ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

MECHANIKA

Z. 64
GLIWICE
1977

SPIS TREŚCI

Str.

1. WPROWADZENIE I TEZA PRACY 3
2. CEL PRACY 5
3. WYKAZ OZNACZEŃ 6
4. PRZEGLĄD LITERATURY 8
4.1. Charakterystyka technologiczna procesu zgrzewania zwarciowego 8
4.2. Zgrzewalność stali stopowych 11
4.2.1. Zgrzewalność stali chromowych 11
4.2.2. Zgrzewalność stali chromoniklowych 12
4.2.3. Zgrzewalność stali szybkotnących 13
5. BADANIA WŁASNE 14
5.1. Sposób przeprowadzenia badań 14
5.1.1. Zaplanowanie doświadczenia i wybór kierunku przemieszczania do obszaru prawie optymalnego 14
5.1.2. Analiza jakości złączy zgrzewanych doczołowo zwarciowo . 21
5.1.3. Materiały użyte do badań 21
5.1.4. Zgrzewarki i układy pomiarowe użyte do badań 24
5.2. Zestawienie wyników badań 25
6. ANALIZA I OMÓWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW . . . 55
6.1. Analiza doświadczalnego badania i poszukiwania najlepszych parametrów zgrzewania 55
6.2. Zagadnienie zgrzewania stali stopowych na podstawie wyników badań 59
6.3. Podsumowanie 72
7. WNIOSKI 75
LITERATURA 77
STRESZCZENIA 80

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 535

IRYDION KUBISZYN

ANALIZA PARAMETRÓW ZGRZEWANIA ZWARCIOWEGO WYBRANYCH GATUNKÓW STALI WĘGLOWYCH I STOPOWYCH

PL ISSN 0434-0817

GLIWICE 1977

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Myśliwiec
Prof. dr hab. inż. Jan Węgrzyn

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Jan Darlewski

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Kazimiera Rymarz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 150+85 Ark. wyd. 3,45 Ark. druk. 5,1 Papier offsetowy kl. III. 70x100, 70 g
Oddano do druku 27.09 1977 Podpis do druku 14.11 1977 Druk ukończ. w grudniu 1977
Zam. 1257/77 Cena zł 9,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

1. WPROWADZENIE I TEZA PRACY

Zgrzewanie zwarciowe w porównaniu z innymi metodami zgrzewania oporowego jest stosunkowo skromnie opisane w światowej literaturze naukowej i technicznej. Istnieje pogląd, że jest to technologia łączenia, ustępująca innym metodom zgrzewania głównie z powodu niskiej jakości złączy, wywołanej obecnością wtrąceń niemetalicznych w zgrzeinie [1, 12, 13, 16, 24, 41, 68, 78, 45, 59].

Zgrzewanie zwarciowe jest odmianą zgrzewania doczołowego i przy spełnieniu podstawowych wymagań technologicznych jest pełnowartościową, a w pewnych przypadkach wprost niezastąpioną metodą łączenia, zwłaszcza w zastosowaniu do łączenia drutów, walcówki, np. dla potrzeb procesu ciągnienia [27, 42, 46, 47, 43, 78].

Opracowania zestawiane w literaturze dotyczą przede wszystkim zgrzewania zwarciowego stali węglowych o niskiej zawartości węgla [7, 13, 16, 22, 18, 17, 26, 31, 41, 52, 57, 60, 68, 78]. Odnośnie zgrzewania stali stopowych wyraźny jest brak szczegółowych opracowań, a informacje podawane w literaturze [5, 10, 9, 20, 42-48, 63, 64, 69] ograniczają się przeważnie do wzmianek i ogólnych sformułowań.

Podstawowe znaczenie dla dziedziny zgrzewania posiada opracowywanie tzw. optymalnych parametrów zgrzewania i temu problemowi poświęcono niniejszą pracę.

Zagadnienie optymalności badano nowymi i skuteczniejszymi metodami, opartymi na elementach teorii planowania eksperymentów [3, 11, 14, 28, 19, 49, 37, 38, 50, 39, 51, 53, 74, 75, 76, 77].

W doborze parametrów zgrzewania istotne znaczenie posiada doświadczenie ukierunkowane z uwagi na trudność równoczesnego określenia wpływu działania zmiennych procesu na jakość złącza i trudność efektywnego rozwiązania zagadnienia na drodze wyłącznie matematycznej - co przyjęto za tezę pracy.

Koncepcję prowadzonych badań oparto na niżej zestawionych założeniach:

- ograniczaniu niepewności poszukiwanego rozwiązania,
- adaptowaniu metod umożliwiających względnie szybką lokalizację quasioptimum, co równoznaczne jest z względnie szybkim przemieszczaniem się w kierunku odpowiedzi "optymalnej",
- procedurach poszukiwania ukierunkowanego, tj. takich, aby się przejawiały w nich równocześnie elementy analizy i syntezy,

- badaniach o charakterze modelowym, tzn. sprecyzowanych na tyle, by można było wyniki zaewidencjonować (obraz funkcji odpowiedzi może być początkowo niedoskonały, ale powinien istnieć jako źródło informacji),
- algorytmie poszukiwania, uwzględniającym równocześnie postulaty planowania eksperymentów i praktyki - odnośnie niezłożoności w jego zastosowaniu.

Pracę wykonano na podstawie badań własnych prowadzonych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach w Zakładzie Zgrzewania Metali.

2. CEL PRACY

Szereg rozwiązywanych w praktyce zadań polega na poszukiwaniu możliwie najlepszych rozwiązań. Współczesny poziom rozwoju nauki i techniki zobowiązuje badacza do stosowania nie tylko optymalnych metod rozwiązywania zadań technologicznych ale i optymalizacji sposobów uzyskiwania tych rozwiązań przy minimalnych stratach czasu i materiału. Sentencja ta w zasadzie składa się na cel pracy.

Zestawione wyniki pracy naświetlają zagadnienie zgrzewania zwarciowego z punktu widzenia technologicznego, a w powiązaniu z nowoczesnymi elementami teorii planowania eksperymentów (formalizującymi liczne działania eksperymentatora podczas analizy i badania tzw. powierzchni odpowiedzi) eksponują parametry zgrzewania, jako ten podstawowy zbiór wielkości poszukiwanych, niezbędnych dla każdej opracowywanej technologii zgrzewania.

Prowadzone badania oprócz aspektu poznawczego mają wypełnić istniejącą lukę w temacie zgrzewania zwarciowego stali stopowych.

Podstawowym celem pracy było przeanalizowanie zagadnienia poszukiwania najlepszych rozwiązań, wytypowanie skutecznej metody czynnego opracowywania optymalnych parametrów zgrzewania oraz opracowanie zoptymalizowanych parametrów zgrzewania drutów na zgrzewarkach zwarciowych produkcji krajowej z możliwością adaptacji ich na dowolne typy zgrzewarek zwarciowych pochodzenia zagranicznego.

Inne cele pracy, już o znaczeniu utylitarnym[1)], to usprawnienie i ułatwienie pracy technologowi przez stworzenie opracowania o charakterze źródłowym, umożliwiającym:

- ewentualną poprawę współczynnika efektywnego czasu pracy ciągarek,
- poprawę uzysku materiału,
- wzrost wydajności ciągarek wskutek eliminowania szeregu prac pomocniczych, związanych z rozpoczynaniem i zakańczaniem ciągnienia małych kręgów o masie 20-200 kg.

Z uwagi na asortyment badanych materiałów stopowych założono, że zgrzewanie prowadzone będzie na wsadzie (walcówka, półfabrykat) przed jego obróbką cieplną oraz bezpośrednio przed ciągarniami.

[1)] Wyniki pracy zostały wdrożone w Fabryce Śrub w Żywcu, w Hucie Baildon, mogą być wykorzystane w innych ciągarniach hut.

3. WYKAZ OZNACZEŃ

a_i - min z_i
b_i - max z_i } - zakresy zmienności czynników z_i

c - ilość obserwacji wykonanych w danym punkcie i

d - średnica drutu zgrzewanego, ilość członów liniowych równania regresji

F - statystyka zgodności Snedecora

G_{max} - obliczeniowa wartość maksymalnej jednorodności dyspersji

$G_{r1,r2}$ - tablicowe kryterium adekwatności

Hv - twardość w skali Vickerse'a

I - natężenie prądu zgrzewania, grupa zaczepu transformatora zgrzewarki

j - gęstość natężenia prądu zgrzewania

K - bezwymiarowy współczynnik ilorazu równoważników koncentracji niklu [Ni] do chromu [Cr]

k_1, k_2, k_3 - bezwymiarowe współczynniki rozkładu twardości w złączu zgrzewanym

l_1 - długość wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki

l_2 - naddatek długości na zgrzewanie

l_s - naddatek długości na spęczanie

l_{si} - naddatek długości na spęczanie pod prądem

l_{so} - naddatek długości na spęczanie bez prądu

N - ilość obserwacji wykonanych w doświadczeniu

P - siła docisku zgrzewania

P_n - plan doświadczenia n-czynnikowego

p - docisk spęczania lub zgrzewania

r_1, r_2 - stopnie swobody

R_s - rozstaw szczęk

$s^2(y)$ - wariancja doświadczenia

$s^2(\Theta i)$ - wariancja współczynnika regresji

$s^2(ad)$ - wariancja adekwatności

t_z - czas przepływu prądu zgrzewania

t_r - tablicowa wartość t - kryteria Studenta dla r = N-1 stopni swobody

U - udarność

W_k - położenie wyłącznika krańcowego nastawionego na zgrzewarce

X - obszar przestrzeni k-wymiarowej o współrzędnych znormalizowanych

X^TX - macierz informacyjna

x_i - kodowy symbol zmiennych

$\hat{Y}_b$ - wartość wyników badań obliczona z równania regresji

Y_b - wartość wyników badań wyznaczona doświadczalnie

Z - obszar przestrzeni k-wymiarowej o współrzędnych nieznormalizowanych

z_i - rzeczywista wartość czynnika

α - poziom ufności

Δ - tolerancja zmiany wartości parametru

Δ_i - krok przemieszczania po powierzchni odpowiedzi

Θ_i - współczynnik regresji liniowego przybliżenia

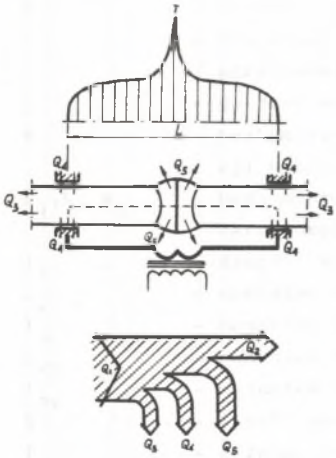
Θ_{kr} - krytyczna wartość współczynnika regresji

4. PRZEGLĄD LITERATURY

4.1. Charakterystyka technologiczna procesu zgrzewania zwarciowego [12, 13, 16, 22, 17, 31, 26, 41, 52, 64]

Warunkiem otrzymania poprawnego złącza zwarciowego jest:

1) jednakowe i równomierne nagrzanie całego przekroju każdej z części zgrzewanej,
2) ochrona powierzchni stykających się od znacznego ich utlenienia w czasie trwania procesu.



Rys. 1. Rozkład ciepła i temperatury przy zgrzewaniu zwarciowym oraz bilans cieplny procesu [13, 64, 18]

Q_1 - ogólna ilość wydzielonego ciepła, Q_2 - ciepło zużyte na zgrzewanie, Q_3 - straty ciepła na nagrzewanie metalu sąsiadującego, Q_4 - straty ciepła na nagrzewanie elektrod, Q_5 - straty ciepła do otoczenia, l - wycinek długości prętów nagrzewanych w czasie zgrzewania

Wymagane jest szczególnie dokładne przygotowanie do zgrzewania powierzchni czołowych elementów. Najkorzystniejsze warunki zgrzewania zwarciowego uzyskuje się, gdy powierzchnie styków szczelnie przylegają do siebie. W przypadku występowania znacznych nierówności powierzchni, pod wpływem przepływającego prądu, następuje miejscowe przegrzanie i utlenienie powierzchni w styku [12, 26, 64].

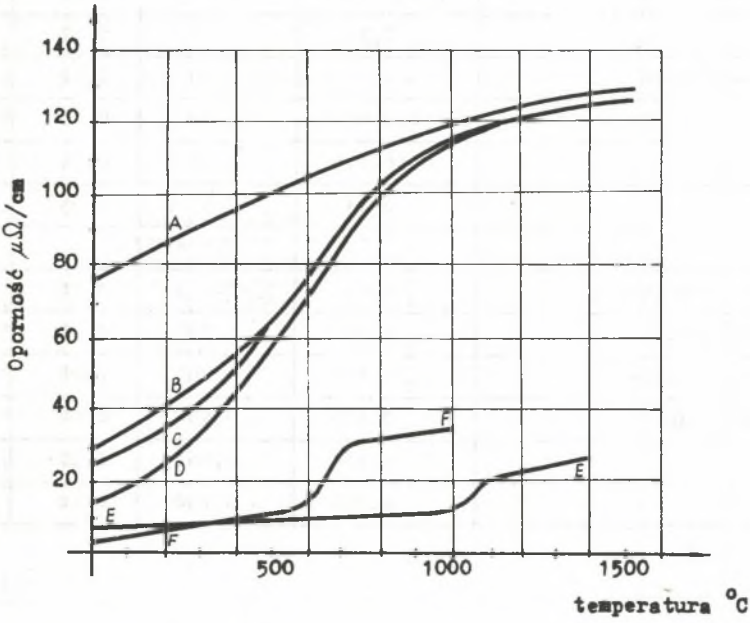
Zgrzewanie zwarciowe oporowe stali możliwe jest w szerokim zakresie temperatur, zwykle wynoszą one od 1100-1500°C. Nagrzanie materiału do tych temperatur może odbywać się z różną prędkością. Prędkość nagrzewania zależy głównie od gęstości prądu. Ze zmniejszeniem średnicy rośnie procent traconego ciepła do otoczenia. Rozkład ciepła i temperatury przy zgrzewaniu zwarciowym oraz bilans cieplny tej metody przedstawiono na rys. 1 [13, 64, 18].

W początkowej fazie procesu zgrzewania zwarciowego, kiedy istnieje duża oporność styku pomiędzy elementami łączonymi znaczna część mocy zużywa się na nagrzanie metalu w styku. W miarę upływu czasu na nagrzanie elementów zużywa się nie więcej niż 50% ogólnej energii cieplnej.

Tablica 1

Zależności empiryczne procesu zgrzewania zwarciowego [26, 24, 17, 41, 52]

Lp.	Parametr zgrzewania		Zależność empiryczna
1	Długość wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki - l_1 mm dla drutów o średnicy "d" lub boku kwadratu "h" w mm	do 3 mm	1,12 d
		od 3-5 mm	0,98 d
		od 5-8 mm	0,84 d
		powyżej 8 mm	0,70 d
		przeciętne mm	0,91 d
2	Naddatek długości na zgrzewanie l_2		(0,3-0,7) l_1
3	Naddatki długości na spęczanie l_s - mm	pod prądem l_{si} - mm	(0,5-0,9) l_s
		bez prądu l_{so} - mm	(0,5-0,1) l_s
4	Gęstość natężenia prądu zgrzewania j, A/mm^2		$(12 - 15) + \frac{90 - 120}{t_z}$ 25-200
5	Czas przepływu prądu zgrzewania t_z - sek		Zależy od gęstości, najczęściej 0,5-5
6	Docisk spęczania lub zgrzewania daN/mm^2		1,5-4



Rys. 2. Krzywe zmiany oporności różnych materiałów w zależności od temperatury ich nagrzania [41]

A - stal chromowo-niklowa, B - stal manganowo-krzemowa, C - stal wysokomanganowa, D - stal niskowęglowa, E - mosiądz, F - aluminium

Niektóre zależności empiryczne procesu zgrzewania zwarciowego stali niskowęglowych zestawiono w tablicy 1. Krzywe zmiany oporności różnych materiałów w zależności od temperatury ich nagrzania podano na rys. 2 [26, 24, 17, 41, 52].

Porównawcze zestawienia współczynników cieplno-fizycznych niektórych metali i ich stopów zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Porównawcze zestawienie współczynników przewodzenia ciepła i oporności dla różnych metali [64, 22, 13]

Materiał	Wartości cieplno-fizyczne metali		Względne wartości współczynników	
	$\lambda \frac{W}{cm\ ^oC}$	$\rho \frac{\Omega mm^2}{m}$	λ_w	ρ_w
Srebro	4,170	0,0158	1,000	1,0000
Miedź M1	3,6-3,9	0,0175	0,90	1,11
Aluminium	2,02-2,10	0,0283	0,49	1,79
Duraluminium	1,34-1,47	0,034	0,34	2,15
Stop magnezu MA1	0,835-1,26	0,070	0,25	4,43
Brąz	0,71	0,16	0,17	10,13
Brąz fosforowy	0,5	0,10	0,12	6,33
Mosiądz (60% Cu + 40% Zn)	0,6-0,92	0,09	0,18	5,70
Nikiel	0,56-0,6	0,09	0,14	5,70
Monel	0,21	0,5	0,05	31,65
Chrom	-	0,118	-	7,47
Stal niskowęglowa	0,65	0,13-0,2	0,16	10,76
Stal chromansil	0,377	0,22	0,09	13,92
Stal niemagnetyczna	0,150	0,70	0,04	44,30
Stal żaroodporna	0,176	0,988	0,04	62,53
Cynk	1,120	0,0625	0,27	3,96
Kadm	0,930	0,750	0,22	4,75

4.2. Zgrzewalność stali stopowych podczas zgrzewania zwarciowego [9, 10, 12, 20, 27, 31, 35, 36, 40, 52, 59, 63, 61, 56, 65, 67, 69, 72, 73]

4.2.1. Zgrzewalność stali chromowych

Duże powinowactwo chromu do tlenu i wysoka wytrzymałość stali chromowych narzucają warunki stosowania dużych sił i prędkości spęczania. Ferrytyczne stale chromowe skłonne są do rozrostu ziarn i wrażliwe są na kruchość odpuszczania w temperaturze 475°C.

