

1 1975

P. 2.229 / 75

prace

**Instytutu  
Maszyn  
Matematycznych**

rok XVII





P. 2229/75

prace

Instytutu  
Maszyn  
Matematycznych

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.

Zjednoczenie Przemysłu Automatyki i Aparatury Pomiarowej "MERA"  
Instytut Maszyn Matematycznych

Copyright © 1975 - by Instytut Maszyn Matematycznych  
Poland

Wszelkie prawa zastrzeżone

**Komitet Redakcyjny**

**Bartłomiej GŁOWACKI, Andrzej KOJEMSKI, Roman KULESZA (red. naczelny),**

**Włodzimierz MARDAL (z-ca red. naczelnego), Jan RELUGA**

**Sekretarz Redakcji: Romana NITKOWSKA**

**Redaktor Techniczny: Maria KOZŁOWSKA**

**Adres Redakcji: Instytut Maszyn Matematycznych**

**Branżowy Ośrodek INTE**

**Warszawa, ul. Krzywickiego 34**

**tel. 21-84-41 w. 431**

**Druk IMM z. 55/75 n. 400 pap. piśm. kl. III g. 70 GP-II-1435/68**

Instytut Maszyn Matematycznych  
ul. Piłsudskiego 5  
00-463 Warszawa

Od redakcji

Przedstawiony Czytelnikom artykuł mgr inż. M. Miki oparty jest na kilkuletnich badaniach przeprowadzonych w Instytucie Maszyn Matematycznych w zakresie połączeń lutowanych. Poruszona w artykule tematyka nie jest zgodna z obecnym profilem prac prowadzonych w IMM. Biorąc jednak pod uwagę duże znaczenie problematyki połączeń lutowanych dla naszego przemysłu oraz fakt, że jest to pierwsza krajowa praca badawcza na temat technologii lutowania połączeń elektrycznych gorącym gazem, uważamy za celowe zaznajomienie z nią naszych Czytelników.

*[The following text is extremely faint and largely illegible, appearing to be bleed-through from the reverse side of the page.]*



ANALIZA PARAMETRÓW I OCENA  
JAKOŚCI POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH  
STRUMIENIEM GORĄCEGO GAZU

Mirosław MIKA

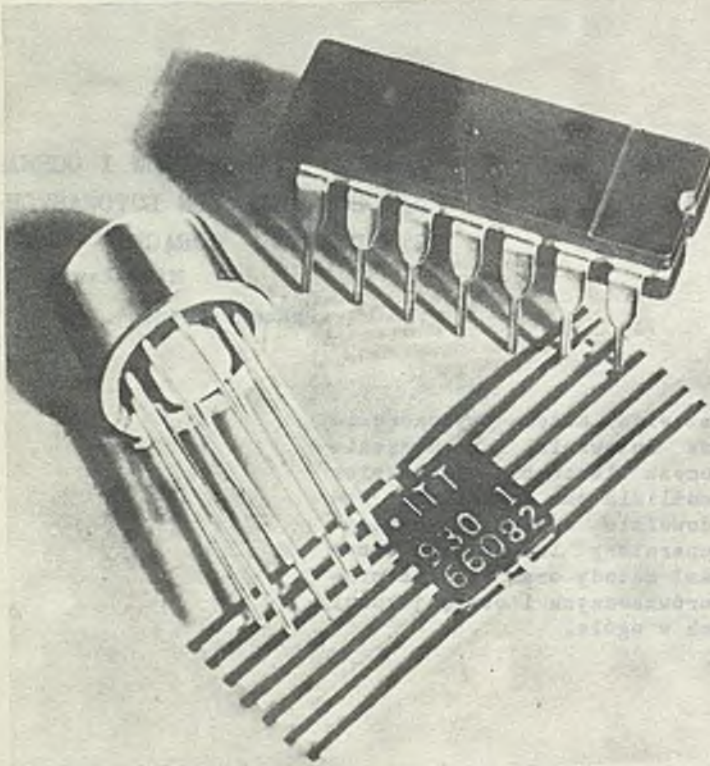
Pracę złożono 4.04.1973

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania parametrów procesu lutowania w powiązaniu z parametrami procesu lutowania strumieniem gorącego gazu. Umożliwia ona określenie zależności między dowolnie wybranymi wartościami czasu i temperatury lutowania a odpowiednimi parametrami metody oraz ułatwia prowadzenie badań porównawczych i ocenę jakości połączeń lutowanych w ogóle.

## WSTĘP

Stała dążność konstruktorów do miniaturyzacji urządzeń elektronicznych o dużej szybkości działania, przy jednoczesnym zwiększeniu ich niezawodności, spowodowała dynamiczny rozwój metod łączenia zapewniających dużą gęstość upakowania elementów.

Jednocześnie elementy elektroniczne poza integracją, która była oczywistą cełą miniaturyzacji, zmieniły swoją postać zewnętrzną eliminując praktycznie metody montażu ręcznego. Wśród kilku najczęściej spotykanych rodzajów obudowy na uwagę zasługuje płaska obudowa z wyprowadzeniami równoległymi do podstawy, zwana obudową typu krab (rys. 1), której kształt został wybrany z myślą o ułożeniu mikroukładu na powierzchni płytki drukowanej. Przyjmując ten typ obudowy jako najbardziej charakterystyczny dla współczesnych elementów elektronicznych zdecydowano się na jej wybór.



Rys. 1. Mikroukład w obudowie typu krab z oznaczeniami literowo-cyfrowymi widziany wraz z innymi mikroukładami stosowanymi w elektronice

Wysokie koszty elementów elektronicznych o dużej niezawodności montowanych na drogich, a po sprawdzeniu również niezawodnych, płytkach drukowanych przesuwają punkt ciężkości na problemy prawidłowego ich łączenia.

Informacje w literaturze z ostatnich lat świadczą o intensywnym rozwoju różnych metod lutowania i zgrzewania zapewniających dużą gęstość upakowania elementów elektronicznych. Znaną są techniki lutowania przy zastosowaniu urządzeń wytwarzających energię cieplną na drodze przepływu prądu elektrycznego (lutowanie oporowe), pod wpływem działania strumienia gorącego gazu, względnie wiązki promieni podczerwonych. W dalszym ciągu aktualną jest metoda lutowania ręcznego, szczególnie za pomocą



specjalnych narzędzi z automatyczną stabilizacją temperatury pracy. Ponadto coraz częściej stosuje się metody łączenia strumieniem elektronowym i laserowym. Jednakże urządzenia stosowane w wielu podanych metodach łączenia są jeszcze bardzo drogie i trudno dostępne. W odniesieniu do mikroukładów typu krab uważa się, że wszystkie wymienione metody lutowania mogą być stosowane. Najczęściej wspomina się o lutowaniu oporowym w następnej kolejności wymienia się lutowanie gorącym gazem i promieniami podczerwonymi uznając je za bardzo nowoczesne.

Studia literaturowe pozwalają na ogólne zapoznanie się z wymienionymi metodami lutowania. Brak danych źródłowych, które jeśli istnieją to nie są publikowane, utrudnia właściwe wykorzystanie urządzeń technologicznych, nawet w przypadku, gdy istnieje możliwość ich nabycia. Celem niniejszej pracy jest dokładne zbadanie metody lutowania gorącym gazem w sensie operowania materiałem badawczym w różnych zastosowaniach praktycznych, jak również stworzenie podstawy (metodyki badań) dla innych metod łączenia.

## 1. ANALIZA TEORETYCZNA PROCESU ŁĄCZENIA

### 1.1. Podstawy fizyczne procesu lutowania

Najczęściej stosowaną metodą łączenia elementów elektronicznych jest, do chwili obecnej, lutowanie miękkie, zwane potocznie lutowaniem. Lutowanie jest metodą łączenia metalurgicznego za pomocą metalu (stopu lutowniczego) o temperaturze topnienia poniżej  $300^{\circ}\text{C}$ .

Do powstania połączenia nie jest konieczna ani dyfuzja ani stopienie metali łączonych. Ciągłość metalurgiczna ustalona pomiędzy częściami łączonymi jest jednoznaczna z ciągłością elektryczną, dobrą przewodnością cieplną, jak również właściwą wytrzymałością mechaniczną połączenia lutowanego. Powyższe jest możliwe przy założeniu, że topnik, zazwyczaj stosowany w procesie lutowania, spełnił przedtem rolę odprowadzenia

gazów adsorbowanych przez powierzchnie metali podlegających łączeniu oraz usunięcia z nich tlenków, siarczków i innych niemetalicznych zanieczyszczeń uniemożliwiających zwilżenie części łączonych przez ciekłe spoiwo lutownicze. W tej metodzie, w przeciwieństwie do innych, jak np. metodzie zgrzewania, mówi się wyłącznie o zwilżeniu warunkującym uformowanie połączenia. Duży obszar działania cieplnego ciekłego spoiwa powoduje wzajemną dyfuzję cząsteczek spoiwa i metalu podstawowego. Ponadto odnotowuje się inne uboczne zjawiska, do których należy przede wszystkim powstawanie związków międzymetalicznych.

Spróbujmy pokrótce rozważyć zjawisko zwilżania w powiązaniu z dyfuzją i powstawaniem związków międzymetalicznych, na tle podstawowych parametrów procesu łączenia, jakimi są czas i temperatura lutowania.

W temperaturze lutowania metal podstawowy części łączonej, najczęściej o wysokiej temperaturze topnienia, pozostaje w fazie stałej, spoiwo lutownicze jest ciekłe, a topnik w postaci ciekłej lub gazowej. Z analizy zjawiska zwilżania wynika, że kropla ciekłego spoiwa lutowniczego w atmosferze topnika układa się na płaskiej, poziomej i absolutnie czystej powierzchni metalu w taki sposób, że wektory napięć powierzchniowych na powierzchniach granicznych metalu podstawowego, spoiwa i topnika (rys. 2a), pozostają w położeniu równowagi termodynamicznej określonej równaniem (1)

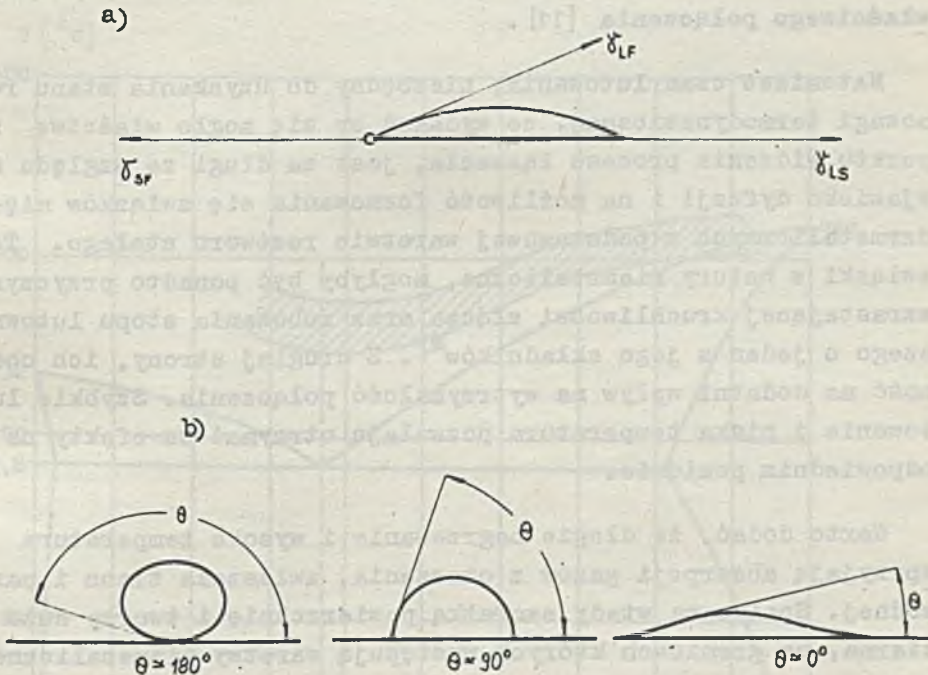
$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta \quad (1)$$

gdzie:

- $\gamma_{SF}$  - napięcie powierzchniowe na powierzchniach granicznych metalu podstawowego i topnika
- $\gamma_{LS}$  - napięcie powierzchniowe na powierzchniach granicznych spoiwa i metalu podstawowego
- $\gamma_{LF}$  - napięcie powierzchniowe na powierzchniach granicznych spoiwa i topnika

$\theta$  - kąt między powierzchnią zwilżania metalu podstawowego a meniskiem spoiwa w punkcie jego zetknięcia się z metalem podstawowym, zwany kątem zwilżania

W przypadku, gdy występuje całkowite zwilżanie, kąt zwilżania będzie równy zeru (rys. 2b).



Rys. 2. Dynamika procesu zwilżania

- a) Rozkład napięć powierzchniowych na powierzchniach granicznych metalu podstawowego, spoiwa i topnika
- b) Kąt zwilżania jako wskaźnik stopnia zwilżania metalu podstawowego przez spoiwo lutownicze (warunkujący jakość połączeń lutowanych)

W praktyce czas lutowania jest za krótki, aby układ po zastygnięciu spoiwa osiągnął punkt równowagi i kąt zwilżania ustala się pomiędzy  $0 + 90^\circ$ , albo jeżeli zachodzą warunki umoż-

liwiające dobre zwilżanie - nieco powyżej 0 rad. (przyjmuje się, że przy dobrym lutowaniu kąt zwilżania nie powinien przekroczyć 30 rad), a w wielu przypadkach wynosi około 5 rad. Kąt zwilżania, poza czynnikami wynikającymi z ustalonych materiałów, stanu ich powierzchni i rodzaju topnika, zależy od temperatury i czasu lutowania. Stwierdzono, że przy odpowiednio wysokiej i stałej dla danego systemu temperaturze występuje nagły przyrost szybkości zwilżania. Tylko w tej temperaturze, zwanej temperaturą krytyczną, może nastąpić uformowanie właściwego połączenia [11].

Natomiast czas lutowania, niezbędny do uzyskania stanu równowagi termodynamicznej, co wydawać by się mogło właściwe z punktu widzenia procesu łączenia, jest za długi ze względu na zjawisko dyfuzji i na możliwość formowania się związków międzymetalicznych w podstawowej warstwie roztworu stałego. Te związki z natury niemetaliczne, mogłyby być ponadto przyczyną wzrastającej kruchłości złącza oraz zubożenia stopu lutowniczego o jeden z jego składników<sup>\*)</sup>. Z drugiej strony, ich obecność ma dodatni wpływ na wytrzymałość połączenia. Szybkie lutowanie i niska temperatura pozwalają utrzymać te efekty na odpowiednim poziomie.

Warto dodać, że długie nagrzewanie i wysoka temperatura sprzyjają absorpcji gazów z otoczenia, zwłaszcza tlenu i pary wodnej. Spoiwo ma wtedy szorstką powierzchnię i tworzy dużo ziarna, na granicach których występują warstwy niemetaliczne, zwłaszcza tlenki.

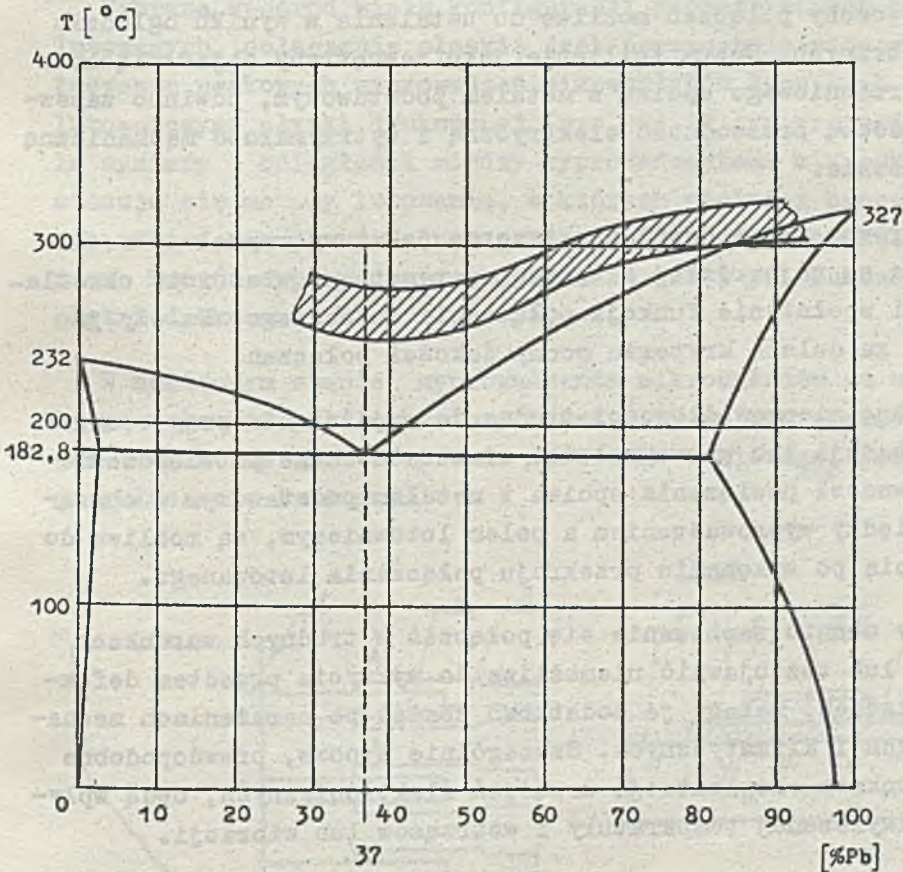
Spoiwò, szybko nagrzewane i szybko studzone składa się z prawidłowych ziaren kolumnowych i ma srebrzystą, błyszczącą powierzchnię, a połączenie odznacza się dobrą przewodnością elektryczną. Z powyższego wynika, że z punktu widzenia jakości połączenia, czas i temperatura lub dokładniej, kształt cha-

---

\*) Najczęściej stosowanym spoiwem lutowniczym, ze względu na odpowiednią strukturę krystalograficzną i małe napięcie powierzchniowe, jest stop SnPb o zawartości cyny około 60% [11]

rakterystyki termicznej procesu lutowania ma pierwszorzędne znaczenie.

Wartości liczbowe zalecanych temperatur lutowania są ogólnie znane i jak przedstawiono na rys. 3, zawierają się one w zakresie 70 + 100 deg powyżej temperatury topnienia spoiwa lutowniczego. Podobnie czas lutowania nie powinien być dłuższy od kilku sekund.



Rys. 3. Zalecane temperatury lutowania (temperatury spoiwa podczas zwilżania powierzchni części łączonych) na tle wykresu równowagi stopu Sn-Pb [11]

## 1.2. Kryteria jakości połączeń lutowanych

Jak stwierdzono istota procesu lutowania polega na właściwym zwilżeniu metalu podstawowego przez spoiwo lutownicze (pkt 1.1). Jednakże ten proces ma miejsce podczas cynowania wyprowadzeń mikroukładów i pól lutowniczych płytki drukowanej. Tam również należałoby ocenić jakość zwilżania powierzchni tych elementów. W końcowej ocenie jakości połączeń należy zbadać wtórne efekty dobrego zwilżania a więc połysk, gładkość kształtu powierzchni spoiwa lutowniczego oraz inne szczególne cechy połączeń możliwe do ustalenia w wyniku oględzin zewnętrznych. Dobre zwilżanie, jako zewnętrzny objaw wiązania powierzchniowego spoiwa z metalem podstawowym, powinno zapewniać dobrą przewodność elektryczną i wytrzymałość mechaniczną połączenia.

Zarówno przewodność elektryczna jak i wytrzymałość mechaniczna są najbardziej istotnymi parametrami właściwie określającymi spełnienie funkcji połączenia lutowanego. Należy je uznać za dalsze kryteria oceny jakości połączeń.

Różne nieprawidłowości, trudne do wyjaśnienia przy ocenie rezystancji lub wytrzymałości, oraz ostateczne potwierdzenie poprawności powiązania spoiwa z metalem podstawowym w obszarze między wyprowadzeniem a polem lutowniczym, są możliwe do wykrycia po wykonaniu przekroju połączenia lutowanego.

Aby ocenić zachowanie się połączeń w trudnych warunkach pracy lub też ujawnić niemożliwe do wykrycia przedtem defekty połączeń, należy je dodatkowo zbadać po narażeniach mechanicznych i klimatycznych. Szczególnie typowe, prawdopodobne w warunkach eksploatacji urządzeń elektronicznych, będą wpływy podwyższonej temperatury i wstrząsów lub wibracji.

Ostatecznie przyjęto cztery podstawowe kryteria oceny jakości połączeń:

- wygląd zewnętrzny połączenia,
- sprawdzenie rezystancji,

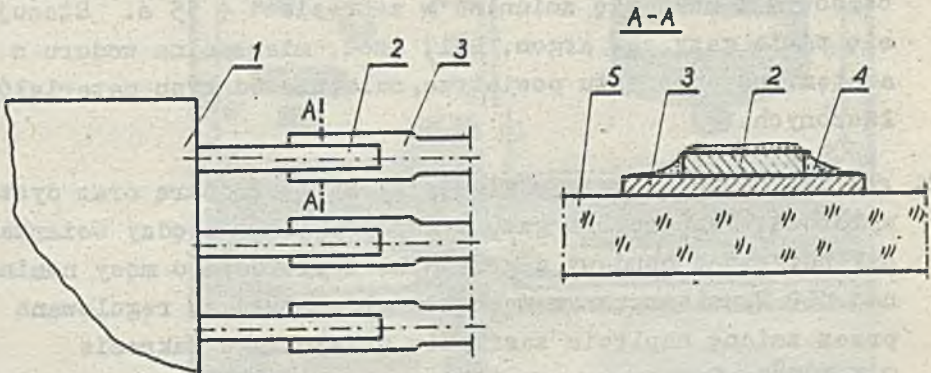
- pomiar siły zrywającej połączenie,
- ocena struktury połączenia.

Każde z wymienionych kryteriów oceny może być stosowane również po wybranych narażeniach mechano-klimatycznych.

### 1.3. Opis metody lutowania mikroukładów strumieniem gorącego gazu

Wybrane, spośród wielu konfiguracji geometrycznych połączeń lutowanych, połączenie płaskie jest powszechnie stosowane przy łączeniu paskowych wyprowadzeń mikroukładów typu krab z polami lutowniczymi płytki drukowanej (rys. 4). W tym przypadku (małe wymiary i odległości między wyprowadzeniami mikroukładu) stosuje się metody lutowania, w których właściwy proces łączenia odbywa się po uprzednim pokryciu spoiwem lutowniczym, zarówno końców wyprowadzeń mikroukładów jak i pól lutowniczych płytki drukowanej.

W następnym etapie wyprowadzenia mikroukładów są układane na powierzchni pól lutowniczych tak, aby po doprowadzeniu ciepła mogło nastąpić stopienie spoiwa lutowniczego, formującego połączenie lutowane.



Rys. 4. Płaskie połączenie lutowane

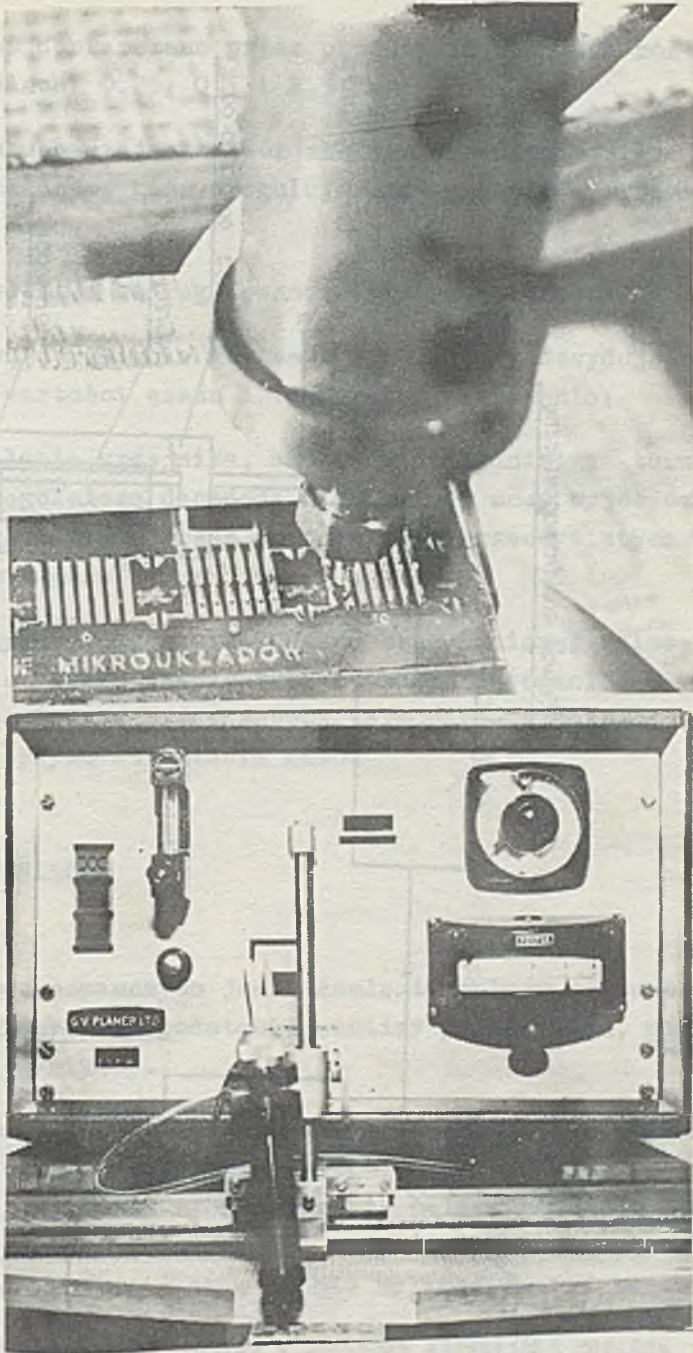
- 1 - obudowa mikroukładu, 2 - wyprowadzenia mikroukładu, 3 - pole lutownicze płytki drukowanej, 4 - spoiwo lutownicze, 5 - podłoże płytki drukowanej

Metoda lutowania gorącym gazem umożliwia łączenie wyprowadzeń mikroukładów z polami lutowniczymi płytki drukowanej za pomocą spoiwa podgrzewanego do temperatury lutowania ciągłym lub przerywanym strumieniem gazu (rys. 5a).

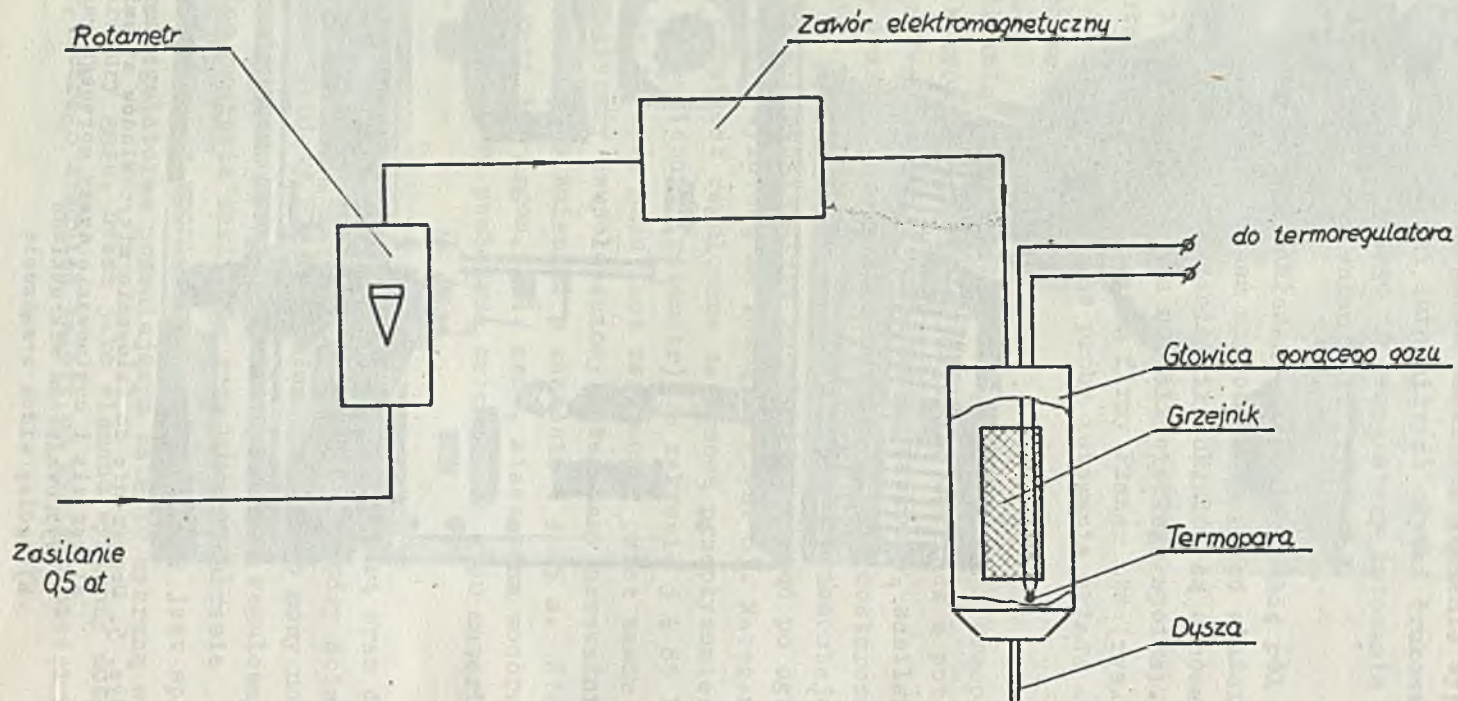
Spoivo lutownicze jest nakładane na powierzchnię pól lutowniczych i na końce wyprowadzeń mikroukładów przed właściwym procesem lutowania (wyprowadzenia mikroukładów są cynowane zanurzeniowo, a płytka drukowana na fali ciekłego spoiwa). Urządzenie do lutowania gorącym gazem firmy Planar Ltd (rys. 5b), za pomocą którego będą wykonane próby lutowania składa się z następujących zespołów:

1. panel zasilania z zaworem elektromagnetycznym i przepływomierzem, w którym ponadto znajduje się zasilacz z potencjometrycznym regulatorem i wskaźnikiem napięcia, zasilaniem grzejnika oraz termoregulator termopary. Gaz dostarczany z zasobnika (pod ciśnieniem około 0,5 at) przedostaje się przez zawór i przepływomierz do głowicy, a stąd po ogrzaniu przez dyszę wylotową na zewnątrz (rys. 6). Natężenie przepływu gazu jest regulowane za pomocą przepływomierza z zaworem mechanicznym (rotametr) w zakresie  $3 \div 85$  l/h. Czas trwania impulsu gazu jest regulowany przez zawór elektromagnetyczny dwupołożeniowy, sterowany przełącznikiem czasowym i może się zmieniać w zakresie  $1 \div 15$  s. Stosuje się takie gazy jak argon, hel, azot, mieszanina wodoru z azotem lub po prostu powietrze, zależnie od typu materiałów łączonych.
2. głowica gorącego gazu z grzejnikiem i termoparą oraz dyszą wylotową. Temperatura gazu przepływającego między ściankami cylindrycznej obudowy a grzejnikiem oporowym o mocy nominalnej 160 W, umieszczonym wewnątrz głowicy, jest regulowana przez zmianę napięcia zasilania grzejnika w zakresie  $0 \div 400^{\circ}\text{C}$ . Termopara wmontowana u wylotu dyszy jest sprzężona z termoregulatorem pozwalającym ustawić wybraną wartość temperatury gazu. Dysza jako element wymienny może mieć otwór, którego średnica zależy od wymiaru części łą-





Rys. 5. Urządzenie do lutowania mikroukładów strumieniem gorącego gazu  
a) kształt i usytuowanie dyszy gorącego gazu nad powierzchnią wyprowadzenia mikroukładu  
b) ogólny widok urządzenia



Rys. 6. Schemat urządzenia do lutowania strumieniem gorącego gazu

czonych i jest dostarczana przez producenta w trzech różnych wielkościach: 0,25; 0,5 i 2,5 mm.

3. pedał nożny uruchamiający zawór elektromagnetyczny z wyłącznikiem czasowym, który reguluje czas przepływu strumienia gorącego gazu.

Parametry lutowania są regulowane odpowiednio przez:

- a) czas przepływu strumienia gorącego gazu, który decyduje o rzeczywistej wartości czasu i temperatury lutowania;
- b) napięcie zasilania grzejnika, które za pośrednictwem termopary i termoregulatora decyduje o aktualnej mocy wyjściowej grzejnika w głowicy, a przez to o wartości rzeczywistych temperatur lutowania<sup>\*)</sup>.

Już po wstępnych próbach stwierdzono brak liniowej zależności między rzeczywistą temperaturą i czasem lutowania, a temperaturą kontrolowaną przez zespół termopara-termoregulator i czasem przepływu strumienia gazu.

## 2. BADANIA ROZPOZNAWCZE

### 2.1. Cel badań

Celem badań rozpoznawczych jest ustalenie wpływu badanych czynników, określonych na podstawie analizy zagadnienia, na przyjęty czynnik wynikowy.

Przy założeniu, że czas i temperatura lutowania lub dokładnej charakterystyka termiczna połączeń lutowanych decyduje przede wszystkim o jakości tych połączeń, należy ocenić w jakim stopniu różne czynniki nie uznane za bezpośrednio oddziaływujące na temperaturę lutowania są w stanie wpłynąć na jej wartość.

\*) Temperatura lutowania zależy również w znacznym stopniu od rodzaju i natężenia przepływu gazu oraz średnicy i odległości dyszy od części łączonych. Każdy z tych parametrów może być wykorzystany do zmiany zakresu temperatury lutowania, co będzie dokładniej zbadane i wyjaśnione w dalszej części opisu metody lutowania gorącym gazem

## 2.2. Zakres badań

Ustalono, że do najważniejszych czynników, które poza czasem przepływu i napięciem zasilania grzejnika mogą mieć pewien wpływ na charakterystyki termiczne lutowania gorącym gazem należą:

- położenie dyszy w stosunku do wyprowadzenia,
- bezwładność cieplna grzejnika, głowicy i ozułość termoregulatora,
- temperatura początkowa głowicy,
- kąt nachylenia dyszy,
- temperatura otoczenia.

