

INSTYTUT TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ
POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Raport ITE

Seria: PRE nr 12

Wpływ parametrów wiązki elektro-
nowej na kształt spoin otrzymywa-
nych w niskonapięciowych spawar-
kach elektronowych

Jan Felba

Rozprawa doktorska

21148 84/
1

Jan Felba

Instytut Technologii Elektronowej

Politechniki Wrocławskiej

ul. Z. Janiszewskiego 11/17, bud. C-2

50-372 Wrocław

Rozprawa doktorska



Raport wpłynął do redakcji

dnia 10.IV. 1979r.

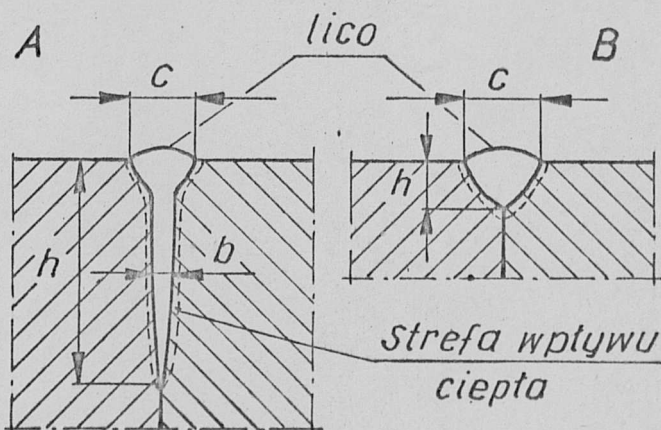
SPIS TREŚCI

	str.
1. WPROWADZENIE	1
2. METODA POMIARÓW. APARATURA POMIAROWA	7
2.1. Parametry wiązki elektronowej	7
2.2. Metodyka pomiarów wiązek elektronowych	10
2.2.1. Metoda pomiaru wiązki niezogniskowanej	10
2.2.2. Metoda pomiaru wiązki zogniskowanej	13
2.2.3. Stanowisko do badań wiązek elektronowych	20
2.3. Wyrzutnia elektronowa	22
2.4. Stanowisko do wykonywania spoin	24
2.5. Warunki pomiaru wiązek i wykonywania spoin	26
3. CHARAKTERYSTYKI WYRZUTNI	28
4. ZALEŻNOŚĆ ROZKŁADU GĘSTOŚCI MOCY WIĄZKI OD PARAMETRÓW ZASILANIA	38
4.1. Wiązka elektronowa niezogniskowana	38
4.2. Wiązka elektronowa zogniskowana	46
4.2.1. Zależność rozkładu gęstości mocy wiązki od mocy i napięcia przyspieszającego	46
4.2.2. Zależność rozkładu gęstości mocy wiązki od prądu soczewki magnetycznej	51
5. ZALEŻNOŚĆ KSZTAŁTU SPOIN OD PARAMETRÓW ZASILANIA	59
5.1. Oddziaływanie wiązki z metalem	59
5.2. Sposób wykonywania spoin	59
5.3. Zależność kształtu spoin od mocy i napięcia przyspieszającego	62
5.4. Zależność kształtu spoin od niektórych para- metrów układu elektrooptycznego	63

5.4.1. Zależność kształtu spoin od prądu soczewki magnetycznej	63
5.4.2. Zależność kształtu spoin od odległości spawanego przedmiotu od soczewki magnetycznej	65
6. ZALEŻNOŚCI MIĘDZY PARAMETRAMI WIĄZKI ELEKTRONOWEJ I GEOMETRIĄ SPOINY	68
7. NIESTABILNOŚĆ PRACY WYRZUTNI	76
7.1. Zmiana wzajemnego położenia elektrod wyrzutni	77
7.2. Zmiana prądu termokatody	82
7.3. Stabilizacja pracy wyrzutni	84
7.3.1. Stabilizacja zmian szybkich	84
7.3.2. Stabilizacja zmian wolnych	88
8. WPŁYW PÓL ZAKŁÓCAJĄCYCH NA WIĄZKĘ I SPOINĘ	89
8.1. Oddziaływanie pól magnetycznych zewnętrznych	89
8.2. Oddziaływanie pól magnetycznych wewnętrznych	95
8.3. Przeciwdziałanie oddziaływaniu pól zakłócających na wiązkę elektronową	98
9. WNIOSKI KOŃCOWE	104
SPIS LITERATURY	107

1. WPROWADZENIE

Proces spawania elektronowiazkowego polega na stopieniu krawędzi łączonych materiałów w pobliżu miejsca ich styku. Źródłem ciepła jest tu strumień elektronów, który tworzy wiązkę elektronową (WE). Kształty spoin wykonanych wiązką elektronową pokazano na rys. 1.1. Spoina przedstawiona na rys. 1.1.A, nazwana umownie „głęboka” posiada charakterystyczny kształt gwoźdźcia.



Rys. 1.1. Przekroje poprzeczne spoin wykonanych wiązką elektronową; A - spoina „głęboka”, B - spoina „płytką”

Spoina „płytką” (rys. 1.1.B) wykonana została WE o niewłaściwych parametrach i zazwyczaj traktowana jest jako nieprawidłowa.

Geometrię przekroju poprzecznego spoiny opisują jednoznacznie następujące parametry:

- głębokość h ,
- szerokość b , mierzona w połowie głębokości, oraz
- szerokość lica spoiny c .

Ze względu na rozszerzenie możliwości zastosowań spawarki, a także celem ograniczenia odkształceń pospawalniczych [10, 22] dąży się zwykle do otrzymania spoin o dużej głębokości oraz małych szerokościach b i c.

Kształt spoiny wykonanej wiązką elektronową zależy od:

- parametrów konstrukcyjnych spawarki,
- parametrów zasilania,
- parametrów technologicznych procesu spawania, a także od
- materiału spawanych detali.

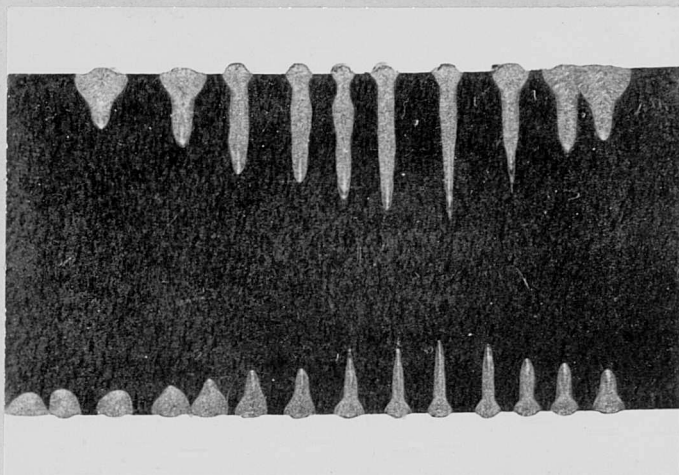
Parametry konstrukcyjne spawarki zdeterminowane są zazwyczaj jej przeznaczeniem. Warto jednak podkreślić, że pewne modyfikacje geometrii układu elektronoptycznego, szczególnie w obrębie wyrzutni, mogą w sposób istotny wpływać na zmianę kształtu spoiny.

Parametry zasilania wyrzutni decydują o kształcie wiązki [3,39,43,44] i w konsekwencji spoiny [28,30,33,43,45,49,50]. Zwykle parametry te sprowadza się do parametrów wiązki, a mianowicie:

- mocy $P_a = U_a \cdot I_a$, oraz (1.1)
- napięcia przyspieszającego, U_a .

Geometria WE i spoiny zależy w sposób istotny od wartości i rozkładu skupiającego pola magnetycznego oraz umiejscowienia płaszczyzn głównych soczewki względem katody i przedmiotu spawanego [3,30,31]. Pole to wytwarzane jest wskutek przepływu w uzwojeniu soczewki magnetycznej prądu nazywanego prądem ogniskowania, I_0 . Przykład zależności kształtu spoin od prądu I_0 pokazano na rys. 1.2.

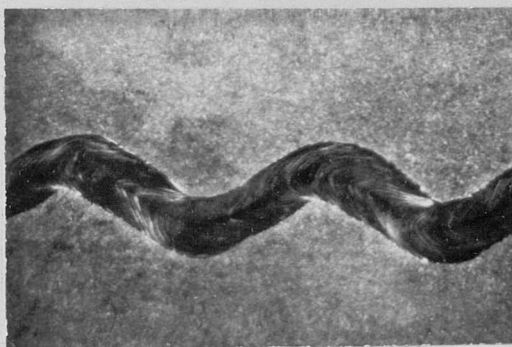
Niejednokrotnie zauważalny wpływ na geometrię spoin mają pola zakłócające [16,19,21]. Pola te w pewnych warunkach mogą



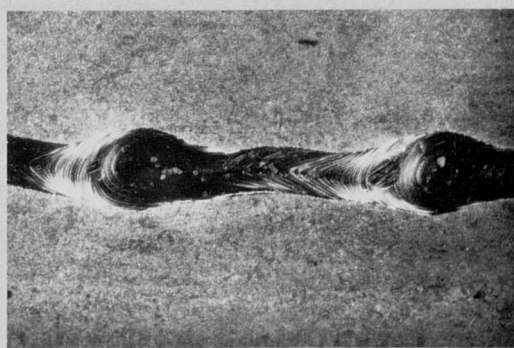
Rys. 1.2. Zależność kształtu spoin od prądu ogniskowania. I_0 zmieniono w granicach + 6%...-3% względem optymalnego prądu ogniskowania $I_{0opt}'' = 1,18A$ w przypadku spoin widocznych w górnej części próbki wykonanych wiązką o mocy $P_a = 2$ kW i napięciu $U_a = 30$ kV, oraz w granicach - 8%...+4% dla spoin widocznych w dolnej części próbki ($I_{0opt}'' = 1,09$ A, $P_a = 1$ kW, $U_a = 25$ kV) . Powiększenie 2x

powodować odchylenie wiązki w płaszczyźnie spawania. Wynikiem takiego oddziaływania jest zmiana zarówno lica jak i głębokości spoiny. Przykłady spoin wykonanych w obecności pól zakłócających pokazano na rys. 1.3 i rys. 1.4 [19] .

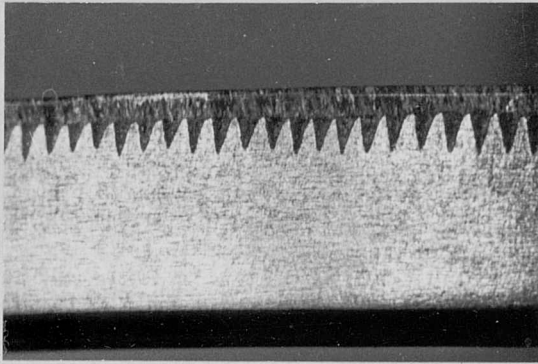
A)



B)



Rys. 1.3. Lica spoin wykonanych wiązką elektronową odchylaną wskutek oddziaływania pól zakłócających. WE odchylana w kierunku prostopadłym (A) oraz równoległym (B) do kierunku spawania



Rys. 1.4. Przekrój wzdłużny przez spoinę wykonaną wiązką elektronową odchylaną wskutek oddziaływania pól zakłócających

Kształt spoiny jest zależny również od parametrów technologicznych procesu spawania. Istotną rolę odgrywa tutaj:

- prędkość spawania [30,33,45,49,50] ,
- sposób przygotowania materiału i wielkość szczeliny w miejscu styku łączonych elementów [22] , a także
- ciśnienie w komorze roboczej urządzenia [3,11,45] .

W literaturze często spotyka się rozważania na temat wpływu poszczególnych parametrów na kształt otrzymywanych spoin. Wytworzenie jednak pełnego obrazu tych zależności jest trudne. Wynika to z faktu, że publikowane materiały

- dotyczą różnych zakresów mocy i napięć przyspieszających wiązkę elektronową,
- nie precyzują parametrów zasilania oraz sposobu ich regulacji i pomiaru,
- traktują o wpływie jednego z parametrów bez uwzględnienia wartości pozostałych, bądź też
- dotyczą konkretnych urządzeń do spawania.

Doświadczenia wykazują, że wiązanie efektów spawania ze specyfiką konstrukcji spawarki oraz stosowanym napięciem przyspieszającym i mocą wiązki elektronowej nie jest jednoznaczne. O geometrii spoiny decyduje bowiem rozkład gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania. Rozkład taki można jednak zmieniać zarówno poprzez zmianę parametrów konstrukcyjnych jak i dobór parametrów zasilania wyrzutni i soczewki magnetycznej. Rozkład gęstości mocy wiązki może być także funkcją pewnych czynników nie związanych bezpośrednio z parametrami konstrukcyjnymi i zasilania, takimi jak czas pracy urządzenia czy też oddziaływanie pól zakłócających.

Pełna znajomość zależności kształtu spoiny od rozkładu gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania, oraz rozkładu gęstości mocy wiązki od pewnych parametrów spawania jest nieodzownym warunkiem prawidłowego i najefektywniejszego wykorzystania spawarki elektronowiazkowej. Przekonanie takie zrodziło koncepcję niniejszej pracy i doprowadziło do sformułowania następujących tez:

1. Efekty spawania zależą nie tylko od całkowitej mocy doprowadzonej do wykonywanej spoiny, czy też od energii dostarczonej na jednostkę długości spoiny, ale również od rozkładu gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania.
2. Rozkład gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania zależy w istotny sposób od geometrii i parametrów zasilania wyrzutni oraz od parametrów układu elektronooptycznego odwzorowującego pozorną źrenicę elektronooptyczną.
3. Rozkład gęstości mocy wiązki może ulegać okresowym lub ciągłym deformacjom w wyniku niestabilnej pracy wyrzutni oraz skutkiem oddziaływania zmiennych pól zakłócających.

Weryfikacja postawionych tez wymaga prześledzenia drogi wiązki między wyrzutnią i spawanymi detalami celem doświadczalnego zbadania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych i zasilania na rozkład gęstości mocy i kształt spoiny. W trakcie kilkuletniej pracy z niskonapięciowymi urządzeniami do spawania elektronowiazkowego stwierdzono, że najistotniejszy wpływ mają tu:

- napięcia i prądy zasilania elektrod wyrzutni,
- położenie katody w otworze elektrody sterującej wyrzutni,
- wartość prądu ogniskowania oraz umiejscowienie soczewki magnetycznej w układzie elektronooptycznym,
- niestabilność pracy wyrzutni, a także
- pola zakłócające.

2. METODYKA POMIARÓW. APARATURA POMIAROWA

2.1. Parametry wiązki elektronowej

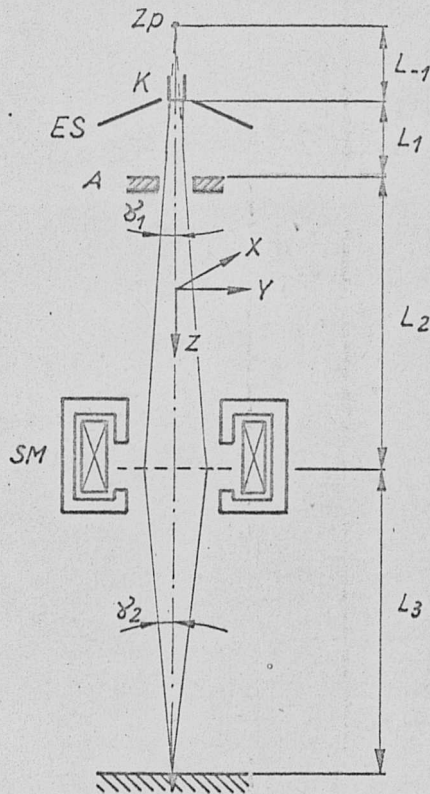
W niskonapięciowych spawarkach elektronowiązkowych do odwzorowania źrenicy elektrooptycznej stosuje się najczęściej jedną soczewkę ogniskującą. Między katodą wyrzutni a spawanymi przedmiotami można wówczas wyodrębnić następujące obszary:

- obszar wyrzutni,
- obszar przelotowy między wyrzutnią i soczewką magnetyczną,
- obszar oddziaływania pola soczewki, oraz
- obszar przelotowy między soczewką magnetyczną a spawanymi przedmiotami.

W rozważaniach nad torami elektronów pomija się często obszar oddziaływania pola skupiającego przyjmując, że soczewka magnetyczna jest nieskończenie cienka. Granicę, na której tory elektronów ulegają załamaniu, określa wówczas płaszczyzna prostopadła do osi WE przechodząca przez środek szczeliny soczewki. Uproszczony kształt wiązki w przekroju podłużnym z zaznaczonymi obszarami:

- L_1 - przyspieszania w obrębie wyrzutni,
- L_2 - przelotowym „rozbieżnym”, oraz
- L_3 - przelotowym „zbieżnym”

pokazano na rys. 2.1. W przyjętym układzie współrzędnych oś elektrooptyczna pokrywa się z osią z , a punktem początkowym, $z = 0$, jest powierzchnia emisyjna katody. W zależności od rozpatrywanego obszaru przelotu wiązki wprowadzono następujące określenia:

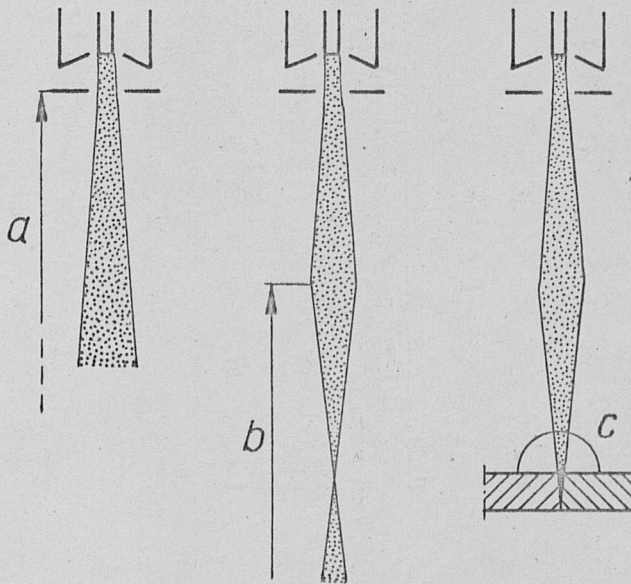


Rys. 2.1. Kształt wiązki elektronowej: K - katoda, A - anoda, ES - elektroda sterująca, SM - soczewka magnetyczna, Z_p - położenie źrenicy elektrooptycznej pozornej

- wiązka niezogniskowana (w obszarze L_2),
- wiązka zogniskowana (w obszarze L_3), oraz
- wiązka spawająca (w obszarze L_3 tuż przy powierzchni spawanego materiału).

Wiązka spawająca jest szczególnym przypadkiem wiązki zogniskowanej. Wyróżnienie pojęcia wiązki spawającej wynika z możliwości zmiany kształtu WE w bezpośrednim sąsiedztwie wykonywanej spoiny wskutek oddziaływania par i jonów par spawanego metalu [1,12,26, 32,35]. Ze względu na trudności w pomiarze rozkładu gęstości

mocy wiązki spawającej a także na niejednoznaczność wyników prac zamieszczanych w literaturze [17] , zmian tych nie uwzględniono i badano relacje między wiązką zogniskowaną i spoiną. Wiązki: niezogniskowaną, zogniskowaną oraz spawającą pokazano na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Wiązka niezogniskowana (a) , wiązka zogniskowana (b) , oraz wiązka spawająca (c)

Wiązkę elektronową charakteryzują następujące parametry:

- moc P_a (wzór 1.1) ,
- napięcie przyspieszające U_a ,
- gęstość mocy

$$\sigma = \frac{d P_a}{d A} \quad (2.1)$$

- średnica S ,
- kąt aperturowy γ_1 ,

- kąt zbieżności γ_2 , oraz

- położenie źrenicy elektrooptycznej pozornej L_{-1} .

Gęstość mocy oraz średnicę wiązki określono w wybranych płaszczynach prostopadłych do osi WE o następujących współrzędnych:

- $z = 333,5$ mm w przypadku wiązki niezogniskowanej, oraz

- $z = 643,5$ mm w przypadku wiązki zogniskowanej.

Średnica wiązki nie jest jednoznacznie definiowana w literaturze.

Zwykle przyjmuje się, że jest to odległość między dwoma przeciwnymi punktami rozkładu gęstości mocy, w których gęstość mocy

wynosi p -tą część wartości maksymalnej. W oparciu o [6,25] przy-

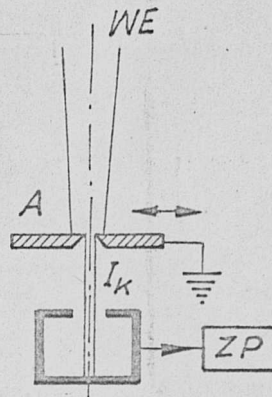
jęto $p = 0,5$ a zdefiniowaną w ten sposób średnicę oznaczono ja-

ko $S_{0,5}$. Kąty γ_1, γ_2 oraz położenie L_{-1} pozornej źrenicy elektrooptycznej zaznaczono na rys. 2.1.

2.2. Metodyka pomiarów wiązek elektronowych

2.2.1. Metoda pomiaru wiązki niezogniskowanej

Zasadę pomiaru wiązki niezogniskowanej pokazano na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Zasada pomiaru wiązki elektronowej przy użyciu analizatora; A - analizator, ZP - zespół pomiarowy

Zastosowano tu miedziany analizator z otworem kołowym, chłodzony wodą. Analizator ten wycina pewną część wiązki a zespół pomiarowy dołączony do kolektora elektronów umożliwia pomiar prądu przechodzącego I_k . Przy powierzchni otworu analizatora A_k gęstość mocy WE określa wzór:

$$\sigma = \frac{U_a}{A_k} \cdot I_k \quad (2.2)$$

Przesuwając analizator w kierunku x oraz y w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki dokonuje się pomiaru rozkładu prądu przechodzącego, a z zależności

$$\sigma(x,y) = \frac{U_a}{A_k} \cdot I_k(x,y) \quad (2.3)$$

oblicza się rozkład gęstości mocy. Zwykle analizator przemieszcza się w wybranym kierunku (x bądź y) poprzez wyszukany wcześniej obszar o największej wartości I_k . Na podstawie otrzymanej zależności $\sigma = f(x)$ bądź $\sigma = f(y)$ ocenia się średnicę wiązki.

Przykład zarejestrowanego rozkładu $\sigma = f(x)$ pokazano

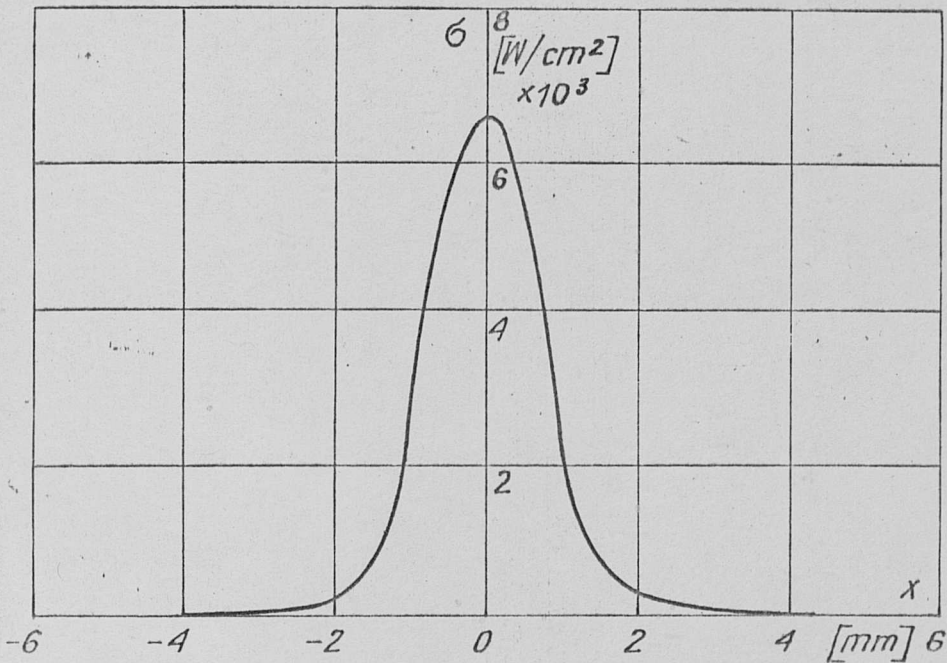
na rys. 2.4.

W celu określenia kąta aperturowego oraz położenia źrenicy elektronooptycznej pozornej posłużono się analizą geometryczną, przy czym przyjęto następujące założenia:

- soczewka katodowa wyrzutni odwzorowuje źrenicę elektronooptyczną w źrenicę pozorną o nieskończenie małej średnicy,
- soczewki wyrzutni nie wprowadzają aberracji,
- elektrony wiązki w obszarze przelotowym nie podlegają oddziaływaniu żadnych sił, a tory elektronów są liniami

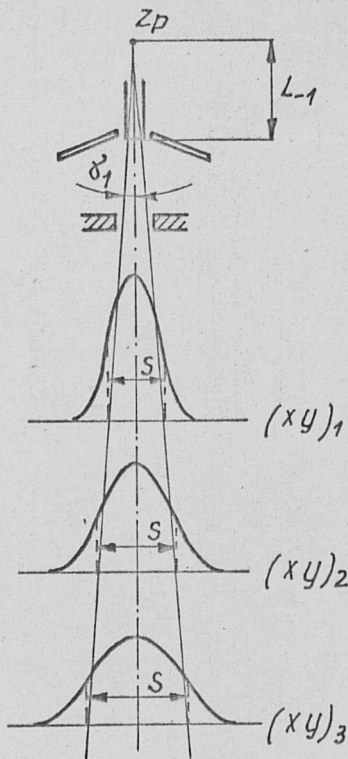
prostymi , oraz

- tory elektronów i oś z leżą na wspólnych płaszczyznach.



Rys. 2.4. Rozkład gęstości mocy w płaszczyźnie $z = 333,5$ prostopadłej do osi wiązki ; $P_a = 1$ kW, $U_a = 25$ kV

Przy takich założeniach wiązka ma kształt stożka. Rozkład gęstości mocy w różnych płaszczyznach prostopadłych do osi wiązki zachowuje ten sam charakter, a zmiana proporcji wynika ze zmiany odległości z . Celem wyznaczenia poszukiwanych wartości L_{-1} i γ_1 dokonuje się pomiaru średnicy WE w conajmniej dwóch płaszczyznach xy i następnie łączy prostymi punkty określające średnice wiązki. Jak widać z rys. 2.5 proste te przecinają oś z w miejscu położenia źrenicy elektrooptycznej pozornej, Z_p i jednocześnie wyznaczają kąt aperturowy γ_1 .



Rys. 2.5. Sposób określenia kąta aperturowego γ_1 oraz położenia źrenicy elektrooptycznej pozornej Z_p

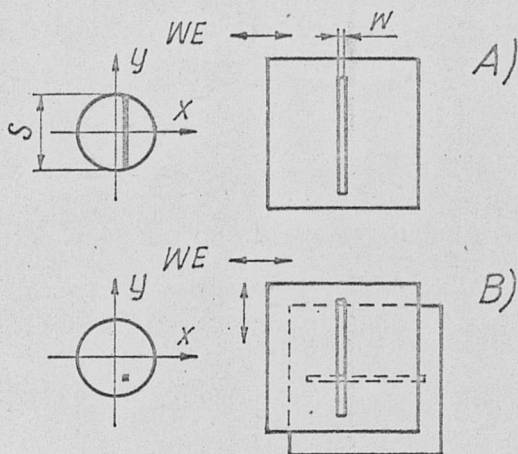
Kąt zbieżności wiązki γ_2 wyznacza się w analogiczny sposób mierząc rozkłady gęstości mocy wiązki w obszarze L_3 .

2.2.2. Metoda pomiaru wiązki zogniskowanej

Przy pomiarach wiązki zogniskowanej, gęstość mocy w płaszczyźnie analizowanej znacznie przekracza wartości, powyżej których istnieje niebezpieczeństwo stopienia elementów pomiarowych. Dlatego też pomiar możliwy jest tu jedynie w warunkach impulsowych, przy czym stosuje się różne rozwiązania techniczne [6,11,14,42,44,47]. Istota pomiaru impulsowego polega na tym, że czas pomiaru jest wielokrotnie krótszy od czasu przerwy między

Pol. Wrocław.

pomiarami. Opisane w literaturze metody pozwalają zwykle na bezpośredni pomiar WE jedynie w postaci rozkładu „plastrowego” [6,11,25,27,42,44] . Przykład takiego sposobu pomiaru pokazano na rys. 2.6A. Analizator szczelinowy przemieszczony w kierunku x,



Rys. 2.6. Analizowany obszar wiązki elektronowej przy zastosowaniu analizatora z jedną (A) oraz dwoma szczelinami (B)

wycina pełną część wiązki a zespół pomiarowy dołączony do kolektora elektronów umożliwia pomiar prądu przechodzącego I_k (rys.2.3).

W przypadku wiązki osiowo - symetrycznej „plastrowy” rozkład prądu dany jest zależnością [27] :

$$I_k(x) = 2 w \int_x^{\frac{1}{2}S} \frac{\varrho J(\varrho) d\varrho}{(\varrho^2 - x^2)^{1/2}} \quad (2.4)$$

gdzie:

$$\varrho^2 = x^2 + y^2,$$

$J(\varrho)$ - gęstość prądu w wiązce,

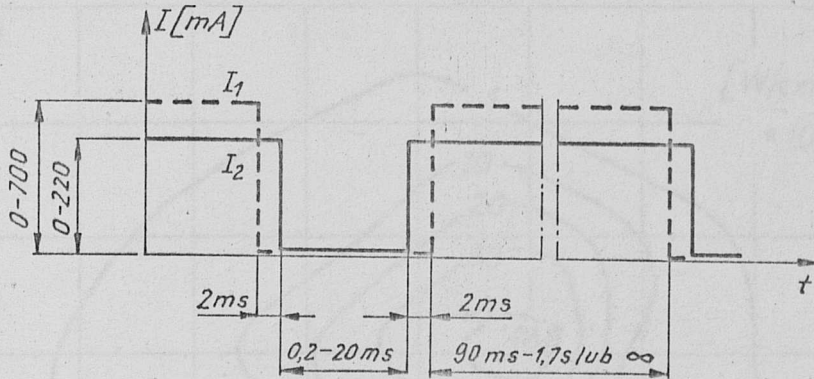
w - szerokość szczeliny analizatora,

S - średnica wiązki.

Rozkład gęstości mocy wiązki wygodnie jest przedstawić w postaci promieniowego rozkładu $\epsilon = f(r)$. Rozkład promieniowy prądu przechodzącego $I_k(r)$ oblicza się ze zmierzonych rozkładów „plastrowych” korzystając z wzoru [27] :

$$I_k(r) = - \frac{1}{w\pi r} \frac{d}{dr} \int_r^{\frac{1}{2}S} \frac{I_k(x) x dx}{(x^2 - r^2)^{1/2}} \quad (2.5)$$

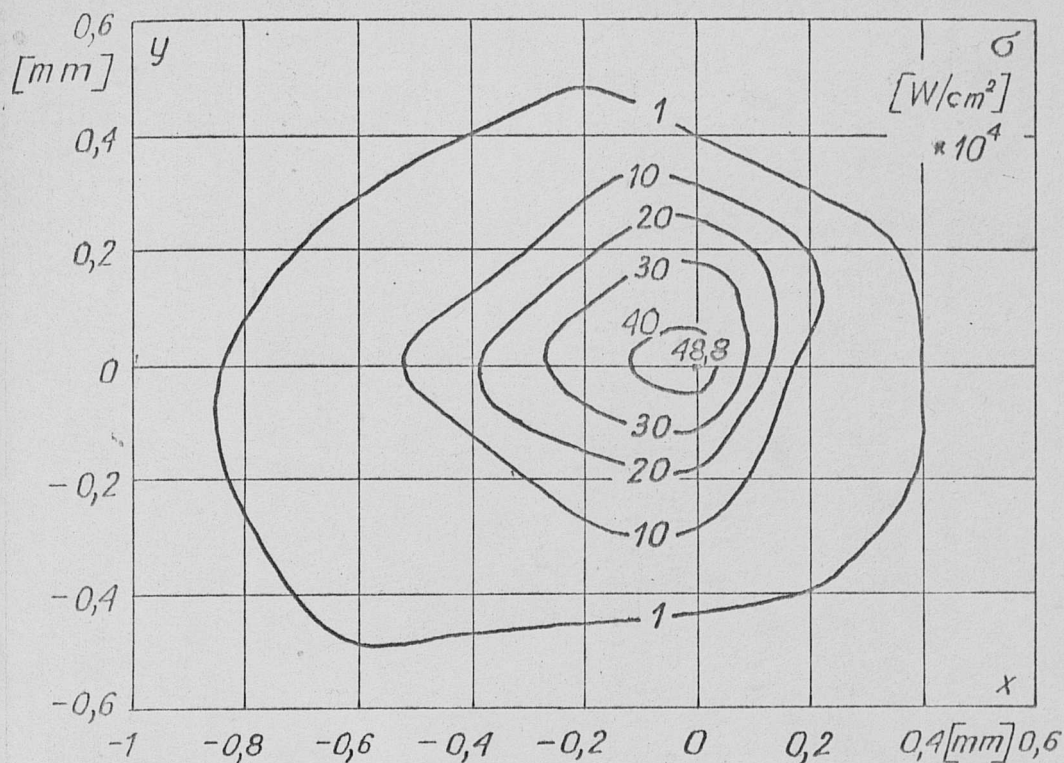
Celem wyeliminowania kłopotliwych obliczeń i zwiększenia dokładności pomiaru opracowano oryginalną metodę polegającą na modyfikacji metody analizatora szczelinowego przez wprowadzenie drugiej prostopadłej szczeliny (rys. 2.6 B). Przemieszczanie szczelin w kierunkach x oraz y w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki pozwala na bezpośredni pomiar prądu przechodzącego $I_k(x,y)$ przy zastosowaniu oscyloskopu i obliczenia gęstości mocy wiązki (w/g wzoru 2.3). W czasie niezbędnej przerwy między pomiarami wiązka jest rozogniskowana przez dodatkową cewkę rozogniskującą i odchylana przez zespół cewek odchylających na blok miedziany intensywnie chłodzony wodą. Cykl pomiarowy zdeteminowany jest przebiegami prądów zasilających cewki. Przebiegi tych prądów pokazano na rys. 2.7. W czasie wyłączenia zasilania cewek odchylających ($I_2 = 0$) zogniskowana wiązka pada na szczeliny analizatora. Zespół pomiarowy rejestruje stałą wartość prądu I_k w badanym punkcie. Zmieniając położenie szczelin można wyznaczyć rozkład prądu przechodzącego i obliczyć rozkład gęstości mocy wiązki w całej płaszczyźnie. Przykład takiego rozkładu pokazano na rys. 2.8.



