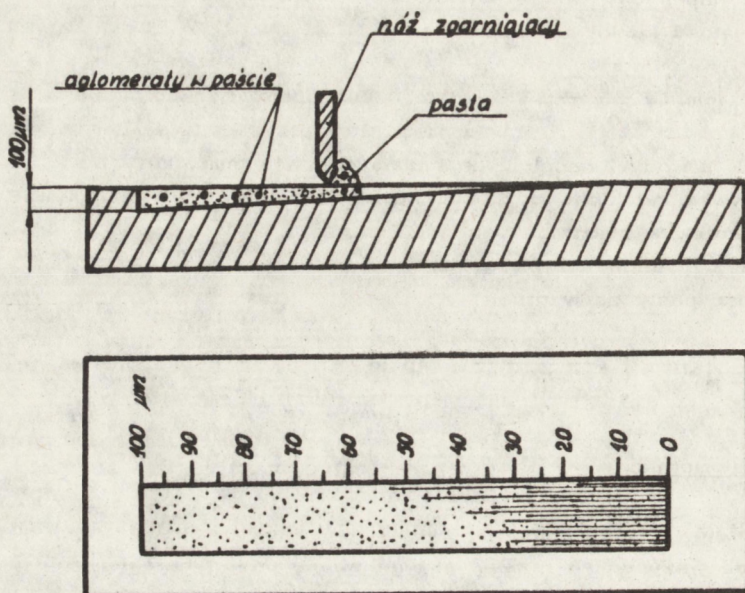
$$X_2 \text{ [g/cm}^3\text{]} = \frac{G_2 - G_0}{X_1} \quad \text{gdzie } G_2 \text{ ciężar kubka napęcnionego pastą w (g)}$$

2.5. Wielkość aglomeratów

Wielkość aglomeratów (skupiska ziaren składników stałych) jest parametrem mierzonym przede wszystkim w czasie przygotowania past. Charakteryzuje on stopień rozrarcia składników pasty. Parametr powinien być również sprawdzony po operacji uzdatniania past magazynowanych przez dłuższy okres czasu, które uległy rozwarstwieniu. Wielkość aglomeratów określa się najczęściej za pomocą grindometru (rys. 7). Metoda ta opisana jest w normie BN-72/6110-09 [49].

Grindometr jest to wypolerowana płytka ze stali kwasoodpornej z wyfrezowanym rowkiem klinowym o równomiernie wzrastającej głębokości. Głębokość rowka wyskalowana jest w μm .

Badaną pastę nakłada się w miejscu A i przesuwając nożem zgarniającym w kierunku końca B. Wielkość aglomeratów określają rysy, jakie powstają na warstwie zgarnianej pasty w momencie, gdy rozmiar aglomeratów znacznie przewyższa głębokość rowka. Punkt, w którym pojawia się trzecia rysa przyjmuje się za wielkość aglomeratów w paście.



Rys. 7. Budowa grindometru i zasada pomiaru

2.6. Napężenie powierzchniowe

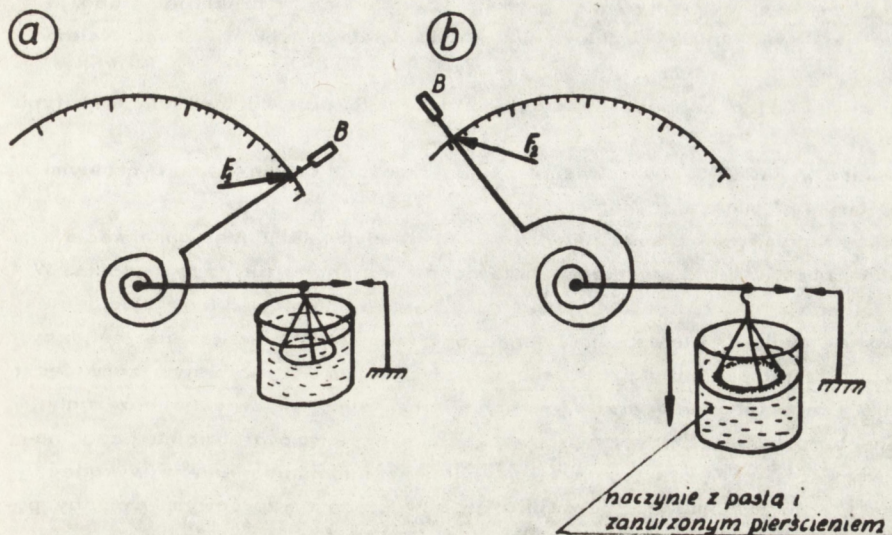
W niektórych zastosowaniach past, szczególnie przeznaczonych do nakładania metodą zanurzenia lub malowania, ważne jest, aby nałożoną warstwą bardzo dokładnie pokrywała powierzchnię kształtki podłożowej, jednocześnie nie tworząc błon zakrywających otwory, zagłębienia i szczeliny konstrukcyjne, jakie mogą wystąpić na podłożu.

Parametrem, który dość dobrze charakteryzuje tę cechę pasty jest napięcie powierzchniowe na granicy faz pasta-powietrze.

Napięcie powierzchniowe jest to siła działająca na jednostkę długości powierzchni swobodnej cieczy (pasty), wywołana istnieniem międzycząsteczkowych sił przyciągania.

Napięcie powierzchniowe mierzy się siłą, która działa w płaszczyźnie stycznej do swobodnej powierzchni pasty i przypada na jednostkę długości linii ograniczającej powierzchnię.

Z kilku metod pomiaru napięcia powierzchniowego w zastosowaniu do past najlepsze wyniki daje pomiar za pomocą wagi skręceń, której zasadę działania pokazano na rysunku 8 lub tensjometru typu du Nouy (PN-72/C-04809). Zasada pomiaru w obydwu przypadkach jest ta sama. [4,35].



Rys. 8. Zasada pomiaru napięcia powierzchniowego pasty przy pomocy wagi skręceń: a - waga przed pomiarem, b - waga podczas wyciągania pierścienia z pasty

Do pomiaru metodą wagi skręceń może być użyte strzemiączko Lenarda lub pierścień platynowo-irydowy. Badaną pastę nalewa się do małego naczynia szklanego, zanurza w niej pierścień pomiarowy, a następnie napina sprężynę wagi za pomocą dźwigni B, aby zrównoważyć ciężar zanurzonego strzemiączka. Po odczytaniu wartości siły F_1 , pierścień wyciąga się do góry wraz z błoną powierzchniową pasty, jednocześnie opuszczając naczynie z pastą nieco w dół. W ten sposób sprężyna wagi napina się do momentu, gdy nastąpi zerwanie błony powierzchniowej. Odczytujemy w tym momencie wartość siły F_2 .

Wartość napięcia powierzchniowego wyznacza się z zależności:

$$\sigma = \frac{F_2 - F_1}{2l} \quad l - \text{długość obwodu pierścienia}$$

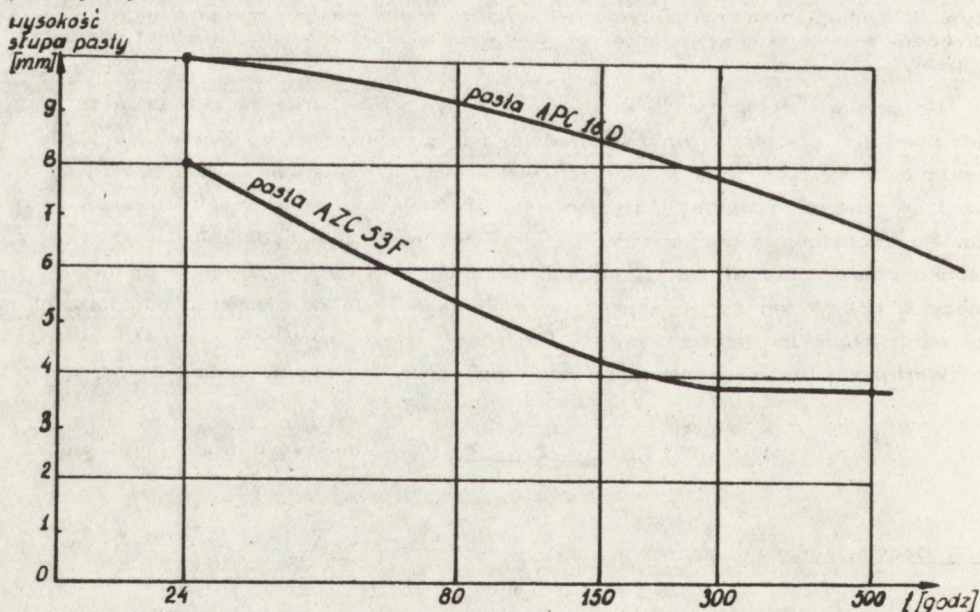
2.7. Sedymentacja

Pasta, jak każda zawiesina, podlega sedymentacji, którą rozumie się jako opadanie cząstek stałych składników pod wpływem sił grawitacyjnych. W praktyce objawia się to rozwarstwieniem pasty. Sedymentacji ulegają wszystkie pasty, natomiast jej szybkość zależy między innymi od lepkości, gęstości, struktury powierzchni proszków i innych składników stałych oraz stopnia ich zdyspergowania.

Sedymentacja jest niepożądaną cechą past, jednak w praktyce trudno ją usunąć; ponieważ jest zjawiskiem naturalnym dla tego typu zawiesin. Należy jednak dążyć do tego aby:

- sedymentacja nie zachodziła szybciej niż jest to przewidziane dla tego typu pasty;
- powstałe w paście rozwarstwienie można było całkowicie usunąć prostymi metodami, np. mieszając bagietką.

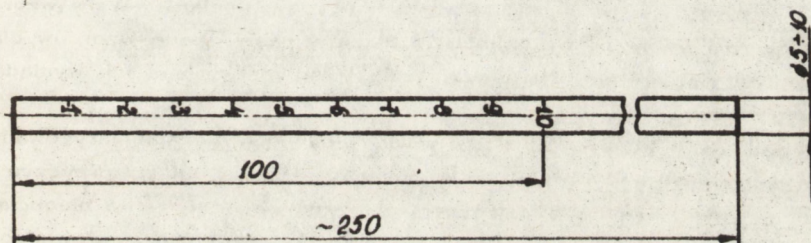
Najprostszym sposobem ustalenia stopnia sedymentacji jest obserwacja zmian zachodzących w paście pozostawionej bez ruchu na czas badania. W tym celu należy dokładnie ujednorodnioną pastą napętnić szklany cylinder miarowy ze szlifem. Dla łatwej obserwacji rozwarstwiania wskazane jest, aby wysokość słupa pasty była nie mniejsza niż 10 cm. Po starannym zamknięciu cylindra (zabezpieczenie przed wysychaniem) należy ustawić go bez ruchu w stałej temperaturze. Obserwując w czasie proces rozwarstwiania pasty należy notować poziom granicy faz. Po zakończeniu badania należy wykonać wykres jak na rysunku 9 i porównać go z wykresem wzorcowym. Opisany powyżej sposób pomiaru sedymentacji może być stosowany do past o lepkości mniejszej niż 10 Pa·s.



Rys. 9. Zmiana w czasie granicy faz: nośnik- składniki stałe obserwowane podczas badania sedymentacji dla past srebrzych o lepkości poniżej 10 Pa·s produkcji CNPME

Inna metoda pomiaru sedymentacji opisana jest w normie (PN-67/C-81543) [38]. Sposób ten powszechnie stosowany w lakiemnictwie może po pewnej modyfikacji znaleźć również zastosowanie w badaniach past.

Zasada pomiaru jest następująca. Bagietka wykonana ze stali nierdzewnej, szkła lub ceramiki (zależnie od typu badanej pasty) ma naniesioną podziałkę od 0 ± 10 (rys. 10). Szklany cylinder miarowy ze szlifem o wysokości większej od 200 mm i średnicy 15 ± 20 mm należy napętnić badaną pastą do poziomu 100 mm. Po zamknięciu cylindra pozostawić go bez ruchu na czas, po którym przewidziane jest sprawdzenie stopnia sedymentacji. Pomiar wykonuje się wprowadzając do cylindra bagietkę. Po upływie określonego czasu notuje się poziom, do którego bagietka zagłębiła się pod własnym ciężarem. Dysponując kompletem bagietek metodą tą można zmierzyć sedymentację past w całym zakresie lepkości i gęstości.



Rys. 10. Bagietka do badania sedymentacji pasty

3. PARAMETRY FIZYCZNO-MECHANICZNE WARSTW

W rozdziale niniejszym przedstawiono parametry opisujące warstwy niezależnie od tego czy badana warstwa jest przewodząca, rezystywna lub dielektryczna.

3.1. Wygląd zewnętrzny

Ocenę wizualną zewnętrznego wyglądu warstwy, jak każde badanie tego typu, należy traktować jako orientacyjne, które może nasunąć pewne przypuszczenia co do właściwości pasty i warstwy. Jest ono często niezbędne dla właściwego przeprowadzenia badania innymi metodami (np. wybranie miejsca pomiaru na warstwie). Może być również niezbędne przy ocenie wyników badań metodami bardziej precyzyjnymi.

Ocenę warstwy należy przeprowadzać w trzech etapach procesu jej formowania:

1. Bezpośrednio po nałożeniu warstwy na podłoże (warstwa mokra).

2. Po wysuszeniu warstwy.

3. Po wypaleniu warstwy.

Podczas oceny należy zwracać uwagę na:

- strukturę powierzchni,
- równomierność nałożenia, smugi, prześwity podłoża,
- barwę i połysk,
- ażurowość warstwy (widoczna w świetle przechodzącym),
- ostrość krawędzi nałożonego wzoru,
- wtrącenia, grudki i zanieczyszczenia,
- pęcherze, kratery, rysy, miejsca nie pokryte pastą.

Ocenę wzrokową należy przeprowadzać używając mikroskopu stereoskopowego o regulowanym powiększeniu w świetle przechodzącym i odbitym.

Oceniając wygląd warstwy można posługiwać się zdjęciami warstw wzorcowych lub samymi wzorcami wykonanymi z badanej pasty. Wadą wzorców dla niektórych past np. srebrowych lub na bazie PdAg jest zmiana ich wyglądu w miarę upływu czasu.

Przeprowadzający kontrolę powinien również dysponować tabelaryzowanym wykazem wszystkich wad warstw, jakie można dostrzec i opisem przyczyn ich powstawania. Identyfikacja przyczyn jest konieczna ze względu na nieobciążanie pasty wadami, które mogły powstać np. podczas niewłaściwie prowadzonego procesu przygotowania próbek do badań.

Na rysunkach 11, 12, 13, 14, 15 pokazano zdjęcia różnych defektów warstw obserwowanych pod mikroskopem stereoskopowym.

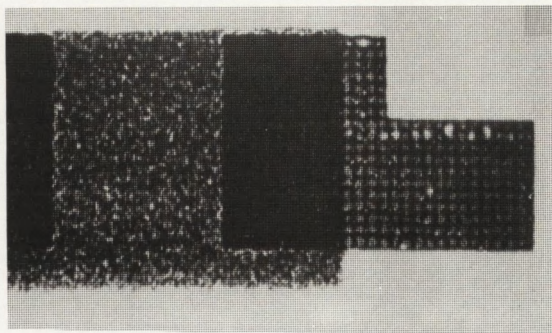
3.2. Grubość

Grubość jest podstawową cechą warstw, od której praktycznie zależą wszystkie jej parametry aplikacyjne. Z tego też względu podając np. rezystancję, adhezję czy napięcie przebicia warstwy konieczne jest określenie jej grubości.

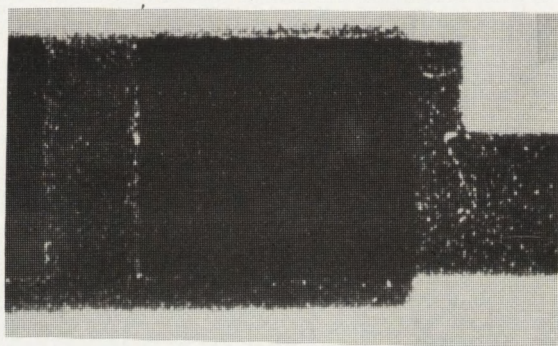
Grubość warstwy jest to odległość między linią średnią profilu powierzchni warstwy a linią średnią profilu powierzchni podłoża, rysunek 16 (linię średnią profilu powierzchni określa się zgodnie z normą PN-73/M-04251). [46]

Decydując się na wybór metody pomiaru grubości należy zdawać sobie sprawę z wymagań, jakie stawia metodzie specyfika grubych warstw. Należy tu uwzględnić następujące zagadnienia:

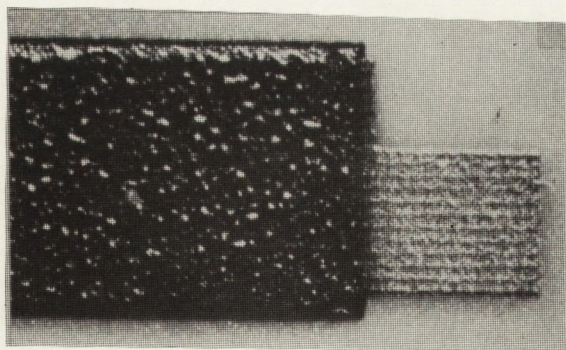
- typowe grubości warstw zawierają się w granicach od 2 do 100 μm ,
- grubość warstwy może zmieniać się w różnych punktach obszaru mierzonego,
- twardość warstwy waha się od 5 kG/mm^2 dla warstw niewypalonych, do 120 kG/mm^2 dla warstw wypalonych,
- pomiarowi poddawane są warstwy przewodzące, rezystywne i dielektryczne,
- wybrana metoda musi być nieniszcząca dla warstw.