Czynnikami wynikowym w badaniach rozpoznawczych będzie temperatura lutowania.

Jako zakres badań przyjęto:

- położenie dyszy - początek, środek i koniec stopki
- kąt nachylenia - 45; 60; 90°
- moment włączenia przepływu gazu - przed i po wygaśnięciu czerwonej lampki termoregulatora,
- temperatura otoczenia - 15; 20; 25°C.

Do czynników stałych należą:

- materiał testowej płytki drukowanej oraz kształt i wymiary pól lutowniczych (laminat epoksydowo-szkłany foliowany miedzią firmy Bakelite Ltd)
- rodzaj mikroukładów i kształt ich wyprowadzeń po krępowaniu (mikroukłady typu TO-89 firmy Ferranti Ltd)
- sposób przygotowania płytki i mikroukładów do lutowania (cynowanie ogniowe pól lutowniczych i wyprowadzeń w ciekłym spoiwie lutowniczym Sn60-Pb40 firmy Fry's Metal Ltd)
- średnica dyszy - 0,5 mm (wybrano jako dyszę o średnicy najbardziej zbliżonej do szerokości pola lutowniczego; w wyposażeniu urządzenia istnieją trzy dysze o średnicach 0,25; 0,5; 2,5 mm)

- rodzaj gazu - azot (wybrano gaz tani i najbardziej dostępny, wyłączając powietrze, którego skład i własności ze względu na sposób otrzymywania budzą najmniejsze wątpliwości a przewodność cieplna (tabl. 1) jest bardzo zbliżona do przewodności azotu i znacznie droższego argonu)
- natężenie przepływu gazu - 56 l/h (wybrano średnią wartość natężenia, które można zmieniać w zakresie od 0 do 84 l/h i ze względu na podziałkę rotametry najprościej regulować dla wartości 28; 56; 84 l/h)

Tabl. 1. Przewodnictwo cieplne gazów

Rodzaj gazu	Przewodnictwo cieplne (cal/cm·s·°C)
Argon	$38,8 \cdot 10^{-6}$
Azot	$56,7 \cdot 10^{-6}$
Hel	$343,0 \cdot 10^{-6}$
Wodór	$418,0 \cdot 10^{-6}$
Powietrze	$57,8 \cdot 10^{-6}$

Należy zaznaczyć, że producent urządzenia do lutowania gorącym gazem model 400/3 firmy Planar Ltd nie daje żadnych wskazówek odnośnie doboru ww czynników do lutowania elementów elektronicznych.

Pozostałe czynniki stałe - analogicznie jak w badaniach właściwych (pkt 3.1).

### 2.3. Metodyka badań

Badania rozpoznawcze przeprowadzono w celu ustalenia istotności wpływu określonych czynników badanych, odnośnie których zarówno analiza ogólnych podstaw fizykalnych lutowania jak i prac badawczych z zakresu tematu nie dała jednoznacznej odpowiedzi na temat ich roli w procesie lutowania [2, 5, 6, 13, 34].

W tej sytuacji podjęta metodyka badań powinna pozwolić na uzyskanie doświadczalnych informacji jedynie o istotności wpływu badanych czynników (bez określenia zależności funkcyjnych), a jednocześnie z uwagi na fakt, że badania rozpoznawcze są jedynie wstępem do właściwych badań, liczba przeprowadzonych pomiarów powinna być ograniczona do możliwego minimum

Przewidywany obszar parametrów lutowania, przy zastosowaniu stopu Sn60-Pb40, jest zawarty w zakresie temperatury od  $200 \div 300^{\circ}\text{C}$  i czasu od  $1 \div 4$  s <sup>\*)</sup>.

Na podstawie pewnej liczby prób przeprowadzonych dla azotu ustalono, że temperatura lutowania w zakresie  $200 \div 300^{\circ}\text{C}$  występuje dla temperatury głowicy w zakresie  $300 \div 400^{\circ}\text{C}$ . Wybrano trzy punkty kontrolne, dla których zostanie dokonana ocena wpływu wymienionych czynników ubocznych na charakterystyki procesu lutowania, tzn. dla temperatury głowicy  $350^{\circ}\text{C}$  oraz czasu przepływu gazu 2,5 s i dla trzech odległości dyszy 1; 2 i 3 mm. Dla tych parametrów urządzenia będą sporządzone charakterystyki termiczne lutowania, pozwalające na oszacowanie wpływu ww czynników z tym, że przy ocenie wpływu parametru badanego, pozostałe czynniki nie będą ulegały zmianie, a ponadto, każdy z pomiarów będzie wykonany na nowej próbce. Pomiarzy będą powtarzane pięciokrotnie dla każdego z pięciu wybranych punktów pomiarowych (metoda pomiaru jak w badaniach właściwych, pkt 3.2).

## 2.4. Wyniki badań i ich ocena

### 2.4.1. Temperatura początkowa głowicy

Zauważono, że metalowa głowica wyposażona w grzejnik o mocy 160 W jest przyczyną znacznego nagrzewania się płytki dru-

<sup>\*)</sup> Stwierdzono doświadczalnie, że zarówno wyższa temperatura jak i dłuższy czas lutowania są przyczyną rozwarstwiania laminatu oraz utraty połysku spoiwa lutowniczego. W temperaturze poniżej wyznaczonego zakresu, szczególnie przy krótkim czasie lutowania zauważa się brak rozplływania spoiwa w obszarze połączenia

kowanej szczególnie pod dyszą, która ze względu na dążenie do ograniczenia obszaru działania cieplnego strumienia gazu powinna być usytuowana w małej odległości od powierzchni płytki. Pomiar wykazały, że otwarcie zaworu zamykającego przepływ gazu powinno nastąpić w czasie nie dłuższym niż kilka sekund od chwili, gdy płytka drukowana lub dysza znajdują się w położeniu lutowania. W przeciwnym przypadku, jak podano w tabeli 2 wpływ temperatury początkowej dyszy na temperaturę lutowania będzie bardzo istotny.

Tabl. 2. Temperatury lutowania w zależności od temperatury początkowej głowicy

Odległość dyszy od płytki drukowanej (mm)	Czas przetrzymania dyszy nad powierzchnią płytki (s)					
	5	10	20	30		
2	224°C	231°C	258°C	271°C		
	225°C	217°C	250°C	269°C		
	228°C	230°C	260°C	273°C		
	220°C	225°C	261°C	270°C		
	221°C	218°C	255°C	268°C		

#### 2.4.2. Bezwładność cieplna grzejnika głowicy i czułość termoregulatora

Pomijając oczywistą konieczność odczekania przez okres kilkunastu minut po włączeniu grzejnika, należy odnotować jeszcze jeden wpływ bezwładności cieplnej związanej z konstrukcją głowicy. Podczas nagrzewania się głowicy powietrze nagromadzone między grzejnikiem a obudową na przemian nagrzewa się i stygnie przy temperaturze wyznaczonej stabilizatorem. Włączenie przepływu strumienia gazu spowoduje wychylenie wskaźnika temperatury lutowania do bliżej nieokreślonej wartości (wychylenie wskaźnika jest ograniczone zastawką stabilizującą tempe-

raturę), która dopiero po pewnym czasie ustala się z dokładnością kilku stopni wokół wartości wyznaczonej. Przy krótkim czasie impulsu rzeczywista temperatura gazu jest bliżej nieokreślona, a różnica, jak wskazują pomiary, sięga  $40^{\circ}\text{C}$ . Powyższe zjawisko jest niewątpliwą wadą tej metody lutowania, która szczególnie jaskrawo występuje przy kilku pierwszych impulsach gazu. Szybkie i długotrwałe lutowanie w stałych odstępach czasowych sprzyja wyeliminowaniu tego niedomagania. Do badań dla ujednolicenia wyników założono, że każde z połączeń będzie wykonywane po wygaśnięciu czerwonej lampki termoregulatora - wyłączenie układu zasilającego grzejnik przy temperaturze przekraczającej ustalony margines w stosunku do wartości żądanej.

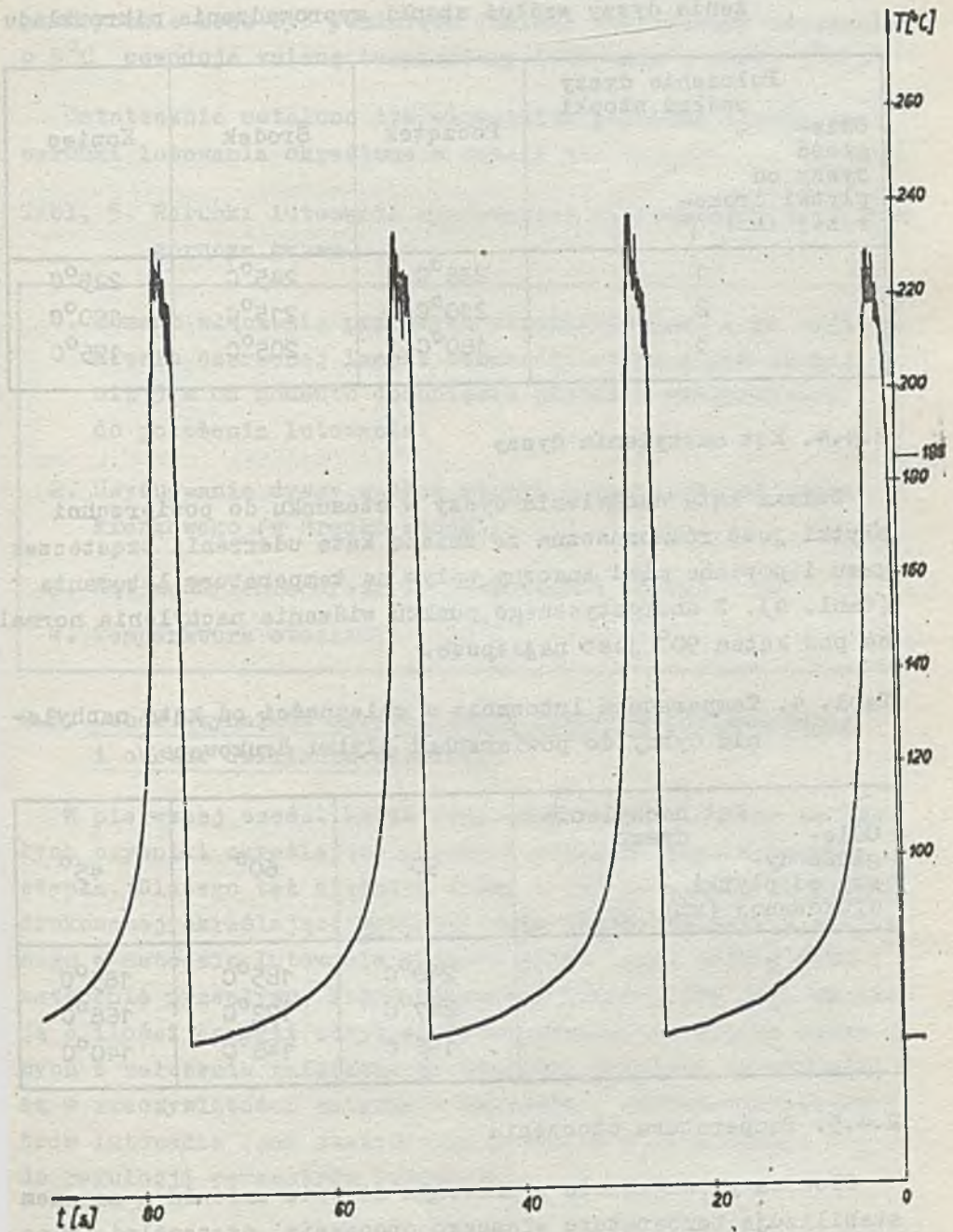
#### 2.4.3. Położenie dyszy w stosunku do wyprowadzenia

Strumień gazu wydostający się przez dyszę usytuowaną w pewnej odległości od powierzchni części łączonych, po ich osiągnięciu, ulegnie rozproszeniu. W związku z tym obszar ogrzewany gorącym gazem będzie znacznie większy od średnicy otworu dyszy.

Najwyższa temperatura wystąpi w centrum położonym na wysokości otworu, jeśli dysza pozostaje w położeniu prostopadłym do powierzchni płytki drukowanej.

Centrum nagrzewania, a więc i temperatura lutowania zależy od usytuowania dyszy w stosunku do stopki wyprowadzenia podlegającego lutowaniu. Położenie dyszy wzdłuż wyprowadzenia może być dość ściśle ocenione po wprowadzeniu bocznego podświetlenia rzucającego cień na powierzchnię płytki drukowanej. Wyniki pomiarów temperatury lutowania po odsunięciu dyszy od środka stopki wyprowadzenia mikroukładu podano w tabeli 3. Przy większej odległości dyszy od powierzchni płytki różnice są jeszcze większe, jednakże przy właściwym wykorzystaniu bocznego podświetlenia dyszy i znaku kreskowego na płytce drukowanej, powtarzalność charakterystyk termicznych jest bardzo dobra (rys. 7).





Rys. 7. Charakterystyki temperaturowe połączenia podgrzewanego wielokrotnie w stałych odstępach czasowych

Tabl. 3. Średnie temperatury lutowania w zależności od położenia dyszy wzdłuż stopki wyprowadzenia mikroukładu

Odległość dyszy od płytki drukowanej (mm) \ Położenie dyszy wzdłuż stopki	Początek	Środek	Koniec
1	235°C	245°C	225°C
2	210°C	215°C	190°C
3	180°C	205°C	175°C

#### 2.4.4. Kąt nachylenia dyszy

Zmiana kąta nachylenia dyszy w stosunku do powierzchni płytki jest równoznaczna ze zmianą kąta uderzenia cząsteczek gazu i powinna mieć znaczny wpływ na temperaturę lutowania (tabl. 4). Z energetycznego punktu widzenia nachylenie normalne pod kątem 90° jest najlepsze.

Tabl. 4. Temperatura lutowania w zależności od kąta nachylenia dyszy do powierzchni płytki drukowanej

Odległość dyszy od płytki drukowanej (mm) \ Kąt nachylenia dyszy	90°	60°	45°
1	240°C	185°C	185°C
2	217°C	172°C	168°C
3	198°C	148°C	140°C

#### 2.4.5. Temperatura otoczenia

Głowica po nagrzanu w znacznym stopniu zmienia a zarazem stabilizuje temperaturę własnego otoczenia, szczególnie w pobliżu części łączonych. Dlatego zmiana temperatury pomiesz-

czenia tylko nieznacznie wpływa na temperaturę lutowania i praktycznie może być pominięta (zmiana temperatury otoczenia o  $5^{\circ}\text{C}$  powoduje zmianę temperatury lutowania o około  $4^{\circ}\text{C}$ ).

Ostatecznie ustalono dla wszystkich połączeń identyczne warunki lutowania określone w tabeli 5.

Tabl. 5. Warunki lutowania wyprowadzeń mikroukładów typu krab gorącym gazem

1. Moment włączenia przepływu strumienia gazu - po wygaśnięciu czerwonej lampki termoregulatora i nie dłużej niż 5 s od momentu dosunięcia płytki z mikroukładem do położenia lutowania.
2. Usytuowanie dyszy wzdłuż stopki - na wysokości znaku kreskowego (w środku stopki).
3. Kąt nachylenia dyszy do powierzchni płytki -  $90^{\circ}$
4. Temperatura otoczenia -  $20^{\circ}\text{C}$

#### 2.5. Dobór czynników określających zdolność przekazywania i obszar działania cieplnego

W pierwszej części badań rozpoznawczych zaliczono do stałych czynniki określające obszar i zdolność przekazywania ciepła. Dlatego też średnica dyszy i jej odległość od płytki drukowanej określające geometrycznie obszar działania cieplnego w metodzie lutowania gorącym gazem oraz rodzaj gazu i natężenie przepływu, które łącznie z temperaturą gazu decydują o ilości energii cieplnej przekazywanej do części łączonych z założenia zaliczono do stałych. Niestety te czynniki są w rzeczywistości zmienne i decydują o wartościach parametrów lutowania (jak stwierdzono niektóre z nich nadają się do regulacji parametrów lutowania).

W tej części badań rozpoznawczych należy ustalić czy i w jaki sposób wymienione czynniki można wykorzystać do wyboru

zakresu lub też do regulacji temperatury lutowania, pamiętając o ograniczeniach związanych z dopuszczalnym obszarem działania cieplnego przy lutowaniu mikroukładów typu krab.

W związku z tym przyjęto następujący zakres badań:

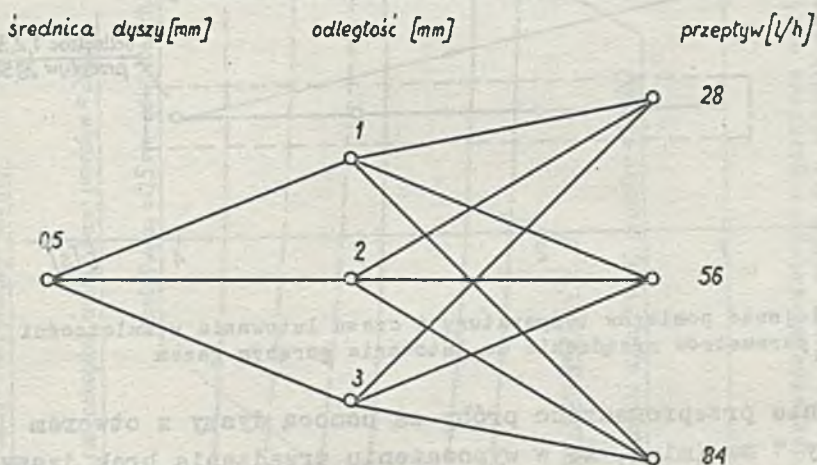
- rodzaj gazu - azot, hel i ewentualnie azot, wodór (argon i powietrze zostały wyeliminowane na podstawie danych z tabl. 1, wg których ich przewodność cieplna jest bardzo podobna do przewodności cieplnej azotu)
- natężenie przepływu gazu - 28; 56; 84 l/h (przyjęto trzy typowe wartości z pełnego zakresu regulacji w urządzeniu do lutowania gorącym gazem)
- średnica dyszy - 0,5; 1; 1,5; 2,5 mm (podczas lutowania za pomocą dyszy z otworem o średnicy 3,5 mm następuje zjawisko palenia się laminatu)
- odległość dyszy - 1, 2, 3 mm (dla większych odległości następuje palenie laminatu na dużej powierzchni już przy małych natężeniach przepływu).

Czynnikiem wynikowym będzie jak poprzednio temperatura lutowania.

Do czynników stałych zaliczono wszystkie pozostałe czynniki uznane za stałe lub zmienne w pierwszej części badań rozpoznawczych (tabl. 5).

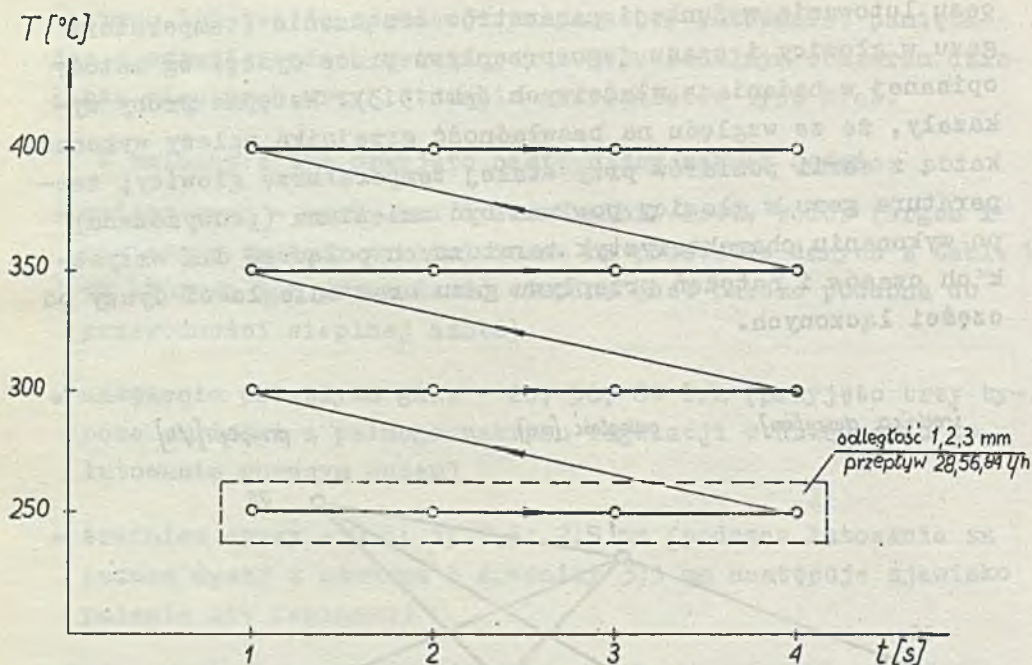
Celem dobrania właściwych wartości wyżej wymienionych czynników uznanych za zmienne przyjęto dla lutowania wyprowadzeń mikroukładów typu krab następującą metodykę badań. Uznając dyszę z otworem o średnicy 0,5 mm za najmniejszą z możliwych nadających się do lutowania wyprowadzeń mikroukładów (o szerokości 0,3 mm ułożonych na powierzchni pół lutowniczych o szerokości 0,8 mm) należy sporządzić charakterystyki termiczne metody podczas lutowania kolejno za pomocą dysz o średnicach określonych zakresem badań według schematu, rys. 8, 9. Oznacza to, że należy określić charakterystyki izotermiczne pro-

cesu lutowania w funkcji parametrów urządzenia (temperatury gazu w głowicy i czasu jego przepływu przez dyszę) wg metody opisanej w badaniach właściwych (pkt 3.3). Wstępne próby wykazały, że ze względu na bezwładność grzejnika należy wykonać każdą z serii pomiarów przy stałej temperaturze głowicy; temperatura gazu w głowicy powinna być zmieniana (podwyższana) po wykonaniu charakterystyk termicznych połączeń dla wszystkich czasów i natężeń przepływu gazu oraz odległości dyszy od części łączonych.



Rys. 8. Różne kombinacje parametrów lutowania mikroukładów przy stałej średnicy dyszy gorącego gazu

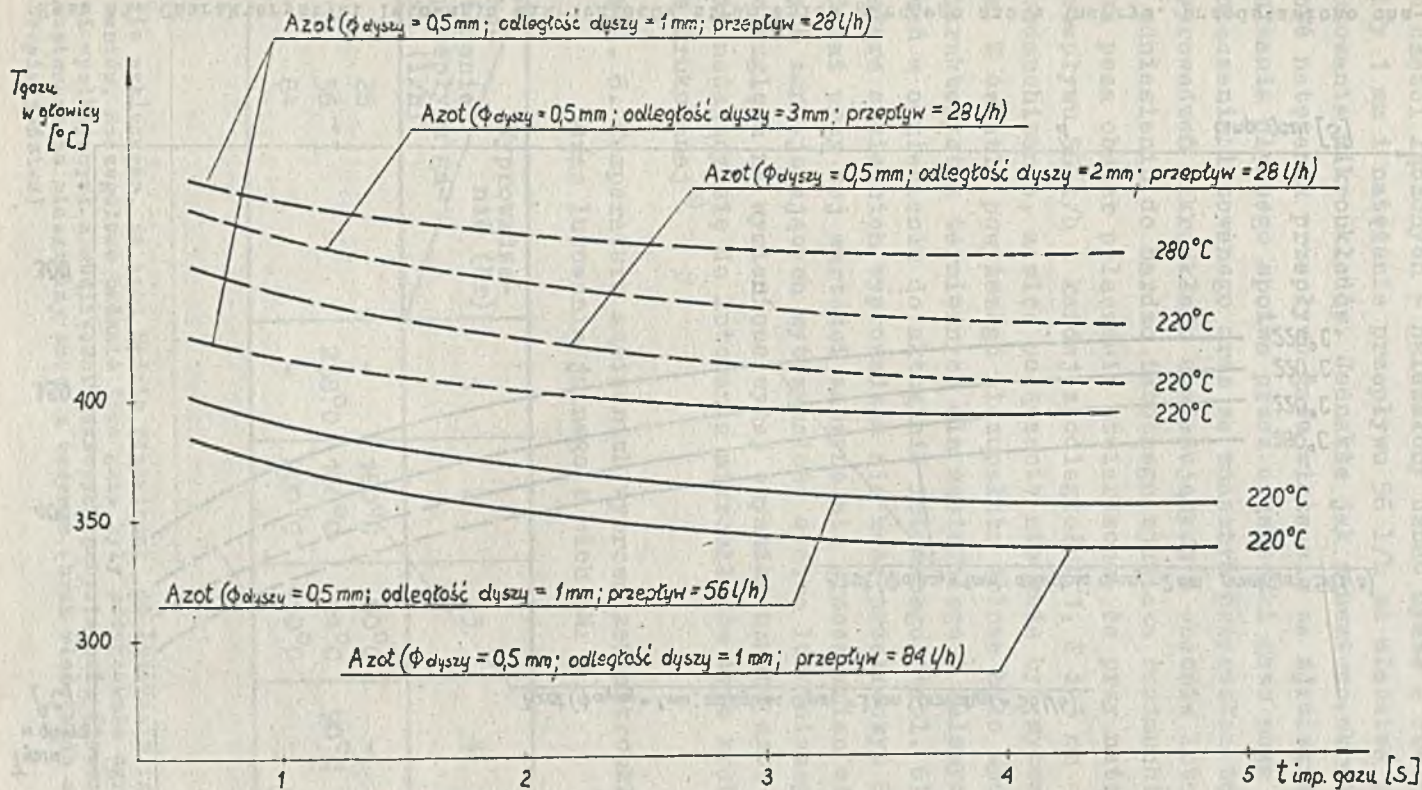
W pierwszej kolejności przeprowadzono próby lutowania za pomocą azotu z dyszą o średnicy 0,5 mm. Wyniki pomiarów ujęto w postaci charakterystyk metody lutowania gorącym gazem (rys. 10). Ponieważ przy żadnej odległości w powiązaniu z dowolnym natężeniem przepływu nie można uzyskać temperatur lutowania powyżej  $250^{\circ}\text{C}$ , dysza z otworem o średnicy 0,5 mm przy wykorzystaniu azotu jako nośnika energii cieplnej nie nadaje się do lutowania mikroukładów typu krab.



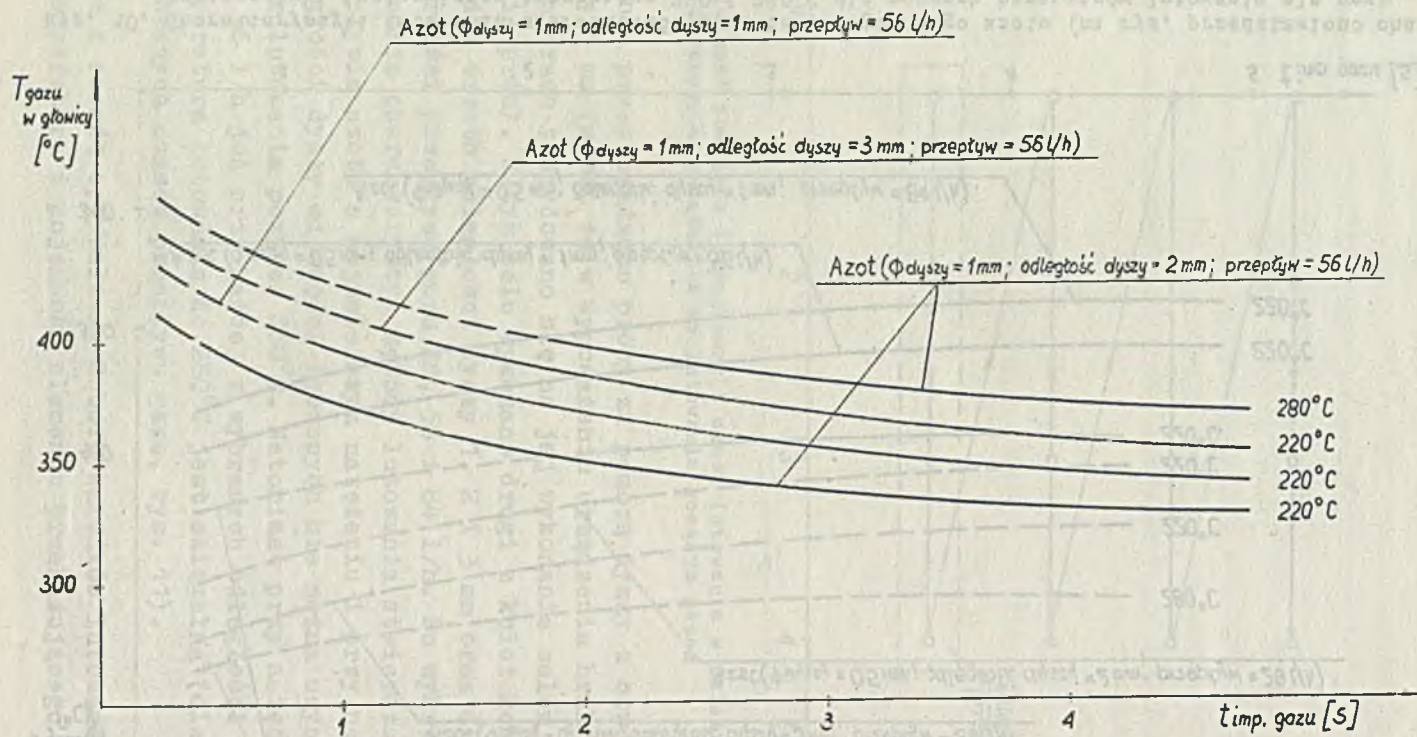
Rys. 9. Kolejność pomiarów temperatury i czasu lutowania w zależności od parametrów urządzenia do lutowania gorącym gazem

Następnie przeprowadzono próby za pomocą dyszy z otworem o średnicy 1 mm (mimo, że w wyposażeniu urządzenia brak dyszy o tych wymiarach zdecydowano się na jej wykonanie celem przeprowadzenia prób). W tym celu wykonano drugi z kolei komplet pomiarów dla trzech odległości dyszy 1, 2 i 3 mm oraz dla trzech wartości przepływu gazu 28, 56 i 84 l/h. Po wykreśleniu jak poprzednio charakterystyk metody lutowania stwierdzono, że przy przepływie azotu o najmniejszym natężeniu i przy najmniejszej odległości dyszy od części łączonych nie można uzyskać temperatur lutowania powyżej 260°C. Natomiast przy natężeniu przepływu 56 l/h już przy każdej z wybranych odległości dyszy górna temperatura lutowania do 280°C jest osiągalna (dla każdego z wybranych czasów przepływu gazu, rys. 11).

Zgodnie z zasadą optymalnego doboru warunków lutowania - minimalna temperatura i pojemność elementu przekazującego ciepło



Rys. 10. Charakterystyki lutowania mikroukładów strumieniem gorącego azotu (na rys. przedstawiono charakterystyki izotermiczne temperatur 220 i 280°C dla różnych parametrów lutowania ale przy stałej średnicy dyszy 0,5 mm)



Rys. 11. Charakterystyki lutowania mikroukładów strumieniem gorącego azotu (na rys. przedstawiono charakterystyki izotermiczne temperatur 220 i 280  $^{\circ}\text{C}$  przy średnicy dyszy 1 mm)

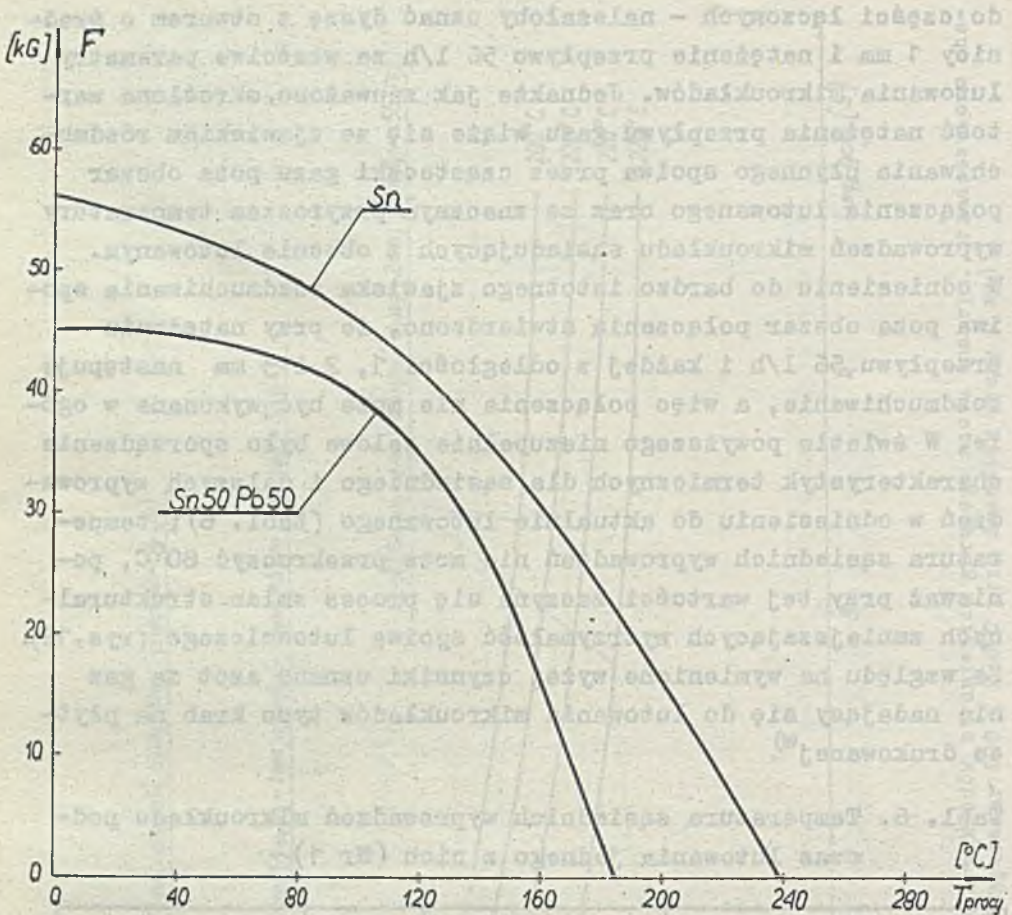


do części łączonych - należałoby uznać dyszę z otworem o średnicy 1 mm i natężenie przepływu 56 l/h za właściwe parametry lutowania mikroukładów. Jednakże jak zauważono, określona wartość natężenia przepływu gazu wiąże się ze zjawiskiem rozdmuchiwania płynnego spoiwa przez cząsteczki gazu poza obszar połączenia lutowanego oraz ze znacznym przyrostem temperatury wyprowadzeń mikroukładu sąsiadujących z obecnie lutowanym. W odniesieniu do bardzo istotnego zjawiska rozdmuchiwania spoiwa poza obszar połączenia stwierdzono, że przy natężeniu przepływu 56 l/h i każdej z odległości 1, 2 i 3 mm następuje rozdmuchiwanie, a więc połączenie nie może być wykonane w ogóle. W świetle powyższego niezupełnie celowe było sporządzenie charakterystyk termicznych dla sąsiedniego i dalszych wyprowadzeń w odniesieniu do aktualnie lutowanego (tabl. 6); temperatura sąsiednich wyprowadzeń nie może przekroczyć 80°C, ponieważ przy tej wartości zaczyna się proces zmian strukturalnych zmniejszających wytrzymałość spoiwa lutowniczego (rys.12). Ze względu na wymienione wyżej czynniki uznano azot za gaz nie nadający się do lutowania mikroukładów typu krab na płytce drukowanej<sup>3E)</sup>.