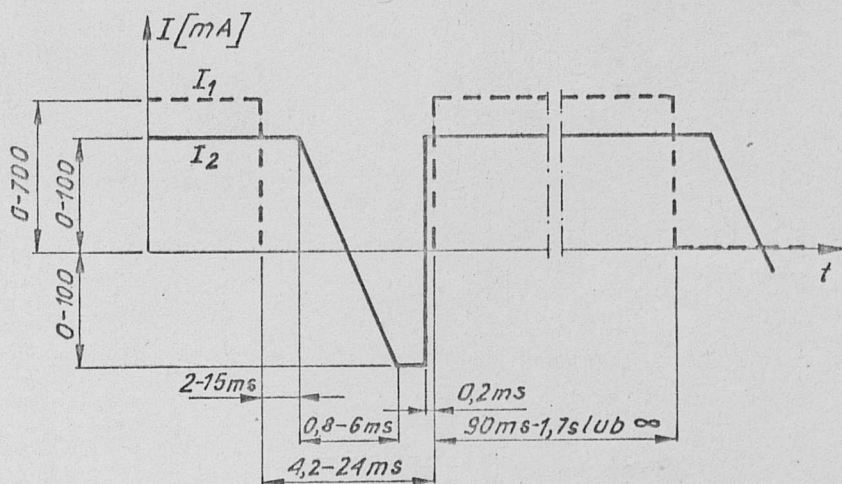
Rys. 2.7. Przebiegi prądów w cewkach rozogniskowującej (I_1) oraz odchylających (I_2) przy stosowaniu metody przesuwu analizatora

Opracowana metoda, nazwana metodą przesuwu analizatora, pozwala na dokładną analizę rozkładu gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do osi WE. Wymaga to jednak przeanalizowania, w zależności od przyjętej dokładności, kilkudziesięciu do kilkuset oscylogramów.

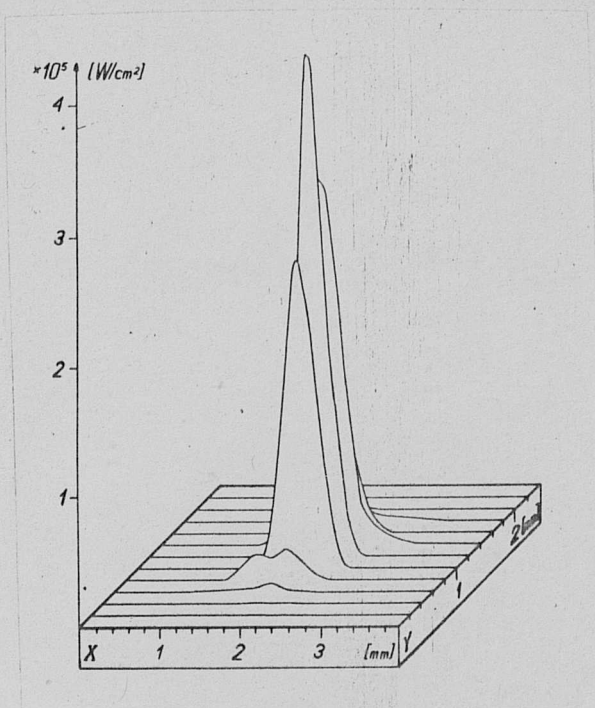
Modyfikacją metody przesuwu analizatora pozwalającą na znaczne przyspieszenie pomiarów, jest metoda przemiatania. W metodzie tej, w czasie liniowej zmiany wartości i kierunku prądu cewek odchylających (rys. 2.9) wiązka ruchem jednostajnym przechodzi przez górną szczelinę analizatora. Na ekranie oscyloskopu obserwuje się kształt rozkładu prądu wiązki dla określonego położenia dolnej szczeliny. Na rys. 2.10 [15] pokazano rozkład gęstości mocy WE w przypadku, gdy wiązka odchylana była w kierunku x , a w kierunku y przesuwano skokowo szczelinę dolną. Zwykle rejestruje się jedynie przebieg charakteryzujący się największą wartością I_k . Przeskalowanie takiego oscylogramu



Rys. 2.8. Rozkład gęstości mocy w wiązce zogniskowanej. Pomiar metodą przesuwu analizatora; $P_a = 1 \text{ kW}$, $U_a = 30 \text{ kV}$



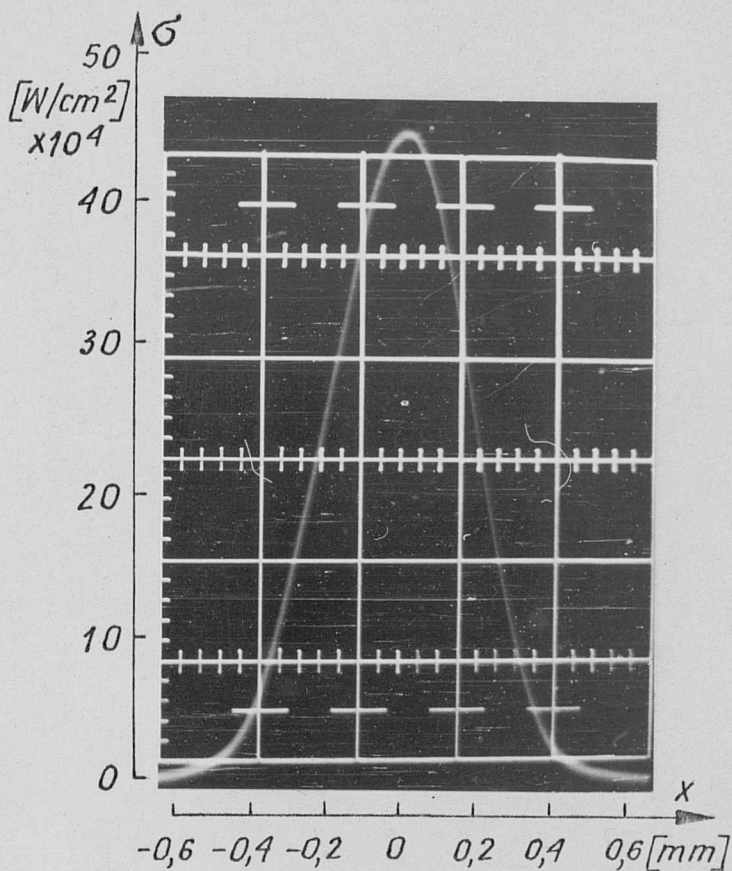
Rys. 2.9. Przebiegi prądów w cewkach rozogniskowującej (I_1), oraz odchylających (I_2) przy stosowaniu metody przemiatań



Rys. 2.10. Rozkład gęstości mocy wiązki zmierzony metodą przemiatań

pozwala na bezpośredni odczyt promieniowego rozkładu gęstości mocy. Przykład rozkładu $\phi = f(x) = f(r)$ przedstawiono na rys. 2.11.

Na rys. 2.8 oraz rys. 2.11 pokazano ten sam rozkład gęstości mocy wiązki zmierzony metodą przesuwu analizatora oraz metodą przemiatań, a charakterystyczne parametry WE podano w tabeli 2.1. Błąd odniesiono do wartości zmierzonych metodą przesuwu analizatora i przyjęto, że nie dyskwalifikuje on przydatności metody przemiatań. Ze względu na niewątpliwą zaletę, jaką jest szybkość pomiaru, metodę tę wykorzystano w pracy do pomiaru wiązki zogniskowanej.



Rys. 2.11. Promieniowy rozkład gęstości mocy w wiązce ogniskowanej. Pomiar metodą przemiatań; $P_a = 1 \text{ kW}$, $U_a = 30 \text{ kV}$

Tabela 2.1

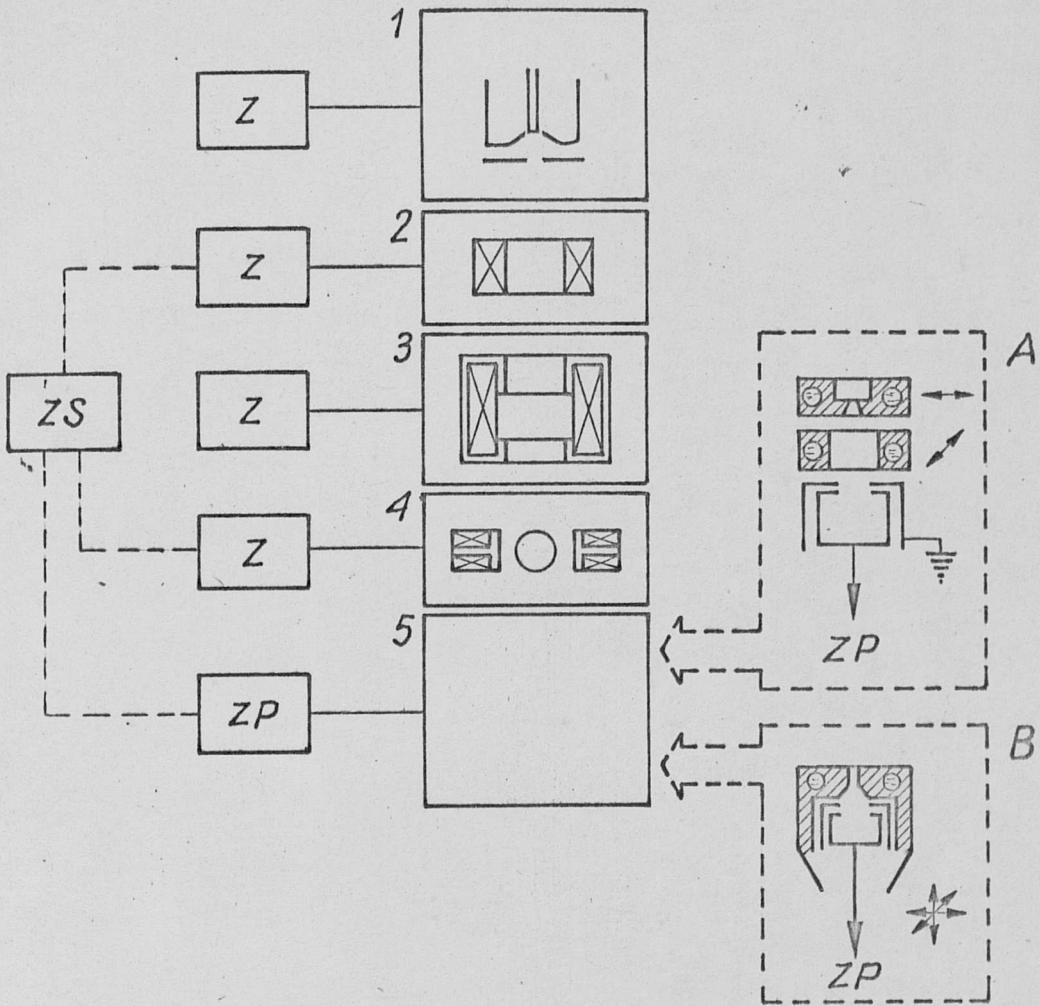
parametr	σ_{\max}	$S_{0,5}(x)$
metoda przesuwu analizatora	$48,8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	0,43 mm
metoda przemiatań	$45,0 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	0,41 mm
błąd	8%	5%

2.2.3. Stanowisko do badań wiązek elektronowych

Pomiary parametrów WE wykonywano na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym [14,15] . Na rys. 2.12 pokazano zasadnicze elementy kolumny pomiarowej tego stanowiska. Są to:

1. Komora wyrzutni.
2. Cewka rozogniskowująca.
3. Soczewka magnetyczna.
4. Cewki odchylające.
5. Komora pomiarowa.

W komorze pomiarowej umieszcza się analizator z otworem kołowym przemieszczanym w kierunku x, y oraz z dla pomiaru wiązek niezogniskowanych, bądź analizatory szczelinowe i puszkę Faraday'a wraz z kolektorem elektronów dla pomiaru wiązek zogniskowanych. W przypadku pomiaru wiązek niezogniskowanych komorę wraz z wyrzutnią (1) montuje się bezpośrednio na komorę pomiarową (5) .



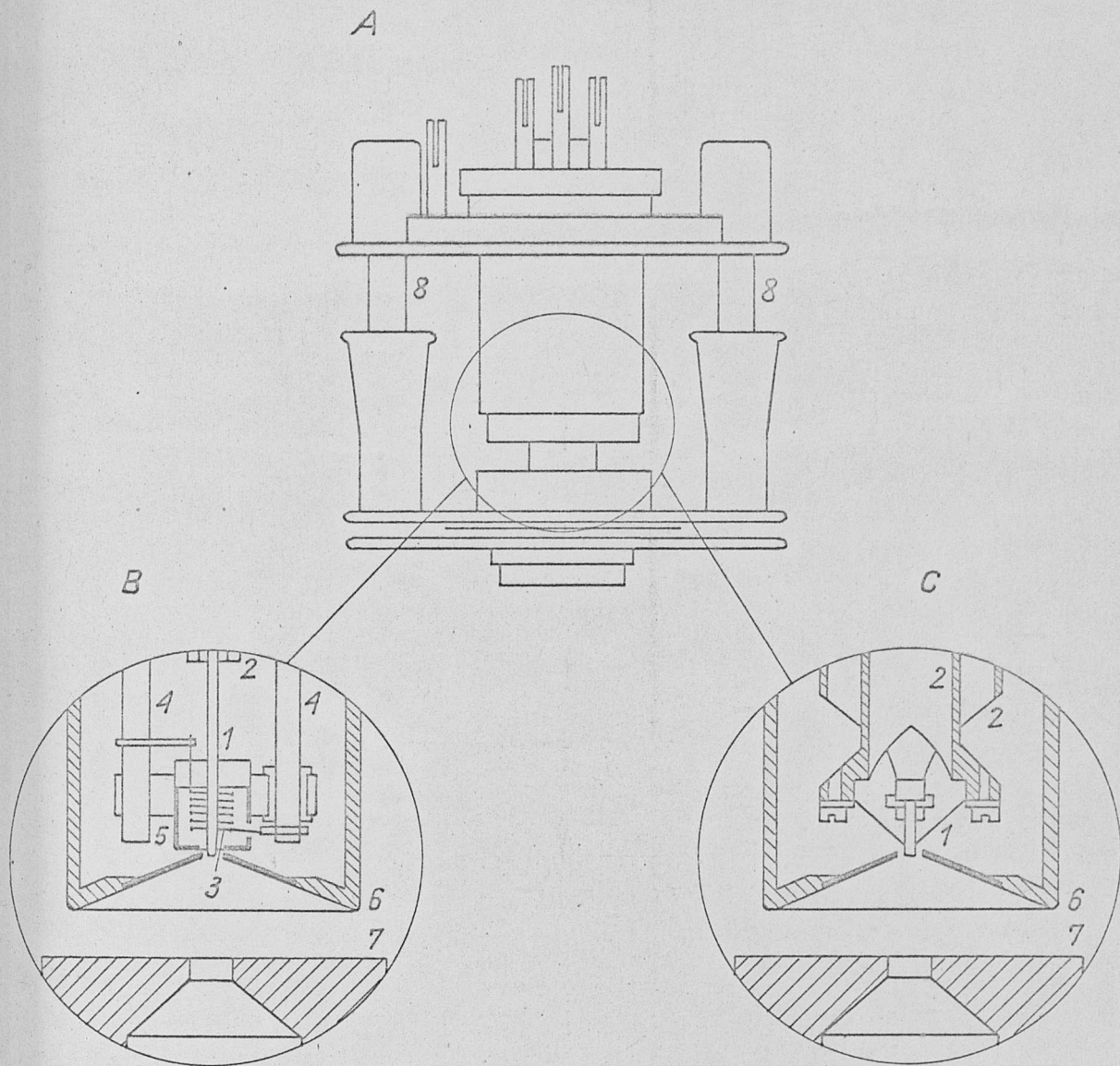
Rys. 2.12. Schemat kolumny pomiarowej stanowiska badawczego:
1 - komora wyrzutni, 2 - zespół cewki rozogniskowującej,
3 - soczewka magnetyczna, 4 - zespół cewek odchylających,
5 - komora pomiarowa, A - zespół analizatora do pomiaru
WE zogniskowanej, B - analizator do pomiaru WE niezognis-
kowanej, Z - zasilacz, ZP - zespół pomiarowy, ZS - zespół
sterujący pracą cewek

2.3. Wyrzutnia elektronowa

Źródłem wiązki elektronowej w niskonapięciowej spawarce jest zwykle sferyczna wyrzutnia triodowa. Wyrzutnia taka posiada trzy zasadnicze elektrody: katodę, elektrodę sterującą oraz anodę. Tworzą one tzw. soczewkę katodową i odgrywają główną rolę w formowaniu WE.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano wyrzutnię pozwalającą na zmianę wzajemnego usytuowania elektrod. Jest to wyrzutnia z katodą żarzoną bądź pośrednio, bądź też bezpośrednio. W przypadku katody żarzonej pośrednio energia niezbędna do nagrzania katody jest dostarczana poprzez bombardowanie jej elektronami emitowanymi z dodatkowej katody i przyspieszonymi polem elektrycznym. Katodę dodatkową nazywa się często katodą pomocniczą, a katodę emitującą wiązkę elektronową - katodą właściwą, rzeczywistą, lub w skrócie, katodą. Katoda bezpośrednio żarzona grzana jest oporowo [20] .

Budowę wyrzutni oraz szczegóły rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rys. 2.13, natomiast podstawowe dane geometryczne zebrano w tabeli 2.2.



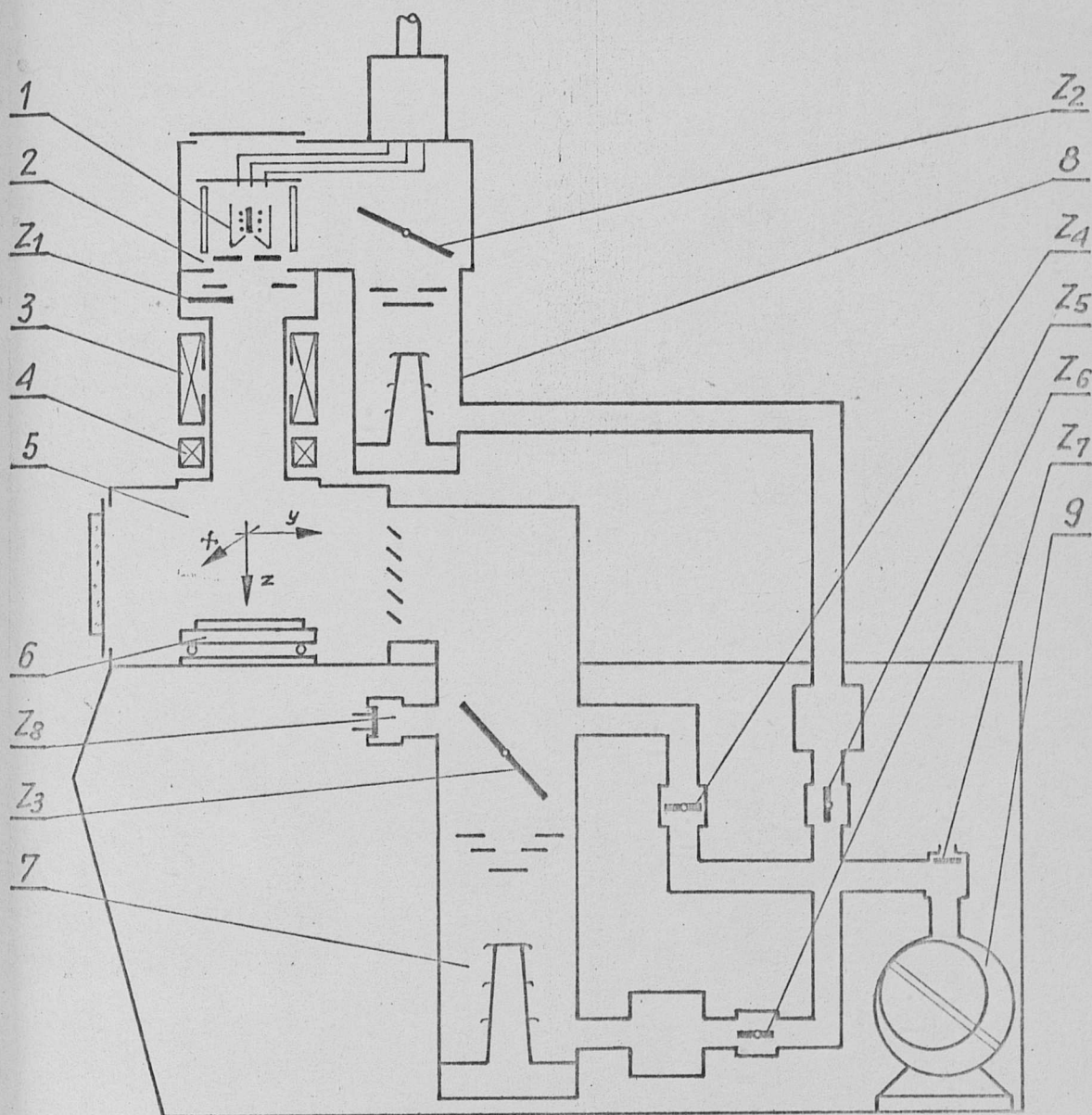
Rys. 2.13. Wyrzutnia pomiarowa: A - widok ogólny, B - zespół katody pośrednio żarzonej, C - katoda bezpośrednio żarzona, 1 - katoda, 2 - uchwyt katody, 3 - katoda pomocnicza, 4 - wsporniki katody pomocniczej, 5 - ekran katody pomocniczej, 6 - elektroda sterująca, 7 - anoda, 8 - izolatory

Tabela 2.2

Wyrzutnia	z katodą pośrednio żarzoną	z katodą bezpośrednio żarzoną
katoda	pręt wolframowy	wytłoczka tantalowa
powierzchnia czołowa katody	∅ 1 mm, płaska	∅ 1,3 mm płaska
katoda pomocnicza	skrętka wolframowa (rys. 8.2)	-
zbieżność elektrody sterującej	135°	135°
otwór w elektrodzie sterującej	∅ 2 mm	∅ 2 mm
powierzchnia anody	płaska	płaska
otwór w anodzie	∅ 6 mm	∅ 6 mm

2.4. Stanowisko do wykonywania spoin

Próby spawania przeprowadzono wykorzystując spawarkę WS-2/30. Jest to urządzenie uniwersalne pozwalające na wykonywanie spoin liniowych oraz obwodowych. Spawarkę WS-2/30 zalicza się do grupy spawarek niskonapięciowych małej mocy. Maksymalna moc urządzenia nie przekracza 2 kW przy napięciu przyspieszającym WE nie większym niż 30 kV. Schemat zawierający ważniejsze elementy zespołu wytwarzającego próżnię oraz układu elektronooptycznego spawarki pokazano na rys. 2.14.



Rys. 2.14. Schemat urządzenia roboczego spawarki WS-2/30
1 - wyrzutnia elektronowa, 2 - komora wyrzutni elektro-
nowej, 3 - soczewka magnetyczna, 4 - cewki odchylające,
5 - komora robocza, 6 - stolik manipulacyjny, 7 - pompa
dyfuzyjna komory roboczej, 8 - pompa dyfuzyjna komory wy-
rzutni, 9 - pompa obrotowa, $Z_1 \div Z_8$ - zawory próżniowe

2.5. Warunki pomiaru wiązek i wykonywania spoin

W tabeli 2.3 podano standartowe warunki pomiaru wiązek i wykonywania spoin. W trakcie badań zmieniano zwykle wartości

Tabela 2.3

Warunki eksperymentów	Ustalone wartości	Uwagi
Wyrzutnia elektronowa	katoda pośrednio żarzona	rys.2.13 rys.8.2 tab.2.2
	$L_1 = 14$ mm	rys. 2.1
	$\Delta z = 0,0$ mm	rys. 3.2
Układ elektrooptyczny	$L_2 = 319,5$ mm	rys. 2.1
	$L_3 = 310$ mm	rys. 2.1
Soczewka magnetyczna	$N = 740$ zwojów	
	$s = 47$ mm	rys. 4.12
	$D_1 = D_2 = 71$ mm	rys. 4.12
Próbki spawalnicze	stal 1H18N9T bez szczeliny	
Prędkość spawania	$v_s = 0,01$ m/sek	
Ciśnienie gazów w komo- rze spawania (pomiaro- wej)	$1,33 \cdot 10^{-2} \dots$ $\dots 1,33 \cdot 10^{-3}$ N/m ² ($10^{-4} \dots 10^{-5}$ Tr)	
Niestabilność pracy wyrzutni	$\frac{\Delta I_a}{I_a \cdot t} < 10\%/godz$	
Pola zakłócające	PMZ:B $< 1,2 \cdot 10^{-6}$ T PMW : B = 0	rys. 8.5

tylko jednego parametru i analizowano wpływ tych zmian na rozkład gęstości mocy w wiązce oraz na kształt spoin. Pozwalało to na określenie relacji między kształtem spoiny i rozkładem gęstości mocy w wiązce oraz na sprecyzowanie szeregu praktycznych wniosków odnośnie prawidłowej eksploatacji spawarek elektro-
nowiązkowych w różnych warunków pracy.

3. CHARAKTERYSTYKI WYRZUTNI

Efekty spawania wiązką elektronową zależą w znacznym stopniu od całkowitej mocy doprowadzonej do wykonywanej spoiny.

W przypadku klasycznych trójelektrodowych wyrzutni elektronowych całkowita moc emitowanej wiązki zależy głównie od:

- temperatury katody , T_k ,
- napięcia elektrody sterującej , U_{ES} ,
- napięcia przyspieszającego, U_a , oraz
- położenia katody w otworze elektrody sterującej , Δz .

W przypadku wyrzutni z katodą pośrednio żarzoną (rys. 2.13 B) temperatura katody zdeteminowana jest mocą bombardowania P_b , przy czym:

$$P_b = U_b \cdot I_b \quad (3.1)$$

gdzie: U_b - napięcie między katodą rzeczywistą i katodą pomocniczą,

I_b - prąd między katodami.

Przy wykorzystaniu pirometru monochromatycznego zmierzono temperaturę katody dla różnych mocy P_b . Stwierdzono, że w przypadku węzła katodowego wyrzutni pomiarowej (rozdz. 2.3) temperatura czosła katody T_{ko} zależy od mocy bombardowania wyrażonej w watach w sposób następujący:

$$T_{ko} \approx 1980 + 10 P_b \quad [K] \quad (3.2)$$

przy czym zależność ta obowiązuje w zakresie zmian P_b - 40...120W a błąd odniesiony do wartości zmierzonych nie przekracza 2%. Rozkład temperatury wzdłuż całej katody dla wybranych wartości P_b przedstawiono na rys. 3.1.

Oszacowano, że na odcinku około 6 mm od czoła, temperatura katody $T_k(z)$ zmienia się zgodnie z zależnością:

$$T_k(z) \cong T_{k0} - 30 z \quad [K] \quad (3.3)$$

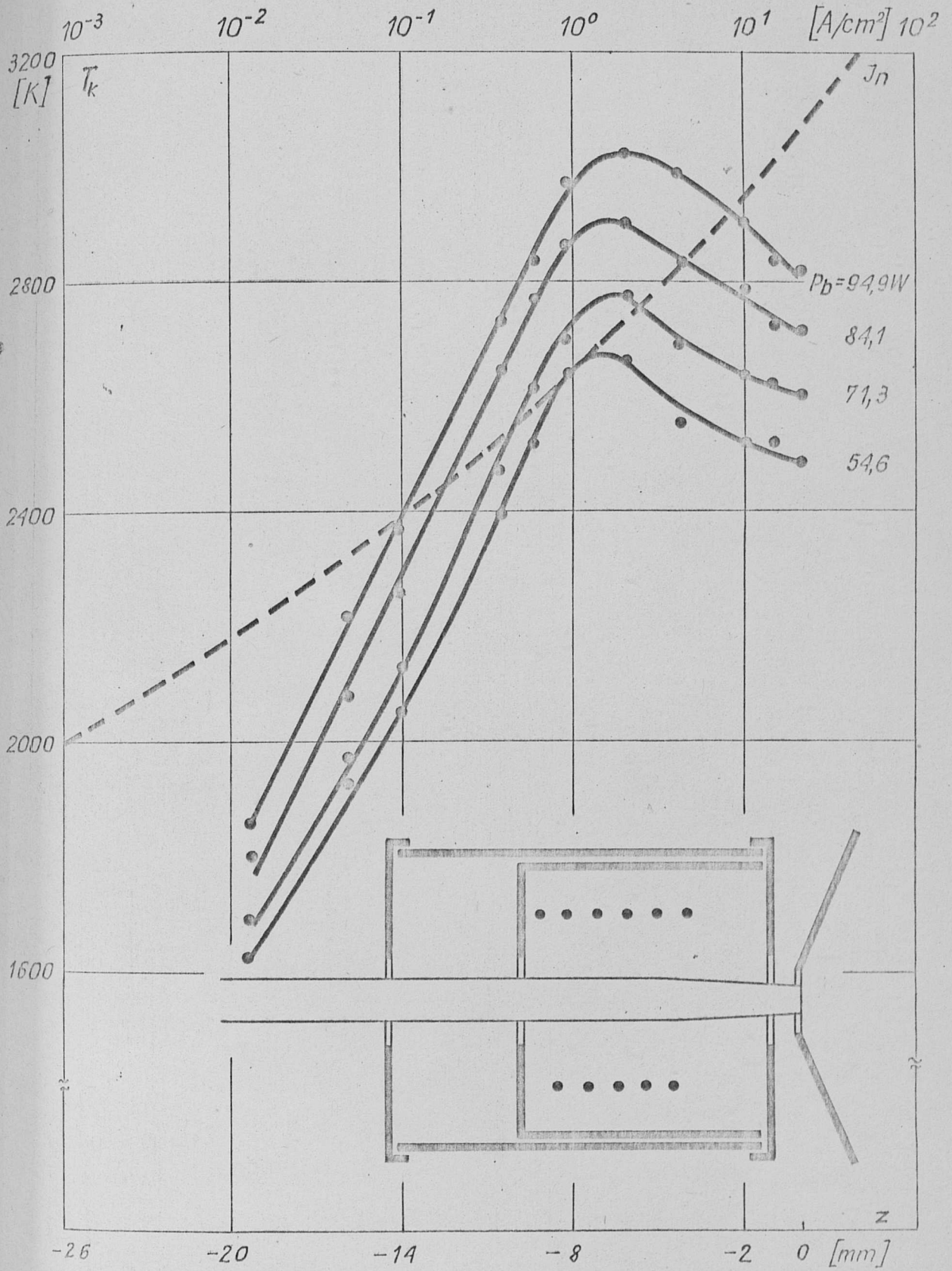
gdzie z jest odległością od czoła katody wyrażoną w milimetrach i zgodnie z przyjętym układem współrzędnych (rozdz. 2.1) przybiera tu wartości ujemne.

Na rys. 3.1 pokazano także zależność gęstości prądu emisji od temperatury (w/g [13]).

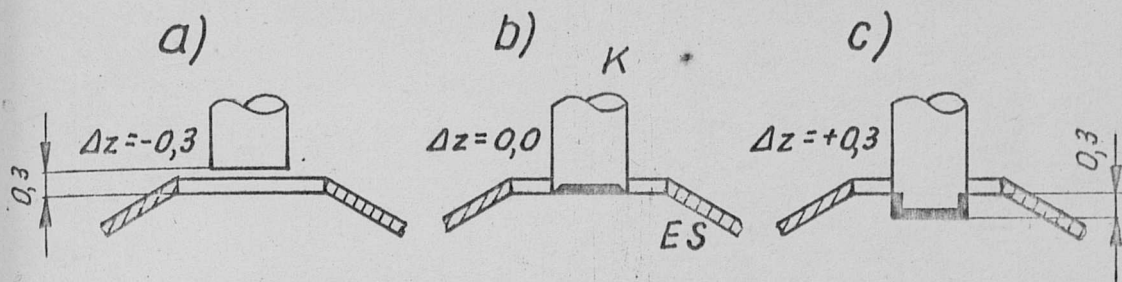
Odległość powierzchni czołowej katody od płaszczyzny otworu elektrody sterującej oznaczone symbolem Δz odpowiednio ze znakiem plus lub minus. Sposób oznaczenia pokazano na rys. 3.2.

Regulacja mocy wiązki poprzez zmianę parametrów zasilania wyrzutni oraz położenia katody Δz , powoduje określone zmiany rozkładu gęstości mocy wiązki i w konsekwencji kształtu spoiny. Wyliczoną teoretycznie przez Friedla [24] zależność głębokości spoiny, h , od mocy wiązki pewnej wyrzutni triodowej pokazano przykładowo na rys. 3.3, przy czym moc zmieniano w sposób następujący:

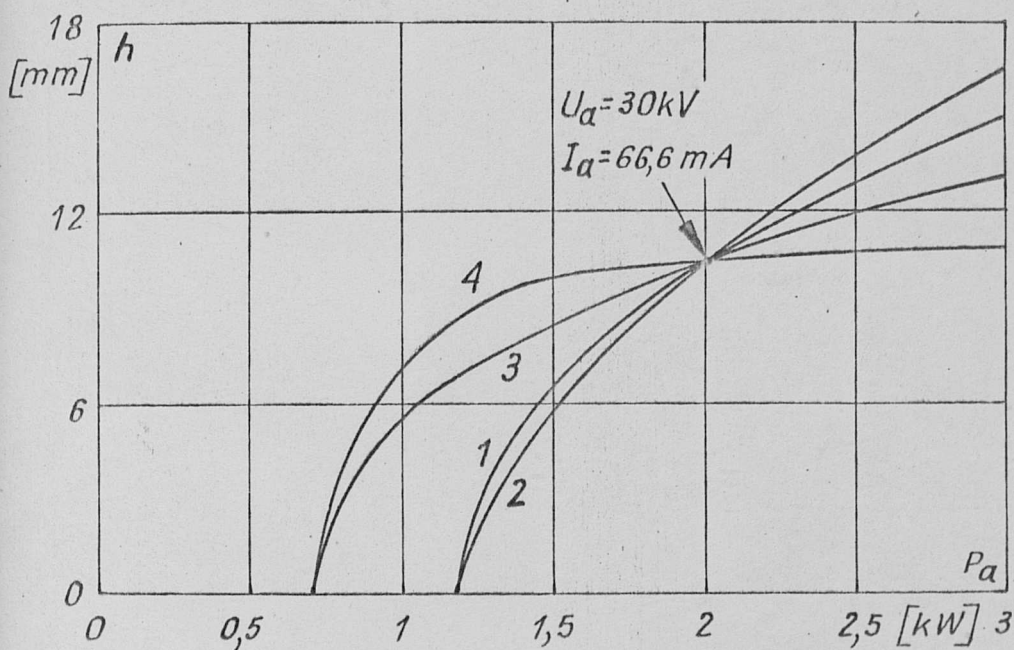
- krzywa 1 - U_a stałe, I_a zmienne poprzez regulację U_{ES} ,
- 2 - U_a stałe, I_a zmienne poprzez regulację P_b ,
- 3 - U_a zmienne, I_a stałe poprzez regulację U_{ES} ,
- 4 - U_a zmienne, I_a stałe poprzez regulację P_b .