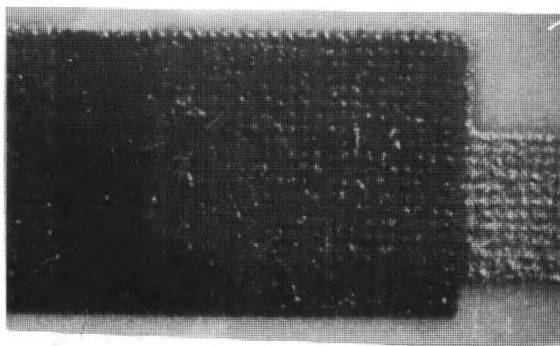
Rys. 11. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, kontakty przewodzące z pasty na bazie PdAg. Warstwa rezystywna wyraźnie ażurowa. Fot. w świetle przechodzącym, pow. 12x



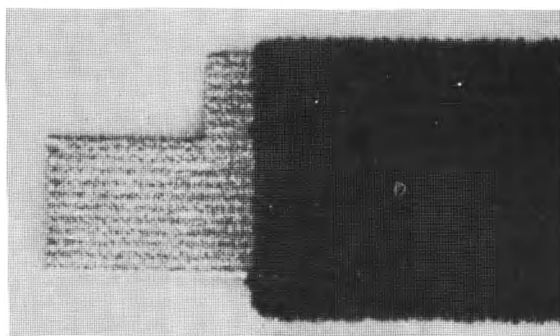
Rys. 12. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, kontakty przewodzące z pasty na bazie Au. Wzdłuż granicy nakładki warstw widoczne jaśniejsze linie. Cieńsza warstwa rezystywna w tym miejscu stwarza możliwość przegrzania i niestabilności rezystora podczas jego eksploatacji. Fot. w świetle przechodzącym, pow. 12x



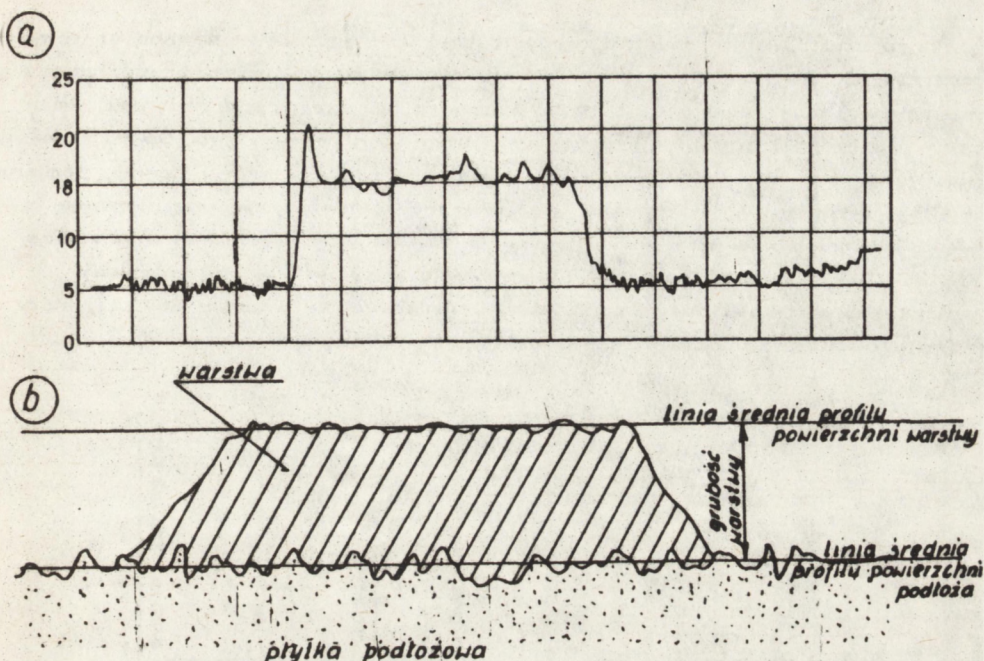
Rys. 13. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie PdAg, kontakty przewodzące z pasty na bazie PdAg. Na całej powierzchni rezystora drobne kraterki, na warstwie przewodzącej ślady odciśniętej siatki. Fotografia w świetle odbitym, pow. 12x



Rys. 14. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie PdAg, kontakty przewodzące z pasty na bazie PdAg. Nieprawidłowy obraz obszaru nakładki warstw. Wyraźnie różny odcień nakładki świadczy o silnej reakcji jaka zaszła pomiędzy warstwami. Fotografia w świetle odbitym, powiększenie 12x



Rys. 15. Fragment rezystora wykonanego z pasty na bazie $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, kontakty przewodzące z pasty na bazie PdAg. Powierzchnia rezystora jednorodna, szklista, pozbawiona defektów. Wygląd prawidłowy. Fot. w świetle odbitym, pow. 12x



Rys. 16. Określenie grubości warstwy: a - profilogram warstwy wykonany na urządzeniu Talysurf 4; b - definicja grubości warstwy

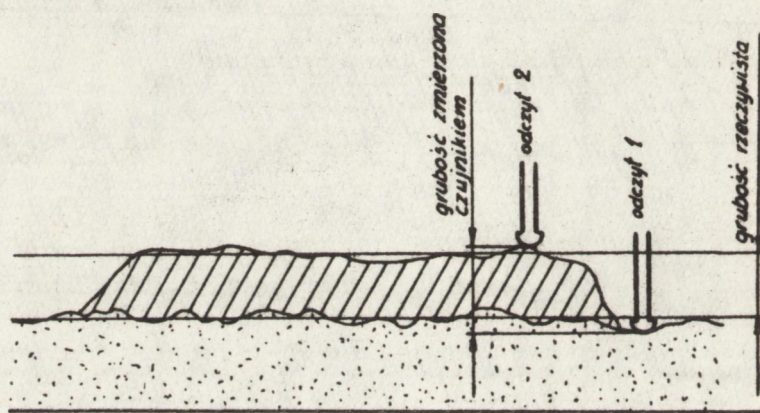
Z pośród wielu metod pomiaru grubości warstw tylko kilka spełnia wszystkie stawiane wymagania. Stosunkowo najwięcej informacji o grubości i strukturze powierzchni warstwy daje pomiar profilografem. Właściwie tylko ten sposób pozwala określić grubość warstwy zgodnie z definicją podaną wyżej.

Przy użyciu dobrych profilografów, np. "Talysurf" firmy Taylor Hobson Anglia, można określić grubość warstwy z dokładnością do $0,2 \mu\text{m}$. Nacisk ostrza sondy pomiarowej tego profilografu na warstwę wynosi $0,05$ grama i nie pozostawia śladu nawet na miękkiej niewypalanej warstwie.

Użycie profilografu do pomiaru grubości umożliwia jednocześnie ocenę chropowatości powierzchni oraz daje obraz profilu warstwy wzdłuż linii pomiarowej.

Pewnym ograniczeniem tej metody pomiarowej jest konieczność takiego ukształtowania mierzonej warstwy, aby pomiar mógł być wykonany na krawędzi warstwy. Jest to konieczne, ponieważ przy odczycie grubości warstwy potrzebny jest poziom podłoża jako płaszczyzna odniesienia. W przypadku pomiaru warstw grubych to ograniczenie nie stwarza dodatkowych kłopotów.

Do pomiaru grubości warstw grubych dość powszechnie stosowane są również czujniki mechaniczne lub elektromagnetyczne. Są to przyrządy niezbyt kosztowne i łatwo dostępne na rynku krajowym, np. czujnik cyfrowy typu Fimetr produkcji Fabryki Wyrobów Precyzyjnych im. gen. Świerczewskiego. Do zmierzenia grubości tą metodą potrzebna jest również krawędź warstwy. Zasadę pomiaru ilustruje rysunek 17. Na rysunku tym pokazano również przyczynę częstego błędu jaki występuje przy pomiarze czujnikiem. Dla jego wyeliminowania zaleca się wykonanie szeregu pomiarów i uśrednienie wyników. Inną wadą metody czujnikowej jest dość duży nacisk sondy pomiarowej na warstwę (80 G), który może spowodować niewielkie zagłębienie sondy w warstwie niewypalanej.



Rys. 17. Zasada pomiaru grubości warstwy czujnikiem. Pokazano przyczynę powstawania błędu

3.3. Adhezja

Jest to parametr charakteryzujący przyczepność warstwy do podłoża, a w przypadku układu warstw do warstwy poprzedniej. Sprawdzany jest przede wszystkim dla past przewodzących, gdyż one najbardziej są narażone na siły odrywające. Wynika to z roli jaką warstwa przewodząca pełni w podzespolu elektrycznym [6, 7]. Do pól montażowych wykonanych z past przewodzących dołącza się końcówki, a w mikroukładach elementy dyskretne takie jak: kondensatory i tranzystory.

Specyfika warstw grubych sprawia, że niezmiernie trudno jest zmierzyć bezwzględną wartość adhezji warstwy (wartość niezależna od metody pomiaru). Wynika to z faktu, że samo zaczepienie siły odrywającej do badanej warstwy najczęściej powoduje zmiany strukturalne w warstwie, które przyczyniają się do

pogorszenia adhezji. Dlatego też w badaniu przyczepności warstw grubych stosuje się pomiary polegające na odrywaniu badanej warstwy w warunkach zbliżonych do tych w jakich warstwa pracuje w podzespolu elektronicznym, do którego jest przeznaczona.

Z przedstawionych powyżej powodów niezwykle istotne jest, aby podając wartość adhezji jednocześnie dokładnie określać metodę pomiaru. W tabelicy 1 podano najczęściej stosowane metody pomiaru adhezji. Zostaną one szczegółowo omówione poniżej. [7, 20, 22, 25].

Tablica 1

Metody pomiaru adhezji warstw grubych

Lp.	Kategoria testu	Lp.	Rodzaj testu
1	Odrywanie warstwy rys. 18 - 1	1	Połączenie lutowane końcówki drutowej
		2	Połączenie lutowane pręta metalowego
		3	Połączenie klejone
		4	Połączenie ultra- lub termokompresyjne drutu
2	Oddzieranie warstw rys. 18-2	5	Połączenie lutowane końcówki drutowej
		6	Zastosowanie tworzywowej taśmy klejącej
3	Zarysowanie warstwy	7	Zarysowanie warstwy ostrzem

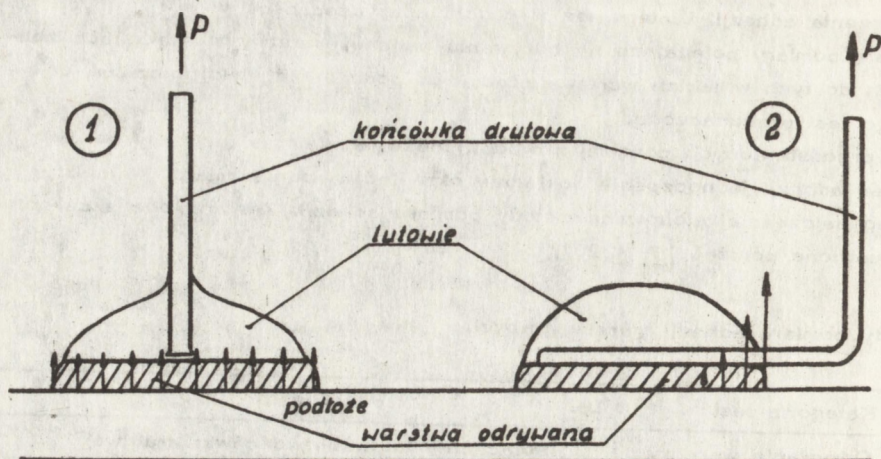
Testy odrywania

Zasadę przyłożenia siły i rozkład naprężeń podczas badania dla tej kategorii testów pokazano na rysunku 18 - 1. Wartość zmierzona w ten sposób jest najbardziej zbliżona do wartości rzeczywistej adhezji. Sposoby realizacji tej kategorii testu wymieniono w prawej kolumnie tabelicy 1. Wybór odpowiedniej metody uzależniony jest od rodzaju i przeznaczenia warstwy.

1. Odrywanie dolutowanej końcówki drutowej

Połączenie końcówki drutowej z badaną warstwą (patrz rys. 18 - 1) wykonuje się najczęściej za pomocą lutownicy zalecanego dla danego typu warstwy. Samo połączenie wykonuje się za pomocą lutownicy ręcznej. Odrywany obszar warstwy powinien mieć kształt kwadratu (najczęściej o boku $2 \div 3$ mm) lub koła (najczęściej o średnicy $2 \div 4$ mm).

Wartość adhezji określa się podając stosunek P/S , gdzie P - siła potrzebna do oderwania warstwy; S - powierzchnia odrywanego obszaru warstwy.



Rys. 18. Sposób przyłożenia siły i naprężenia w warstwie dla testu odrywania - 1 i testu oddzierania - 2

2. Odrywanie dolutowanego pręta metalowego

Metoda ta daje bardzo dobrą powtarzalność wyników i nadaje się do pomiaru dużych wartości adhezji. Dlatego często znajduje zastosowanie do badania przyczepności metalizacji twardej na ceramice.

Zasadę wykonania badania pokazano na rysunku 19.

Wartość adhezji określa się podając stosunek P/S , gdzie P - siła potrzebna do oderwania pręta z warstwą, S - przekrój pręta.

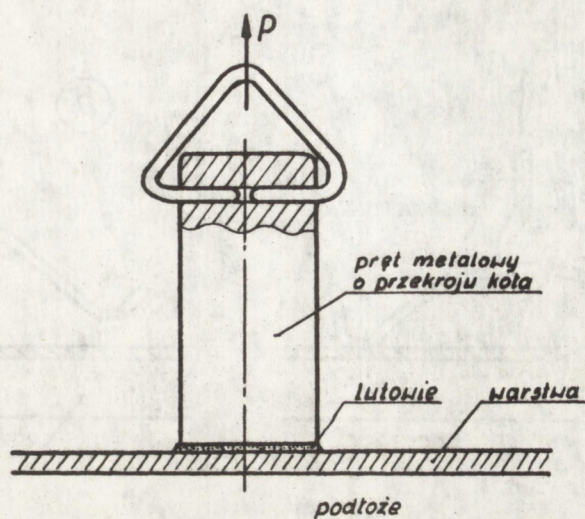
3. Połączenie klejone

Zasadę wykonania próby pokazano na rysunku 20. Metodę tę stosuje się do badania adhezji warstw przewodzących, dla których nie zaleca się lutowania lub dla warstw nielutowalnych, jak np. warstwy rezystywne i dielektryczne.

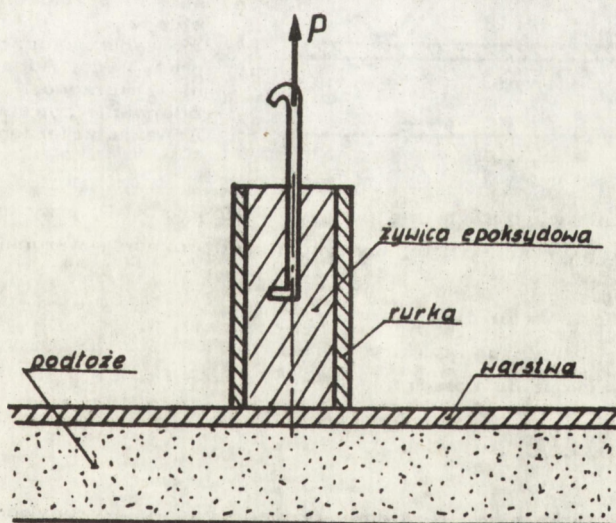
Wartość adhezji określa się podając stosunek P/S , gdzie P - oznacza siłę potrzebną do oderwania rurki z warstwą, S - oznacza przekrój wewnętrzny rurki.

4. Odrywanie drutu dołączonego termokompresyjnie lub ultrakompresyjnie

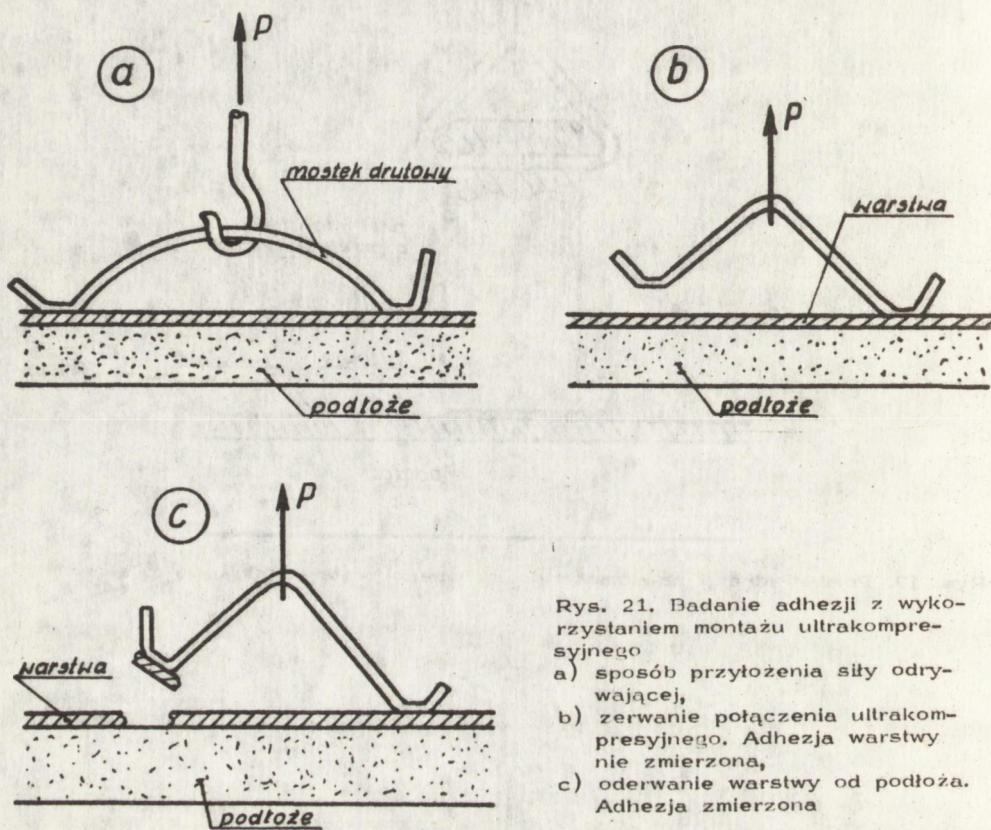
Ten sposób pomiaru adhezji warstwy jest mało dokładny i stosowany prawie wyłącznie przy ocenie warstwy w zastosowaniu do mikroukładów. Ponieważ połączenia termo- i ultrakompresyjne mają stosunkowo małe wytrzymałości (np. dla drutów o ϕ 25÷50 μm wytrzymałość złącza jest 5÷15 G) należy podczas badania prowadzić dokładną obserwację mikroskopową miejsca zerwania. Rysunek 21 ilustruje zasadę pomiaru.



Rys. 19. Pomiar adhezji za pomocą dolutowanego pręta metalowego



Rys. 20. Test odrywania z wykorzystaniem połączenia klejowego



Rys. 21. Badanie adhezji z wykorzystaniem montażu ultrakompresyjnego

- sposób przyłożenia siły odrywającej,
- zerwanie połączenia ultrakompresyjnego. Adhezja warstwy nie zmierzona,
- oderwanie warstwy od podłoża. Adhezja zmierzona

Adhezję warstwy określa się podając wartość siły P , przy której nastąpiło oderwanie jak na rysunku 21c, precyzując jednocześnie warunki wykonania badania:

- materiał drutu (lub taśmy)
- średnicę drutu (lub wymiary taśmy)
- metodę wykonania połączenia.

Testy oddzierania

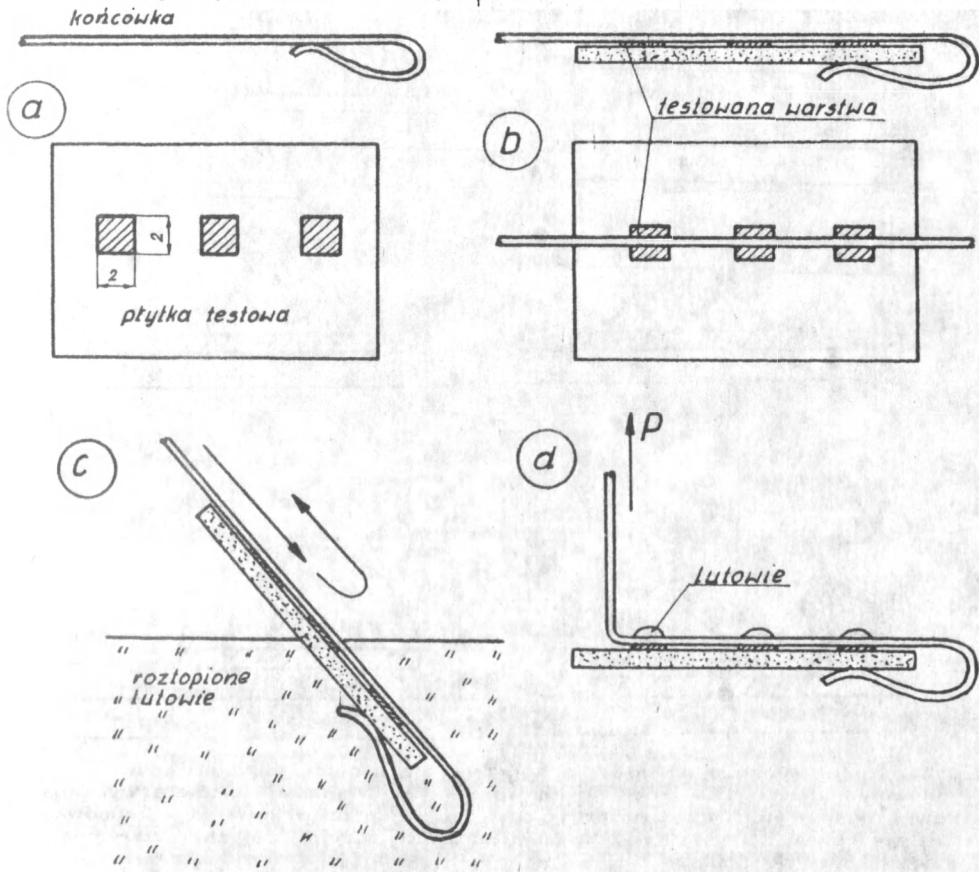
Zasadę przyłożenia siły i rozkład naprężeń podczas wykonywania badania tą kategorią testów pokazano na rysunku 18 - 2, a sposoby ich realizacji wymieniono w tablicy 1.