Plastyczność zgrzewanych połączeń ulega zwiększeniu podczas powtórnego krótkochwilowego nagrzania stali (po zgrzewaniu) do temperatury ok. 800°C i szybkim jej ochłodzeniu.

Intensywność hartowania się stali chromowych znacznie wzrasta wraz ze zwiększeniem zawartości węgla w stali [69, 79, 16, 12, 13]. Ze wzrostem zawartości węgla w stali chromowej (17% Cr), np. z 0,08 do 0,4%, następuje zmiana struktury stali z ferrytycznej na martenzytyczną [35, 36, 61, 63]. Dodatek do stali chromowej niewielkiej ilości węgla, molibdenu polepsza jej zgrzewalność; dodatek niobu i boru powoduje kruchość metalu podczas jego przegrzania. Wzrost zawartości węgla (niezwiązanego w węgliki), jakkolwiek ułatwia zgrzewanie, jest jednak powodem podhartowywania się złączy. Niekiedy wystarczające jest zastosowanie jednorazowego cyklu obróbki wyżarzania złącza bezpośrednio w zgrzewarce. Nagrzanie złącza do temperatury 740-760°C w przeciągu czasu wynoszącego ok. 60 sek. umożliwia obniżenie twardości w niektórych gatunkach stali z 370-400 do 200-225 HB - tablica 3 [69, 12, 63].

Tablica 3

Zmiana twardości i udarności złączy wykonanych ze stali gat. 2H13 i H17N2 w zależności od temperatury odpuszczania [69]

Stal	Własności mechaniczne	Stan wyjściowy	Po spawaniu	Temperatura odpuszczania °C					
				550	600	650	680	700	720
2H13	HV	180	340	280	240	-	200	190	180
	U kGm/cm^2	8,1	0,8	-	5,4	-	7,9	8,0	8,0
H17N2	HV	240	340	310	250	210	210	210	230
	U kGm/cm^2	7,9	0,8	3,8	4,3	6,2	6,6	7,0	6,6

Węgliki zawierające chrom rozpuszczają się w austenicie wolniej i przy wyższych temperaturach niż węgliki bez chromu. Podczas nagrzania stali z zawartością 0,6% C i 15% Cr do temperatury 900°C do roztworu przechodzi

nieznaczna ilość węglików i stal tego typu hartuje się słabo. Nagrzanie stali do temperatury 1100°C powoduje rozpuszczenie węglików a tym samym zwiększenie zawartości węgla i chromu w austenicie, który przy odpowiednim ochłodzeniu daje struktury hartowania łącznie z austenitem szczątkowym [35, 36, 61].

Dla stali chromowych stosuje się spęczanie pod prądem wielkości - 0,8 długości naddatku na spęczanie [69, 79].

Niekiedy podczas zgrzewania zwarciowego stali z dodatkiem molibdenu i wanadu stosuje się atmosfery ochronne. Odpuszczanie stali chromowych zwiększa plastyczność, chociaż twardość złączy z dużą zawartością chromu pozostaje wyższa od twardości materiału wyjściowego. Zwiększająca się ze zwiększeniem zawartości chromu twardość złączy znacznie obniża się przy zastosowaniu ich wyżarzania w piecu zazwyczaj w temperaturze 845°C. Efekt wyżarzania złączy jest wyraźniejszy niż odpuszczanie w temperaturze 730°C. Zgrzewanie zwarciowe tych stali zapewnia uzyskanie jednorodnych złączy, różniących się od materiału podstawowego tylko rozrostem ziarna w strefie wpływu ciepła [56, 67, 69].

4.2.2. Zgrzewalność stali chromoniklowych austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych

Stale tej grupy zaliczają się raczej do trudnozgrzewalnych. Ich zgrzewalność zależy od składu chemicznego i struktury [27, 79]. Stale austenityczne skłonne są do rozrostu ziarna podczas zgrzewania. Powinny być zgrzewane dużymi siłami spęczania i bez znacznego przegrzania. Dwufazowe austenityczno-ferrytyczne stale trudno odkształcają się podczas ich łączenia. Dodatki do stali składników stopowych jak Mo, Si, Nb, C, Mn zmieniają stopień austenityczności oznaczonej ilorazem:

$$K = \frac{[Ni]}{[Cr]},$$

gdzie:

[Ni] = Ni + 30C + 0,5Mn; [Ni]- równoważnik niklu,

[Cr] = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb; [Cr]- równoważnik chromu, co również wpływa na różną zgrzewalność stali [79, 63, 69].

Przy $K > 1$ stal posiada jednorodną austenityczną strukturę. Trudnorozpuszczalne węgliki również pogarszają zgrzewalność stali wysokostopowych. W większości przypadków stale po zgrzewaniu należy poddawać austenityzacji. Zabieg wymieniony można wykonywać bezpośrednio na zgrzewarce przez krótkotrwałe (około 1-3 minut) nagrzanie złączy w odpowiednich szczękach [9, 12].

Temperaturę nagrzania złączy po zgrzewaniu należy dobierać doświadczalnie w zależności od składu chemicznego stali [22, 31, 41, 52].

4.2.3. Zgrzewalność stali szybkotnących

Stale szybkotnące odznaczają się małą przewodnością cieplną i stosunkowo niewielką krytyczną szybkością chłodzenia. Wystarcza stosunkowo wolne chłodzenie, aby uzyskać przechłodzenie austenitu i zahartowanie [9, 10, 12, 13, 79].

Zbyt szybkie nagrzewanie i chłodzenie stali prowadzi do powstawania dużych naprężeń wewnętrznych w wyniku zachodzących przemian w złączu, co może prowadzić do tworzenia pęknięć [16, 19, 22].

Pęknięcia występują zazwyczaj na odcinkach znacznej zmiany twardości w odległości od zgrzeiny ok. 0,75 szerokości odcinka zahartowanego. Występują one za strefą przegrzania i zawsze przebiegają przez martenzyt. Przy wąskim odcinku zahartowania złącze w mniejszym stopniu podatne jest na pęknięcia [65, 67].

Nagrzewanie elementów nie powinno odbywać się na dużej szerokości, a proces zgrzewania powinien przebiegać w zakresie temperatur: dla stali SW18 ok. 1330°C, dla stali SW7M - 1280°C [63, 69, 79, 67, 65]. Powyżej tych temperatur wzdłuż granic ziarn pojawia się kruchy ledeburyt, który w znacznym stopniu obniża własności plastyczne złączy. Równomierność nagrzewania uzyskuje się drogą krótkiego mocowania elementów w szczękach i stopniowego prowadzenia procesu nagrzewania elementów do zgrzewania [64, 7, 16].

5. BADANIA WŁASNE

5.1. Sposób przeprowadzenia badań

5.1.1. Zaplanowanie doświadczenia i wybór kierunku przemieszczania do obszaru prawie optymalnego

Zaplanowanie doświadczenia i wybór kierunku przemieszczania do obszaru prawie optymalnego przeprowadzono wg schematu postępowania przedstawionego na rys. 3. Ogólny schemat analizowania powierzchni odpowiedzi podczas opracowywania wyników badań podano w tablicy 4.

Tablica 4

Ogólny schemat analizowania powierzchni odpowiedzi podczas opracowywania wyników badań

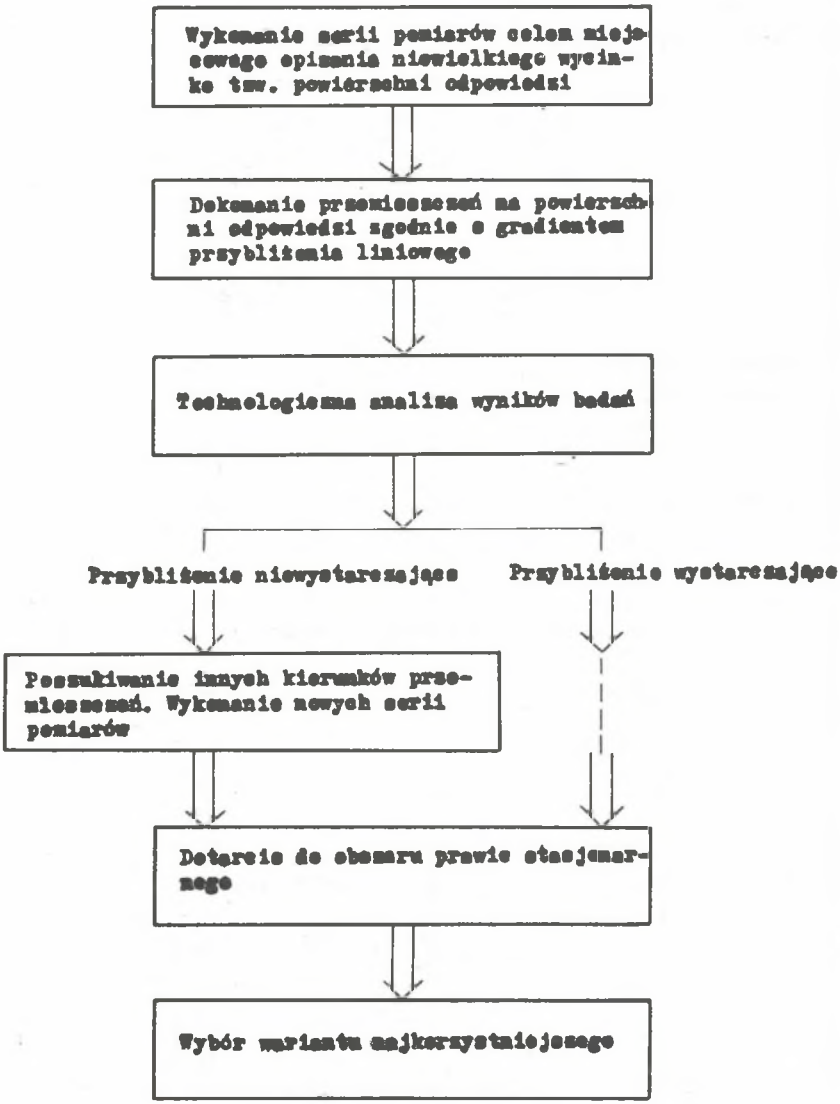
Lp.	Etapy postępowania	Forma opracowywania wyników badań
1	2	3
1	Wybór obszaru doświadczenia (eksperymentalnego)	Przyjęcie poziomów badania: - podstawowego (zerowego) - górnego - b_i - dolnego - a_i Obszar - Z-powierzchni k-wymiarowej $Z \subset R^k$ o współrzędnych $Z = \{ \underline{z} = (z_1, z_2 \div z_n) : a_i \leqslant z_i \leqslant b_i,$ dla $i = 1,2,\ldots,k \}$ przekształcono afinicznie na standardowy obszar eksperymentalny stanowiący kostkę k-wymiarową (hipersześcian) $Z \rightarrow X \subset R^k$ $X = \{ \underline{x} = (x_1, x_2, x_n) : -1 \leqslant x_i \leqslant +1$ dla $i = 1,2,\ldots,k \}$
2	Przyjęcie kodowych symboli zmiennych	$X_i = \dfrac{z_i - \dfrac{a_i + b_i}{2}}{\dfrac{b_i - a_i}{2}}$ z_i - rzeczywista wartość czynnika $\left.\begin{array}{l} \max z_i = b_i \\ \min z_i = a_i \end{array}\right\}$ zakresy zmienności czynników Każdy z czynników przekształcony jest do dwóch poziomów kodowych +1, -1

cd. tablicy 4

1	2	3
3	Przyjęcie macierzy planowania doświadczenia całkowitego czynnikowego $CDC2^k$ lub ułamkowego $UDC2^{k-p}$ p - liczba całkowita dodatnia, spełniająca nierówność $2^{k-p} > k$	Plan doświadczenia P_n +1 +1 +1 +1 . +1 -1 +1 -1 . +1 +1 -1 -1 . +1 -1 -1 +1 . . . .
4	Obliczenie współczynników regresji liniowego przybliżenia $\hat{\Theta}_i$	$\hat{\Theta}_i = (X^TX)^{-1} X^TY = \frac{1}{N}\sum_{b=1}^{N} x_{ib} \cdot y_b$ x_{ib} - wartość zakodowanej zmiennej (+1 lub -1) y_b - wartość wyników badań
5	Obliczenie błędów oznaczenia współczynników $s^2(y)$; $s^2(\Theta_i)$. Sprawdzenie jednorodności dyspersji wyników badań	$s^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^{c}(y_{il} - y_i)^2}{c - 1}$ $G_{max} = \frac{\max s^2(y_i)}{\sum s^2(y_i)} \leqslant G_{tabl}$ $s^2(y) = \frac{\sum s^2(y_i)}{N}$ $s^2(\Theta_i) = \frac{s^2(y)}{N.C}$ C - ilość obserwacji wykonanych w danym punkcie "i" G_{r_1,r_2} - tablicowe kryterium adekwatności $r_1 r_2$ - stopnie swobody - poziom ufności $s^2(y)$ - wariancja doświadczenia
6	Analiza obliczonych współczynników regresji, obliczenie ich statystycznej istotności	$\Theta_{kr} = \pm t_{r,\alpha} s(\Theta_i)$ Θ_{kr} - krytyczna wartość współczynnika regresji $t_{r,\alpha}$ - tablicowa wartość t-kryteria Studenta dla r = N-1 stopni swobody $s^2(\Theta_i)$ - wariancja współczynnika regresji

od. tablicy 4

1	2	3
7	Sprawdzenie hipotezy adekwatności przybliżenia liniowego	$F = \frac{s^2_{ad}}{s^2(y)} \leqslant F_{r1,r2}$ $s^2_{ad} = \frac{\sum_{b=1}^{N} (\hat{y}_b - y_b)^2}{N - d}$ $\hat{y}_b$ - wielkość obliczona z równania regresji y_b - wielkość wyznaczona doświadczalnie d - ilość członów liniowych równania regresji $\left.\begin{array}{l} r_1 = N - d \\ r_2 = N - 1 \end{array}\right\}$ stopnie swobody F - statystyka zgodności Snedecora
8	Przyjęcie skoku jednostkowego - w dla czynnika o największym współczynniku L_{imax}. Obliczenie długości kroku Δ_i dla pozostałych czynników	$L_i = \frac{b_i - a_i}{2} \theta_i$ $\Delta_i = L_i \frac{W}{\lvert L_{max} \rvert}$ L_i - iloczyn jednostki czynnika $\frac{b_i - a_i}{2}$ i współczynnika regresji θ_i Δ_i - krok przemieszczania po powierzchni odpowiedzi
9	Obliczanie zamierzonych pomiarów przemieszczania na powierzchni odpowiedzi zgodnie z gradientem przybliżenia liniowego	Dane liczbowe otrzymuje się przez kolejne algebraiczne dodawanie do poziomu podstawowego - wartości Δ_i
10	Wybór wariantu najkorzystniejszego	Realizacja pomiarów - dokonanie przemieszczeń na powierzchni odpowiedzi zgodnie z gradientem przybliżenia liniowego.