Tabl. 6. Temperatura sąsiednich wyprowadzeń mikroukładu podczas lutowania jednego z nich (Nr 1)

Natężenie przepływu gazu (l/h) \ Wyprowadzenie (Nr)	1	2	3	4	7
28	-	160°C	80°C	-	-
56	238°C	180°C	94°C	90°C	68°C
84	-	200°C	110°C	-	-

\* ) Nie wykluczone, że azot będzie odpowiedni do lutowania innych elementów. Szczegółowe badania tego gazu były podyktowane ograniczeniami wynikającymi z możliwości czasowych nabycia helu (import) oraz zastosowania mieszaniny azotu z wodorem (brak właściwych warunków bezpieczeństwa)



Rys. 12. Zmiana wytrzymałości (siły zrywającej) płaskiego połączenia lutowanego w zależności od temperatury pracy [11]

Według wyników ujętych w tabeli 7, opracowanej na podstawie analizy procesu przekazywania ciepła przez gaz do ciała stałego (pkt 2.6), która w tym przypadku stała się konieczna, należy wnioskować, że jedynie hel lub mieszanina wodoru z azotem mogłyby się nadawać do lutowania mikroukładów. Do dalszych badań wybrano hel jako gaz obojętny chemicznie i bardziej bezpieczny.

Postępując analogicznie jak poprzednio, przy badaniu azotu wybrano następujące warunki lutowania mikroukładów:

- średnica dyszy - 1 mm,
- odległość dyszy - 2 mm,
- natężenie przepływu helu - 28 l/h.

Tabl. 7. Wartości współczynnika  $I_{xp}$  dla różnych gazów i względna wartość  $\mu$ ,  $c$ ,  $\lambda$  gazów względem powietrza w temperaturze  $373^{\circ}\text{K}$  i pod ciśnieniem 760 mm Hg

x	$\nu$	$\frac{\mu^p}{\mu^x}$	$\frac{c^x}{c^p}$	$\frac{\lambda^p}{\lambda^x}$	$I_{xp}$
H <sub>2</sub>	2	3,46	14,4	0,144	3,09
He	4	1,57	5,18	0,18	1,72
N <sub>2</sub>	14	1,0	2,1	1,0	1,52
Powietrze	29	1,00	1,00	1,00	1,00
A	40	1,31	0,52	1,13	0,81

W połączeniach lutowanych gorącym helem dla tych warunków rzeczywiście nie obserwuje się szkodliwego rozdmuchiwania spoiwa. Jednakże temperatura sąsiednich wyprowadzeń, podobnie jak dla azotu, jest bardzo wysoka i praktycznie powoduje powtórne roztopianie spoiwa na tych wyprowadzeniach. Tym samym czas lutowania odczytany z charakterystyki termicznej nie ma nic wspólnego z rzeczywistym czasem lutowania a ponadto jakość połączenia kilkakrotnie podgrzewanego budzi poważne wątpliwości (pkt 1.1).

Ostatecznie mimo zmniejszenia zjawiska rozdmuchiwania spoiwa do minimum przyjęty sposób lutowania nie nadaje się do elementów położonych blisko siebie, czyli tak jak są rozmieszczone wyprowadzenia mikroukładu typu krab. Uznano, że lutowanie tych mikroukładów jest możliwe jedynie po wprowadzeniu głowicy w ruch liniowy i poziomy oraz zastosowaniu ciągłego wpływu strumienia gazu. Tylko w tych warunkach czas lutowania określony z charakterystyk termicznych będzie rzeczywistym czasem lutowania a połączenia będą wykonywane jedno po drugim, bez

wielokrotnego przetapiania spoiwa. Pierwszy z warunków wymagał uzupełnienia urządzenia do lutowania gorącym gazem poprzez wyposażenie go w śrubę pociągową napędzaną silnikiem elektrycznym z płynną regulacją obrotów i przeznaczoną do transportu głowicy gorącego gazu, a drugi został zrealizowany po odłączeniu sprzęgła łączącego czasomierz z zaworem magnetoelektrycznym, zamykającym przepływ strumienia gazu.

W powiązaniu z danymi wg pkt 2.4 ustalono ostateczne warunki lutowania mikroukładów typu krab wg tabeli 8.

Tabl. 8. Końcowe warunki lutowania mikroukładów typu krab gorącym gazem

1. Rodzaj gazu - hel
2. Natężenie przepływu gazu - 28 l/h
3. Średnica dyszy - 1 mm
4. Kąt nachylenia dyszy - 90°
5. Usytuowanie dyszy - na wysokości znaku kreskowego (w środku stopki)
6. Temperatura otoczenia - 20°C

Warto podkreślić, że po wprowadzeniu w ruch głowicy z gorącym gazem stracił na wartości najbardziej trudny do utrzymania warunek określający moment włączenia przepływu strumienia gazu wg tabeli 5.

## 2.6. Analiza matematyczna procesu przekazywania ciepła przez gaz do ciała stałego

Warunek brzegowy w płynie wymieniającym ciepło z powierzchnią ciała stałego ma zgodnie z prawem Newtona postać (2)

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha (t - t_0) \quad (2)$$

stąd 
$$\left( \frac{\partial t}{\partial n} = Nu (t - t_0) \right) \quad (3)$$

gdzie:

- $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$  - liczba podobieństwa Nusselta
- $\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła
- $l$  - wymiar charakterystyczny
- $\lambda$  - współczynnik przewodności cieplnej płynu
- $t_0$  - temperatura gazu w dużej odległości od powierzchni
- $t$  - temperatura powierzchni

Wzrostowi wartości liczby Nusselta odpowiada wzrost intensywności wymiany ciepła.

W wyidealizowanym przypadku wymiany ciepła w laminarnej warstwie przyściennej, tzn. takiej, w której prędkość równoległa do powierzchni zmienia się od wartości  $v$  w dużej odległości od powierzchni do wartości zero na powierzchni, otrzymuje się doświadczalnie zależność (4)

$$Nu = 0,648 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4)$$

gdzie:

- Liczba Reynoldsa  $Re = \frac{v l}{\mu}$
- Liczba Prandtla  $Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$

- $v$  - prędkość płynu
- $\mu$  - współczynnik lepkości
- $c$  - ciepło właściwe płynu

Po podstawieniu liczb  $Re$  i  $Pr$  do równania (4) otrzymujemy zależność:

$$Nu = 0,648 l^{1/2} v^{1/2} c^{1/3} \mu^{-1/6} \lambda^{-1/3} \quad (5)$$

Sama liczba Nusselta może w przedstawionej postaci służyć do oceny gazów, jednak wygodniej jest posłużyć się oceną w odniesieniu do jednego wybranego gazu, np. powietrza. W tym celu

zdefiniujemy współczynnik intensywności wymiany ciepła gazu względem powietrza, jako stosunek odpowiednich liczb Nusselta (6)

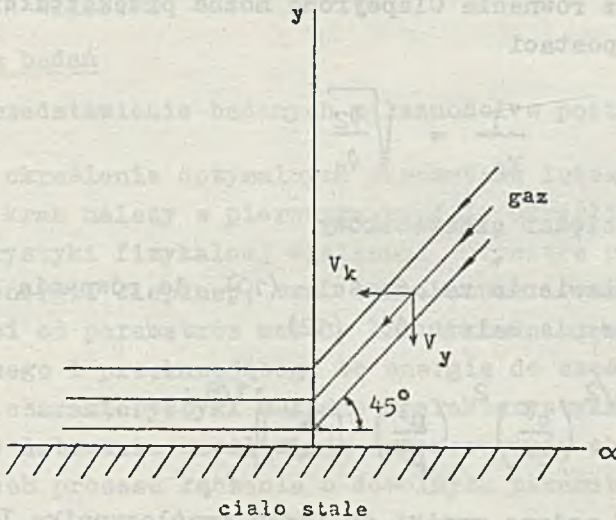
$$I_{xp} = \frac{Nux}{Nup} = \left[ \left( \frac{v^x}{v^p} \right)^3 \left( \frac{g^x}{g^p} \right)^2 \left( \frac{\mu^p}{\mu^x} \right) \left( \frac{\lambda^p}{\lambda^x} \right)^2 \right]^{1/6} \quad (6)$$

Parametry powietrza indeksowane są literą p, parametry gazu porównywanego literą x.

Porównanie musi być przeprowadzone w pewnych ustalonych warunkach. Zakładamy, że geometria układu jest dla wszystkich gazów taka sama, co praktycznie oznacza, że konfiguracja połączenia lutowanego i głowicy gorącego gazu jest zawsze jednako-  
wa. Niewłaściwe byłoby jednak ustalenie tej samej prędkości wypływu dla wszystkich gazów. Liczba Nusselta każdego gazu zależy od prędkości

$$Nux \sim v^x^{1/2}$$

Warto zatem stosować możliwie duże prędkości wypływu. Jednak ze wzrostem prędkości rośnie ciśnienie wywierane przez gaz na spoiwo i przy pewnej prędkości obserwuje się rozdmuchiwanie stopionego spoiwa. Oznacza to, że dające się zastosować prędkości wypływu są ograniczone od góry przez wielkość napięcia powierzchniowego spoiwa. Ilościowe oszacowanie wielkości napięcia powierzchniowego, a co za tym idzie maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia wywieranego przez gaz na spoiwo, jest bardzo trudne i ograniczymy się do obliczenia jak mają się do siebie prędkości różnych gazów wywierających na spoiwo ciśnienie o tej samej wartości. W tym celu przyjmijmy uproszczony model ciał wymieniających ciepło (rys. 13). Związek tego modelu z rzeczywistym obrazem gazu opływającego płaską płytę jest dosyć skomplikowany. Jest oczywiste, że jeśli gaz kierujemy na płaską płytę, to w końcu opływanie następuje równoległe do płyty. Przyjęte założenie, że  $v_x = v_y$  oznacza, że średnia składowa x prędkości cząsteczek jest równa średniej składowej y. Sytuacja ta może odpowiadać w rzeczywistości skierowaniu strumienia gazu nawet pod kątem  $90^\circ$  do powierzchni.



Rys. 13. Uproszczony model ciał wymieniających ciepło

Rozważmy wielkość pędu przeniesionego wzdłuż osi Y, czyli prostopadłe do powierzchni (po przyjęciu  $v_x = v_y$  będziemy używali dla obu składowych oznaczenia  $v$ ).

$$dp = v \, dm = v \rho \, dV = v^2 \rho \, dt \, S \quad (7)$$

Ciśnienie wywierane przez gaz na powierzchnię jest określone zależnością

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{S} \frac{dp}{dt} = \rho v^2 \quad (8)$$

Zatem, jeśli dwa różne gazy wywierają na powierzchnię spoiwa ciśnienie o najwyższej dopuszczalnej ale jednakowej niezależnie od rodzaju gazu wartości, przy której nie następuje jeszcze rozdmuchiwanie spoiwa, to na mocy zależności (8) otrzymujemy równość:

$$\rho_1 v_1^2 = \rho_2 v_2^2 \quad (9)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (10)$$

Wychodząc z równania Clapeyrona można przekształcić zależność (10) do postaci

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} \quad (11)$$

gdzie  $v$  - ciężar cząsteczkowy

Przez podstawienie zależności (10) do równania (6) otrzymujemy ostatecznie zależność (12)

$$I_{xp} = \left[ \left( \frac{v^p}{v^x} \right)^{3/2} \left( \frac{c^x}{c^p} \right)^2 \left( \frac{\mu^p}{\mu^x} \right) \left( \frac{\lambda^p}{\lambda^x} \right) \right]^{1/6} \quad (12)$$

W tabeli 7 podano wyniki obliczeń współczynnika  $I_{xp}$  dla różnych gazów w temperaturze  $373^{\circ}\text{K}$  i pod ciśnieniem  $760 \text{ mm Hg}$ .

## 2.7. Wnioski z badań rozpoznawczych

Wyniki analizy warunków lutowania gorącym gazem wykazały, że ich dobór jest trudny i bardzo pracochłonny. Tego typu badania powinny być przeprowadzone przez producenta urządzenia, a ich wyniki należałoby podać w instrukcji obsługi; w przeciwnym przypadku metoda staje się niezwykle uciążliwa i dopiero pewne doświadczenie pozwala nieco szybciej ustalić parametry lutowania konkretnych elementów. Konieczne jest jednak uwzględnienie faktu, że określona, maksymalna wartość natężenia przepływu lub bardziej dokładnie ciśnienie wywierane przez gaz na powierzchnię spoiwa, przy której nie występuje rozdmuchiwanie jest czynnikiem ograniczającym możliwość stosowania danego gazu w procesie lutowania. Dlatego też nie można za pomocą zmian natężenia przepływu gazu regulować temperatury lutowania, co było sugerowane w pracy [2]. Należy raczej szukać takiej maksymalnej wartości natężenia danego gazu pamiętając o obszarze działania cieplnego (średnica i odległość dyszy od części łączonych), a potem sprawdzić czy przy większej wartości mocy grzejnika istnieje możliwość uzyskania najwyższej z żądanych temperatur lutowania.



### 3. BADANIA WŁAŚCIWE

#### 3.1. Plan badań

##### 3.1.1. Przedstawienie badanych zależności w postaci funkcyjnej

Celem określenia optymalnych parametrów lutowania mikroukładów typu krab należy w pierwszym rzędzie określić w postaci charakterystyki fizycznej wielkości dotyczące procesu przekazywania energii cieplnej, tzn. temperaturę i czas lutowania w zależności od parametrów metody lub dokładniej urządzenia wytwarzającego i przekazującego tę energię do części łączonych. Powyższe charakterystyki nazwane charakterystykami termicznymi metody lutowania umożliwiają wygenerowanie charakterystyk termicznych procesu łączenia o dowolnych parametrach.

W postaci wartości liczbowych, w ujęciu statystycznym, opisano podstawowe własności połączeń lutowanych. Kształt charakterystyki termicznej procesu łączenia i sposób przekazywania energii cieplnej oraz inne cechy metody lutowania powinny się przyczynić do zróżnicowania wartości liczbowych tych własności.

Oprócz własności podstawowych połączeń lutowanych, do których zaliczono przede wszystkim rezystancję i wytrzymałość mechaniczną, będą obserwowane i opisywane pewne niewymierne cechy tzn. takie, które trudno scharakteryzować wartościami liczbowymi. Dla jednoznaczności poglądów cechy te opisano w sposób umowny. W taki sposób będą podawane: wygląd zewnętrzny próbek po lutowaniu, ukształtowanie mikro i makrostruktury połączeń oraz pewne cechy technologiczne i eksploatacyjne urządzenia i samej metody lutowania.

##### 3.1.2. Czynniki przyjęte jako zmienne niezależne. Zakres zmienności, wartości liczbowe

Do zmiennych niezależnych związanych z parametrami lutowania, według danych sformułowanych w opisie metody lutowania

(pkt 2.3), zaliczono dla lutowania gorącym gazem - temperaturę gazu i szybkość posuwu głowicy.

Do czynników stałych zaliczono wszystkie uznane za stałe oraz ustalone na podstawie analizy wyników badań rozpoznawczych (tabl. 8).

Zakres zmienności ustalono w zależności od wartości liczbowych czasu i temperatury lutowania, które na podstawie analizy zagadnienia i badań rozpoznawczych należy ustalić w zakresie temperatury  $200 \div 300^{\circ}\text{C}$  i czasu lutowania  $1 \div 4$  s.

### 3.1.3. Czynniki przyjęte jako zmienne zależne

Jako zmienne zależne przyjęto następujące wielkości:

- pierwotne - czas i temperatura lutowania (pole charakterystyki termicznej procesu lutowania),
- wtórne - rezystancja, wytrzymałość mechaniczna i wygląd zewnętrzny (ewentualnie makro i mikrostruktura), przed i po narażeniach mechano-klimatycznych, określające jakość połączeń lutowanych.

Ponadto w sposób umowny oszacowano pewne cechy technologiczne i eksploatacyjne poszczególnych metod lutowania.

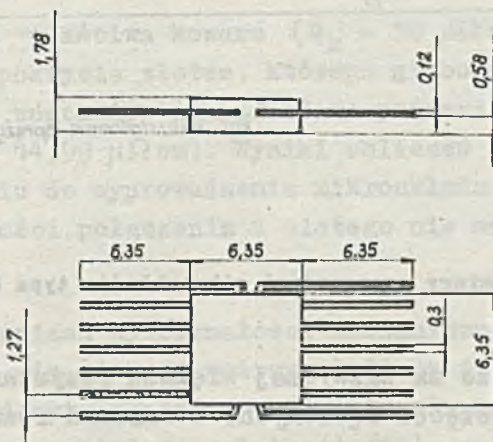
Sposób pomiaru oraz obliczenia poszczególnych wielkości jak również stosowaną aparaturę pomiarową podano w pkt 3.2.

## 3.2. Metodyka i technika badań, aparatura pomiarowa

### 3.2.1. Kształt testowej płytki drukowanej i połączenia lutowanego

Ze względu na rozpływanie spoiwa i trudności związane z dokładnym ułożeniem końców wyprowadzeń mikroukładów na powierzchni pól lutowniczych płytki drukowanej założono, że po-

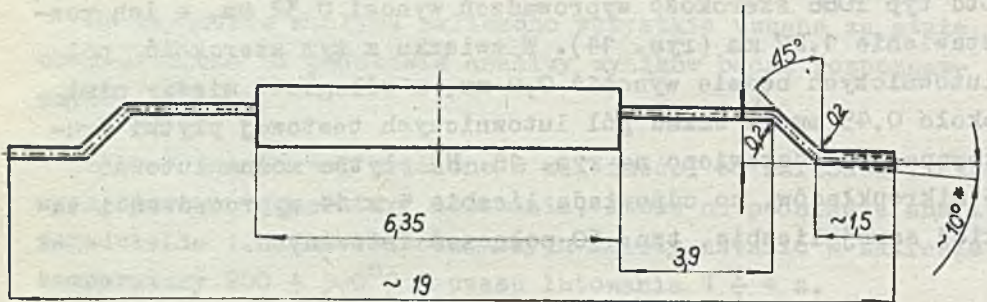
la lutownicze będą co najmniej dwukrotnie szersze od wyprowadzeń. W przeznaczonych do badań mikroukładach firmy Ferranti Ltd typ T086 szerokość wyprowadzeń wynosi 0,32 mm, a ich rozstawienie 1,27 mm (rys. 14). W związku z tym szerokość pól lutowniczych będzie wynosić 0,8 mm, a odległość między nimi około 0,45 mm <sup>\*)</sup>. Układ pól lutowniczych testowej płytki drukowanej przedstawiono na rys. 18. Na płytce można lutować 5 mikroukładów, co odpowiada liczbie 5 x 14 wyprowadzeń i takiej samej liczbie, tzn. 70 połączeń lutowanych.



Rys. 14. Kształt i wymiary obudowy mikroukładów typu krab (flat pack), standard TO-86

Wyprowadzenia mikroukładów powinny być tak wykrępowane, aby przylegały na pewnej długości do powierzchni pól lutowniczych. Kształt wyprowadzeń po krępowaniu przedstawiono na rys. 15. Część wyprowadzenia stykająca się z polem lutowniczym, nazywana stopką, powinna mieć długość wynikającą z odpowiednich wymagań elektrycznych i mechanicznych dla połączeń lutowanych.

\*) Obciążalność prądowa przewodów drukowanych o szerokości 0,8 mm wynosi 3A, a maksymalne napięcie pracy, przy odległości 0,4 mm wynosi 50 V [16]



\* kąt odkształcenia sprężystego max. 10°

Rys. 15. Kształt i wymiary wyprowadzeń mikroukładów typu krab po krępowaniu

Spoivo lutownicze ma zazwyczaj większą rezystancję właściwą od materiału części łączonych. Z warunku równości rezystancji obu materiałów, która gwarantuje równomierny spadek napięcia wynika, że dla połączenia lutowanego powinna być spełniona zależność (13)

$$L \gg \delta \cdot g \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

gdzie:

L - długość połączenia lutowanego (stopki), mm

$\delta$  - stosunek rezystancji właściwych  $\rho_s$  spoiwa i  $\rho_p$  przewodu lub  $\rho_w$  wyprowadzenia,  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$

g - grubość przewodu drukowanego lub wyprowadzenia, mm

Po podstawieniu odpowiednich wartości rezystancji właściwych przewodu drukowanego (miedzi) i stopu lutowniczego Sn60-Pb40 otrzymujemy:

$$L \gg \frac{14,99}{1,72} \cdot 0,070 = 0,6 \text{ mm}$$

Jeżeli założymy, że współczynnik bezpieczeństwa będzie wynosił 100% należy przyjąć:

$$L = 1,2 \text{ mm}$$

Rezystancja właściwa kowaru ( $Q_k = 70 \mu\Omega \text{ cm}$ ), nawet po uwzględnieniu pokrycia złotem, którego grubość nie przekracza kilku  $\mu\text{m}$ , jest znacznie większa od rezystancji spoiwa lutowniczego ( $Q_s = 14,99 \mu\Omega \text{ cm}$ ). Wyniki obliczeń rezystancji spoiny w odniesieniu do wyprowadzenia mikroukładu prowadzą do bardzo małej długości połączenia i dlatego nie można ich uwzględniać.

Przy obliczeniach wytrzymałości mechanicznej spoiny lutowniczej zakłada się, że jej wytrzymałość na ścinanie powinna być mniejsza od wytrzymałości wyprowadzenia na zerwanie, a więc powinna być spełniona zależność (14)

$$L \gg \beta \cdot g \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

gdzie:

$\beta$  - stosunek wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  wyprowadzenia do wytrzymałości na ścinanie  $R_t$  spoiwa lutowniczego.

Po podstawieniu odpowiednich wartości dla wyprowadzenia mikroukładu (kowar) i stopu lutowniczego Sn60-Pb40 otrzymujemy:

$$L \gg \frac{6300}{392} \cdot 0,12 = 1,9 \text{ mm}$$

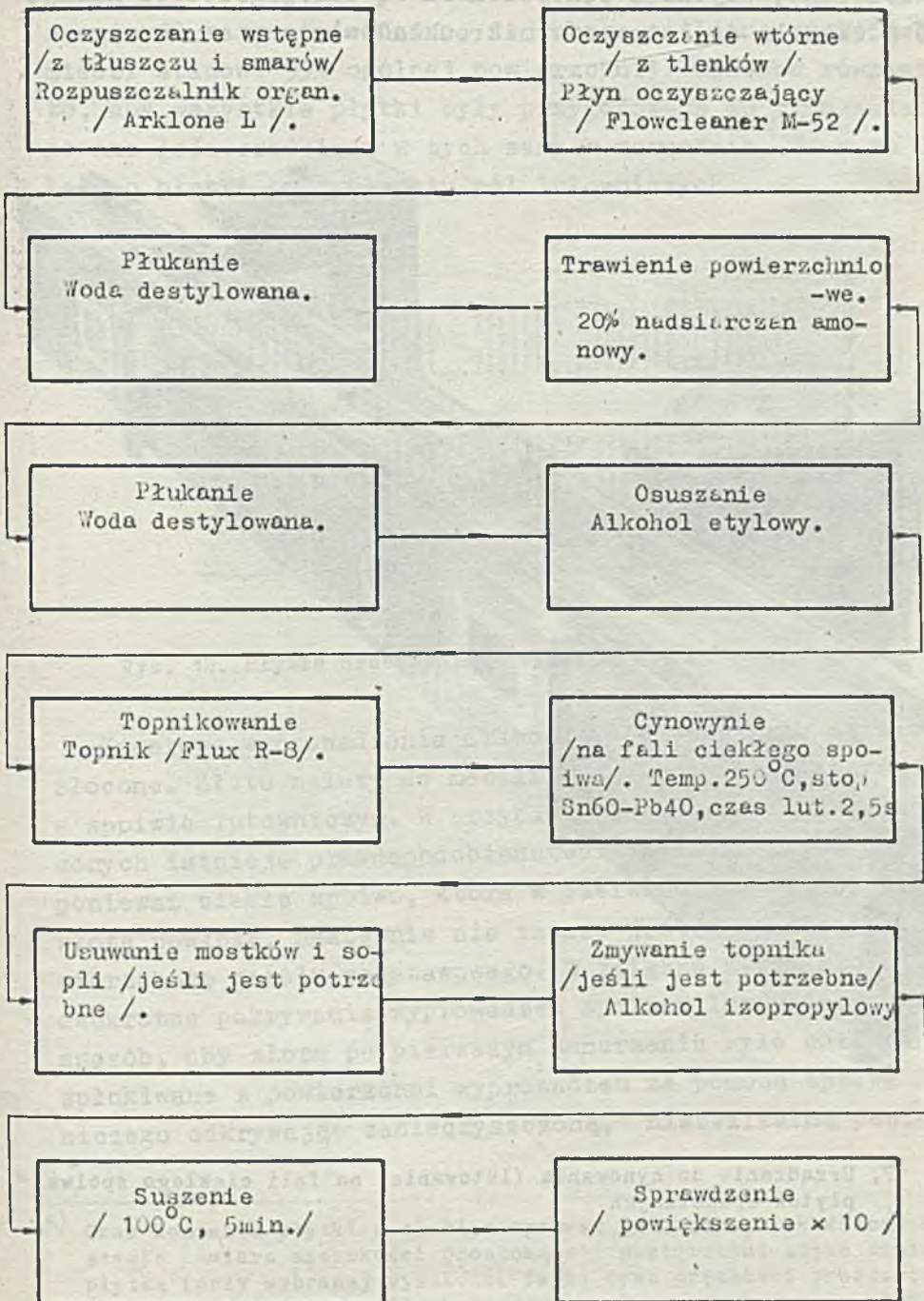
Jednakże porównywanie wytrzymałości spoiny z wytrzymałością wyprowadzenia jest w tym przypadku niecelowe, ponieważ

ciężar mikroukładu, który ponadto przyklejono do płytki drukowanej, jest bardzo mały a wytrzymałość mechaniczna kowaru duża. Z tego względu przyjęto ostatecznie długość stopki 1,5 mm.

### 3.2.2. Sposób przygotowania płytki testowej i mikroukładów do lutowania

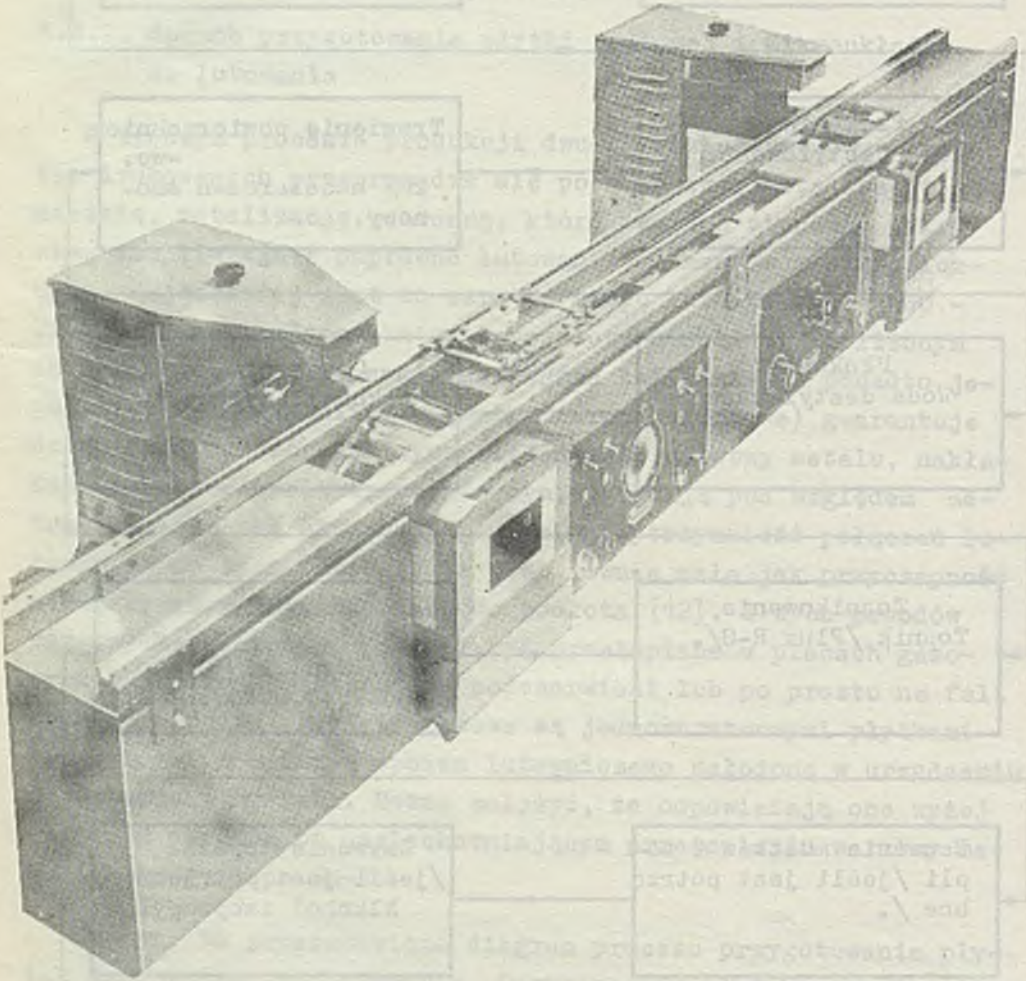
W typowym procesie produkcji dwu- i wielowarstwowych płytek drukowanych przeprowadza się po właściwej metalizacji miedzią, metalizację ochronną, którą powinno stanowić pokrycie, umożliwiające poprawne lutowanie elementów elektronicznych. Najczęściej jest to warstwa stopu lutowniczego Sn60 - Pb40. Jak stwierdzono, stop lutowniczy o składzie zbliżonym do eutektycznego, zapewnia najlepsze zwilżanie, a ponadto jego struktura krystaliczna (małe ziarna kolumnowe) gwarantuje dobrą przewodność elektryczną. Jednakże warstwy metalu, nakładane w procesie elektrochemicznym, nie mają pod względem metalurgicznym charakteru stopowego, a wytrzymałość połączeń lutowanych do tych powierzchni jest równie mała jak przyczepność samej warstwy metalizowanej do podłoża [12]. Z tych powodów warstwy metalizowane powinny być przetapiane w piecach gazowych za pomocą promienników podczerwieni lub po prostu na fali oiekłego spoiwa. Płytki testowe są jednowarstwowymi płytkami drukowanymi z warstwą spoiwa lutowniczego nałożoną w urządzeniu do lutowania na fali. Można założyć, że odpowiadają one wyżej opisanym płytkom po uszlachetniającym przetapianiu warstwy metalizowanej stopu Sn-Pb.

Na rys. 16 przedstawiono diagram procesu przygotowania płytek drukowanych do lutowania. Oczyszczenie płytek oraz ich topnikowanie i cynowanie wykonano na materiałach firmowych, wykorzystując urządzenia do lutowania na fali firmy Fry's Metals Ltd (rys. 17). Grubość pokrycia stopem Sn-Pb przy tym cynowaniu wynosi średnio 0,05 mm, przy czym nie więcej niż 10% pól lutowniczych pokrytych jest warstwą o grubości do 0,1 mm (jak



Rys. 16. Diagram przygotowania płytek drukowanych do lutowania

stwierdzono, płytki z pokryciem Sn-Pb o tej grubości nadają się doskonale do lutowania mikroukładów).



Rys. 17. Urządzenie do cynowania (lutowania) na fali ciekłego spoiwa płytek drukowanych

Parametry procesu cynowania dobrano w taki sposób, aby czas kontaktu miedzi z gorącym spoiwem lutowniczym, którego tempe-



ratura wynosi  $250^{\circ}\text{C}$ , był równy  $2,5 \text{ s}^{*)}$ , tzn. tyle, aby nastąpiło dobre zwilżenie powierzchni (po sprawdzeniu przy powiększeniu 10 razy stwierdzono, że dobrze zwilżona powierzchnia miedzi stanowi 95% ogólnej powierzchni). Zadbano również o to, aby wszystkie płytki były przygotowane do cynowania i cynowane jednocześnie i w tych samych warunkach. Na rys. 18 pokazano płytki po cynowaniu pól lutowniczych.