Testy tej grupy stosowane są najczęściej do oceny adhezji, pomimo że nie podają rzeczywistej wartości adhezji.

5. Oddzieranie dolutowanej końcówki drutowej

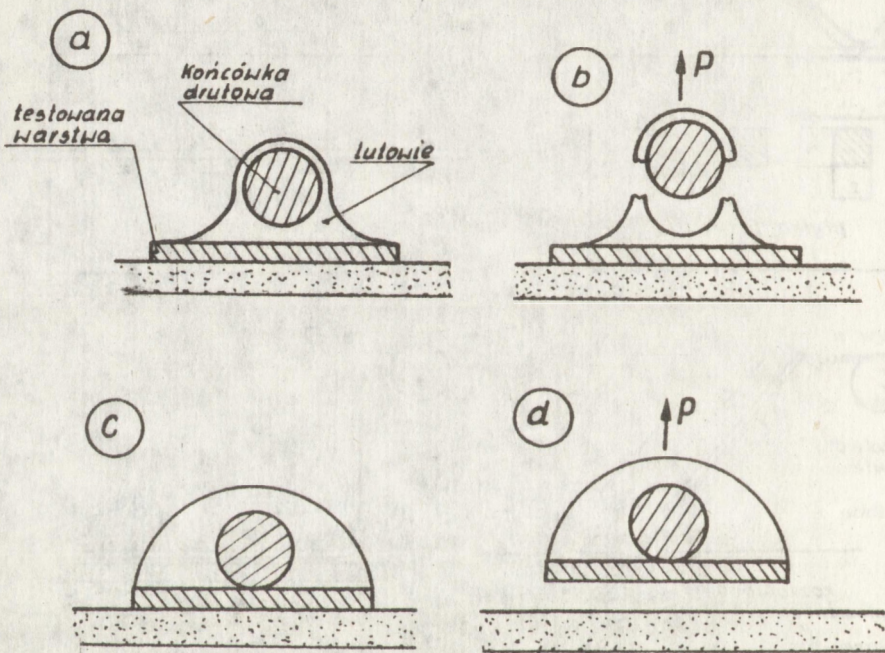
Jest to najpopularniejszy sposób badania adhezji warstw stosowany w wielu firmach, między innymi przez firmę Du Pont. Popularność tej metody wynika z dwóch powodów:

- testy są łatwe do wykonania
- ich przygotowanie i sposób przeprowadzania badania jest zbliżony do rzeczywistych warunków eksploatacji warstwy w podzespołe elektronicznym.



Rys. 22. Metoda badania adhezji stosowana w firmie Du Pont
a) płytka testowa i końcówka drutowa przygotowana do badań,
b) sposób ułożenia końcówki na płytce przed zanurzeniem w lutowniu,
c) sposób zanurzania płytki w roztopionym lutowniu,
d) płytka testowa po montażu przygotowana do pomiaru adhezji

Zasadę wykonania badania pokazano na rysunku 22. Warstwa przeznaczona do badania tą metodą musi być naniesiona na podłoże w postaci pół kwadratowych o boku 2 ± 3 mm. Dla prawidłowego przeprowadzenia badania szczególnie ważne jest właściwe wykonanie lutowania, które najczęściej przeprowadza się metodą zanurzenia. Lutowie powinno być nałożone odpowiednio grubo, gdyż w przeciwnym wypadku podczas odrywania może nastąpić pęknięcie lutownia a nie oderwanie warstwy od podłoża. Ilustruje to rysunek 23.



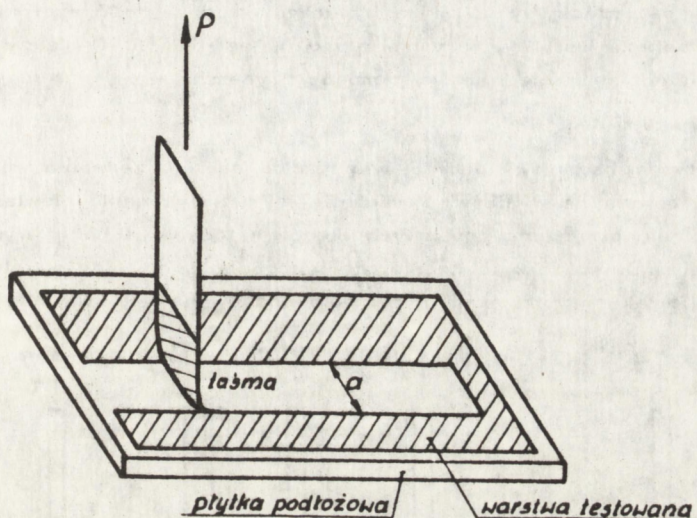
Rys. 23. Wpływ sposobu dolutowania końcówki na miejsce jej oderwania:
a - lutowanie niewłaściwe, zbyt cienka warstwa lutownia, b - końcówka wyrwana z lutownia, adhezji nie można zmierzyć, c - lutowanie prawidłowe, d - końcówka odrywa się razem z badaną warstwą, wartość siły odrywającej charakteryzuje adhezję warstwy do podłoża

Wartość adhezji określa się podając siłę odrywającą P , precyzując jednocześnie warunki wykonania badania:

- metodę oddzierania,
- rozmiary odrywanego pola,
- średnicę drutu.

6. Oddzieranie taśmy tworzywowej

Zasadę pomiaru pokazano na rysunku 24.



Rys. 24. Pomiar adhezji metodą oddzierania przyklejonej taśmy tworzywowej

Wartość adhezji określa się podając P/a , gdzie P - siła odrywająca, a - szerokość taśmy.

Metoda ta znajduje zastosowanie w pomiarach małych wartości adhezji, np. warstw niewypalonych.

Pewną modyfikacją tej metody jest zastosowanie taśmy klejącej typu "scotch". Dokładnie przyklejoną do warstwy taśmę odrywa się przez szybkie pociągnięcie ręką. Ocenę adhezji przeprowadza się przez oględziny taśmy i warstwy po oderwaniu. Im adhezja słabsza, tym pozostanie więcej defektów w warstwie po oderwaniu. Jest to metoda bardzo orientacyjna, ale łatwa i szybka.

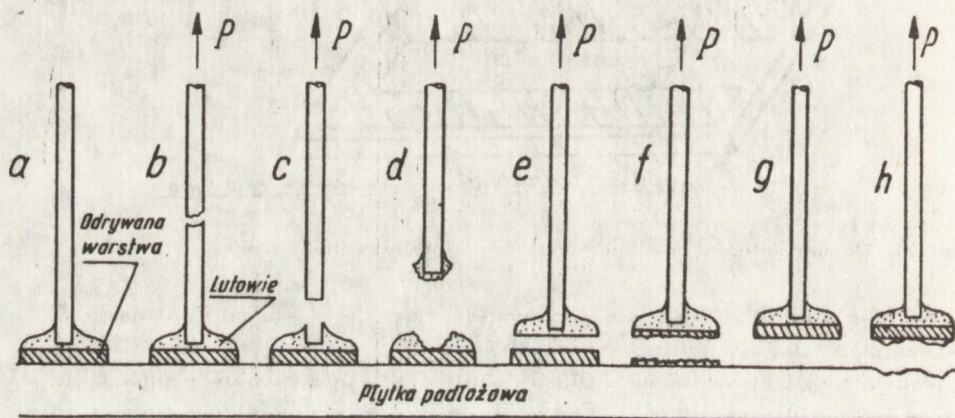
Testy rysy [17]

Ten sposób testowania stosowany jest najczęściej dla warstw cienkich (nakładanych próżniowo). W przypadku warstw grubych wykorzystywany jest przede wszystkim do badania przyczepności warstw niewypalonych. Jest kilka sposobów pomiarów tą metodą. Najprostszy sposób polega na przesuwaniu obciążonej igły wolframowej lub ostrza diamentowego nad badaną warstwę. Obciążenie zwiększa się do momentu, gdy igła zagłębi się do podłoża. Siłą obciążającą igłę przyjmuje się za miarę adhezji.

Lepsze wyniki daje pewna modyfikacja tej metody. Dwie igły ustawione jedna obok drugiej, obciążone odpowiednią siłą, prowadzi się po powierzchni badanej warstwy. Odległość między igłami może być regulowana w dość szerokim zakresie. Miarą adhezji warstwy, w tym przypadku, jest odległość między igłami, przy której nastąpi zerwanie warstwy pomiędzy rysami.

Analiza wyników

Ostatnim etapem badania, nie mniej ważnym od samego zerwania warstwy, jest szczegółowa analiza wyników. Pominięcie jej lub wykonanie niewłaściwe jest bardzo często przyczyną poważnych błędów w ocenie adhezji. Wynika to z faktu, że zerwanie połączenia często nie następuje na granicy warstwa - podłoże, a tylko takie wyniki mogą być brane pod uwagę jako wartość adhezji.



Rys. 25. Możliwe miejsca zerwania połączenia podczas badania adhezji warstwy do podłoża: a) wygląd połączenia przed testem; b) zbyt mała wytrzymałość końcówki drutowej; c) zła lutowność drutu; d) zbyt mała wytrzymałość lutownia; e) zła lutowność warstwy; f) rozerwanie warstwy; g) oderwanie warstwy od podłoża. Prawidłowy pomiar adhezji; h) adhezja warstwy większa od wytrzymałości podłoża

Na rysunku 25 wskazano miejsca, w których może wystąpić zerwanie połączenia testowanego. Tylko w przypadku "g" wynik pomiaru siły zerwania charakteryzuje rzeczywiście adhezję warstwy do podłoża. W pozostałych przypadkach można powiedzieć, że adhezja warstwy do podłoża jest większa od wyniku pomiaru.

Na prawidłowy wynik badania adhezji ma również wpływ stosowane oprzyrządowanie pomiarowe. Zrywanie powinno odbywać się na precyzyjnych zrywarkach o zmiennych zakresach pomiarowych i regulowanej szybkości narastania siły zrywającej (zalecana szybkość opuszczania uchwytu $2 \div 3$ cm/min).

Nie zaleca się wykonywania pomiarów na mało precyzyjnych dynamometrach ręcznych.

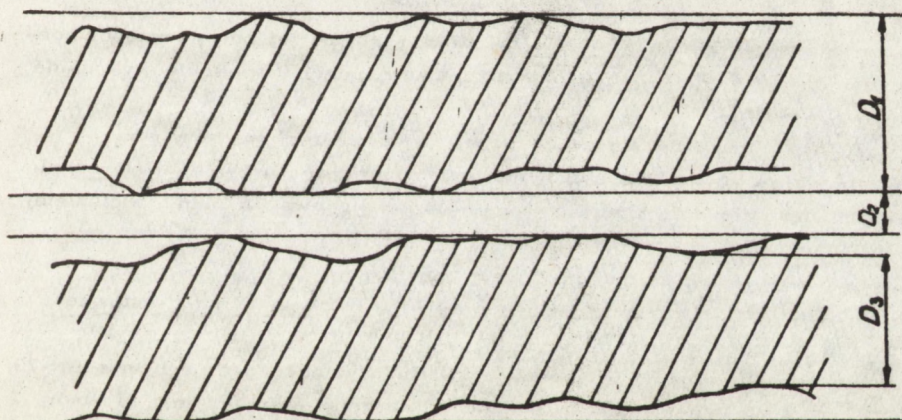
3.4. Rozdzielczość

Parametr ten określany jest dla past nakładanych metodą druku sitowego. Charakteryzuje on zdolność pasty do wydrukowania wąskich ścieżek przy małej odległości pomiędzy nimi. Stosowany jest w przypadku past przewodzących i niektórych typów past izolacyjnych.

Rozdzielczość drukowania zależy w równym stopniu od właściwości pasty jak i od sposobu przeprowadzenia samego procesu nakładania warstwy. Dlatego też podając rozdzielczość pasty należy dokładnie określić warunki, w jakich prowadzono proces, a w szczególności:

- parametry ustawienia drukarki
- materiał i gęstość sita
- metodę maskowania sita i grubość emulsji.

Pomiar zdolności rozdzielczej polega na mierzeniu szerokości najwęższej, nieprzerwanej i pozbawionej przewężeń ścieżki oraz najmniejszej odległości pomiędzy dwiema sąsiednimi nie zwartymi ścieżkami (rysunek 26).



- D_1 - szerokość ścieżki
- D_2 - odległość pomiędzy ścieżkami
- D_3 - największe przewężenie ścieżki

Rys. 26. Pomiar zdolności rozdzielczej drukowania

Zdolność rozdzielczą podaje się w postaci dwóch liczb, np. 150x200 μm . Oznacza to, że z badanej pasty można wydrukować najwęższe ścieżki ciągłe o szerokości 150 μm przy najmniejszym odstępnie między ścieżkami nie zwartymi 200 μm .

Pomiary wykonuje się za pomocą mikroskopu warsztatowego.

3.5. Chropowatość powierzchni

Chropowatość powierzchni warstwy jest parametrem dość istotnym w niektórych zastosowaniach warstwy. Jego znajomość pozwala również ocenić prawidłowość przygotowania pasty i procesu formowania warstwy.

Chropowatość warstwy przewodzącej jest jednym z czynników decydujących o przydatności warstwy do mikroelektronicznego montażu ultrakompresyjnego i termokompresyjnego. Dotyczy to szczególnie montażu drutami o małych średnicach $20 \div 25 \mu\text{m}$. Stwierdzono [5], że chropowatość $R_a > 0,8 \mu\text{m}$ powoduje znaczne obniżenie jakości złącza "drut - warstwa". Uważa się, że dla wykonania prawidłowego złącza chropowatość powierzchni warstwy powinna być taka, aby wymiary złącza były duże w porównaniu z wysokością mikronierówności (patrz punkt 4.5.).

W przypadku warstw rezystywnych nadmierna chropowatość może ją zdyskwalifikować szczególnie w zastosowaniu do potencjometrów. Warstwa taka jest przyczyną trzasków i jest na ogół nieodporna na ścieranie przy ruchu ślizgacza.

Analiza stanu powierzchni warstwy, a między innymi jej chropowatości pozwala bardzo często wydać opinię o jakości samej pasty i sposobie wykonania warstwy.

Przyczynami pojawienia się zwiększonej chropowatości warstwy są:

- 1) Niewłaściwa reologia pasty, która uniemożliwia wyrównanie powierzchni bezpośrednio po nałożeniu warstwy. Na powierzchni powstają ślady odciśniętej siatki.
- 2) Złe rozdrobnienie składników i ujednorodnienie pasty.
- 3) Nieprawidłowo prowadzony proces obróbki termicznej (zbyt gwałtowne suszenie lub spalanie substancji organicznych).

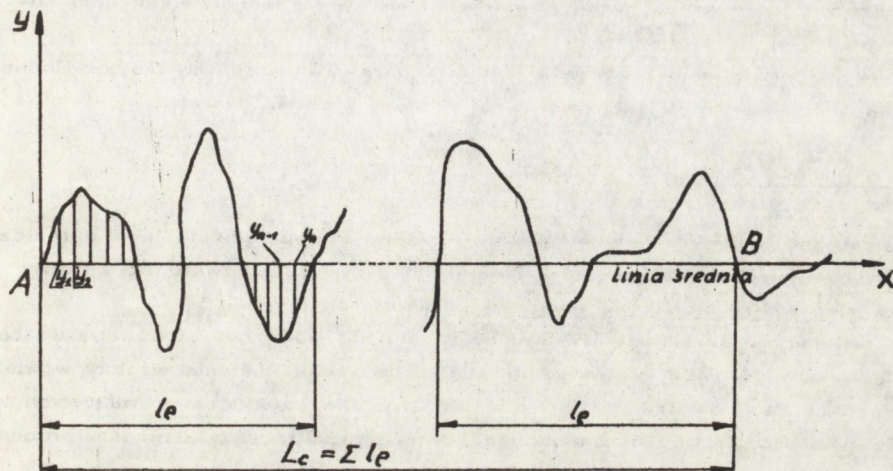
Definicję chropowatości i wielkości ją charakteryzujące podaje norma PN-73/M-04251 [46]. Według niej chropowatość powierzchni warstwy jest to zbiór nierówności powierzchni, umownie określanych jako odchyłki profilu zmierzonego od linii odniesienia w granicach odcinka, na którym nie uwzględnia się odchytek kształtu i falistości.

Parametrem, który charakteryzuje chropowatość powierzchni jest średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej $R_a = \frac{1}{l_e} \int_A |y| dx$, oznaczenia jak na rysunku 27. Zmierzoną wartość R_a należy podawać razem z długością odcinka elementarnego l_e .

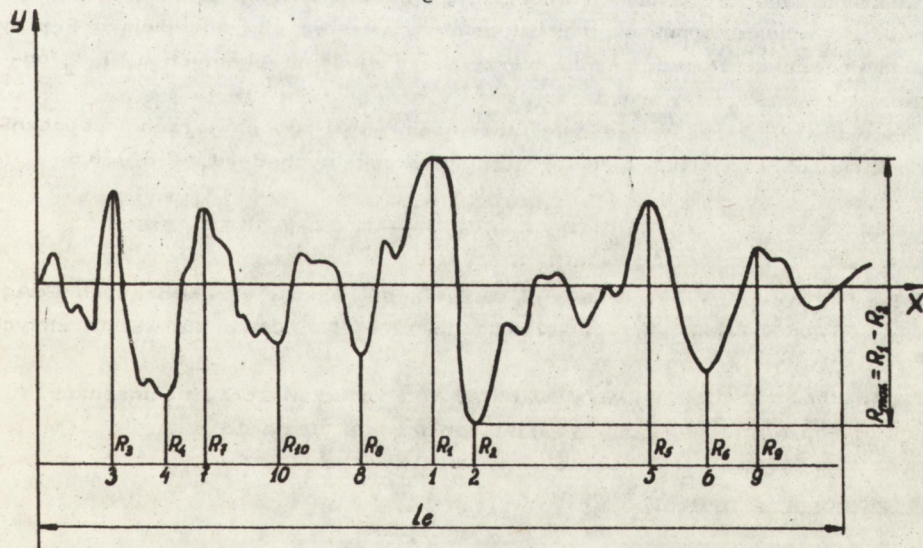
Drugim parametrem opisującym chropowatość jest wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu R_z . Jest to średnia odległość pięciu najwyższych położonych punktów wgłębień zaobserwowanego profilu na długości elementarnego odcinka l_e , mierzona od linii równoległej do linii średniej. Wielkość tę wyznacza się ze wzoru:

$$R_z = \frac{1}{5} \left\{ \left[R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9 \right] - \left[R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10} \right] \right\}$$

Sposób obliczania wyjaśnia rysunek 28.