Rys. 3. Schemat wyznaczania optymalnych parametrów zgrzewania

Tablica 5

Zapis podstawowych macierzy i sposób wyznaczania estymatorów równania regresji

Zapis:

- macierzy wyników obserwacji

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & \cdots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & \cdots & x_{k2} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ x_{0N} & x_{1N} & & x_{kN} \end{bmatrix} \qquad Y = \begin{bmatrix} Y_1(\underline{x}) \\ Y_2(\underline{x}) \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_N(\underline{x}) \end{bmatrix}$$

X - macierz planowania

Y - macierz kolumnowa wektora obserwacji

- układu równań liniowych

$$X\theta = Y$$

θ - macierz kolumnowa współczynników regresji

- układu równań normalnych

$$X^T X\theta = X^T Y$$

- macierzy odwrotnej i macierzy współczynników regresji

$$(X^T X)^{-1} = \left\{c_{ij}\right\} = \begin{bmatrix} c_{oo} & c_{01} & \cdots & c_{0k} \\ c_{10} & c_{11} & \cdots & c_{1k} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ c_{ko} & c_{k1} & \cdots & c_{kk} \end{bmatrix}$$

Macierzowe wyprowadzenie estymatora współczynników regresji

$$(X^T X)^{-1}(X^T X)\hat{\underline{\theta}} = \hat{\underline{\theta}} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Tablica 6

Przyjęta macierz planowania doświadczeń dla X_i zmiennych
$(i = 0,1,2,...,7)$

B	Y	X_o	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
		B_o=M	B_1=A	B_2=B	B_3=C	B_4=D	B_5=E	B_6=F	B_7=G
A	1	+	-	-	-	+	+	+	-
C	2	+	+	-	-	-	-	+	+
D	3	+	-	+	-	-	+	-	+
E	4	+	-	-	+	+	-	-	+
F	5	+	+	+	-	+	-	-	-
G	6	+	+	-	+	-	+	-	-
H	7	+	-	+	+	-	-	+	-
I	8	+	+	+	+	+	+	+	+

P_3

oznaczenie zmiennych przyjętych do wyznaczania współczynników regresji

oznaczenie współczynników regresji równania liniowego

Tablica 7

Algorytmy i programy badania powierzchni odpowiedzi opracowane w jęz. BASIC na minikomputer MERA 303

Grupa programu	Lp.	Tematyka algorytmów i programów	Zakres numeracji etykiet	Początek dyrektywy RUN
1	2	3	4	5
1	1	Kodowanie	5-80	R5
	2	Obliczanie jednorodności dyspersji	95-175	R95
	3	Sprawdzenie jednorodności - kryterium Gmax	185-205	R185
	4	Obliczanie krytycznej wartości współczynników regresji	210-240	R210
2	5	Obliczanie współczynników regresji	245-535	R245
3	6	Badania standardowe	540-780	R540
	7	Sprawdzanie adekwatności modelu	790-850	R790
4	8	Poszukiwanie najlepszej odpowiedzi metodą gradientu	855-970	R855
	9	Wariantowanie - prognozowanie	985-1035	R985

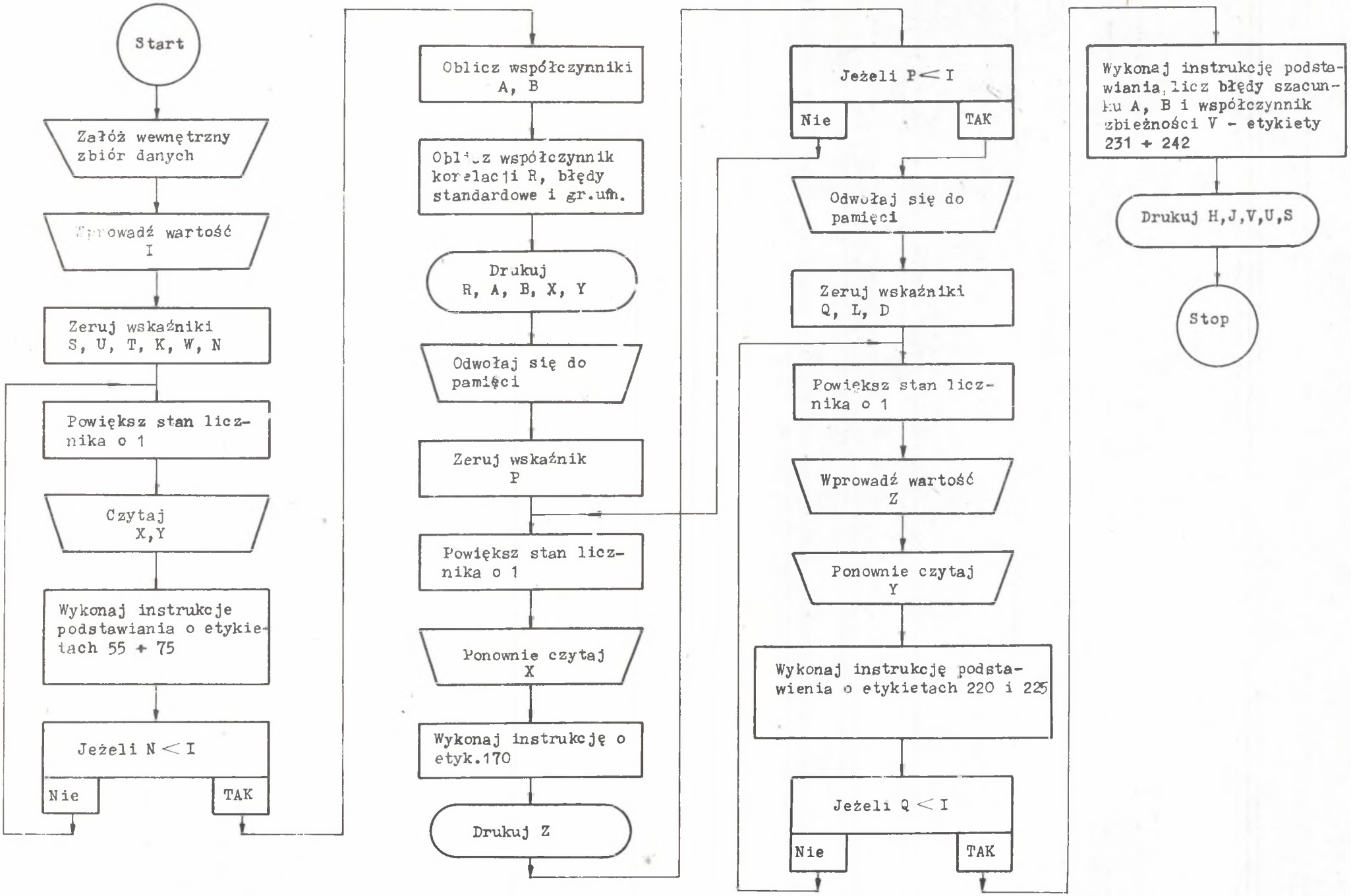
Tablica 8

Treść programu realizującego algorytm obliczania współczynników A, B metodą najmniejszych kwadratów i analizowania równań regresji liniowej przy ustalaniu zależności empirycznych

```
1   REM ANALIZA RÓWNANIA REFRESJI LINIOWEJ!
5   DATA ....!
6   DATA ....!
10  INPUT I!
15  LET S = 0!
20  LET U = 0!
25  LET T = 0!
30  LET K = 0!
35  LET W = 0!
40  LET N = 0!
45  LET N = N+1!
50  READ X,Y!
55  LET S = S+X!
60  LET U = U + Y!
65  LET T = T + X*Y!
70  LET K = K + X*X!
75  LET W = W + Y*Y!
80  IF N < I THEN 45!
85  LET A = S/N!
90  LET B = U/N!
95  LET D = R/N!
100 LET E = W/N!
105 LET C = T/N!
110 LET M = SQR(D-A*A)!
115 LET O = SQR(E-B*B)!
120 LET R = (C-A*B)/(M*O)!
125 LET F = R*O/M!
130 LET G = -R*O*A/M+B!
135 LET X = 2*M*SQR(1-R*R)!
140 LET Y = 2*O*SQR(1-R*R)!
145 PRINT R,F,G,I,Y!
150 RESTORE!
155 LET P = 0!
160 LET P = P + 1!
165 READX,L!
170 LET Z = F-X + G!
175 PRINTP,Z!
180 IF P < I THEN 160!
185 RESTORE!
190 LET Q = 0!
195 LET L = 0!
200 LET D = 0!
205 LET Q = Q+1!
210 INPUT Z!
215 READP,Y!
220 LET L = L+(Y-Z)*(Y-Z)!
225 LET D = D+(Y-B)*(Y-B)!
230 IF Q < I THEN 205!
235 LET M=(I-2)*(K-S*S/I)!
232 LET O=(I-2)*I*(K-S*S/I)!
235 LET H = SQR(L/M)!
240 LET J = SQR(L*K/O)!
245 LET V = L/D!
241 LET U = (H/F)*100!
242 LET S = (J/G)*100!
250 PRINT H,J,V,U,S!
255 END!
```

Przyjęte oznaczenia:

- I - ilość par X,Y wpisanych w instrukcję DATA
- R - współczynnik korelacji
- F - współczynnik przy zmiennej X
- G - wyraz wolny równania - B
- X, Y - błędy standardowe oceny wartości niewiadomych X, Y
- H, J - błędy szacunku współczynników F i G
- V - współczynnik zbieżności



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu obliczania współczynników A, B metodą najmniejszych kwadratów i analizowania równania regresji liniowej

Sposób wyznaczania estymatorów współczynników regresji i zapis podstawowych macierzy zestawiono w tablicy 5. Przyjętą macierz planowania doświadczenia zestawiono w tablicy 6.
W ramach tematu opracowano podstawowe algorytmy i programy w jęz. BASIC na minikomputer MERA 303, na którym wykonano szczegółowe obliczenia związane z badaniem powierzchni odpowiedzi i ustaleniem zależności empirycznych (zestawiono w tablicach 7, 8 i rys. 4).

5.1.2. Analiza jakości złączy zgrzewanych doczołowo zwarciowo

Jakość złączy analizowano i sprawdzano na podstawie:
- oględzin zewnętrznych,
- prób technologicznych rozciągania lub zginania,
- prób statycznych rozciągania wg PN-64/M-69713,
- badań metalograficznych makro i mikroskopowych,
- prób twardości wg PN-64/M-69752,
- prób przeciągania po zgrzewaniu.

W badaniach wytrzymałościowych wskaźnikiem jakości był charakter zniszczenia złącza. Wynikiem dodatnim oceniano złącza, które ulegały zniszczeniu poza zgrzeiną (materiał lub strefa wpływu ciepła).

W badaniach metalograficznych wskaźnikiem jakości była poprawność budowy makro i mikro połączenia.

Badania wytrzymałościowe na rozciąganie przeprowadzano na maszynie wytrzymałościowej typu ZD-40 o maksymalnym zakresie siły rozciągania 400 ± 2 N.

Próby zgrzewania (parametrami dobranymi) i przeciągania drutów przeprowadzono na urządzeniach ciągarni w Hucie Baildon.

5.1.3. Materiały użyte do badań

Materiały użyte do zgrzewania zestawiono w tablicy 9.

Tablica 9

Zestawienie i skład chemiczny stali użytych do badań[1)]

Oznaczenie stali	Skład chemiczny %											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti	Cu	W	V	Mo
1H13	0,09-0,15	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	12,0-14,0	max 0,6					
2H13	0,16-0,25	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	12-14	max 0,6					
3H13	0,25-0,35	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	12-14	max 0,6					
4H13	0,35-0,45	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	12-14	max 0,6					

cd. tablicy 9

Oznaczenie stali	Skład chemiczny %											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti	Cu	W	V	Mo
H17N2	0,11 0,17	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	16-18	1,50-2,50					
H17	max 0,10	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	16-18	max 0,6					
OH17T	max 0,08	max 0,80	max 0,80	max 0,035	max 0,030	16-18	max 0,6	5xC-0,8				
H10S2M	0,35-0,45	max 0,7	1,9-2,6	max 0,035	max 0,030	9-10,5	max 0,5					0,7-0,9
1H18N9T	max 0,10	max 2,0	max 0,08	max 0,035	max 0,030	17-19	8-10	5xC-0,8				
H19N9	max 0,06	1,2-2,0	max 0,80	max 0,030	max 0,020	19-21	9-10		max 0,25			
H19N9M	max 0,06	1,2-2,0	max 0,80	max 0,030	max 0,020	18,5-20	10-11,5		max 0,25			2,0-2,6
H19N9G8T	max 0,1	6,0-7,0	max 1,2	max 0,030	max 0,020	18-19,5	8-9,5	0,10-0,20	max 0,25			
H25N20S2	max 0,20	max 1,5	2,0-3,0	max 0,035	max 0,030	24-27	18-21					
50H21G9N4	0,47-0,57	8,0-11,0	max 0,5	max 0,03	max 0,03	20-22	3,25-4,5					
N12E	1,15-1,24	0,15-0,30	0,15-0,30	max 0,03	max 0,02	max 0,15	max 0,20		max 0,20			
NW1	1,10-1,25	0,2-0,4	0,15-0,35	max 0,03	max 0,03					1,0-1,5		
NC6	1,30-1,45	0,5-0,7	0,15-0,35	max 0,03	max 0,03	1,3-1,6					0,10	
SW7M	0,84-0,92	max 0,4	max 0,4	max 0,03	max 0,03	3,7-4,5	max 0,4			6-7	1,7-2,1	4,5-5,5
SW18	0,75-0,85	max 0,4	max 0,4	max 0,03	max 0,03	3,8-4,8	max 0,4			17-19	1-1,5	

1) Stale odporne na korozję: 1H13, 2H13, 3H13, 4H13, H17, OH17T, H17N2, 1H18N9T - wg PN-71/H-86020.

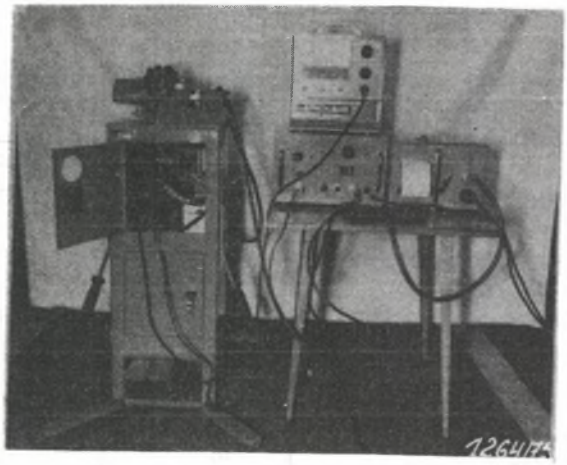
Stale na druty do spawania: H19N9, H19N9M, 1H19N9G6T - wg ZN-68/0632-24

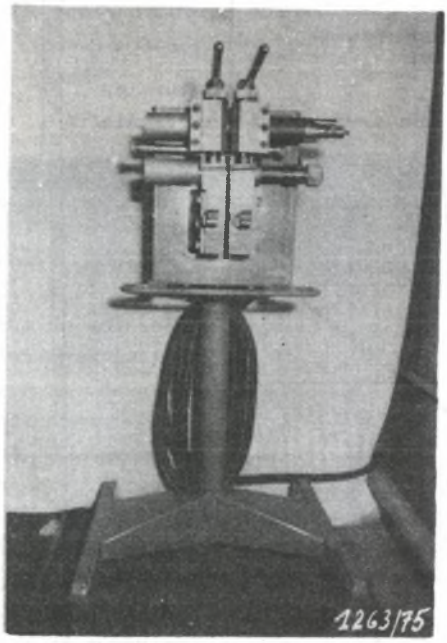
Stale żaroodporne: H10S2M, H25N20S2, 50H21G9N4 - wg PN-71/H-86022

Stale narzędziowe do pracy na zimno: NC6, NW1 - wg PN-71/H-85022

Stale szybkotnące: SW18, SW7M - wg PN-71/H-85022

Stale węglowe narzędziowe: N12E - wg PN-66/H-85020.





Rys. 5. Ogólny widok zgrzewarek użytych do badań

a) zgrzewarka doczołowa zwarciowa typu ZDZ-1854-05-1 z podłączonymi układami do pomiaru wartości skutecznej natężenia prądu zgrzewania i zapisu przebiegów prądowych, b) zgrzewarka doczołowa zwarciowa typu ZDZ-1834-05-0

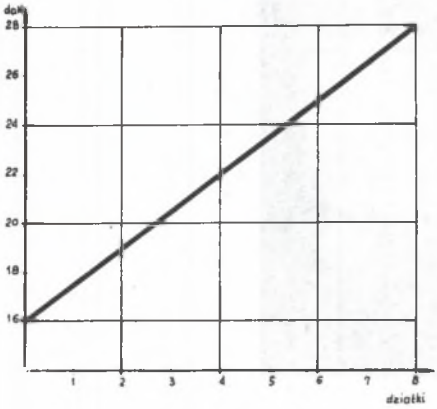
5.1.4. Zgrzewarki i układy pomiarowe użyte do badań

Ogólny widok oraz podstawowe dane techniczne zgrzewarek zwarciowych użytych do badań podano na rys. 5 i w tablicy 10.

Tablica 10

Podstawowe dane techniczne zgrzewarek użytych do badań

Dane techniczne zgrzewarek ZDZ		
Typ zgrzewarki	1854-05-1	1834-05-0
Napięcie zasilania - V	380, 50 Hz	380, 50 Hz
Moc znamionowa przy pracy P50 - kVA	2,5	7
Prąd pierwotny - znamionowy - A	6,3	17,6
Zakres napięć wtórnych - V	1,31-3,52	0,9-2,8
Prąd wtórny znamionowy - A	890	2400
Liczba stopni nastawienia prądu zgrzewania	8	16
Stopień znamionowy	8	ostatni
Wydajność zgrzewania przy max. średnicy drutu - max. zgrzein/h	30	30
Zakres średnic drutów zgrzewanych (stal stopowa) mm	1,8-8	4-12
Chłodzenie	naturalne	naturalne
Zabezpieczenie ochronne zgrzewarki	zerowanie	zerowanie
Masa - kg	73	160
Wymiary gabarytowe - mm	660x610x1000	840x603x1350

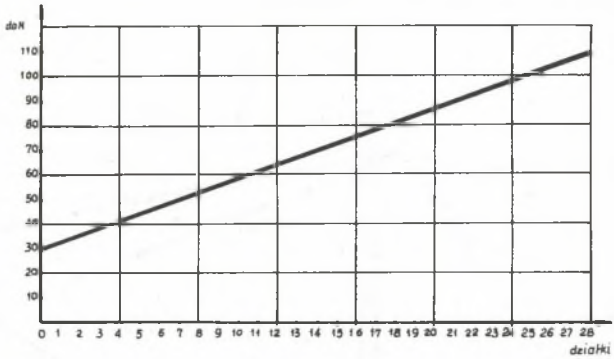


Rys. 6. Charakterystyka statyczna układu dociskowego zgrzewarki typu ZDZ-1854-05-1

Podczas wyznaczania parametrów zgrzewania zgrzewarki wyposażono w specjalne układy laboratoryjne do pomiaru wartości skutecznej natężenia prądu zgrzewania i zapisu przebiegów prądowych. Zapis przebiegów prądowych, umożliwiających kontrolę powtarzalności czasu zgrzewania wykonywano aparaturą kontrolno-pomiarową typu KELVIN.

Typowy zapis przebiegu prądu w czasie zgrzewania podano na rys. 8 Pomiary siły spęczania zgrzewarek zwarciowych wykonano specjalnym dynamometrem w zakresie pomiarowym 0-1000 N.