Rys. 3.1. Rozkład temperatury wzdłuż katody pośrednio żarzonej



Rys. 3.2. Sposób oznaczenia położenia katody w otworze elektrody sterującej



Rys. 3.3. Teoretyczna zależność głębokości spoiny od mocy wiązki

Z przedstawionych na rys. 3.3 zależności $h = f(P_a)$ widać, że sposób regulacji mocy wiązki ma istotny wpływ na głębokość spoiny przy określonej wartości P_a . Dodatkowym kryterium wyboru sposobu regulacji mocy jest:

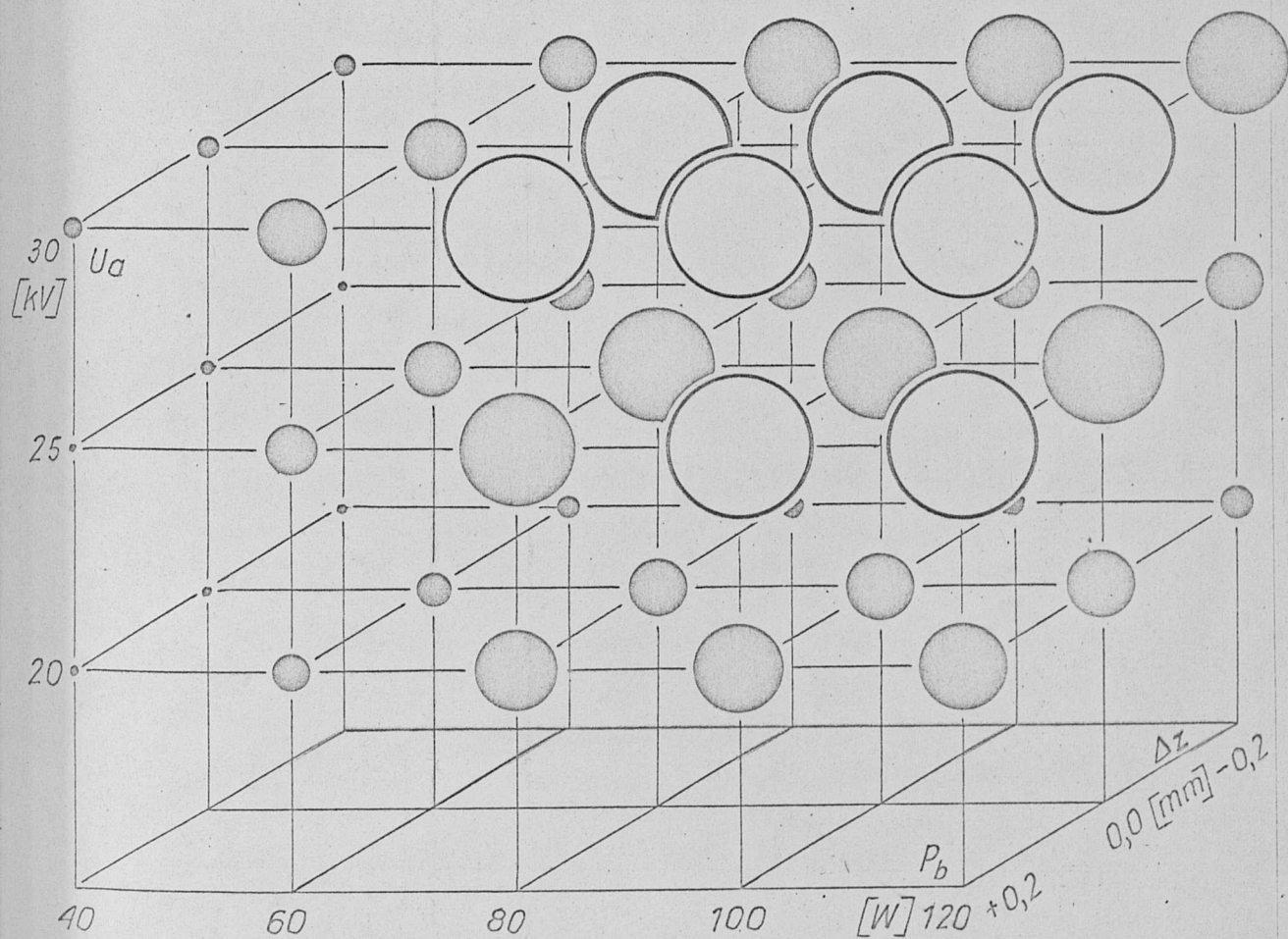
- łatwość i jednoznaczność zmian P_a w całym zakresie, oraz
- szybkość i bezpośredniość regulacji.

Celem wyboru najkorzystniejszego sposobu regulacji mocy wiązki w spawarce niskonapięciowej zmierzono szereg charakterystyk, przy czym wartości parametrów zasilania wyrzutni oraz położenia

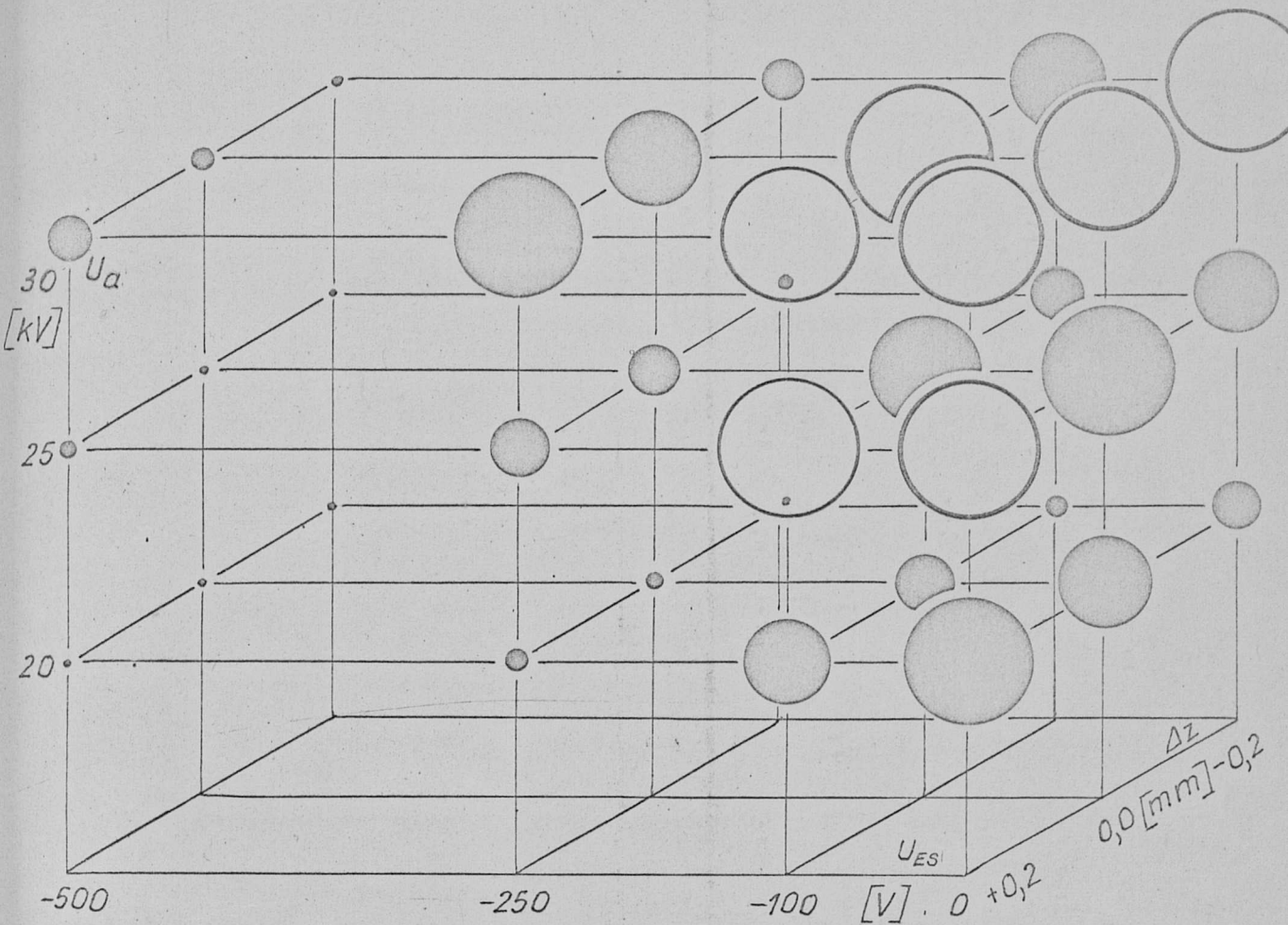
katody Δz zmieniano w granicach:

- T_{kc} , od 2290 K do 3090 K (P_b od 40 W do 120 W),
- U_{ES} , od -500 V do 0 V,
- Δz , od -0,2 mm do +0,2 mm, natomiast
- U_a ustalono kolejno na wartościach 20, 25 i 30 kV.

Zależności $P_a = f(P_b, U_a, \Delta z)$ oraz $P_a = f(U_{ES}, U_a, \Delta z)$ pokazano na rys. 3.4 i rys. 3.5, przy czym wartość mocy przedstawiono tu w postaci okręgów o średnicach proporcjonalnych do mocy (1 mm = 100 W). Okręgi niezaczernione odpowiadają przypadkom, gdy moc $P_a > 2$ kW. Niektóre z tych zależności w formie wykresów zamieszczone na rys. 3.6.



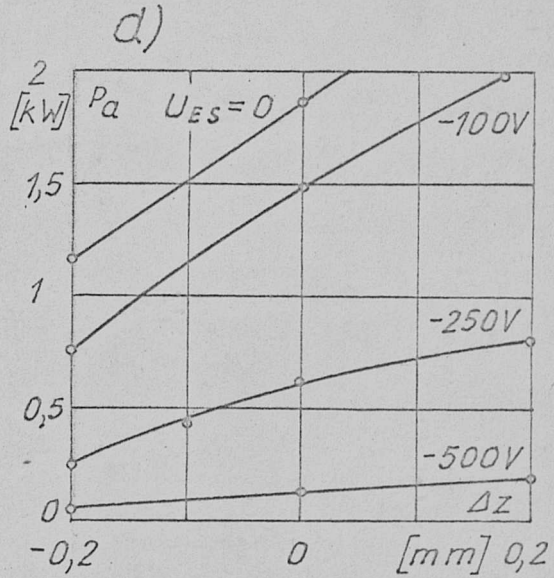
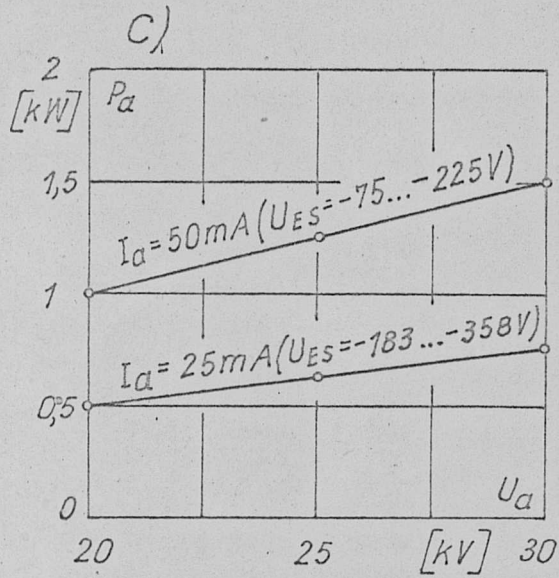
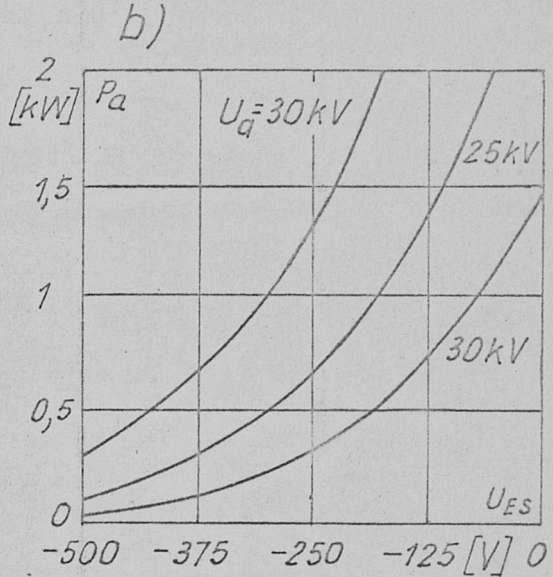
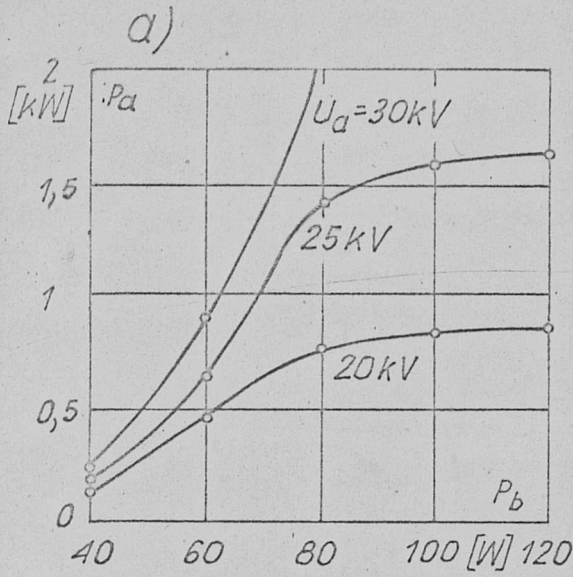
Rys. 3.4. Zależność mocy wiązki P_a ($\phi 1$ mm = 100 W) od mocy bombardowania katody P_b , napięcia przyspieszającego U_a , oraz położenia katody w otworze elektrody sterującej Δz , przy $U_{ES} = -100$ V



Rys. 3.5. Zależność mocy wiązki P_a (ϕ 1 mm = 100 W) od napięcia elektrody sterującej U_{ES} , napięcia przyspieszającego U_a oraz położenia katody w otworze elektrody sterującej Δz , przy $P_b = 100$ W

Przytoczone charakterystyki pozwalają na wyciągnięcie pewnych wniosków odnośnie sposobu zmiany mocy całkowitej, a mianowicie:

- charakterystyki $P_a = f(P_b)$ wykazują nasycenie powyżej pewnej wartości mocy bombardowania katody (rys. 3.6 a). Jest to niewątpliwie efektem wzrostu ładunku przestrzennego przy katodzie. Obserwowane zjawisko ogranicza zakres regulacji mocy wiązki drogą zmian P_b , szczególnie w przypadku ujemnych wartości Δz i małych wartości napięcia



Rys. 3.6. Charakterystyki wyrzutni: a) - $P_a = f(P_b)$, $U_{ES} = -100V$, $\Delta z = 0$, b) - $P_a = f(U_{ES})$, $P_b = 100 W$, $\Delta z = 0$, c) - $P_a = f(U_a)$, $\Delta z = 0$, d) - $P_a = f(\Delta z)$, $P_b = 100 W$, $U_a = 25 kV$

przyspieszającego.

- Charakterystyki $P_a = f(U_{ES})$ zgodnie z oczekiwaniem mają charakter wykładniczy (rys. 3.6 b). Zauważa się tu łatwość regulacji mocy wiązki w pełnym zakresie P_a .

- Zmiana napięcia przyspieszającego przy stałym prądzie wiązki umożliwia stosunkowo niewielką zmianę P_a (rys. 3.6c). Ograniczenia regulacji $P_a = f(U_a)$ wynikają z jednej strony z maksymalnych wartości napięć przyspieszających spawarki niskonapięciowej, z drugiej strony natomiast - ze wzrostu oddziaływania sił ładunku przestrzennego przy małych wartościach napięcia U_a . Oddziaływanie ładunku przestrzennego ma istotny wpływ na przebieg torów elektronów, szczególnie w obszarze soczewki katodowej i może prowadzić do wzrostu średnicy wiązki zogniskowanej.
- Wartość parametru Δz w sposób wyraźny decyduje o wartości całkowitej mocy wiązki (rys. 3.6d). Regulacja P_a drogą zmian położenia katody w otworze elektrody sterującej, w czasie pracy wyrzutni, jest technicznie trudna i sposobu tego się nie stosuje.

W konkretnym przypadku, regulację mocy wiązki można zatem przeprowadzić praktycznie jedynie poprzez zmianę mocy bombardowania P_b lub napięcia elektrody sterującej U_{ES} . W rozpatrywanym zakresie mocy obydwa te sposoby prowadzą do uzyskania podobnych spoin (krzywe 1 i 2 na rys. 3.3). Ze względu jednak na:

- pracę wyrzutni w zakresie ładunku przestrzennego,
- pełniejszy zakres regulacji, a także
- szybkość i bezpośredniość regulacji,

zmiana P_a drogą zmian napięcia elektrody sterującej jest korzystniejsza.

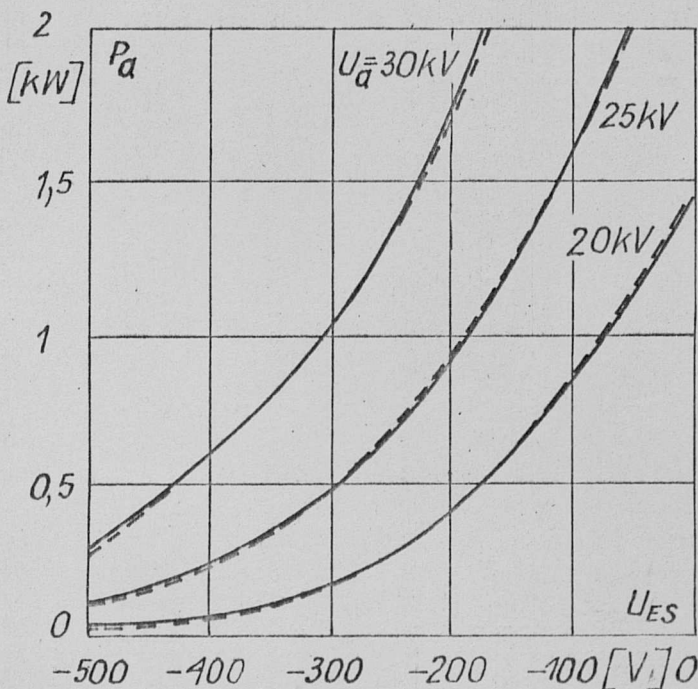
Zmiany mocy całkowitej wiązki elektronowej wskutek zmian napięcia elektrody sterującej są zależne od charakterystyk modulacyjnych wyrzutni. W oparciu o prace teoretyczne i doświad-

czalne Mossa [37] funkcję tę można przedstawić w sposób następujący:

$$P_a = U_a \cdot U_z^{-2} \cdot k' (|U_z| - |U_{ES}|)^{7/2} \quad (3.4)$$

gdzie: k' jest stałą zależną od geometrii wyrzutni, natomiast U_z - napięciem elektrody sterującej, przy którym przestaje płynąć prąd emisji katody. Napięcie to nosi nazwę napięcia odcięcia.

Na rys. 3.7 liniami ciągłymi przedstawiono doświadczalne charakterystyki $P_a = f(U_{ES})$ mierzonej wyrzutni, w przypadku $\Delta z = 0$, natomiast liniami przerywanymi wykreślono krzywe według zależności 3.4, przy czym dla napięć przyspieszających 20, 25 i 30 kV napięcie odcięcia przyjęto odpowiednio -650 V, -800 V i -950 V, a stałą $k' - 4,48 \cdot 10^{-3}$. Jak widać wzór 3.4



Rys. 3.7. Charakterystyki wyrzutni $P_a = f(U_{ES})$, doświadczalne (linie ciągłe) oraz w/g zależności 3.4 (linie przerywane);

w sposób zadawalający opisuje zależność $P_a = f(U_{ES})$ doświadczalnej wyrzutni triodowej przy pracy jej w zakresie ładunku przestrzennego. Napięcie odcięcia można tu wyrazić zależnością:

$$|U_z| = 50 + 0,03 U_a \quad [V] \quad (3.5)$$

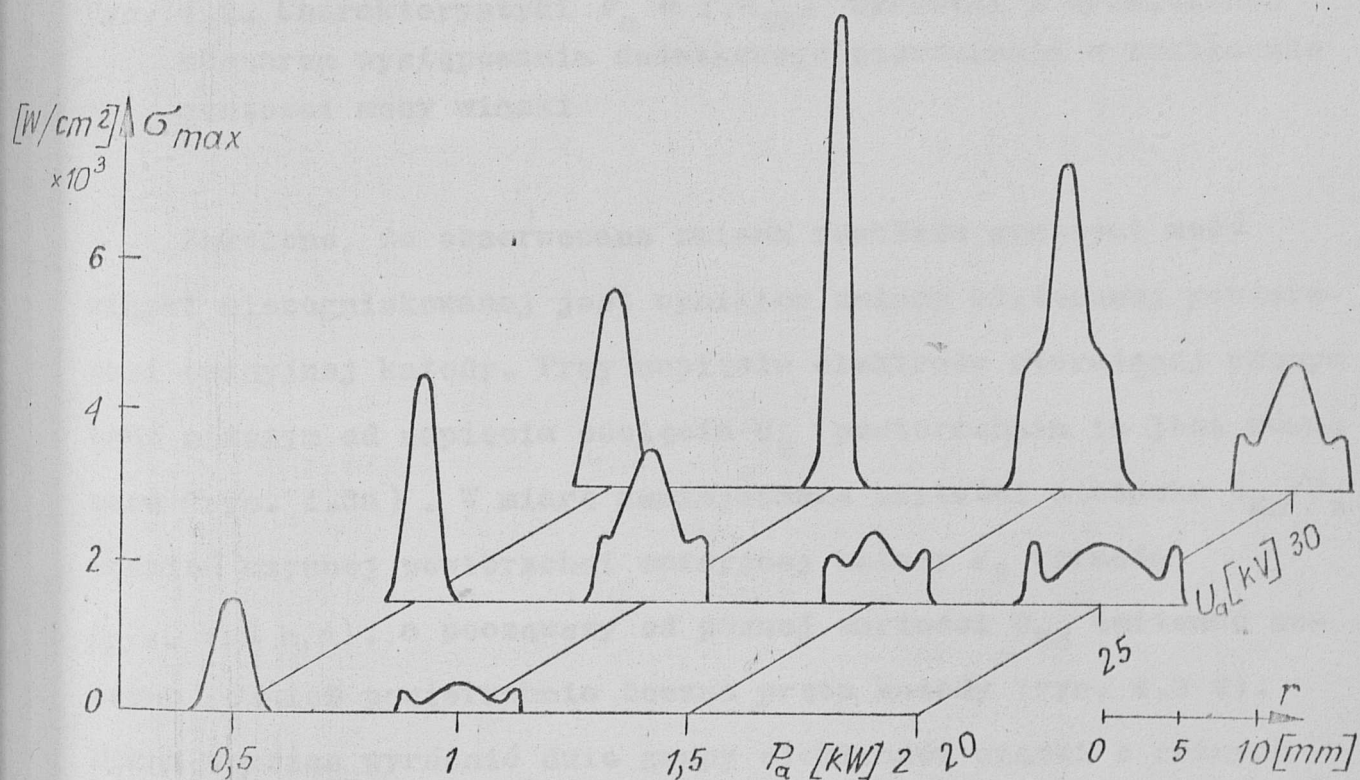
przy czym obowiązuje ona w zakresie zmian napięcia przyspieszającego 20.....30 kV.

4. ZALEŻNOŚĆ ROZKŁADU GĘSTOŚCI MOCY WIĄZKI OD PARAMETRÓW ZASILANIA

4.1. Wiązka elektronowa niezogniskowana

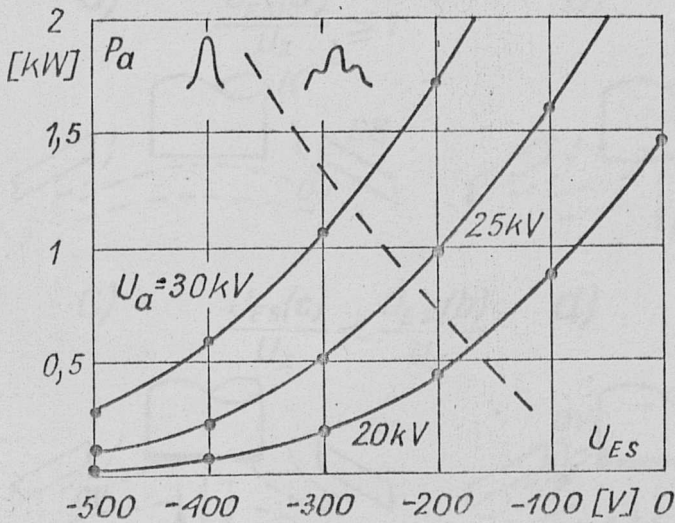
Rozkład gęstości mocy wiązki niezogniskowanej określano przy zastosowaniu analizatora z otworem kołowym o średnicy 0,3 mm. Metodę pomiarową opisano w rozdziale 2.2.1. Pomiarów dokonywano w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki, w położeniu odpowiadającym płaszczyźnie przechodzącej przez środek szczytliny soczewki magnetycznej.

Na rys. 4.1 pokazano rozkłady gęstości mocy wiązki niezogniskowanej dla wybranych wartości mocy całkowitej i napięcia



Rys. 4.1. Rozkłady gęstości mocy wiązki elektronowej niezogniskowanej w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki;
 $z = 333,5 \text{ mm}$

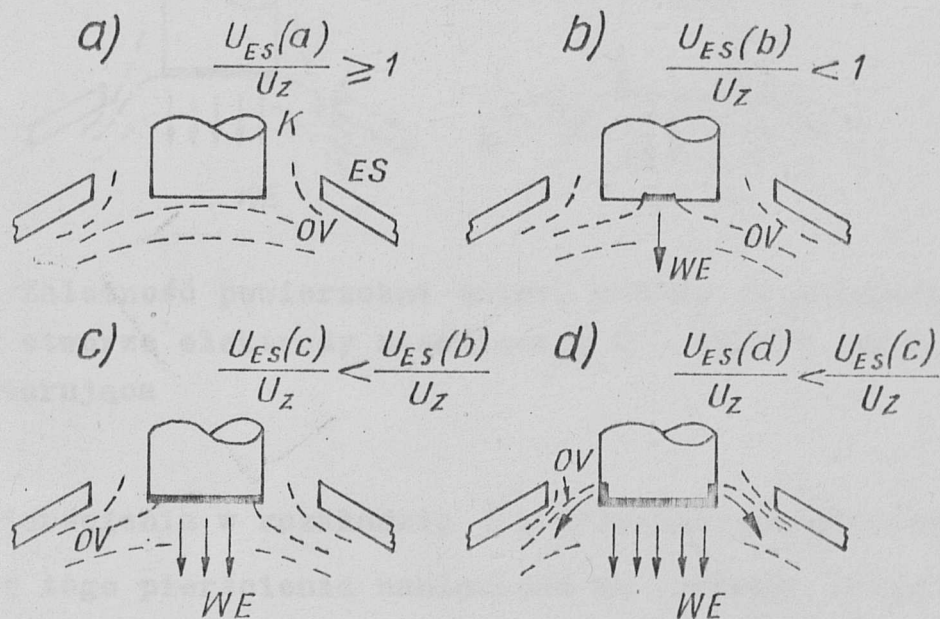
przyspieszającego. Jak widać, w przypadku wszystkich stosowanych napięć U_a wraz ze wzrostem mocy P_a pojawiają się zmiany w charakterze rozkładu σ . Na dzwonową krzywą $\sigma = f(r)$ nałożony zostaje dodatkowy pierścień. Występowanie tego pierścienia jest jednoznacznie uzależnione od wartości napięcia przyspieszającego i potencjału elektrody sterującej (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Charakterystyki $P_a = f(U_{ES})$ wyrzutni z wydzielonym obszarem występowania dodatkowego pierścienia w rozkładzie gęstości mocy wiązki

Założono, że obserwowana zmiana rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej jest wynikiem zmiany użytecznej powierzchni emisyjnej katody. Przy napięciu elektrody sterującej równym bądź niższym od napięcia odcięcia U_z powierzchnia ta jest równa zero (rys. 4.3a). W miarę zmniejszania wartości stosunku U_{ES}/U_z promień czynnej powierzchni emisyjnej katody r_k wzrasta (rys. 4.3 b, c), a począwszy od pewnej wartości U_{ES} emitować zaczyna również powierzchnia boczna pręta katody (rys. 4.3 d). Można wówczas wyróżnić dwie grupy elektronów wiązki o różnych rozkładach kierunkowych prędkości początkowych. Grupa elektronów

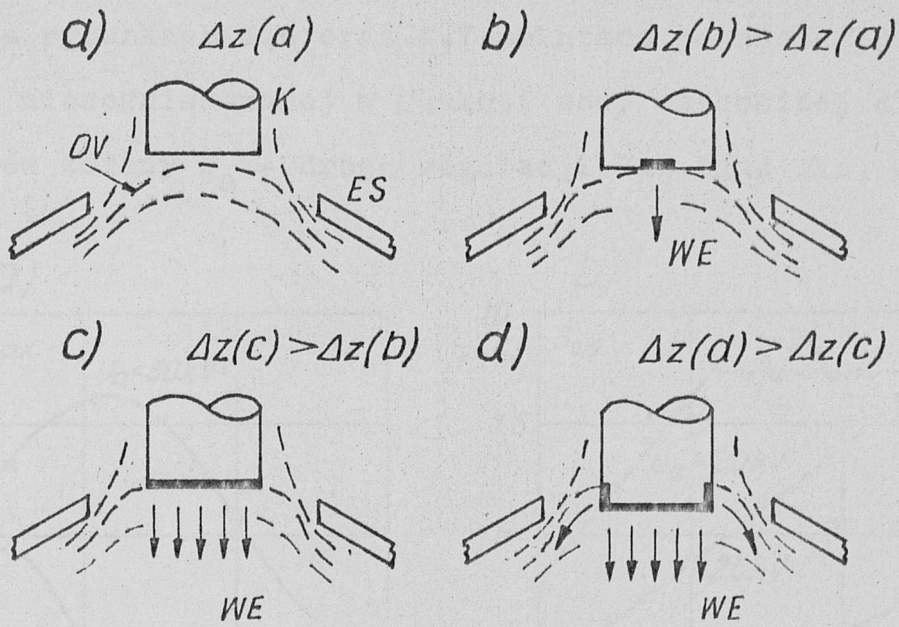
emitowanych z powierzchni bocznej katody przyczynia się do powstania zaobserwowanego pierścienia rozkładu gęstości mocy. Jeżeli przyjęty model zmian czynnej powierzchni emisyjnej katody przy zmianach napięcia U_{ES} jest prawidłowy, wówczas podobnych zależności $\sigma = f(P_a)$ należy oczekiwać przy zmianach mocy wiązki poprzez



Rys. 4.3. Zależność powierzchni emisyjnej katody od napięcia elektrody sterującej U_{ES} ; K - katoda, ES - elektroda sterująca

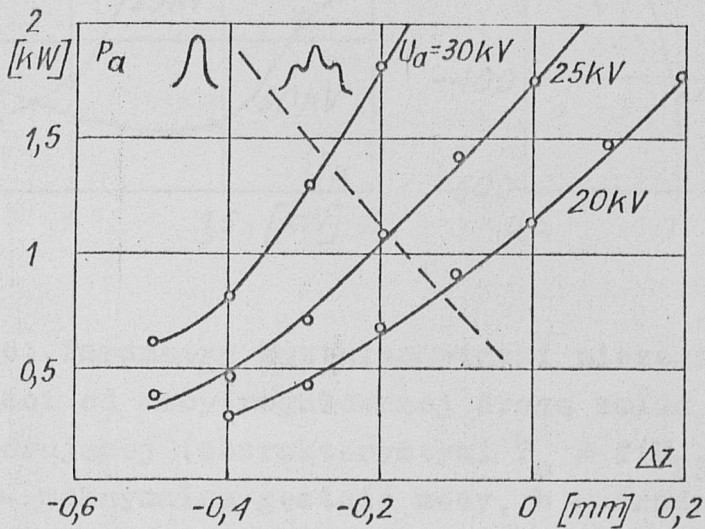
regulację położenia katody w otworze elektrody sterującej. Przy zmianach wartości parametrów Δz bądź U_{ES} użyteczna powierzchnia katody zmienia się bowiem podobnie (rys. 4.4 i rys. 4.3).