Rys. 27. Wyznaczanie parametru R_z
 l_e - znormalizowana długość odcinka linii odniesienia wybierana do określenia chropowości bez uwzględnienia falistości i odchytek kształtu,
 L_c - długość odcinka linii odniesienia konieczna do określenia parametrów chropowości powierzchni. Odcinek pomiarowy L_c może zawierać jeden lub więcej odcinka elementarnych l_e



Rys. 28. Wyznaczanie parametrów R_z i R_{max}

Z wielu metod pomiaru chropowatości, najbardziej zalecaną dla warstw grubych jest metoda stykowo-mechaniczna. Do tego celu znakomicie nadają się profilografy, które kreślą profil powierzchni warstwy i jednocześnie dają odczyt wielkości R_a lub R_z .

Przykładem takiego przyrządu jest profilograf Talysurf firmy Taylor Hobson Anglia, który zalecany jest również do pomiaru grubości warstw.

3.6. Twardość

Parametr ten jest określany stosunkowo rzadko ze względu na jego ograniczone znaczenie. Stwierdzono, że w niektórych przypadkach twardość warstwy może mieć wpływ na jakość połączeń ultrakompresyjnych. [5].

Konwencjonalne metody pomiaru twardości nie mogą być stosowane do badania warstw grubych, ponieważ powstające w czasie badania wgnioty w wielu przypadkach są większe niż grubość warstwy. Dla uzyskania prawidłowych wyników pomiaru, głębokość wgniotu nie powinna przekraczać kilkunastu procent grubości warstwy.

Dlatego też dla warstw grubych wykonuje się pomiary mikrotwardości, stosując siły nacisku od kilku do kilkudziesięciu gramów. Do takich pomiarów można wykorzystać metodę podaną w PN-79/H-04361. [3].

Zasada pomiaru polega na wykonaniu w badanej warstwie odcisku ostrostupa diamentowego o podstawie kwadratowej i określonym kącie. Odcisk ten wykonuje się wciskając ostrostup prostopadle w warstwę siłą obciążającą F przyłożoną na czas t . Po odciążeniu mierzy się długość przekątnych d_1 i d_2 odcisku.

Twardość Vickersa wyraża się stosunkiem siły F do powierzchni poboczniczy odcisku obliczonej ze średniej wartości przekątnych $d = (d_1 + d_2) / 0,5$

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (N/mm^2)$$

Typowe wartości mikrotwardości Vickersa dla warstw przewodzących PdAg zawierają się w granicach 700 HV 0,01 do 1200 HV 0,01, a dla warstw złotych od 250 HV 0,01 do 400 HV 0,01.

Zapis 700 HV 0,01 oznacza twardość 700 zmierzoną przy obciążeniu 0,098 N (0,01 kG) w czasie działania obciążenia 10 do 15 s.

3.7. Ścieralność warstwy

Odporność na ścieranie wymagana jest przede wszystkim od warstw rezystywnych i przewodzących przeznaczonych do wykonywania potencjometrów oraz od warstw zabezpieczających.

Specyfika warstw grubych sprawia, że do pomiaru ścieralności nie zaleca się dość popularnej metody Tabera.

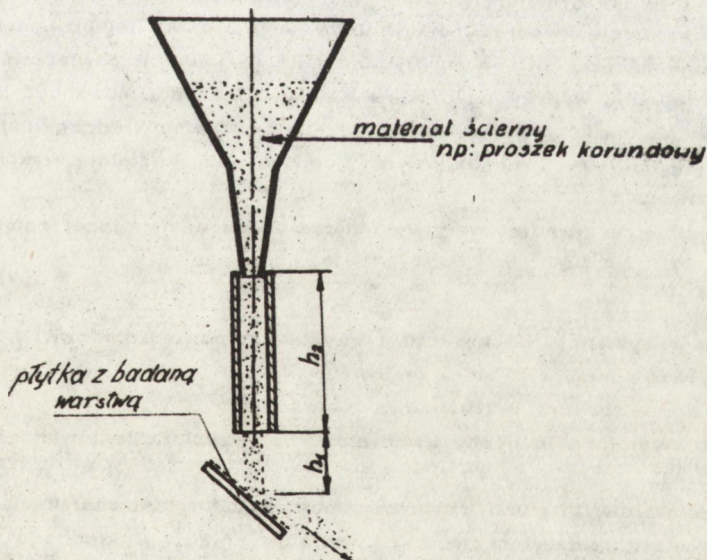
W przypadku warstw rezystywnych najczęściej badanie przeprowadza się na zmontowanym potencjometrze, który poddany jest określonej liczbie obrotów ślizgacza. Za miarę ścieralności przyjmuje się względną zmianę rezystancji po narażeniu oraz zmianę profilu warstwy poddanej badaniu, rysunek 29.



Rys. 29. Zmiana profilu warstwy po próbie ścierania ślizgaczem potencjometru
a) profil warstwy przed próbą, b) profil warstwy po próbie

Charakteryzując warunki wykonania badania należy podać: materiał, wymiary, siłę docisku i liczbę obrotów.

Badanie odporności na ścieranie warstw zabezpieczających wykonać można metodami opisanymi w normie PN-76/C-81516. [37]. Zasada badania polega na ścieraniu warstwy ustawionej pod kątem 45° względem strumienia proszku ściernego opadającego z określonej wysokości i z określoną szybkością, rysunek 30.



Rys. 30. Zasada pracy urządzenia do badania ścieralności warstw zabezpieczających

Miarą ścieralności jest stosunek masy zużytego materiału ściernego do grubości badanej warstwy. Metodę tę można zmodyfikować stosując jako źródło materiału ściernego urządzenie do korekcji rezystorów grubowarstwowych metodą piaskowania, ustawione na małe ciśnienie strumienia korygującego.

4. PARAMETRY CHARAKTERYSTYCZNE WARSTW PRZEWODZĄCYCH

Parametry opisujące właściwości warstwy przewodzącej i metody ich pomiaru wynikają z roli, jaką tego typu warstwa spełnia w podzespolu elektronicznym lub mikroukładzie grubowarstwowym.

Do najważniejszych funkcji warstwy należą:

- Zapewnienie połączeń przewodzących pomiędzy elementami układu.
- Umożliwienie montażu elementów dyskretnych, końcówek i połączeń drutowych.
- Utworzenie kontaktów przewodzących dla warstwy rezystywnej.
- Utworzenie okładek kondensatorów.

Dla zmierzenia parametrów warstwy konieczne jest uformowanie jej w odpowiednio zaprojektowane wzory testowe.

4.1. Rezystancja

Rezystancję warstwy przewodzącej charakteryzuje się podając jej rezystancję powierzchniową (rezystancję na kwadrat), którą definiuje się jako rezystancję warstwy w kształcie kwadratu, o dowolnym boku i ustalonej grubości, mierzoną pomiędzy bokami przeciwległymi. Wyznaczenie rezystancji powierzchniowej na podstawie definicji, w przypadku warstw przewodzących, może być kłopotliwe ze względu na bardzo małą wartość rezystancji. Dlatego najczęściej pomiar wykonuje się na rezystorze testowym o odpowiednim kształcie, wykonanym z badanej warstwy.

Rezystancję na kwadrat warstwy oblicza się z następującej zależności

$$R_s = \frac{R}{n}$$

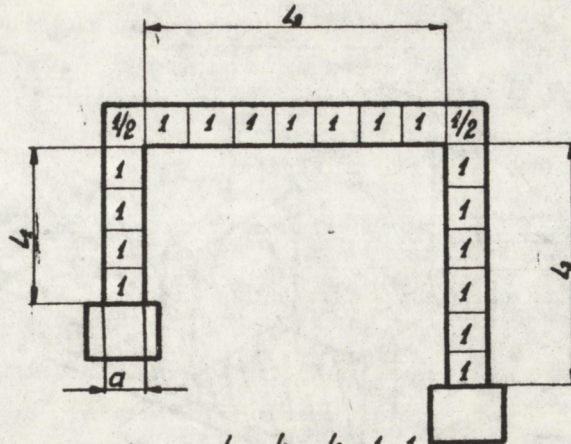
gdzie R_s - rezystancja na kwadrat (rezystancja powierzchniowa)

R - rezystancja rezystora testowego

n - liczba kwadratów rezystora testowego.

Sposób wyznaczania liczby kwadratów dla rezystora testowego zilustrowano na rysunku 31.

W praktyce warstw grubych wystarczy, aby rezystor taki miał kształt meandra lub prostokąta i zawierał około 200 kwadratów [6,20]. Dokładność wyznaczenia rezystancji na kwadrat zależy również od szerokości rezystora, która nie powinna być mniejsza niż 0,5 mm.



liczba kwadratów $n = \frac{L}{a} + \frac{L}{a} + \frac{L}{a} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 18$

Rys. 31. Sposób obliczenia liczby kwadratów w rezystorze testowym

Niektóre katalogi charakteryzują warstwy przewodzące podając ich rezystancję właściwą. Zależność pomiędzy rezystancją właściwą i powierzchniową jest następująca:

$$Q = R_s \cdot d$$

gdzie Q - rezystancja właściwa warstwy
 R_s - rezystancja na kwadrat warstwy
 d - grubość warstwy.

W przypadku, kiedy z pasty nie można wykonać odpowiedniego rezystora testowego (np. pasty nakładane pędzlem) należy się posłużyć sondą cztero-elektrodową, a warstwę nałożyć na prostokątną płytkę podłożową. Na rysunku 32 pokazano zasadę konstrukcji i sposób podłączenia do układu pomiarowego sondy cztero-elektrodowej.

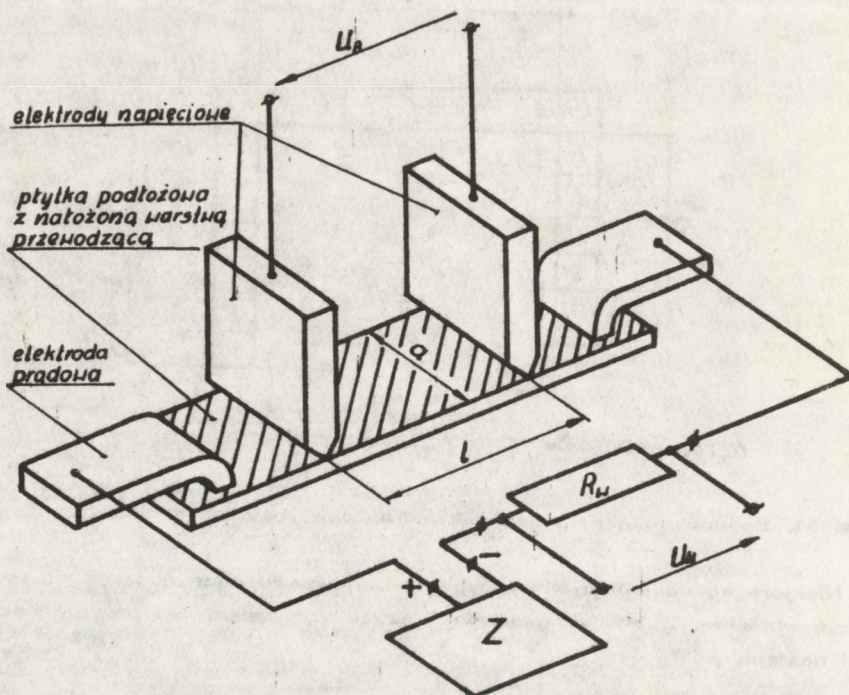
Rezystancję na kwadrat warstwy oblicza się wg wzoru:

$$R_s = \frac{a \cdot U_R}{I \cdot U_W} R_W$$

Oznaczenia jak na rysunku 32.

4.2. Lutowność

Dla większości warstw przewodzących jest to jeden z ważniejszych parametrów. Pod tym pojęciem rozumie się podatność warstwy na zwilżanie przez lutowanie w stanie roztopionym.



R_w - rezystor wzorcowy $0,01 \div 0,001 \Omega$
 Z - zasilacz stabilizowany prądu stałego

Rys. 32. Zasada konstrukcji sondy do czteropunktowego pomiaru rezystancji warstwy przewodzącej i sposób jej połączenia z układem pomiarowym

Badanie lutowności warstw przeprowadza się jedną z dwóch metod: [3, 6, 7, 20].

- sprawdzenie zwilżalności przez zanurzenie warstwy w roztopionym lutowiu,
- wyznaczania współczynnika rozptywu lutowia.

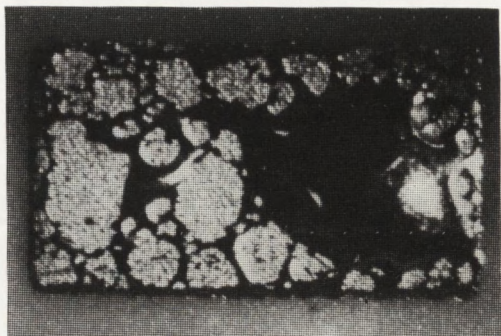
Pierwsza z wymienionych metod, pomimo że mniej dokładna, stosowana jest niemal powszechnie. Wynika to z łatwości wykonania badania oraz jego charakteru, który wiernie oddaje sposób lutowania stosowany w montażu podzespołów.

Metoda zanurzenia warstwy w roztopionym lutowiu

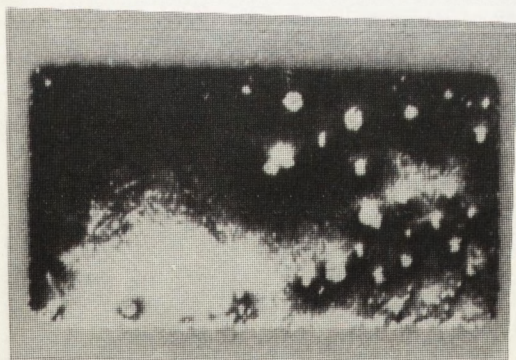
Metoda ta polega na zanurzeniu warstwy w wannie lutowniczej i ocenie stopnia pokrycia powierzchni warstwy przez lutowie. Skład lutowia, jego temperatura, czas przetrzymywania warstwy w lutowiu i rodzaj topnika muszą być



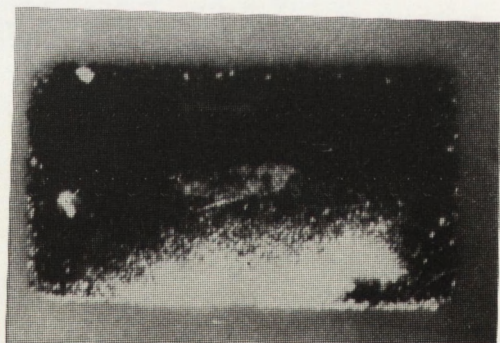
Rys. 33. Lutowność zła. Warstwa niepokryta lutowiem. W kilku punktach przywarły krople lutowia



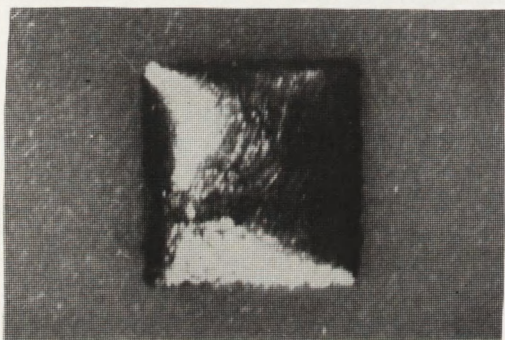
Rys. 34. Lutowność niedostateczna. Lutowie zwilża tylko niektóre obszary warstwy



Rys. 35. Lutowność dostateczna. Na powierzchni lutowia widoczne liczne defekty. W tym przypadku można uzyskać poprawę wyglądu przez powtórne polutowanie

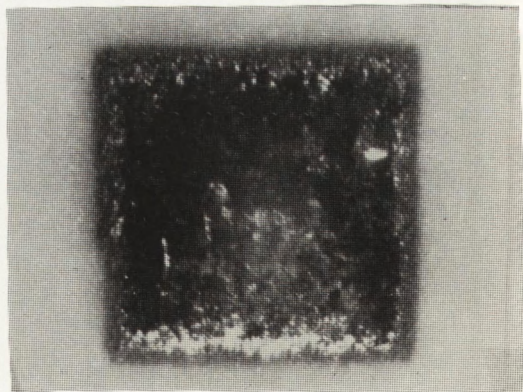
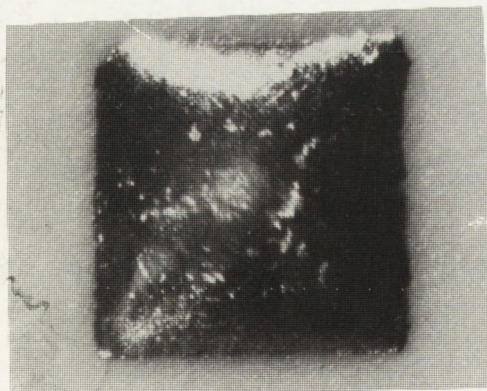


Rys. 36. Lutowność dobra. Lutowie dobrze zwilża warstwę. Nieznaczne defekty nie mają wpływu na jakość połączeń lutowanych



Rys. 37. Lutowność bardzo dobra. Warstwa całkowicie pokryta lutem bez defektów. Powierzchnia lutowa błyszcząca o kształcie "poduszkowatym"

Uwaga. Wszystkie fotografie wykonane w świetle odbitym, powiększenie 14x.



Rys. 38. Ługowanie warstwy przewodzącej na bazie PdAg lutem Sn, Pb36, Ag2. Fotografie w świetle odbitym, powiększenie 21x
 Fot. 1. Warstwa pokryta lutem przed narażeniem
 Fot. 2. Ta sama warstwa po 10 cyklach zanurzenia w lutem. Przy krawędziach widoczne obszary warstwy rozpuszczonej w lutem

ściśle określone. Parametry te powinny być dobrane optymalnie dla każdego rodzaju warstwy. Jest to bardzo ważne z tego względu, że lutowność warstwy zależy w takim samym stopniu od właściwości warstwy, jak i warunków wykonania procesu lutowania.

Po wyjęciu płytki z lutowia, ostudzeniu i umyciu z pozostałości topnika, warstwy ogląda się pod mikroskopem. Ocenia się procent powierzchni badanego wzoru pokryty przez lutowie. Przy tego typu testach bardzo pomocne są wzorce pokrytych lutowiem powierzchni. Mogą to być zdjęcia mikroskopowe jak na rysunkach 33 ÷ 37 lub eksponaty płytek o odpowiednio zabezpieczonej powierzchni przed utlenianiem i zanieczyszczeniem.

W badaniach lutowności stosuje się również szereg testów będących modyfikacją opisanej wyżej metody. Można np. mierzyć czas przetrzymywania warstwy w lutowiu, po którym to czasie nastąpi 100% pokrycie warstwy lutowiem lub podać liczbę zanurzeń w lutowiu, po których nastąpi całkowite pokrycie warstwy.