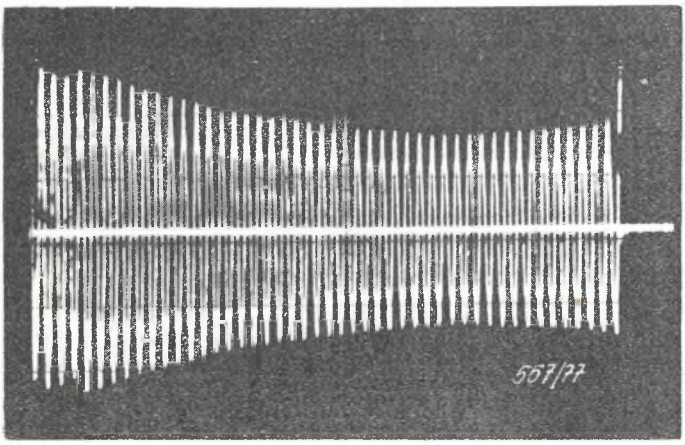
Charakterystyki statyczne układów dociskowych zgrzewarek podano na rys. 6 i 7.



Rys. 7. Charakterystyka statyczna układu dociskowego zgrzewarki typu ZDZ-1834-05-0

5.2. Zestawienie wyników badań

Wyniki zestawione w pracy stanowią dokumentację przeprowadzonych badań. Szczegółową analizę i omówienie wyników badań przeprowadzono w rozdziale "Analiza i omówienie badań".

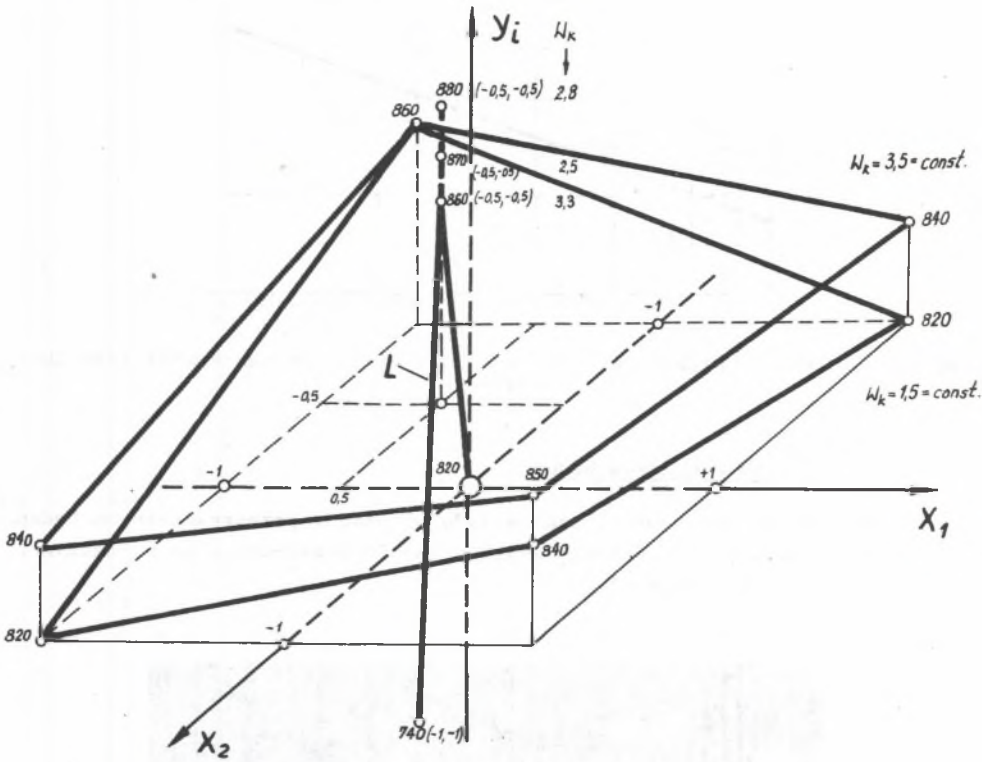


Rys. 8. Badania oscylograficzne przebiegu prądu w czasie zgrzewania zwarciowego drutów - typowy zapis

Prędkość przesuwania papieru w rejestratorze - 2 cm/s

Zestawienia dotyczą następujących badań:

- oscylograficznych, analizujących przebieg prądu w czasie zgrzewania - rys. 8,
- analizy powierzchni odpowiedzi - rys. 9,



Rys. 9. Wyniki badania powierzchni odpowiedzi na przykładzie wyznaczania optymalnych parametrów zgrzewania stali gat. H19N9G6T ø 4 mm

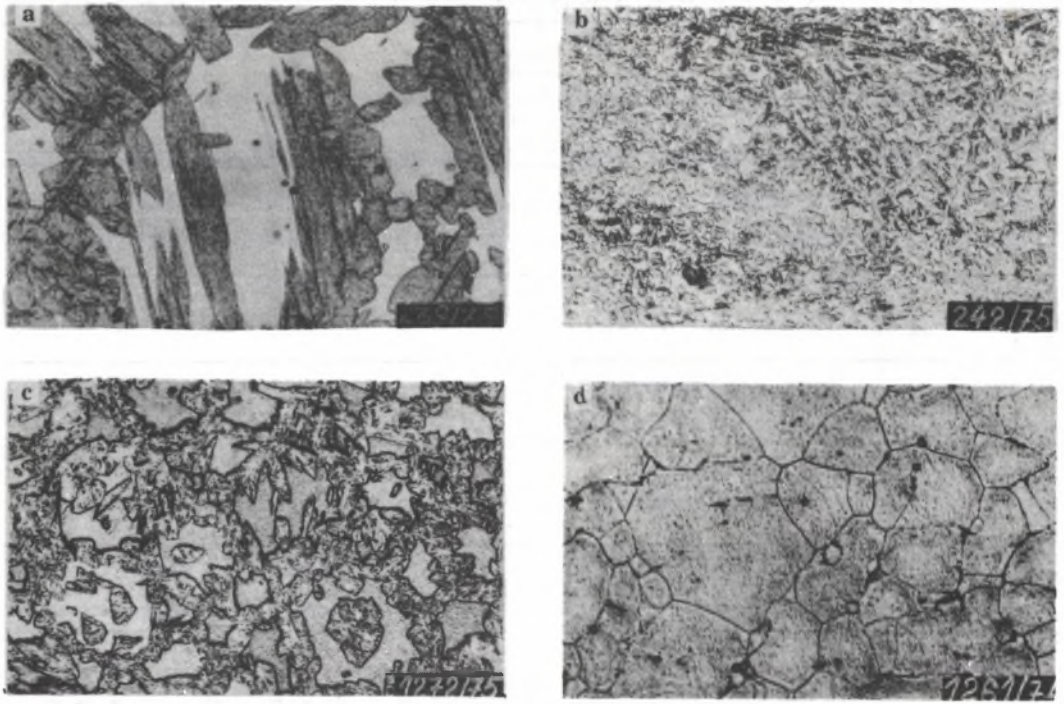
X_1, X_2 - zmienne procesu zgrzewania, Y_1 - zmienna opisywana (siła niszcząca złącze), L - krzywa przemieszczania się parametrów do obszaru stacjonarnego wg kierunku gradientu przybliżenia liniowego, x_1 - siła spęczania daN, $\dot{x}_2$ - zaczep transformatora, W_k - wyłącznik krańcowy, $\left.\begin{matrix}-1\\+1\end{matrix}\right\}$ przedział zmian zmiennych w opisie kodowym

- zgrzewania, zwarciowego i doboru parametrów zgrzewania stali stopowych - tablice 11, 12,
- własności mechanicznych złączy - tablica 13,
- metalograficznych, mikroskopowych - rys. 10-13,
- przeciągania złączy - tablica 14,
- innych, dotyczących opracowań z zakresu matematycznych metod graficznego opisywania i wyznaczania zależności zgrzewania zwarciowego (wykresy, nomogramy) - rys. 14, 15, 16-31.

Tablica 11

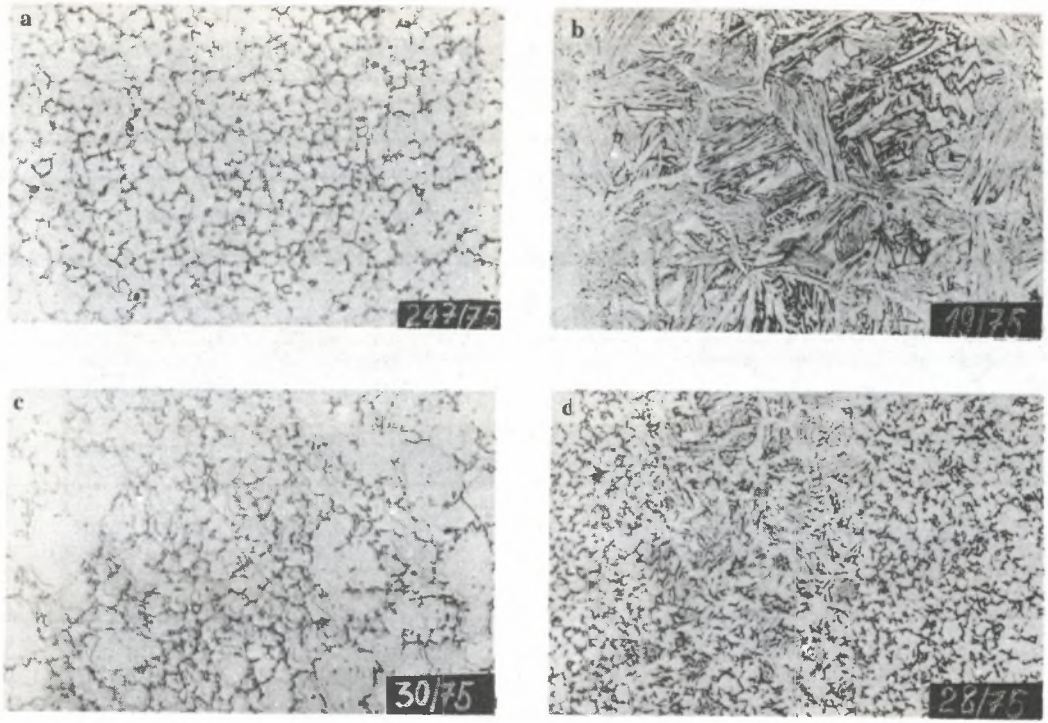
Zestawienie optymalnych parametrów zgrzewania doczołowego zwarciowego drutów na zgrzewarce typu ZDZ-1854-05-1 wyznaczonych metodą badania powierzchni odpowiedzi

Lp.	Materiał zgrzewany	Średnioe drutu Φ mm	Rozstaw szczęk mm	Siła docisku		Wyłącznik krańcowy "W_k" dz	Natężenie prądu zgrzewania	
				dz	daN		Numer zaczepu transformatora	kA
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1H13	5	8	8	27	2,2	7	1,85
2	1H13	6	8	8	27	2,5	7	2,3
3	2H13	7	8	8	27	2,5	8	2,7
4	3H13	2	4	2	18	1,4	5	0,23
5	3H13	2,5	4,5	3	19	1,6	6	0,29
6	4H13	6	8	8	27	2,5	7	2,3
7	4H13	6,3	8	8	27	2,5	7	2,4
8	4H13	6,5	8	8	27	2,5	7	2,55
9	H17N2	6,8	8	8	27	2,5	8	2,5
10	H17	3,5	6	7	26	2,0	8	1,2
11	OH17T	3,0	5	6	24	1,9	7	0,9
12	OH17T	4,0	6,5	8	27	2,0	8	1,2
13	1H18N9T	2,0	4	4	22	1,4	5	0,36
14	1H18N9T	4,0	6	6	24	2,3	5	0,8
15	1H18N9T	6,0	8	8	27	2,5	7	2,3
16	H19N9	2,5	5	3	20	1,9	4	0,41
17	H19N9	3,2	6	5	22	2,0	5	0,8
18	H19N9	4,0	6,5	6	24	2,5	5	1,0
19	H19N9	5,0	8	8	27	3,2	7	1,85
20	H19N9M	3,2	6	5	22	2,0	5	0,85
21	H19N9M	4,0	6,5	6	24	2,5	5	0,8
22	H19N9G6T	4,0	6,5	6	24	2,5	5	0,7
23	H19N9G6T	4,2	6,5	6	24	2,5	5	0,75
24	H25N20S2	2,4	4	4	22	1,6	4	0,36
25	H25N20S2	6	8	8	27	2,5	7	2,0
26	N12E	3,5	6	8	27	1,3	8	1,7
27	NC6	6,0	8	8	27	2,1	8	2,4
28	SW7M	2,5	5	3	19	1,8	3	0,28



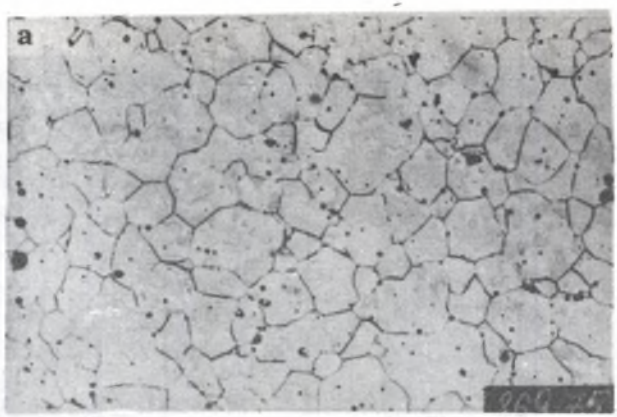
Rys. 10. Mikrostruktury zgrzein zwarciowych wykonanych parametrami podanymi w tablicy 11. Pow. 250x. Traw. elektrolitycznie

a) stal gat. 1H13. Struktura ferrytyczno-martenzytyczna; b) stal gat. 4H13. Struktura - martenzyt iglasty z austenitem szczątkowym + niewielkie ilości ferrytu; c) stal gat. H17N2. Struktura - martenzytyczno-ferrytyczna; d) stal gat. OH17T. Struktura - ferryt z bardzo dobrymi węglikami po granicach i wewnątrz ziarn



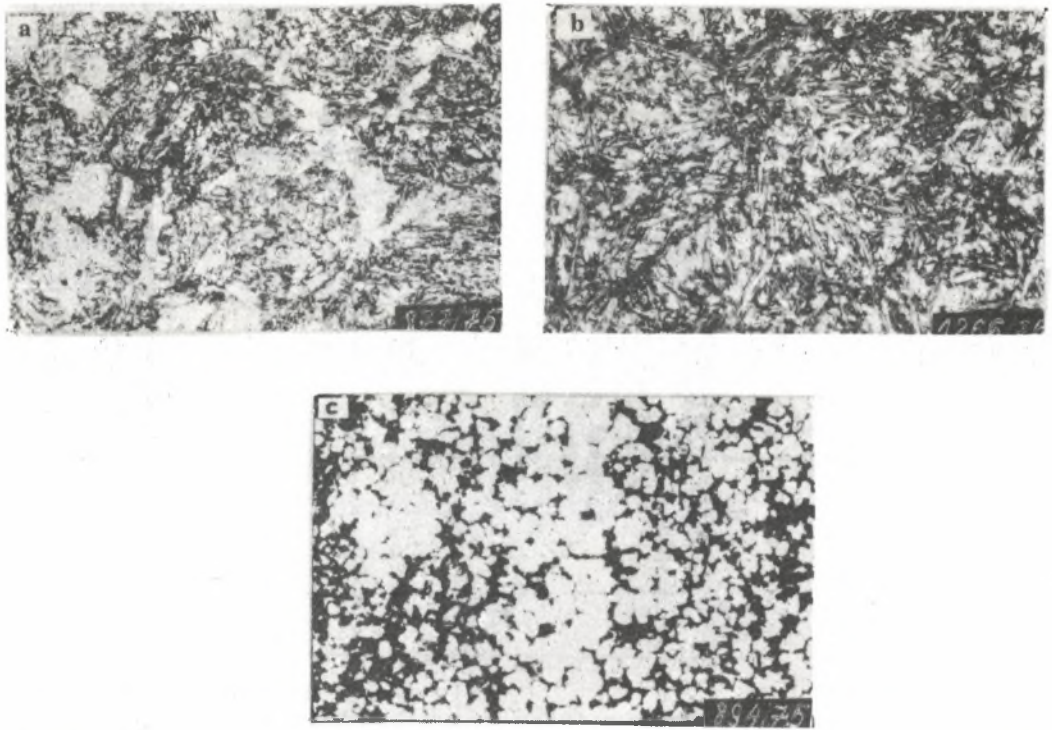
Rys. 11. Mikrostruktury zgrzein zwarciowych wykonanych parametrami podanymi w tablicy 11. Pow. 250x. Traw. elektrolitycznie

a) stal gat. 1H18N9T. Struktura austenityczna + niewielkie ilości ferrytu; b) stal gat. H19N9. Struktura austenityczno-ferrytyczna, c) stal gat. H19N9M. Struktura austenit + ferryt, d) stal gat. H19N9G6T. Struktura austenityczno-ferrytyczna