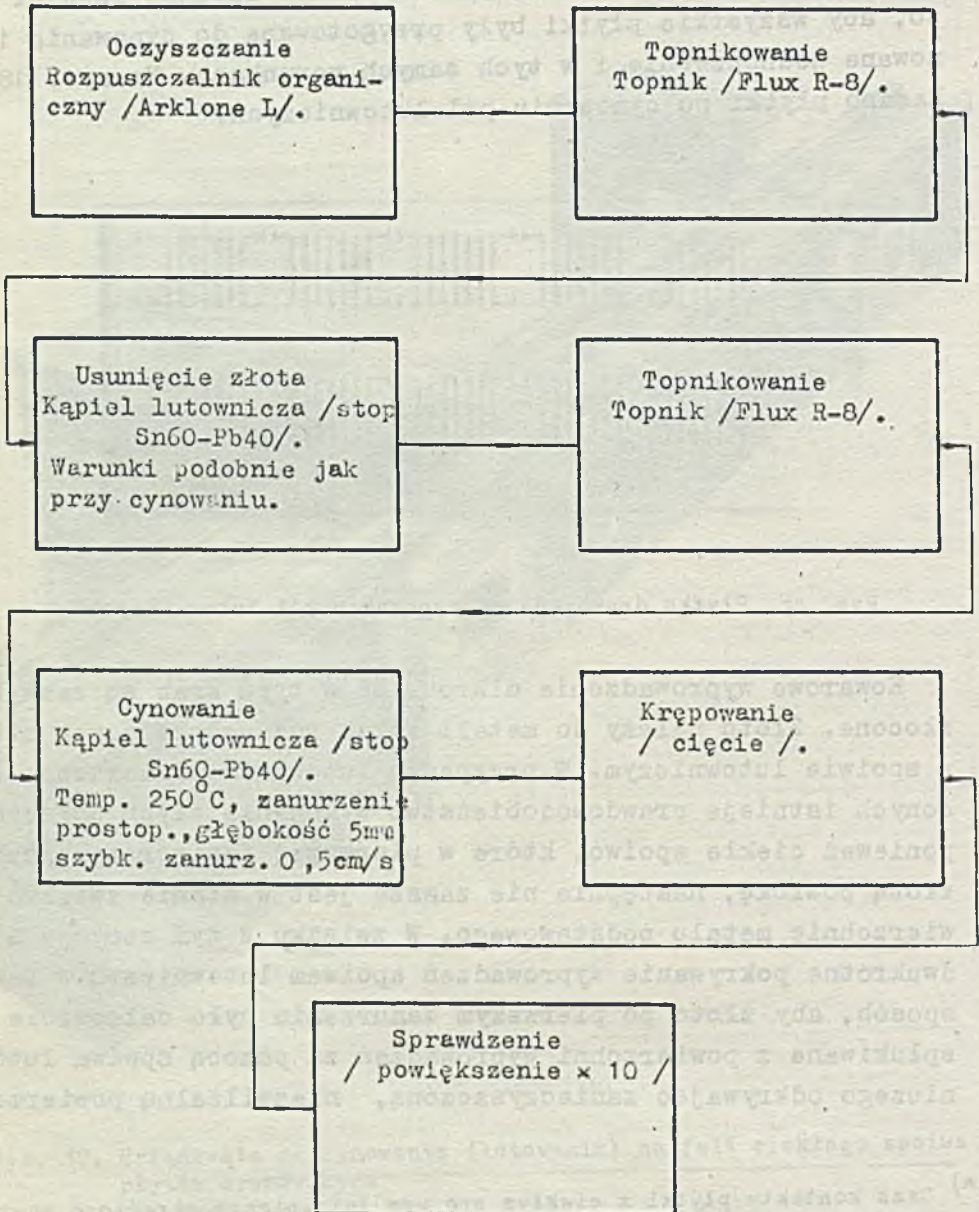


Rys. 18. Płytki drukowane po cynowaniu pól lutowniczych

Kowarowe wyprowadzenia mikroukładów typu krab są zazwyczaj złożone. Złoto należy do metali łatwo rozpuszczających się w spoiwie lutowniczym. W przypadku lutowania powierzchni złożonych istnieje prawdopodobieństwo wykonania złych połączeń, ponieważ ciekłe spoiwo, które w pierwszej fazie rozpuszcza złotą powłokę, następnie nie zawsze jest w stanie zwilżyć powierzchnię metalu podstawowego. W związku z tym stosuje się dwukrotne pokrywanie wyprowadzeń spoiwem lutowniczym w taki sposób, aby złoto po pierwszym zanurzeniu było całkowicie splukiwane z powierzchni wyprowadzeń za pomocą spoiwa lutowniczego odkrywając zanieczyszczoną, niezwilżalną powierzch-

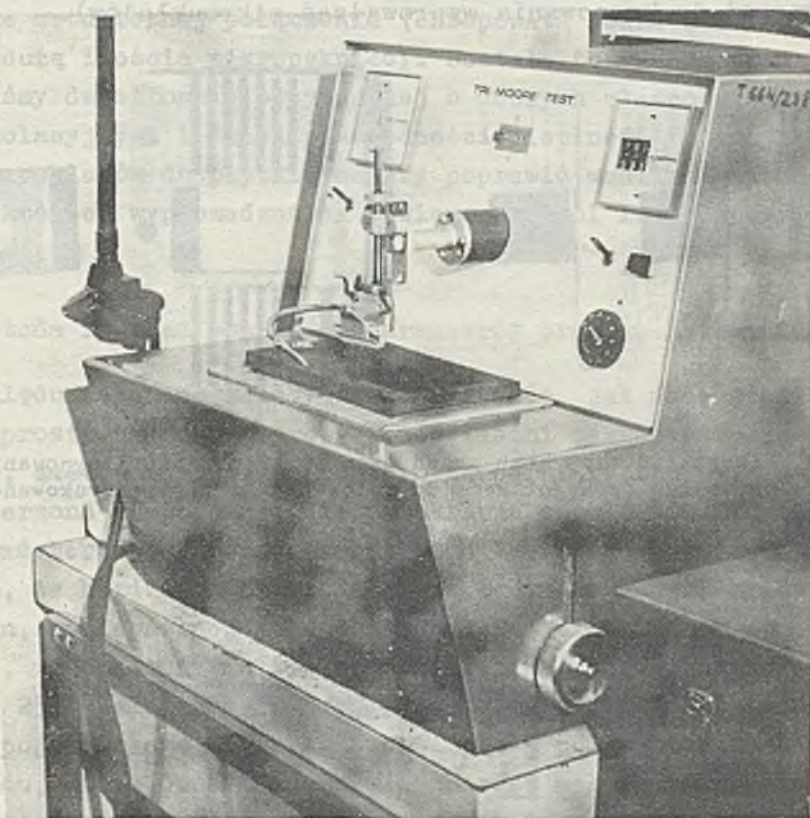
\*) Czas kontaktu płytki z ciekłym spoiwem lutowniczym określono na podstawie pomiaru szerokości prostokątnej powierzchni styku spoiwa z płytką (przy wybranej wysokości fali) oraz prędkości przesuwu płytki (szerokość powierzchni styku spoiwa z płytką drukowaną wynosi  $17 \text{ mm}$ , szybkość przesuwu płytki  $7 \text{ mm/s}$ , czas kontaktu  $17 : 7 = 2,45 \text{ s}$ )

nię metalu (patrz diagram procesu przygotowania mikroukładów, rys. 19). Zaletą urządzenia, w którym następuje cynowanie



Rys. 19. Diagram przygotowania wyprowadzeń mikroukładów do lutowania

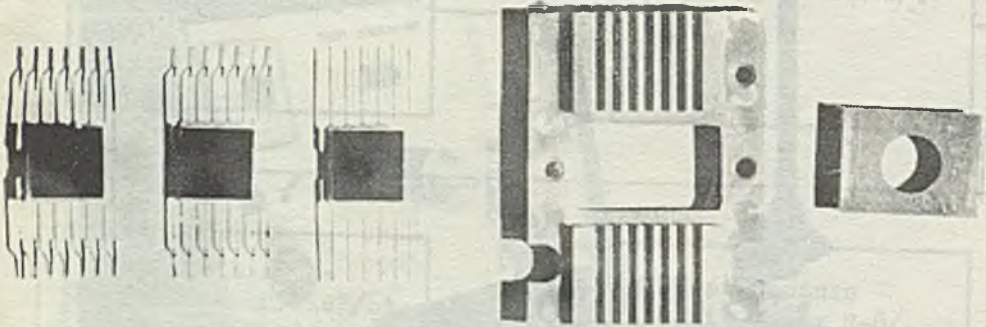
(rys. 20) jest możliwość regulacji temperatury i poziomu kąpeli, czasu zanurzania oraz szybkości wyciągania wyprowadzeń mikroukładów.



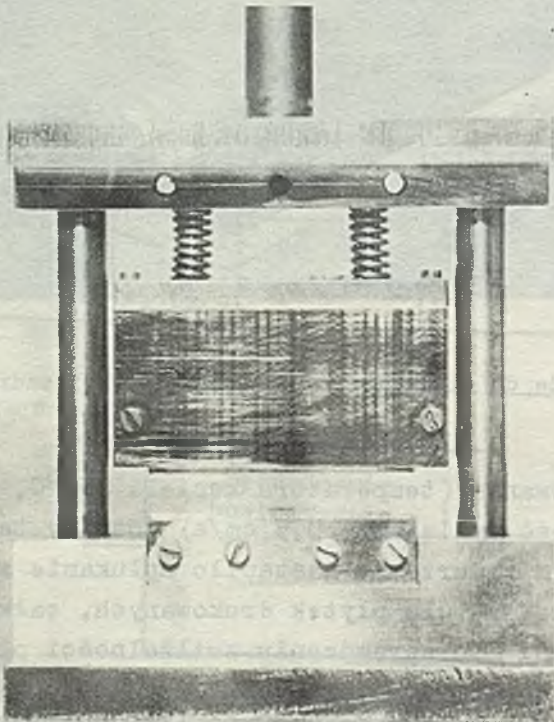
Rys. 20. Urządzenie do cynowania zanurzeniowego wyprowadzeń mikroukładów

Warunki cynowania (temperatura kąpeli  $250^{\circ}\text{C}$ , czas zanurzenia 5 s, szybkość wyciągania 0,5 cm/s) zostały tak dobrane, aby po pierwszym zanurzeniu nastąpiło splukanie złota, a po drugim, podobnie jak dla płytek drukowanych, całkowite zwilżenie powierzchni (po sprawdzeniu zwilżalności przy powiększeniu 10 razy stwierdzono, że jest ona lepsza od 95%). Grubość pokrycia stopem Sn-Pb wynosi średnio 0,03 mm i jest prawie identyczna dla wszystkich mikroukładów.

W diagramie na rys. 19 zaznaczono operację krępowania wyprowadzeń, która także należy do procesu przygotowania mikroukładów do lutowania. Na rys. 21 pokazano mikroukłady przed oraz po krępowaniu i cynowaniu wyprowadzeń (rys. 22 przedstawia przyrząd do krępowania wyprowadzeń mikroukładów).



Rys. 21. Mikroukład typu krab przed oraz po krępowaniu i cynowaniu wyprowadzeń (przygotowany do lutowania na płycie drukowanej)



Rys. 22. Krępownik do krępowania wyprowadzeń mikroukładów

### 3.2.3. Montaż mikroukładów na płycie drukowanej

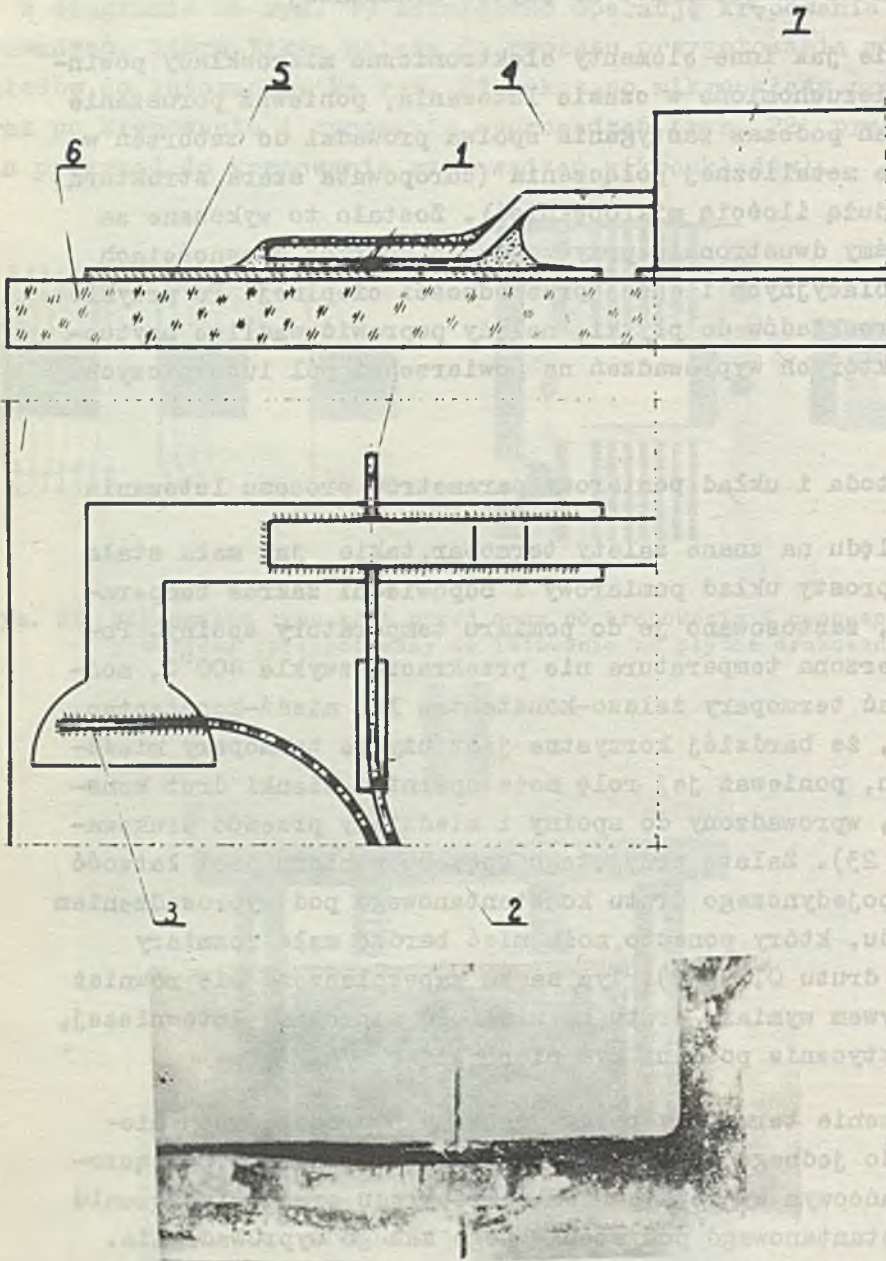
Podobnie jak inne elementy elektroniczne mikroukłady powinny być unieruchomione w czasie lutowania, ponieważ poruszanie wyprowadzeń podczas zastygania spoiwa prowadzi do zaburzeń w strukturze metalicznej połączenia (chropowata szara struktura spoiwa z dużą ilością mikropełnięć). Zostało to wykonane za pomocą taśmy dwustronnie przyczepnej o dobrych własnościach elektroizolacyjnych i dużej przewodności cieplnej. Po przyklejeniu mikroukładów do płytki, należy poprawić wadliwe usytuowanie niektórych wyprowadzeń na powierzchni pól lutowniczych.

### 3.2.4. Metoda i układ pomiarowy parametrów procesu lutowania

Ze względu na znane zalety termopar, takie jak mała stała czasowa, prosty układ pomiarowy i odpowiedni zakres temperatur pracy, zastosowano je do pomiaru temperatury spoiny. Ponieważ mierzona temperatura nie przekracza zwykle  $400^{\circ}\text{C}$ , można stosować termopary żelazo-konstantan lub miedź-konstantan. Zauważono, że bardziej korzystne jest użycie termopary miedź-konstantan, ponieważ jej rolę może spełniać cienki drut konstantanowy, wprowadzony do spoiny i miedziany przewód drukowany (rys. 23). Zaletą przyjętego sposobu pomiaru jest łatwość ułożenia pojedynczego drutu konstantanowego pod wyprowadzeniem mikroukładu, który ponadto może mieć bardzo małe rozmiary (średnica drutu  $0,05\text{ mm}$ ). Tym samym zabezpieczono się również przed wpływem wymiaru drutu na wielkość szczeliny lutowniczej, która praktycznie powinna być nieco większa<sup>\*)</sup>.

Podłączenie termopary polega na przylutowaniu drutu miedzianego do jednego z dwu owalnych pól lutowniczych, połączonych z krańcowym wyprowadzeniem mikroukładu oraz umieszczeniu drutu konstantanowego pod stopką tego samego wyprowadzenia. Umieszczając drut konstantanowy pod stopką wyprowadzenia na-

\*) Szczelina między powierzchniami części łączonych poniżej  $0,05\text{ mm}$  jest za mała ze względu na kapilarne wnikanie spoiwa lutowniczego

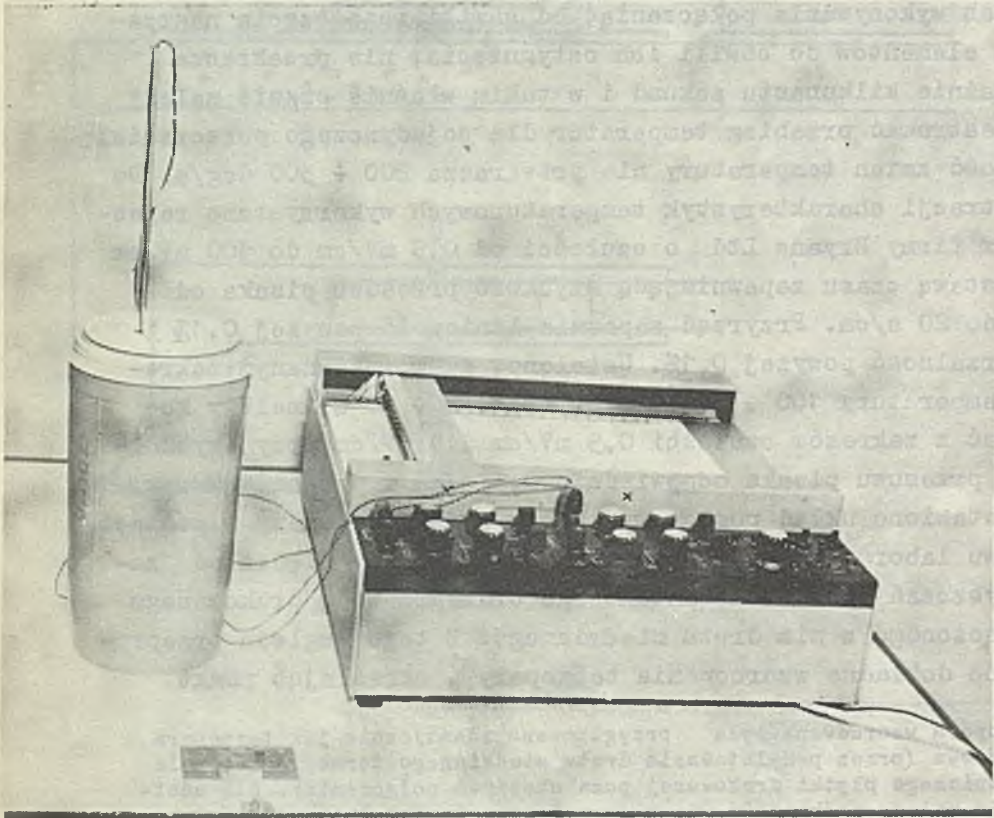


Rys. 23. Usytuowanie drutu konstantanowego termopary miedz-konstantan pod wyprowadzeniem mikroukładu (koniec drutu konstantanowego 1 usytuowano dokładnie na wysokości znaku kreskowego 2 na płycie drukowanej 6 i na środku stopki tego wyprowadzenia 4, drugim końcem termopary jest miedziany przewód drukowany 5, do którego należy przylutować w miejscu okrągłego pola lutowniczego drut miedziany 3, przedłużający tę część termopary)

leży zwrócić uwagę na dokładne usytuowanie go na wysokości znaku kreskowego, wytrawionego na płycie drukowanej, tzn. w połowie długości stopki. Dla uniknięcia zwarcia z końcówką lutującą należy pamiętać, aby drut przylegał do powierzchni pola lutowniczego.

Czas wykonywania połączenia, od chwili rozpoczęcia nagrzewania elementów do chwili ich ostygnięcia, nie przekracza przeważnie kilkunastu sekund i w takim właśnie czasie należy zarejestrować przebieg temperatur dla pojedynczego połączenia. Szybkość zmian temperatury nie przekracza  $200 \div 300$  deg/s. Do rejestracji charakterystyk temperaturowych wykorzystano rejestrator firmy Bryans Ltd o czułości od 0,5 mV/cm do 100 mV/cm z podstawą czasu zapewniającą szybkość przesuwu pisaka od 0,05 do 20 s/cm. Przyrząd zapewnia liniowość powyżej 0,1% i powtarzalność powyżej 0,1%. Ustalono, że w rozważanym zakresie temperatury  $100 \div 350^{\circ}\text{C}$  oraz czasu  $0 \div 20$  s, należy korzystać z zakresów czułości 0,5 mV/cm i 1 mV/cm przy szybkościach przesuwu pisaka odpowiednio 0,5 s/cm i 1 s/cm. Na rys. 24 przedstawiono układ pomiarowy, który został wykonany w postaci zestawu laboratoryjnego. Pomiar jest obarczony błędem od zanieczyszczeń drutu konstantanowego oraz przewodu drukowanego i połączonego z nim drutu miedzianego. Z tego względu przeprowadzono dokładne wzorcowanie termopary<sup>\*)</sup>, określając punkt

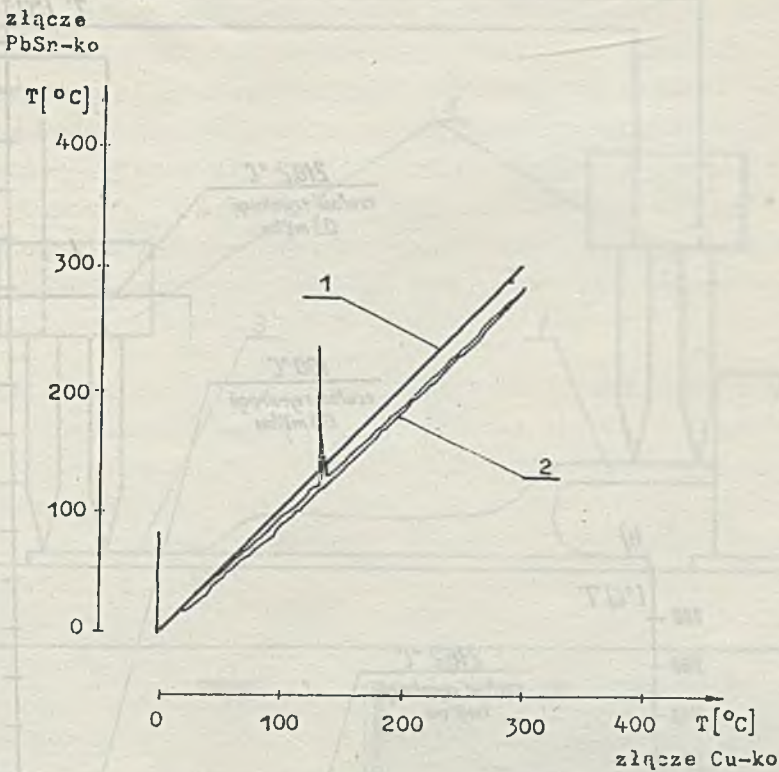
\*) Termopara wzorcowana była przygotowana identycznie jak termopara pomiarowa (przez przylutowanie drutu miedzianego termopary do pola lutowniczego płytki drukowanej poza obszarem połączenia). Dla uściślenia należy podkreślić, że przy wzorcowaniu całe pole lutownicze i oba końce termopary miedź-konstantan połączone warstwą spoiwa lutowniczego znajdowały się w temperaturze wzorcowania, podczas gdy przy pomiarach jeden z końców pola lutowniczego w miejscu przylutowania drutu miedzianego był faktycznie poza obszarem działania temperatury lutowania (rys. 23). Jest to równoznaczne z faktem, że rolę termopary pomiarowej spełniało złącze spoiwo-konstantan o nieco innej sile elektromotorycznej (rys. 25). Rejestrując jednak przebieg temperatury w czasie wykonywania połączenia uzyskuje się na wykresie wyraźnie widoczny przystanek eutektyczny (rys. 33) występujący dla każdego spoiwa w ściśle określonej temperaturze. Znając temperaturę eutektyczną spoiwa (dla stopu Sn60-Pb40 firmy Fry's wynosi ona około  $183^{\circ}\text{C}$ ) i temperaturę otoczenia oraz zakładając liniowość charakterystyk termoelementu, co dla termopary miedź-konstantan jest uzasadnione [14], można z dostateczną dokładnością odczytać ten wykres (charakterystykę termiczną połączenia lutowanego)



Rys. 24. Zestaw laboratoryjny do zdejmowania charakterystyk temperaturowych połączeń lutowanych (z rejestratorem, za pośrednictwem przewodów łączących, połączono zimne końce termopary miedź-konstantan, umieszczone w naczyniu z mieszaniną lodu i wody destylowanej; gorące końce termopary znajdują się w miejscu połączenia lutowanego na płytce drukowanej)

wrzenia wody i naftalenu oraz krzepnięcia czystej cyny i ołowiu a więc odpowiednio temperatury  $100^{\circ}\text{C}$ ;  $218,2^{\circ}\text{C}$ ;  $231,9^{\circ}\text{C}$ ;  $327,3^{\circ}\text{C}$  (rys. 26).

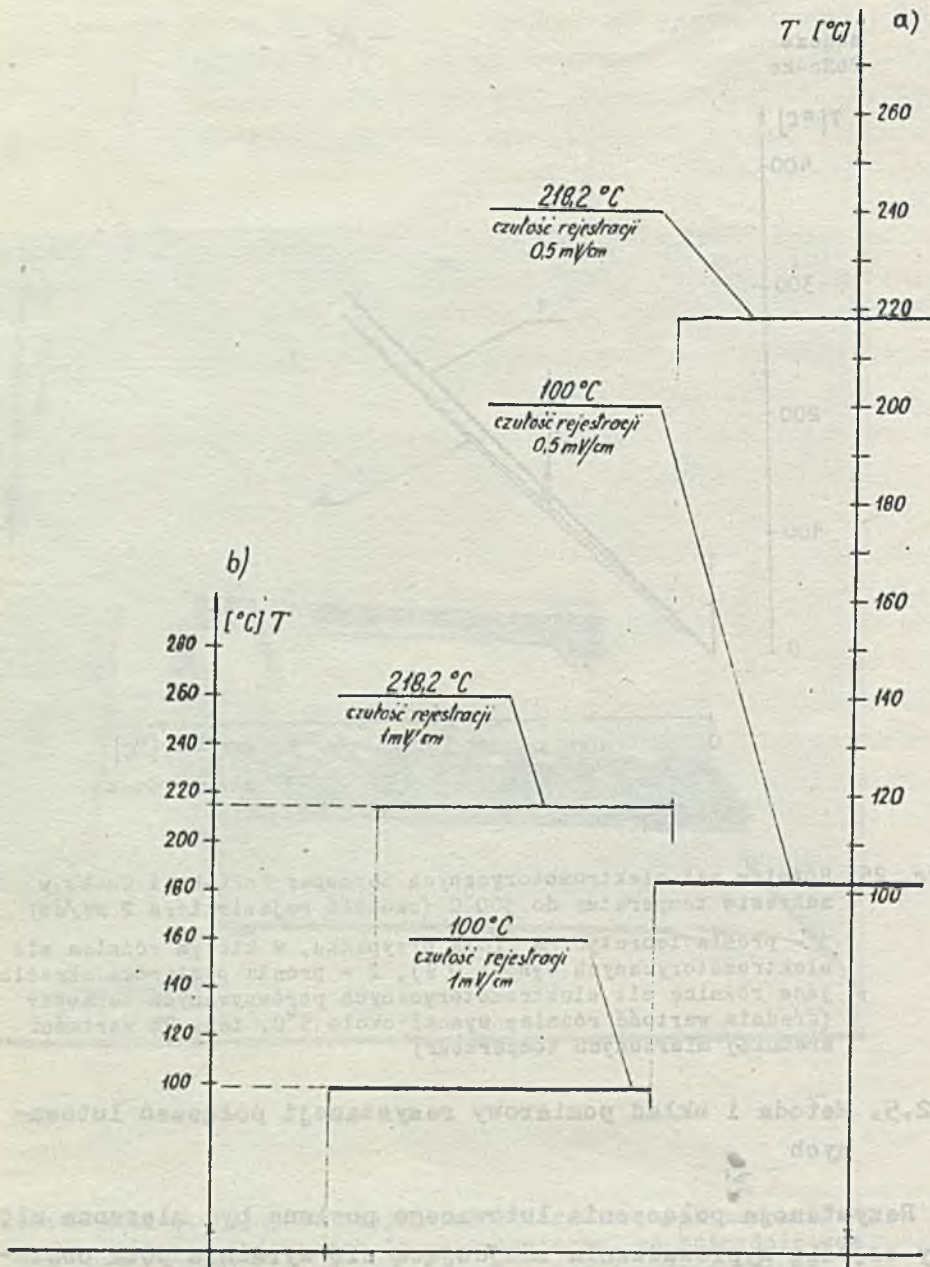




Rys. 25. Różnice sił elektromotorycznych termopar SnPb-ko i Cu-ko w zakresie temperatur do 300°C (czułość rejestratora 2 mV/cm)  
1 - prosta teoretyczna (dla przypadku, w którym różnica sił elektromotorycznych wynosi 0 V), 2 - prosta pomiarowa określająca różnicę sił elektromotorycznych porównywanych termopar (średnia wartość różnicy wynosi około 5°C, tzn. 2% wartości średniej mierzonych temperatur)

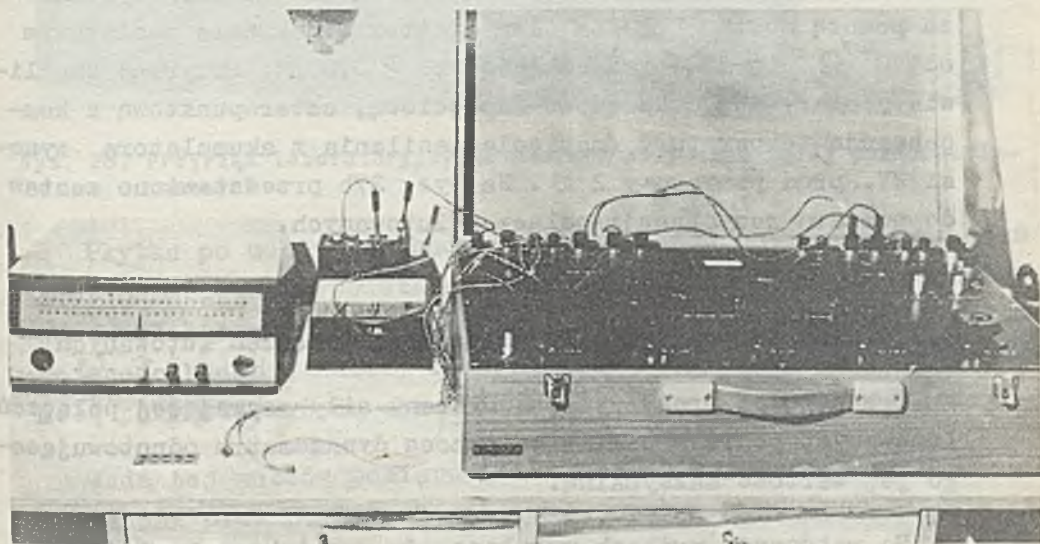
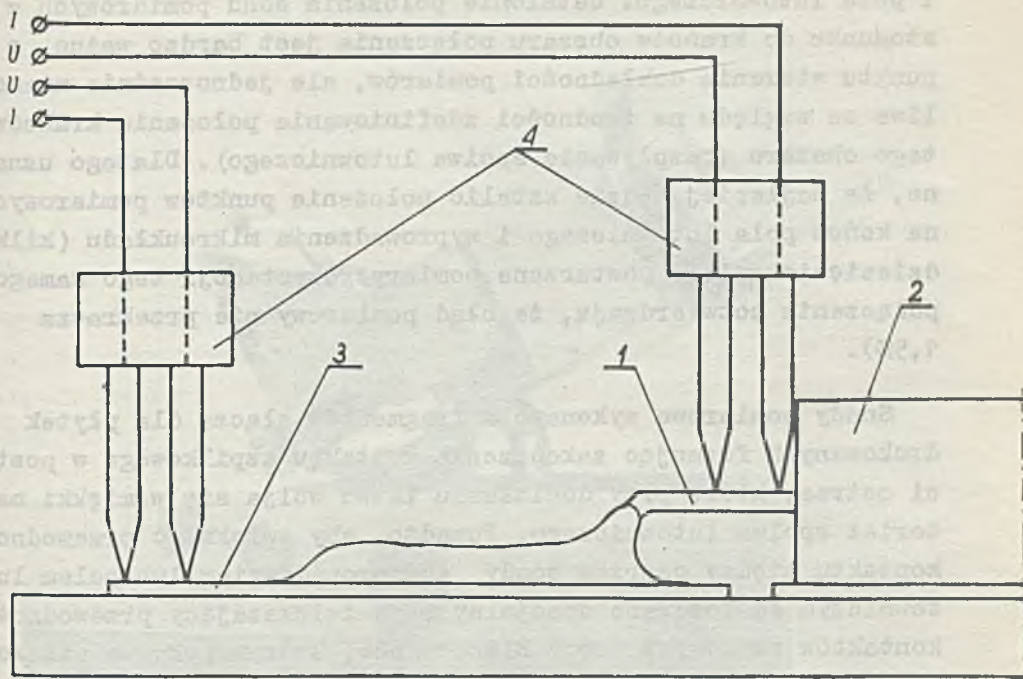
### 3.2.5. Metoda i układ pomiarowy rezystancji połączeń lutowanych

Rezystancja połączenia lutowanego powinna być mierzona między częścią wyprowadzenia znajdującą się wyraźnie poza obszarem połączenia, a częścią pola lutowniczego również poza tym obszarem (rys. 27a). Tak więc do faktycznej rezystancji połączenia będzie dodawana rezystancja pewnej części wyprowadzenia



Rys. 26. Skala temperaturowa dla termopary miedz-konstantan (skalę pokazano w powiązaniu z rzeczywistą charakterystyką temperatury wrzenia wody i naftalenu tzn.  $100^\circ\text{C}$  i  $248,2^\circ\text{C}$ )

- a) skala temperaturowa przy czułości rejestratora  $0,5 \text{ mV/cm}$
- b) skala temperaturowa przy czułości  $1 \text{ mV/cm}$



Fys. 27. Układ pomiarowy do pomiaru rezystancji połączeń lutowanych

- a) ułożenie sond pomiarowych  
1 - wyprowadzenie, 2 - obudowa mikroukładu, 3 - pole lutownicze, 4 - sondy pomiarowe, 5 - przewody łączące
- b) mostek Kelwina z galwanometrem i amperomierzem w układzie do pomiaru rezystancji połączeń lutowanych (na zdjęciu widoczna płytka z mikroukładami i sondy do pomiaru metodą czteropunktową)

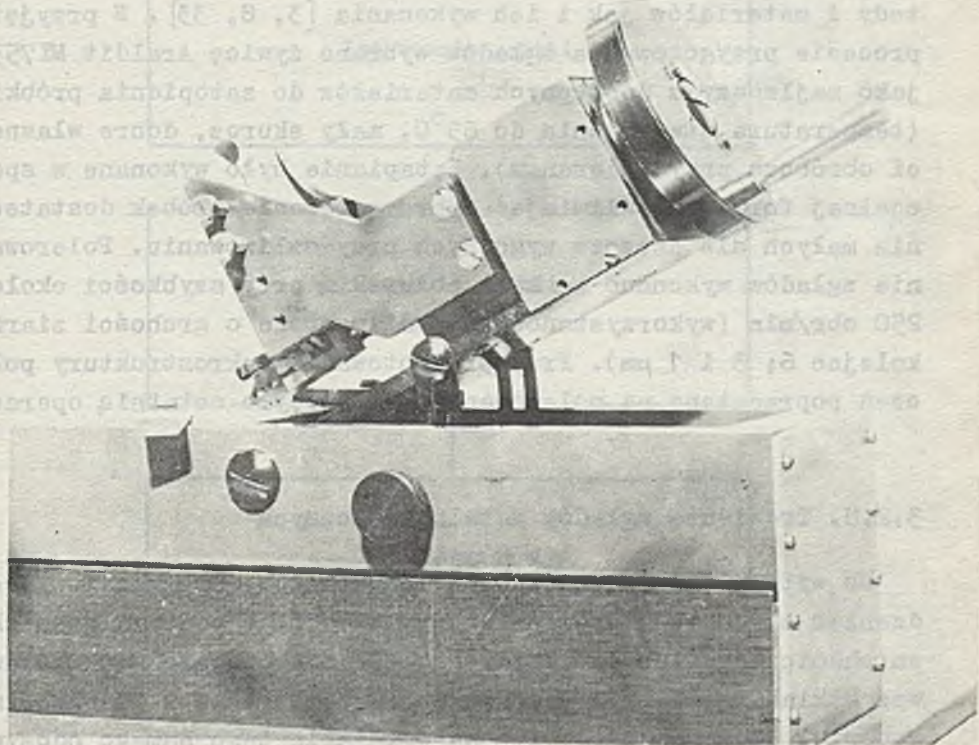
i pola lutowicznego. Ustalenie położenia sond pomiarowych w stosunku do krańców obszaru połączenia jest bardzo ważne z punktu widzenia dokładności pomiarów, ale jednocześnie niemożliwe ze względu na trudności zdefiniowania położenia krańców tego obszaru (rozpływanie spoiwa lutowicznego). Dlatego uznano, że najlepiej będzie ustalić położenie punktów pomiarowych na końcu pola lutowicznego i wyprowadzenia mikroukładu (kilkudziesięciokrotnie powtarzane pomiary rezystancji tego samego połączenia potwierdzają, że błąd pomiarowy nie przekracza 1,5%).