Metoda wyznaczania współczynnika rozptywu lutowia

Wykonanie próby polega na umieszczeniu znormalizowanego kawałka lutowia na powierzchni warstwy (uprzednio zwilżonej topnikiem) i podgrzaniu jej do temperatury lutowania. Po ostygnięciu próbki mierzy się wielkość obszaru rozptynięcia lub wysokość lutowia nad powierzchnią warstwy. Przykładem tej metody może być test proponowany w normie amerykańskiej ASTM B545-71. Jego procedura wygląda następująco:

- wydrukować na odpowiednim podłożu badaną pastę w kształcie koła o $\phi=1,25$ cm, wysuszyć i wypalić w warunkach zalecanych przez producenta;
- położyć badaną płytkę na płycie grzejnej o temperaturze wystarczającej do stopienia lutowia (np. 220°C dla lutowia LC63);
- położyć 3 krople właściwego topnika na badany obszar i pozostawić przez 1 minutę;
- zważyć kawałek lutowia w postaci drutu (np. ϕ 0,1 mm, długość 70 mm) i ustawić prostopadle do badanego obszaru (posługując się rurką szklaną);
- pozostawić stopione lutowie na powierzchni warstwy przez 2 minuty;
- zdjąć płytkę z grzejnika i pozostawić do ostygnięcia w pozycji poziomej;
- płytkę umyć z topnika;
- zmierzyć wysokość lutowia nad powierzchnią warstwy (H);
- obliczyć współczynnik rozptywu lutowia K_r z następującej zależności:

$$D = 1,2407 \frac{W}{g} \quad K_r = \frac{100 (D-H)}{D} \quad [\%]$$

gdzie W - ciężar lutowia, g - gęstość lutowia, H - grubość lutowia nad powierzchnią warstwy. Badane wg tego testu pasty na bazie PdAg o dobrej lutowności miały współczynnik $K_r \sim 74\%$

4.3. Odporność na ługowanie lutowiem

Warstwy przewodzące (szczególnie na bazie srebra i złota), odznaczają się na ogół małą odpornością na ługujące działanie roztopionego lutowia.

Badanie tego parametru wykonuje się najczęściej jedną z dwóch metod.

Pierwsza polega na zanurzeniu w roztopionym lutowiu kilku płytek testowych i przetrzymywanie ich kolejno przez 5, 10, 20, 40 sekund. Przed zanurzeniem płytki pokrywa się topnikiem, a po wyjęciu z lutowia i ostudzeniu zmywa topnik. Oceny dokonuje się pod mikroskopem, ustalając po jakim czasie występują pierwsze objawy rozpuszczania warstwy przez lutowie. Zjawisko to widoczne jest najczęściej na krawędziach wzorów testowych. Ilustrują je fotografie na rysunku 38.

Drugi rodzaj testu polega na wielokrotnym zanurzaniu w lutowiu na określony czas (10 s) badanej warstwy.

Płytkę przed każdym zanurzeniem należy pokryć topnikiem, a po wyjęciu z lutowia umyć i obejrzeć pod mikroskopem. Badanie należy kontynuować do momentu, kiedy wystąpią objawy rozpuszczania warstwy przez lutowie.

Stosunkowo rzadko stosowana jest metoda oceny ługowania przez pomiar adhezji po cyklach zanurzania w lutowiu. Metoda ta zalecana jest dla past, które szybko tracą adhezję, pomimo że nie wykazują zmian wyglądu zewnętrznego.

4.4. Migracja jonów metalicznych

W niektórych rodzajach warstw przewodzących, a zwłaszcza zawierających w swym składzie srebro, zauważa się skłonność do występowania migracji jonów srebrowych. Wilgoć i stałe pole elektryczne wyraźnie przyspiesza to zjawisko. Migracja ta jest bardzo szkodliwa, ponieważ jest przyczyną powstawania zwarców oraz niestabilności rezystorów i kondensatorów.

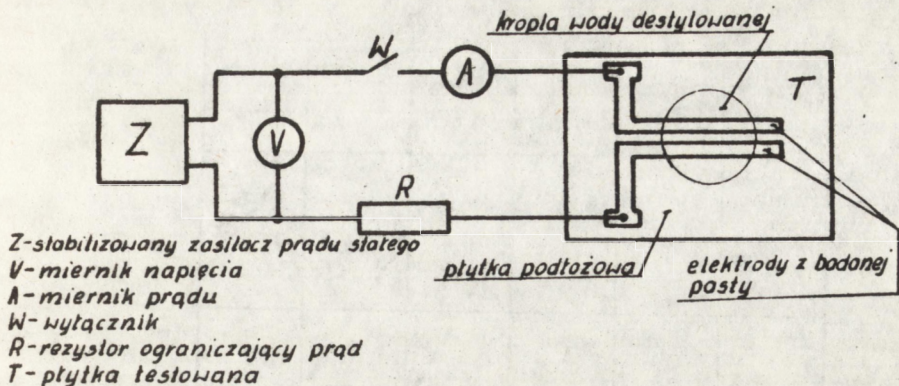
W pomiarze migracji wykorzystuje się zjawisko łatwego przechodzenia jonów srebrowych do wody pod wpływem pola elektrycznego.

Pomiar migracji wykonuje się w układzie elektrycznym pokazanym na rys.39.

Do zasilacza prądu stałego podłącza się elektrody wykonane z badanej pasty, które pokryte są kilkoma kroplami wody destylowanej.

Czas migracji jonów mierzony jest od momentu włączenia napięcia w obwodzie do chwili pojawienia się prądu. Na rysunku 40 pokazano typowe zależności czasu migracji od przyłożonego napięcia dla różnych past i odległości pomiędzy elektrodami.

Przy wykonywaniu pomiarów zaleca się stosowanie napięcia 5V i odległości pomiędzy elektrodami 0,5 mm.



Rys. 39. Zasada pomiaru czasu migracji składników metalicznych warstwy

Pomimo prostej zasady pomiaru bardzo często występują kłopoty z uzyskaniem powtarzalnych wyników. Składa się na to kilka przyczyn. Prąd, który pojawia się w obwodzie w wyniku ruchu jonów narasta stopniowo. Ważne jest więc ustalenie poziomu prądu, który uzna się za prąd zwarcia. Jest to szczególnie istotne w przypadku past o krótkim czasie migracji (kilka sekund). W takim przypadku korzystnie jest zastosować rezystor ograniczający w granicach od 5 do 10 M Ω i mierzyć spadek napięcia, jaki wystąpi na nim z chwilą pojawienia się prądu w obwodzie.

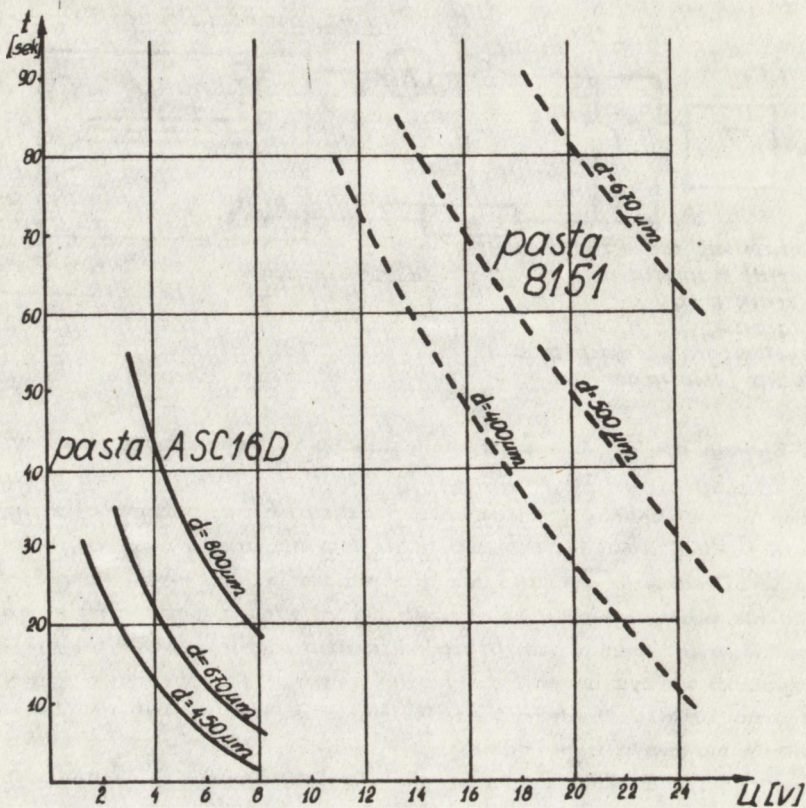
Rezystor taki znacznie zwalnia proces migracji, przesuwając czas zwarcia z kilkunastu sekund do kilkudziesięciu minut.

4.5. Podatność do montażu mikroelektronicznego

Parametr ten rozumiany jest jako zespół cech warstwy, który umożliwia dotarczenie do warstwy drutu złotego i aluminiowego metodami termo- lub ultrakompresyjnymi.

Dla pewnej grupy past szczególnie dla złotych i platynowo-złotych parametr ten zaliczany jest do podstawowych. Wynika to z zastosowania tych past do wytwarzania mikroukładów grubowarstwowych i obudów ceramicznych, w których montowane są nieobudowane elementy półprzewodnikowe.

Pomiar tego parametru sprowadza się do oceny połączeń wykonanych na warstwach. Badania takie są skomplikowane i wymagają precyzyjnej aparatury pomiarowej.



Rys. 40. Zależność czasu migracji od napięcia przy różnych odległościach pomiędzy elektrodami dla past przewodzących na bazie Ag (ASC16D prod.CNPME) i PdAg (8151 prod. Du Pont)

Dodatkowym utrudnieniem w ocenie wyników jest bardzo duża zależność jakości połączeń od samej techniki ich wykonania i zastosowanych materiałów.

Opracowano wiele metod badania połączeń "drut-warstwa". Ich omówieniem zajmuje się publikacja [5].

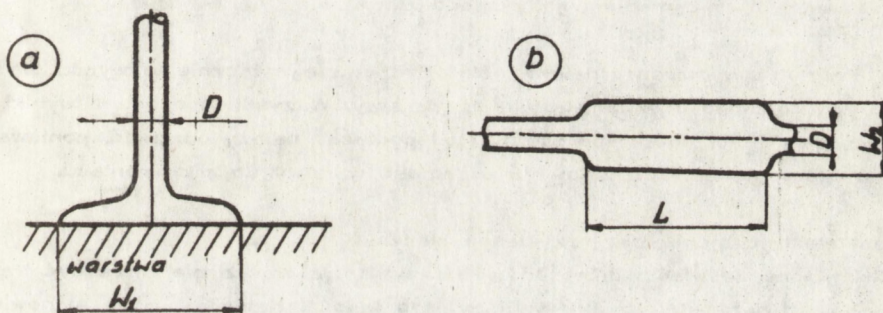
Poniżej zostaną przedstawione trzy najczęściej stosowane metody testowania.

Test wizualnej kontroli połączeń drutowych

Ten test należy traktować jako wstępną ocenę badanych próbek. Pozwala on wyeliminować z dalszych prób złącza wadliwie wykonane. Ta wstępna ocena jest niezmiernie ważna, ponieważ ocenę jakości warstwy można wykonać biorąc pod uwagę tylko złącza prawidłowo wykonane.

Obserwacje należy wykonać pod mikroskopem stereoskopowym przy powiększeniach 30÷100 razy zwracając uwagę na trzy obszary złącza:

1. Drut dołączony - nie powinien mieć przewężeń, pęknięć, śladów korozji
2. Obszar złącza (zgniot-drutu) - wymiary prawidłowo wykonanego złącza powinny spełniać następujące zależności (rysunek 41):
dla złącza termokompresyjnego
 $6D > W_1 > 2D$
dla złącza ultrakompresyjnego
 $3D > W_2 > 1,2D$
 $5D > L > 1,5D$
3. Umieszczenie złącza na warstwie - ważne jest aby złącze wykonane było w miejscu pozbawionym defektów warstwy. W każdym innym przypadku próbkę należy wyeliminować z dalszych badań.



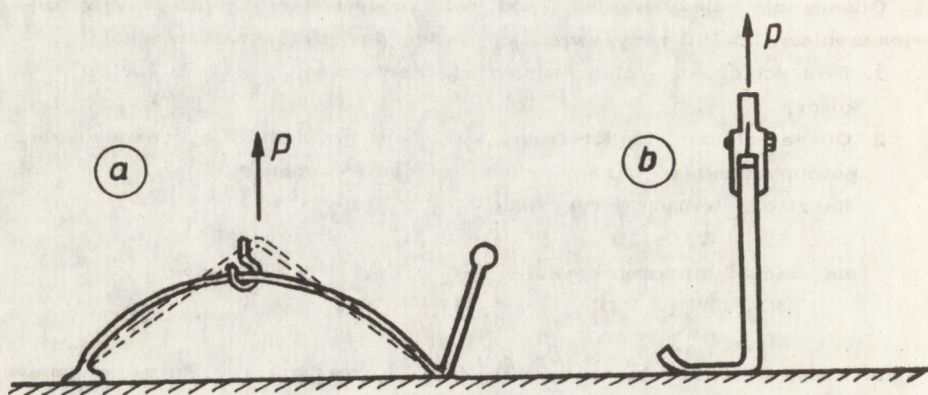
Rys. 41. Wymiary geometryczne charakteryzujące złącze termokompresyjne - a, ultrakompresyjne - b, D - średnica drutu, W_1 - średnica złącza termokompresyjnego, W_2 - szerokość złącza ultrakompresyjnego, L - długość złącza ultrakompresyjnego

Test odrywania

Zasadę wykonania testu odrywania ilustruje rysunek 42. Ze względu na małe wartości siły (pojedyncze gramy) zastosowana zrywarka powinna mieć dokładność 0,1 G, (są to na ogół urządzenia specjalistyczne przeznaczone wyjątkowo do tego celu).

Istotny jest sposób zaczepienia siły zrywającej (rysunek 42). Ma on wpływ na rodzaj i rozkład naprężeń, jakie pojawiają się w złączu podczas zrywania i tym samym wpływa na wartość pomiarów.

W celu określenia miejsca uszkodzenia wszystkie zerwane złącza należy ponownie poddać kontroli wizualnej.



Rys. 42. Sposoby zaczepienia siły odrywającej: a - odrywanie połączenia drutowego, b - odrywanie pojedynczego złącza

Przy ocenie warstwy należy wziąć pod uwagę wyłącznie te wyniki dla których nastąpiło oderwanie drutu od warstwy. Wszystkie pozostałe wyniki (zerwanie drutu, oderwanie warstwy od podłoża) należy odrzucić, ponieważ charakteryzują inne zjawiska niż podatność warstwy do mikromontażu.

Test elektryczny. Pomiar rezystancji złącza

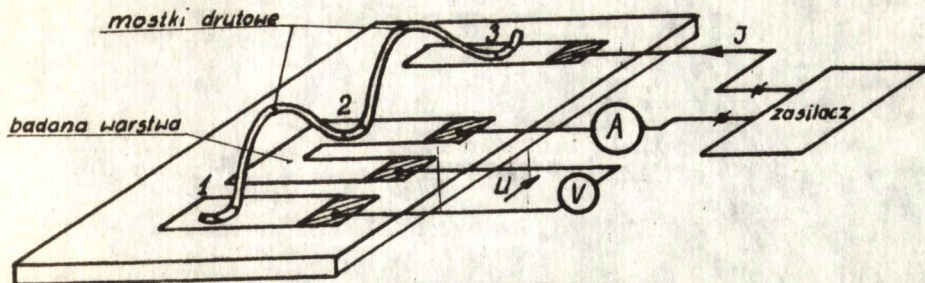
Stwierdzono doświadczalnie [13], że rezystancja złącza nie może być traktowana jako parametr charakteryzujący jego jakość. Natomiast może stanowić bardzo dobry wskaźnik zmian zachodzących w obszarze złącza po narażeniach termiczno-prądowych, np. tworzenie się związków międzymetalicznych złoto-aluminium powoduje bardzo wyraźny wzrost rezystancji złącza.

Pomiar rezystancji złącza wykonuje się najczęściej metodą czteropunktową. W tym celu należy wykonać odpowiedni układ warstw i połączeń drutowych jak na rysunku 43.

Typowe wartości rezystancji złącza dla drutów aluminiowych o ϕ 25 μm zawierają się w granicach $0,5 \pm 0,6 \Omega$.

4.6. Podatność warstwy do montażu struktur półprzewodnikowych

Przewodząca warstwa złota tworzy z krzemem w temperaturze 370°C stop eutektyczny. Właściwość tę wykorzystuje się powszechnie do trwałego łączenia struktur półprzewodnikowych z warstwami złotymi.



1, 3 - złącza zapewniające doprowadzenie prądu
i pomiar napięcia
2 - złącze mierzone $R_{z\acute{l}acza\ 2} = \frac{U}{J}$

Rys. 43. Układ testu i zasada pomiaru rezystancji złącza

Złącze takie powinno zapewnić:

- mechaniczne, dostatecznie wytrzymałe połączenie struktury krzemowej z warstwą,
- omowe przejście pomiędzy warstwą i strukturą półprzewodnikową,
- odprowadzenie ciepła wydzielonego w elemencie półprzewodnikowym.

Aby ocenić tę właściwość warstwy należy za pomocą urządzenia do montażu eutektycznego dołączyć strukturę krzemową i przeprowadzić:

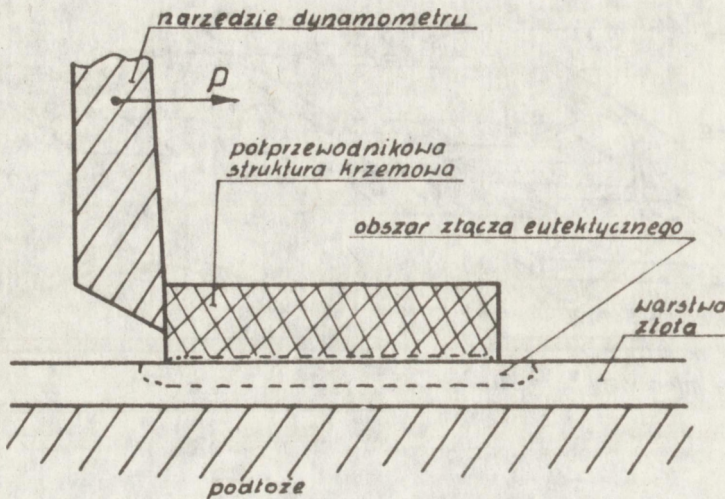
- 1) obserwację połączenia pod mikroskopem w czasie jego wykonywania,
- 2) pomiar siły stycznej do powierzchni warstwy, potrzebnej do zerwania dołączonej struktury.

Ad. 1. Obserwacja mikroskopowa obszaru złącza podczas jego wykonywania umożliwia ocenę szybkości tworzenia się eutektyki oraz pozwala przewidywać proces wówczas, gdy obszar eutektyki zaczyna wyraźnie wychodzić poza obręb dołączonej struktury.

Ad. 2. Pomiar siły potrzebnej do zerwania struktury należy wykonać dynamometrem przykładając siłę tak jak na rysunku 44.

5. PARAMETRY CHARAKTERYSTYCZNE WARSTW REZYSTYWNYCH

Pomiary parametrów elektrycznych warstw rezystywnych wykonuje się na rezystorach testowych uformowanych z badanej warstwy. Wykonując testy pomiarowe należy wyjątkowo starannie dobrać pastę przewodzącą na końcówki rezystora, najlepiej taką, co do której istnieje pewność, że jest zgodna technologicznie z badaną warstwą rezystywną.



Rys. 44. Sposób przyłożenia siły przy badaniu wytrzymałości połączenia eutektycznego

Jest to bardzo istotne, ponieważ przy złej współpracy obydwu past uzyskane wyniki mogą bardziej charakteryzować właściwości obszaru kontaktowego niż warstwy rezystywnej. Zagadnienie to omówiono szerzej w części 7.

Drugim zagadnieniem, które należy uwzględnić przy analizie wyników jest wpływ właściwości podłoża na parametry warstwy badanej.

5.1. Rezystancja warstwy

Charakteryzowanie rezystancji warstwy przez określenie rezystancji właściwej materiału, z jakiego została wykonana jest kłopotliwe, mało dokładne i nie daje pełnej informacji o jej właściwościach użytkowych. Dlatego też lepiej posługiwać się parametrem rezystancji powierzchniowej nazywanym również rezystancją na kwadrat.