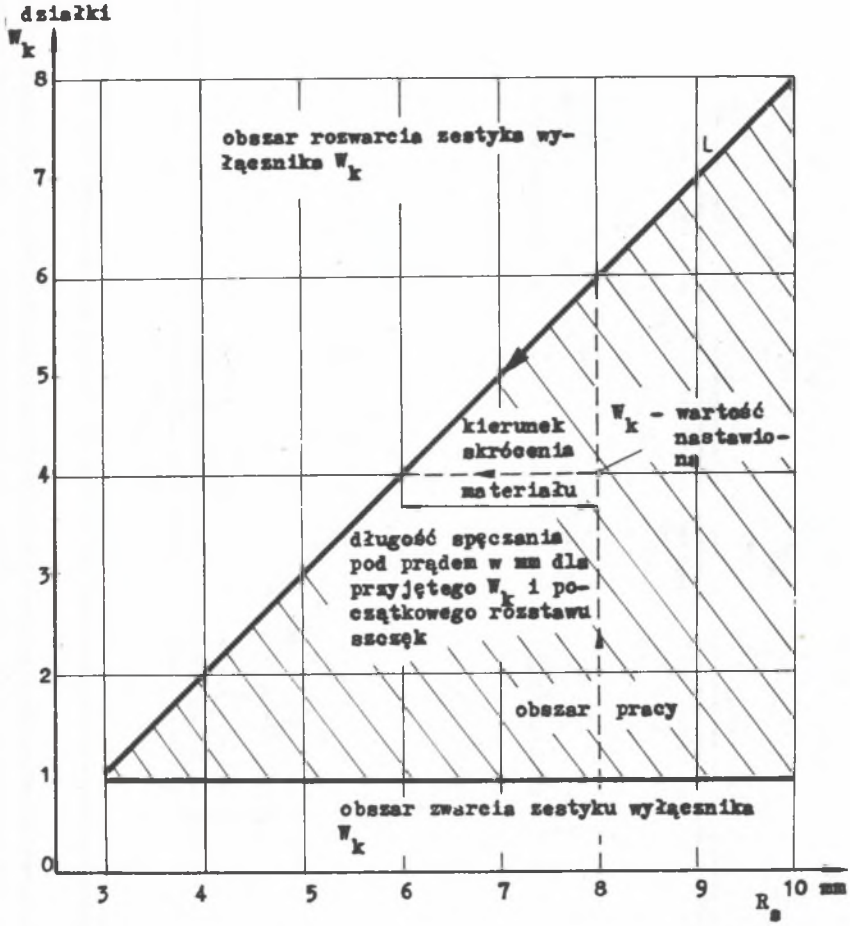
Rys. 12. Mikrostruktury zgrzein zwarciowych wykonanych parametrami podanymi w tablicy 12. Pow. 250x. Traw. elektrolitycznie

a) stal gat. 50H21G9N4. Struktura austenit + węgliki, b) stal gat. H10S2M. Struktura martenzytyczna + niewielkie ilości austenitu szczątkowego + ferryt



Rys. 13. Mikrostruktury zgrzein zwarciowych wykonanych parametrami podanymi w tablicach 11, 12. Pow. 250x. Trew. elektrolitycznie

a) stal gat. NW1. Struktura martenzytyczna + austenit szczątkowy + węgliki, b) stal gat. NC6. Struktura martenzytyczna + austenit szczątkowy + węgliki, c) stal gat. SW18. Struktura - martenzyt + austenit szczątkowy + ledeburyt



Rys. 14. Wykres do wyznaczania długości spęczania pod prądem w zależności od początkowego rozstawu szczęk R_s i wartości nastawionego wyłącznika krańcowego W_k zgrzewarki ZDZ-1854-05-1

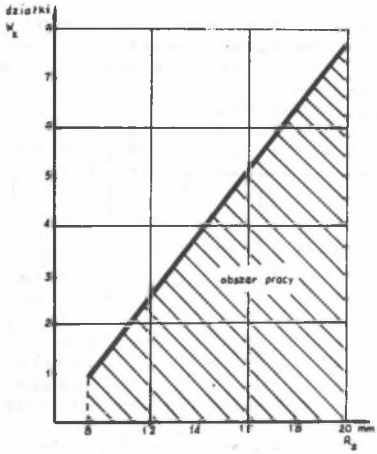
Przykład. Dane przyjęte do zgrzewania: R_s = 8 mm, W_k = 4 dz

Wielkość wyznaczana: długość spęczania pod prądem L_i - mm

$$L_i = 8 - 6 = 2 \text{ mm}$$

8 - punkt przecięcia odciętej R_s = 8 mm z linią L

6 - odcięte na wysokości przecięcia W_k z linią L



Rys. 15. Wykres do wyznaczania długości spęczania pod prądem w zależności od początkowego rozstawu szczęk i wartości nastawionego wyłącznika krańcowego "W_k" zgrzewarki ZDZ-1834-05-0. (Sposób odczytu wielkości L_i analologiczny jak na rys. 14)

Tablica 12

Zestawienie optymalnych parametrów zgrzewania doczołowego zwarciowego drutów na zgrzewarce typu ZDZ-1834-05-0 wyznaczonych metodą badania powierzchni odpowiedzi

Lp.	Materiał zgrzewany	Średnica drutu Φ mm	Rozstaw szczęk mm	Siła docisku		Wyłącznik krańcowy "W_k" dz	Natężenie prądu zgrzewania	
				dz	daN		Numer zaczepu transformatora	kV
1	H17N2	8	12	12	65	1,3	II/6	2,9
2	H10S2M	10,5	14	23	95	2,1	II/8	3,8
3	50H21G9N4	9,5	13	15	70	2,0	II/4	3,3
4	NW1	11	14	17	80	1,2	II/4	4,4
5	NC6	5,5	12	5	45	0,7	II/5	2,4
6	NC6	6	12	5	45	0,7	II/5	2,7
7	SW18	11,5	14	15	75	1,0	II/4	4,6
8	SW18	12	14	15	75	1,0	II/4	4,9

Tablica 13

Własności mechaniczne złączy zgrzanych doczołowo zwarciowo parametrami podanymi w tablicach (średnie z 5 pomiarów)

Lp.	Znak lub cecha materiału zgrzewanego	Średnica drutu Φ mm	Średnia siła niszcząca daN		Wytrzymałość doraźna daN/mm^2		Współczynnik wytrzymałości złącza w odniesieniu do materiału podstawowego	Kąt gięcia złącza o	Rozkład twardości HV w		
			materiał	złącze	materiału	złącza			materiale	strefie wpływu ciepła	zgrzeinie
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1H13	5	1000	1000	50,6	50,6	1,0	40°	-	-	-
2	1H13	6	1300	1300	46,0	46,0	1,0	40°	212 223 232	524 480 494 376 283	353 362 401
3	3H13	2	185	185	58,5	58,5	1,0		-	-	-
4	4H13	2,2	241	241	63,0	63,0	1,0	40°	190 195 192	666 603 524 502 381	701 701 689
5	4H13	6	1800	1800	63,3	63,3	1,0	40°	213 216 207	578 442 460 404 238	430 450 442
6	4H13	6,5	2100	2100	63,0	63,0	1,0	110°	-	-	-
7	H17N2	5,0	1480	1480	75,0	75,0	1,0	30°	271 271 271	429 454 435 321 241	329 321 332
8	H17N2	6,8	2740	2740	75,0	75,0	1,0	30°	236 236 236	421 409 425 421 270	413 363 366
9	H17	3,5	820	650	84,8	67,2	0,79	30°	-	-	-
10	OH17T	4,0	800	630	63,3	49,8	0,79	30°	213 214 221	205 199 183 169 180	197 191 194

cd. tablicy 13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	H10S2M	10,5	7900	5600	90,7	64,3	0,71	-	262 262 262	627 613 599 478 327	542 493 572
12	1H18N9T	2,0	200	200	63,3	63,3	1,0	180°	-	-	-
13	1H18N9T	4,0	800	800	63,3	63,3	1,0	180°	144 144 146	162 150 144 148 147	183 178 183
14	1H18N9T	6,0	1600	1600	56,3	56,3	1,0	180°	207 223 213	245 242 256 239 239	223 226 216
15	H19N9	2,5	430	340	87,0	68,8	0,79	180°	-	-	-
16	H19N9	3,2	740	590	91,4	72,8	0,80	180°	-	-	-
17	H19N9	5,0	1570	1260	82,5	73,6	0,89	180°	-	-	-
18	H19N9	5,0	1570	1260	99,5	63,8	0,80	180°	280 280 280	164 164 167 219 268	165 208 195
19	H19N9M	3,2	710	570	87,6	70,4	0,80	180°	-	-	-
20	H19N9M	4,0	940	830	74,4	65,7	0,88	180°	286 286 286	175 161 183 265 271	164 178 175
21	H19N9G6T	4,0	1020	880	80,7	69,6	0,86	180°	280 293 290	192 178 164 180 200	175 175 169
22	H25N20S2	2,4	330	330	72,5	72,5	1,0	180°	180 180 180	204 201 187 185 185	206 206 206
23	50H21G9N4	9,5	7500	7500	105,2	105,2	1,0	40°	314 314 314	312 299 302 317 322	317 289 264
24	N12E	3,5	510	500	52,7	51,7	0,98	-	-	-	-

cd. tablicy 13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	NW1	11,0	12200	4100	127,6	42,9	0,34	-	383 380 380	673 592 579 437 370	649 620 673
26	NC6	6,0	2270	770	79,8	27,1	0,34	-	223 223 222	618 579 618 598 429	618 618 618
27	SW7M	2,5	280	280	56,7	56,7	1,0	-	-	-	-
28	SW18	11,0	8800	7200	92,0	75,3	0,82	-	292 292 292	634 813 707 464 306	715 772

Uwaga:

Pozycje kolumny 5 ze wskaźnikiem 1) - złącza podczas próby rozciągania ulegały zniszczeniu w strefie wpływu ciepła.

Pozycje kolumny 5 bez wskaźnika 1) - złącza podczas próby rozciągania ulegały zniszczeniu w materiale podstawowym.

Tablica 14

Zestawienie wyników z prób przeciągania drutów zgrzanych zwarciowo[x)]

Lp.	Oznaczenie stali	Stan drutu przed przeciąganiem	Średnica drutu					Uwagi
			przed przeciąganiem	po pierwszym przeciąganiu		po drugim przeciąganiu		
			ø mm	ø mm	wynik próby	ø mm	wynik próby	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1H13	0	6,0	5,0	dodatni	4,0	dodatni	
2	2H13	0	7,0	6,0	dodatni	5,0	dodatni	
3	3H13	0	2,5	2,0	dodatni	-	-	Mała średnica drutu - drugi raz nie przeciągano

cd. tablicy 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	4H13	0	6,3	5,4	dodatni	4,5	ujemny	Część zgrzein przeszła przez ciągadło. Zniszczenie drutu nastąpiło w materiale wskutek zatrzymania zgrzeiny w otworze roboczym ciągadła na pierścieniu kalibrującym. Charakter zniszczenia - plastyczne, z utworzeniem szyjki w materiale drutu.
5	H17N2	0	8,0	7,0	dodatni	-	-	Drut nie wytrzymuje próby nawijania na bęben ciągarki
6	OH17T	n	3,0	2,5	ujemny	-	-	Następuje zatrzymanie zgrzeiny w otworze roboczym ciągadła. Charakter zniszczenia drutu - plastyczne z utworzeniem szyjki w materiale drutu
7	OH17T	0	3,0	2,4	dodatni	-	-	-
8	1H18N9T	n	4,0	3,2	dodatni	2,8	dodatni	-
9	H19N9	n	4,0	3,2	dodatni	2,8	dodatni	-
10	H19N9M	n	3,2	2,8	dodatni	-	-	Mała średnica drutu - drugi raz nie przeciągano.
11	H19N9G6T	n	4,2	3,2	dodatni	2,8	dodatni	-
12	H25N20S2	n	6,0	-	-	-	-	Nie przeciągano. Drut pękł w pobliżu zgrzeiny podczas próby gięcia. Drut przeznaczono do austenizacji.
13	H25N20S2	0	6,0	4,5	ujemny	-	-	Ciągniono przy względnym ubytku przekroju - 25%. Stosowane jest 10-20% (wg danych literatury).
14	NC6	0	5,5	4,5	dodatni	4,0	ujemny	Wynik próby po drugim przeciąganiu jak w pkt 4.

cd. tablicy 14

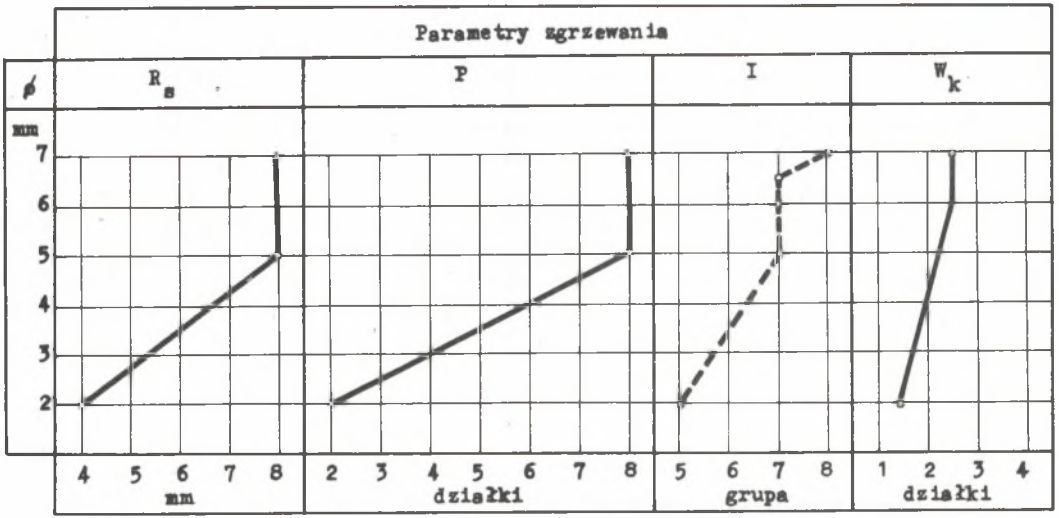
1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	SW7M	0	3,2	2,5	ujemny	-	-	Kruche zerwanie drutu w otworze roboczym ciągadła. Miejsce zniszczenia - strefa wpływu ciepła w pobliżu zgrzeiny.
16	SW18	0	12,0	11,5	dodatni	10,9	ujemny	Wynik próby po drugim przeciąganiu jak w pkt. 15.

Oznaczenia:

0 - drut po zgrzewaniu obrabiany cieplnie w piecu w Hucie Baildon

n - drut po zgrzewaniu nieobrobiony cieplnie

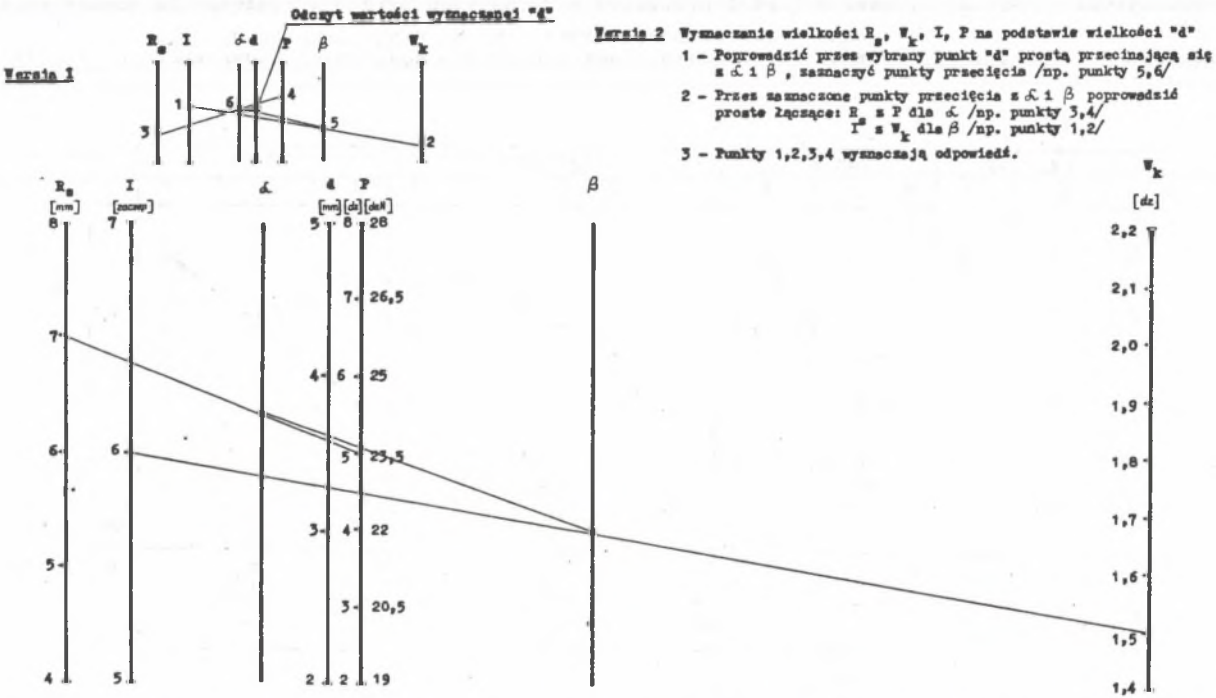
x - długość złącza przeciąganego (o danej średnicy drutu) ok. 2 m, minimalna ilość zgrzein w złączu - 5.