W wyniku pomiarów rozkładu gęstości mocy WE w zależności od położenia katody w otworze elektrody sterującej, przy pracy wyrzutni w warunkach ładunku przestrzennego, zaobserwowano emisję wiązki bądź wyłącznie z powierzchni czołowej, bądź też z powierzchni czołowej i bocznej, co uwiidocznili się wystąpieniem i wzrostem



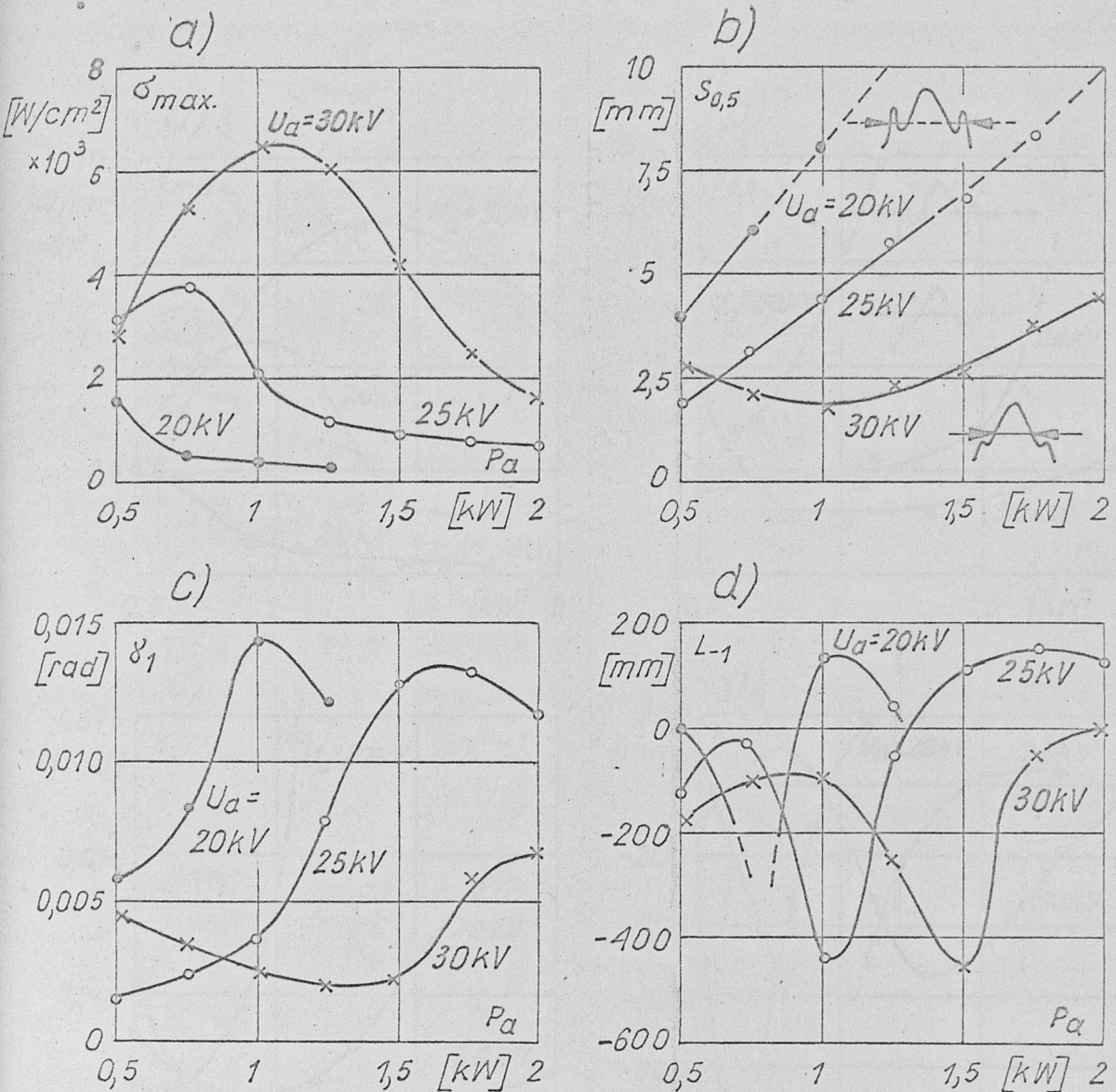
Rys. 4.4. Zależność powierzchni emisji katody od położenia katody w otworze elektrody sterującej; K - katoda, ES - elektroda sterująca

udziału pierścienia w rozkładzie σ . Orientacyjną granicę pojawienia się tego pierścienia naniesiono na wykresy zależności $P_a = f(\Delta z)$ (rys. 4.5).



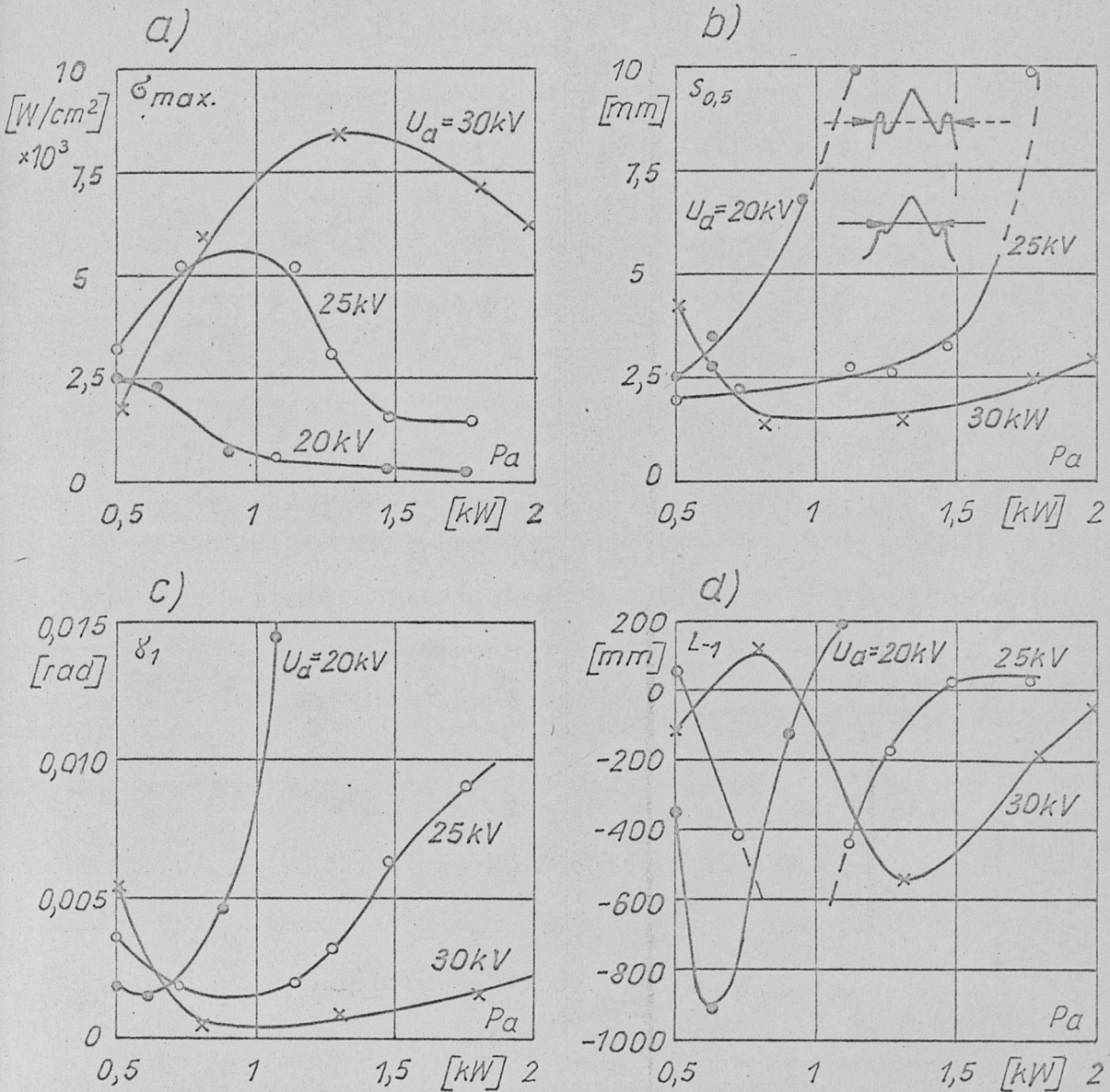
Rys. 4.5. Charakterystyki $P_a = f(\Delta z)$ wyrzutni z wydzielonym obszarem występowania dodatkowego pierścienia w rozkładzie gęstości mocy wiązki

Na rysunkach 4.6 oraz 4.7 pokazano parametry kształtu wiązki niezogniskowanej w funkcji mocy całkowitej dla dwóch sposobów zmiany P_a - droga regulacji U_{ES} bądź Δz . Jak widać



Rys. 4.6. Parametry kształtu wiązki niezogniskowanej w zależności od mocy regulowanej drogą zmian napięcia elektrody sterującej (charakterystyki $P_a = f(U_{ES})$ podano na rys. 4.2) a - maksymalna gęstość mocy, b - średnica wiązki, c - kąt rozbieżności, d - położenie L_{-1} pozornej źrenicy elektrooptycznej

występuje tu wyraźne podobieństwo przebiegów poszczególnych funkcji, co jest potwierdzeniem modelu potencjałowego ekranowania lub odsłaniania czynnej powierzchni emisyjnej katody przy zmianach napięcia elektrody sterującej.



Rys. 4.7. Parametry kształtu wiązki niezogniskowanej w warunkach ładunku przestrzennego w zależności od mocy regulowanej drogą zmian położenia katody w otworze elektrody sterującej (charakterystyki $P_a = f(\Delta z)$ podano na rys. 4.5); a - maksymalna gęstość mocy, b - średnica wiązki, c - kąt rozbieżności, d - położenie L_{-1} pozornej źrenicy elektrooptycznej

Interpretacja ilościowa zmian parametrów rozkładu gęstości mocy wiązki przy zmianach mocy całkowitej i występowanie ekstremów funkcji wymaga znajomości przebiegu torów elektronów w obszarze soczewki katodowej. Dokładna analiza soczewki katodowej, polegająca na wyznaczeniu położenia płaszczyzny rzeczywistej źrenicy elektrooptycznej, średnicy wiązki, oraz rozkładu gęstości prądu w tej płaszczyźnie przedstawia znaczne trudności. Wiąże się one z faktem, że [5] :

- soczewka katodowa jest soczewką grubą,
- przedmiot (katoda) jest zanurzony w obszarze soczewki, oraz
- tory elektronów nie są przyosiowe.

Podjęto jednak próbę interpretacji zmian σ_{\max} i $S_{0,5}$ w funkcji mocy całkowitej w oparciu o zmiany wartości kąta aperturowego wiązki w przypadku zastosowania napięcia przyspieszającego 30 kV. Wydaje się, że przy tym napięciu uzyskano najpełniejszy obraz zmian parametrów rozkładu gęstości mocy.

Kąt aperturowy wiązki γ_1 określa się następująco [25] :

$$\operatorname{tg} \gamma_1 \approx \gamma_1 = \frac{r_k}{r_c} \sqrt{\frac{U_T}{U_c}} \quad (4.1)$$

gdzie:

- r_k - promień powierzchni czynnej katody,
- r_c - promień rzeczywistej źrenicy elektrooptycznej,
- U_T - potencjał elektrokinetyczny,
- U_c - potencjał na osi elektrooptycznej w płaszczyźnie źrenicy

Wyniki własnych badań oraz dane literaturowe pozwalają na wniosek, że pozaogólne czynniki determinujące wartości kąta γ_1 w miarę malenia ujemnego potencjału elektrody sterującej i wzrost

tu mocy P_a zmieniają się w sposób następujący:

- promień powierzchni czynnej katody r_k wzrasta.
- Średnica pozornej źrenicy elektrooptycznej zwiększa się [25,34,36] . (Ze względu na geometryczne zależności między promieniem źrenicy elektrooptycznej pozornej i rzeczywistej można sądzić, że wartość r_c także wzrasta) .
- Potencjał elektrokinetyczny $U_T = k T_k/e$ nie ulega zmianie.
- Potencjał na osi elektrooptycznej, w płaszczyźnie rzeczywistej źrenicy elektrooptycznej wzrasta wskutek przemieszczania się źrenicy w kierunku anody.

Zgodnie z zależnością 4.1 istnieją zatem dwie tendencje zmian kąta γ_1 , a mianowicie:

- zmniejszenie spowodowane wzrostem wartości r_c oraz U_c , i jednocześnie
- zwiększenie wskutek wzrostu powierzchni emisji katody.

Analiza wykresów przedstawionych na rys. 4.2 i rys. 4.6 oraz zależności 4.1 prowadzi do następujących wniosków:

- w przypadku wzrostu powierzchni czynnej czoła katody kąt γ_1 maleje wskutek zwiększania się wartości parametrów r_c oraz U_c . Konsekwencją zmniejszania się wartości kąta aperturowego przy jednoczesnym wzroście mocy całkowitej jest wzrost σ_{max} oraz malenie $S_{0,5}$,
- z chwilą, gdy w emisji elektronów zaczyna brać udział powierzchnia boczna katody „zastępczy promień” r_k gwałtownie wzrasta, wskutek czego γ_1 rośnie i w konsekwencji maleje σ_{max} i rośnie $S_{0,5}$.

Jak zatem wynika z przeprowadzonych rozważań, rozkład gęstości mocy wiązki niezogniskowanej zależy jest w sposób istotny od kształtu użytecznej powierzchni emitującej katody.

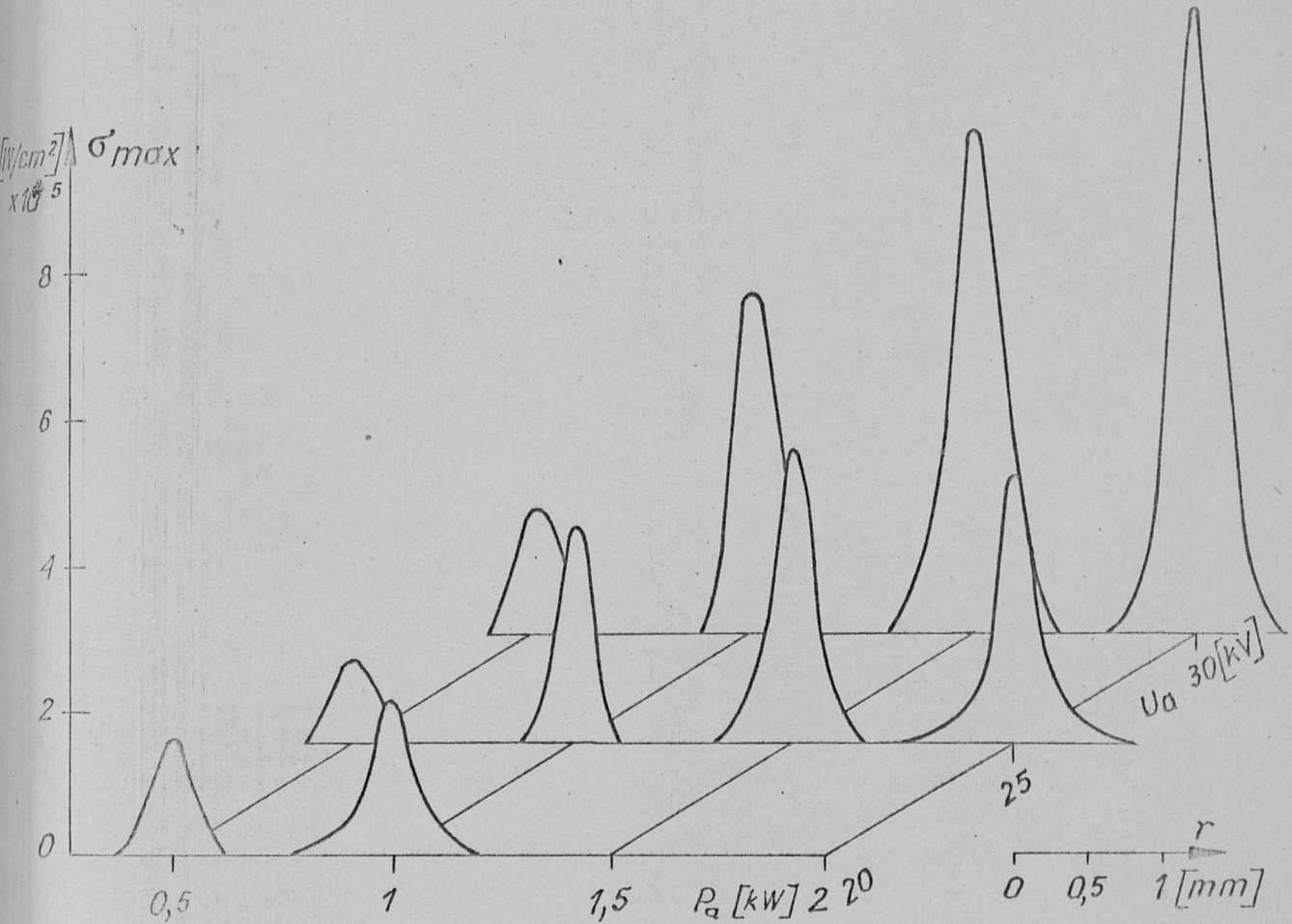
4.2. Wiązka elektronowa zogniskowana

Kształt wiązki zogniskowanej określano drogą pomiarów rozkładów gęstości mocy w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki w pobliżu jej przewężenia stosując metodę przemiatania (rozdz. 2.2.2). Wykorzystano tu analizator z dwoma prostopadłymi szczelinami o szerokościach 0,2 mm. Analizator umieszczano w odległości $z = 643,5$ mm ($L_3 = 310$ mm).

4.2.1. Zależność rozkładu gęstości mocy wiązki od mocy i napięcia przyspieszającego

Rozkłady gęstości mocy wiązki zogniskowanej zmierzono dla przypadku charakteryzującego się największą wartością σ_{\max} w płaszczyźnie pomiarowej przy zmianach prądu ogniskowania. Na rys. 4.8 pokazano rozkłady gęstości mocy wiązki zogniskowanej dla wybranych wartości mocy całkowitej i napięcia przyspieszającego. Parametry kształtu wiązki określone na podstawie zmierzonych rozkładów $\sigma = f(r)$ przedstawiono na rys. 4.9. Stwierdzono, że w zakresie mocy 0,5 ... 2 kW oraz napięć 20 ... 30 kV wartość σ_{\max} w płaszczyźnie pomiarowej wiązki zogniskowanej oraz kąt zbieżności wiązki γ_2 zależą zarówno od U_a jak i P_a . Średnica wiązki $S_{0,5}$ przy napięciu 30 kV zachowuje stałą wartość w całym zakresie mocy, natomiast przy $U_a = 25$ kV

nie ulega zmianie, jeśli $P_a > 1$ kW. Ze wzrostem napięcia przyspieszającego obserwuje się praktycznie wzrost wartości σ_{max} i $S_{0,5}$ oraz malenie γ_2 .

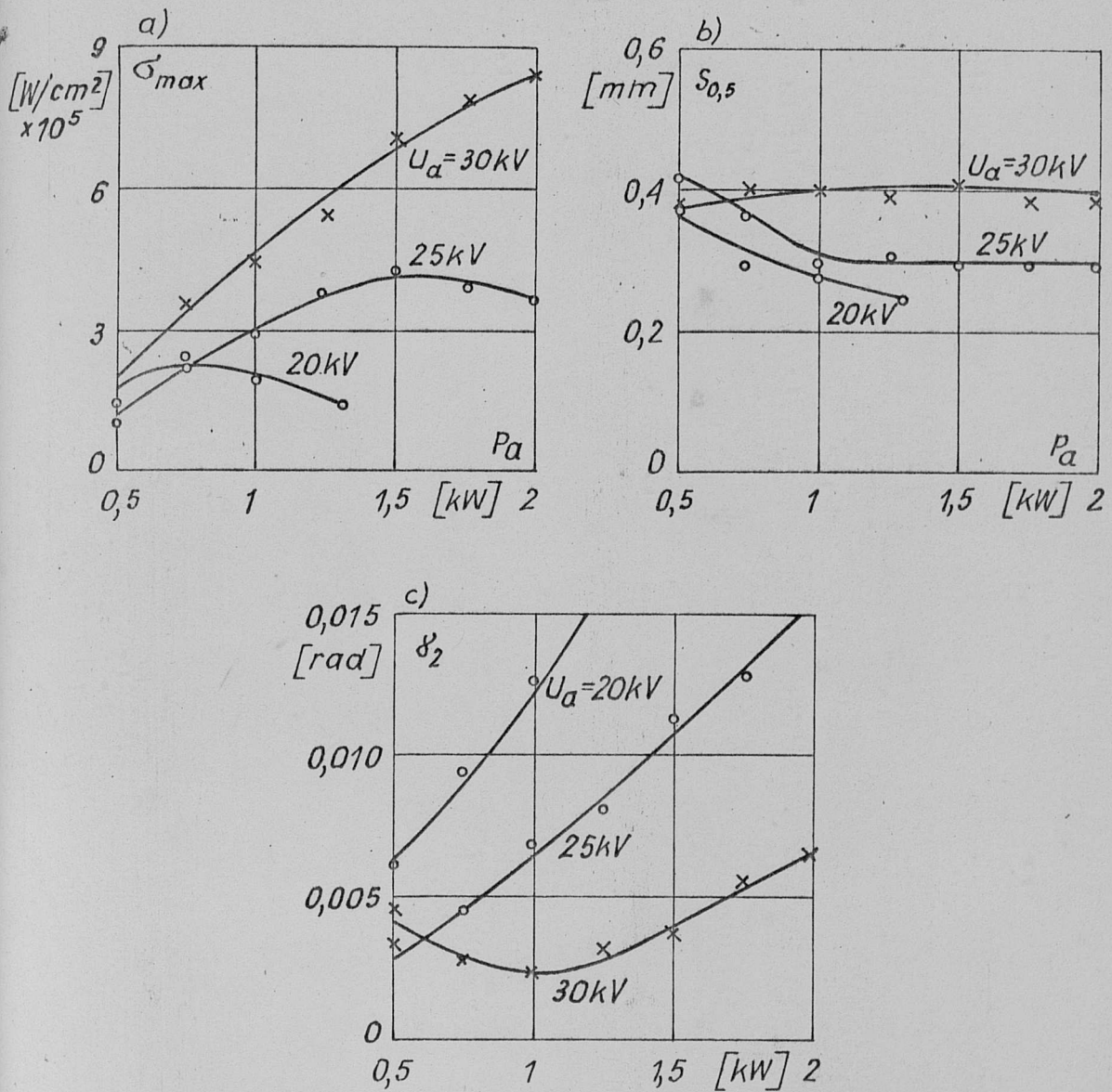


Rys. 4.8. Rozkłady gęstości mocy wiązki elektronowej zogniskowanej w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki, $z = 643,5$ mm

Zachowanie stałej wartości, a nawet zmniejszanie się średnicy wiązki w miarę wzrostu mocy całkowitej P_a , przy jednoczesnym maleniu wartości σ_{max} jest sprzeczne z oczekiwaniem. Wzrost wartości mocy wiązki powinien bowiem powodować wzrost powierzchni objętej krzywą rozkładu $\sigma = f(r)$ czy też objętości

powstałej bryły w przypadku wiązki osiowo - symetrycznej.

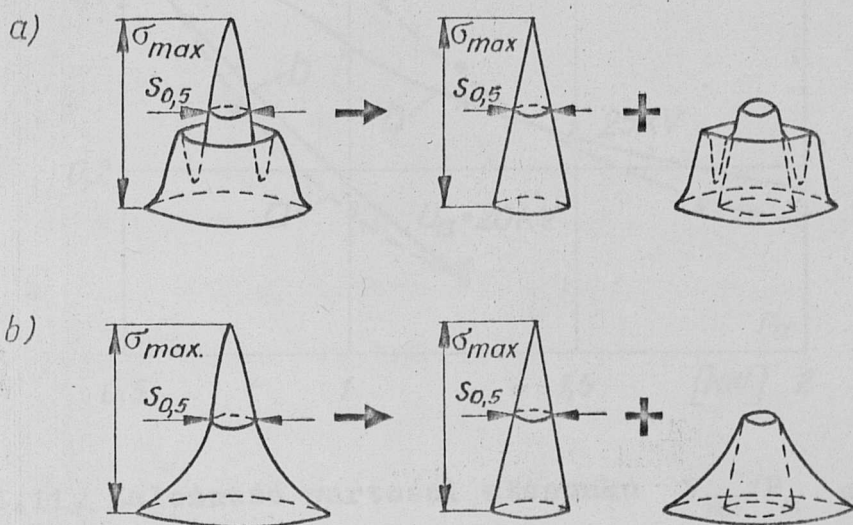
Z wykresów zamieszczonych na rys. 4.8 wynika jednak, że w pewnych przypadkach wzrost mocy wiązki nie powoduje wzrostu wartości σ_{max} oraz $S_{0,5}$ a prowadzi do istotnego wzrostu szerokości rozkładu $\sigma = f(r)$ w pobliżu podstawy.



Rys. 4.9. Parametry kształtu wiązki zogniskowanej w zależności od mocy i napięcia przyspieszającego: a - maksymalna gęstość mocy rozkładu, b - średnica wiązki, c - kąt zbieżności

Założono, że rozkład gęstości mocy jest zależny od kształtu użytecznej powierzchni katody. Obserwowane zniekształcenie „dzwonowego” rozkładu gęstości mocy wiązki zogniskowanej jest wówczas związane z emisją wiązki z bocznej powierzchni katody. W takim przypadku zniekształcenie to powinno występować współbieżnie ze zniekształceniami rozkładu $\sigma = f(r)$ wiązki niezogniskowanej.

W rozdziale 4.1 wykazano, że można wyróżnić dwie grupy elektronów wiązki o różnych rozkładach kierunkowych prędkości początkowych. Grupa elektronów emitowanych z powierzchni bocznej katody tworzy obserwowany zewnętrzny pierścień rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej. Można przyjąć, że część środkowa rozkładu $\sigma = f(r)$ jest reprezentowana przez elektrony emitowane z powierzchni czołowej katody. Podział taki pokazano na rys. 4.10 a, przy czym część środkową rozkładu przedstawiono



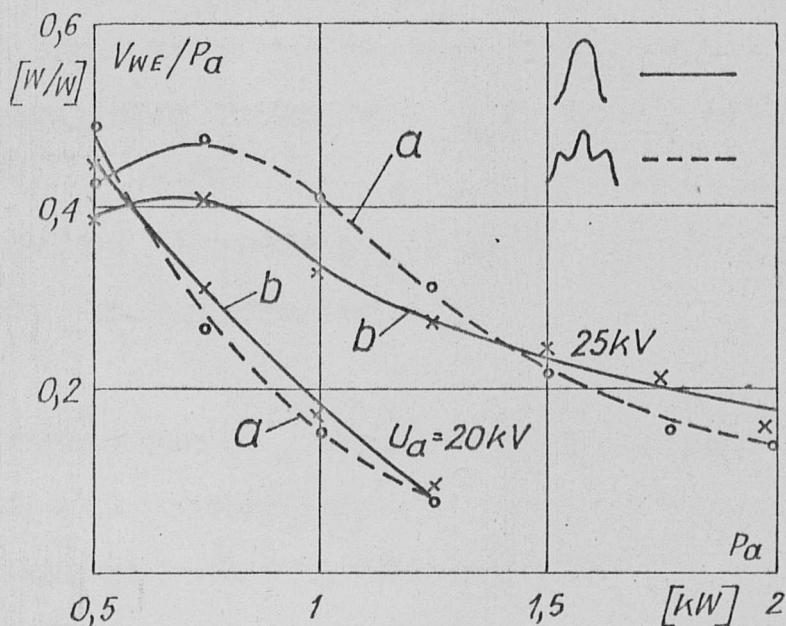
Rys. 4.10. Rozkłady gęstości mocy wiązki niezogniskowanej (a), oraz zogniskowanej (b) z wyodrębnieniem obszaru reprezentowanego przez elektrony emitowane z powierzchni czołowej katody

w postaci stożka o wysokości σ_{\max} i średnicy podstawy $2 S_{0,5}$.
Objętość takiego stożka:

$$V_{WE} = \frac{1}{3} \pi (S_{0,5})^2 \cdot \sigma_{\max} \quad [W] \quad (4.2)$$

wyraża zatem pewną część mocy wiązki elektronowej.

Dla wybranych wartości napięć przyspieszających, przy których obserwuje się wyraźną zmianę charakteru rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej przy zmianach mocy całkowitej, obliczono stosunek V_{WE}/P_a . Wykresy zależności $V_{WE}/P_a = f(P_a)$ dla $U_a = 20 \text{ kV}$ i 25 kV pokazano na rys. 4.11. Jak widać, w przypadku występowania i dominacji dodatkowego „pierścienia”, wartość



Rys. 4.11. Zależność wartości stosunku V_{WE}/P_a od mocy całkowitej wiązki niezogniskowanej (a) oraz wiązki zogniskowanej (b)

stosunku V_{WE}/P_a maleje. Oznacza to wzrost udziału elektronów emitowanych z powierzchni bocznej katody i jest zgodne z obserwowaną zmianą kształtu rozkładu gęstości mocy (rys. 4.1).

Podobną analizę przeprowadzono dla przypadku wiązki zogniskowanej (rys. 4.10 b). Na rys. 4.11 pokazano przebieg funkcji $V_{WE}/P_a = f(P_a)$. Jak widać, przy zmianach mocy całkowitej względny udział elektronów emitowanych z powierzchni czołowej katody w rozkładzie gęstości mocy zmienia się podobnie dla wiązki zogniskowanej i niezogniskowanej. Na tej podstawie można wnioskować, że rozkład $\sigma = f(r)$ wiązki w płaszczyźnie największej gęstości mocy jest zależny nie tylko od mocy całkowitej i napięcia przyspieszającego, lecz także od użytecznej powierzchni emisji katody. Jeśli więc wiązka emitowana jest także z powierzchni bocznej katody, obserwuje się „rozmycie” rozkładu gęstości mocy WE zogniskowanej i pozorne malenie średnicy wiązki wynikające z przyjętej definicji $S_{0,5}$ (rozdz. 2.1).

4.2.2. Zależność rozkładu gęstości mocy wiązki od prądu soczewki magnetycznej

W stanowisku do pomiarów wiązek elektronowych oraz w spawarce WS-2/30 zastosowano soczewkę magnetyczną o następujących charakterystycznych wielkościach:

- liczba zwojów, $N = 740$,
- szerokość szczeliny, $s = 47$ mm, oraz
- średnica $D_1 = D_2 = 71$ mm.

Ogniskową soczewki magnetycznej można wyliczyć z doświadczalnych wzorów podanych przez Ferta i Durandea [46]:

dla

$$\frac{N I_0}{N I_1} < 0,774 ; \quad \frac{f}{f_{1m}} = \frac{0,897}{\left(\frac{N I_0}{N I_1}\right) \sin 2.029 \left(\frac{N I_0}{N I_1}\right)} \quad (4.3)$$

oraz dla

$$\frac{N I_0}{N I_1} > 0,774 ; \quad \frac{f}{f_{1m}} = \frac{0,897}{\frac{N I_0}{N I_1}} \quad (4.4)$$

gdzie: f - ogniskowa soczewki,
 $N I_0$ - ilość amperozwojów soczewki, natomiast
 f_{1m} - minimalna ogniskowa osiągana przy $N I_1$
 amperozwojach

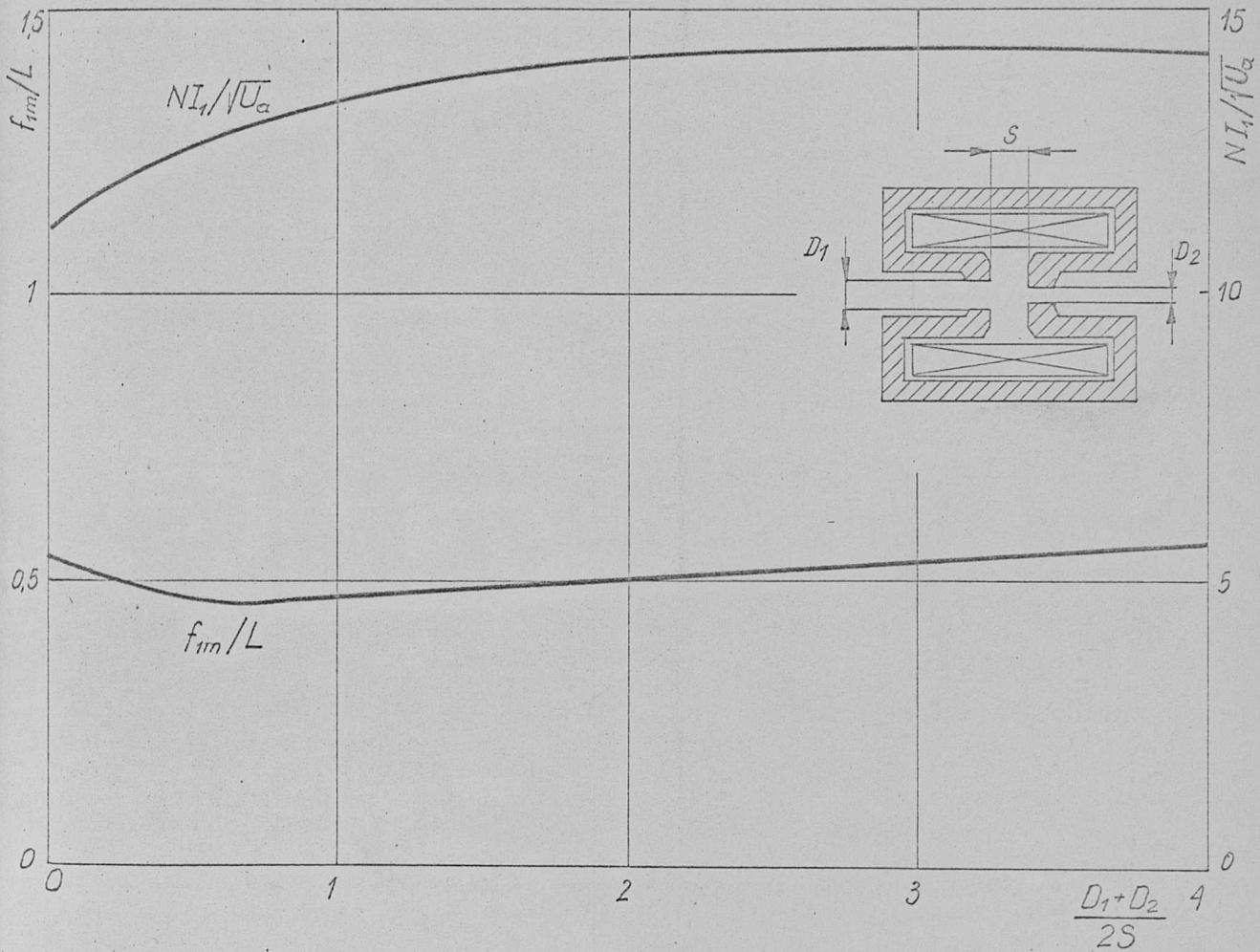
Wartość minimalnej ogniskowej oraz ilość amperozwojów ,
 przy której się ją osiąga, podano na rys. 4.12 w zależności od
 charakterystycznych wielkości soczewki. Występujący na rysunku
 parametr L dany jest wzorem:

$$L = \left[s^2 + 0,45 \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

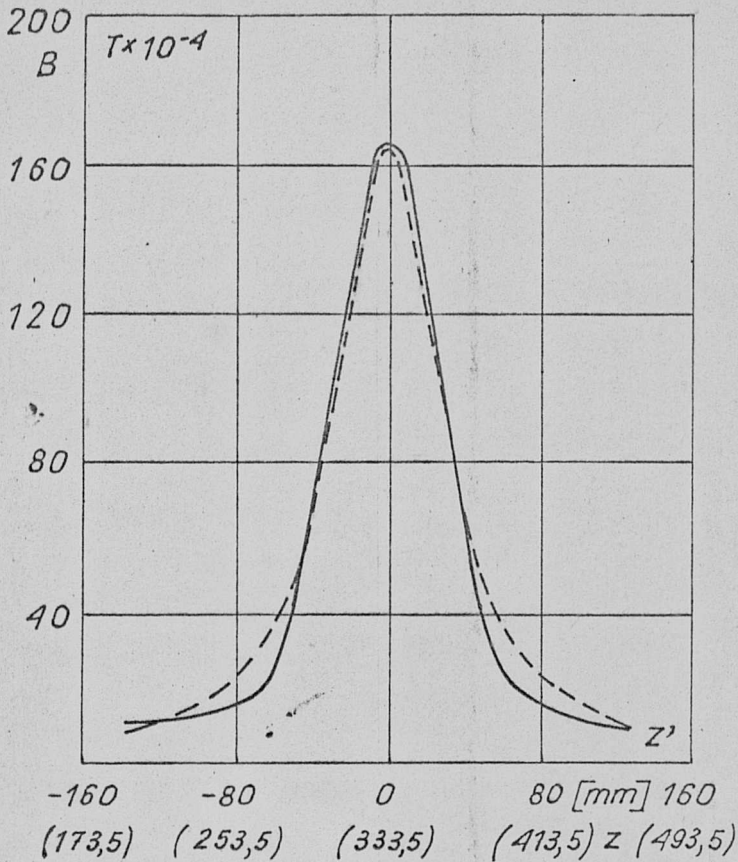
Rozkład indukcji magnetycznej w zastosowanej soczewce
 przedstawiono na rys. 4.13. Zaznaczono tu także, linią przery-
 waną, teoretyczną zależność $B = f(z')$ wyliczoną według wzo-
 ru [41] :

$$B = \frac{B_{\max}}{\left[1 + \left(\frac{z'}{a}\right)^2\right]^m} \quad (4.6)$$

gdzie $2a$ jest połówkową szerokością zmierzonego rozkładu pola soczewki.