Sondy pomiarowe wykonano z fragmentów złącza dla płytek drukowanych formując zakończenie kontaktu szpilkowego w postaci ostrza, które przy dociskaniu łatwo wbija się w miękki materiał spoiwa lutowicznego. Ponadto, aby zwiększyć przewodność kontaktu między ostrzem sondy a wyprowadzeniem lub polem lutowicznym zastosowano specjalny płyn zwiększający przewodność kontaktów stykowych firmy Electrolube, którym pokrywa się końce sond przed każdym pomiarem rezystancji. Pomiary wykonano za pomocą mostku Kelwina firmy Tettex o zakresie pomiarowym od  $10^{-7}\Omega$  do  $110\Omega$  i dokładności  $\pm 0,003\%$ . Przyrząd umożliwia pomiary metodą prądowo-napięciową, czteropunktową z kompensacją temperatury (napięcie zasilania z akumulatora wynosi 2V, prąd pomiarowy 2 A). Na rys. 27b przedstawiono zestaw do pomiaru rezystancji połączeń lutowanych.

### 3.2.6. Metoda pomiaru siły zrywającej połączeń lutowanych

Przyjęto najprostszy sposób oceny siły zrywającej połączeń lutowanych poprzez pomiar za pomocą dynamometru odnotowującego jej wartość maksymalną.

Po wstępnych próbach ustalono, że największa wartość siły zrywającej dane połączenie występuje w przypadku zrywania pod kątem  $45^{\circ}$  w stosunku do powierzchni styku części łączonych (rys. 28).



Rys. 28. Przyrząd laboratoryjny do pomiaru siły zrywającej połączeń lutowanych

Płytkę po odcięciu obudowy mikroukładów od ich wyprowadzeń jest zamocowana w podstawce. Po zaciśnięciu uchwyty, pochyłonego pod kątem  $45^{\circ}$  do podstawki, na końcu wyprowadzenia podlegającego badaniu należy równomiernie napinać dynamometr za pomocą pokrętła, aż do zerwania połączenia lub wyprowadzenia.

Wadą tej metody pomiaru jest zmienna szybkość napinania, co jednak przy pomiarach statystycznych nie powinno mieć istotnego wpływu na końcowy wynik pomiaru.

### 3.2.7. Sposób przygotowania zglądów do oceny metalograficznej połączeń lutowanych

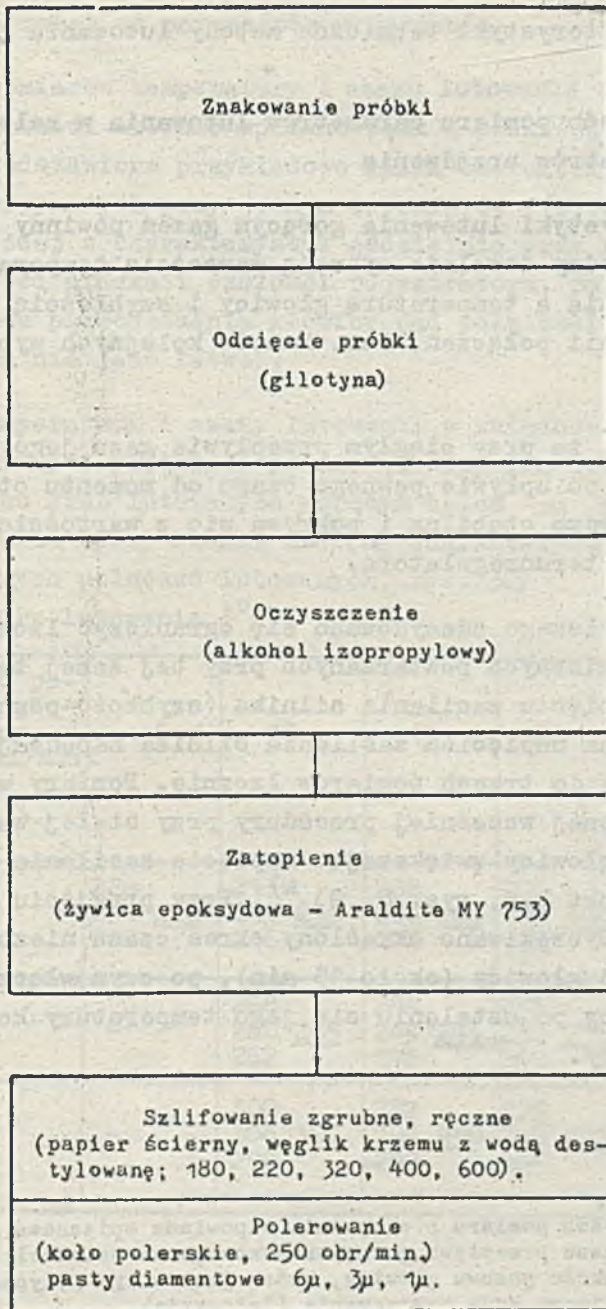
Wykonanie zglądu połączenia lutowanego jest zazwyczaj bardzo trudne. Nieomal każda z operacji (patrz diagram przygoto-

wania zglądu połączeń lutowanych, rys. 29) jest skomplikowana i pracochłonna zarówno z punktu widzenia doboru właściwej metody i materiałów jak i ich wykonania [3, 8, 33]. W przyjętym procesie przygotowania zglądów wybrano żywicę Araldit M753 jako najlepszy z dostępnych materiałów do zatopienia próbki (temperatura utwardzania do 65°C, mały skurcz, dobre własności obróbcze przy ścieraniu). Zatapianie było wykonane w specjalnej formie umożliwiającej przygotowanie próbek dostatecznie małych ale jeszcze wygodnych przy szlifowaniu. Polerowanie zglądów wykonano na kole polerskim przy szybkości około 250 obr/min (wykorzystano pasty diamentowe o grubości ziarna kolejno 6; 3 i 1  $\mu\text{m}$ ). Przy przygotowaniu makrostruktury połączeń porzeczano na polerowaniu, które było ostatnią operacją.

### 3.2.8. Trawienie zglądów metalograficznych

Do wytrawienia zglądów połączenia między spoiwem i wyprowadzeniem elementu stosowano odczynniki różne pod względem składu chemicznego lub stężenia. Na ogół nie udawało się wytrawić wszystkich materiałów wchodzących w połączenie w jednakowym stopniu, gdyż podatność ich na działanie tego samego odczynnika jest bardzo różna. Przyjęto więc zasadę trawienia składnika mniej odpornego, którym jest spoiwo, takim odczynnikiem, który by ujawniał istniejące fazy międzymetaliczne. Próby trawienia bardziej odpornego materiału prowadziły do nadmiernego wytrawienia nie tylko spoiwa lecz i strefy przejściowej, co w efekcie dawało obraz nieczytelny. Trawienie połączenia między spoiwem i przewodem drukowanym było mniej kłopotliwe. Poniżej podano odczynniki używane do trawienia:

- a) trawienie mikrostruktury strefy przejścia między spoiwem i miedzianym przewodem drukowanym - 20% siarczan sodu, kilka kropel kwasu solnego,
- b) trawienie mikrostruktury strefy przejścia między spoiwem i wyprowadzeniem mikroukładu - 100  $\text{cm}^3$  alkoholu etylowego, 10  $\text{cm}^3$  kwasu solnego, 5  $\text{cm}^3$  kwasu azotowego.



Rys. 29. Diagram przygotowania zglądów do oceny makroskopowej

### 3.3. Wyniki badań

#### 3.3.1. Charakterystyki termiczne metody lutowania gorącym gazem

##### 3.3.1.1. Sposób pomiaru parametrów lutowania w zależności od parametrów urządzenia

Charakterystyki lutowania gorącym gazem powinny określać zależność między dowolnie wybraną wartością temperatury i czasu lutowania a temperaturą głowicy i szybkością jej posuwu wzdłuż linii połączeń, tzn. końców kolejnych wyprowadzeń mikroukładu.

Zauważono, że przy ciągłym przepływie gazu jego temperatura w głowicy po upływie pewnego czasu od momentu otwarcia zaworu jest bardzo stabilna i pokrywa się z wartością ustawioną na wskaźniku termoregulatora.

Wobec powyższego zdecydowano się ograniczyć liczbę charakterystyk termicznych powtarzanych przy tej samej temperaturze głowicy i napięciu zasilania silnika (szybkość posuwu głowicy jest określona napięciem zasilania silnika napędzającego śrubę pociągową) do trzech pomiarów łącznie. Pomiarów wykonano według ustalonej wcześniej procedury przy stałej wartości temperatury głowicy zwiększając napięcie zasilania silnika napędowego (pkt 2.5, rys. 8, 9) \*). Przy przejściu do wyższej temperatury wyczekiwano określony okres czasu niezbędny do nagrzania się głowicy (około 15 min), po czym włączano przepływ gazu, aby po ustaleniu się jego temperatury kontynuować dalsze pomiary.

---

\*) Przyjęty sposób pomiaru niezupełnie odpowiada opisanemu na rys. 9; w miejsce czasu przepływu gazu, oznaczonego na osi odciętych, wprowadzamy szybkość posuwu głowicy, która jest w tym przypadku parametrem określającym czas nagrzewania (lutowania)



3.3.1.2. Wyniki pomiarów czasu i temperatury lutowania w zależności od parametrów urządzenia

Wyniki pomiarów temperatury i czasu lutowania zebrano w tabeli 9 (wartości średnie wpisano obok i podkreślono). Na rys. 30 przedstawiono przykładowo kilka charakterystyk termicznych otrzymanych przy jednym z pomiarów (zdecydowano się na zapis każdej z charakterystyk oddzielnie przy nieco mniejszej szybkości pisaka i czułości rejestratora, ponieważ uchwycenie momentu przechodzenia głowicy nad połączeniem z termoparą pomiarową nie jest łatwe).

Tabl. 9. Temperatury i czasy lutowania w zależności od temperatury i prędkości posuwu głowicy dla mikroukładów typu krab lutowanych gorącym helem za pomocą urządzenia firmy Planar Ltd (wg charakterystyk temperaturowych połączeń lutowanych, rys. 30)

a) Temperatury lutowania ( $^{\circ}\text{C}$ )

Prędkość posuwu głowicy (cm/min) \ Temperatura gazu w głowicy ( $^{\circ}\text{C}$ )	5	10	15	20	25
250	228 232 <u>225</u> 220	213 215 <u>215</u> 216	208 208 <u>205</u> 202	200 196 <u>195</u> 192	-
300	-	268 260 <u>265</u> 262	244 244 <u>245</u> 246	232 237 <u>235</u> 240	224 228 <u>225</u> 226
350	-	300 306 <u>300</u> 298	282 291 <u>290</u> 292	275 280 <u>275</u> 264	262 257 <u>260</u> 256

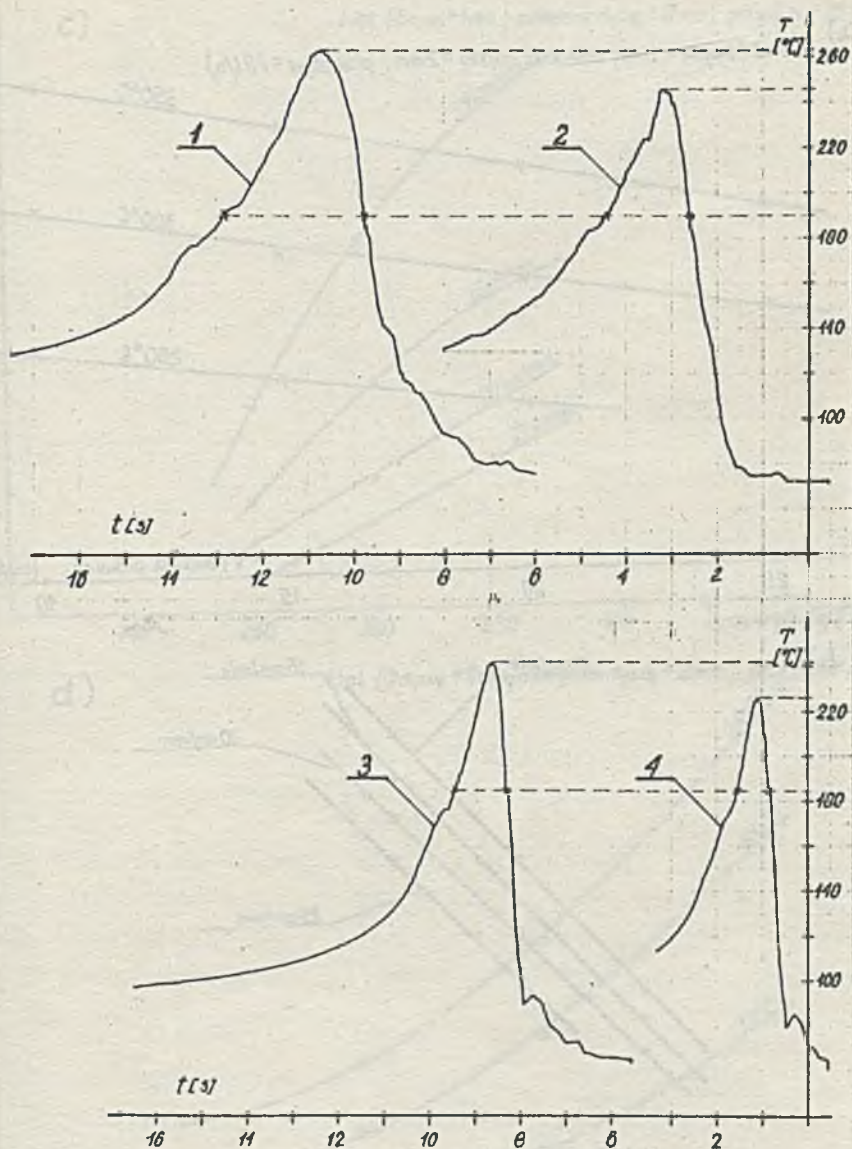
b) Czasy lutowania (s)

Temperatura gazu w głowicy (°C) \ Prędkość posuwu głowicy (cm/min)	5	10	15	20	25
250	4,4 4,6 <u>4,3</u> 4,0	1,6 1,6 <u>1,6</u> 1,7	0,9 0,9 <u>0,9</u> 0,9	0,6 0,5 <u>0,4</u> 0,3	-
300	-	3,3 3,1 <u>3,2</u> 3,2	1,8 1,7 <u>1,8</u> 2,0	1,0 1,0 <u>1,0</u> 1,1	0,7 0,7 <u>0,7</u> 0,7
350	-	4,1 4,2 <u>4,1</u> 4,1	2,5 2,6 <u>2,5</u> 2,6	1,6 1,7 <u>1,6</u> 1,7	1,2 1,1 <u>1,2</u> 1,3

3.3.1.3. Określenie charakterystyk termicznych metody lutowania gorącym gazem.

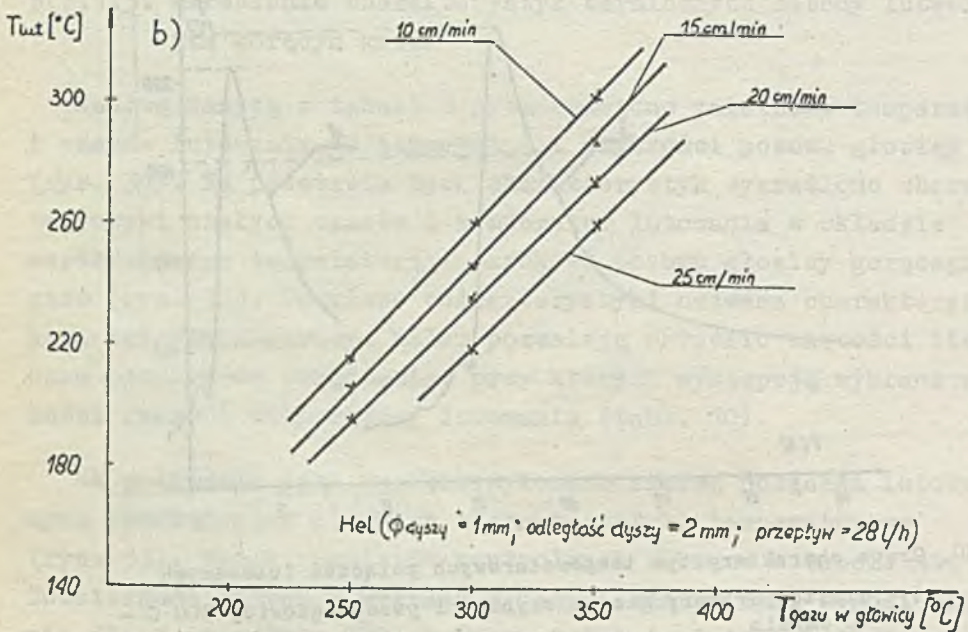
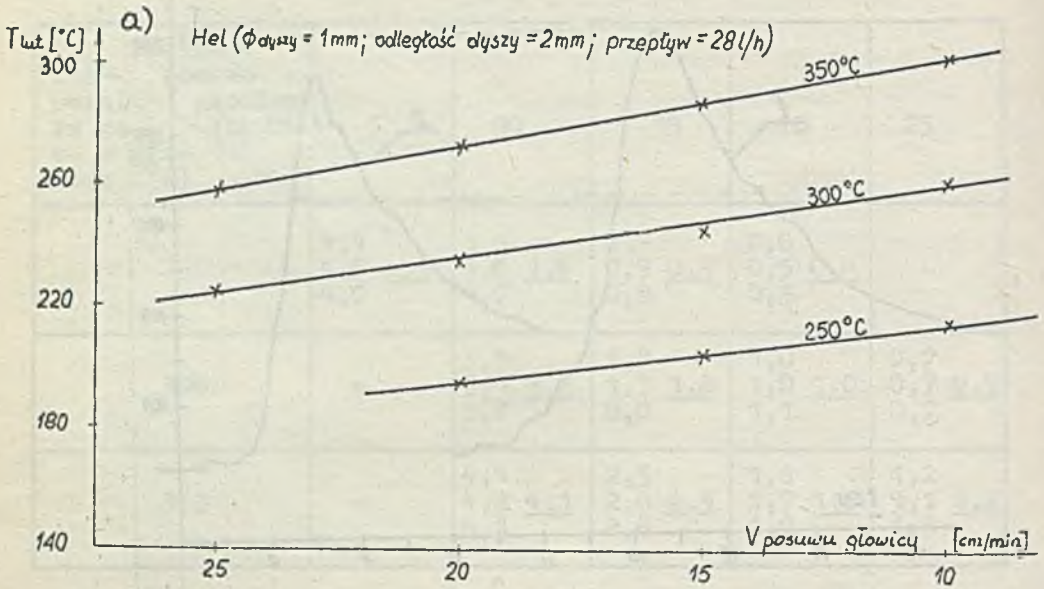
Według danych z tabeli 9 przedstawiono zależność temperatur i czasów lutowania od temperatur i szybkości posuwu głowicy (rys. 31). Na podstawie tych charakterystyk wykreślono charakterystyki stałych czasów i temperatur lutowania w układzie współrzędnych temperatura i szybkość posuwu głowicy gorącego gazu (rys. 32). Powyższe charakterystyki nazwane charakterystykami lutowania gorącym helum pozwalają określić wartości liczbowe parametrów urządzenia, przy których występują wybrane wartości czasu i temperatury lutowania (tabl. 10).

Na podstawie tych wyników wykonano szereg połączeń lutowanych sporządzając dla nich charakterystyki temperaturowe (rys. 33). Wyniki pomiarów kontrolnych zebrano w tabeli 11. Rozbieżność danych z wykresu z danymi kontrolnymi wynosi średnio dla temperatury 4°C (1,5% wartości średniej) i dla czasu 0,1 s (5% wartości średniej).



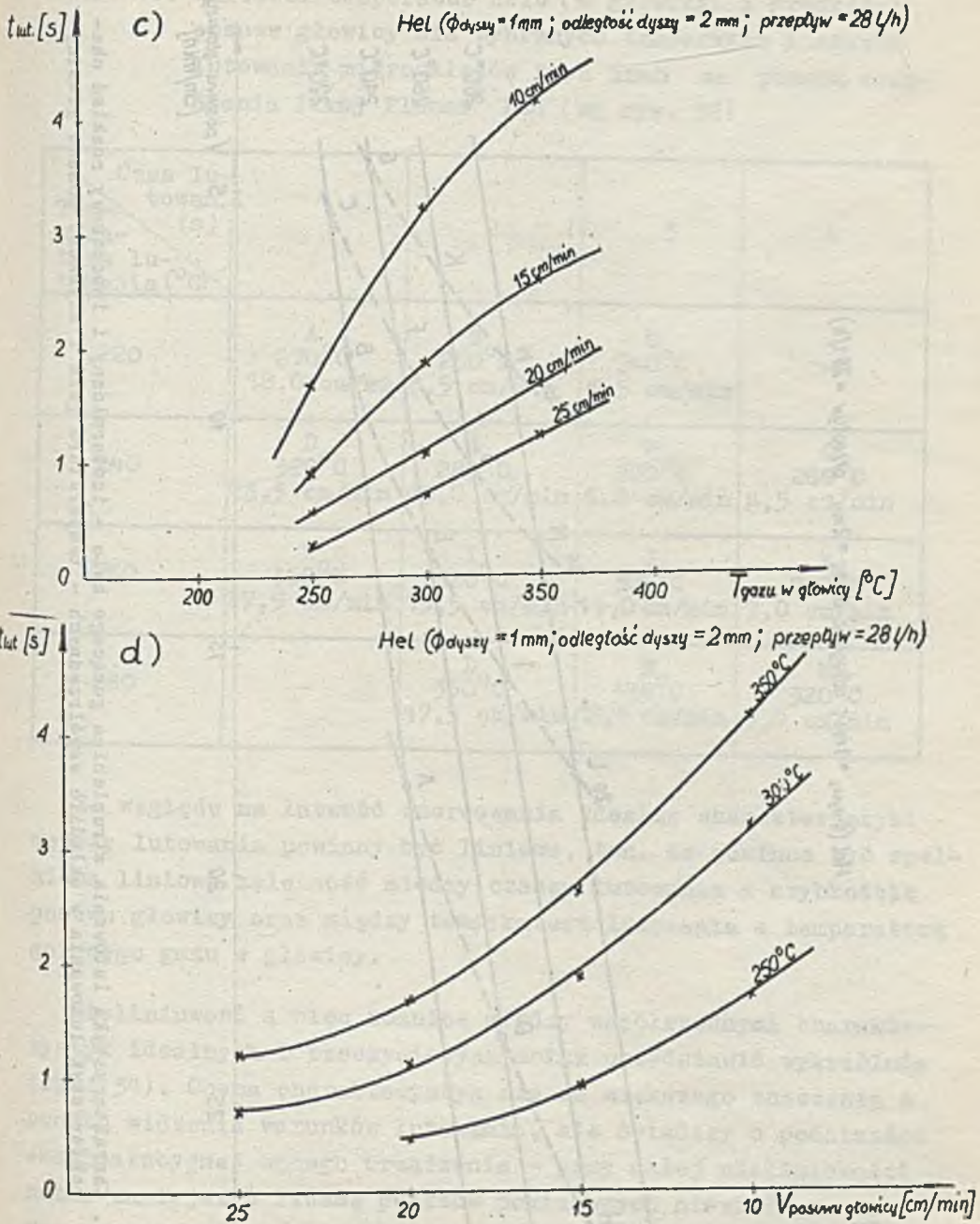
Rys. 30. Grupa charakterystyk temperaturowych połączeń lutowanych

- 1 - dla temperatury gazu i szybkości posuwu głowicy  $300^{\circ}\text{C}$  - 10 cm/min
- 2 - dla temperatury gazu i szybkości posuwu głowicy  $300^{\circ}\text{C}$  - 15 cm/min
- 3 - dla temperatury gazu i szybkości posuwu głowicy  $300^{\circ}\text{C}$  - 20 cm/min
- 4 - dla temperatury gazu i szybkości posuwu głowicy  $300^{\circ}\text{C}$  - 25 cm/min



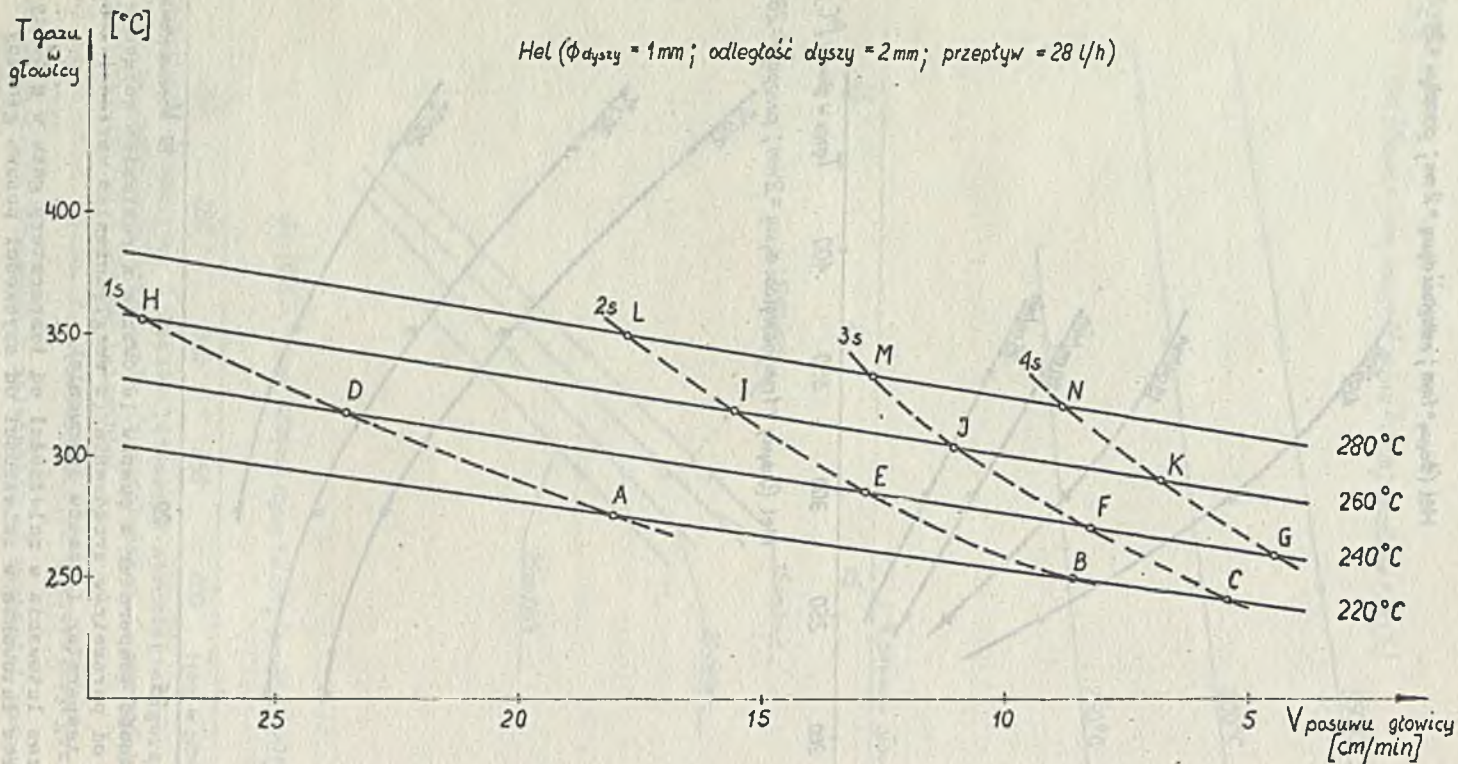
Rys. 31. Zależność temperatur i czasów lutowania strumieniem gorącego helu od parametrów urządzenia (z uwzględnieniem wartości średnich temperatur i czasów lutowania)

- temperatura lutowania w zależności od temperatury gazu w głowicy
- temperatura lutowania w zależności od szybkości posuwu głowicy



Rys. 31. Zależność temperatur i czasów lutowania strumieniem gorącego helu od parametrów urządzenia (z uwzględnieniem wartości średnich temperatur i czasów lutowania)

- c) czas lutowania w zależności od temperatury gazu w głowicy
- d) czas lutowania w zależności od szybkości posuwu głowicy