Rys. 16. Wykres do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1 drutów gat. 1H13, 2H13, 3H13, 4H13, H17N2. Zakres średnic zgrzewanych: 2-7 mm

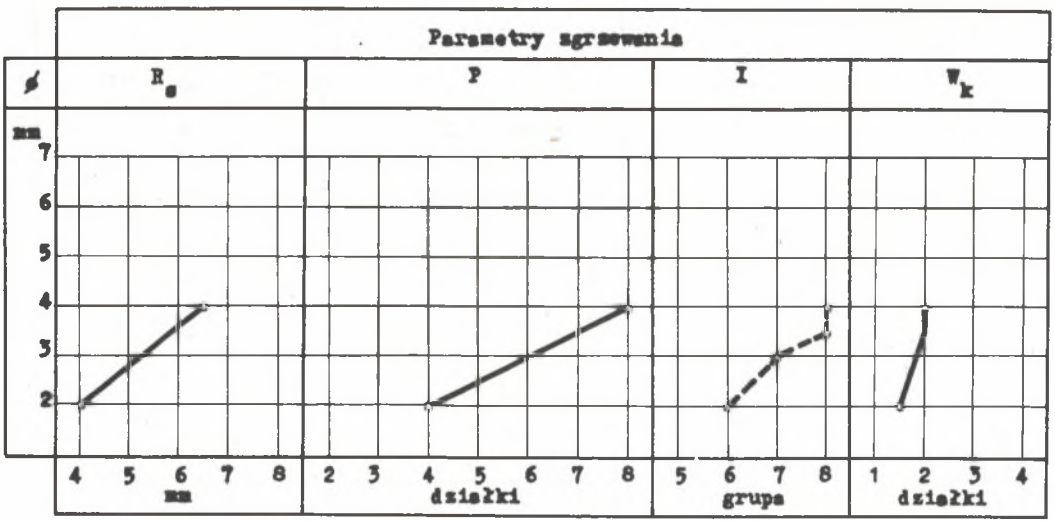
R_s - rozstaw szczęk zgrzewarki, P - siła docisku, I - natężenie prądu zgrzewania (zaczep transformatora - numer), W_k - wyłącznik krańcowy

Sposób stosowania nomogramu

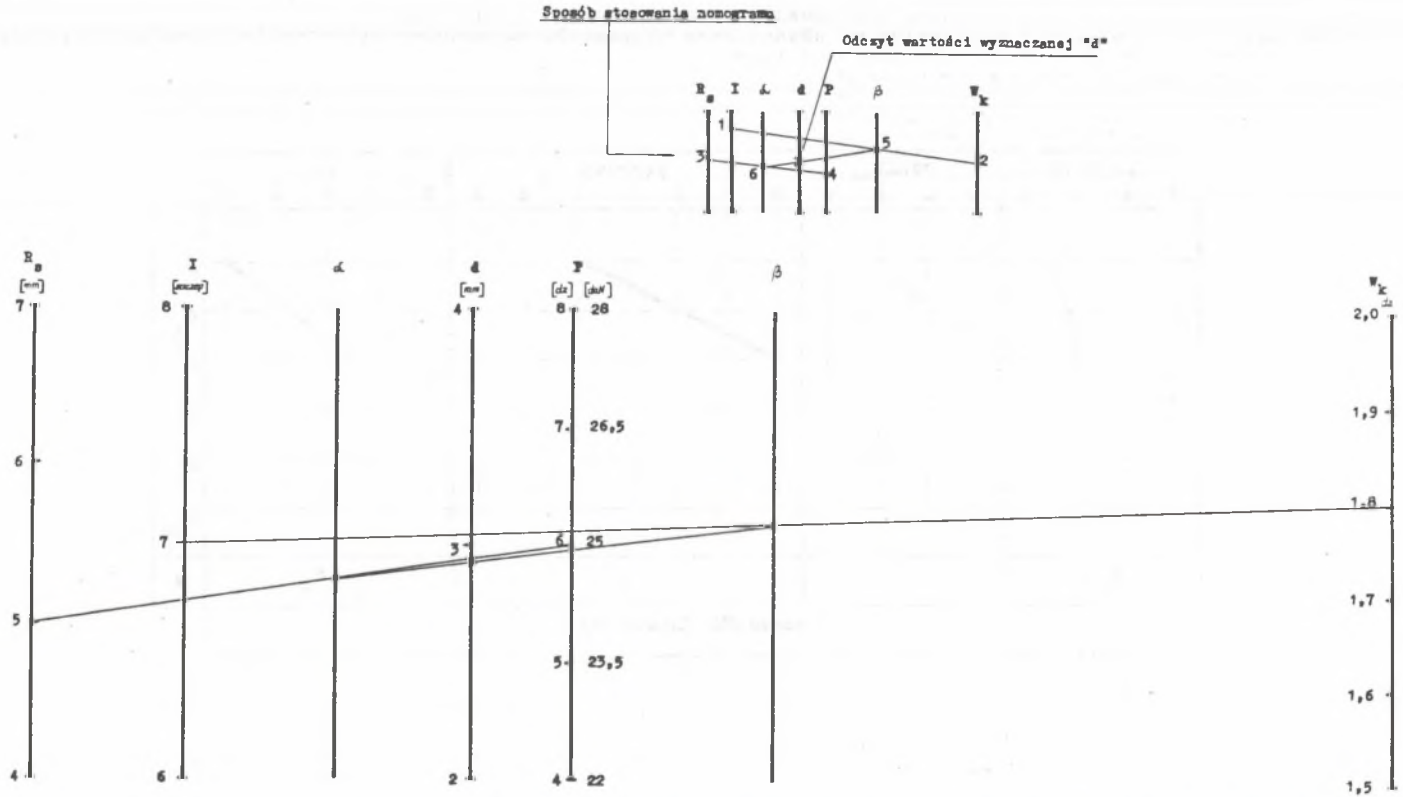


Rys. 17. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunek drutów zgrzewanych: 1H13, 2H13, 3H13, 4H13, H17N2. Zakres średnic zgrzewanych 2-5 mm

Oznaczenia: R_s - rozstaw szczęk w mm, P - siła docisku zgrzewania w działkach nastawianych na zgrzewarce, I - natężenie prądu zgrzewania (zaczep transformatora), W_k - wyłącznik krańcowy w działkach nastawianych na zgrzewarce - rys. 14, d - średnica drutu zgrzewanego w mm (wartość wyznaczona z nomogramu)

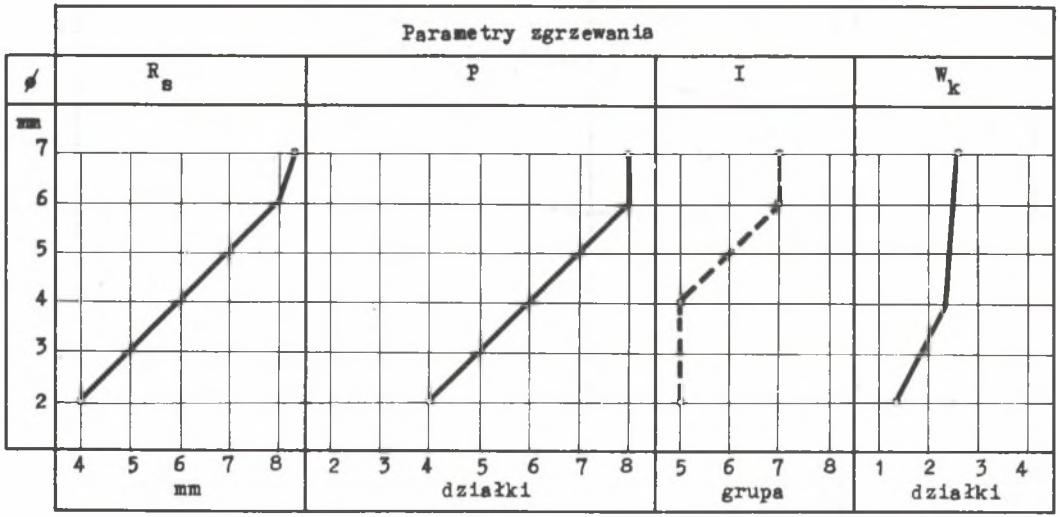


Rys. 18. Wykres do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1 drutów gat. H17, OH17T. Zakres średnic zgrzewanych 2-4 mm

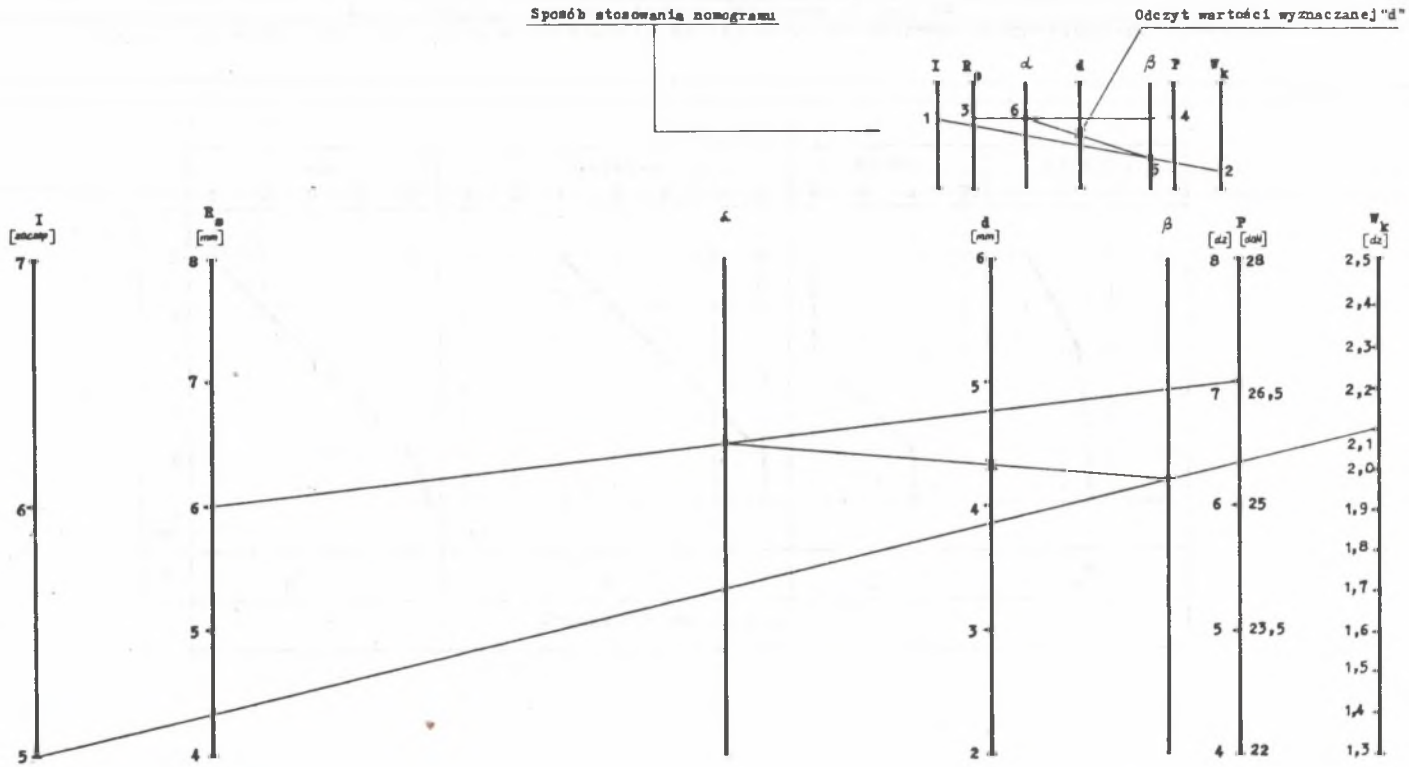


Rys. 19. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunki drutów zgrzewanych: H17, OH17T. Zakres średnic zgrzewanych 2-4 mm

Oznaczenia: jak na rys. 17

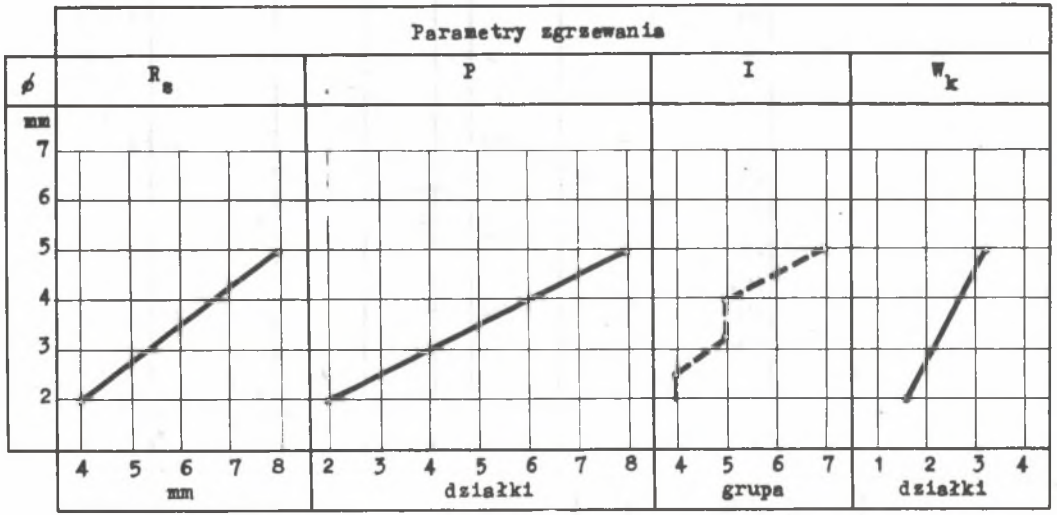


Rys. 20. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1 drutów - gat. 1H18N9T. Zakres średnic zgrzewanych 2-7 mm

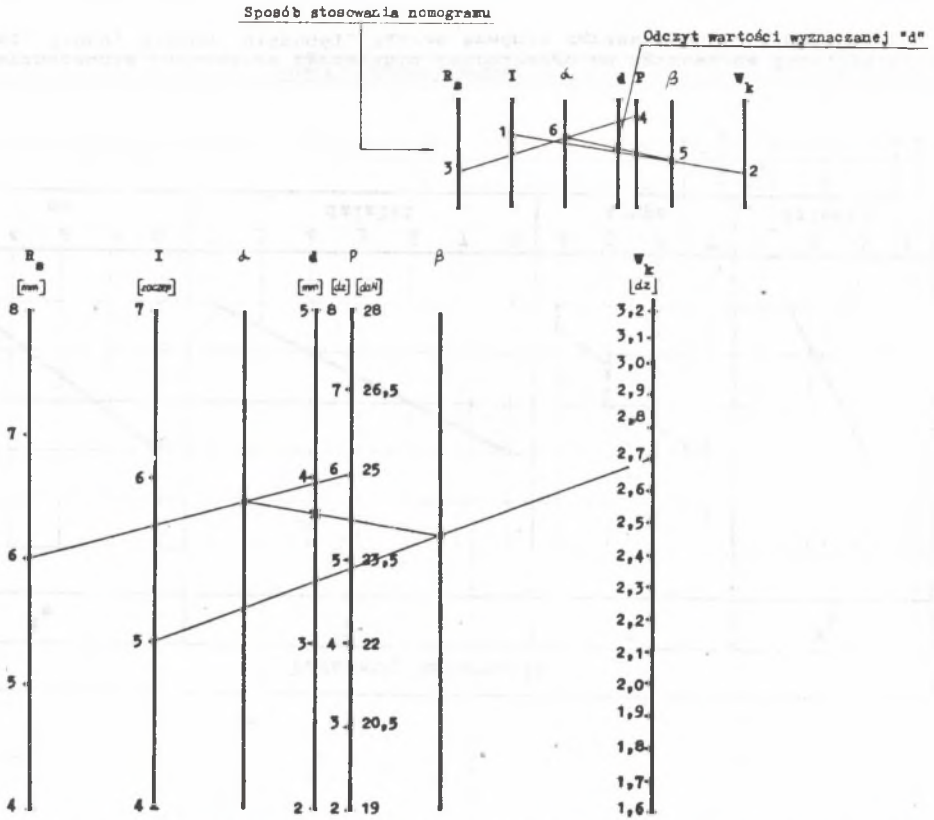


Rys. 21. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych za zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunek drutu stopowego - 1H18N9T. Zakres średnic zgrzewanych 2-6 mm

Oznaczenia: jak na rys. 17

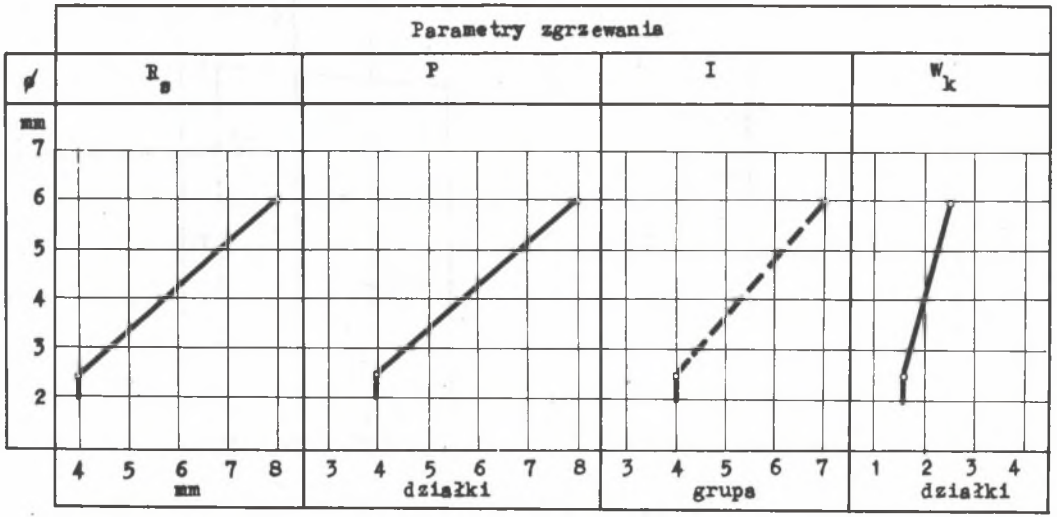


Rys. 22. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1 drutów - gat. H19N9, H19N9M, H19N9G6T. Zakres średnic zgrzewanych: 2-5 mm