Rys. 4.12. Minimalna ogniskowa soczewki magnetycznej f_{1m} oraz odpowiadająca jej ilość amperozwojów $N I_1$. Krzywe wykreślono dla $D_1/D_2 = 1$ (w/g [46])



Rys. 4.13. Rozkład indukcji magnetycznej w soczewce zastosowanej w stanowisku do pomiarów wiązek elektronowych oraz w spawarce WS-2/30. Prąd w uzwojeniu soczewki 1 A

Dla cienkich soczewek magnetycznych, tzw. soczewek Glasera przyjmuje się wartość współczynnika m występującego we wzorze 4.6 równą jedności. Wobec dużej zgodności rozkładów indukcji magnetycznej, rzeczywistego oraz wyliczonego z zależności 4.6 dla $m = 1$, przyjęto, że zastosowana soczewka jest soczewką cienką. W takim przypadku można posłużyć się następującym równaniem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_b} \quad (4.7)$$

które ujmuje zależności między:

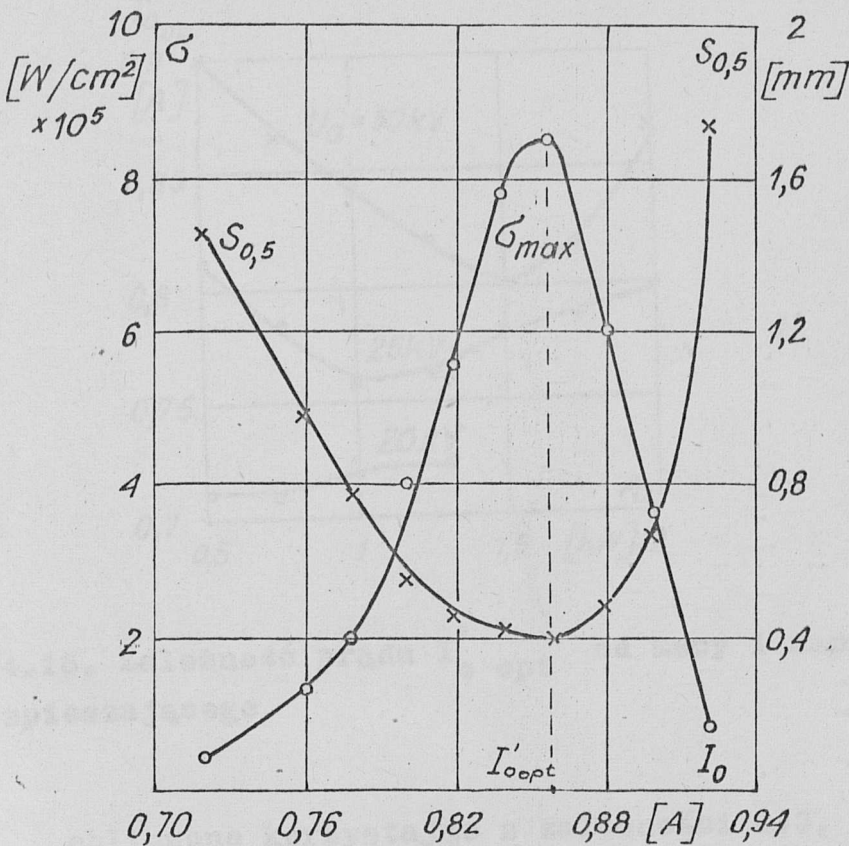
- l_a - odległością płaszczyzny przechodzącej przez środek szczeliny soczewki od płaszczyzny przedmiotu odwzorowania elektrooptycznego,
- l_b - odległością płaszczyzny obrazu odwzorowania elektrooptycznego od płaszczyzny przechodzącej przez środek szczeliny soczewki, oraz
- f - ogniskową soczewki.

Ze względu na soczewkowe oddziaływanie pola wyrzutni przedmiotem odwzorowywanym jest pozorna źrenica elektrooptyczna.

Przy przyjętych oznaczeniach długości poszczególnych obszarów (rys. 2.1) odległość l_a jest równa:

$$l_a = L_{-1} + L_1 + L_2 \quad (4.8)$$

Jak wynika z zależności 4.3 i 4.4 oraz z rys. 4.12 dla określonej konstrukcji soczewki magnetycznej (w zakresie, w którym nie występuje nasycenie materiału magnetycznego) ogniskowa f jest funkcją jedynie napięcia przyspieszającego wiązkę elektronową oraz prądu płynącego w uzwojeniu. Prąd ten, nazywany prądem ogniskowania I_0 determinuje maksymalną wartość indukcji magnetycznej. Wpływ prądu ogniskowania na wartość parametrów gęstości mocy wiązki zilustrowano na rys. 4.14. Jak widać, dla określonego I_0 otrzymano wiązkę o maksymalnej wartości σ_{\max} i minimalnej średnicy. Prąd ten oznaczono $I'_0 \text{ opt}$. Wartość prądu $I'_0 \text{ opt}$ jest pewną funkcją U_a i P_a . Zależność tę przedstawiono na rys. 4.15. Jak widać, funkcja $I'_0 \text{ opt} = f(P_a)$ charakteryzuje się wyraźnym minimum. Celem wyjaśnienia występowania tego

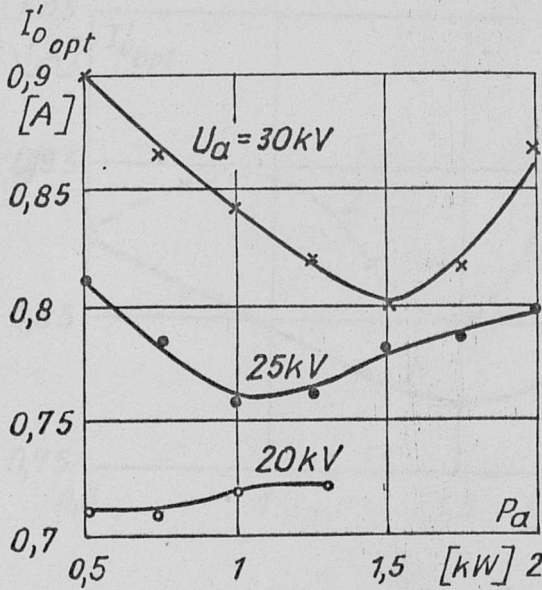


Rys. 4.14. Zależność parametrów rozkładu gęstości mocy wiązki od prądu ogniskowania; $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV

minimum, obliczono teoretyczną zależność $I'_{0,opt} = f(P_a)$ w oparciu o zmianę położenia pozornej źrenicy elektronooptycznej. Założono przy tym, że płaszczyzna obrazu odwzorowania elektronooptycznego pokrywa się z płaszczyzną największej gęstości mocy, ($l_b = L_3$). W takim przypadku zależność 4.7 przybiera postać:

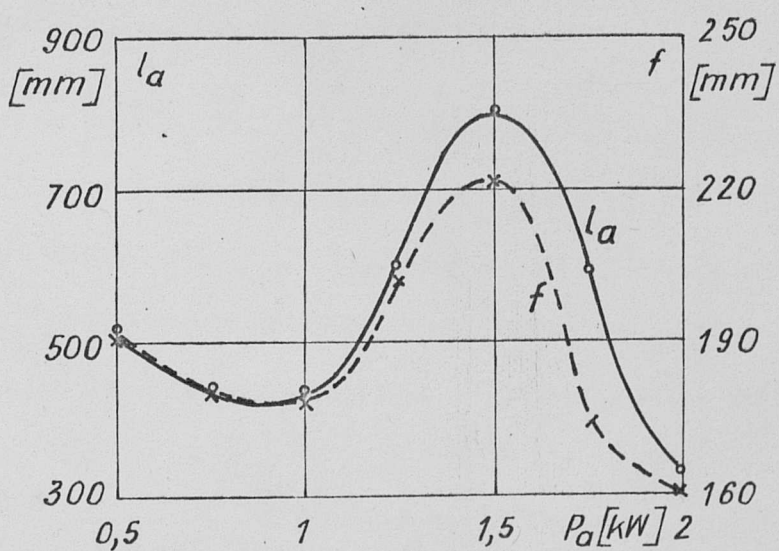
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_b} = \frac{1}{L_{-1} + L_1 + L_2} + \frac{1}{L_3} \quad (4.9)$$

Z wzoru 4.9 obliczono wartości ogniskowej soczewki, przy czym wartości odległości L_{-1} odczytano z rys. 4.6d. Teoretyczny prąd

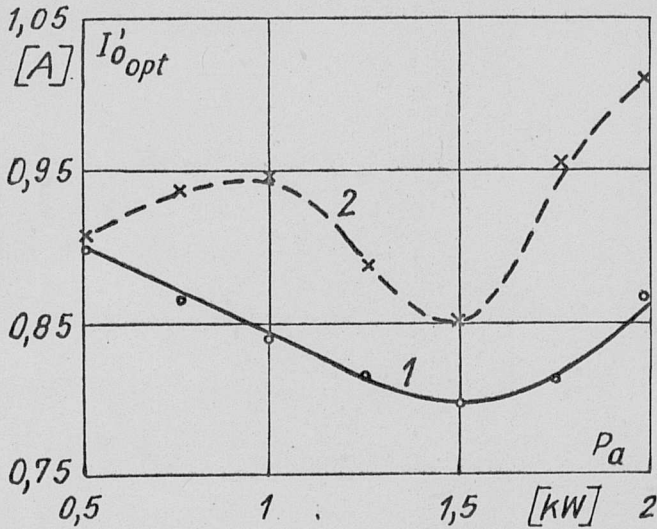


Rys. 4.15. Zależność prądu $I'_{0,opt}$ od mocy i napięcia przyspieszającego

$I'_{0,opt}$ obliczono korzystając z zależności 4.3, 4.5 oraz rys. 4.12. Przebieg funkcji $l_a = f(P_a)$ i $f = f(P_a)$ dla przypadku $U_a = 30$ kV podano na rys. 4.16, natomiast wykres teoretycznego i doświadczalnego prądu $I'_{0,opt}$ w funkcji mocy wiązki pokazano na rys. 4.17. Jak widać, charakter zmian prądów przy zmianach P_a



Rys. 4.16. Zależność położenia płaszczyzny przedmiotu (l_a) oraz ogniskowej soczewki (f) od mocy wiązki; $U_a = 30$ kV



Rys. 4.17. Zależność doświadczalnego (1) i teoretycznego (2) prądu ogniskowania $I'_{0 opt}$ od mocy wiązki; $U_a = 30$ kV

jest zbliżony, mimo różnic w wartościach prądów teoretycznego i doświadczalnego. Można jednak stwierdzić, że konieczność korekty wartości prądu ogniskowania przy zmianach mocy całkowitej wiązki celem umiejscowienia przewężenia WE w płaszczyźnie pomiarowej, jest konsekwencją zmiany położenia płaszczyzny pozornej źrenicy elektrooptycznej.

5. ZALEŻNOŚĆ KSZTAŁTU SPOIN OD PARAMETRÓW ZASILANIA

5.1. Oddziaływanie wiązki z metalem

Spawanie wiązką elektronową jest procesem fizycznym polegającym na wzajemnym oddziaływaniu wiązki i materiału. Elektrony wiązki wnikając pod powierzchnię metalu tracą swoją energię kinetyczną, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu jego temperatury. W przypadku, gdy gromadzenie energii w jednostce objętości jest szybsze niż jej odprowadzanie wskutek przewodnictwa cieplnego i promieniowania, następuje topienie i gwałtowne parowanie materiału. W pewnych warunkach reakcja parującego materiału powoduje wypchnięcie cieczy na ścianki wgłębienia, co pozwala na dalszą penetrację wiązki. Tworzy się wówczas głęboki kanał, który w miarę przemieszczania się wiązki jest wypełniony stopionym i zastygającym materiałem. Zestawiony metal ma zwykle inne własności fizyczne niż materiał rodzimy i nosi nazwę złącza lub spoiny.

5.2. Sposób wykonywania spoin

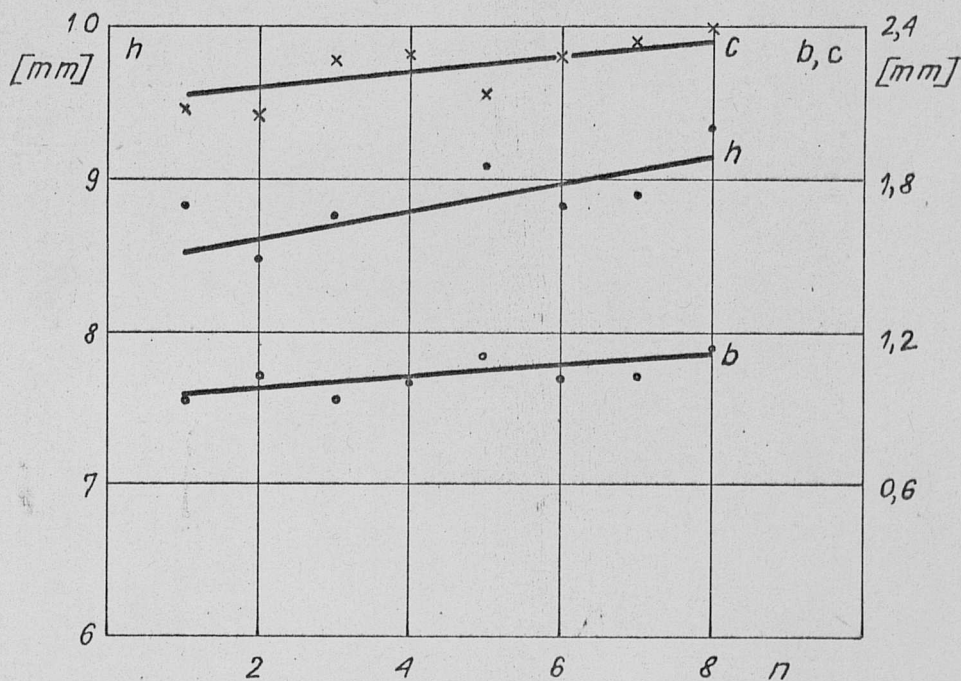
Celem uproszczenia procedury badań zrezygnowano z wykonywania typowych złącz, a ograniczono się jedynie do wtopów wykonywanych w materiale jednorodnym. Jest to zresztą zabieg dość powszedni stosowany w tego typu badaniach [28,30,31,42,43,44,48,49] , przy czym uzyskiwane wtopy określa się niezbyt ściśle mianem spoin.

Kształt spoin określano na podstawie obrazów makroskopowych przekroi poprzecznych. Mierzono (rys. 1.1) :

- głębokość spoiny, h ,
- szerokość spoiny, b , w przypadku, gdy jest to spoina głęboka (rys. 1.1 A), a także
- szerokość lica spoiny, c .

Próbki spawalnicze wykonywano ze stali 1H18N9T. Ich grubość przekraczała conajmniej dwukrotnie głębokość spoiny.

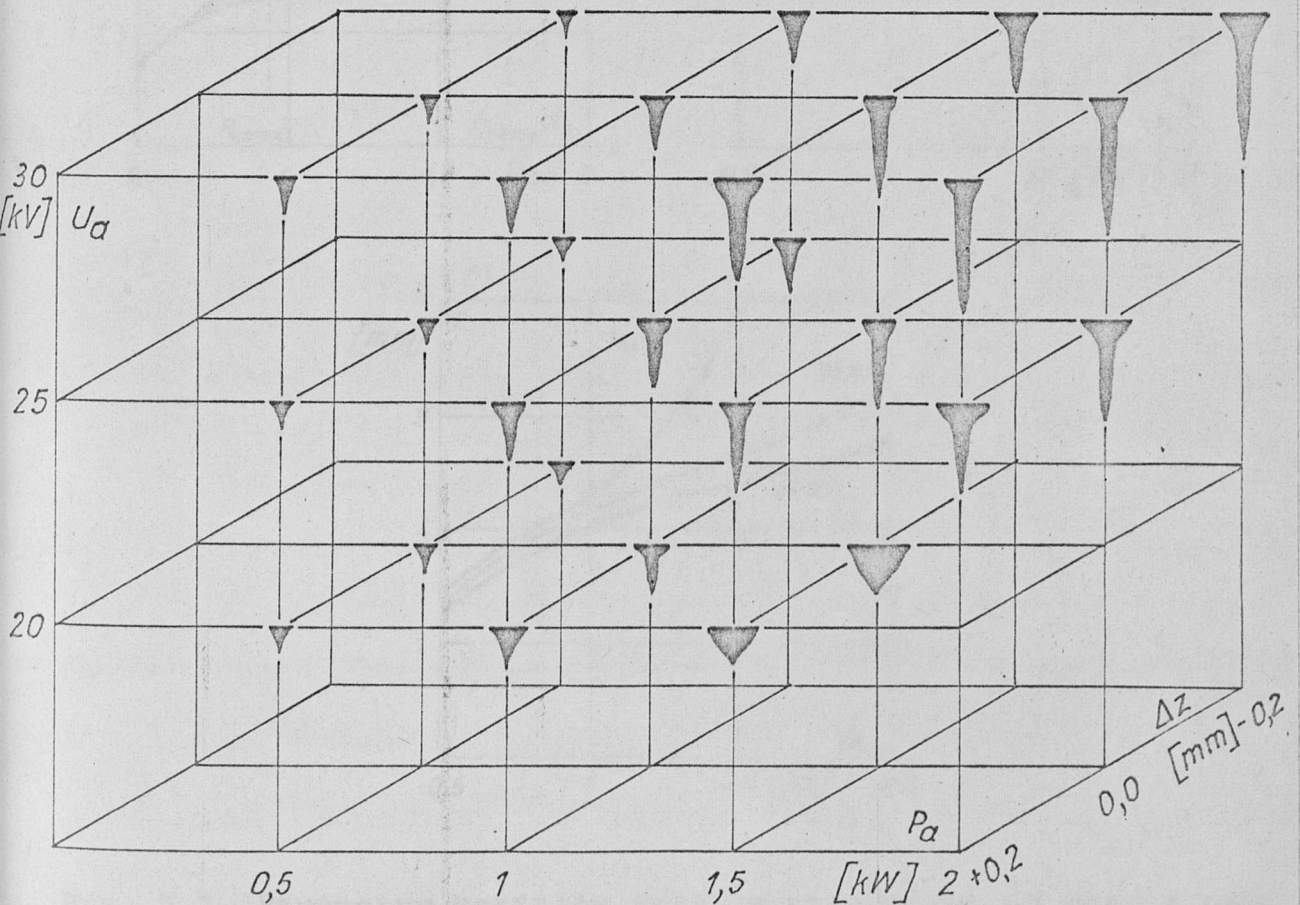
W celu doboru odpowiedniego prądu ogniskowania, dla określonych warunków spawania wykonywano zwykle kilka równoległych spoin w jednej próbce spawalniczej przy różnych wartościach prądu I_0 . Taki sposób badań wymagał oceny stopnia zmian geometrii spoin wskutek wzrostu temperatury próbki. Testy (rys. 5.1) wykazały, że kształt kolejnych spoin ulega jedynie niewielkim zmianom, a błąd wynikający z nieznacznego wzrostu szerokości b i głębokości h jest porównywalny z błędami spowodowanymi:



Rys. 5.1. Zmiana kształtu spoin wykonanych w jednej próbce spawalniczej przy stałej wartości prądu ogniskowania; $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV, $I_0 = 0,87$ A, h - głębokość spoiny, b - szerokość spoiny, c - szerokość lica spoiny

- niedokładnością regulacji prądu ogniskowania (rys. 1.2),
- oddziaływaniem pól zakłócających na wiązkę (rozd. 8),
czy też
- fluktuacjami głębokości przetopu [30,44,48] .

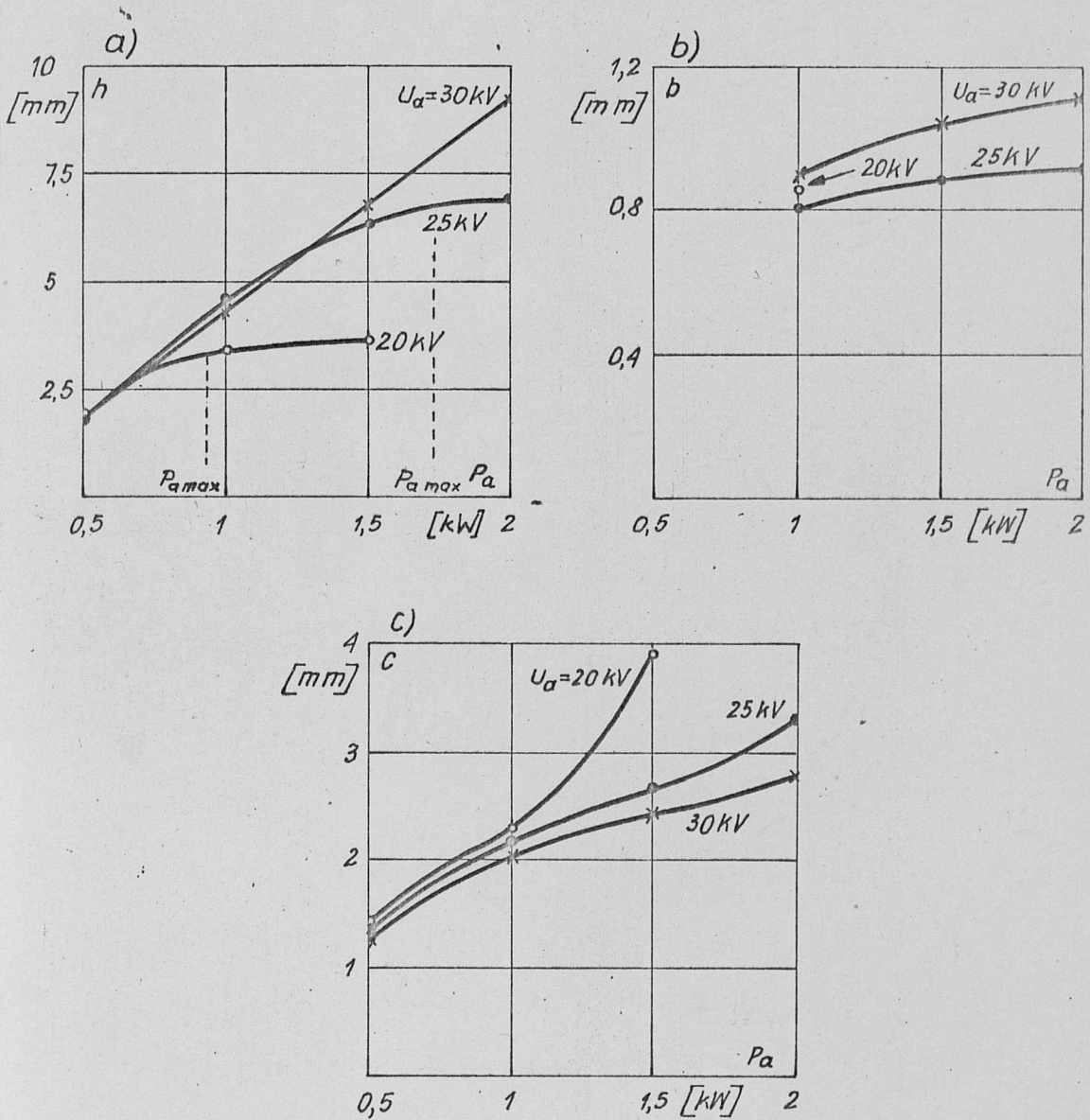
Z szeregu spoin wykonywanych przy zmienianych wartościach prądu ogniskowania wybierano spoinę o największej głębokości. Zwykle spoina taka posiadała także najmniejszą szerokość b i najmniejszą szerokość lica, c (rys. 5.4) . Wobec braku innych kryteriów przyjęto, że jest to spoina optymalna w określonych warunkach spawania, a odpowiedni prąd ogniskowania nazwano $I''_{o \text{ opt}}$. Kształty spoin wykonanych wiązkami o różnej mocy i energii przy kilku położeniach katody w otworze elektrody sterującej i przy optymalnym prądzie ogniskowania pokazano na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Kształty spoin (w dwukrotnym powiększeniu) przy optymalnym prądzie ogniskowania dla różnych mocy, napięć przyspieszających i położenia katody w otworze elektrody sterującej

5.3. Zależność kształtu spoin od mocy i napięcia przyspieszającego

Na rys. 5.3 przedstawiono zależność parametrów kształtu spoin od mocy wiązki i napięcia przyspieszającego. Jak widać głębokość przetopu h jest funkcją zarówno P_a jak i U_a , przy czym przebieg funkcji $h = f(P_a)$ wykazuje pewnego rodzaju nasycenie.



Rys. 5.3. Parametry kształtu spoin w zależności od mocy i napięcia przyspieszającego; h - głębokość spoiny, b - szerokość spoiny, c - szerokość lica

Wartość mocy wiązki, przy której obserwuje się wyraźną zmianę nachylenia tej charakterystyki oznaczono $P_{a \max}$. Z porównania zależności przedstawionych na rys. 5.3a oraz 4.9a wynika, że głębokość spoiny jest zależna od maksymalnej gęstości mocy wiązki zogniskowanej w płaszczyźnie spawania. Przy zmianach mocy całkowitej WE , głębokość h rośnie w przypadku wzrostu wartości ϕ_{\max} . Wzrost mocy P_a jest natomiast przyczyną nieznacznego zwiększenia szerokości spoiny i wyraźnego wzrostu szerokości lica (szczególnie przy $P_a > P_{a \max}$).

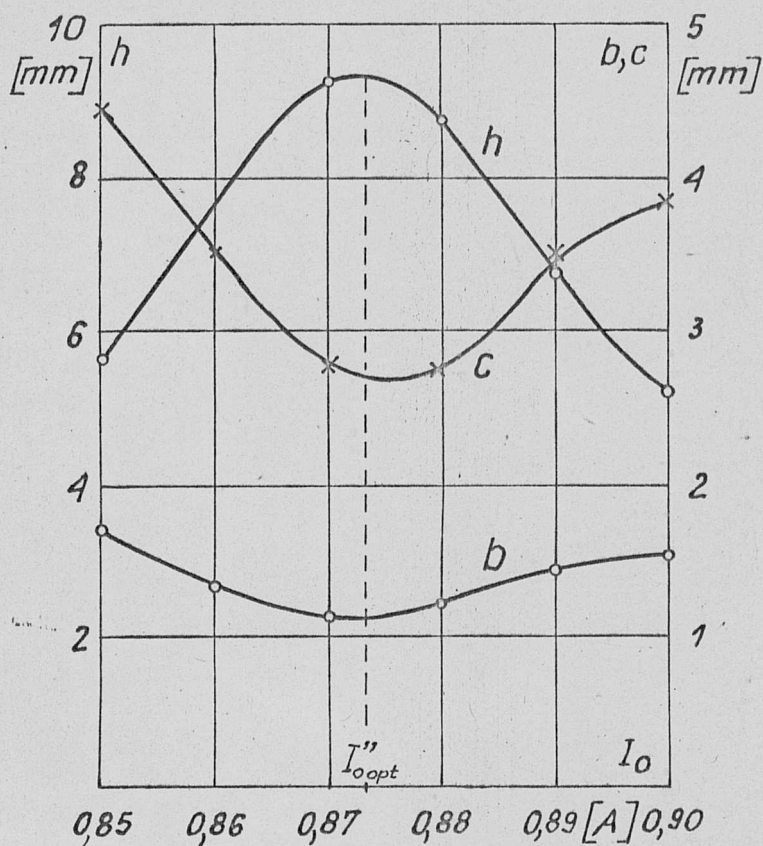
Przedstawione zależności mają istotne znaczenie praktyczne. Wynika z nich bowiem, że dla określonego napięcia przyspieszającego wzrost mocy wiązki począwszy od $P_{a \max}$ nie powoduje zwiększenia głębokości spoiny a prowadzi jedynie do wzrostu szerokości lica przy równoczesnym niewielkim wzroście szerokości spoiny. W celu zwiększenia głębokości h niezbędne jest wówczas podwyższenie napięcia przyspieszającego.

5.4. Zależność kształtu spoin od niektórych parametrów układu elektrooptycznego

5.4.1. Zależność kształtu spoin od prądu soczewki magnetycznej

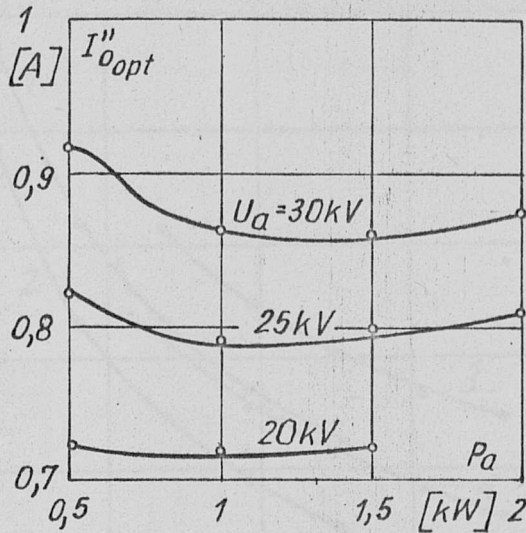
Na rys. 5.4 pokazano zależność geometrii spoiny od prądu ogniskowania. Na podstawie wykresów $h, b, c = f(I_0)$ oszacowano, że w przypadku zastosowania wiązki o mocy 2 kW i napięciu 30 kV niedokładność ustawienia wartości optymalnego prądu ogniskowania jedynie o 1% może prowadzić do:

- zmniejszenia głębokości spoiny o około 10%,
- wzrostu szerokości spoiny o około 14% i wreszcie
- wzrostu szerokości lica spoiny o około 19%.