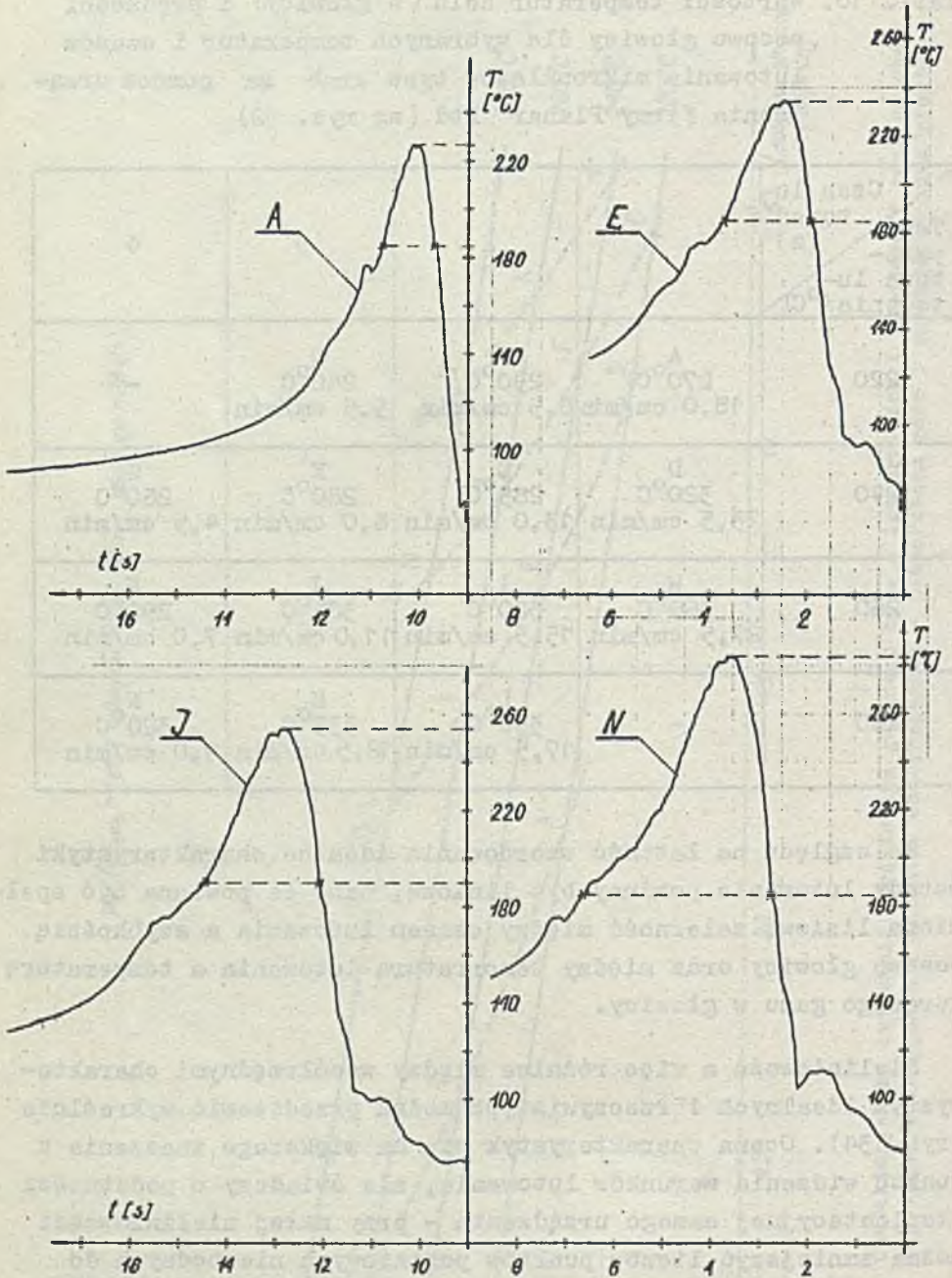
Rys. 32. Charakterystyka lutowania strumieniem gorącego helu - izotermiczny i izoczasowy rozkład charakterystyk lutowania w układzie współrzędnych - temperatura gazu i szybkość posuwu głowicy

Tabl. 10. Wartości temperatur helu (w głowicy) i prędkości posuwu głowicy dla wybranych temperatur i czasów lutowania mikroukładów typu krab za pomocą urządzenia firmy Planar Ltd (wg rys. 32)

Tem- pera- tura lu- towania (°C) \ Czas lu- towania (s)	1	2	3	4
220	A 270°C 18,0 cm/min	B 250°C 8,5 cm/min	C 240°C 5,5 cm/min	-
240	D 320°C 23,5 cm/min	E 285°C 13,0 cm/min	F 280°C 8,0 cm/min	G 260°C 4,5 cm/min
260	H 360°C 27,5 cm/min	I 320°C 15,5 cm/min	J 305°C 11,0 cm/min	K 290°C 7,0 cm/min
280	-	L 350°C 17,5 cm/min	M 335°C 12,5 cm/min	N 320°C 9,0 cm/min

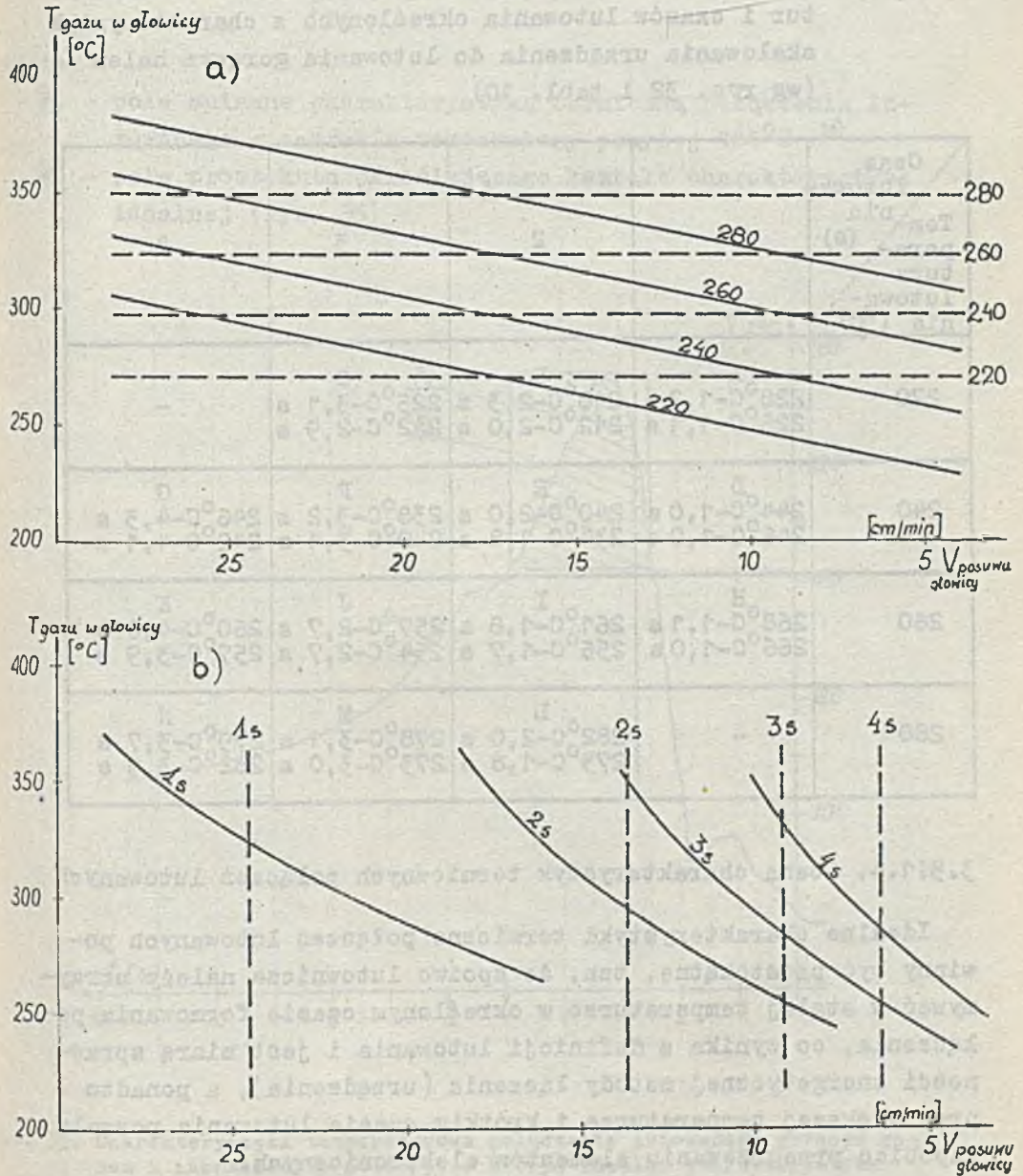
Ze względu na łatwość wzorcowania idealne charakterystyki metody lutowania powinny być liniowe, tzn. że powinna być spełniona liniowa zależność między czasem lutowania a szybkością posuwu głowicy oraz między temperaturą lutowania a temperaturą gorącego gazu w głowicy.

Nieliniowość a więc różnice między współrzędnymi charakterystyk idealnych i rzeczywistych można przedstawić wykreślnie (rys. 34). Ocena charakterystyk nie ma większego znaczenia z punktu widzenia warunków lutowania, ale świadczy o podatności eksploatacyjnej samego urządzenia - przy małej nieliniowości można zmniejszyć liczbę punktów pomiarowych niezbędnych do wzorcowania urządzenia, lub też przy specjalizowanej aparaturze technologicznej, wzorcować ją bezpośrednio w wartościach rzeczywistych czasu i temperatury lutowania.



Rys. 33. Charakterystyki temperaturowe połączeń, lutowanych przy wybranych parametrach urządzenia do lutowania strumieniem gorącego helu (oznaczonych literowo na rys. 32)





Rys. 34. Charakterystyki lutowania strumieniem gorącego helu na tle liniowych charakterystyk lutowania uważanych za idealne  
a) charakterystyki izotermiczne w układzie współrzędnych - temperatura gazu i szybkość posuwu głowicy  
b) charakterystyki izochasowe w układzie współrzędnych - temperatura gazu i szybkość posuwu głowicy

Tabl. 11. Rzeczywiste temperatury i czasy lutowania wyprowadzeń mikroukładów typu krab dla wybranych temperatur i czasów lutowania określonych z charakterystyk skalowania urządzenia do lutowania gorącym helem (wg rys. 32 i tabl. 10)

Czas lutowania (s) / Temperatura lutowania (°C)	1	2	3	4
220	<sup>A</sup> 228°C-1,2 s 226°C-1,1 s	<sup>B</sup> 218°C-2,3 s 212°C-2,0 s	<sup>C</sup> 225°C-3,1 s 222°C-2,9 s	-
240	<sup>D</sup> 244°C-1,0 s 246°C-1,0 s	<sup>E</sup> 240°C-2,0 s 234°C-1,8 s	<sup>F</sup> 238°C-3,2 s 240°C-3,1 s	<sup>G</sup> 246°C-4,3 s 242°C-4,1 s
260	<sup>H</sup> 268°C-1,1 s 266°C-1,0 s	<sup>I</sup> 261°C-1,8 s 256°C-1,7 s	<sup>J</sup> 257°C-2,7 s 254°C-2,7 s	<sup>K</sup> 260°C-4,0 s 257°C-3,9 s
280	-	<sup>L</sup> 282°C-2,0 s 273°C-1,8 s	<sup>M</sup> 278°C-3,1 s 273°C-3,0 s	<sup>N</sup> 279°C-3,7 s 282°C-3,9 s

### 3.3.1.4. Ocena charakterystyk termicznych połączeń lutowanych

Idealne charakterystyki termiczne połączeń lutowanych powinny być prostokątne, tzn. że spoiwo lutownicze należy utrzymywać w stałej temperaturze w określonym czasie formowania połączenia, co wynika z definicji lutowania i jest miarą sprawności energetycznej metody łączenia (urządzenia), a ponadto przy większej temperaturze i krótkim czasie lutowania pozwala zapobiec przegrzewaniu elementów elektronicznych.

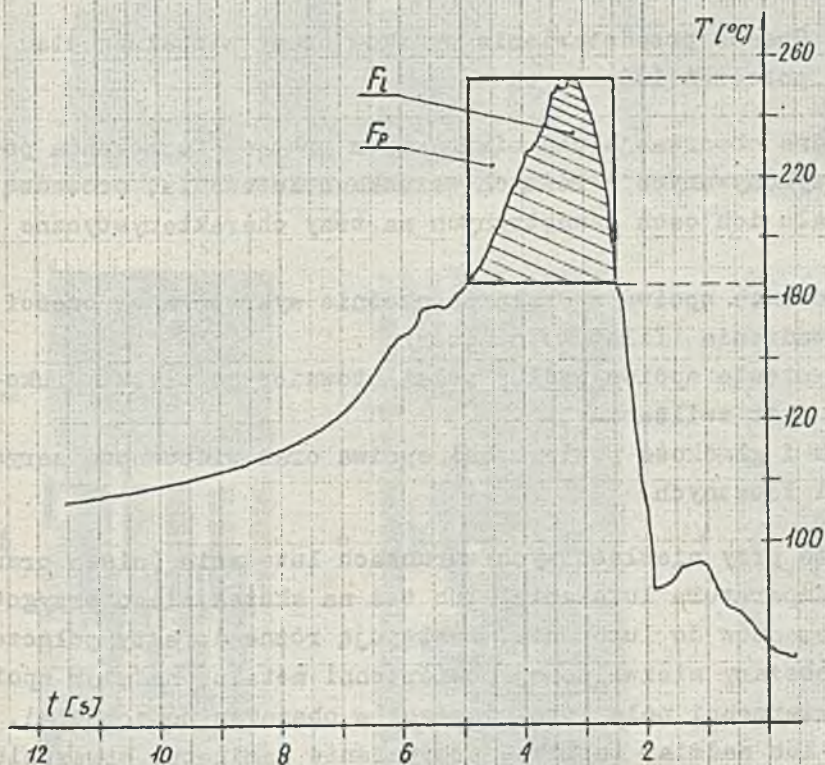
Współczynnik prostokątności określono jako stosunek pola  $F_1$  do pola  $F_p$  według zależności

$$\eta = \frac{F_1}{F_p} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

gdzie:

$F_1$  - pole opisane charakterystyką termiczną połączenia lutowanego w zakresie temperatury powyżej  $185^{\circ}\text{C}$  <sup>32)</sup>

$F_p$  - pole prostokąta określającego kształt charakterystyce idealnej (rys. 35)



Rys. 35. Charakterystyka temperaturowa połączenia lutowanego gorącym gazem z zaznaczeniem pola  $F_1$ , w którym idealna charakterystyka temperaturowa powinna być prostokątna (pole  $F_p$ )

<sup>32)</sup> Przyjęto dla uproszczenia, że temperatura topnienia stopu Sn60-Pb40 wynosi  $185^{\circ}\text{C}$ . Faktycznie dla spoiwa Sn60-Pb40 firmy Fry's Metals Ltd wynosi ona około  $183^{\circ}\text{C}$

Ponieważ znane są charakterystyki termiczne dla wybranych czasów i temperatur lutowania (rys. 33), istnieje możliwość wyznaczenia tego współczynnika. Na podstawie parametrów planimetrycznych ustalono, że dla metody lutowania oporowego wynosi on średnio 53,5%. Wartość tego współczynnika określa przydatność danej metody z termodynamicznego punktu widzenia dla procesu lutowania.

### 3.3.2. Wygląd zewnętrzny połączeń lutowanych

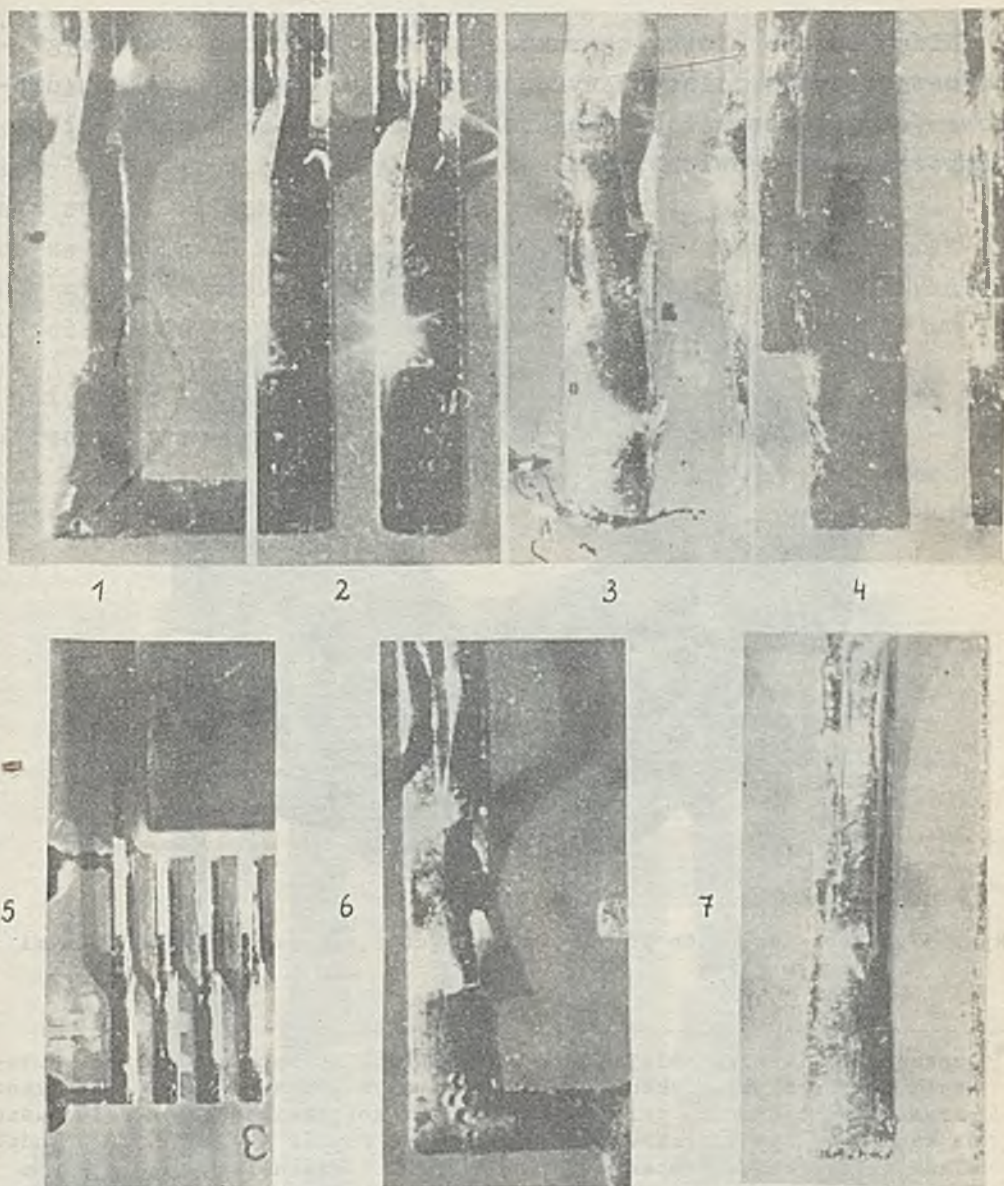
#### 3.3.2.1. Sposób przedstawiania wyników oceny wizualnej dla połączeń lutowanych

Dokładne obserwacje pod mikroskopem procesu formowania połączeń, wykonywanych w różnych warunkach lutowania, prowadzą do podziału ich cech zewnętrznych na trzy charakterystyczne grupy:

- 1) uformowanie spoiwa w obszarze skośnie wykrępowanej części wyprowadzenia (filet lutowniczy),
- 2) rozplynięcie spoiwa wzdłuż pola lutowniczego płytki drukowanej (kąć zwilżania),
- 3) połysk i gładkość powierzchni spoiwa oraz widoczność zarysu części łączonych.

Ponadto przy niewłaściwych warunkach lutowania (niska oraz wysoka temperatura lutowania) lub też na skutek złego przygotowania elementów do lutowania, występują różne defekty połączeń jak np. obszary niezwilżonej powierzchni metalu, nadmiar spoiwa na powierzchni pola lutowniczego (w obszarze połączenia), spalenie lub nadmiar topnika, przypalenie laminatu, przesunięcie wyprowadzenia w stosunku do pola lutowniczego, złe przyleganie stopki do powierzchni pola lutowniczego (wychylenie do góry na końcu lub na początku stopki) pęknięcia, małe otwory i sople spoiwa oraz niekiedy w ogóle nie przylutowane wyprowadzenia mikroukładów (rys. 36).

Uznano, że można wprowadzić punktację liczbową określającą wielkość badanej cechy połączeń,



Rys. 36. Wady połączeń lutowanych

- 1 - nadmiar spoiwa na powierzchni pola lutowniczego
- 2 - fragment powierzchni niezwilżonej na wyprowadzeniu mikro-układu
- 3 - nadmiar topnika widoczny w postaci zwęglenia na powierzchni laminatu
- 4 - przesunięcie wyprowadzenia w stosunku do pola lutowniczego
- 5 - przypalenie laminatu (jasne plamy w obszarze pomiędzy wyprowadzeniami)
- 6 - złe przyleganie stopki do powierzchni pola lutowniczego (widoczny cień odchylnego do góry końca stopki)
- 7 - sople spoiwa na końcu wyprowadzenia

Niżej podano krótką charakterystykę i punktową ocenę wyglądu zewnętrznego połączeń wykonanych na testowych płytkach drukowanych<sup>\*)</sup>. Obserwacje wykonano pod mikroskopem o dużej głębi ostrości, przy powiększeniu 2,5 razy.



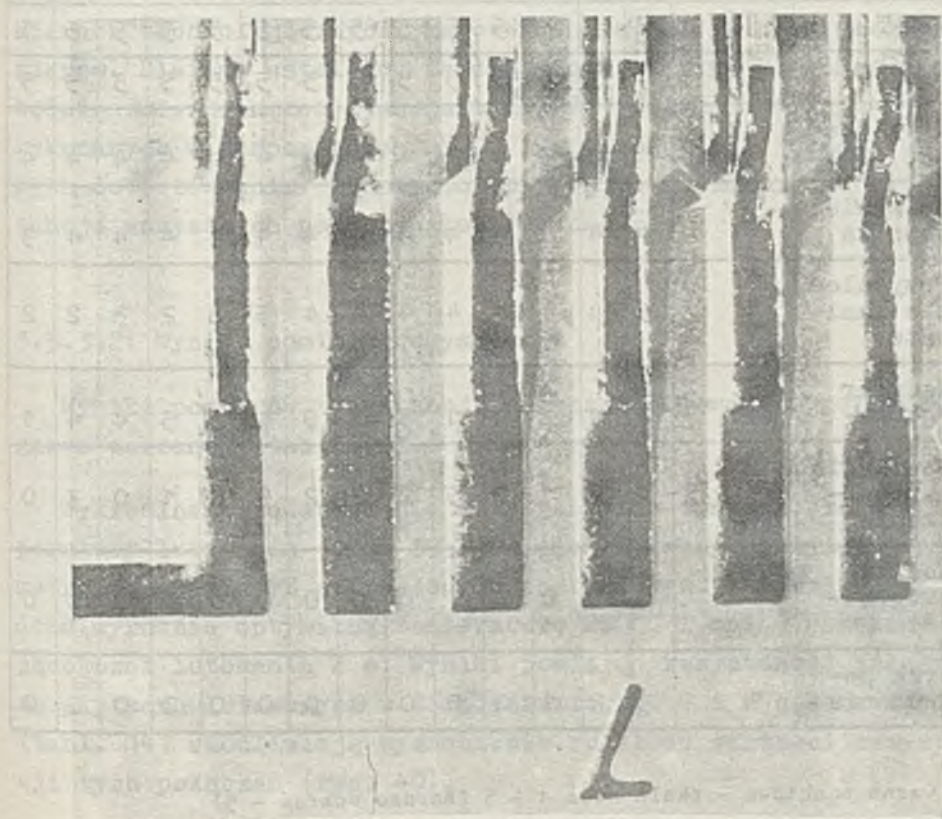
Rys. 37. Grupa testowych płytek drukowanych z mikroukładami lutowanymi gorącym gazem

\*) Oznaczając literowo kolejne punkty wybranych temperatur i czasów lutowania na charakterystykach lutowania gorącym gazem (rys. 32) określono parametry urządzenia, przy których będą wykonywane połączenia lutowane na każdej z płytek drukowanych (tabl. 10). Płytki A + N (rys. 37) odpowiadają zakresowi temperatury  $220 \div 280^{\circ}\text{C}$  i czasu lutowania  $1 \div 4$  s i umożliwiają zbadanie połączeń lutowanych w całym zakresie parametrów lutowania, począwszy od wartości przekraczających warunki, przy których zaczyna się topienie spoiwa lutowniczego, aż do wartości, przy których zaczyna się palenie laminatu na płytce drukowanej. Płytki U + T służą do porównania połączeń lutowanych w identycznych warunkach,  $250^{\circ}\text{C} - 2,5$  s. Jak już wspomniano przy opisie konstrukcji testowych płytek drukowanych (pkt. 3.2.1), na każdej z nich można polutować po 5 sztuk mikroukładów. Przy założeniu, że wyprowadzenia mikroukładów będą lutowane na każdej z tych płytek przy wybranych ale jednakowych parametrach, tzn. w tej samej temperaturze i czasie lutowania, otrzymujemy 280 jednakowo wykonanych połączeń

### 3.3.2.2. Wyniki oceny wizualnej

Połączenia lutowane gorącym gazem są bardzo gładkie, błyszczące, z dużą ilością spoiwa w obszarze skośnego wygięcia wyprowadzenia (rys. 38). Przyleganie stopki do pola lutowniczego jest różne, zależnie od sposobu wykrepowania wyprowadzenia. Tuż za stopką od strony obudowy mikroukładu występuje charakterystyczny "dołek" świadczący o wciągnięciu spoiwa do obszaru połączenia (pkt. 3.3.8).

Między polami lutowniczymi widać wyraźne przypalenie powierzchni laminatu występujące nawet przy niższych, normalnych temperaturach lutowania. Przy najniższych temperaturach występują pojedynczo, w ogóle niepolutowane wyprowadzenia mi-



Rys. 38. Wygląd zewnętrzny połączeń lutowanych gorącym gazem

kroukładów. W tabeli 12 podano ocenę punktową tej metody lutowania. Zakres temperatur i czasów lutowania, przy których

Tabl. 12. Ocena optyczna połączeń lutowanych gorącym gazem

Cecha	Oce- na	Oznaczenie płytki													
		AG	BG	CG	DG	EG	FG	GG	HG	IG	JG	KG	LG	MG	NG
Połysk	pkt <sup>*)</sup>	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
Gładkość	"	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Rozpływanie	"	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Filet lutowniczy	"	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Zwilżenie powierzchni	"	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Pory	"	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sople	"	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Przyleganie stopki	"	1	1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Spalenie topnika	"	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
Przypalenie laminatu	"	5	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	3	2	2
Nadmiar spoiwa	szt. <sup>**)</sup>	2	1	1	1	1	3	1	0	1	3	3	4	4	1
Zsuniecie wyprowadzenia	"	1	2	1	2	5	2	2	2	5	0	1	0	3	0
Mostki lutownicze	"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brak połączenia	"	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

\*) Ocena punktowa - skala ocen 1 ÷ 5 (bardzo dobrze - 5)

\*\*\*) Ocena liczbowa - liczba połączeń z daną cechą



powstają najlepsze połączenia, odpowiada wartościom powyżej  $220^{\circ}\text{C}$  i 2 s.

Należy zaznaczyć, że metoda lutowania gorącym gazem traci wiele na wartości ze względu na słabe przyleganie stopki i przypalenie laminatu między polami lutowniczymi.

### 3.3.3. Rezystancja połączeń lutowanych

#### 3.3.3.1. Sposób pomiaru rezystancji połączeń lutowanych

Na każdej z płytek drukowanych znajduje się 70 połączeń lutowanych. Ponieważ wykonano około 20 płytek należałoby wykonać pomiary rezystancji około 1.400 połączeń lutowanych. Różne warunki i parametry lutowania, błędy pomiarowe, wpływ czynników zewnętrznych itp., skłaniają, jak w wielu innych pomiarach technologicznych, ku ocenie statystycznej wyników pomiarów. Dlatego ustalono, że dla każdej z płytek drukowanych będzie zmierzona rezystancja tylko 10 połączeń (dla płytek wykonanych w temperaturze  $250^{\circ}\text{C}$  i w czasie 2,5 s przeznaczonych do porównania "identycznych" połączeń pomierzono rezystancje wszystkich połączeń lutowanych).

#### 3.3.3.2. Wyniki pomiaru rezystancji

Wyniki pomiarów rezystancji połączeń lutowanych gorącym gazem zebrano w tabeli 13.

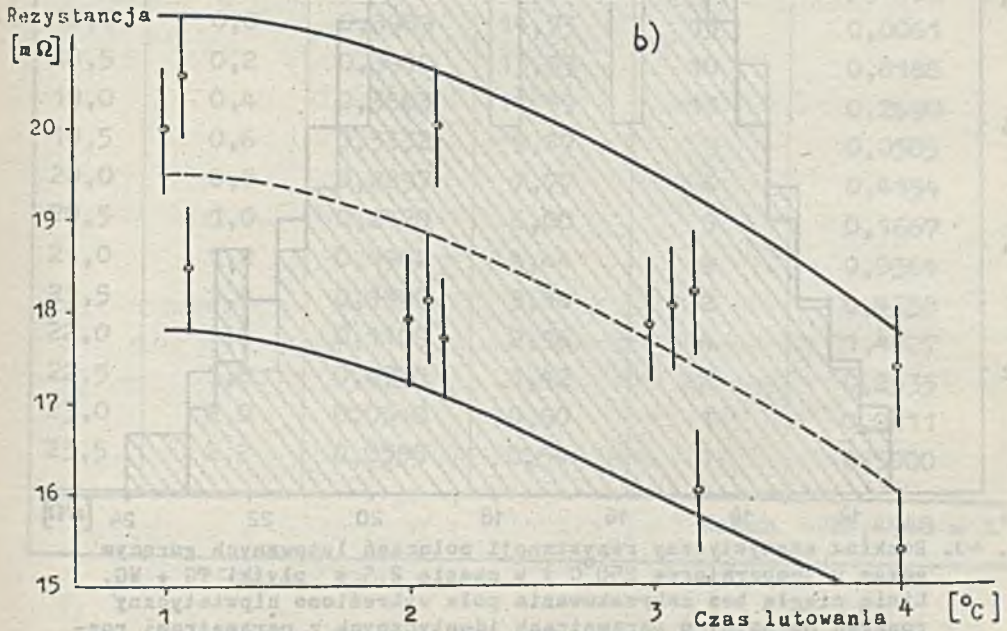
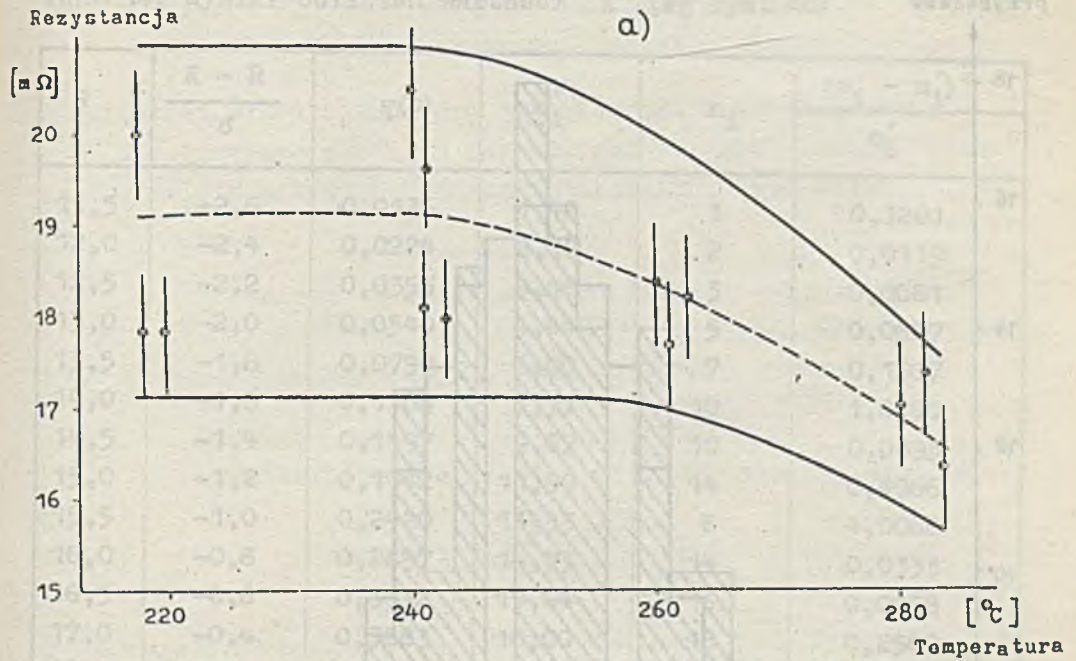
Wykreślne przedstawienie rezystancji w funkcji czasu i temperatury lutowania (rys. 39) pozwala wyznaczyć optymalne parametry lutowania. Z wykreślonych charakterystyk odczytujemy dość wyraźnie optymalną temperaturę  $260^{\circ}\text{C}$  i mniej przekonująco czas lutowania 2 s. Wyniki pomiaru rezystancji połączeń na płytkach lutowanych w temperaturze  $250^{\circ}\text{C}$  i w czasie 2,5 s (tabl. 14) umożliwiają wyznaczenie rozkładu wartości rezystancji tych połączeń (rys. 40).