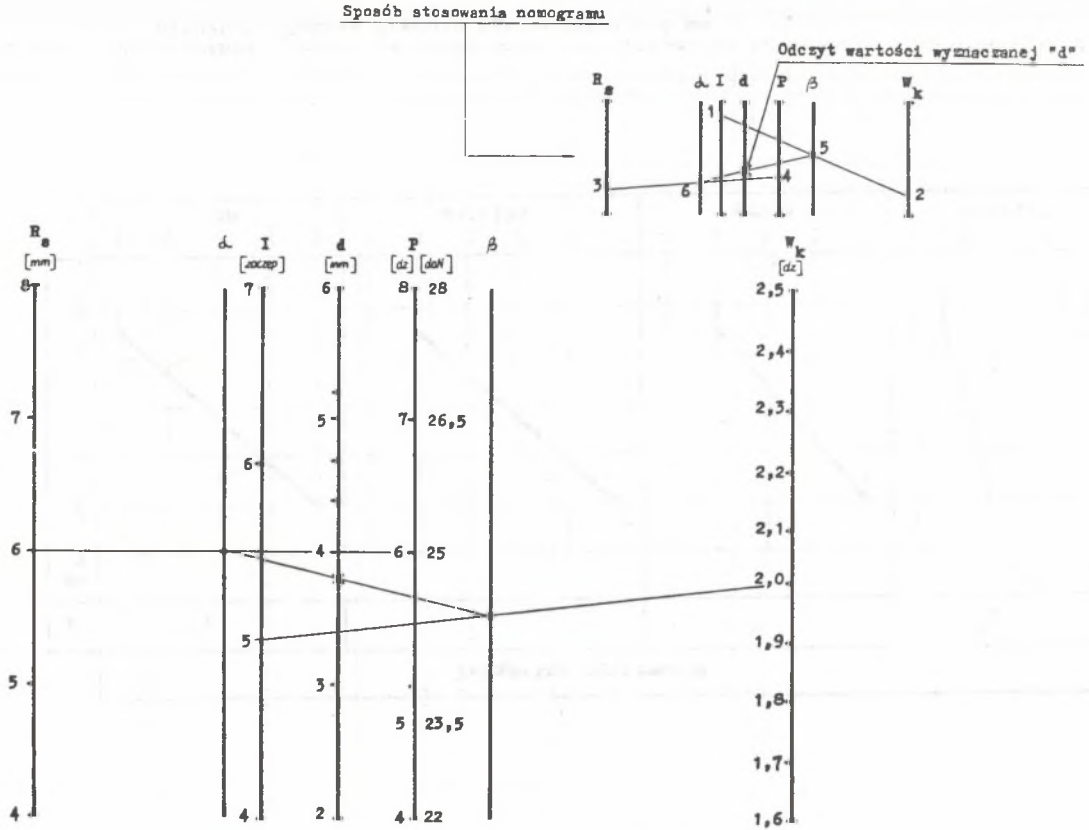


Rys. 23. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunki drutów stopowych: H19N9, H19N9M, H19N9G6T. Zakres średnic zgrzewanych: 2-5 mm

Oznaczenia jak na rys. 17

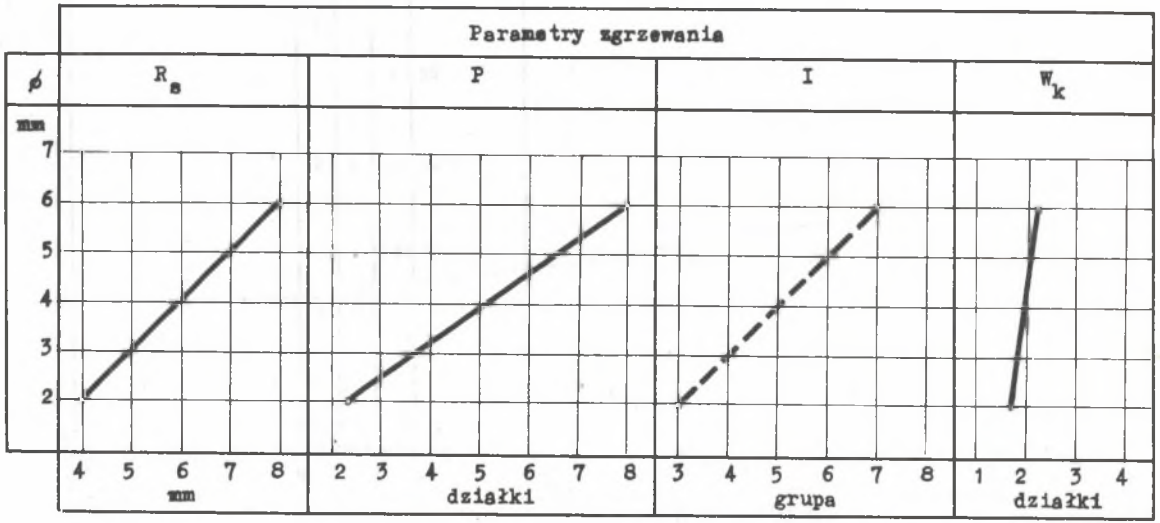


Rys. 24. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-o5-1 drutów - gat. H25N20S2. Zakres średnic zgrzewanych 2-6 mm

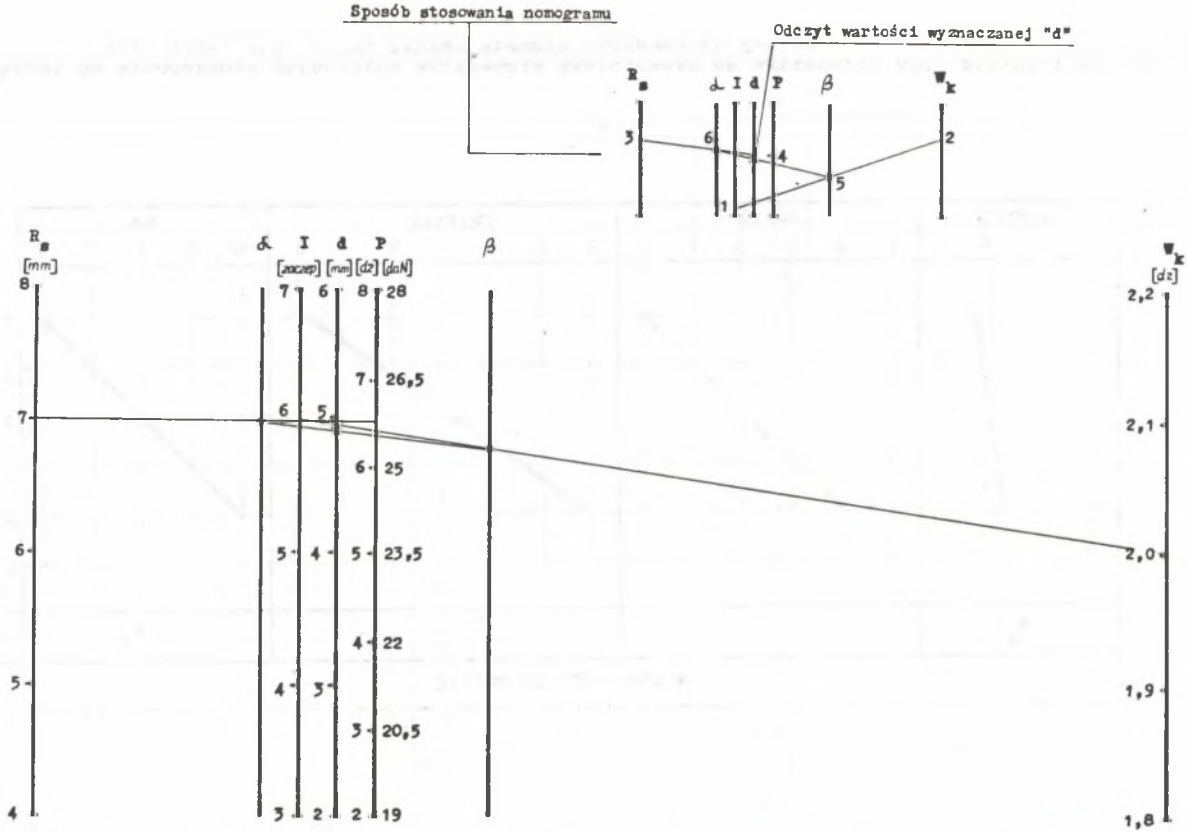


Rys. 25. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunek drutu stopowego: H25N20S2. Zakres średnic zgrzewanych 2-6 mm

Oznaczenia jak na rys. 17

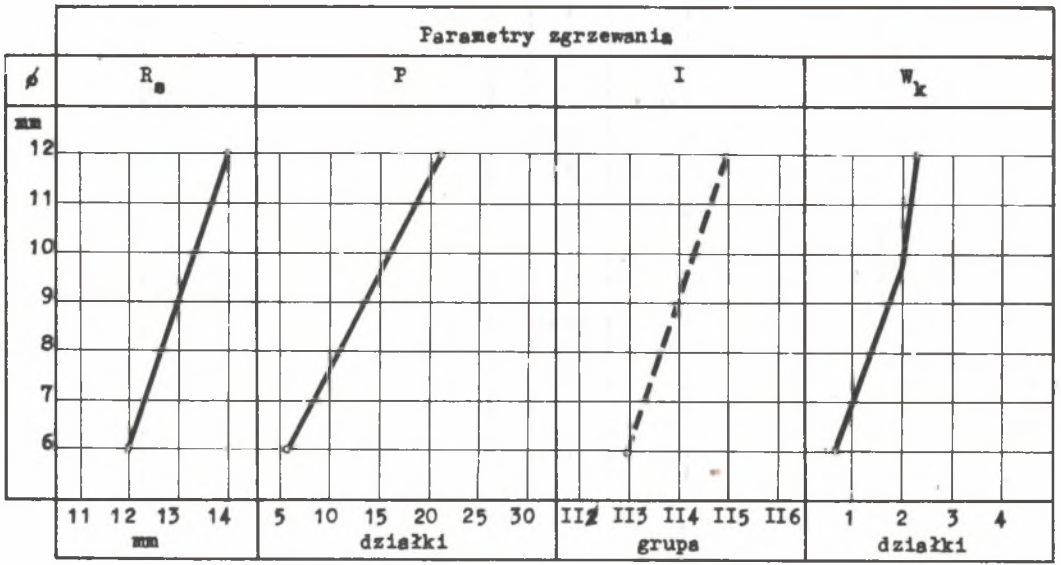


Rys. 26. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1 drutów - gat. N12E, NC6, SW7M. Zakres średnic zgrzewanych 2-6 mm

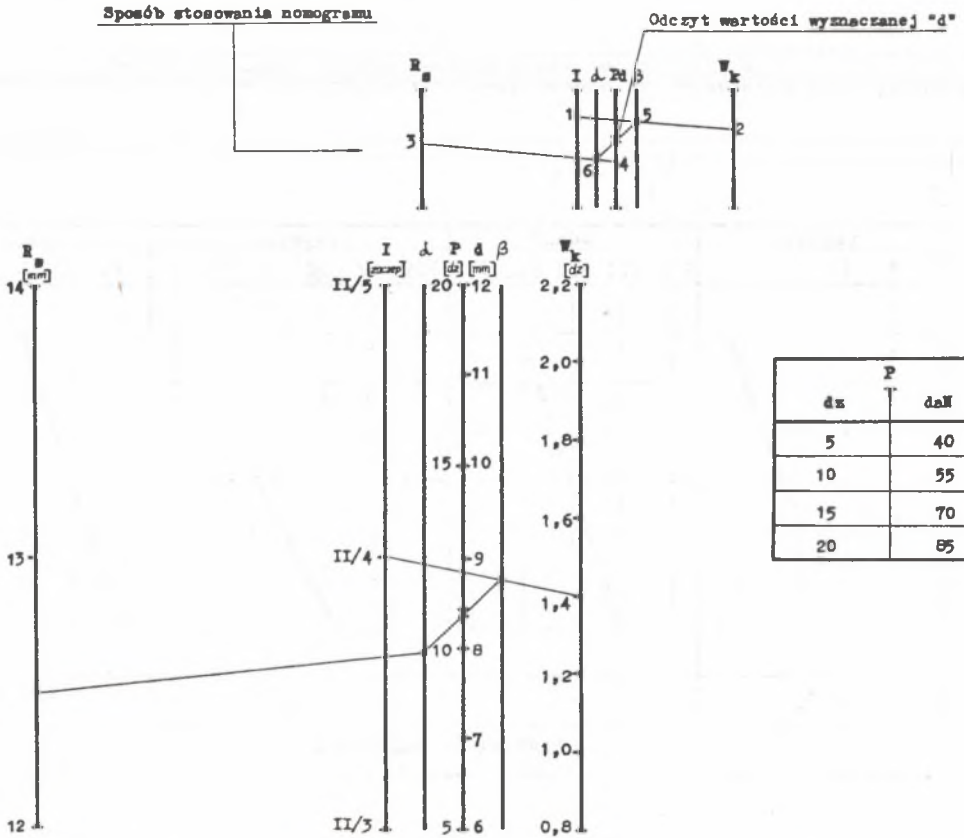


Rys. 27. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1854-05-1. Gatunki drutów stopowych: N12E, NC6, SW7M. Zakres średnic zgrzewanych 2-6 mm

Oznaczenia jak na rys. 17



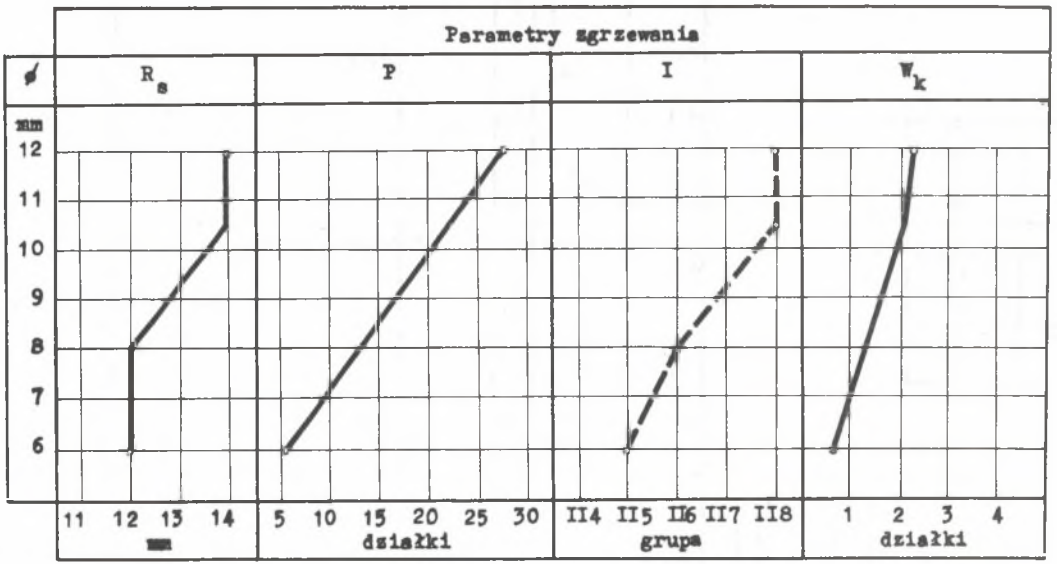
Rys. 28. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1834-05-0 drutów - gat. 50H21G9N4. Zakres średnic zgrzewanych 6-12 mm



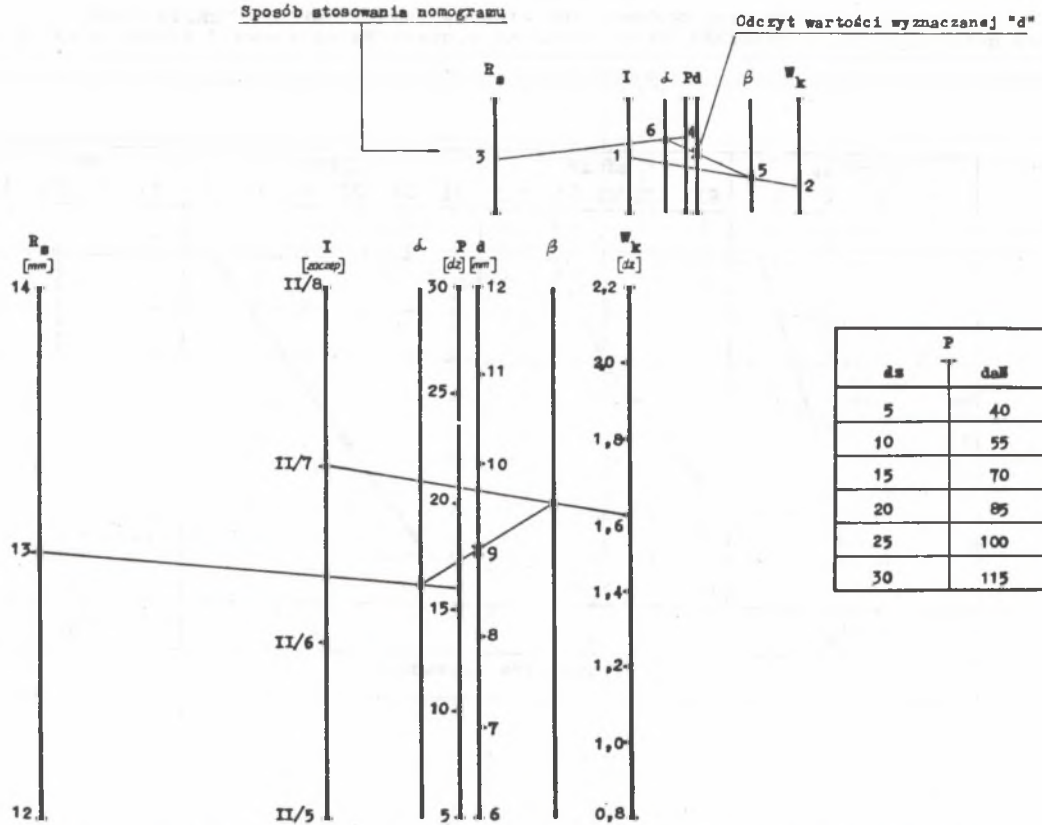
dz	P daN
5	40
10	55
15	70
20	85

Rys. 29. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1834-05-0. Gatunek drutu stopowego: 50H21G9N4. Zakres średnic zgrzewanych 6-12 mm

Oznaczenia jak na rys. 17



Rys. 30. Wykresy do wyznaczania parametrów zgrzewania zwarciowego na zgrzewarce ZDZ-1834-05-0 drutów - gat. H17N2, H10S2M. Zakres średnic zgrzewanych 6-12 mm



P	
ds	daN
5	40
10	55
15	70
20	85
25	100
30	115

Rys. 31. Nomogram do wyznaczania w obszarze eksperymentowania parametrów zgrzewania zwarciowego drutów ze stali stopowych na zgrzewarce ZDZ-1834-05-0. Gatunek drutów stopowych: H17N2, H10S2M. Zakres średnic zgrzewanych 6-12 mm

Oznaczenia jak na rys. 17

6. ANALIZA I OMÓWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

6.1. Analiza doświadczalnego badania i poszukiwania najlepszych parametrów zgrzewania

Przyjęta metodyka badań wynika z trzech następujących aspektów analizy zagadnienia opracowywania parametrów zgrzewania:

- z aspektu specyfiki doświadczenia wykonywanego w warunkach techniki zgrzewania,
- z aspektu poszukiwania technicznie uzasadnionych parametrów zgrzewania, tzw. optymalnych,
- z aspektu kategorii optymalności.