Rys. 5.4. Zależność parametrów kształtu spoiny od prądu ogniskowania; $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV

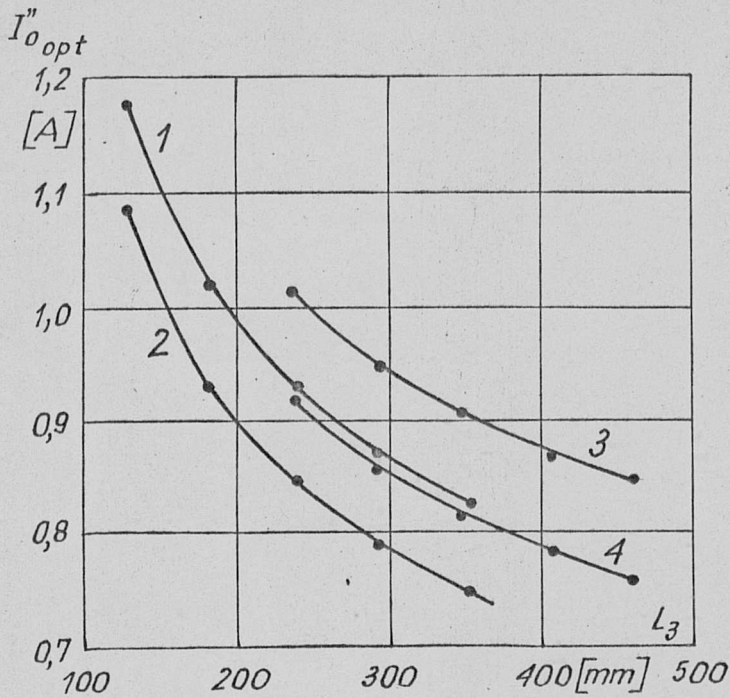
Jak widać więc prawidłowy dobór $I_0''_{opt}$ ma istotne znaczenie dla właściwej eksploatacji spawarki. Wartość tego prądu, podobnie jak wartość prądu $I_0'_{opt}$ wiązki zogniskowanej (rys. 4.15), zależy nie tylko od napięcia przyspieszającego, ale także od mocy wiązki. Zależności $I_0''_{opt} = f(P_a)$ pokazano na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Zależność I''_{0opt} od mocy i energii wiązki

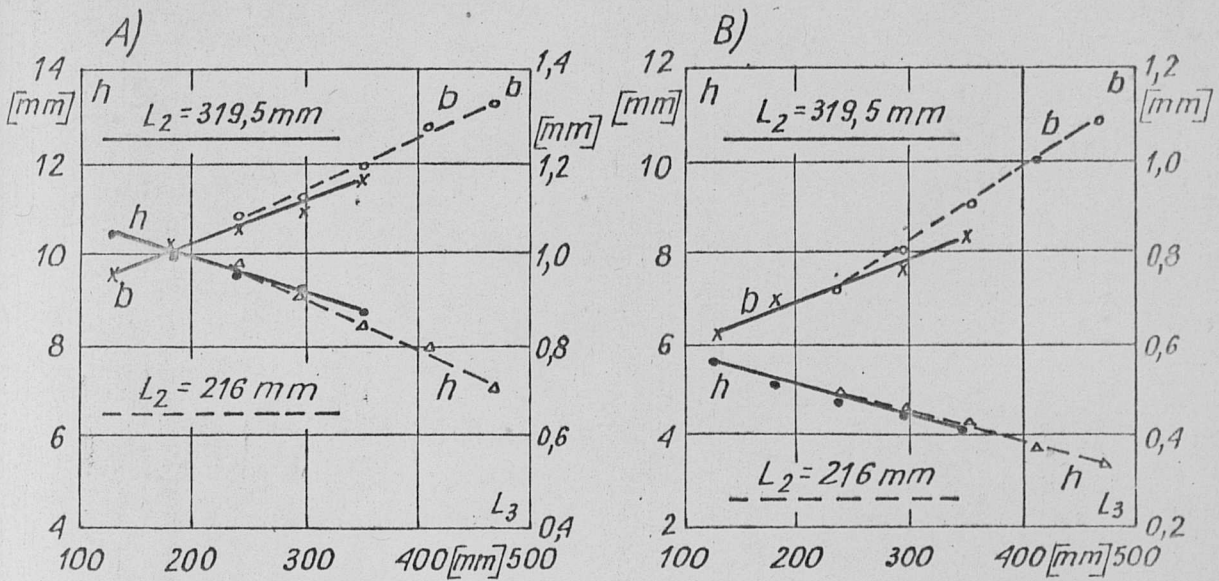
5.4.2. Zależność kształtu spoin od odległości spawanego przedmiotu od soczewki magnetycznej

Celem oceny w jakim stopniu zmiana odległości między soczewką a spawanym przedmiotem wpływa na kształt spoiny, przeprowadzono następujące doświadczenie: Dla dwóch różnych położeń soczewki ($L_2 = 319,5$ mm oraz $L_2 = 216$ mm) przemieszczano spawany przedmiot w komorze spawarki w kierunku z i wykonywano spoiny. Stosowano wiązkę o mocy 2 kW i napięciu 30 kV bądź 1 kW i 25 kV. Dla każdego zespołu wartości L_2 , L_3 , P_a i U_a dobierano prąd ogniskowania I''_{0opt} (rys. 5.6). Wyniki pomiarów pokazano na rys. 5.7. Jak widać, w każdym z rozpatrywanych przypadków zaobserwowano wzrost głębokości i malenie szerokości spoiny przy zbliżaniu przedmiotu do soczewki. Ze względu na ograniczenia techniczne prowadzenia eksperymentu nie udało się doświadczalnie stwierdzić, jaki przebieg mają funkcje h , $b = f(L_3)$ dla $L_3 < 127$ mm.



Rys. 5.6. Zależność $I_{0, opt}''$ od odległości L_2 i L_3 ;

- 1 - $L_2 = 319,5$ mm, $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV;
- 2 - $L_2 = 319,5$ mm, $P_a = 1$ kW, $U_a = 25$ kV;
- 3 - $L_2 = 216$ mm, $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV;
- 4 - $L_2 = 216$ mm, $P_a = 1$ kW, $U_a = 25$ kV

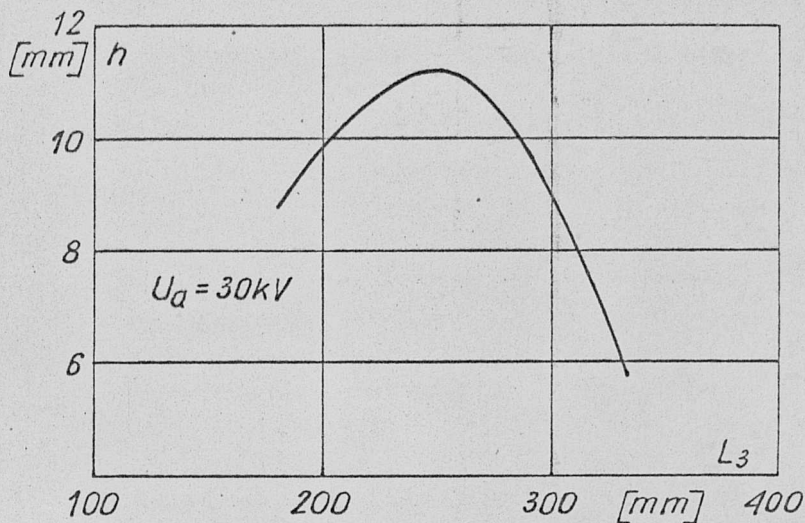


Rys. 5.7. Zależność głębokości (h) i szerokości (b) spoiny od odległości spawanego przedmiotu od soczewki (L_3).

Parametry wiązki: A - $P_a = 2$ kW, $U_a = 30$ kV,

B - $P_a = 1$ kW, $U_a = 25$ kV

Z literatury [24] wiadomo jednak, że ze względu na przesłone oddziaływanie otworu wlotowego kanału, w miarę zbliżania przedmiotu spawanego do soczewki, może wystąpić ponowne malenie głębokości spoiny (rys. 5.8) . Efekt ten zaobserwowany został przez Sandstroma [43] .



Rys. 5.8. Teoretyczna zależność głębokości spoiny od odległości L_3 (w/g [24])

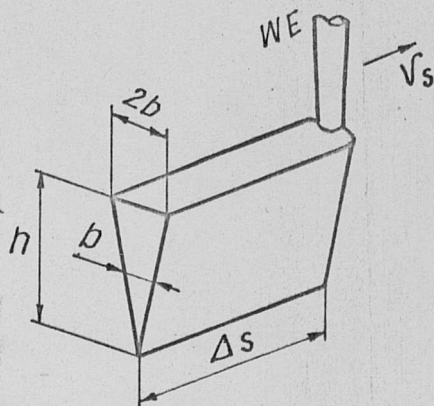
Należy zatem stwierdzić, że korzystniejszy kształt spoiny otrzymuje się w przypadku zbliżania spawanego przedmiotu do soczewki, przy czym powyżej pewnej optymalnej wartości L_3 głębokość spoiny ponownie maleje.

6. ZALEŻNOŚCI MIĘDZY PARAMETRAMI WIĄZKI ELEKTRONOWEJ I GEOMETRIĄ SPOINY

Objętość stopionego metalu, która determinuje kształt spoiny jest zależna od mocy doprowadzonej do jednostkowej długości spoiny. Noller i Mayer [39] wykazali doświadczalnie, że w przypadku wiązek o wysokich energiach (100....150 keV) zachodzi liniowy związek między mocą wiązki a objętością stopionego metalu. Jeżeli objętość tę przedstawi się w postaci pryzmatu o wysokości h , szerokości podstawy $2b$ i długości Δs (rys. 6.1), zależność ta ma postać:

$$h \cdot b = C \cdot P_a \quad (6.1)$$

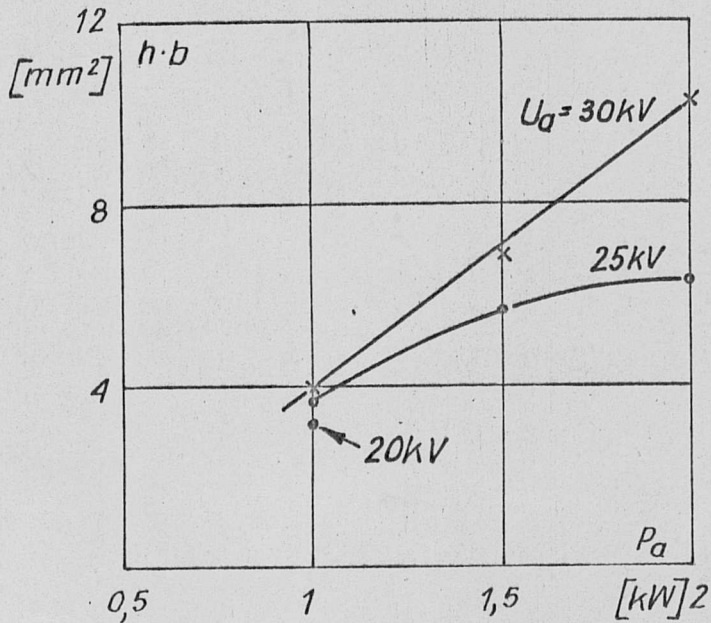
gdzie C jest stałą zależną od właściwości fizycznych metalu, jego temperatury przed spawaniem oraz prędkości spawania.



Rys. 6.1. Schematyczne przedstawienie objętości stopionego metalu

Na podstawie kształtu przekrojów poprzecznych otrzymanych spoin „głębokich” (rozd. 5.3) obliczono zależność iloczynu $h \cdot b$ od mocy wiązki o energii 20, 25 i 30 keV. Wyniki przedstawiono

na rys. 6.2. Jak widać, wartość iloczynu $h \cdot b$ jest zależna nie tylko od mocy wiązki, lecz także od napięcia przyspieszającego.



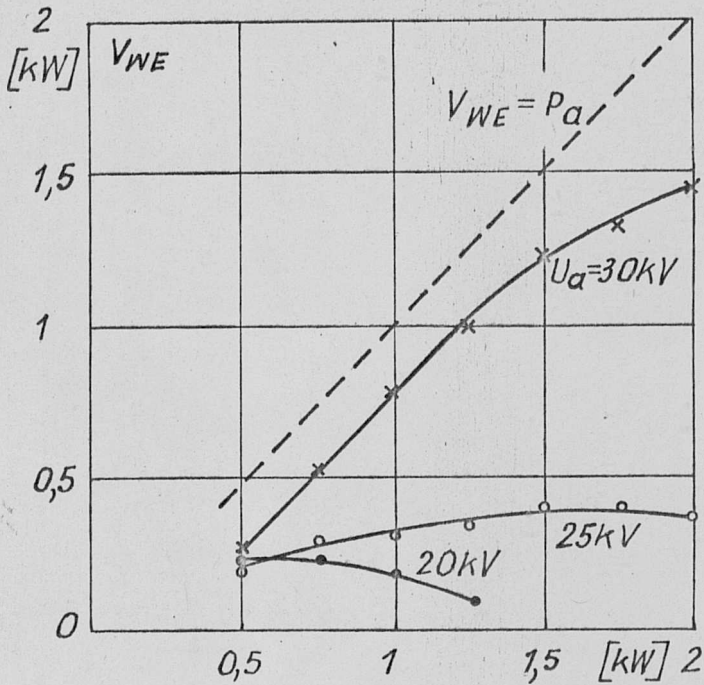
Rys. 6.2. Zależność iloczynu $h \cdot b$ od mocy wiązki

Dla stosunkowo niskich napięć U_a zależność 6.1 należy zatem zmodyfikować przez wprowadzenie współczynnika $n = f(P_a, U_a)$:

$$h \cdot b = n \cdot C \cdot P_a \quad (6.2)$$

Założono, że konieczność wprowadzenia współczynnika n wynika z zauważalnych deformacji rozkładu gęstości mocy wiązki zogniskowanej polegających na „rozmyciu” charakterystyki $\sigma = f(r)$ wskutek emisji elektronów z bocznej powierzchni katody. Problem ten analizowano w rozdziale 4.2.1. Część mocy wiązki, reprezentowaną przez elektrony emitowane z powierzchni ozłowej katody przedstawiono tam w postaci stożka (rys. 4.10b) o objętości V_{WE} (wzór 4.2). Na rys. 6.3 pokazano zależność objętości (mocy) V_{WE} od mocy P_a , przy różnych napięciach przyspieszających. Jak widać, w miarę

wzrostu energii wiązki wzrasta objętość V_{WE} , co oznacza mniejsze „rozmycie” wiązki. Można przypuszczać, że przy dużych wartościach U_a (100...150 kV) rozmycie to jest nieznaczne, $V_{WE} \cong P_a$ (linia przerywana na rys. 6.3), $n \cong 1$ i zależność 6.2 przechodzi w zależność 6.1.



Rys. 6.3. Zależność objętości V_{WE} od mocy wiązki

W przypadku zatem wiązek o wysokich energiach można założyć, że „użyteczna” moc wiązki jest zawarta w stożku o objętości V_{WE} . Założenie to pozwala na przedstawienie zależności 6.1 w postaci:

$$h \cdot b = C \cdot V_{WE} = C \cdot \frac{1}{3} \pi \sigma_{\max} \cdot (S_{0,5})^2 \quad (6.3)$$

lub też

$$C \approx \frac{h}{\sigma_{\max}} \cdot \frac{b}{(S_{0,5})^2} \quad (6.4)$$

Jeżeli wprowadzi się współczynniki n_1 oraz n_2 ujmujące zależności między głębokością spoiny i maksymalną wartością gęstości mocy wiązki oraz szerokością spoiny i średnicą WE

$$n_1 = \frac{h}{\sigma_{\max}}, \quad (6.5)$$

$$n_2 = \frac{b}{(s_{0,5})^2}, \quad (6.6)$$

wówczas otrzymuje się wyrażenie:

$$h \cdot b = n_1 \cdot n_2 \cdot P_a \quad (6.7)$$

przy czym wartości współczynników n_1 i n_2 są zależne od prędkości spawania oraz od właściwości fizycznych spawanego metalu.

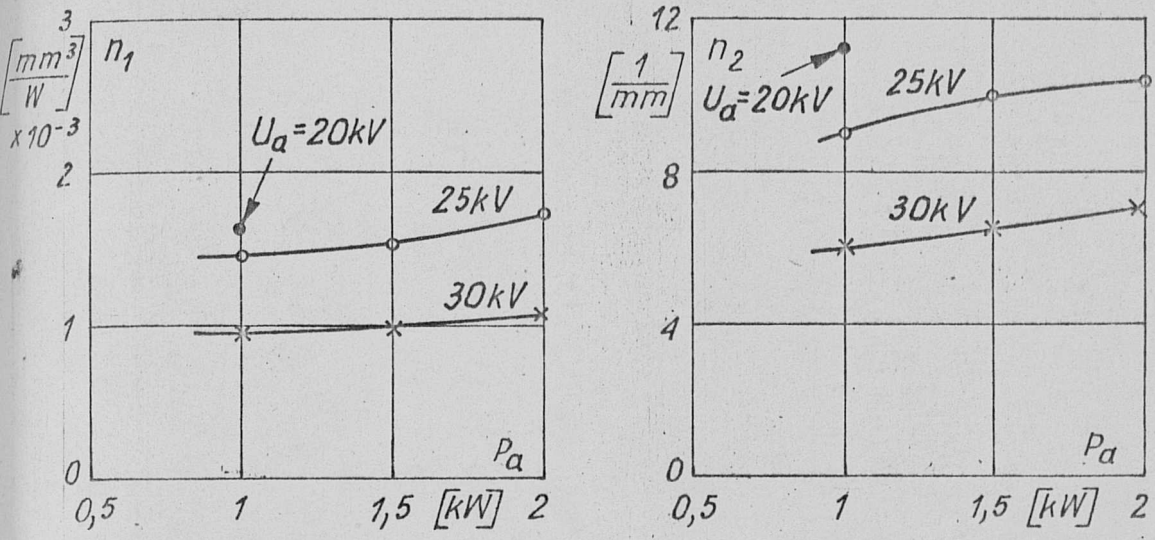
W przypadku wykonywania spoin w spawarce niskonapięciowej, zgodnie z wyrażeniem 6.2 zależność 6.7 przybiera postać:

$$h \cdot b = n \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot P_a \quad (6.8)$$

W oparciu o pomiary rozkładu gęstości mocy wiązki zogniskowanej (rys. 4.9) oraz geometrii spoin (rys. 5.3) wykonanych w stali 1H18N9T z prędkością 0,01 m/sek obliczono wartości współczynników n_1 i n_2 . Wyniki, dla przypadków „głębokich” spoin przedstawiono na rys. 6.4. Jak widać, wartości tych współczynników są funkcją zarówno napięcia przyspieszającego jak i, w niewielkim stopniu, mocy wiązki.

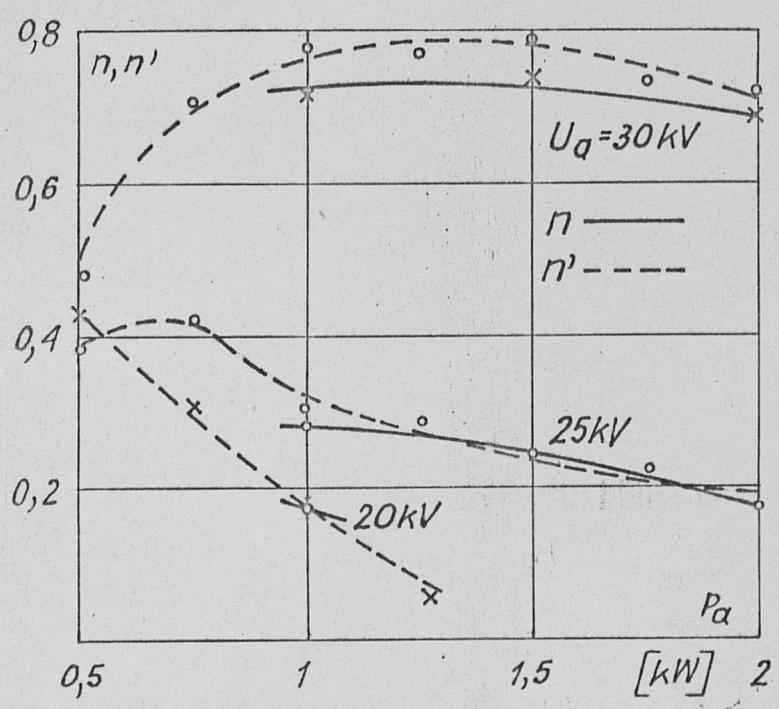
Fizyczny sens przedstawionych na rys. 6.4 funkcji jest trudny do interpretacji ze względu na skomplikowany mechanizm powsta-

wania głębokiej spoiny związany z przepływem ciekłego metalu [2,9,18]. Wartości współczynników n_1 i n_2 umożliwiają jednakże



Rys. 6.4. Zależność współczynników n_1 i n_2 od mocy wiązki

oszacowanie z wyrażenia 6.8 wartości współczynnika n . Wykresy funkcji $n = f(P_a)$ przedstawiono na rys. 6.5. Widać tu, że wartości



Rys. 6.5. Zależność współczynników n i n' od mocy wiązki

współczynnika n zależą (podobnie jak współczynniki n_1 i n_2) w znacznym stopniu od energii, niewiele natomiast od mocy wiązki. Tendencja zmian wartości współczynnika n w funkcji napięcia przyspieszającego pozwala na wyprowadzenie wniosku, że w przypadku wiązek o dużych energiach (100...150 keV), $n \approx 1$ i spełniona jest zależność 6.7.

Na rys. 6.5 pokazano także zależności wartości stosunku objętości stożka V_{WE} od mocy wiązki

$$n' = \frac{V_{WE}}{P_a} \quad (6.9)$$

od całkowitej mocy P_a . Jak widać, przy zmianach U_a i P_a wartości współczynników n i n' zmieniają się podobnie. Tak więc wobec równości

$$n(P_a, U_a) \approx n'(P_a, U_a) \quad (6.10)$$

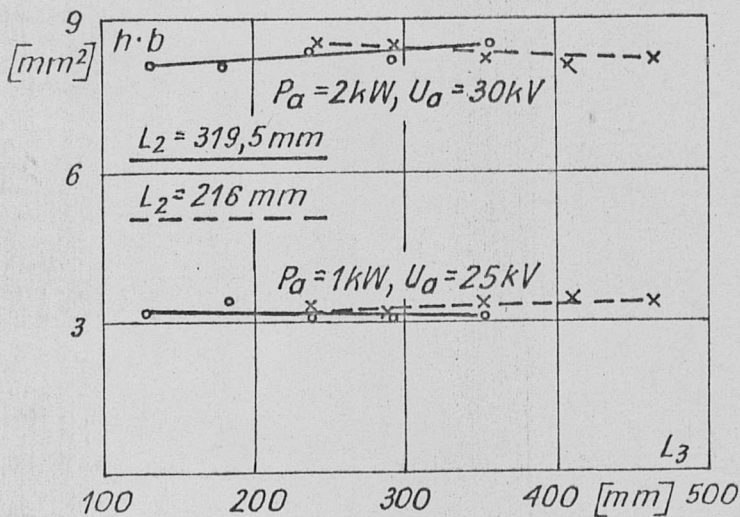
zależności 6.8 oraz 6.2 można przedstawić w postaci:

$$h \cdot b = n_1 \cdot n_2 \cdot V_{WE} \quad (6.11)$$

$$h \cdot b = C \cdot V_{WE} \quad (6.12)$$

Z równań 6.11 i 6.12 wynika, że o geometrii spiny decydują w głównej mierze elektrony wiązki emitowane z powierzchni czołowej katody. Wzrost mocy całkowitej wiązki na skutek powiększenia powierzchni emisji katody o powierzchnię boczną pręta (rys. 4.3d) nie powoduje wzrostu głębokości spiny a głównie przyczynia się do wzrostu szerokości lica spiny (rys. 5.3c).

Z przeprowadzonych analiz wynika, że przy stałych wartościach mocy, napięcia przyspieszającego i prędkości spawania, a także przy optymalnym prądzie ogniskowania, iloczyn $h \cdot b$ nie zależy od rozkładu gęstości mocy, zależy natomiast od konfiguracji powierzchni emisji katody. Rozkład gęstości mocy zmieniano w trakcie badań zależności kształtu spoin od parametrów spawania poprzez zmianę geometrii układu elektronooptycznego (rozdz.5.4.2). Na podstawie kształtów spoin otrzymywanych przy różnych odległościach L_2 i L_3 obliczono wartości iloczynu $h \cdot b$. Wyniki przedstawiono na rys. 6.6. Jak widać, w rozpatrywanym zakresie zmian



Rys. 6.6. Zależność iloczynu $h \cdot b$ od odległości L_3

odległości L_2 i L_3 wartość iloczynu $h \cdot b$ jest w przybliżeniu stała, co potwierdza sformułowaną uprzednio tezę.

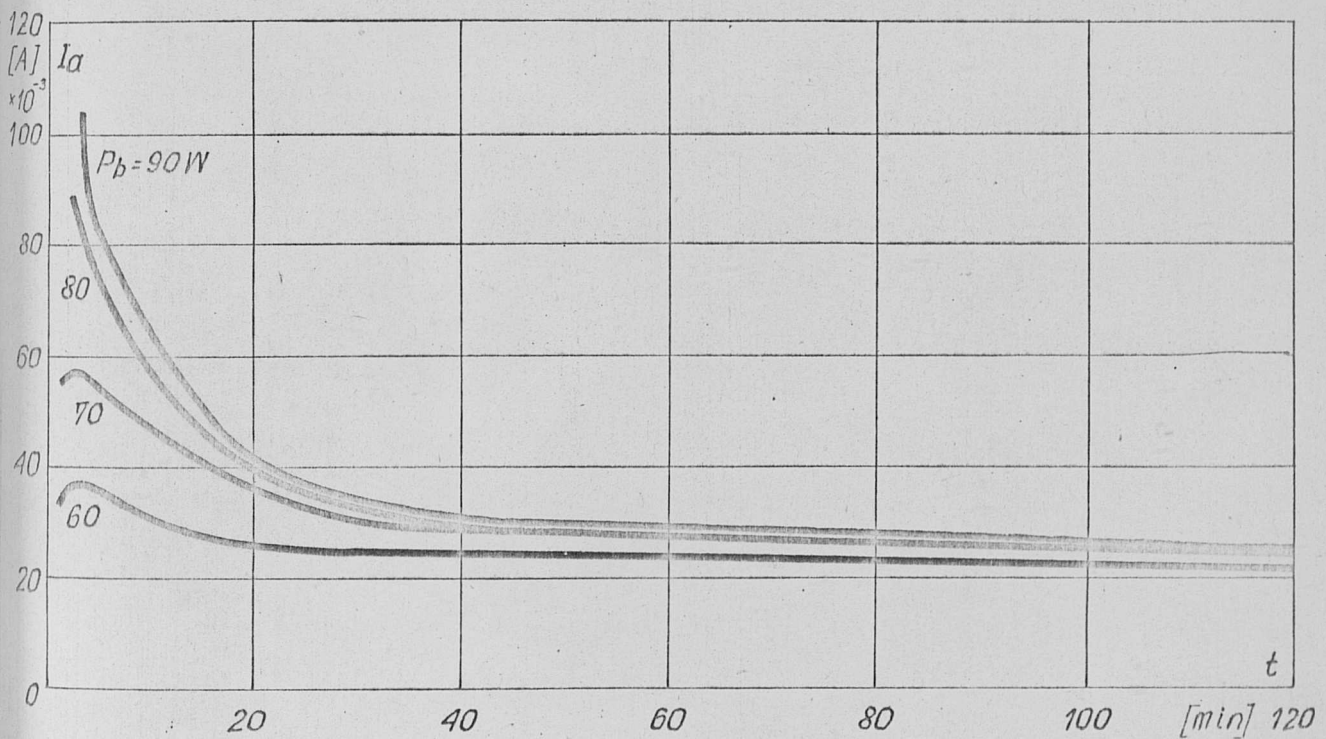
Reasumując można stwierdzić, że:

- głębokość spoiny h jest zależna od maksymalnej gęstości mocy σ_{\max} wiązki zogniskowanej w płaszczyźnie spawania,

- kształt przekroju poprzecznego spoiny zależy od rozkładu gęstości mocy WE, oraz
- wartość iloczynu $h \cdot b$ jest zależna od konfiguracji powierzchni emisji katody.

7. NIESTABILNOŚĆ PRACY WYRZUTNI

W triodowych wyrzutniach elektronowiązkowych obserwuje się często zmianę wartości prądu anodowego w czasie pracy wyrzutni [38]. Efekt taki stwierdzono także w przypadku wyrzutni spawarki WS-2/30. Przy niezmiennych warunkach zasilania spawarki mierzono prąd wiązki w funkcji czasu. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 7.1. Celem znalezienia przyczyn i wyeliminowania



Rys. 7.1. Zależność prądu wiązki od czasu pracy wyrzutni oraz mocy P_b ; $U_a = 20$ kV, $U_{ES} = 0$

obserwowanej zmiany prądu I_a przeprowadzono szereg doświadczeń. Założono przy tym, że niestabilność prądu wiązki jest spowodowana:

- zmianą wzajemnego położenia elektrod wyrzutni, oraz
- zmianą prądu emisji termokatody.

7.1. Zmiana wzajemnego położenia elektrod wyrzutni

W wyrzutni z termokatodą, w węźle katodowym wydzielone jest ciepło, które prowadzi do wzrostu temperatury całej wyrzutni. Wzrost temperatury poszczególnych elementów konstrukcyjnych powoduje ich wydłużenie i w konsekwencji zmianę wzajemnego położenia elektrod. W efekcie następuje:

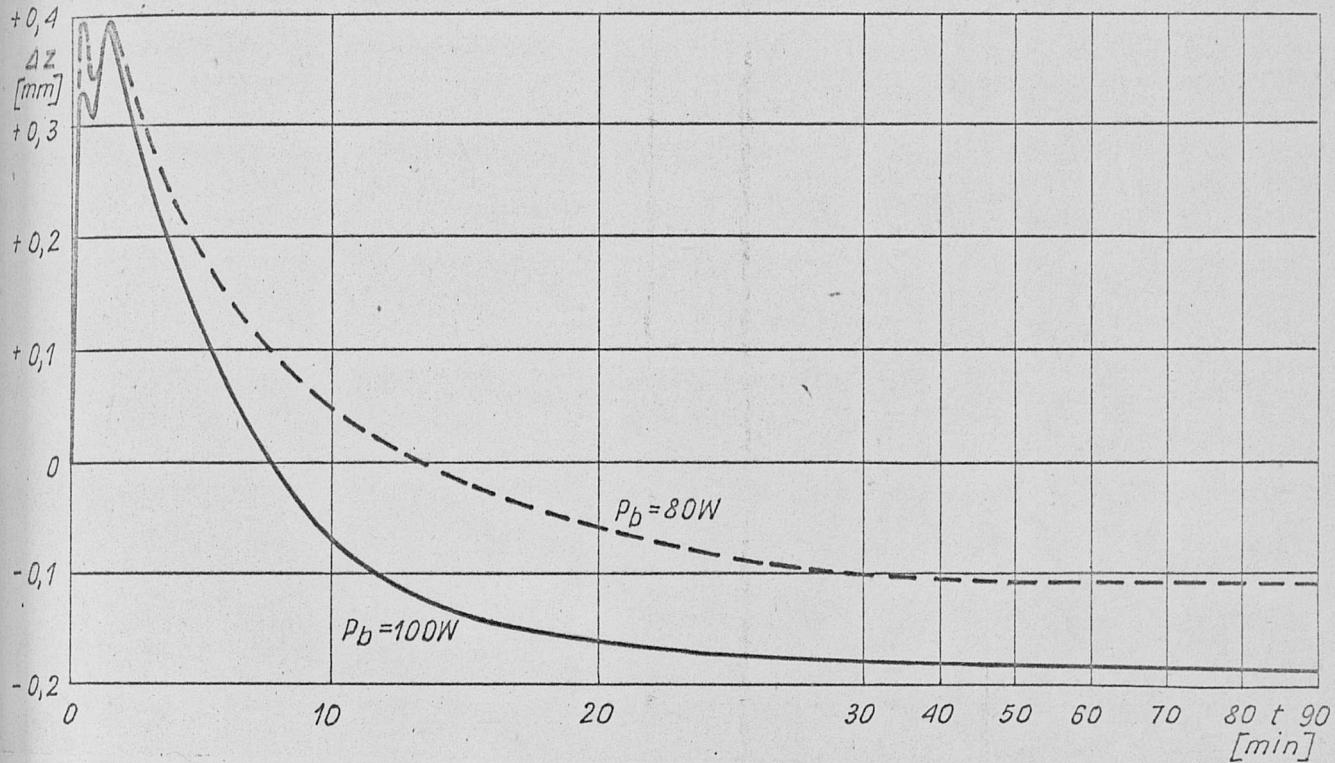
- zmiana odległości katoda - anoda wskutek wydłużenia izolatorów oraz wydłużenia katody i jej uchwytu,
- zmiana położenia katody w otworze elektrody sterującej spowodowana wydłużeniem zespołu elektrody sterującej oraz katody i jej uchwytu, a także
- zmiana położenia katody pomocniczej względem osi katody rzeczywistej.

W celu oszacowania wielkości zmian wzajemnego położenia elektrod wskutek ich dylatacji termicznych, obserwowano katodę, katodę pomocniczą i elektrodę sterującą przez wziernik w komorze stanowiska badawczego. Celem umożliwienia tej obserwacji wprowadzono pewne zmiany w konstrukcji wyrzutni. Stwierdzono, że w okresie niestabilnej pracy wyrzutni elektrody przemieszczają się w sposób następujący:

- Odległość między katodą i anodą maleje o około 0,4 mm.

Poprzez analogię z diodą, w której prąd jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości katoda - anoda, oszacowano, że obserwowana zmiana odległości L_1 może spowodować wzrost prądu I_a o 6%.

- Zmienia się położenie katody w otworze elektrody sterującej. Przebieg tych zmian pokazano na rys. 7.2. Można tu

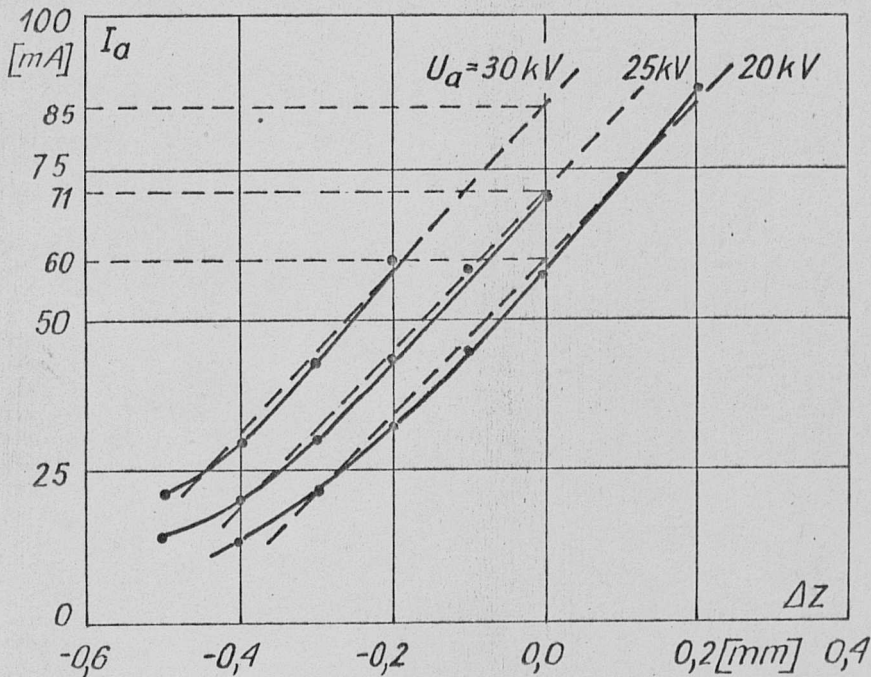


Rys. 7.2. Przemieszczanie się katody względem płaszczyzny otworu elektrody sterującej

wyodrębnić dwie fazy procesu dylatacji a mianowicie szybkie wysuwanie się katody wskutek wydłużania się tej elektrody i jej uchwytu, a następnie stosunkowo wolne wydłużanie się zespołu elektrody sterującej. Celem oceny wpływu obserwowanych zmian wzajemnego położenia elektrod, mierzone prąd wiązki emitowanej ze stabilnej termicznie wyrzutni przy różnych wartościach Δz . Wyniki zamieszczone na rys. 7.3. Charakterystyki $I_a = f(\Delta z)$ przy pracy wyrzutni w warunkach ładunku przestrzennego można w pierwszym przybliżeniu przedstawić w postaci :

$$I_a = I_a(0) + 0,134 \Delta z, \quad [A] \quad (7.1)$$

gdzie: $I_a(0)$ - prąd wiązki w przypadku $z = 0$, [A],
 Δz - odległość powierzchni czołowej katody od płaszczyzny otworu elektrody sterującej (rys. 3.2), [mm].