Rezystancja na kwadrat jest to rezystancja warstwy w kształcie kwadratu o dowolnym boku, zmierzona pomiędzy bokami przeciwległymi (pod warunkiem jednakowej grubości warstwy na całej powierzchni).

Definicję tę można przedstawić poniższym wzorem:

$$R_s = \frac{a \rho}{a d} = \frac{\rho}{d}$$

gdzie R_s - rezystancja na kwadrat

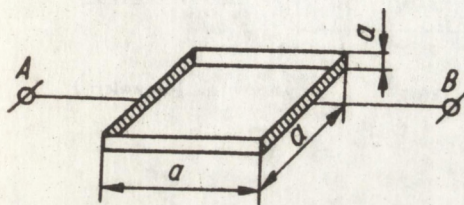
ρ - rezystancja właściwa materiału rezystywnego.

Powyższy wzór definiuje rezystancję pomiędzy końcówkami A B rezystora kwadratowego, rysunek 45.

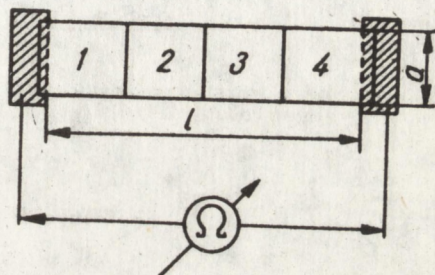
Jak wynika z powyższej zależności rezystancja powierzchniowa warstwy w kształcie kwadratu nie zależy od wielkości boku kwadratu.

W praktyce stosowane są dwa sposoby pomiaru rezystancji na kwadrat:

- rezystora testowego,
- sondy czterostrzowej.



Rys. 45. Warstwa w kształcie kwadratu o boku a



Rys. 46. Rezystor testowy o współczynniku kształtu 4

Metoda rezystora testowego [7, 30]

Zasada tej metody oparta jest na definicji rezystancji na kwadrat, rysunek 46:

$$R_s = \frac{R}{n}$$

gdzie:

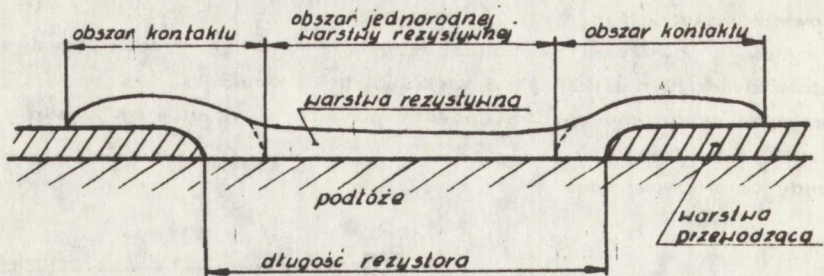
R_s - rezystancja na kwadrat

R - rezystancja rezystora testowego

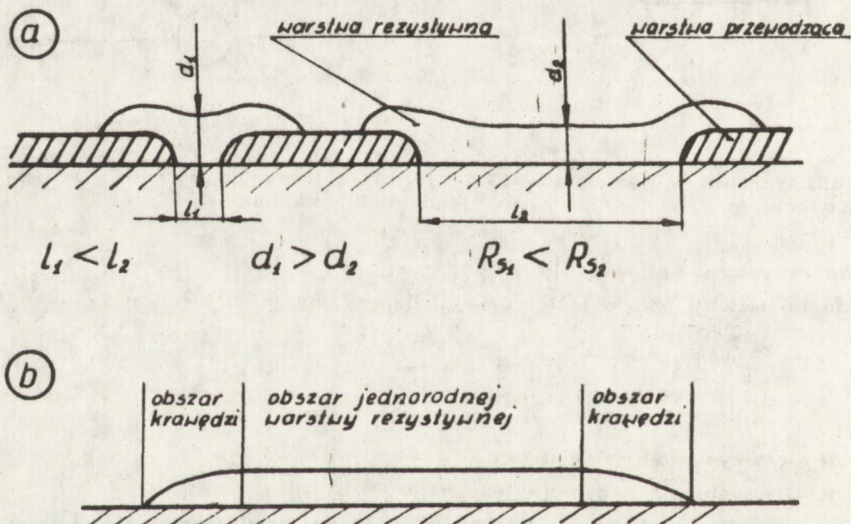
n - współczynnik kształtu rezystora (liczba kwadratów $n = l/a$).

Korzystając z omówionej metody wyznaczania R_s należy zwrócić uwagę na:

1. Rezystancję obszaru nakładki warstwy rezystywnej na przewodzącą (rysunek 47).
2. Niejednakową grubość warstwy w różnych obszarach rezystora (rys.48).
Mogą one przy niewłaściwym zaprojektowaniu rezystora testowego w zasadniczy sposób wpłynąć na wynik pomiaru, a w przypadkach krańcowych dać wynik całkowicie błędny.



Rys. 47. Wpływ warstwy przewodzącej na warstwę rezystywną. (Przekrój podłużny rezystora)



Rys. 48. Przyczyny niejednakowej grubości warstwy rezystywnej: a - wpływ kontaktów na grubość przy różnej długości rezystorów (przekrój podłużny); b - wpływ rozlania pasty przy krawędziach na grubość warstwy (przekrój poprzeczny)

Ad. 1. Wpływ obszaru nakładki

Warstwa rezystywna w pobliżu kontaktu z warstwą przewodzącą tworzy obszar przejściowy, który ma inną rezystancję niż pozostała część rezystora. Jest to spowodowane reakcjami międzyfazowymi warstw przewodzącej i rezystywnej. Wielkość tego obszaru nie zależy od długości rezystora. Dlatego też, rezystor testowy powinien być odpowiednio długi, aby rezystancja obszaru kontaktowego stanowiła mały procent w całkowitej rezystancji zmierzonej. W praktyce wystarcza, aby długość rezystora była większa od 4 mm. Na rysunku 71 pokazano zależność rezystancji powierzchniowej od długości rezystora.

Ad. 2. Wpływ niejednorodnej grubości warstwy

Kontakty przewodzące rezystora mają wpływ na grubość warstwy rezystywnej, co odbija się bezpośrednio na wartości rezystancji powierzchniowej. Grubość wzrasta w miarę skracania rezystora, rysunek 48. Również grubość krawędzi bocznych jest mniejsza, a ich skład bogatszy w szkliwo w porównaniu z obszarem środkowym rezystora. Pominiecie wpływu krawędzi bocznych możliwe jest dla rezystorów testowych szerszych od 2 mm.

Metoda sondy czterostrzowej [10, 11]

Zasadę pomiaru tą metodą pokazano na rysunku 49.

Rezystancja właściwa warstwy dla układu liniowego sonda tak jak na rysunku 49a wyraża się wzorem:

$$\rho = \frac{2\pi s U}{I}$$

gdzie s - odstęp między sondami

I - natężenie prądu wprowadzonego do sond zewnętrznych

U - napięcie zmierzone na sondach wewnętrznych.

Jeżeli warstwa mierzona jest cienka w stosunku do odstępów między sondami s , to wzór ten można zapisać inaczej:

$$\rho = \frac{\pi d U}{(\ln 2) I}$$

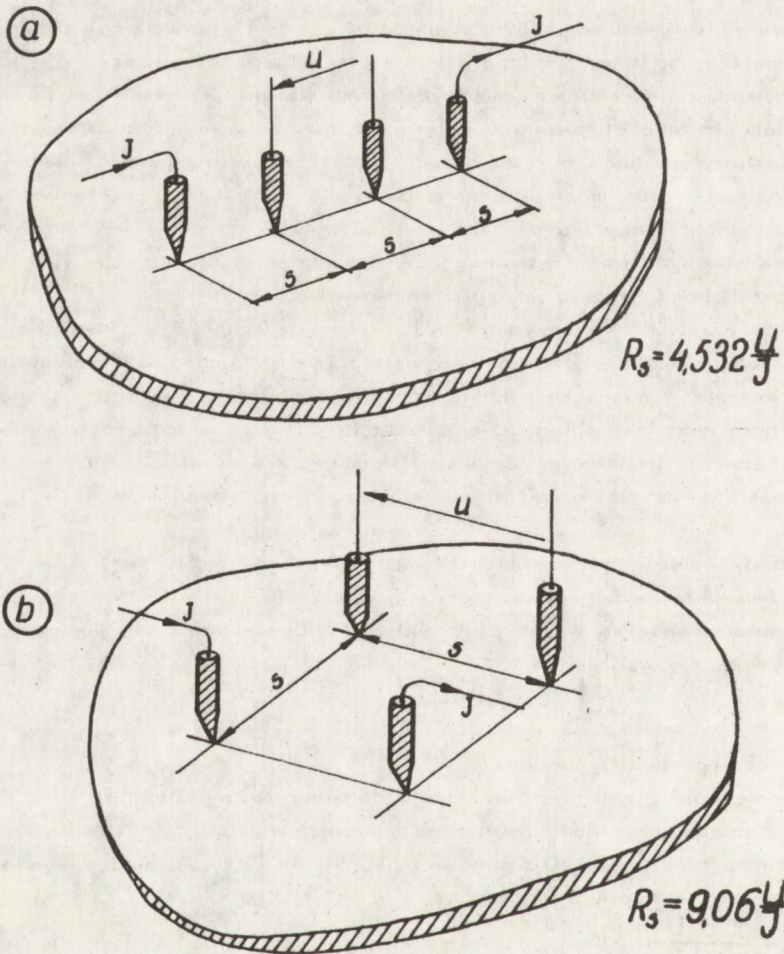
stąd $\frac{\rho}{d} = R_s = 4,532 \frac{U}{I}$

gdzie R_s - rezystancja powierzchniowa, d - grubość warstwy.

Pomiar warstwy o mniejszej powierzchni można wykonać w układzie sond rozstawionych w kwadrat (rysunek 49b).

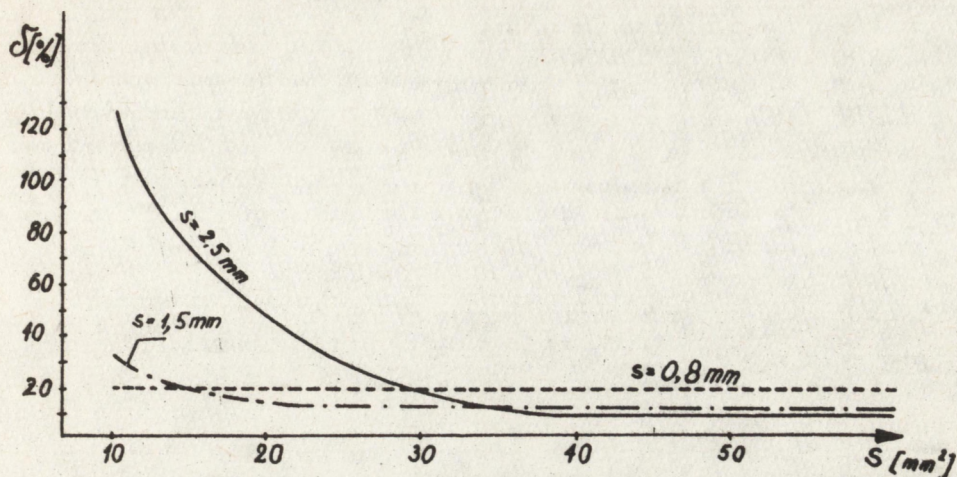
Dla takiego układu $R_s = 9,06 \frac{U}{I}$

We wzorach tych nie występuje wielkość s , ponieważ wyprowadzono je przy założeniu, że rozmiary obszaru mierzonego są dużo większe od rozstawu sond s . W praktyce nie zawsze jest to spełnione. Na rysunku 50 pokazano zależność błędów pomiaru wartości R_s od wielkości obszaru mierzonego.



Rys. 49. Zasada pomiaru rezystancji powierzchniowej sondą czteroostrzoną dla dwóch ustawień sondy

Zaletą tej metody jest wyeliminowanie wpływu obszaru kontaktów i krawędzi rezystora na wyniki pomiaru. Nie potrzebne jest również formowanie z badanej warstwy rezystora testowego. Mimo zalet sondy czteroostrzonej, w praktyce pomiar R_s najczęściej wykonuje się za pomocą rezystora testowego. Wynika to z faktu, że ten sposób pomiaru wiernie oddaje warunki pracy rezystora w układzie elektronicznym, a sama metoda jest bardzo prosta.



Rys. 50. Wpływ rozmiarów rezystora (w kształcie kwadratu) na wielkość błędu pomiaru rezystancji powierzchniowej metodą sondy czterostrzowej ustawionej w kwadrat. Jako wartość poprawną do której odniesiono wyniki pomiarów przyjęto rezystancję powierzchniową mierzoną przy pomocy rezystora testowego. Charakterystyki zostały zdjęte dla warstwy o rezystancji $70 \frac{\text{k}\Omega}{\square}$

5.2. Temperaturowy współczynnik rezystancji

Jest to parametr, który charakteryzuje zmiany rezystancji w funkcji temperatury. Jego pomiar wykonuje się na rezystorze testowym.

Współczynnik temperaturowy zdefiniowany jest następująco:

$$\text{TWR} = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \Delta T} \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

gdzie R_1 - rezystancja w temperaturze T_1

R_2 - rezystancja w temperaturze T_2

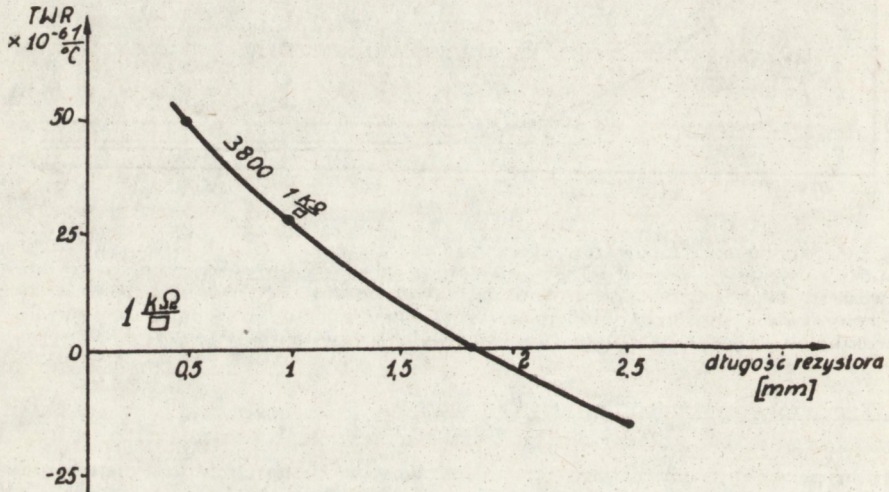
W praktyce mówi się o TWR "zimnym", gdy $T_2 < 0^\circ\text{C}$; $T_1 = T_{\text{pokojo wej}}$ i o TWR "gorącym", gdy $T_2 > 100^\circ\text{C}$, a $T_1 = T_{\text{pokojo wej}}$

Zmierzenie i obliczenie TWR na ogół nie nastęrcza większych trudności. Służy do tego komora zmiennych temperatur lub termostat odpowiednio oprzyrządowany i wyposażony w izolowane przepusty prądowe.

Na wartość TWR, oprócz właściwości badanej warstwy ma duży wpływ wiele czynników wymienionych poniżej, które należy uwzględniać przy planowaniu badania i interpretacji wyników.

1. Projekt rezystora testowego

Właściwie zaprojektowany test powinien zmniejszyć do minimum wpływ, jaki mają na TWR obszary kontaktów przewodzących i krawędzi bocznych rezystora. Wskazane jest, aby rezystor miał rozmiary nie mniejsze niż 4x2 mm, a jego współczynnik kształtu zawierał się w granicach 1 ÷ 2 kwadraty (rysunek 51).



Rys. 51. Zależność "gorącego" współczynnika temperaturowego rezystancji od długości rezystora dla pasty 3800 firmy ESL

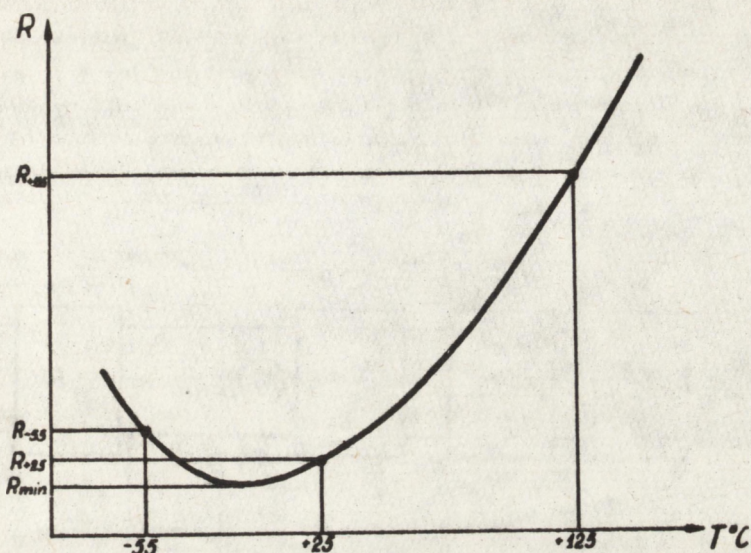
2. Wpływ materiału podłoża

Wpływ materiału zastosowanego podłoża wynika z dwóch powodów:

- reakcji fizykochemicznych zachodzących na granicy "warstwa-podłoże" mogących spowodować zmianę składu warstwy
- różnicy współczynników rozszerzalności termicznej podłoża i warstwy rezystywnej powodującej przy zmianie temperatury wystąpienie naprężeń w warstwie zmieniających jej rezystancję.

3. Nieliniowość charakterystyki temperaturowej

Obliczanie współczynnika temperaturowego z 3 punktów pomiarowych dla dość odległych od siebie temperatur może dać mniejsze wartości TWR od rzeczywistych zmian temperaturowych rezystancji. Ilustruje to rysunek 52. W przypadku takim celowe jest zdjęcie pełnej charakterystyki temperaturowej rezystancji.



Rys. 52. Przykład wyraźnej nieliniowej charakterystyki temperaturowej warstwy rezystywnej. Zaznaczono punkty pomiaru rezystancji do obliczenia TWR.

5.3. Nieliniowość rezystancji

Pod tym pojęciem należy rozumieć zależność rezystancji warstwy od przyłożonego napięcia. Ta nieliniowość charakterystyki prądowo-napięciowej rezystora testowego może być spowodowana właściwościami samej warstwy rezystywnej lub zjawiskami występującymi w obszarze nakładki warstwy rezystywnej i przewodzącej. Ilościową charakterystykę tych zjawisk dają dwa parametry:

- współczynnik nieliniowości (Indeks trzeciej harmonicznej);
- współczynnik napięciowy.

Pomiar współczynnika nieliniowości

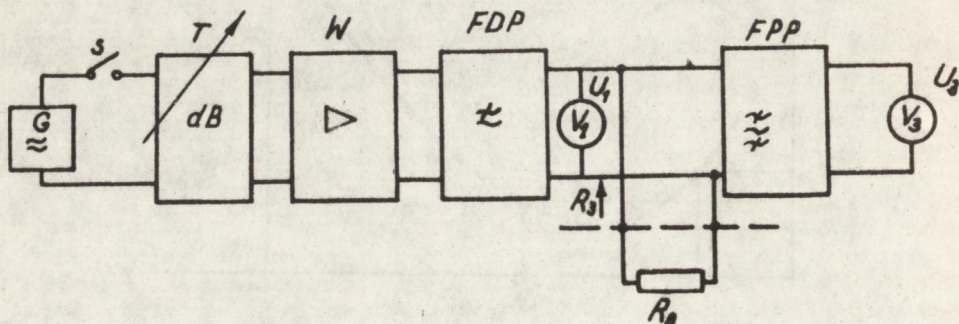
Do rezystora testowego przykładana się napięcie przemiennie o kształcie sinusoidalnym. Jeżeli impedancja rezystora nie jest całkowicie liniowa, to napięcie występujące między wyprowadzeniami rezystora jest zniekształcone i zawiera harmoniczne. Bádanie właściwości nieliniowych rezystora polega na pomiarze jednego lub kilku napięć harmonicznych.