Tabl. 13. Rezystancja połączeń lutowanych gorącym gazem (mΩ)

czas lutowa- nia tem- pera- tura lu- towania(°C)	1	2	3	4
220	AG	BG	CG	-
	19,04 19,30	19,01 16,79	20,59 15,97	
	24,01 18,34	15,87 18,00	17,96 17,11	
	23,13 20,01	19,26 16,45	16,01 17,72	
	19,01 17,01	17,70 19,97	16,26 16,19	
19,30 18,34	18,03 17,30	21,35 19,25		
240	DG	EG	FG	GG
	20,42 22,21	19,56 19,73	16,01 18,01	19,38 18,60
	22,25 17,49	17,35 16,75	20,90 14,91	18,46 21,74
	21,64 20,68	16,44 17,89	17,10 17,71	21,62 20,60
	20,59 22,91	18,11 19,70	20,35 18,26	19,78 18,95
19,22 18,11	18,21 16,21	19,21 16,68	18,62 19,11	
260	HG	IG	JG	KG
	18,39 18,78	16,36 15,77	16,44 15,11	17,11 15,07
	17,46 17,95	20,07 18,07	18,24 16,46	19,68 13,60
	17,15 18,85	15,56 19,26	20,18 19,58	18,11 13,33
	16,03 17,11	17,41 17,88	18,06 18,81	16,70 15,01
22,12 20,01	16,76 17,83	24,01 18,29	8,70 15,65	
280	-	LG	MG	NG
		19,71 14,21	15,70 15,37	19,44 16,77
		23,11 18,41	16,89 13,71	18,56 13,40
		20,37 18,55	15,05 15,53	15,57 18,50
		15,71 19,30	17,57 23,25	20,21 16,27
	25,36 25,56	11,46 15,39	17,33 15,94	

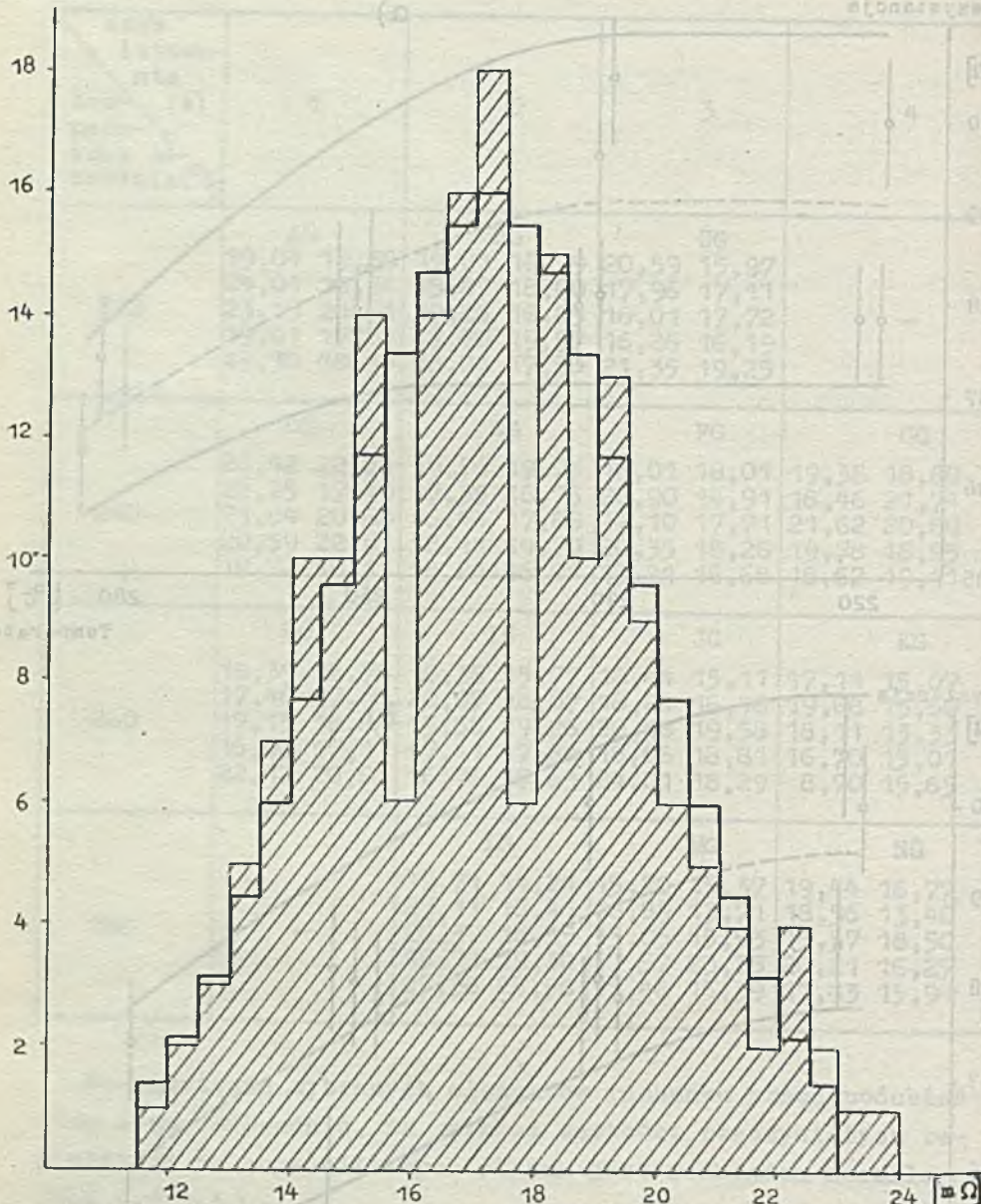
Na podstawie wybranych elementów rachunku prawdopodobieństwa można udowodnić, że rozkład wartości rzeczywistych rezystancji połączeń dla tych płytek jest rozkładem normalnym (pkt 3.5.3.3).

Obliczono, że wartość średnia rezystancji połączeń wynosi 17,5 mΩ, a odchylenie standardowe 2,5 mΩ.



Rys. 39. Rezystancja połączeń lutowanych gorącym gazem (na rys. zaznaczono wartość maks. średniego błędu kwadratowego dla każdej serii pomiarów odpowiadających danej temperaturze i czasowi lutowania)  
a) w zależności od temperatury lutowania  
b) w zależności od czasu lutowania

Liczba przypadków



Rys. 40. Rozkład statystyczny rezystancji połączeń lutowanych gorącym gazem w temperaturze 250 C i w czasie 2,5 s płytki TG + WG. Linia ciągłą bez zakreskowania pola wykreślono hipotetyczny rozkład normalny o parametrach identycznych z parametrami rozkładu rzeczywistego (wartość średnia - 17,6 mΩ, odchylenie std. - 2,5 mΩ, szerokość przedziału - 0,5 mΩ, liczba pomiarów - 200)

Tabl. 14. Wyniki obliczeń wartości  $\chi^2$  (wg rys. 40)

R	$\frac{R - \bar{R}}{\sigma}$	$\varphi(t)$	$n'_1$	$n_1$	$(n_1 - n'_1)^2$
					$n'_1$
11,5	-2,6	0,0136	1,42	1	0,1201
12,0	-2,4	0,0224	2,16	2	0,0119
12,5	-2,2	0,0355	3,16	3	0,0081
13,0	-2,0	0,0540	4,44	5	0,0627
13,5	-1,8	0,0790	6,00	7	0,1667
14,0	-1,6	0,1109	7,77	10	1,0050
14,5	-1,4	0,1497	9,67	10	0,0093
15,0	-1,2	0,1942	11,59	14	0,4966
15,5	-1,0	0,2420	13,33	6	4,0068
16,0	-0,8	0,2897	14,73	14	0,0333
16,5	-0,6	0,3332	15,64	16	0,0058
17,0	-0,4	0,3683	16,00	18	0,2500
17,5	-0,2	0,3910	15,64	6	5,8926
18,0	0,0	0,3989	14,73	15	0,0061
18,5	0,2	0,3910	13,33	10	0,8188
19,0	0,4	0,3683	11,59	13	0,2690
19,5	0,6	0,3332	9,67	9	0,0505
20,0	0,8	0,2897	7,77	6	0,4154
20,5	1,0	0,2420	6,00	5	0,1667
21,0	1,2	0,1942	4,44	4	0,0364
21,5	1,4	0,1497	3,16	2	0,4258
22,0	1,6	0,1109	2,16	4	1,4727
22,5	1,8	0,0790	1,42	2	0,2535
23,0	2,0	0,0540	0,90	1	0,0111
23,5	2,2	0,0355	0,54	1	0,5000
Razem					$16,4948 = \chi^2$

### 3.3.3.3. Weryfikacja hipotezy statystycznej dla rozkładów rezystancji połączeń lutowanych

Otrzymany rozkład statystyczny przypomina swoim kształtem krzywą Gaussa. Postulat lub inaczej hipotezę statystyczną "dany rozkład jest rozkładem normalnym" sprawdza się za pomocą testu  $\chi^2$ .

Funkcja gęstości rozkładu normalnego ma postać

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (16)$$

Ogólnie gęstość rozkładu definiuje się równaniem

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x_1 \leq x \leq x_2)}{\Delta x} \quad (17)$$

gdzie:

$P(x_1 \leq x \leq x_2)$  - prawdopodobieństwo, że zmienna  $x$  przyjmie wartość z przedziału  $(x_1, x_2)$   $\Delta x = x_2 - x_1$

Możemy zatem napisać

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = f(x) \Delta x + \theta \quad (18)$$

gdzie:  $\theta \rightarrow 0$       gdy  $\Delta x \rightarrow 0$

Jeśli mamy rozkład liczący  $n$  przypadków, a prawdopodobieństwo, że dany przypadek będzie leżał w kanale  $(x, x + \Delta x)$  wynosi  $P$ , to w kanale tym powinno wystąpić  $n'$  przypadków

$$n' = n P(x_1 \leq x \leq x_2) = n f(x) \Delta x + n\theta \approx n f(x) \Delta x \quad (19)$$

Składnik  $n\theta$  jest do pominięcia w porównaniu z pierwszym składnikiem sumy.

Aby ułatwić korzystanie z tablic rozkładu normalnego wprowadza się zmienną standaryzowaną:

$$t = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

$$f(t) = \frac{1}{s} \varphi(t)$$

Ostatecznie otrzymujemy zależność

$$n' = \frac{n \Delta x \cdot \varphi(t)}{s} \quad (20)$$

Na rys. 40 przedstawiony jest otrzymany i hipotetyczny rozkład rezystancji połączeń lutowanych gorącym gazem.

Miarą zgodności tych rozkładów jest funkcja

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{25} \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad (21)$$

Korzystamy następnie z tabeli rozkładu  $\chi^2$  (tab. 15). Dla poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  zachodzi przy  $25 - 3 = 22$  stopniach swobody nierówność

$$\left. \begin{array}{l} 16,375 < 40,289 \\ \chi^2 < \chi_0^2 \end{array} \right\} \quad (22)$$

Ponieważ hipotezę odrzucamy jeśli zachodzi

$$\chi^2 > \chi_0^2 \quad (23)$$

więc nie ma podstaw do jej odrzucenia w rozpatrywanym przypadku. Dla poziomu istotności  $\beta = 0,90$  zachodzi

$$\left. \begin{array}{l} 16,375 > 14,041 \\ \chi^2 > \chi_0^2 \end{array} \right\} \quad (24)$$

Oznacza to, że przy tym poziomie istotności hipotezę należy odrzucić.

Jednak  $\beta$  oznacza prawdopodobieństwo popełnienia błędu drugiego rodzaju, tzn. prawdopodobieństwo odrzucenia hipotezy słusznej wynosi 0,90. Tak więc ostatecznie przedstawiony roz-

kład jest rozkładem normalnym z prawdopodobieństwem co najmniej 0,9.

### 3.3.4. Siła zrywająca połączenie

#### 3.3.4.1. Sposób pomiaru siły zrywającej połączenie

Ocena siły zrywającej połączeń lutowanych należy do prób niszczących i może być traktowana wyłącznie jako pomiar statystyczny. Liczbowe wartości siły zrywającej są bardzo przekonywującym kryterium jakości połączeń. Przyjęto sposób pomiaru podobnie jak dla rezystancji połączeń lutowanych (pkt 3.3.3.1).

#### 3.3.4.2. Wyniki pomiarów siły zrywającej

Wyniki pomiarów siły zrywającej połączeń lutowanych gorącym gazem zebrano w tabeli 15.

Na rys. 41 przedstawiono zależność siły zrywającej od czasu i temperatury lutowania. Na podstawie oceny tych zależności można wybrać optymalną temperaturę lutowania  $260^{\circ}\text{C}$  i czas lutowania 3 s.

Siła zrywająca połączeń lutowanych w temperaturze  $250^{\circ}\text{C}$  i w czasie około 2,5 s została zmierzona dla jednej płytki (tab. 16). Rozkład wartości siły zrywającej przedstawiono na rys. 42. Średnia wartość siły zrywającej wynosi 2 kg a odchylenie standardowe 0,35 kg<sup>\*)</sup>.

---

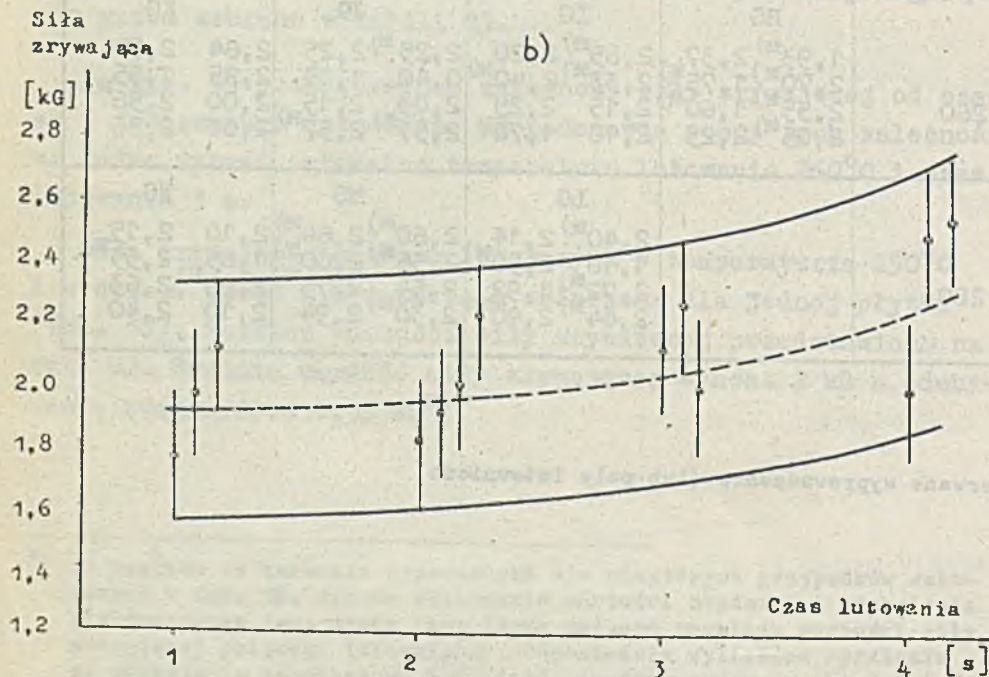
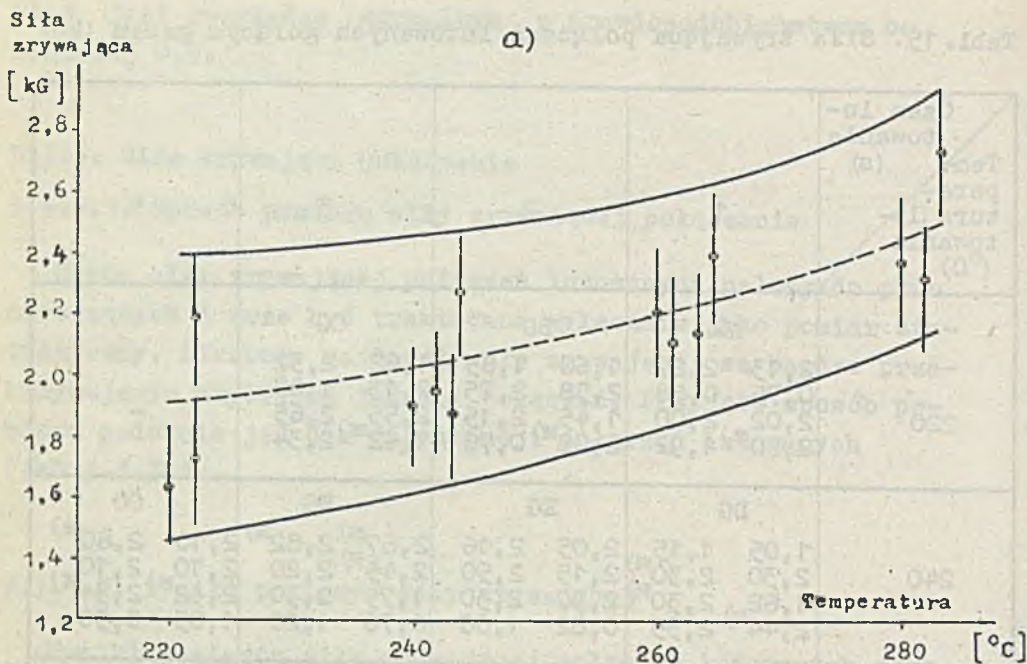
\*) Ze względu na zerwanie wyprowadzeń dla niektórych przypadków wskazanych w tab. 16, sposób obliczania wartości średniej i odchylenia standardowego jest nieco inny (brak pełnego rozkładu wartości siły zrywającej połączeń lutowanych). Odpowiednio wyliczone wyrażenia na odchylenie standardowe i wartość średnią podano w pkt 3.3.4.3.



Tabl. 15. Siła zrywająca połączeń lutowanych gorącym gazem (kG)

Czas lu- towania Tem- pera- tura lu- towania (°C)	(s)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
220	AG		BG		CG			
	2,13	2,27	1,60	1,85	1,62	2,32		
	0,75	0,58	2,58	2,25	2,13	1,88		
	2,02	2,00	1,45	2,15	2,55	2,65		
	2,20 <sup>*)</sup>	1,92	2,08 <sup>*)</sup>	0,76	1,62 <sup>*)</sup>	2,34		
240	DG		EG		FG		GG	
	1,05	1,15	2,05	2,16	2,67 <sup>*)</sup>	2,82 <sup>*)</sup>	2,10	2,60 <sup>*)</sup>
	2,30	2,30 <sup>*)</sup>	2,15	2,50	2,45 <sup>*)</sup>	2,20	2,10	2,10
	1,62	2,30 <sup>*)</sup>	2,37	2,30	1,75	2,30	2,32 <sup>*)</sup>	2,34 <sup>*)</sup>
	2,44 <sup>*)</sup>	2,35	0,82	1,00	2,70	1,20	1,05	0,50
260	HG		IG		JG		KG	
	1,93 <sup>*)</sup>	2,37	2,85 <sup>*)</sup>	2,20	2,25 <sup>*)</sup>	2,25	2,64	2,74
	2,70 <sup>*)</sup>	1,75 <sup>*)</sup>	2,33 <sup>*)</sup>	2,40 <sup>*)</sup>	0,40	1,85	2,25	1,35 <sup>*)</sup>
	2,55 <sup>*)</sup>	1,60 <sup>*)</sup>	2,15	2,25	2,03	2,15	2,00	2,56 <sup>*)</sup>
	2,05 <sup>*)</sup>	2,25	2,18	1,70	2,57 <sup>*)</sup>	2,57 <sup>*)</sup>	2,00	2,56
280			LG		MG		NG	
			2,40 <sup>*)</sup>	2,14	2,60 <sup>*)</sup>	2,64 <sup>*)</sup>	2,10	2,15
			1,10	2,50 <sup>*)</sup>	2,56 <sup>*)</sup>	2,60 <sup>*)</sup>	1,85	2,55 <sup>*)</sup>
			2,72 <sup>*)</sup>	1,92	2,54	2,75 <sup>*)</sup>	2,60 <sup>*)</sup>	2,63
	-		2,84 <sup>*)</sup>	2,40 <sup>*)</sup>	2,30 <sup>*)</sup>	2,94	2,10	2,40

\*) Zerwane wyprowadzenie (lub pole lutownicze)

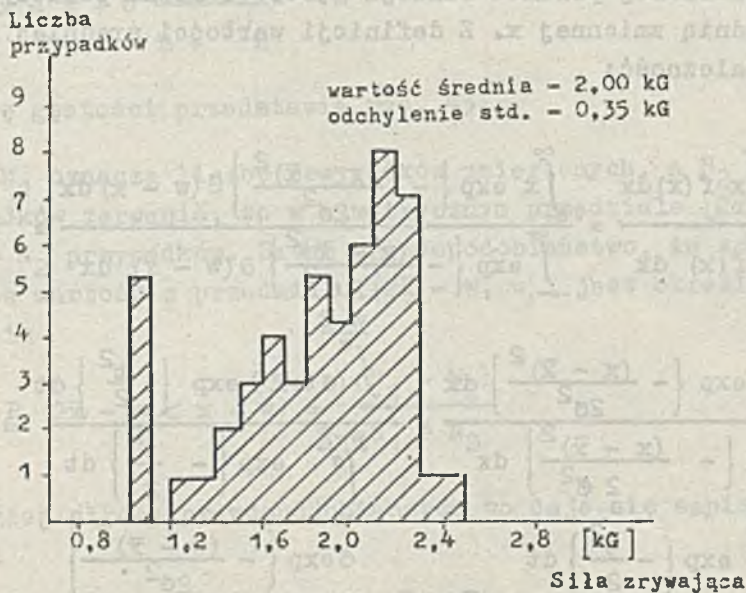


Rys. 41. Siła zrywająca połączeń lutowanych gorącym gazem (na rys. zaznaczono wartość maks. średniego błędu kwadratowego dla każdej serii pomiarów odpowiadających danej temperaturze i czasowi lutowania)  
a) w zależności od temperatury lutowania  
b) w zależności od czasu lutowania

Tabl.16. Wyniki pomiarów siły zrywającej połączeń wykonanych w temperaturze 250°C, w czasie 2,5 s za pomocą strumienia gorącego gazu

Siła zrywająca połączenie [kG]			
2,10	2,24 <sup>*)</sup>	1,05	1,66
2,20	1,75	2,04	2,16
2,16	2,04	1,68	1,86
1,00	2,01		
1,82	0,75	2,58 <sup>*)</sup>	1,38
2,05	1,08	2,12	1,44
		1,88	1,23
2,24	2,16	2,18	2,27
2,36 <sup>*)</sup>	1,86	2,36 <sup>*)</sup>	2,06
1,64	1,68	1,92	2,28
1,45	2,06	2,36 <sup>*)</sup>	2,36 <sup>*)</sup>
2,20	1,03	1,98	1,00
2,40 <sup>*)</sup>	1,51	2,16 <sup>*)</sup>	2,22
2,10	1,80		
1,52	1,51		
1,71	1,62		
2,42 <sup>*)</sup>	1,90		

\*) zerwane wyprowadzenie lub pole lutownicze



Rys. 42. Rozkład statystyczny siły zrywającej połączeń lutowanych gorącym gazem w temperaturze 250°C i w czasie 2,5 s (płytki WG). Liczba pomiarów - 56

3.3.4.3. Wartość średnia i odchylenie standardowe zniekształconych rozkładów siły zrywającej połączenie lutowane

W przypadku badania siły zrywania połączeń lutowanych rozkład normalny jest zniekształcony małą wytrzymałością przewodów drukowanych (rys. 42); wytrzymałość wyprowadzeń elementów jest nieco mniejsza dla niektórych połączeń lutowanych. Wytrzymałość przewodów nie ma określonej ściśle wartości, jednak przedział, w którym się mieści, ma szerokość małą w porównaniu z szerokością zmienności wytrzymałości połączeń. Fakt ten umożliwia przyjęcie dla rozważanego przypadku funkcji gęstości

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} \Theta(w-x) \quad (25)$$

gdzie:

$$\Theta(w-x) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1 & \text{dla } x < w \\ 0 & \text{dla } x > w \end{cases}$$

w - siła zrywania ścieżki

Dla założonej postaci funkcji gęstości można policzyć wartość średnią zmiennej x. Z definicji wartości średniej otrzymujemy zależność:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} \Theta(w-x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} \Theta(w-x) dx} = \\ &= \frac{\int_{-\infty}^w x \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} dx}{\int_{-\infty}^w \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} dx} = \frac{\int_{-\infty}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} (\sigma t + \bar{x}) \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt}{\int_{-\infty}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt} = \\ &= \frac{\sigma \int_{-\infty}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} t \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt}{\int_{-\infty}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt} + \bar{x} = \bar{x} - \frac{\frac{w-\bar{x}}{\sigma} \exp\left\{-\frac{(w-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\}}{\int_{-\infty}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt} = \end{aligned}$$

$$= \bar{x} - \sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(w - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp \left\{ -\frac{t^2}{2} \right\} dt \quad (26)$$

Oznaczamy odpowiednio:

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(w - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (27)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp \left\{ -\frac{t^2}{2} \right\} dt \quad (28)$$

Ostatecznie otrzymujemy wyrażenie:

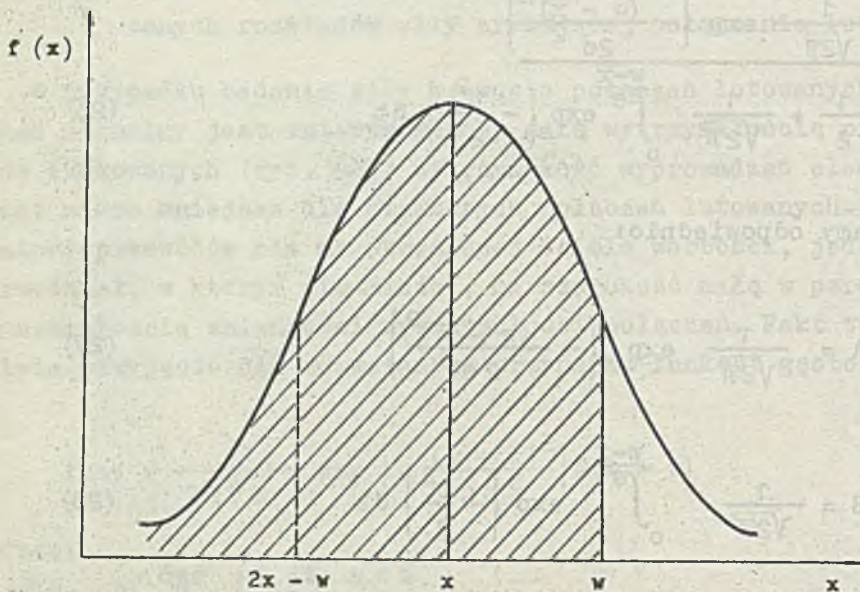
$$\bar{x} = \bar{x}' + \sigma \frac{A}{B + 1/2} \quad (29)$$

Funkcję gęstości przedstawia rys. 43.

Jeśli  $N_1$  oznacza liczbę przypadków zmierzonych, a  $N_2$  liczbę przypadków zerwania, to w symetrycznym przedziale  $[2\bar{x} - w, w]$  jest  $N_1 - N_2$  przypadków. Zatem prawdopodobieństwo, że zmienna  $x$  przyjmie wartość z przedziału  $[2\bar{x} - w, w]$  jest określone zależnością

$$P(2\bar{x} - w \leq x \leq w) = \frac{(N_1 - N_2)}{N_1 + N_2} \quad (30)$$

Z drugiej strony prawdopodobieństwo to daje się zapisać w postaci



Rys. 43. Wykres funkcji gęstości rozkładu Gaussa zniekształconego, wg wyrażenia (25)

$$\begin{aligned}
 P(2\bar{x} - w \leq x \leq w) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{2\bar{x}-w}^w \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] dx = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{w-\bar{x}}{\sigma}}^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{w-\bar{x}}{\sigma}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt = 2B \quad (31)
 \end{aligned}$$

Porównując (28) i (31) otrzymujemy zależność

$$B = \frac{1}{2} \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \quad (32)$$

Wartość B jest wyznaczona doświadczalnie i na podstawie jej znajomości można znaleźć z tablic granicę całkowania  $\frac{w - \bar{x}}{\sigma}$  w wyrażeniu (28).

Oznaczmy:

$$\frac{w - \bar{x}}{\sigma} = C \quad (33)$$

Dla znanej wartości C można znaleźć wartość funkcji A postaci (27). Po tych manipulacjach mamy do rozwiązania układ równań (27) i (29)

$$\left. \begin{aligned} \frac{w - \bar{x}}{\sigma} &= C \\ \bar{x} &= \bar{x}' + \sigma \frac{A}{B + \frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Rozwiązaniem układu (34) jest zestaw równań

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\bar{x}' + Dw}{D + 1} \\ \sigma &= \frac{w - \bar{x}'}{C(D + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

gdzie:

$$D = \frac{2A}{C(1 + 2B)}$$

W związku z tym przy obliczaniu wartości średniej i odchylenia standardowego rozkładu wartości siły zrywającej (który jest również rozkładem normalnym) należy korzystać z zależności (35).

### 3.3.5. Ocena struktury połączeń lutowanych

Ocena połączeń lutowanych w przekroju jest najbardziej przekonującym kryterium umożliwiającym "wgląd do wnętrza", a więc oszacowanie rozmiarów i stopnia wypełnienia spoiwem szczeliny między powierzchniami części łączonych, rozplywania i kąta zwilżania metalu podstawowego przez spoiwo lutowane.

nicze, ułożenie stopki i pozostałej części wyprowadzenia mikroukładu na powierzchni pola lutowniczego oraz po właściwym przygotowaniu zglądu, określenie mikrostruktury i oszacowanie warstwy dyfuzji i związków międzymetalicznych, które stanowią istotę połączenia lutowanego.

W powiązaniu z wynikami poprzednio omówionych kryteriów, ocena przekroju daje syntetyczny obraz jakości połączenia lutowanego.

### 3.3.5.1. Makrostruktura połączeń lutowanych

Połączenia lutowane gorącym gazem oglądane w przekroju odznaczają się niezbyt dokładnym przyleganiem stopki do folii miedzianej tak, że szczelina między wyprowadzeniem a polem lutowniczym nie jest jednakowa na całej długości stopki, a ponadto dla różnych połączeń zmienia się przypadkowo zależnie od dokładności wykrapowania wyprowadzeń. Szerokość szczeliny przy tej metodzie lutowania wynosi średnio 0,035 mm. Duży obszar działania ciepłego powoduje znaczne zwiększenie ilości spoiwa pod skośnie wykrapowaną częścią wyprowadzenia i charakterystyczny, łagodny owal linii konturowej spoiwa w tym obszarze<sup>\*)</sup>.

Można przypuszczać, że połączenie na skutek zwiększonego przekroju czynnego i zwiększonego obszaru zamocowania wyprowadzenia w spoiwie lutowniczym będzie mieć dużą przewodność elektryczną oraz wytrzymałość mechaniczną. Nie umniejsza to faktu, że dość duża szczelina lutownicza powinna oddziaływać w kierunku zmniejszenia wartości tych parametrów. Przyrost

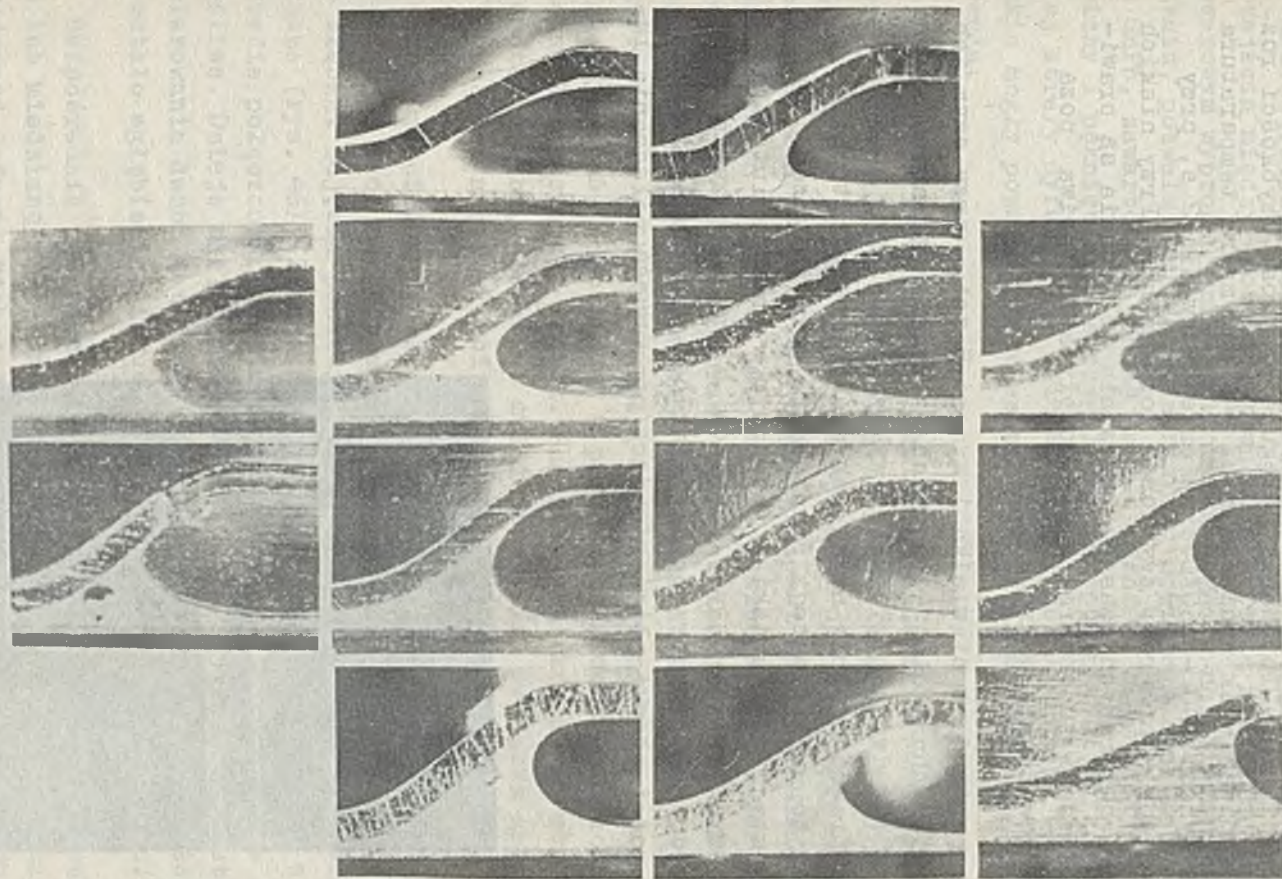
---

\*) Za miarę ilości spoiwa nagromadzonego pod skośnie wykrapowaną częścią wyprowadzenia, które świadczy o jego rozplywaniu, można uznać współczynnik określony stosunkiem wysokości obszaru wypełnionego spoiwem  $h$  do wysokości wyprowadzenia nad powierzchnią płytki drukowanej (rys. 45) wg zależności:

$$R = \frac{h}{w}$$

Z obliczeń wynika, że wartość średnia tego współczynnika dla lutowania gorącym gazem wynosi średnio 0,80

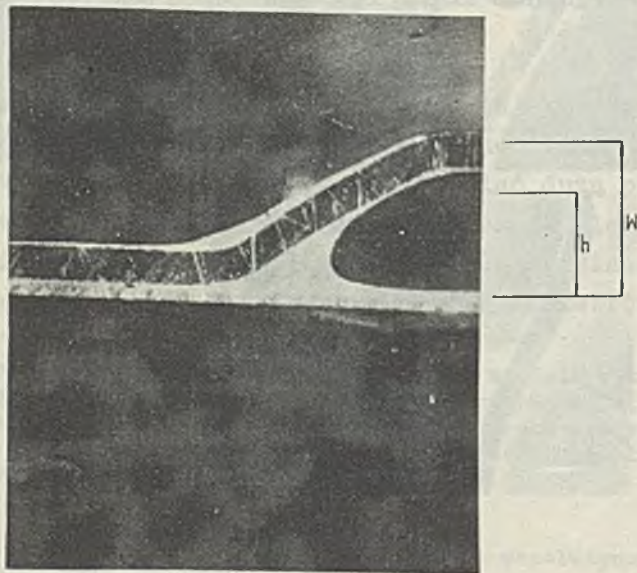




Rys. 44. Połączenia lutowane gorącym gazem na płytkach AG ÷ NG w przekroju (zdjęcia ułożono w kolejności odpowiadającej rosnącym wartościom czasów i temperatur lutowania przyjętym we wszystkich tabelach wyników pomiarów). Powiększenie 46 razy

temperatury i czasu lutowania potęguje przyrost szybkości roz-  
pływania spoiwa i jak wynika z rys. 44, optymalna temperatura  
lutowania wynosi  $240 - 260^{\circ}\text{C}$  oraz czas lutowania 2 s, przy  
którym występuje przyrost szybkości rozpływania. Przy niskich  
temperaturach i małych czasach lutowania połączenia są prawi-  
dłowe, jako że i tu obserwuje się rozpływanie spoiwa poza  
stopkę wyprowadzenia mikroukładu.