Rys. 7.3. Zależność prądu wiązki od położenia katody w otworze elektrody sterującej: doświadczalna (linie ciągłe) oraz według zależności 7.1 (linie przerywane)

Wykresy zależności 7.1 przedstawiono linią przerywaną na rys. 7.3. Jak widać, występuje zadawalająca zgodność charakterystyk doświadczalnej i opisanej wyrażeniem 7.1 w zakresie zmian Δz spowodowanych procesem dylatacji.

Z zależności 7.1 oszacowano, że zmiana położenia katody w otworze elektrody sterującej od + 0,4 do -0,2 mm (rys.7.2)

powoduje następujące względne zmiany prądu odniesione do $I_a(0)$:

dla $U_a = 20$ kV - od + 89% do -45%

dla $U_a = 25$ kV - od + 75% do -38%, oraz

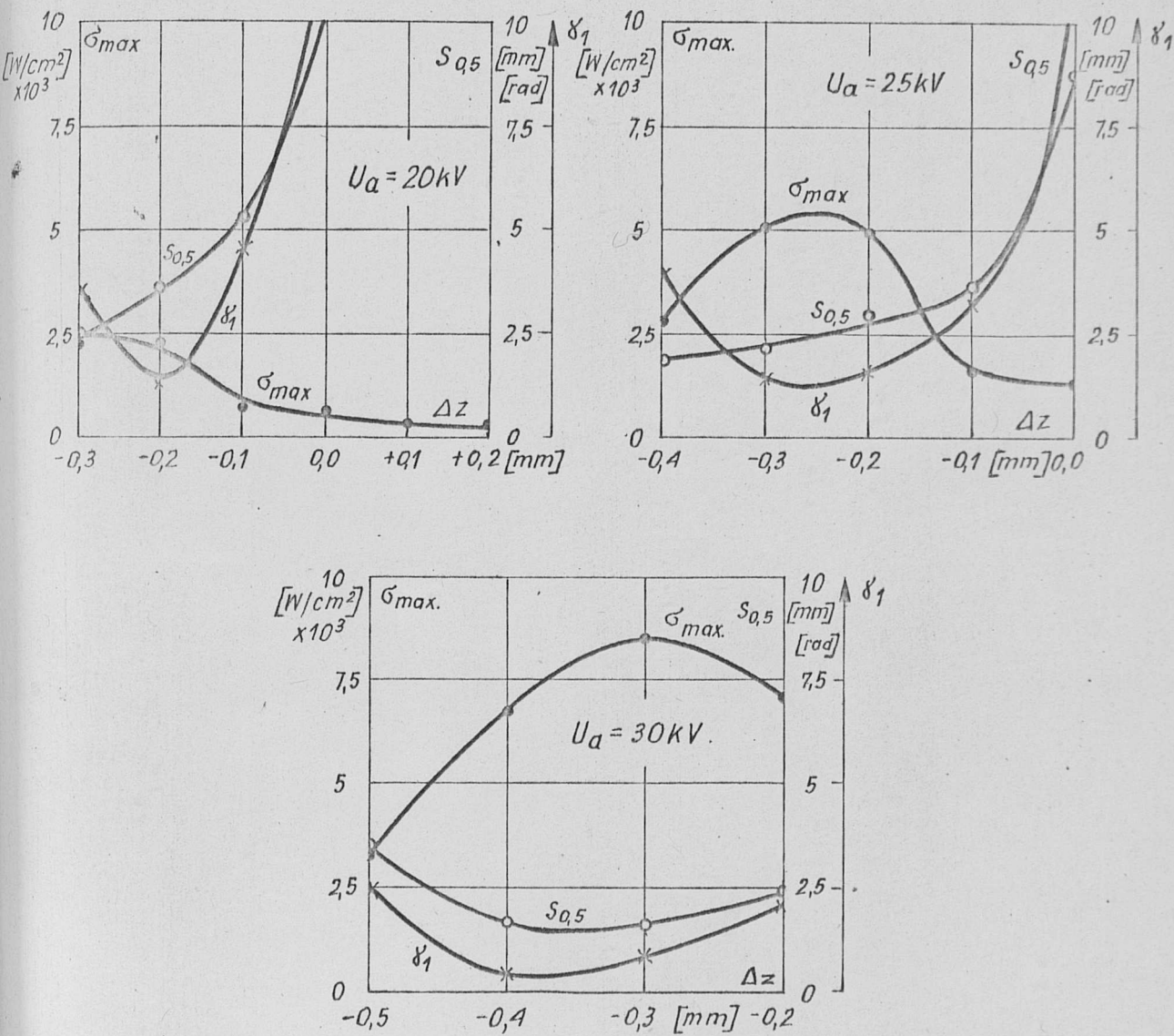
dla $U_a = 30$ kV - od + 63% do -32%.

W przypadku znacznego wysunięcia katody z otworu elektrody sterującej względne zmiany prądu I_a mogą być mniejsze ze względu na możliwość pracy wyrzutni w warunkach nasycenia.

- Katoda pomocnicza (ściślej ekran katody pomocniczej) ulega niewielkiemu przemieszczeniu względem czosła katody rzeczywistej, przy czym wzajemne położenie katod w okresie równowagi termicznej odpowiada stanowi początkowemu. Oszacowano według zależności 3.3, że zmiana położenia katod o 0,2 mm w okresie niestabilnej pracy wyrzutni powoduje obniżenie temperatury czosła katody rzeczywistej o około 6 K, co nie wprowadza zauważalnych zmian prądu wiązki.

Jak wynika z przeprowadzonych obserwacji i analiz, niestabilność prądu wiązki wynika w głównej mierze ze zmiany wzajemnego położenia katody i elektrody sterującej. Zmiana parametru Δz powoduje nie tylko fluktuacje mocy całkowitej wiązki, ale także istotne zmiany rozkładu gęstości mocy. Na rys. 7.4 przedstawiono zależność parametrów kształtu rozkładu σ wiązki niezogniskowanej od położenia katody w otworze elektrody sterującej. Obserwowane zmiany zarówno P_a jak i rozkładu σ w okresie niestabilnej pracy wyrzutni spowodowane dylatacjami termicznymi

elektrod w znacznym stopniu utrudniają prawidłową eksploatację spawarki.



Rys. 7.4. Zależność parametrów kształtu rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej od położenia katody w otworze elektrody sterującej

7.2. Zmiana prądu termokatody

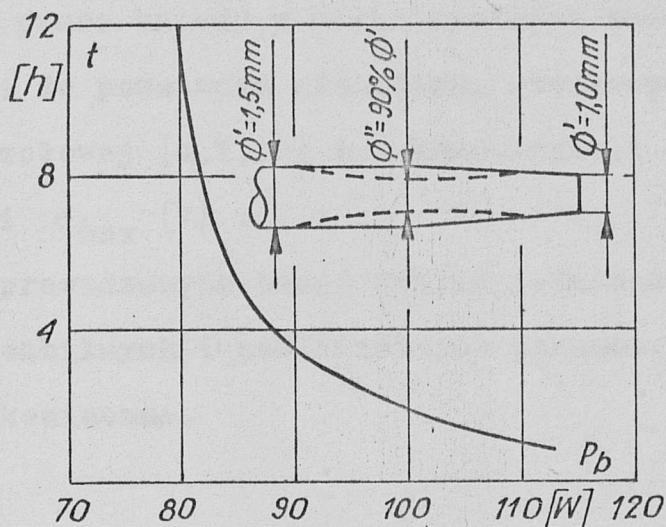
W czasie długotrwałej pracy wyrzutni obserwuje się szybkie zmiany prądu wiązki związane z dylatacjami termicznymi elektrod, oraz zmiany wolne wynikające z parowania materiału katody i erozji jonowej jej powierzchni emisyjnej.

Wzajemne przemieszczenie się katody i elektrody sterującej jest przyczyną istotnej zmiany powierzchni emisyjnej katody. W miarę bowiem wydłużania się katody i jej uchwytu, w emisji elektronów coraz to większy udział bierze powierzchnia boczna pręta wolframowego. Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów (rys. 3.1) powierzchnia ta ma temperaturę wyższą od temperatury powierzchni czołowej, co pogłębia efekt niestabilności prądu I_a oraz rozkładu gęstości mocy wiązki.

W strefie bombardowania elektronami emitowanymi z katody pomocniczej obserwuje się ubytek materiału katody w stopniu zależnym od temperatury T_k [8]. Dla katody pośrednio żarzonej wyrzutni spawarki WS-2/30 zbadano zależność czasu, po którym średnica katody maleje w rejonie najwyższej temperatury do 90% wartości początkowej, od mocy bombardowania P_b (rys. 7.5).

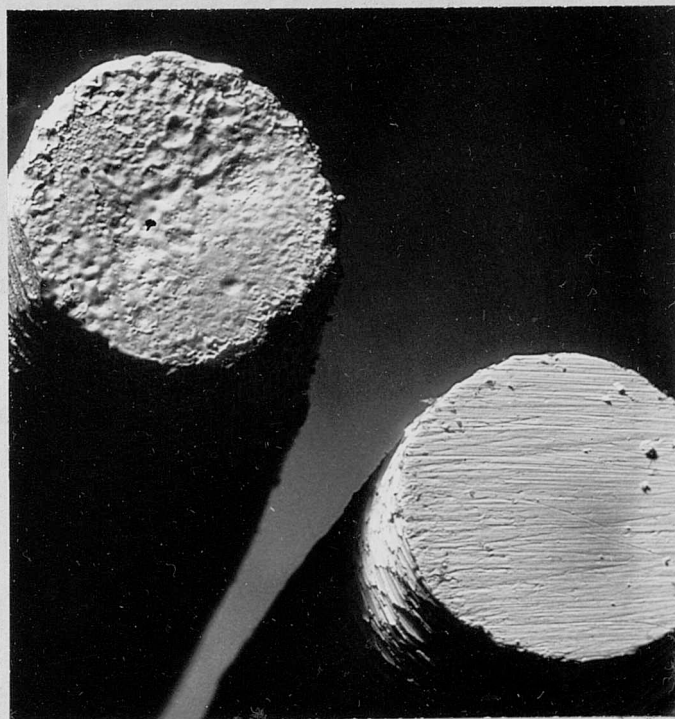
Parowanie materiału katody może być przyczyną wolnych zmian prądu emisji wskutek:

- zmiany powierzchni emisyjnej katody,
- zmiany rozkładu temperatury na powierzchni katody spowodowanej zmianą jej geometrii, a także
- zmiany temperatury w następstwie zmniejszania się sprawności prądowej zespołu katoda - katoda pomocnicza [23].



Rys. 7.5. Zależność czasu, po którym średnica katody maleje w rejonie o najwyższej temperaturze do 90% wartości początkowej, od mocy bombardowania P_b

Bombardowanie katody jonami, których źródłem jest zarówno topiony materiał jak i atmosfera gazów resztkowych, prowadzi do zmian w strukturze powierzchni emisyjnej. Na rys. 7.6. przedstawiono fragment katody, gdzie widoczne są skutki erozji jonowej.



Rys. 7.6. Powierzchnia ozołowa katody po kilku godzinach pracy z widocznymi skutkami erozji jonowej. Obok katoda nowa

Długotrwała praca katody w niekorzystnych warunkach może doprowadzić nawet do powstania głębokich, stożkowych otworów w powierzchni czołowej [4,7,40] i w konsekwencji do znacznego zmniejszenia wartości σ_{\max} [7].

Z przeprowadzonych badań wynika jednoznacznie, że dla zapewnienia stabilnych i powtarzalnych parametrów WE stabilizacja prądu jest konieczna.

7.3. Stabilizacja pracy wyrzutni

7.3.1. Stabilizacja zmian szybkich

Stabilizację zmian prądu wiązki zachodzących wskutek dylatacji termicznych można uzyskać przez:

- skonstruowanie wyrzutni, w której nie występuje wzajemne przemieszczanie się elektrod,
- wygrzewanie wyrzutni celem osiągnięcia stanu równowagi termicznej przed procesem spawania, bądź też
- zachowanie stałej użytecznej powierzchni emisji katody bez względu na jej chwilowe położenie w obszarze elektrody sterującej.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, niestabilność prądu wiązki jest spowodowana wzrostem długości elementów konstrukcyjnych wskutek wzrostu ich temperatury. Wydłużenie to określa zależność:

$$\Delta l = l_p \cdot \alpha_l \cdot (T_1 - T_0) \quad (7.2)$$

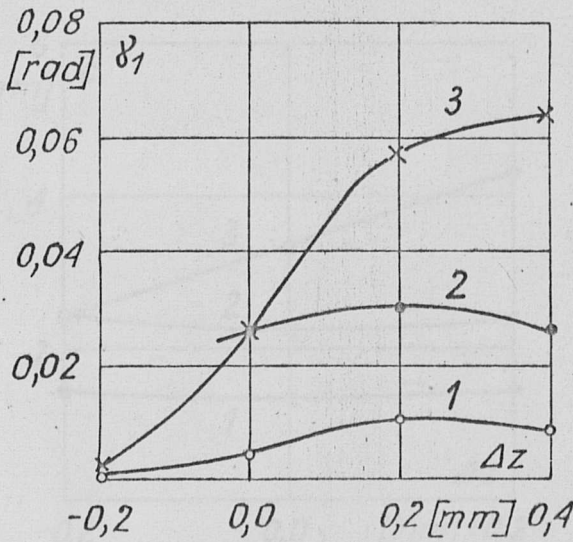
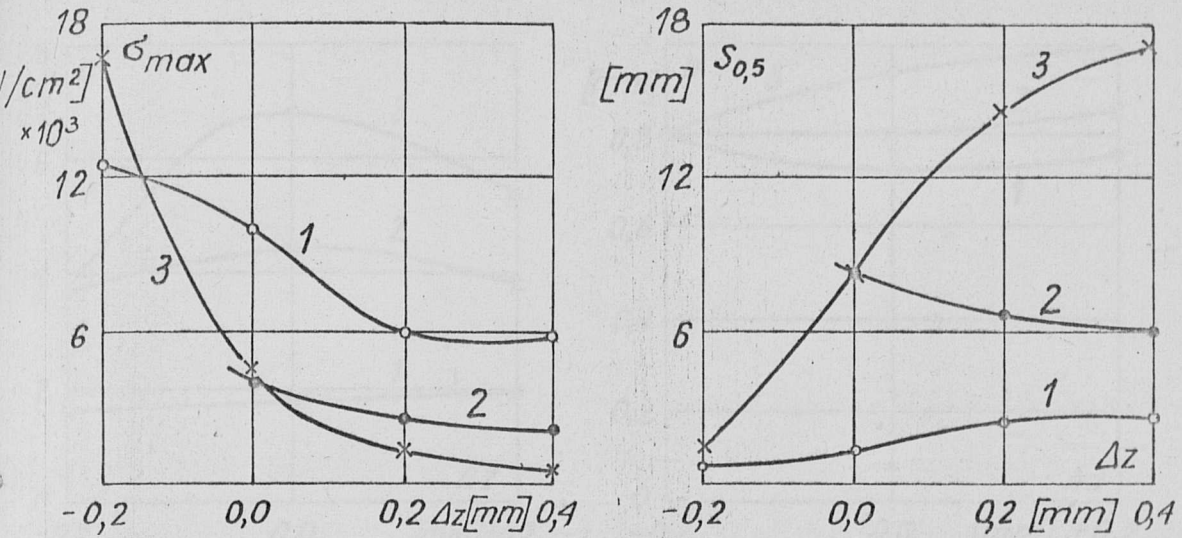
gdzie: l_p - długość elementu w temperaturze T_0 ,
 $T_1 - T_0$ - przyrost temperatury,
 α_l - współczynnik rozszerzalności liniowej.

Z wzoru 7.2 wynika jednoznacznie, że zmniejszenie ruchów dylatacyjnych i stabilniejszą pracę wyrzutni osiągnie się w następnym:

- skrócenia (wzdłuż osi z) elementów konstrukcji,
- obniżenia temperatury wyrzutni poprzez stosowanie katod o niskiej temperaturze emisji oraz chłodzenia wyrzutni i wreszcie
- stosowania materiałów o małych wartościach współczynnika rozszerzalności liniowej.

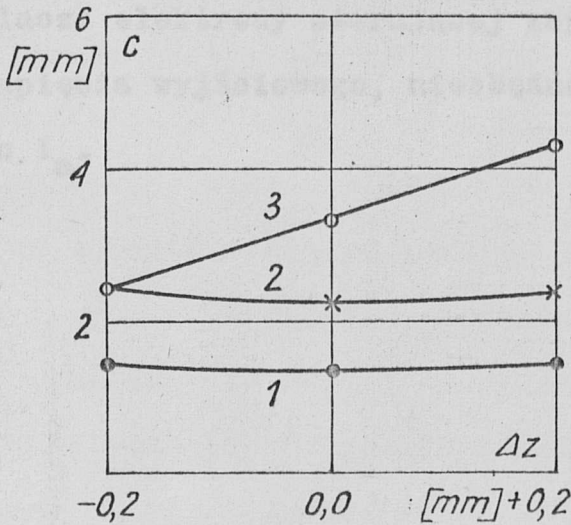
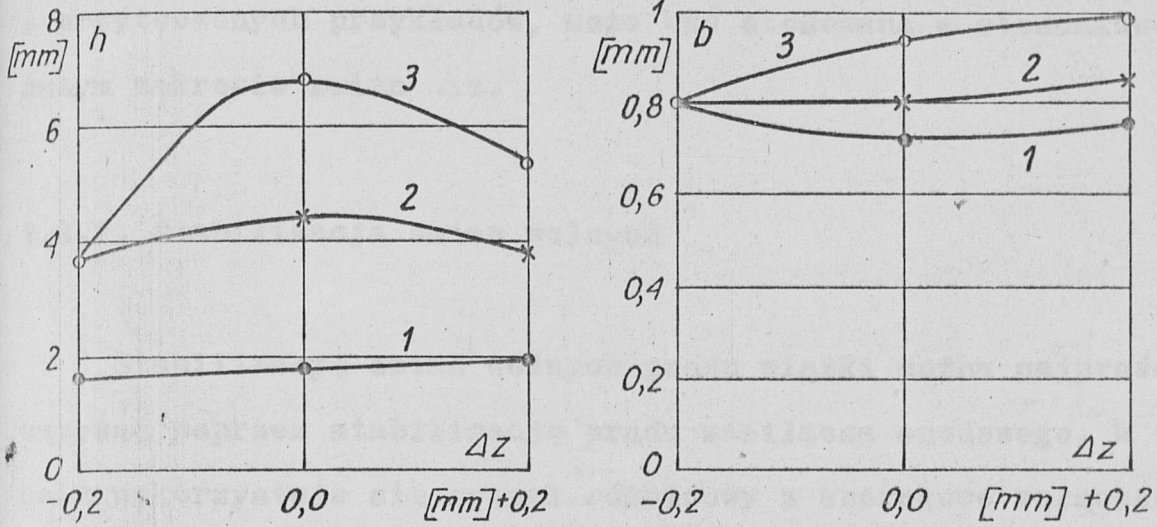
Przeprowadzane zabiegi w mniejszym lub większym stopniu ograniczają ruchy dylatacyjne, jednak nie likwidują ich całkowicie. Największe zmiany, wynikające głównie ze zwiększenia długości katody i przemieszczania się jej w otworze elektrody sterującej, obserwuje się w pierwszych kilku minutach pracy wyrzutni. W przypadku wyrzutni spawarki WS-2/30 zadawalająca stabilność prądu I_a osiągana jest po upływie kilkudziesięciu minut. Oceniono, że po jednej godzinie pracy wyrzutni zmiana prądu wiązki określona jako $\Delta I_a / I_a \cdot t$ jest mniejsza od 10% na godzinę. Stan taki przyjęto za okres równowagi termicznej. W okresie tym dokonywano pomiarów wiązki i wykonywano spoiny.

Zmiana wartości prądu wiązki w czasie niestabilnej pracy wyrzutni jest wynikiem wzrostu lub zmniejszania powierzchni emisyjnej katody wskutek zmiany jej położenia w otworze elektrody sterującej (rys. 4.4). Stwierdzono, że na rozmiary tej powierzchni ma również wpływ potencjał elektrody sterującej (rys. 4.3). Kompensację skutków dylatacyjnego ruchu elektrod można więc w znacznym stopniu uzyskać przez odpowiednią zmianę wartości U_{ES} współbieżnie z przemieszczaniem się katody Δz . Efekty stosowania takiej kompensacji przedstawiono na rys. 7.7 oraz rys. 7.8.



Rys. 7.7. Parametry rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej w zależności od położenia katody w otworze elektrody sterującej przy stabilizacji mocy P_a na poziomie 0,4 kW (1) oraz 1 kW (2) drogą zmian napięcia elektrody sterującej oraz bez stabilizacji (3) przy $U_{ES} = 0$; $U_a = 20$ kV, $z = 114$ mm

Na rys. 7.7 pokazano zmianę parametrów rozkładu gęstości mocy wiązki niezogniskowanej w granicach rzeczywistych zmian Δz w przypadku stabilizacji P_a drogą zmian napięcia elektrody sterującej oraz, dla porównania, bez stabilizacji. Podobne zależności zmiany parametrów kształtu spiny w funkcji Δz pokazano na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Parametry kształtu spiny w zależności od położenia katody w otworze elektrody sterującej przy stabilizacji mocy P_a na poziomie 0,5 kW (1) i 1 kW (2) drogą zmian napięcia elektrody sterującej oraz bez stabilizacji (3) przy $U_{ES} = -50$ V; $U_a = 25$ kV

Jak widać, nie uzyskano tu kompensacji idealnej, jednakże parametry zarówno rozkładu ϕ jak i kształtu spiny zmieniają się w znacznie mniejszym stopniu niż bez stosowania stabilizacji. Należy jednak podkreślić, że metoda ta nie wymaga zmian konstrukcyjnych wyrzutni czy też dodatkowego oprzyrządowania i jak widać

z przytoczonych przykładów, może być stosowana w stosunkowo dużym zakresie zmian Δz .

7.3.2. Stabilizacja zmian wolnych

Stabilizację zmian wolnych prądu wiązki można najprościej uzyskać poprzez stabilizację prądu zasilacza anodowego. W tym celu wykorzystuje się sygnał różnicowy z szeregowo załączonego rezystora i regulowanego źródła odniesienia. Sygnał ten doprowadzony do zasilacza elektrody sterującej zapewnia zawsze odpowiednią wartość napięcia wyjściowego, niezbędną do utrzymania stałej wartości prądu I_a .

8. WPLYW PÓL ZAKŁÓCAJĄCYCH NA WIĄZKĘ I SPOINĘ

Podczas eksploatacji spawarki WS-2/30 zaobserwowano pewne anomalie, polegające na pojawianiu się okresowych zmian głębokości i kształtu lica spoiny. Efekty te występowały wyraźnie przy dużych szybkościach spawania, rzędu kilku m/min i związane były z drganiami wiązki spawającej. Przykłady kształtów lica spoin otrzymanych przy kierunku spawania prostopadłym bądź równoległym do kierunku drgań wiązki przedstawiono na rys. 1.3. W przypadku zgodności kierunków odchylenia WE i ruchu próbki względna prędkość spawania zmienia się tu znacznie powodując zróżnicowanie głębokości spoiny. Przekrój wzdłużny przez taką spoinę, w przypadku gdy prędkość ta zmieniała się od zera do $2 v_g$ pokazano na rys. 1.4.

Ponieważ zmiany głębokości i kształtu lica spoin występowały okresowo z częstotliwością bliską częstotliwości sieci, podjęto próbę wyjaśnienia zaobserwowanych anomalii oddziaływaniem zmiennych, zakłócających pól magnetycznych na WE.

Zmienne pola zakłócające można podzielić na:

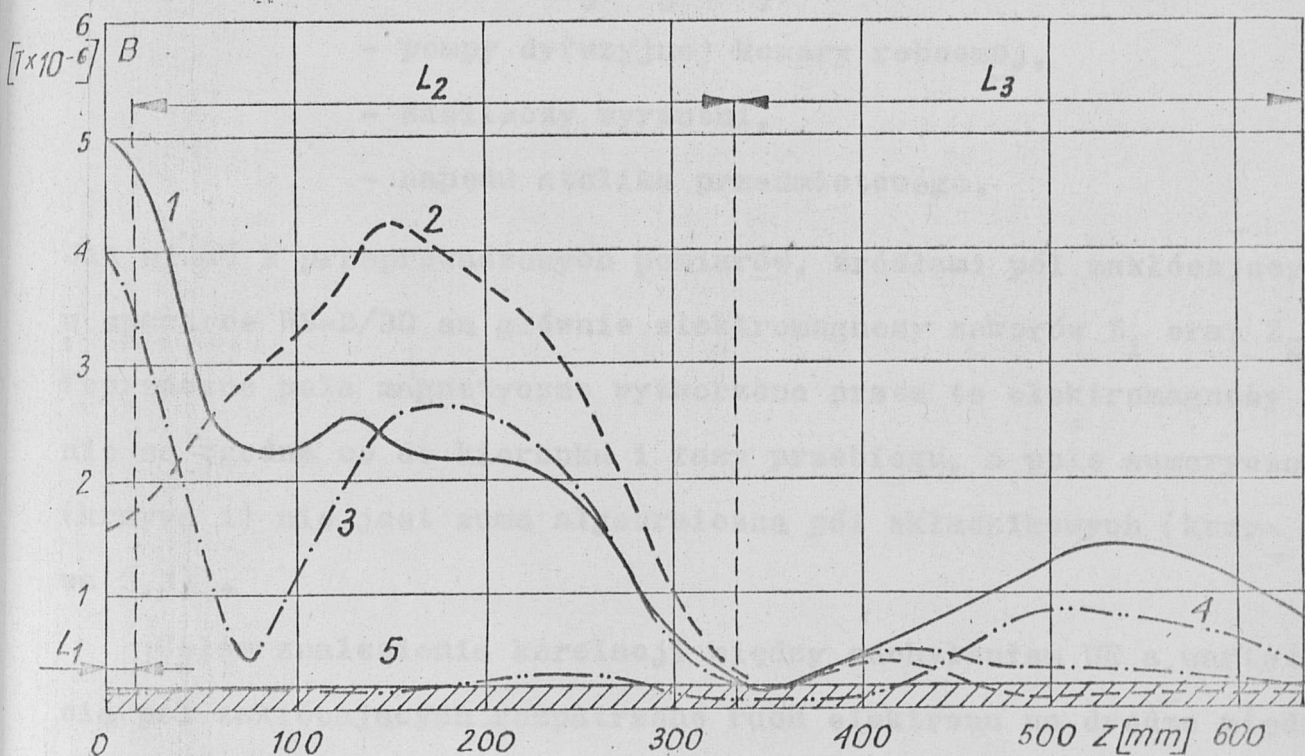
- pola magnetyczne zewnętrzne (PMZ), wytwarzane przez podzespoły zasilania, automatyki i sterowania spawarki oraz przez inne urządzenia znajdujące się w pobliżu,
- pola magnetyczne wewnętrzne (PMW), związane z przepływem prądów zasilania elektrod wyrzutni.

8.1. Oddziaływanie pól magnetycznych zewnętrznych

Celem określenia wpływu pól magnetycznych zewnętrznych na amplitudę drgań wiązki, w osi elektronooptycznej kolumny spawarki mierzono zmienne pola magnetyczne w kierunkach x i y . Pomiaru

dokonano fluksometrem z cewką o średnicy $\phi 10 \times \phi 19$ mm i rezystancji 7200Ω oraz zespołem elektronicznym zawierającym wzmacniacz, układ całkujący i miernik. Przyrząd ten umożliwił pomiar zmiennego pola magnetycznego od wartości około $5 \cdot 10^{-8}$ T.

Wyniki pomiarów posłużyły do obliczenia wypadkowych wartości indukcji magnetycznych w płaszczyznach prostopadłych do osi elektrooptycznej urządzenia. Chwilowe wartości maksymalne przebiegów PMZ, bez uwzględnienia kierunku oraz fazy, przedstawiono na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Zmienne pola magnetyczne poprzeczne do osi elektrooptycznej spawarki WS-2/30

Poszczególne przebiegi indukcji magnetycznej zmiennych pól poprzecznych do osi z odpowiadają następującym warunkom przeprowadzenia pomiarów:

- krzywa 1 - praca wszystkich podzespołów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania urządzenia,
- 2 - włączony jedynie elektromagnes siłownika zaworu Z_1 (oznaczenia na rys. 2.14) ,
- 3 - włączony jedynie elektromagnes siłownika zaworu Z_2 ,
- 4 - włączony jedynie grzejnik pompy dyfuzyjnej komory wyrzutni,
- 5 - poziom, poniżej którego leżą krzywe przedstawiające pole magnetyczne przy oddzielnej pracy podzespołów:
- zaworu Z_3 ,
 - zaworów Z_5 , Z_6 i Z_7 ,
 - pompy dyfuzyjnej komory roboczej,
 - zasilaczy wyrzutni,
 - napędu stolika przedmiotowego.

Jak widać z przeprowadzonych pomiarów, źródłami pól zakłócających w spawarce WS-2/30 są głównie elektromagnesy zaworów Z_1 oraz Z_2 . Poprzeczne pola magnetyczne wytworzone przez te elektromagnesy nie są zgodne co do kierunku i fazy przebiegu, a pole sumaryczne (krzywa 1) nie jest sumą algebraiczną pól składnikowych (krzywa 2,3) .

Celem znalezienia korelacji między odchyleniem WE a wartością pól zakłócających rozpatrzono ruch elektronu na drodze między katodą wyrzutni a powierzchnią spawania w trzech wydzielonych obszarach (rys. 2.1) . Rozważania ograniczono wyłącznie do najprostszego przypadku rozpatrując wpływ pól zakłócających na tory elektronów poruszających się wzdłuż osi elektronooptycznej z zerowymi prędkościami początkowymi oraz zakładając dodatkowo, że:

- pole przyspieszające (E) działa jedynie w kierunku z ,

$$(E_x = 0, E_y = 0, E_z \neq 0) ,$$

- na elektron oddziałuje pole magnetyczne zmienne $B = B_0 \sin \omega t$, przy czym czas przelotu elektronu jest znacznie krótszy od okresu tej funkcji,
- pole magnetyczne posiada składową jedynie w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu elektronów ($B_z = 0$),
- rozkład pola elektrycznego wzdłuż osi z w obrębie wyrzutni jest taki jak w diodzie z ładunkiem przestrzennym i w dowolnym punkcie leżącym na osi w obszarze L_1 potencjał dany jest zależnością

$$U(z) = U_a \left(\frac{z}{L_1} \right)^{4/3} \quad (8.1)$$

Przyjęte założenia pozwalają na uzyskanie stosunkowo prostych rozwiązań ruchu elektronów. Tok wyprowadzenia wzorów określających odchylenie R wiązki elektronowej od osi elektronooptycznej w płaszczyźnie spawania zamieszczono w pracy [19], natomiast końcowe zależności zestawiono w tabeli 8.1. Pozwalają one na wyznaczenie odchylenia R ze znajomości geometrii układu (L_1, L_2, L_3), ogniskowej soczewki (f), napięcia przyspieszającego (U_a) oraz indukcji magnetycznej (B) pola zakłócającego, jednakże tylko dla przypadku, gdy pole to oddziałuje wyłącznie w jednym z wyodrębnionych obszarów. W przypadkach, gdy pole zakłócające występuje równocześnie w dwóch lub nawet w trzech obszarach, zachodzi potrzeba wektorowego sumowania wyznaczonych odchyleń cząstkowych. W tabeli 8.1 podano również wzory umożliwiające wyznaczenie odchyleń R w przypadku, gdy PMZ oddziałuje na wiązkę w ograniczonej strefie obszaru L_2 o długości l_2 bądź w strefie obszaru L_3 o długości l_3 . Symbolami L_2' oraz L_3'

oznaczono tu odległości środków stref l_2 i l_3 odpowiednio od płaszczyzny głównej soczewki i od płaszczyzny spawania.

Tabela 8.1

	Obszar oddziaływania PMZ	Odchylenie toru elektronu w płaszczyźnie spawania
1	L_1	$R = - \frac{3}{4} \frac{\sqrt{\eta}}{\sqrt{2}} \frac{B}{\sqrt{U_a}} L_1 (L_1 + \frac{4}{3}L_2) \left 1 - L_3 \frac{L_1 + \frac{4}{3}L_2 - \frac{4}{3}f}{f L_1 + \frac{4}{3}f L_2} \right $
2	L_2	$R = - \frac{\sqrt{\eta}}{2\sqrt{2}} \frac{B}{\sqrt{U_a}} L_2^2 \left 1 - L_3 \frac{L_2 - 2f}{f L_2} \right $
3	L_2 w strefie l_2	$R = - \frac{\sqrt{\eta}}{\sqrt{2}} \frac{B}{\sqrt{U_a}} l_2 L_2' \left 1 - L_3 \frac{L_2' - f}{L_2' f} \right $
4	L_3	$R = - \frac{\sqrt{\eta}}{2\sqrt{2}} \frac{B}{\sqrt{U_a}} L_3^2$
5	L_3 w strefie l_3	$R = - \frac{\sqrt{\eta}}{\sqrt{2}} \frac{B}{\sqrt{U_a}} l_3 L_3'$

$\eta = \frac{e}{m}$

W tabeli 8.2 podano przykładowo wartości indukcji magnetycznej powodujące odchylenie toru elektronu w płaszczyźnie spawania o 0,1 mm, 0,5 mm i 1 mm dla przypadku, gdy pole to oddziałuje bądź w jednym z wyodrębnionych obszarów (kolumny 2, 3, 4), bądź też wzdłuż całej drogi przelotu (kolumna 5). Obliczenia wykonano podstawiając do wyprowadzonych wzorów parametry konstrukcyjne spawarki WS-2/30 oraz napięcie przyspieszające $U_a = 25$ kV,

a także ogniskową soczewki $f = 174,4$ mm, wyliczoną dla prądu I_0'' opt z zależności 4.3. Jak widać, decydujący wpływ na wypadkowe odchylenie WE wywierają pola zakłócające występujące w obszarach oddziaływania L_2 i L_3 ,

Tabela 8.2

Odchylenie	O b s z a r y			Katoda - próbka
	L_1	L_2	L_3	
1	2	3	4	5
0,1 mm	$61,1 \times 10^{-6} T$	$0,9 \times 10^{-6} T$	$1,18 \times 10^{-6} T$	$0,55 \times 10^{-6} T$
0,5 mm	$305,5 \times 10^{-6} T$	$4,5 \times 10^{-6} T$	$5,92 \times 10^{-6} T$	$2,75 \times 10^{-6} T$
1 mm	$61,10 \times 10^{-6} T$	$9,0 \times 10^{-6} T$	$11,84 \times 10^{-6} T$	$5,5 \times 10^{-6} T$

W tabeli 8,3 zestawiono średnie wartości indukcji magnetycznej PMZ zmierzone w poszczególnych obszarach spawarki WS-2/30 i wyliczone odchylenie R na podstawie zależności z tabeli 8.1. Odchylenie to określono uwzględniając kierunek oddziaływania pola w każdym obszarze, a także skrócenie torów elektronów przy przejściu wiązki przez obszar pola magnetycznego soczewki. W tabeli 8.3 podano także rzeczywiste odchylenie wiązki, spowodowane wpływem pól magnetycznych zewnętrznych (R_a na rys. 8.6).