Współczynnik nieliniowości definiuje się następująco:

$$K = 20 \log \frac{E_3}{U_1^n} \quad (\text{dB})$$

gdzie: E_3 - siła elektromotoryczna trzeciej harmonicznej generowanej w badanym rezystorze; U_1 - napięcie sygnału sinusoidalnego przyłożonego do rezystora; n - współczynnik o wartości $1,5 \div 3,5$ zależnie od rodzaju rezystora.

Metodę pomiaru tego współczynnika podaje norma PN-74/T-04601 arkusz 07. [47]. Na rysunku 53 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego.



Rys. 53. Schemat blokowy układu do pomiaru nieliniowości rezystorów metodą pomiaru napięcia trzeciej harmonicznej (wg PN-75/T-04601 arkusz 07)
 G - generator częstotliwości podstawowej; S - wyłącznik; T - tłumik nastawny; W - wzmacniacz mocy o małych zniekształceniach; FDP - filtr dolnoprzepustowy; V_1 - woltomierz napięcia składowej podstawowej U_1 ; FPP - filtr pasmowy dla trzeciej harmonicznej; V_3 - woltomierz napięcia trzeciej harmonicznej; R_B - rezystor badany; R_3 - rezystancja widziana od strony końcówek pomiarowych przy częstotliwości trzeciej harmonicznej

W praktyce do pomiaru współczynnika nieliniowości rezystorów najczęściej stosuje się produkowane seryjnie mierniki trzeciej harmonicznej.

Pomiar współczynnika napięciowego (NWR) [47; 20].

Współczynnik napięciowy zdefiniowany jest następująco:

$$K_n = \frac{100 (R_2 - R_1)}{0,9 U R_1} \quad [\%/V]$$

gdzie: U - wyższe napięcie przyłożone do rezystora (na ogół równe napięciu znamionowemu); R_2 - rezystancja przy napięciu U ; R_1 - rezystancja przy napięciu $0,1 U$.

Pomiar rezystancji należy wykonać przy dwóch kolejno przyłożonych do rezystora napięciach równych 10% i 100% napięcia znamionowego. Czas trwania pomiaru nie powinien przekraczać 0,5 s; natomiast przerwa między kolejnymi pomiarami powinna wynosić około 5 s. W czasie pomiaru nie powinien występować dostrzegalny wzrost temperatury. Podczas pomiaru rezystorów dużej

mocy może wystąpić pewne nagrzanie rezystora. W takim przypadku wskazane jest na czas pomiaru położyć płytkę na radiatorze.

Wyznaczanie napięcia znamionowego dla rezystora testowego zilustrowano poniższym przykładem.

Rezystor testowy o wymiarach $l=4$ mm, $a=2$ mm i rezystancji 2000Ω wykonany z warstwy rezystywnej o dopuszczalnej gęstości mocy rozproszonej w warstwie $p_r=10$ W/dm² (patrz punkt 5,5).

$$U_{zn} = \sqrt{P_{zn} R}$$

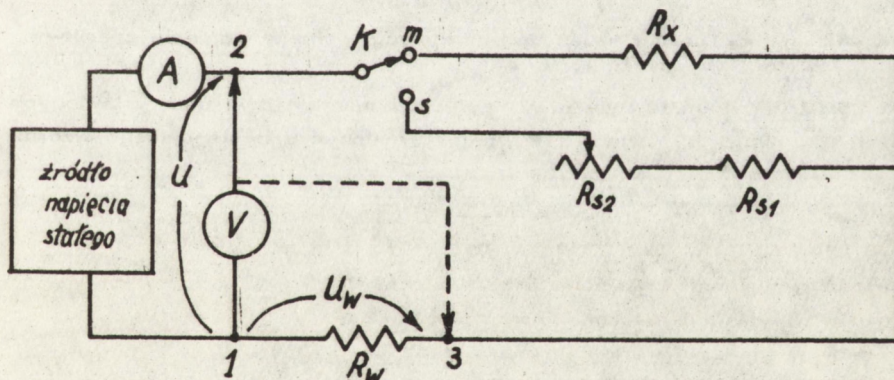
gdzie: P_{zn} - moc znamionowa; R - wartość rezystancji; p_r - dopuszczalna gęstość mocy w warstwie.

$$P_{zn} = p_r \cdot S_r = 10 \text{ W/cm}^2 \cdot 0,08 \text{ cm}^2 = 0,8 \text{ W}$$

S_r - powierzchnia rezystora

$$U_{zn} = \sqrt{0,8 \text{ W} \cdot 2000 \Omega} = 40 \text{ V}$$

Sam pomiar rezystancji należy wykonać metodą techniczną. Na rysunku 54 pokazano prosty układ proponowany do tego rodzaju pomiarów w normie amerykańskiej MIL STD 202 C [20] i stosowany do badania warstw rezystywnych w firmie Du Pont. Metoda ta może być stosowana do rezystorów o rezystancji większej od $1 \text{ k}\Omega$.



Rys. 54. Schemat ideowy układu do pomiaru współczynnika napięciowego wg normy amerykańskiej MIL-STD 202C. A - amperomierz; V - woltomierz; K - szybki przełącznik; R_x - rezystor testowy; R_{S1} - rezystor stabilizujący; R_{S2} - rezystor nastawny; R_c - rezystor wzorcowy

Rezystory R_{S1} i R_{S2} oraz przełącznik K w układzie na rysunku 54 służą do skrócenia czasu przepływu prądu pomiarowego przez mierzony rezystor R_x .

Pomiar R_x należy wykonać dwukrotnie dla napięcia $0,1 U_{zn}$ i pełnego napięcia znamionowego na rezystorze R_x . Procedura pomiaru jest następująca:

1. Przełącznik K ustawić w położenie "m" i wyregulować prąd (odczyt A) tak, aby na rezystorze R_x odkładało się napięcie $0,1 U_{zn}$.
 2. Przełącznik K ustawić w położenie "S" i tak dobrać wartość R_{s2} żeby w obwodzie płynął prąd taki sam jak w poprzednim położeniu przełącznika.
 3. Przełącznik K ustawić w pozycji "m" i w czasie krótszym niż $0,5$ s odczytać wartość napięcia U , następnie przełącznik K ponownie ustawić w położenie "s".
 4. Voltomierz odłączyć od zacisku 2 i podłączyć do zacisku 3.
 5. Przełącznik K ustawić w pozycji "m" i odczytać wartość napięcia U_w .
- Pomiar napięć U i U_w należy przeprowadzać bardzo szybko, aby prąd pomiarowy nie spowodował nagrzania się rezystorów R_x i R_w , co miałoby wpływ na dokładność wyznaczenia NWR.

Jeżeli rezystancja wejściowa voltomierza użytego do pomiaru jest większa niż $50 M\Omega$ to można zaniedbać jego wpływ na wynik pomiaru i rezystancję R_x obliczyć ze wzoru:

$$R_x = R_w \left(\frac{U}{U_w} - 1 \right)$$

W ten sam sposób pomiar należy powtórzyć dla pełnego napięcia znamionowego.

Jeżeli pomiary wykonane były przy napięciach niezbyt dokładnie ustawionych na poziomie U_{zn} i $0,1 U_{zn}$ wtedy NWR należy obliczyć z następującego wzoru:

$$K_n = \frac{(R_2 - R_1) \cdot 100}{R_1 (U_2 - U_1)} \quad [\%V]$$

R_2 - wartość rezystancji zmierzona przy napięciu U_2

R_1 - wartość rezystancji zmierzona przy napięciu U_1

U_2 - napięcie o większej wartości (zbliżone do U_{zn})

U_1 - napięcie o mniejszej wartości (zbliżone do $0,1 U_{zn}$).

Przy porównywaniu współczynników nieliniowości różnych rezystorów należy zwrócić uwagę, aby ich wymiary były zbliżone do siebie, ponieważ istnieje wyraźna zależność współczynnika napięciowego od długości rezystora.

5.4. Współczynnik szumów

Szumami rezystora nazywane są małe fluktuacje napięcia, prądu lub rezystancji, po przyłożeniu do niego napięcia stałego. [14 ; 21].

Na wielkość szumów składają się fluktuacje różnego pochodzenia, z których zasadnicze znaczenie mają:

- szумы termiczne;
- szумы prądowe.

Szумы termiczne zależą głównie od właściwości materiału i temperatury rezystora.

Wartość skuteczną napięcia szumów termicznych wyznacza się z podanej niżej zależności:

$$U_T^2 = 4R k T df$$

gdzie R - wartość rezystancji; k - stała Boltzmanna; T - Temperatura rezystora; df - pasmo częstotliwości.

W rezystorach grubowarstwowych największe znaczenie mają szумы prądowe. Wartość ich zależy od struktury warstwy, wielkości ziaren, typu kontaktów między nimi, rezystancji przejścia pomiędzy warstwą przewodzącą i rezystywną.

Wartość skuteczną napięcia szumów prądowych wyznacza się z zależności:

$$U_f^2 = \frac{c I_o R^2}{f}$$

gdzie U_f - wartość skuteczną napięcia szumów prądowych, I_o - składowa stała prądu przepływającego przez rezystor, f - częstotliwość pomiaru, R - wartość rezystancji, c - stała zależna od materiału i procesu wytwarzania rezystora.

Na podstawie powyższej zależności zdefiniowano współczynnik szumów prądowych. Zasada jego pomiaru polega na porównaniu szumu rezystora mierzony z szumem wzorcowym.

Współczynnik szumów wyrażony w dB określa się jako stosunek wartości skutecznej napięcia szumów prądowych w dekadzie częstotliwości wyrażonego w mikrowoltach do przyłożonego napięcia stałego w woltach:

$$F_R = 20 \log \frac{U_f}{U_o} \left[\frac{\text{dB}}{\text{dekadę } f} \right] = \frac{m}{\sqrt{f}}$$

Wielkość współczynnika szumów zależy od stałej "m". Na wartość tej stałej ma wpływ materiał, z jakiego wykonano warstwę rezystywną, przebieg procesu technologicznego i rozmiary rezystora.

Zależność stałej "m" od właściwości materiału i geometrii rezystora jest następująca:

$$m = \frac{B}{l w t}$$

gdzie B - stała zależna od właściwości materiału; l - długość rezystora; w - szerokość rezystora; t - grubość rezystora.

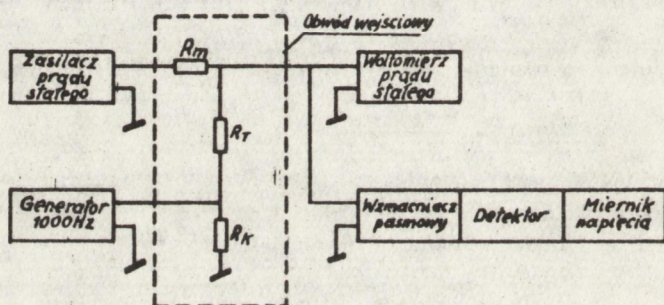
Z zależności tej wynika, że w przypadku rezystorów warstwowych o określonej grubości na wartość współczynnika szumów ma wpływ tylko wielkość powierzchni rezystora.

Współczynnik kształtu rezystora (liczba kwadratów) nie ma wpływu na wielkość szumów.

Na rysunku 56 pokazano zależność współczynnika szumów prądowych od powierzchni rezystora dla pasty 8021 firmy Du Pont.

Metoda wyznaczania współczynnika szumów prądowych opisana została w normie PN-74/T-04601 arkusz 09. [47]. Rysunek 55 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego.

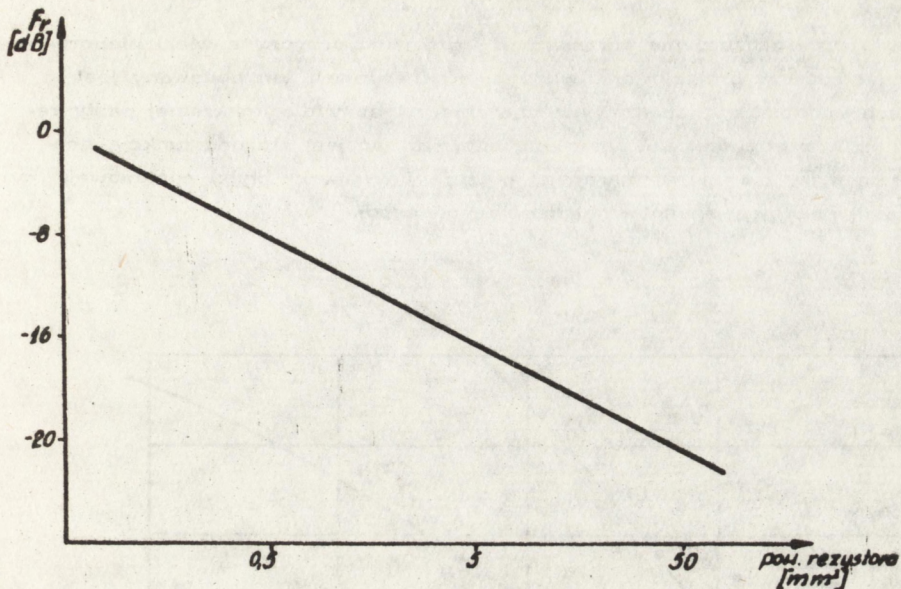
Bardzo często pomiary takie wykonuje się za pomocą produkowanych seryjnie mierników, np. firmy Quan-Tech USA Model 315.



Rys. 55. Schemat blokowy układu do pomiaru szumów prądowych rezystorów (wg PN-74/T-04601 arkusz 09) R_m - rezystor oddzielający; R_T - rezystor badany; R_K - rezystor kalibratora

5.5. Obciążalność

Parametr ten określa maksymalną gęstość mocy, jaka może być rozproszona w warstwie rezystywnej bez pogorszenia jej właściwości. Są dwa zasadnicze czynniki, które wpływają destrukcyjnie na warstwę rezystywną. Jest to połączone działanie płynącego prądu elektrycznego (polaryzacja elektryczna warstwy) i wydzielonego ciepła w wyniku przepływu prądu. Temperatura warstwy jest funkcją rozproszonej mocy, i warunków odprowadzania ciepła z warstwy. Wykorzystanie w praktyce dopuszczalnej temperatury warstwy do projektowania rezystorów jest bardzo kłopotliwe, ponieważ wymaga od użytkownika wykonania każdorazowo analizy termicznej podzespołu, szeregu prób na rezystorach testowych i pomiaru temperatury warstwy. Jest to zadanie bardzo trudne, wymagające kosztownej aparatury pomiarowej (analiza w podczerwieni), a w niektórych



Rys. 56. Zależność współczynnika szumów od powierzchni rezystora dla pasty 8021 firmy Du Pont

konstrukcjach podzespołów w praktyce niewykonalne. Dlatego też producenci past dla scharakteryzowania obciążalności wartości rezystywnych przeważnie podają w katalogach parametr p_r definiowany jako dopuszczalna gęstość mocy rozpraszanej w warstwie rezystywnej:

$$p_r = \frac{P}{s_r}$$

gdzie: p_r - gęstość mocy w warstwie

P - moc rozproszona w warstwie

s_r - powierzchnia warstwy rezystywnej

Parametr ten uzupełnia się podając dodatkowo warunek nieprzekroczenia gęstości mocy na powierzchni całej płytki podłożowej:

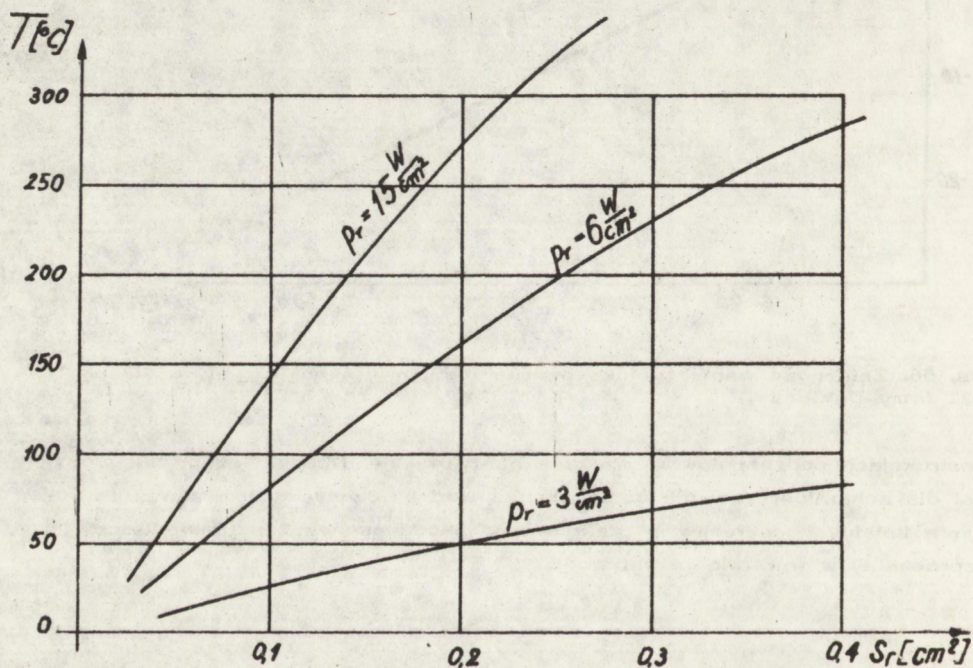
$$p_p = \frac{P}{s_p}$$

gdzie: p_p - gęstość mocy na płytce podłożowej

P - całkowita moc wydzielona na płytce

s_p - powierzchnia płytki

Niewłaściwe zrozumienie parametru p_r może być przyczyną wielu nieporozumień i błędów w projektowaniu podzespołów. Parametr ten podawany jest najczęściej jako stały współczynnik charakterystyczny dla konkretnej pasty rezystywnej. W rzeczywistości natomiast jego wartość jest złożoną funkcją geometrii rezystora, rodzaju stosowanego podłoża i wymiarów płytki podłożowej, konstrukcji obudowy, sposobu chłodzenia podzespołu itp.

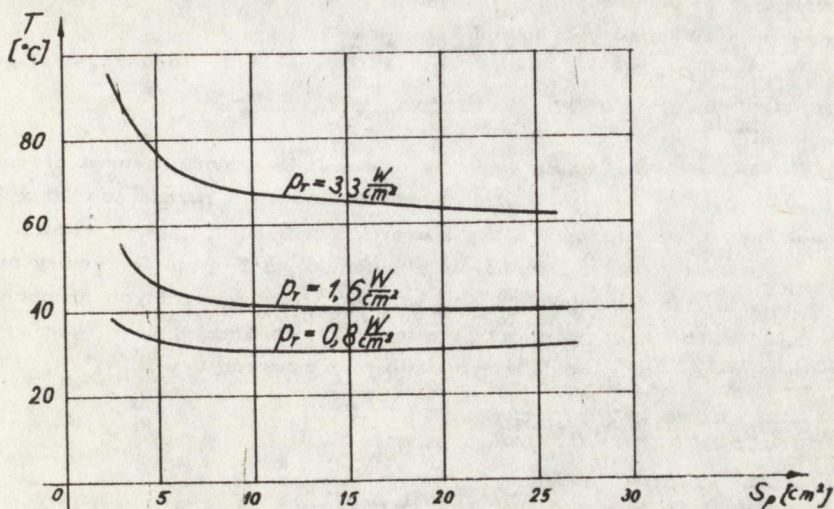


Rys. 57. Zależność temperatury warstwy rezystywnej od powierzchni rezystora przy zachowaniu stałej gęstości mocy wydzielonej w warstwie rezystywnej. Charakterystyki zdjęte dla płytki podłożowej o pow. 1 cm^2

Na rysunkach 57 i 58 pokazano zależność temperatury warstwy rezystywnej od gęstości mocy w niej wydzielonej dla:

1. Różnych powierzchni rezystora przy jednakowej powierzchni płytki, rys.57.
2. Różnych powierzchni płytki podłożowej przy jednakowej powierzchni rezystora, rysunek 58.