Liczba porów jest niewielka i wynosi 5 szt., przy czym ich  
łączna powierzchnia dla 14 badanych połączeń lutowanych wynosi  
około  $1 \text{ mm}^2$ ; w dwóch przypadkach wykryto bąbelkowe pustki  
utworzone prawdopodobnie na skutek niewyparowania topnika  
(parowanie topnika w metodzie lutowania gorącym gazem jest  
charakterystycznym zjawiskiem widocznym w trakcie lutowania  
w postaci wydobywających się bąbelków). Przy większym powięk-  
szeniu rzędu  $\times 200$  obserwuje się ciągłość warstwy spoiwa na  
całej długości stopki potwierdzającą poprawność połączenia lu-  
towanego gorącym gazem.



Rys. 45. Przekrój połączenia lutowanego z zaznaczeniem wysokości spoiwa nagromadzonego pod wyprowadzeniem  $h$  w stosunku do wysokości wyprowadzenia  $w$  - do obliczenia współczynnika rozpływania

### 3.3.5.2. Mikrostruktura połączeń lutowanych

Mikrostruktura połączenia lub dokładniej złącza na granicy przejścia między spoiwem lutowniczym i folią miedzianą lub kowarowym wyprowadzeniem mikroukładu oraz w najbliższym otoczeniu, pozwala określić ziarnistość poszczególnych faz stopu SnPb, zawartość i rodzaj zanieczyszczeń, segregacje, rzadziny i pęknięcia, a szczególnie występowanie choćby płytkiej strefy dyfuzji lub związków międzymetalicznych, jeśli takie mogły powstać, jako warunku otrzymania właściwego połączenia.

Segregacje i pęknięcia są łatwe do zidentyfikowania. Wtrącenia niemetaliczne pochodzą z topników, które mogły być stopione (żuźle, tlenki) lub niestopione i nie wypłynęły na zewnątrz spoiwa. Mogą to być również tlenki niezbyt dokładnie oczyszczonych elementów lub zanieczyszczenia, które dostały się do miejsc lutowania przed rozpoczęciem procesu łączenia. Segregacje w spoiwie powstają na skutek nierozpłynięcia się części spoiwa (mikrokropelki), która otoczona była powłoką zanieczyszczeń, najczęściej w postaci tlenków. Tlenków tych nie zdołał rozpuścić topnik. Rzadziny są skupiskami wtrąceń niemetalicznych, tlenków i żużli powstałych wewnątrz spoiwa i tworzących nieciągłości w złączu.

Oceny jakości połączeń dokonano nie na podstawie wykonanych zdjęć lecz na podstawie obserwacji pod mikroskopem całego złącza. Zdjęcia pokazują jedynie charakterystyczne cechy złącza (rys. 46). Złącza mają na zdjęciach ciemną linię w strefie połączenia, co nie zawsze oznacza, że połączenie jest wadliwe. Dzieje się to dlatego, że w tym miejscu na skutek polerowania dwóch materiałów o różnym stopniu ścieralności powstało wgłębienie dające cień przy ukośnym oświetleniu.

Bezpośrednie połączenie spoiwa z wyprowadzeniem mikroukładu lub miedzianą folią przewodu drukowanego opiera się na wzajemnej dyfuzji tych materiałów. Strefa dyfuzji jest wyraźnie widoczna i ma głębokość od 0,001 do 0,003 mm. Strefa ta

jest w większości przypadków czysta, szczególnie przy wyprowadzeniu mikroukładu. Interesującym zjawiskiem jest znacznie większa ilość zanieczyszczeń w pobliżu folii niż w pozostałej części spoiwa. Należy przypuszczać, że zanieczyszczenia te pochodzą z folii, która być może nie była wystarczająco oczyszczona przed lutowaniem.

Ze względu na trudności i pracochłonność przygotowania próbek uznano za wystarczające przedstawienie jednego przykładu mikrostruktury potwierdzając fakt występowania strefy dyfuzji i ewentualnych związków międzymetalicznych na granicy części łączonych.

Szczegółowa ocena metalograficzna serii próbek wykonanych w różnych warunkach lutowania mogłaby być przedmiotem oddzielnego opracowania. Z użytkowego punktu widzenia, ocena metalograficzna mikrostruktury, jako kryterium jakości połączeń wydaje się zbyt kłopotliwa. Uznano, że podane wcześniej kryteria oceny powinny być świadectwem istnienia właściwej mikrostruktury połączeń lutowanych.

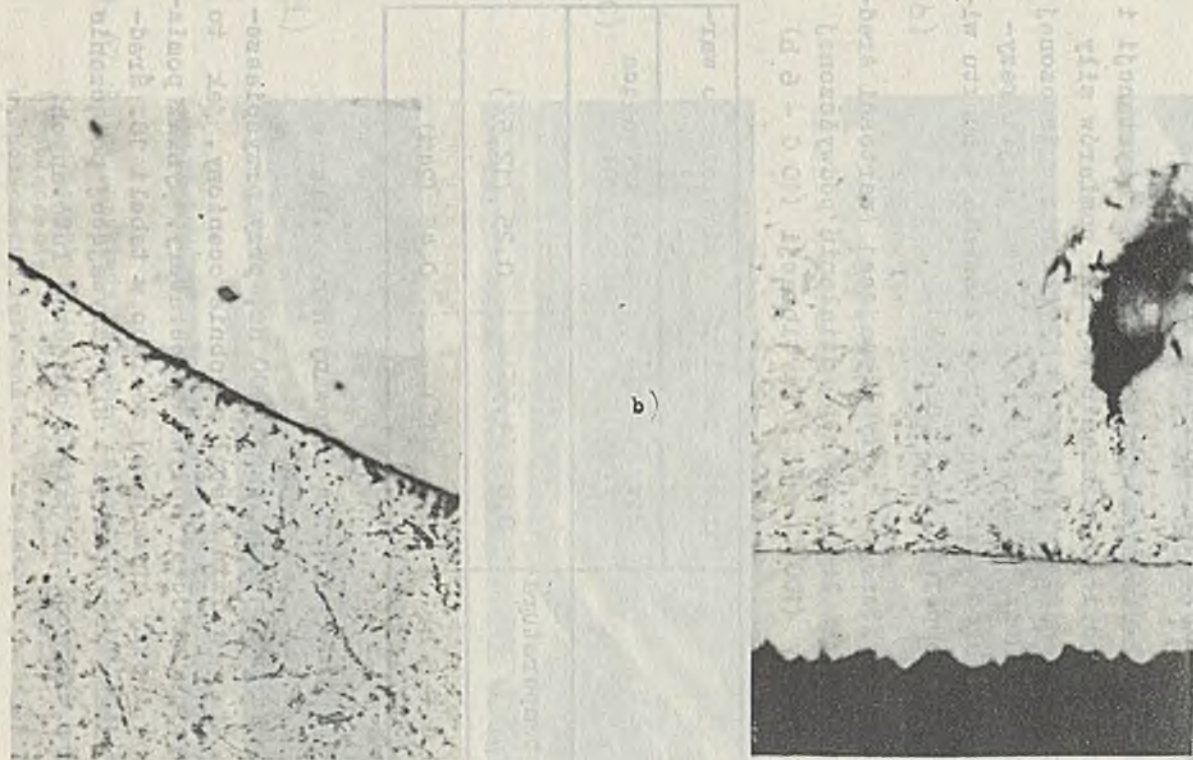
### 3.3.6. Wpływ narażeń mechano-klimatycznych na jakość połączeń lutowanych

Ocena jakości połączeń lutowanych po narażeniach mechano-klimatycznych może być uznana za bardzo przydatne kryterium kontroli okresowej, statystycznej.

Rodzaje narażeń i ich wielkość powinny być podyktowane konkretnymi wymaganiami wynikającymi z warunków eksploatacji urządzeń elektronicznych, w których będą stosowane połączenia lutowane.

Dla przykładu wybrano typowe narażenia zalecane przy badaniach odporności klimatycznej i mechanicznej elementów urządzeń elektronicznych [24], a więc:

- a) odporność na gorąco -  $100^{\circ}\text{C}$ , 32 godziny,
- b) wytrzymałość na wibracje -  $5 \div 1000$  Hz, 10 G, 6 godzin w jednej płaszczyźnie.



Rys. 46. Mikrostruktura połączenia lutowanego

- a) w obszarze złącza między wyprowadzeniem a spoiwem lutowniczym (strefa dyfuzji o szerokości 0,002 mm nie zawiera wad)
- b) w obszarze złącza między folią miedzią a spoiwem lutowniczym (w spoiwie znajdują się dwa pęcherze gazowe o średnicy ok. 0,02 mm). Powiększenie 750 razy

### 3.3.6.1. Odporność termiczna połączeń lutowanych

Płytką lutowaną w temperaturze 250°C i w czasie 2,5 s została poddana wpływowi podwyższonej temperatury 100°C w czasie 32 h. Jako kryterium oceny wpływu temperatury przyjęto zmianę rezystancji i siły zrywającej połączeń lutowanych.

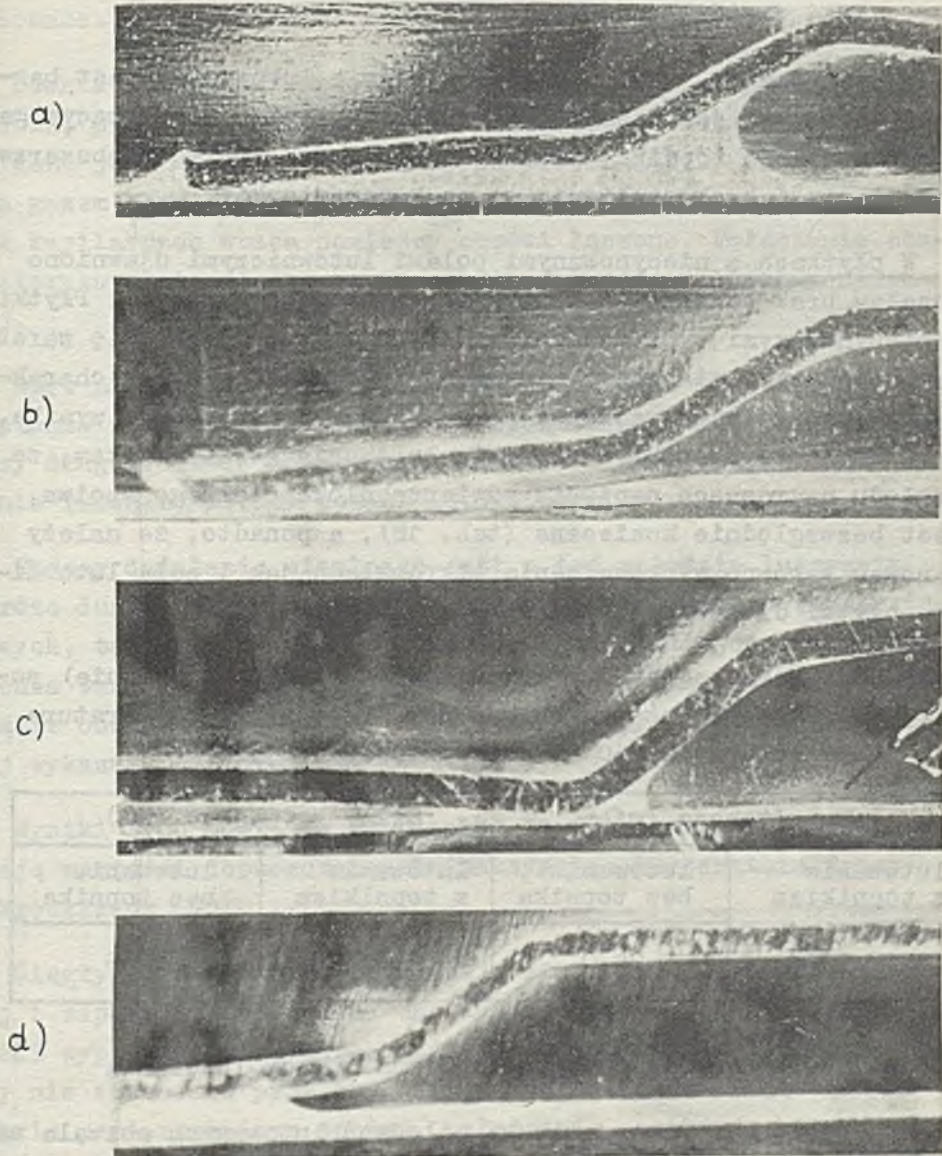
W tabeli 17 podano różnicę wyników pomiarów rezystancji i siły zrywającej przed i po narażeniu (wyniki pomiarów siły zrywającej po narażeniu odniesiono do płytki nie zniszczonej próbami zrywania). Różnice wartości siły zrywającej i rezystancji określają jakość badanej metody łączenia z punktu widzenia odporności temperaturowej połączeń.

Tabl.17. Zmiana rezystancji i siły zrywającej (wartości średnie) połączeń lutowanych po działaniu podwyższonej temperatury (100°C - 32 h) i wibracji (10 G - 6 h)

Narażenie	Wartość różnicy (odniesiona do wartości średniej)	
	Rezystancja (mΩ)	Siła zrywająca (kG)
Podwyższona temperatura (100°C - 32 h)	0,8 (4,5%)	0,25 (12,5%)
Wibracje (10 G - 6 h)	0,2 (1%)	0,48 (24%)

### 3.3.6.2. Wytrzymałość połączeń lutowanych na wibracje

Wpływ wibracji o częstotliwości 200 Hz, przy przyspieszeniu 10G, w czasie 6 godzin został podobnie oceniony, jak to uczyniono w przypadku oceny wpływu temperatury. Wyniki pomiarów rezystancji i siły zrywającej zebrano w tabeli 18. Średnie wartości zmiany rezystancji i siły zrywającej połączenie określają wpływ wibracji na jakość połączeń lutowanych.



Rys. 47. Różne przykłady połączeń lutowanych gorącym gazem w przekroju

- a) połączenie lutowane przy użyciu topnika
- b) połączenie lutowane bez użycia topnika
- c) połączenie lutowane bez wstępnego cynowania pola lutowniczego (folii miedzianej)
- d) połączenie lutowane bez wstępnego cynowania wyprowadzenia mikroukładu

Powiększenie 46 razy

### 3.3.7. Ocena połączeń lutowanych bez topnika oraz bez cynowania części łączonych

Wpływ topnika, stosowanego w procesie lutowania, jest bardzo widoczny i jak pokazano na rys. 47b lutowanie gorącym gazem bez użycia topnika ujawnia zupełny brak spoiwa w obszarze połączenia i brak stopienia go na końcu stopki.

W płytkach z niecynowanymi polami lutowniczymi ujawniono zupełny brak połączenia wynikający z niedoboru spoiwa. Płytki z niecynowanymi wyprowadzeniami cechuje uformowanie się warstwy spoiwa wypełniającego szczelinę lutowniczą ale bez charakterystycznego nagromadzenia poza stopką. Z powyższego wynika, że stosowanie topnika w metodzie lutowania gorącym gazem, ze względu na rosnące napięcie powierzchniowe ciekłego spoiwa, jest bezwzględnie konieczne (tab. 18), a ponadto, że należy cynować zarówno wyprowadzenia mikroukładu jak i pola lutownicze płytki drukowanej.

Tabl. 18. Rezystancja i siła zrywająca (wartości średnie) połączeń lutowanych bez użycia topnika (temperatura lutowania 250°C, czas lutowania 2,5 s)

Rezystancja (mΩ)		Siła zrywająca (kG)	
lutowanie z topnikiem	lutowanie bez topnika	lutowanie z topnikiem	lutowanie bez topnika
17,5	24,0	2,0	0,35

### 3.3.8. Charakterystyka technologiczna metody lutowania

Wykonanie określonej liczby połączeń lutowanych pozwala na sformułowanie uwag ogólnych o procesie lutowania.

W procesie lutowania gorącym gazem przetopienie spoiwa lutowniczego następuje jednocześnie na całej długości stopki. Równocześnie obserwuje się samoczynne zbliżenie stopki do powierzchni pola lutowniczego uwarunkowane kształtem wyprowadze-



nia i własnościami sprężystymi materiału, z którego jest ono wykonane.

Ciekłe spoiwo lutownicze jest wydmuchiwane z obszaru połączenia, przez strumień gorącego gazu. Jeśli natężenie przepływu gazu jest właściwie dobrane, po przesunięciu dyszy z gorącym gazem poza obszar połączenia, spoiwo na skutek działania sił kapilarnych wraca pomiędzy części łączone. Połączenie charakteryzuje się gładką powierzchnią o łagodnej linii konturowej.

Zbyt niska temperatura gazu nie pozwala na odpowiednie przetopienie spoiwa. Przy wysokiej temperaturze gazu, podobnie jak przy długim czasie nagrzewania następuje wyraźnie widoczne spalanie laminatu między polami lutowniczymi.

Obszar działania ciepłego jest w tej metodzie lutowania bardzo duży i jak wykazały pomiary za pomocą kredek temperaturowych, temperatura  $75^{\circ}\text{C}$  występuje na całej długości wyprowadzenia tzn. w odległości 7 mm od końca. Jednakże pomiary wewnętrznie obudowy mikroukładu a więc samej płytki półprzewodnikowej wykazały, że przyrost temperatury wynosi tylko  $12^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki tych pomiarów są niezbyt korzystne ale nie przekraczają wartości dopuszczalnych (maksymalna temperatura pracy mikroukładów  $75^{\circ}\text{C}$ ).

Ciągły strumień gazu przekazuje stałą porcję energii cieplnej i zapewnia powtarzalne charakterystyki lutowania. Jednakże jeśli wyprowadzenia mikroukładów były wadliwie wykrępowane lub gdy nie stosowano przy lutowaniu topnika, zwiększającego napięcie powierzchniowe spoiwa, połączenia nie udają się.

Obsługa urządzenia jest bardzo prosta.

Z czasem dysza i dolna część głowicy gorącego gazu ulegają zanieczyszczeniu od parującego topnika, które jednakże bez trudu można usunąć.

Szybkość lutowania wynosi 1 mikroukład/minutę.

Zużycie helu jest stosunkowo małe i wynosi około 21/100 mikroukładów. Zużycie energii elektrycznej jest niewielkie (moc elementu grzejnego wynosi 200 W).

Cechy charakterystyczne metody lutowania gorącym gazem zestawiono w tabeli 19.

Tabl. 19. Zestawienia cech charakterystycznych metody lutowania gorącym gazem

Cechy charakterystyczne	Lutowanie gorącym gazem
Prawdopodobieństwo występowania złych połączeń	małe
Docisk części łączonych w czasie lutowania	brak
Rozdmuchiwanie spoiwa	występuje
Poruszenie się części łączonych przy zastyganiu spoiwa	brak
Obszar działania ciepłego	duży
Stabilność parametrów lutowania	duża
Zmiana parametrów lutowania	trudna
Graniczna temperatura lutowania	mała
Wpływ temperatury lutowania na elementy półprzewodnikowe	mały
Wpływ czynników zewnętrznych	mały
Dobór końcówki lutującej	trudny
Zużycie końcówki lutującej	bardzo małe
Wzorowanie urządzenia	bardzo trudne
Uniwersalność metody	średnia
Szybkość lutowania	duża
Obsługa urządzenia	bardzo trudna
Zmęczenie pracownika	małe
Automatyzacja metody	możliwa
Zużycie energii elektrycznej	średnie
Koszt urządzenia	średni

### 3.3.9. Podsumowanie wyników badań

Określono optymalne parametry procesu lutowania gorącym gazem i wyznaczono kryteria jakości połączeń rozpliwowych<sup>3E)</sup> dla mikroukładów typu krab. Wykonanie połączeń o dobrej przewodności elektrycznej i wytrzymałości mechanicznej jest warunkowane następującymi czynnikami:

- wyprowadzenia mikroukładów powinny być tak wykrepowane, aby stopka wyprowadzenia po przyklejeniu lub dociśnięciu płaskiej obudowy mikroukładu do powierzchni płytki drukowanej stykała się na całej długości z powierzchnią pola lutowniczego,
- zarówno wyprowadzenia mikroukładów jak i pola lutownicze płytki drukowanej powinny być cynowane przed lutowaniem; tylko takie przygotowanie części łączonych zapewnia dostateczną wytrzymałość połączeń lutowanych,
- cienka warstwa nieaktywnego topnika nałożona bezpośrednio przed lutowaniem na powierzchnię pól lutowniczych zapewnia uformowanie połączenia i jest niezbędna w procesie lutowania,
- dostateczna, stała grubość warstwy spoiwa na powierzchni pola lutowniczego i wyprowadzenia, jak również właściwy kształt pól lutowniczych i wyprowadzeń (po krepowaniu) są bardzo istotne dla procesu lutowania.

Ocena metody lutowania gorącym gazem mikroukładów typu krab przyniosła następujące rezultaty:

- urządzenie do lutowania zapewnia stałe warunki lutowania w sensie temperatury i czasu w jakim spoiwo pozostaje w fazie ciekłej w całym obszarze połączenia,

---

<sup>3E)</sup> Określenie "połączenie rozpliwowe" przypisano lutowaniu wstępnie cynowanych części łączonych; proces lutowania następuje po przetopieniu zewnętrznej warstwy spoiwa, które rozpliwia się na ich powierzchni i formuje właściwe połączenie

- dobre przygotowanie części łączonych (krępowanie wyprowadzeń) oraz właściwy dobór parametrów lutowania (znajomość procesu lutowania) są warunkami uzyskania dobrych rezultatów przy lutowaniu gorącym gazem.

Ocena jakości połączeń lutowanych może być dokonana na podstawie:

- oceny wizualnej, w której należy zwrócić szczególną uwagę na kształt i wymiary filetu lutowniczego,
- pomiaru rezystancji, którego rezultaty ze względu na znaczne rozrzuty wyników pomiarów budzą pewne obawy,
- pomiaru siły zrywającej, który jest najpewniejszym testem jakości połączeń lutowanych,
- oceny makrostruktury połączeń lutowanych.

Za najlepszą metodę oceny jakości połączeń lutowanych uważa się kontrolę wizualną uzupełnioną statystycznym pomiarem siły zrywającej.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz ich analiza pozwalają na wysunięcie poniższych wniosków.

##### 4.1. Wnioski o charakterze poznawczym

Przypomnijmy, że celem tej pracy jest ocena metody lutowania gorącym gazem oraz wyznaczenie kryteriów jakości połączeń.

Porównując wyniki badań własnych z rezultatami badaczy amerykańskich i angielskich należy stwierdzić, że:

1. przewodność cieplna gazów nie jest jedynym parametrem określającym intensywność przekazywania ciepła. Dokładniejsza analiza matematyczna prowadzi do określenia współczynnika intensywności przekazywania ciepła, który zależy ponadto

od stosunku ciepła właściwego, współczynnika lepkości i ciężaru cząsteczkowego gazów,

2. w metodzie lutowania gorącym gazem nie można dobierać temperatury lutowania poprzez zmianę natężenia przepływu gazu. Proponowana przez A. Caldera [2] metoda regulacji temperatury prowadzi do rozdmuchiwania spoiwa. Należy raczej szukać wartości natężenia przepływu danego gazu, przy którym nie występuje rozdmuchiwanie spoiwa, a następnie, przy optymalnym wykorzystaniu nośnika energii cieplnej, regulować temperaturę lutowania poprzez zmianę mocy grzejnika podgrzewającego gaz w głowicy,
3. niewłaściwe jest również proponowane przez producenta urządzenia lutowanie za pomocą "stojącej" dyszy gazu. Wprawienie dyszy w ruch ciągły wzdłuż linii połączeń zabezpiecza przed wielokrotnym podgrzewaniem części łączonych. Jest to szczególnie ważne w przypadku lutowania mikroukładów typu krab,
4. możliwe jest określenie charakterystyk termicznych dla każdej metody lutowania zapewniających wykonanie połączeń w tym samym czasie i temperaturze. Uniwersalna metoda wyznaczania dowolnych parametrów lutowania została przedstawiona w badaniach własnych.

#### 4.2. Wnioski praktyczne z zakresu technologii

W stosunku do procesu technologicznego można stwierdzić że:

1. potwierdzają się wnioski niektórych badaczy o konieczności stosowania topnika w każdej metodzie lutowania, który ma zapewnić usunięcie zewnętrznej warstwy tlenków zanieczyszczających połączenie oraz zwiększyć napięcie powierzchniowe ciekłego spoiwa formującego połączenie lutowane. Niezbędne jest również cynowanie wstępne części łączonych,

2. lutowanie gorącym gazem jest możliwe pod warunkiem, że wyprowadzenia mikroukładów będą tak wykrepowane, aby ich końce po przyklejeniu lub dociśnięciu obudowy do płytki drukowanej stykały się na właściwej długości z powierzchnią pola lutowniczego. W przeciwnym przypadku będą występować wadliwe połączenia lub brak połączeń,
3. duży obszar działania cieplnego, występujący w metodzie lutowania gorącym gazem, nawet przy małej średnicy i bliskim położeniu dyszy w stosunku do części łączonych jest istotnym ograniczeniem przy określonych wymiarach połączenia. Należy zbadać wpływ strumienia gazu na sąsiednie elementy i dopiero wtedy rozważyć możliwość lutowania tą metodą,
4. w trakcie lutowania prawie zawsze istnieje możliwość prowadzenia obserwacji procesu rozplývania spoiwa i formowania filetu lutowniczego pod i tuż za stopką wyprowadzenia. Właściwa obserwacja, na bieżąco, jest najlepszą metodą kontroli połączeń lutowanych, rozumianą nawet w sensie kontroli ostatecznej.

#### 4.3. Propozycje dotyczące dalszych badań

Badania własne oraz ich analiza pozwalają wysunąć pewne wnioski odnośnie dalszych badań:

1. wydaje się celowe szczegółowe zbadanie istoty procesu formowania połączenia, np. przez ocenę zawartości związków międzymetalicznych w spoinie lutowniczej w zależności od czasu i temperatury lutowania oraz ich związku z wytrzymałością i rezystancją połączeń,
2. idealna warstwa stopu lutowniczego (o stałej grubości) na powierzchni części łączonych oraz identyczne wymiary stopki wyprowadzeń mikroukładu powinny bardziej wyraźnie ujawnić krytyczną temperaturę lutowania, przy której występuje

największa szybkość rozplywania spoiwa (z drugiej strony takie warunki odbiegają od warunków lutowania występujących w praktyce),

3. w przyszłości należy uwzględnić w badaniach mało znane metody pomiaru szybkości rozplywania spoiwa za pomocą kamery filmowej, określenie charakterystyk izotermicznych lutowania za pomocą kamery lub mikroskopu promieni podczerwonych, jak również ocenę połączeń na podstawie radiogramów rentgenowskich, lub też poprzez badanie stanu powierzchni za pomocą penetrantów,
4. opisana w pracy metoda analizy parametrów procesu lutowania może być również stosowana przy badaniu innych metod lutowania lub zgrzewania (lutowanie ręczne na fali ciekłego spoiwa, lutowanie i zgrzewanie oporowe promieniami podczerwonymi, strumieniem elektronów, wiązką światła laserowego, itd.). Metoda pozwala na porównanie jakości połączeń lutowanych lub zgrzewanych różnymi sposobami w szerokim zakresie parametrów łączenia. Powyższe może być podstawą do zdefiniowania idealnej metody łączenia i podjęcia próby wykonania odpowiedniego urządzenia, odpowiadającego tej definicji.

#### Literatura

- [1] BROWN C.W.: Gold Plated Leads Can Cause Gold Soldered Joints., Electronic Design, 1963, nr 3
- [2] CALDER A.S.: The Evolution of a Process for Hot Gas Reflow Soldering, Marconi Ltd, 1968, nr 39
- [3] CLEWS K.I., IONG I.G.: Metalurgical Evolution of Microcircuit Interconnections Made by the Parallel-Gap Process, Microelectronics and Reliability, 1966, nr 3
- [4] Commodity Informations and Identification Service: Component Termination Solderability, Quality Control Data Q.C. 1000, Anglia
- [5] COSTELLO B.J.: Flat Pack Reflow Soldering with Infrared, Bulletin of Federal Tool Comp. USA
- [6] DANCKWERTS P.W.: Gas-Liquid Reactions, McGraw-Hill Book Comp., New York, 1970

- [ 7 ] DULNIEW G.A.: Wymiana ciepła w urządzeniach elektronicznych i ich elementach, WNT, Warszawa, 1967
- [ 8 ] FERENZ K. i in.: Badania metalograficzne lutowanych złącz obwodów drukowanych, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1968
- [ 9 ] FOSTER F.G.: Embrittlement of Solder by Gold from Plated Surfaces, Papers on Solder, 1962, TT267.56
- [10] JOHNSON F.W.: Continuous Temperature Measurement, Electronic Packaging and Production, 1968, nr 8
- [11] MANKO H.H.: Solders and Soldering, McGraw-Hill Book Comp, New York, 1964
- [12] MANKO H.H.: Soldering Flat-Packs, Solid State Technology, 1968 nr 9
- [13] MANKO H.H.: Reliable Soldering of Hybrid Circuits, Solid State Technology, 1968, nr 8
- [14] MICHALSKI L., ECKERSDORF K.: Pomiar temperatury, WNT, Warszawa, 1969
- [15] MIKA M.: Lutowanie mikroukładów typu krab (flat-pack), Pomiar, Automatyka, Kontrola, 1969, nr 8
- [16] MIKA M., EKNER J.: Mikroelektroniczne konstrukcje modułowe, WNT, Warszawa, 1971
- [17] MIKA M., ORZECZOWSKI J.: Metoda pomiaru parametrów procesu lutowania, Pomiar, Automatyka, Kontrola, 1972, nr 10
- [18] MIKA M.: Zgrzewanie oporowe mikroukładów, Prace IMM, 1972, nr 3
- [19] MIKA M.: Technika warstwowa w mikroelektronice, praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1973
- [20] MIKA M.: Próba oceny parametrów procesu lutowania, Elektronika, 1972, nr 10
- [21] MIKA M.: Metoda wyznaczania parametrów lutowania ręcznego, Pomiar, Automatyka, Kontrola, 1973, nr 7
- [22] MOHLER J.B.: Solder Joints vs Time and Temperature, Machine Design, 1971, nr 9
- [23] NOBLE R.P.: On the Quality of Soldered Joints, Electronic Packaging and Production, 1969, nr 6
- [24] PN-60/T-04550. Elementy urządzeń elektronicznych. Metody badań odporności klimatycznej i mechanicznej, 1960
- [25] Hot Gas Soldering Equipment, Type B400/1,3. Catalogue, Planer G.W. Ltd, Anglia
- [26] SHULTZ H.F.: Multiple-Lead Reflow Soldering Techniques. Electronic Packaging and Production, 1967, nr 10
- [27] SHWARTZ M.M.: Modern Metal Joining Techniques, John Willey and Sons, New York, 1969
- [28] STALER J.J.: The Packaging Revolution: Form and Function Interact, Electronics, 1965, nr 20



- [29] STANISZEWSKI B.: Wymiana ciepła, PWN, Warszawa, 1968
- [30] STĘPIEŃ S.: Połączenia elektryczne, PIT, Warszawa, 1971
- [31] THWAITTES C.J.: Comparative Wetting of Printed Circuit Board by Solder, Leaflet No 52, Tin Research Institute, Anglia
- [32] TOMLIN J.E.: The Metallurgy of Microconnection Soldering, Electronic Engineering, 1970, nr 3
- [33] TOMLIN J.E.: Polishing and Sectioning of Microelectronic Components, Microelectronics, 1970, nr 4
- [34] WELTHA M.D.: A Hot-Air Soldering Facility: Design and Operation, Electronic Packaging and Production, 1967, nr 11
- [35] WILD R.N.: Effects of Gold on Solders Properties, Electronic Packaging and Production, 1968, nr 8

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПАЯННЫХ  
СТРУЕЙ ГОРЯЧЕГО ГАЗА

Резюме

В статье указан метод определения параметров процесса пайки в связи с параметрами процесса паяния струей горячего газа. Этот метод позволяет определять зависимости между произвольно избранными значениями времени и температуры пайки соответствующими параметрами метода. Он также облегчает проводить сравняющие исследования и оценку качества паянных соединений вообще.

ANALYSIS OF PARAMETERS AND QUALITY ESTIMATION OF CONNECTIONS SOLDERED  
BY HOT GAS STREAM

Summary

The paper presents a method of determination of soldering process parameters in connection with parameters of hot gas stream soldering process. The method enables to determine the relation between arbitrarily chosen soldering time and temperature values and suitable parameters of the method. It makes it possible to carry comparative researches and estimation of soldered connection quality, in general.