Tabela 8.3

Indukcja pola zakłócającego zewnętrznego, średnio w obszarze			Odchylenie wiązki, R	
L_1	L_2	L_3	obliczone	zmierzone
$4,85 \times 10^{-6} T$	$2,14 \times 10^{-6} T$	$0,85 \times 10^{-6} T$	0,30 mm	0,35 mm

Porównanie zmierzonych odchyień z odchyleniami wyznaczonymi na podstawie wzorów wykazuje zadawalającą zbieżność otrzymanych wyników i potwierdza tym samym prawidłowość przyjętej interpretacji zaobserwowanych anomalii. Występujące różnice odchyień wynikać mogą zarówno z przyjętych założeń upraszczających jak i z trudności związanych z wyznaczaniem pól zastępczych.

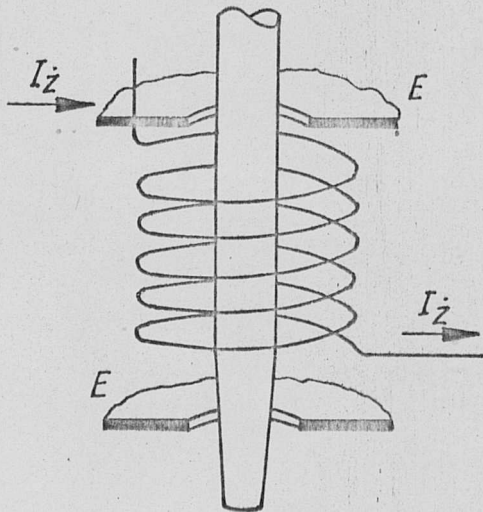
Wzory określające wpływ PMZ na odchylenie wiązki mają charakter ogólny i mogą być z powodzeniem wykorzystane do wyznaczenia poziomu zakłóceń, gwarantującego jeszcze poprawną pracę urządzeń elektronowiązkowych w zależności od dopuszczalnych drgań wiązki w płaszczyźnie obróbki. Opracowaną metodę wyznaczenia odchyień można rozwinąć i dostosować do bardziej rozbudowanych układów elektronooptycznych.

8.2. Oddziaływanie pól magnetycznych wewnętrznych

Pola magnetyczne wewnętrzne związane są ściśle z typem i geometrią źródła elektronów stosowanego w urządzeniu elektronowiązkowym. Możliwe są zatem rozważania nad wpływem PMW jedynie w odniesieniu do konkretnej konstrukcji wyrzutni.

Badania wpływu pól magnetycznych wewnętrznych na wiązkę przeprowadzono wykorzystując typową wyrzutnię (rys. 2.13 B) zawierającą katodę w postaci wolframowego pręta, który jest nagrzewany przez bombardowanie elektronami emitowanymi ze spiralnej katody pomocniczej. Prąd płynący przez tę spiralę jest źródłem PMW. Na rys. 8.2 pokazano kształt katody pomocniczej i jej usytuowanie w węźle katodowym. Parametry geometryczne tej katody są następujące:

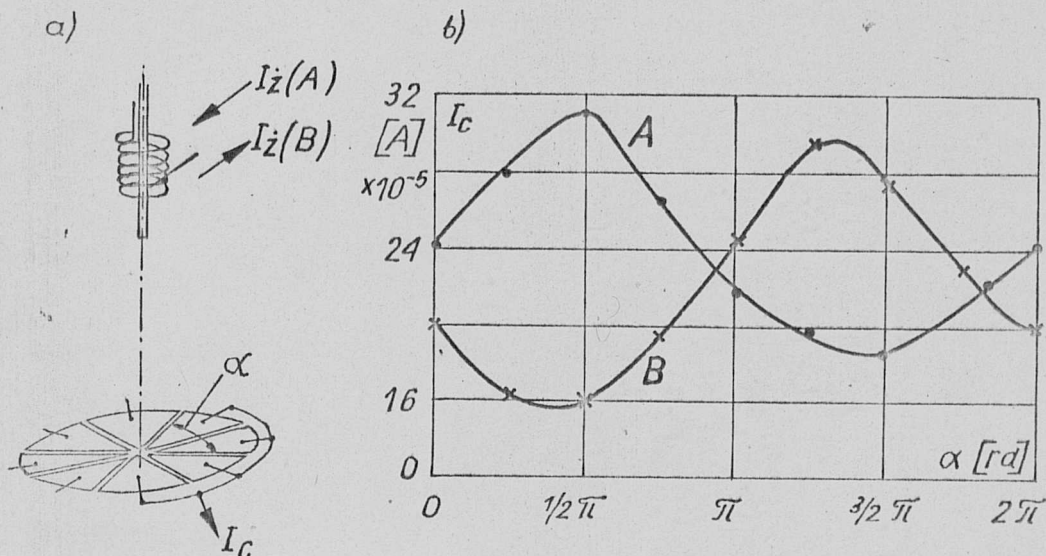
- skok linii śrubowej - 1 mm
- liczba zwojów - 5,5
- średnica drutu - 0,3 mm
- średnica wewnętrzna - 6 mm
- długość doprowadzenia prądowego dolnego (licząc od osi katody) - ok. 11 mm
- długość doprowadzenia prądowego górnego - ok. 1 mm.



Rys. 8.2. Zespół katod wyrzutni; E - ekran cieplny

Badanie oddziaływania prądu żarzenia katody pomocniczej na wiązkę elektronową przeprowadzono przy użyciu kolektora składającego się z ośmiu jednakowych płytek, odizolowanych od siebie (rys. 8.3a) . Płytki łączono kolejno tworząc półpłaszczyznę „obracającą się” skokowo o kąt α co $\pi/4$ wokół osi z. Zależność prądu kolektora (czterech połączonych płytek) od kąta „obrotu” α przedstawiono na rys. 8.3 b . Pomiarów te przeprowadzono dla dwóch kierunków przepływu stałego prądu żarzenia katody pomocniczej. Jak widać pole magnetyczne związane z prze-

plywem tego prądu powoduje wyraźne odchylenie wiązki, przy czym kierunek odchylenia zależy od kierunku przepływu prądu I_z .



Rys. 8.3. Wzajemne usytuowanie kolektora i katody pomocniczej (a), oraz zależność prądu kolektora od kąta α dla dwóch kierunków prądu katody pomocniczej (b). Kolektor umieszczono w płaszczyźnie $z = 176$ mm, $I_z = 8,3$ A, $U_a = 20$ kV

Bezpośredni pomiar drgań WE spowodowanych wpływem jedynie zmiennych PMW jest trudny ze względu na jednoczesne oddziaływanie PMZ. Także technicznie trudny jest pomiar pola magnetycznego w pobliżu pracującej wyrzutni. Pole to można wyznaczyć natomiast ze znanych zależności jako superpozycję trzech pól, a mianowicie pola wytworzonego przez przewodnik w kształcie linii śrubowej [29] oraz dwóch pól wytworzonych odpowiednio przez dwa prostoliniowe odcinki doprowadzeń prądowych. Wpływ PMW na końcowe odchylenie wiązki elektronowej wyznaczone, podobnie jak w przypadku PMZ, rozwiązując równanie ruchu elektronów w nałożonych polach elektrycznym i magnetycznym [19]. Dla

przypadku spawarki WS-2/30 pracującej przy napięciu 25 kV otrzymano zależność:

$$R = 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot I_{a\dot{z}} \text{ [m]} \quad (8.2)$$

określającą wpływ amplitudy prądu żarzenia ($I_{a\dot{z}}$) na wartość odchylenia WE w płaszczyźnie spawania. Z zależności tej wynika, że przy szczytowej wartości prądu żarzenia 12,7 A ($I_z = 9 \text{ A}$) maksymalne odchylenie wiązki spowodowane wyłącznie PMW wynosi ok. 0,2mm.

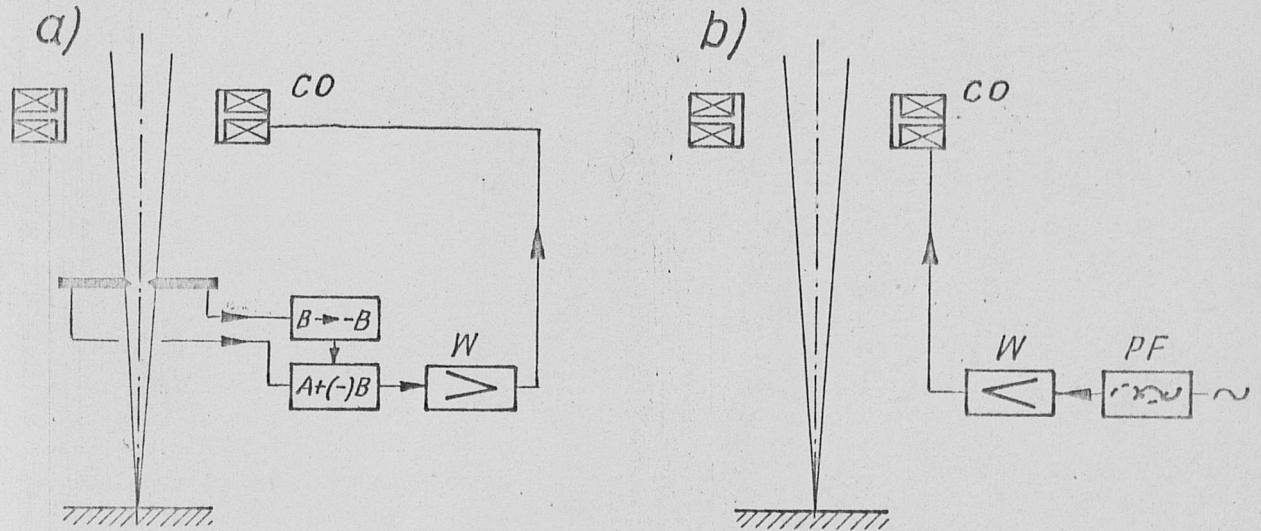
8.3. Przeciwdziałanie oddziaływaniu pól zakłócających na wiązkę elektronową

Z przeprowadzonych badań wynika, że w rozpatrywanym przykładzie spawarki WS-2/30 wpływ PMZ i PMW na drgania wiązki elektronowej, a tym samym również na kształt otrzymywanych spoin jest na tyle duży, że wymaga zastosowania pewnych środków zaradczych.

Jednym ze sposobów przeciwdziałania niepożądanym odchyleniom wiązki jest kompensacja skutków oddziaływania pól zakłócających. Kompensację uzyskuje się poprzez wprowadzenie dodatkowego pola, które odchyła WE tak, aby była ona nieruchoma w płaszczyźnie spawania.

Kompensacja dynamiczna polega na realizacji pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego w układzie: - analizator odchylenia - - układ sumujący - wzmacniacz - pole kompensujące (cewki odchylające) - wiązka elektronowa - analizator odchylenia. Schemat ten podano na rys. 8.4 a. Jako analizatora odchylenia do reali-

zacji kompensacji dynamicznej zastosowano czujnik z dwoma przeciwnymi prętami wolframowymi usytuowanymi w płaszczyźnie, w której odchylana jest wiązka. Pręty te wnikając w obszar wiązki na niewielką głębokość przechwytyują część jej prądu.



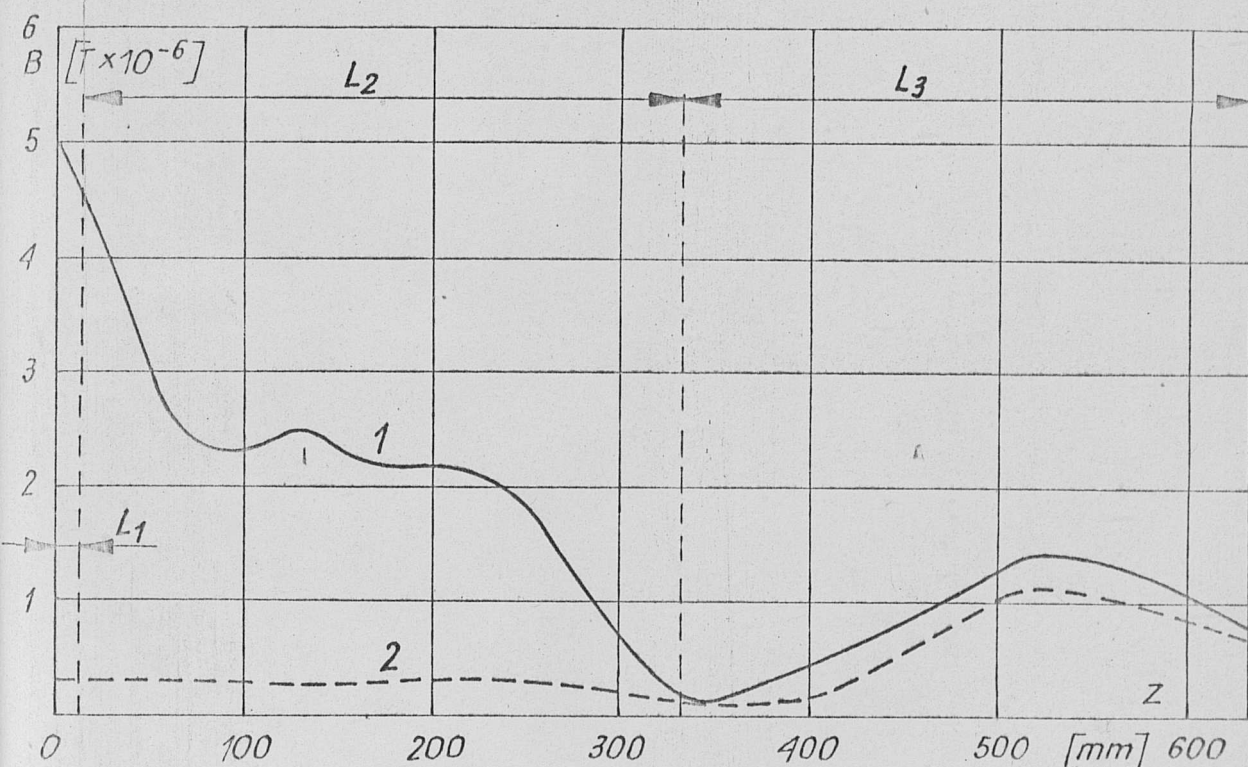
Rys. 8.4. Dynamiczna (a) oraz statyczna (b) metoda kompensacji drgań wiązki; CO - cewki odchylające, W - wzmacniacz, PF - przesuwnik fazy

W przypadku drgań WE prądy w obu ramionach analizatora (sygnały A i B) są w fazach przeciwnych. Analizowane sygnały po odpowiednim przetworzeniu oddziałują na wiązkę elektronową poprzez zmienne pole odchylające. Istotną wadą metody jest konieczność zastosowania dodatkowego oprzyrządowania wprowadzanego do komory roboczej spawarki.

W przypadku, gdy odchylenie wiązki jest spowodowane polem zakłócającym o stałej amplitudzie i częstotliwości, możliwa jest kompensacja drgań WE poprzez wprowadzenie dodatkowego pola o zadanych parametrach. Sposób ten nazwano kompensacją statyczną (rys. 8.4 b). Kompensacja statyczna wymaga doświadczalnego do-

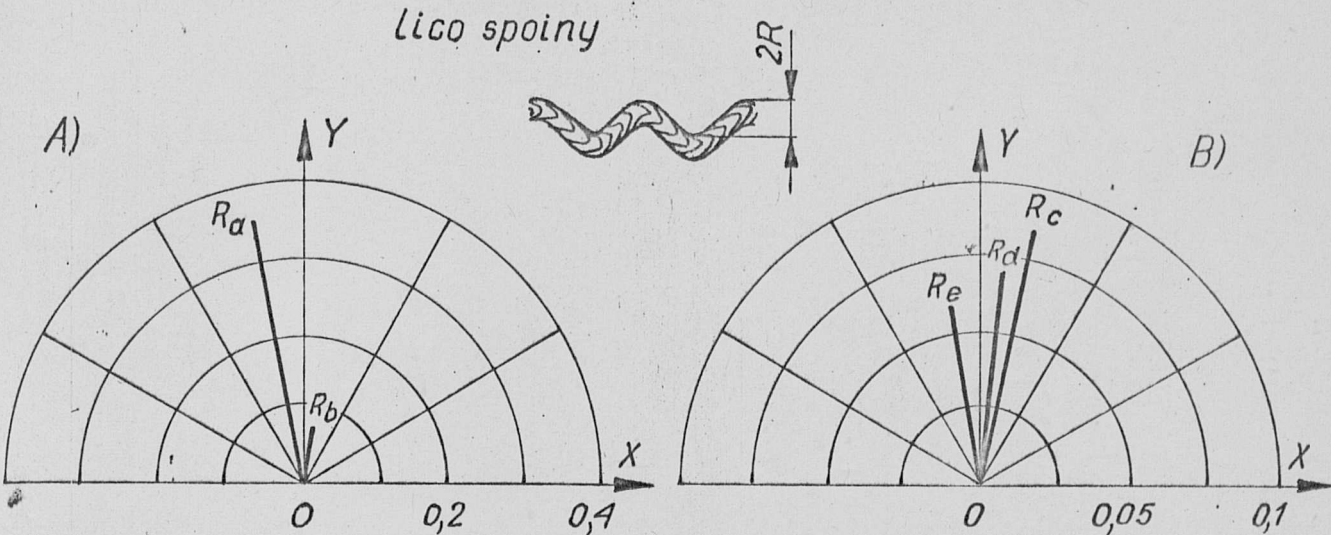
boru pola kompensującego dla określonych warunków spawania.

Z analizy zmiennych pól, poprzecznych do osi elektronooptycznej spawarki WS-2/30 wynika, że źródłami PMZ o największej wartości są elektromagnesy zaworów Z_1 i Z_2 . Elektromagnesy te zasilono prądem stałym. W efekcie uzyskano znaczne obniżenie wartości indukcji magnetycznej w kierunku prostopadłym do osi wiązki (rys. 8.5), przy czym pole to mierzono przy pracy wszystkich podzespołów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania



Rys. 8.5. Zmienne pola magnetyczne poprzeczne do osi kolumny spawarki WS-2/30 przy zasilaniu zaworów Z_1 i Z_2 prądem przemiennym (1) oraz stałym (2)

urządzenia. Na rys. 8.6 A przedstawiono kierunek i wartość odchylenia wiązki w płaszczyźnie spawania w przypadku zasilania zaworów Z_1 i Z_2 bądź prądem przemiennym (odcinek R_a) bądź stałym (R_b). Jak widać, w sposób znaczny obniżono poziom PMZ a w konsekwencji drgania wiązki elektronowej.



Rys. 8.6. Odchylenie wiązki R w płaszczyźnie spawania urządzenia WS-2/30 wskutek: A - oddziaływania PMZ, B - oddziaływania PMW; zawory Z_1 i Z_2 zasilano prądem przemiennym (a) oraz stałym (b,c,d,e), katodę pomocniczą wyrzutni żarzoną prądem przemiennym (c) oraz stałym (a,b,d), zastosowano wyrzutnię z katodą bezpośrednio żarzoną (e); $U_a = 25$ kV

Oddziaływanie pól zakłócających, a następnie skutki kompensacji obserwowano oceniając wygląd lica spoiny i opisano zależnością:

$$K = \frac{R_0 - R_1}{R_0} \cdot 100\% \quad (8.3)$$

gdzie R jest odchyleniem wiązki w płaszczyźnie spawania (rys. 8.6) bez kompensacji (o) oraz z kompensacją (1). Wartości współczynnika K, jakie otrzymano po seriach prób stosując metodę kompensacji dynamicznej lub statycznej, oraz w przypadku zasilania zaworów Z_1 i Z_2 prądem stałym zamieszczone w tabeli 8.4.

Wpływ PMW na wiązkę elektronową można ograniczyć przez:

- żarzenie katody prądem stałym,
- zastosowanie kompensacji drgań wiązki, lub
- taką konstrukcję katody, aby pole magnetyczne wytworzone

przez przepływ prądu żarzenia nie oddziaływało szkodliwie na wiązkę.

Tabela 8.4

	K
Metoda kompensacji dynamicznej	96%
Metoda kompensacji statycznej	85%
Zasilanie zaworów Z_1, Z_2 prądem stałym	80%

Katoda, w której wymuszono symetrycznie-osiowy przepływ prądu jest katoda bezpośrednio żarzona w formie krzyża (rys. 2.13c) [20]. Na rys. 8.6 B przedstawiono wartość i kierunek odchylenia wiązki w płaszczyźnie spawania przy zastosowaniu wyrzutni z taką katodą (R_e), a także wyrzutni z katodą pośrednio żarzoną, w przypadku żarzenia katody pomocniczej prądem stałym (R_d) bądź prądem przemiennym (R_o). Przy żarzeniu katody pomocniczej prądem stałym, drgania WE wynikają z istnienia PMZ, natomiast przy żarzeniu prądem przemiennym obserwowany efekt jest sumą oddziaływań PMZ oraz PMW. W przypadku, gdyby oba typy zakłóceń były zgodne co do fazy i kierunku, różnica między długościami odcinków R_o i R_d odpowiadałaby skutkom wpływu PMW. Należy się tu jednak liczyć z możliwością częściowej wzajemnej kompensacji wpływu rozpatrywanych zakłóceń na położenie wiązki elektronowej wskutek niespełnienia warunku zgodności faz. Zastosowanie wyrzutni z katodą bezpośrednio żarzoną o odpowiedniej konstrukcji (rys. 2.13 c) powoduje ograniczenie odchylenia wiązki, przy czym efekt minima-

lizacji drgań jest tu podobny jak w przypadku żarzenia katody pomocniczej prądem stałym.

Przy pomiarach parametrów wiązki i wykonywaniu spoin zawory Z_1 oraz Z_2 w spawarce WS-2/30 a także katodę pomocniczą wyrzutni pomiarowej zasilano prądem stałym.

9. WNIOSKI KOŃCOWE

Doświadczenia w eksploatacji niskonapięciowych spawarek elektronowiazkowych wykazują, że głębokość otrzymywanych spoin nie w każdym przypadku jest proporcjonalna do całkowitej mocy P_a wiązki. Celem wyjaśnienia braku tej korelacji przeanalizowano rozkłady gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania oraz zależności między parametrami tego rozkładu i geometrią spoiny. W wyniku badań stwierdzono, że:

efekty spawania zależą nie tylko od całkowitej mocy doprowadzonej do wykonywanej spoiny, czy też od energii dostarczonej na jednostkę długości spoiny, ale również od rozkładu gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania.

Zależności te formułuje następujące wyrażenie (wzór 6.8) :

$$h \cdot b = n \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot P_a \quad (9.1)$$

gdzie h i b są odpowiednio głębokością i szerokością spoiny (rys. 1.1), natomiast współczynniki n_1 i n_2 (wzory 6.5 i 6.6) ujmują ilościowe zależności między parametrami gęstości mocy i kształtu spoiny. Wartości tych współczynników są zależne od napięcia przyspieszającego, prędkości spawania i fizycznych właściwości metalu, a także w miarę zmniejszania energii wiązki - w coraz większym stopniu od mocy. O stopniu użyteczności wiązki elektronicznej do wykonywania głębokich spoin decyduje współczynnik n . Jego wartość wzrasta w miarę wzrostu napięcia przyspieszającego do wartości bliskiej jedności w przypadku wiązek wysokoenergetycznych. Wartość współczynnika n jest związana

z rozkładem gęstości mocy wiązki. Stwierdzono, że rozkład gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania zależy w istotny sposób od geometrii i parametrów zasilania wyrzutni oraz parametrów układu elektronooptycznego odwzorowującego pozorną źrenicę elektronooptyczną.

Rozkład ten jest zdeterminowany kształtem i wielkością powierzchni emisji katody. Powierzchnia emisji katody pracującej w stałej temperaturze może ulegać zmianom w wyniku zmian:

- położenia katody w otworze elektrody sterującej,
- napięcia elektrody sterującej, oraz
- napięcia przyspieszającego.

W przypadku katody prętowej korzystniejszy kształt wiązki uzyskuje się jeżeli elektrony emitowane są jedynie z płaskiej powierzchni czołowej katody. Rozkład gęstości mocy jest wówczas mniej „rozmyty” (rozdz. 4.2.1) a wartość współczynnika n w wyrażeniu 9.1 wzrasta i bardziej jednoznaczne stają się korelacje między parametrami rozkładu gęstości mocy i kształtem spoiny.

Jak należało oczekiwać, stwierdzono silną zależność rozkładu gęstości mocy wiązki (rys. 4.14) oraz geometrii spoiny (rys. 5.4) od wartości prądu soczewki magnetycznej. Zauważono także, że korzystniejszy kształt spoiny otrzymuje się w przypadku zbliżania spawanego przedmiotu do soczewki (rys. 5.7) .

W wyniku pomiarów stwierdzono, że:

rozkład gęstości mocy wiązki może ulegać okresowym lub ciągłym deformacjom w wyniku niestabilnej pracy wyrzutni oraz skutkiem oddziaływania zmiennych pól zakłócających.

Fluktuacje te mogą w znacznym stopniu utrudniać prawidłową eksploatację spawarki. Z tego też względu podjęto prace mające na celu określenie źródeł tych fluktuacji oraz przeciwdziałanie występującym deformacjom. Opracowano więc i zbadano skuteczność metod stabilizacji rozkładów gęstości mocy spowodowanych powyższymi zakłóceniami (rozdz. 7.3 oraz 8.3). Stwierdzono zadawalające efekty stabilizacji a w przypadku spawarki WS-2/30 źródła pól zakłócających zlokalizowano i w znacznym stopniu wyeliminowano.

W trakcie prac zmierzających do określenia wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych i zasilania na rozkład gęstości mocy i kształt spoiny

- opracowano metodę pomiaru rozkładu gęstości mocy wiązki (rozdz. 2.2.2),
- skonstruowano specjalistyczne stanowisko badawcze (rozdz. 2.2.3), a także
- opracowano konstrukcję wyrzutni, w której przepływ prądu żarzenia katody nie powoduje drgań wiązki (rys. 2.13 c, rozdz. 8.3).

Autor ma nadzieję, że wyniki badań i analiz zamieszczone w niniejszej pracy przyczynią się do właściwej eksploatacji krajowych spawarek elektronowiązkowych i dalszego rozwoju tej dziedziny technologii.

SPIS LITERATURY

- 1 Akop'janc K.S., Zubčenko Ju. V., Lokšin V.E., VI Vsesojuznaja Konf. po elektronolučевой svarke, Moskva 1977, s 9-14
- 2 Arata Y., Abe E., Nabegata E., Fujisawa M., 2-nd C.I.S.F.F.E., Avignon, 1978, s 13-28
- 3 Arata Y., Tomie M., Terai K., Nagai H., Hattori T., 6-th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, San Francisco, 1974, s 377-398
- 4 Barwicz W., Zastosowanie wiązek elektronowych w przemyśle i w badaniach naukowych, OBREP, Warszawa 1974
- 5 Barwicz W., Mulak A., Szymański H., Zastosowanie optyki elektronowej, WKiŁ, Warszawa, 1969
- 6 Bas E.B., Cremosnik G., 1-st International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Toronto, 1964, s 108-132
- 7 Bas E.B., Cremosnik G., Lerch H., Schweizer Archiv., Marz, 1962, s 112-121
- 8 Bas E.B., Cremosnik G., Lerch H., Winkler O., Gmeiner O., 1-st International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Toronto, 1964, wyd. w jęz. ros. s 369-390
- 9 Bašenko V.V., Petrov G.L., Avtomatičeskaja Svarka, 1977, s 23-27

- 10 Czapla K., Detka A., Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, 14, 1975, s 265-270
- 11 Dumonte P., Sayegh G., Vignau J.F., Sciaky, 5, 1973, s 71-76
- 12 Dvorkin I.I., Ledovskoj V.P., Žurnal Techničeskoj Fiziki, 47, 6, 1977, s 1187-1189
- 13 Espe W., Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik, DVW, Berlin, 1960
- 14 Felba J., Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, 11, 1974, s 17-31
- 15 Felba J., Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, 14, 1975, s 91-97
- 16 Felba J., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 72, 1975
- 17 Felba J., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 176, 1978
- 18 Felba J., Friedel K., Hałas A., Kirczuk C., Psiuk J., Sarnowski W., Smardz S., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 183, 1978, s 1-10
- 19 Felba J., Hałas A., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 103, 1976
- 20 Felba J., Kałat B., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 73, 1975

- 21 Felba J., Kirczuk C., Prasoł H., Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, 14, 1975, s 123-129
- 22 Fletcher M.J., Welding and Metal Fabrication, August 1971, s 298-301
- 23 Friedel K., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, praca doktorska, 1974
- 24 Friedel K., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, raport, 126, 1977
- 25 Friedel K., Hałas A., Prace Naukowe Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, 4, 1970, s 39-61
- 26 Gabowić M.D., Kovalenko V.P., Metallov O.A., Nazarenko O.K., Pac'ora S.K., Žurnal Tehničeskoj Fiziki, 44, 7, 1974, s 1956-1957
- 27 Harker K.J., Journ. of Appl. Phys., 28, 11, 1957, s 1354-1357
- 28 Jüptner W., Bödecker V., Sepold G., 6-th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, San Francisco, 1974, s 366-376
- 29 Kałat B., Prace Ośrodka Badawczo - Rozwojowego Techniki Telewizyjnej, 1, Warszawa 1977, s 67-74
- 30 Konkol P.J., Smith P.M., Willebrand C.F., Connor L.P., Welding Journal, November, 1971, s 765-776
- 31 Lawrence G.S., 5-th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Houston 1972, s 354-371

- 32 Ledovskoj V.P., Pis'ma v Žurnal Techničeskoj Fiziki, 1, 5, 1975, s 224-227
- 33 Lubin B.T., Welding Research Supplement, March, 1968, s 140-144
- 34 Maternia Z., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, praca doktorska, 1978
- 35 Mladenov G.M., International Conference on Electrode Phenomena in Gas Discharges, Bucarest, 1974
- 36 Mokrauz I., Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, praca doktorska, 1976
- 37 Moss H., Narrow Angle Electron Guns and Cathode Ray Tubes, Academic Press, New York, London, 1968
- 38 Munakata C., Honda Y., Miura Y., Int. J. Electronics, 33, 2, 1971, s 209-216
- 39 Noller F., Mayer H.G., DVS - Berichte, Strahltechnik VIII, 44, 1977, s 29-34
- 40 Okuda T., Ohmine M., Ueyama Z., Yasunaga S., Sasaki S., 2-nd International Colloquium of Electron Beam Welding and Melting, Avignon, 1978
- 41 Paszkowski B., Optyka elektronowa, WNT, Warszawa, 1965
- 42 Sanderson A., British Welding Journal, October 1968, s 509-523
- 43 Sandstrom D.J., 5-th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Houston, 1972, s 341-353

- 44 Sandstrom D.J., Buchen J.F., Hanks G.S., *Welding Journal*, 1970, s 293s - 300s
- 45 Schiller S., Heising U., Jäsch G., *Schweisstechnik*, 4, 1970
- 46 Septier A., *Focusing of Charged Particles*, 1, Academic Press, New York, 1967, s 309-352
- 47 Siekman J.G., Schoenmakers T.M., Eindhoven K.N., Torre D., *Journal of Physics*, E, 8, 1975, s 391-395
- 48 Tong H., Giedt W.H., Hong Z., 5-th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Houston, 1972, s 321-340
- 49 Wiesner P., *ZIS - Mitteilungen*, 14, 1, 1972, s 36-42
- 50 Zatyka H., *Spawanie wiązką elektronów*, WNT, Warszawa, 1968

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	* N *	MNSzWiT.A.N								1.6.0.8	
	Rozpocz. pr.	Zakończ. pr.	Opubl. pr.		Instytut			Nr tematu.			
	0 5 7 4	0 5 7 9			I, 2, 5			1 2 3 11		04	
Nr zlecenia.		Nr archiwalny									
		I, 2, 5 / P - 0 1 2 779								*	
Symbol UKD. 621.791.72		spawanie elektronowe							79; Inst. Technol. Elektron. PWr MNSzWiT pol.		

Opis bibliograficzny.

Felba Jan

Wpływ parametrów wiązki elektronowej na kształt spoin otrzymanych

w niskonapięciowych spawarkach elektronowych.

Raporty Inst. Technol. Elektron. PWr 1979

ser. PRE nr 11

111 s. 16 rys. 7 tabl. 50 wyk. 4 fot.

bibliogr. 50 poz. /maszyn. powiel./

Rozprawa doktorska

Politechnika Wrocławska, Instytut

Technologii Elektronowej, Wrocław

promotor: doc. dr inż. Andrzej Hałas

Charakter pracy: stosowana

Rozpowszechnianie:

Materiały odpłatne: A

-

Analiza dokumentacyjna

⟨D⟩ W pracy przedstawiono wyniki badań nad zależnościami kształtu spoin wykonanymi w niskonapięciowej spawarce elektronowej od parametrów wiązki elektronowej oraz pewnych parametrów zasilania.

Stwierdzono, że :

- efekty spawania zależą od rozkładu gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania ,
- rozkład gęstości mocy wiązki w płaszczyźnie spawania zależy w istotny sposób od geometrii i parametrów zasilania wyrzutni oraz parametrów układu elektronoptycznego ,
- rozkład gęstości mocy wiązki może ulegać okresowym lub ciągłym deformacjom w wyniku niestabilnej pracy wyrzutni oraz skutkiem oddziaływania zmiennych pól zakłócających .

Imię i Nazwisko autora analizy

Jan Felba


Słowa kluczowe

⟨S⟩ wiązka elektronowa , wyrzutnia , spawanie elektronowiązkowe , spoina

**0480*00*

⟨A⟩ _____ *B. _____ *C. _____ *D. _____

*E _____ *F _____ *G _____ *H _____ ←←

Tylko PRL	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Dokumentacji
NIE	TAK	2TAK				
Wpisać TAK lub NIE						