Z rysunków tych wynika, że przy zachowaniu tej samej gęstości mocy, temperatura na powierzchni rezystorów o różnych rozmiarach może różnić się ponad 100°C . Dlatego też dla uniknięcia tak poważnych błędów w projektowaniu rezystorów parametr p_r należy traktować jako wstępną, mało precyzyjną charakterys-



Rys. 58. Zależność temperatury warstwy od powierzchni płytki podłożowej przy zachowaniu stałej gęstości mocy wydzielonej w warstwie rezystywnej. Charakterystyki zdjęte dla rezystora o pow. $0,3 \text{ cm}^2$ umieszczonego na środku płytki podłożowej

tykę obciążalności warstwy. Można nim posługiwać się przy projektowaniu mikroukładów i podzespołów małej mocy przeznaczonych do sprzętu powszechnego użytku. Natomiast nie należy posługiwać się katalogowymi parametrami p_r i p_p przy projektowaniu układów precyzyjnych lub dużej mocy. W takim przypadku konieczne jest wykonanie analizy termicznej układów i wyznaczenie właściwych parametrów p_p i p_r dla konkretnych konstrukcji mikroukładu lub podzespołu.

Wyznaczanie parametru p_r

Badanie należy wykonać na rezystorach testowych wykonanych z badanej pasty. Wskazane jest, aby rezystory testowe miały kształt jednego lub dwóch kwadratów i umieszczone były na środku płytki. Powierzchnia rezystora powinna być dużo mniejsza od powierzchni płytki.

Badaną partię rezystorów należy podzielić na kilka grup i umieścić w komorze temperaturowej nastawionej na temperaturę 70°C . Dla poszczególnych grup rezystorów należy dobrać różne wartości obciążenia jednostkowego p_r . Najwyższe z przyjętych wartości obciążenia powinny być dobrane tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnej gęstości mocy na płytce p_p , którą dla podłoży alundowych niezabezpieczonych i chłodzonych swobodnie przyjmuje się na ogół

0,25 W/cm². W czasie badania, które nie powinno być krótsze niż 1000 h wyznacza się stabilność rezystancji.

Poniżej na przykładzie pokazano sposób wyznaczenia dopuszczalnej gęstości mocy wydzielonej w warstwie rezystywnej.

Przykład:

Badano pastę o rezystancji warstwy 1000 $\frac{\Omega}{\square}$. Rezystory testowe przygotowano w następujący sposób: na środku płytki alundowej o rozmiarach 20 x 30 mm wykonano rezystor o długości 3 mm i szerokości 2 mm (1,5 kwadratów).

Wykonaną partię takich rezystorów podzielono na 5 grup. Rezystory obciążono napięciem stałym dobierając jego wartość w poszczególnych grupach tak, aby uzyskać następujące wartości parametru p_r: 20; 15; 10; 6; 4 W/cm².

Odpowiednie napięcia obciążające obliczono ze wzoru:

$$U = \sqrt{p_r S_r R_r} \quad R_r = \frac{R}{\square} n$$

gdzie:

p_r - gęstość mocy w warstwie rezystywnej

S_r - powierzchnia rezystora (w przykładzie S_r = 6 mm²)

R_r - wartość rezystancji (w przykładzie 1500 Ω)

n - liczba kwadratów rezystora testowego (w przykładzie n = 1,5)

p _r	W/cm ²	20	15	10	6	4
U	V	42,4	36,7	30	23,1	19

Należy jeszcze sprawdzić, czy dla płytek najbardziej obciążonych nie występuje przekroczenie parametru p_p.

$$P = p_r S_r = 20 \cdot 0,06 = 1,2 \text{ W}$$

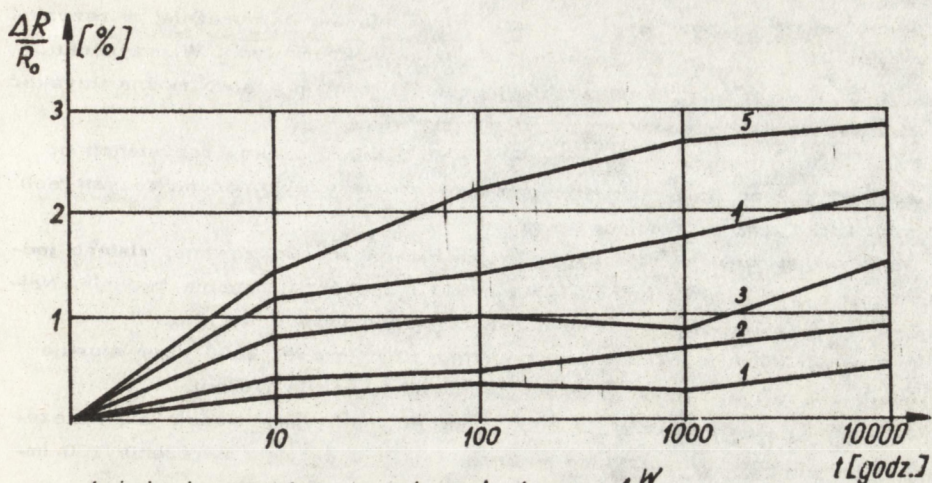
P - moc wydzielona w rezystorze testowym

$$p_p = \frac{P}{S_p} = \frac{1,2 \text{ W}}{6} = 0,2 \text{ W/cm}^2$$

S_p - powierzchnia płytki podłożowej

$$p_p < p_{p \text{ max}} = 0,25 \text{ W/cm}^2$$

Na rysunku 59 pokazano w jaki sposób korzystając z wykresu stabilności można wyznaczyć dopuszczalną gęstość mocy rozproszonej w warstwie p_r.



- obciążenie warstwy rezystywnej:
1. $p_r = 4 \frac{W}{cm^2}$
 2. $p_r = 6 \frac{W}{cm^2}$
 3. $p_r = 10 \frac{W}{cm^2}$
 4. $p_r = 15 \frac{W}{cm^2}$
 5. $p_r = 20 \frac{W}{cm^2}$

Rys. 59. Sposób wykorzystania charakterystyki stabilności czasowej rezystancji warstwy do wyznaczenia dopuszczalnej gęstości mocy. Jeżeli od warstwy wymaga się stabilności rezystancji 1% na 10000 godz. pracy, to dopuszczalna gęstość mocy wynosi 6 W/cm^2 . Jeżeli od tej samej warstwy wymaga się stabilności 3% na 10000 godz. pracy, to dopuszczalna gęstość mocy wynosi 20 W/cm^2 .

5.6. Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego

Pole elektryczne, którego działaniu poddany jest rezystor, wynika z napięcia, jakie przyłożone jest do jego końcówek. Jest ono skierowane stycznie do warstwy i określone zależnością:

$$E = \frac{U}{l} \left[\frac{V}{mm} \right]$$

E - natężenie pola elektrycznego

U - napięcie przyłożone do rezystora

l - długość rezystora

Parametr ten określany jest najczęściej dla past przeznaczonych do pracy w układach wysokonapięciowych i rezystorach precyzyjnych. [20].

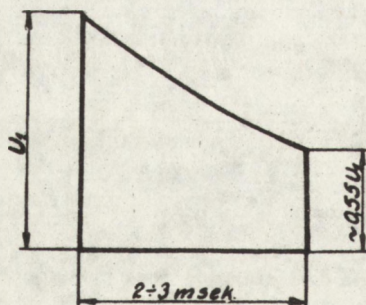
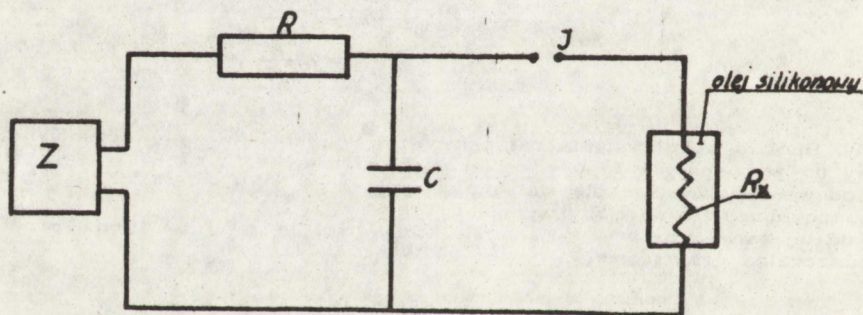
Wpływ natężenia pola elektrycznego uwidacznia się najwyraźniej w rezystorach krótkich (do 1 mm) wykonanych z past wysokoomowych. W przypadku takim, nie przekraczając dopuszczalnej gęstości mocy p_r , łatwo można uzyskać wysokie natężenie pola elektrycznego w warstwie.

Badanie tego parametru sprowadza się do pomiaru zmiany rezystancji po przyłożeniu stałego pola elektrycznego. Próbę należy wykonać na rezystorach krótkich (do 1 mm) o małej powierzchni.

Ponieważ stosowane metody pomiarowe nie są znormalizowane, dlatego jednocześnie z wynikami należy podać warunki i sposób wykonania badania. Najczęściej podaje się dwa sposoby narażania napięciowego warstw.

1. Dla pól elektrycznych o natężeniu od 100 V/mm do 1000 V/mm stosuje się czasy narażenia odpowiednio od 200 h do kilku minut.
2. Dla pól elektrycznych od 1000 V/mm do 3000 V/mm stosuje się narażenia impulsowe. Na przykład w firmie Du Pont przyjęto narażenie 100 impulsów o częstotliwości 10 impulsów/minutę.

Na rysunku 60 pokazano zasadę pracy układu generującego impulsy napięciowe, stosowanego w firmie Du Pont do badania warstw rezystywnych.



Rys. 60. Zasada pracy układu generującego impulsy napięciowe i kształt impulsu. Z-zasilacz prądu stałego, R-rezystor ograniczający prąd ładowania kondensatora C, J-iskiernik, C-kondensator różładowywany przez rezystor badany, R_x -rezystor badany zanurzony w oleju chłodzącym

LITERATURA

1. Szymański D., Szczytko B.: "Opracowanie metod badań aplikacyjnych past przewodzących", Sprawozdanie z pracy naukowo badawczej. Praca nr 25/80515/76 etapy OW i OT. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
2. Szczytko B., Szymański D.: "Opracowanie metod badań aplikacyjnych past rezystywnych" Sprawozdanie z pracy naukowo badawczej. Praca nr 25/80638/78 etapy OW i OT. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
3. Bistek T., Sękowski S.: "Metody badań powłok metalowych". WNT Warszawa 1973
4. Dryński T.: "Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki". PWN Warszawa 1978
5. Fortuna E., Jabłoński J.: "Przegląd czynników wpływających na jakość połączeń drutowych w układach scalonych oraz metody testowania tych połączeń". Informacje, Studia, Przyczyunki. PIE Warszawa 1976
6. Hamer D.W., Biggers J.V.: "Technologia układów scalonych grubowarstwowych" WNT Warszawa 1976
7. Harper Ch.A.: "Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics" Mc Graw Hill Company 1974
8. Kembłowski Z.: "Reometria płynów nielawnowiskalnych". WNT Warszawa 1973
9. Kossakowski J.: "Oporniki i kondensatory radiowe". MON Warszawa 1979
10. Kowtioniuk i inni: "Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych" PWN Warszawa 1973
11. Maissel L.J., Glang R.: "Handbook of Thin Film Technology" Mc Graw Hill Book Company 1970
12. Mikroelektroniczna Technika Grubowarstwowa I Sympozjum Rzeszów 1973
13. Mikroelektroniczna Technika Grubowarstwowa II Sympozjum Rzeszów 1977
14. Motchenbacher C.D., Fitchen F.C.: "Projektowanie elementów i układów elektronicznych niskoszumnych" WNT Warszawa 1977
15. Nowak S. i inni: "Układy mikroelektroniczne grubowarstwowe" WNT Warszawa 1977
16. Praca zbiorowa "Poradnik Inżyniera Elektronika" WNT Warszawa 1971
17. Praca zbiorowa "Technika warstwowa w mikroelektronice" WNT Warszawa 1973
18. Radomski T., Ciszewski A.: "Lutowanie" WNT Warszawa 1979
19. Siciński Z.: "Badanie materiałów elektroizolacyjnych" WNT Warszawa 1968
20. "The Thick Film Microcircuitry" Handbook Du Pont Electronic Products.
21. Anjard R.P.: "Leaching During Solder Immersion Thick Film Conductors" Proceeding of the Technical Programme Internepcon 1970

22. Anjard R.P.: "Thick Film Conductor Adhesion Testing". Microelectronics and Reliability 1971, Vol 10 269-275
23. Biggers J.V.: "Thick Film Glass-Ceramic Capacitors". Solid State Technology maj 1971, 63-66
24. Holmes P.J.: "The Load Life Characteristics of Thick Film Resistors". Microelectronics and Reliability 1973 Vol 12 61
25. Jacobson L.: "Testing for Adhesion of Hybrid Films" Proceedings Electronic Components Conference 1971, 474-479
26. Kuo C.Y., Blank H.G.: "Effects of Resistor Geometry on Current Noise in Thick Film Resistors". Proceedings of I.S.H.M. Symposiums 1968, 153-160
27. Kuo C.Y.: "The Contact Resistance in Thick Film Resistors". Proceedings of I.S.H.M. 1969, 263-269
28. Lougharm J.A., Sigbee R.A.: "Termination Anomalies in Thick Film Resistors" Proceedings of I.S.H.M. 1969, 271-280
29. Olivei A.: "On The Sensitivity to High Voltages of Thick Film Resistors", Proceedings 23 I.E.E.E. Electronic Components Conference 1973, 140-152
30. Rimer D.E.: "Effect of Geometry on the Characteristics of Thick Film Resistors". Proceedings Electronic Components Conference 1970, 102-108
31. Pitt K.E.G., Jansom C.J.: "Thermographic Studies of Power Dissipation in Thick Film Resistors". Proceedings of the Technical and International Microelectronics 1974 s.65-78
32. Robertson J.: "Conduction Processes in High Value Thick Film Resistors" Electrocomponent Science and Technology 1977 Vol 4 s.105-109
33. Stein S.J., Huang C.: "A High Voltage, High Performance Thick Film Resistor System". Electrocomponent Science and Technology 1977, Vol 4 s.95-105
34. PN-63/C-01700 Wyroby lakierowe. Nazwy i określenia
35. PN-72/C-04809 Środki powierzchniowo czynne. Oznaczanie napięcia powierzchniowego i napięcia międzyfazowego
36. PN-75/C-81508 Wyroby lakierowe. Oznaczanie czasu wypywu kubkami wypywowymi
37. PN-76/C-81516 Wyroby lakierowe. Oznaczanie ścieralności powłok lakierowych
38. PN-67/C-81543 Wyroby lakierowe. Oznaczanie stopnia osadzenia się pigmentów i wpełniaczy
39. PN-73/C-81547 Wyroby lakierowe. Wyznaczanie współczynnika tiksotropii

40. PN-72/E-04400 Materiały elektroizolacyjne state. Przygotowanie i badanie próbek. Znormalizowane warunki otoczenia
41. PN-69/E-04403 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych
42. PN-63/E-04404 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar wytrzymałości dielektrycznej i próby napięciowe
43. PN-71/E-04405 Materiały elektroizolacyjne state. Pomiar elektrycznej oporności
44. PN-73/E-04550 Wyroby elektrotechniczne. Próby środowiskowe
45. PN-76/E-06307 Elektroizolacyjne materiały ceramiczne. Metody badań
46. PN-73/M-04251 Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni
47. PN-74/T-04601 Elementy urządzeń elektronicznych. Rezystory state. Metody prób i pomiarów
48. PN-75/T-04602 Elementy urządzeń elektronicznych. Kondensatory state. Metody prób i pomiarów
49. BN-72/6110-09 - Wyroby lakierowe. Oznaczanie stopnia rozłarcia pigmentów i wypelniaczy przy użyciu grindometru
50. BN-64/6110-11 Wyroby lakierowe. Oznaczanie gęstości
51. BN-66/6110-16 Wyroby lakierowe. Badanie ścieralności powłok lakierowych aparatem Tabera
52. ZN-78MPM-14/ONPMP/E-011 Pasty dla elektroniki. Nazwy i określenia
53. PN-79/H-04361 Pomiar twardości metali sposobem Vickersa przy obciążeniu poniżej 9,8 N
54. Thorbiomsen A.R., Dworack M., Riad A.: "Correlation Between Thick-Film Resistance Values" IEEE Transaction on Parts, Hydrids and Packaging Vol. PHP 13, No 2 June

SPIS TREŚCI

Część I

1. Wstęp	5
2. Parametry charakteryzujące właściwości past	5
2.1. Wygląd zewnętrzny	5
2.2. Skład	6
2.3. Lepkość	7
2.4. Gęstość	11
2.5. Wielkość aglomeratów	13
2.6. Napięcie powierzchniowe	14
2.7. Sedymentacja	15
3. Parametry fizyczno-mechaniczne warstw	17
3.1. Wygląd zewnętrzny	17
3.2. Grubość	18
3.3. Adhezja	20
3.4. Rozdzielczość	29
3.5. Chropowatość powierzchni	30
3.6. Twardość	32
3.7. Ścieralność	32
4. Parametry charakterystyczne warstw przewodzących	34
4.1. Rezystancja	34
4.2. Lutowność	35
4.3. Odporność na ługowanie lutowiem	38
4.4. Migracja jonów metalicznych	38
4.5. Podatność do montażu mikroelektronicznego	39
4.6. Podatność do montażu struktur półprzewodnikowych	42
5. Parametry charakterystyczne warstw rezystywnych	43
5.1. Rezystancja	44
5.2. Temperaturowy współczynnik rezystancji	49
5.3. Nieliniowość rezystancji	51
5.4. Współczynnik szumów	54
5.5. Obciążalność	56
5.6. Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego	61
Literatura	63

Część II

6. Parametry warstw dielektrycznych	3
6.1. Przenikalność elektryczna i współczynnik stratności	4
6.2. Wytrzymałość dielektryczna	8
6.3. Rezystancja	8
6.4. Temperaturowy współczynnik przenikalności elektrycznej	10
6.5. Przenikalność dla wilgoci	12
7. Zgodność technologiczna past i warstw	13
8. Narażenia stosowane w badaniach warstw	18
8.1. Narażenia temperaturowe	18
8.2. Narażenia temperaturo-prądowe	19
8.3. Narażenia temperaturowe z uwzględnieniem wilgoci	20
8.4. Narażenia technologiczne	20
9. Projektowanie i wykonanie testów	21
9.1. Zasady projektowania testów	23
9.2. Podłoża	29
9.3. Przygotowanie pasty do nakładania	30
9.4. Nakładanie warstwy	31
9.5. Obróbka termiczna	37
9.6. Montaż	39
Literatura	40