B a d a c z na co dzień związany jest z doświadczeniem, którego realizacja nie wynika jednak z teorii eksperymentu ale z intuicji i fachowości. Reprezentowana jest tu przede wszystkim praktyczna strona zagadnienia, mniej analityczna. Pomimo istnienia w literaturze (rys. 32) już dość obszernego przeglądu zasad, metod optymalizacji i teorii planowania doświadczeń stan zastosowania w kraju tych metod do rozwiązywania technologicznych zagadnień z zakresu zgrzewania należy uznać za wciąż niewystarczający.

Doświadczenie bazuje na elementach biernych a nie czynnych,a ciąg przyjętych kroków poszukiwania najlepszych rozwiązań tworzy pewną klasę szablonów i klasę postępowania odzwierciedlających wspomnianą sferę intuicji (szacowanie dodatnich i ujemnych skutków zamierzonego wyboru).

Z całym naciskiem należy stwierdzić, że tworzony "szablon" jest strukturalnie prosty, przez co po części spełnia podstawowy wymóg praktyki, jakim jest niezłożoność algorytmów postępowania, nie ogarnia jednak zagadnienia wielowymiarowości. Ponadto ogólną cechą obserwacji nieukierunkowanej jest jej niekompletność, brak systematyczności, niedokładność i wymienione elementy mogą w mniejszym lub większym stopniu wpływać na organizację doświadczenia.

Przeważnie w doświadczeniu zgrzewalniczym realizowane są procedury relaksacyjne, oparte na metodzie Gaussa-Zajdla - rys. 33.

Przeciw szeroko stosowanej procedurze postępowania tzw. Gaussa-Zajdla wysuwa się obecnie następujące zarzuty [28, 14, 6, 51]:

- dużą pracochłonność, związaną z poszukiwaniem wartości parametru optymalnego,

- trudność uwzględnienia rozrzutu własności jakościowych połączeń, wynikających z różnego stanu przygotowania powierzchni do zgrzewania, niejednorodności materiałowej, nierównomierności oporności styku itp.,
- trudności przeniesienia opracowanego wyniku na inne podobne zgrzewarki itp.

Próby analitycznego uzasadnienia metod intuicyjnych związane są z dużymi trudnościami natury teoretycznej. W większości przypadków trafność wnioskowania intuicyjnego nie jest przypadkowa; wypracowuje się ją na podstawie dużego doświadczenia praktycznego. Ponadto rozwiązania intuicyjne są zawsze nieodłącznym atrybutem każdego badacza. Istnieją jednak często sytuacje wymagające uwzględnienia w krótkim czasie dużej liczby wyników, których wstępna selekcja intuicyjna jest utrudniona, względnie niemożliwa.

Istotą doświadczenia jest również i to, że na wynik końcowy mają wpływ czynniki losowe, istnienie których utrudnia w poważnym stopniu rozwiązanie zadania. Doświadczeniu towarzyszy zawsze element niepewności. Dąży się do uzyskania takiego punktu odniesienia, w którym następowałaby zmiana niepewności na prawie pewność. Przemawia to już za potrzebą posługiwania się zalgorytmizowaną metodą analizowania zjawisk i procesów.

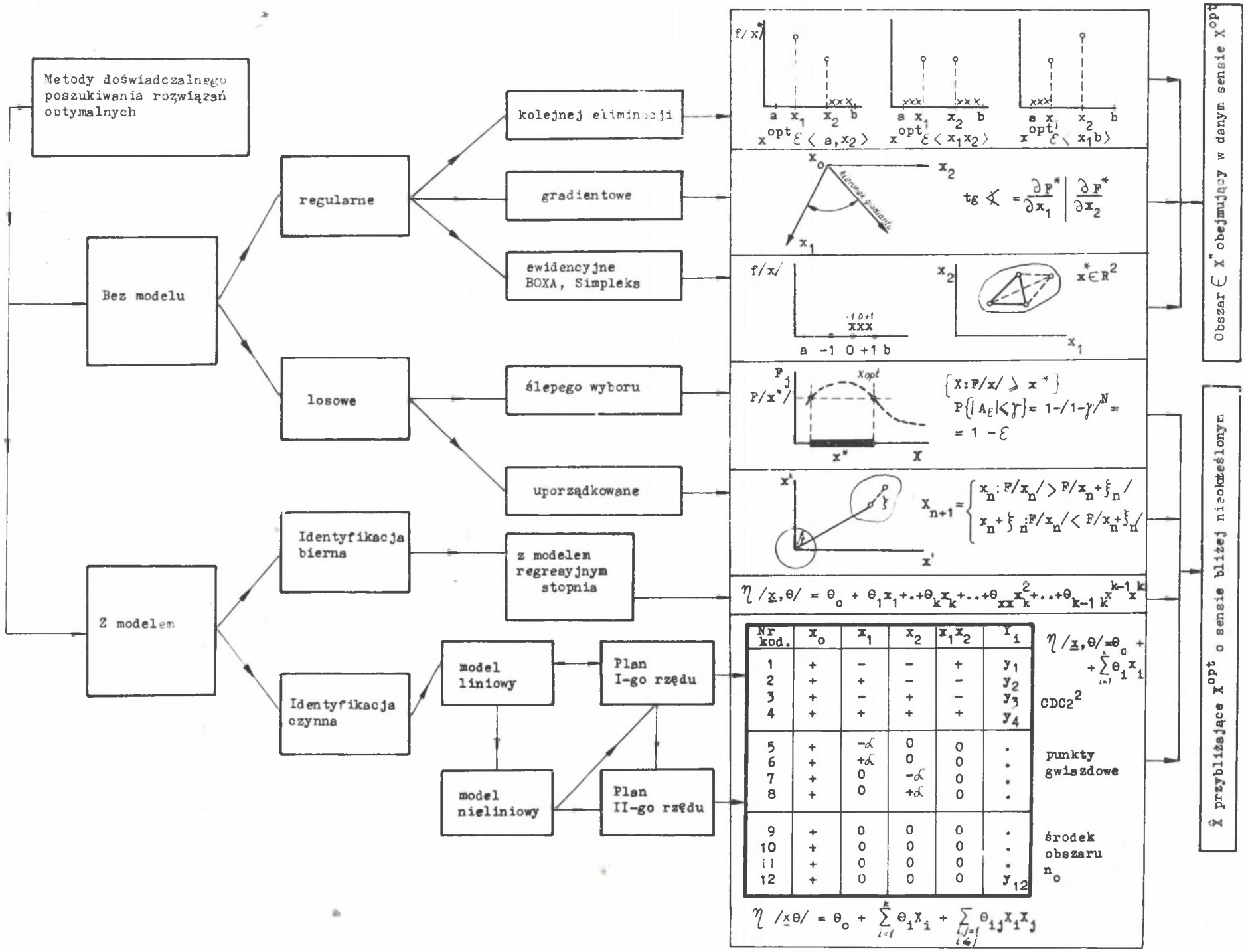
T e c h n o l o g nie zna funkcji odpowiedzi. W wyniku prowadzonych doświadczeń może sobie wyrobić jedynie pogląd o stopniu złożoności zagadnienia. Wszystko zależy od tego, w jakim czasie uda się "uchwycić" rozwiązanie.

Poszukiwaniom towarzyszy: wymieniona już sfera intuicji, sfera skrajnej fachowości oraz brak wątku analizy w sensie ukierunkowania matematycznego.

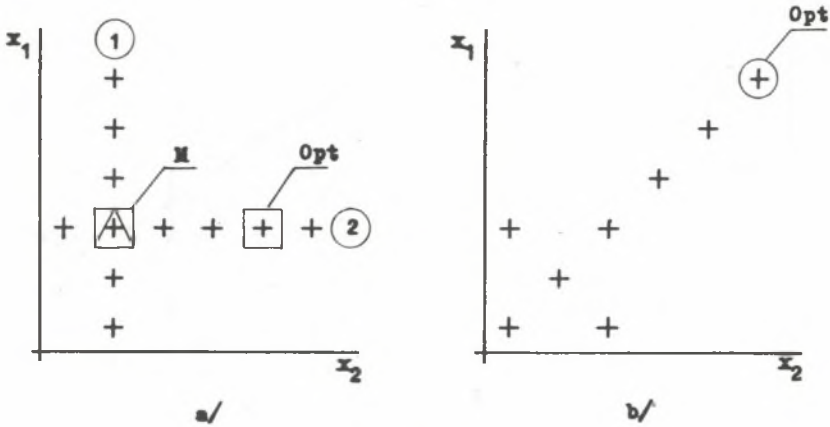
Przyjmowane rozwiązania x^*, uznawane za korzystne, odbiegają od rzeczywistego x_{opt}, który jest poszukiwany (x^* jest przybliżeniem x_{opt}) - rys. 34.

Przy precyzowaniu kryterium jakości (lub kryteriów) funkcja odpowiedzi $F(x^*)$ nie zawsze spełnia warunek globalności, na co należy zwracać uwagę, może "wpadać" w lokalność; zależy to od głębokości δ, a wręcz dokładności określenia kryterium jakości. Dotarcie do punktu x_{opt} teoretycznie może nastąpić w trakcie wykonywania nieskończonej liczby kroków, natomiast dotarcie do wystarczająco małej odległości od niego wymaga tylko ograniczonych wysiłków, a więc skończonej ilości kroków (rys. 35), co posiada duże znaczenie praktyczne.

Nieznajomość funkcji odpowiedzi oraz losowość doświadczenia determinują całość zagadnienia. Trudno jest mówić o poszukiwaniu "optimum" a kategoriach analitycznych, tj. ścisłym dochodzeniu do ekstremem; zagadnienie rozwiązywalne jest w kategoriach korelacyjnych. Przy zadanych kryteriach jakości zadania optymalizacyjne z zakresu zgrzewania kończą się na zabezpieczaniu ekstremem wybranego kryterium.

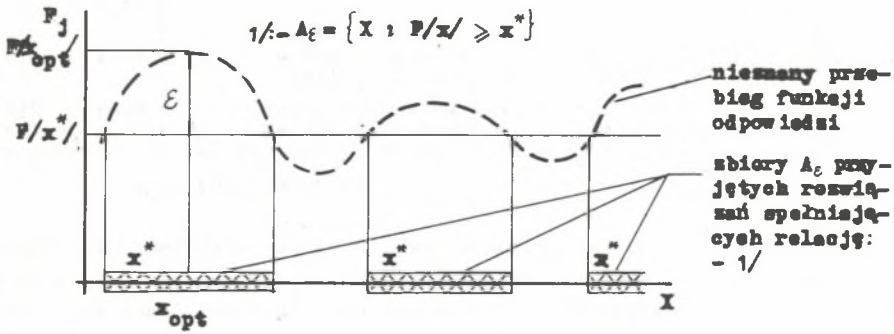


Rys. 32. Metody doświadczalnego poszukiwania najlepszych rozwiązań [19, 37, 75, 14, 6, 30, 38, 51]



Rys. 33. Krokowe procedury wyznaczania optimum "opt" na przykładzie dwóch zmiennych x_1, x_2 [51]

a) parametry zmieniane 1 i 2; po znalezieniu optimum "M" parametru 1 poszukuje się optimum parametru 2, b) metoda wyboru najbardziej interesującego kierunku wyznaczania "Opt"

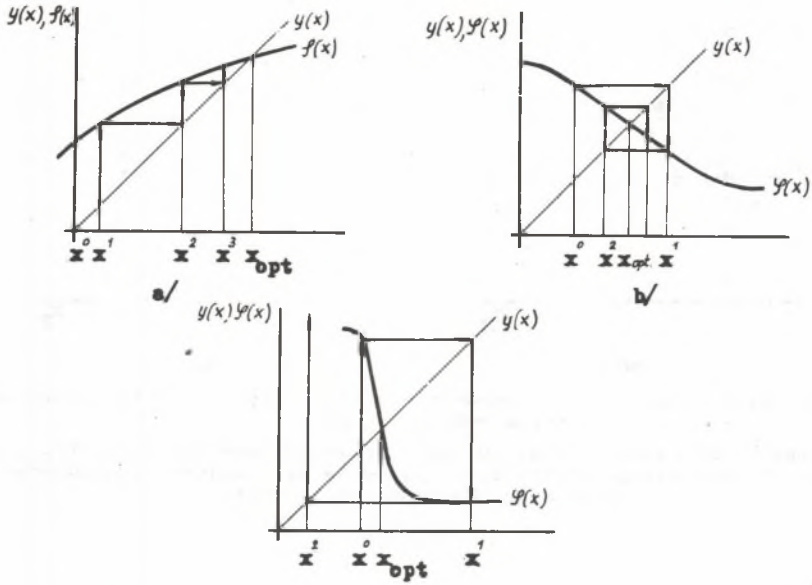


Rys. 34. Schemat poszukiwania x_{opt} w procesie badawczym [75]

Oznaczenia: x^* - zbiór wartości zadowalających poszukiwanie, x_{opt} - rzeczywista wartość optymalna poszukiwana, $F(x^*)$ - funkcja odpowiedzi - minimum kryterium jakości

Rozpatrzone, przez porównanie z literaturą, zagadnienie w trzech poziomach odniesienia niejako wypunktowuje listę niedociągnięć warsztatu technologa w zakresie doświadczalnych metod poszukiwania najlepszych rozwiązań, uściślając równocześnie znaczenie tych pojęć użytych jako istotnych w formułowaniu i rozwiązywaniu tematu pracy.

Przyjęta we wstępie koncepcja prowadzenia badań wiąże się ze współczesną procedurą poszukiwania, z planowaniem eksperymentów jako aktywnym narzędziem oddziaływania na badaną rzeczywistość.



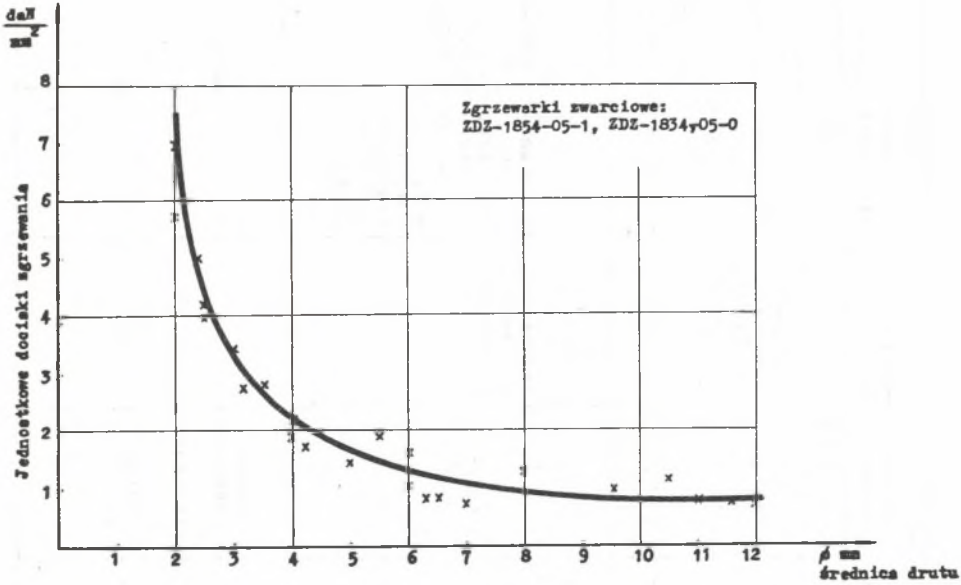
Rys. 35. Geometryczne konstrukcje ilustrujące proces przybliżania się do punktu optymalnego x_{opt} [55]
a) proces szukania jako linia łamana wpisana między wykresy funkcji $\varphi(x)$ i $y(x)$ będące składowymi procesu szukania, b) proces szukania w postaci spirali, c) proces szukania w postaci rozchodzącej się spirali. Oznaczenia: x^o, x^1, x^{n+1} kolejne punkty dochodzenia do x_{opt}

Zaproponowany w pracy cykl badania, oparty na zorganizowanym działaniu podczas opracowywania tzw. optymalnych parametrów zgrzewania wg rys. 3, w znacznym stopniu upraszcza cykl wyznaczania quasioptimum i umożliwia badaczowi przybliżyć się do poszukiwanego rozwiązania przy zrealizowaniu stosunkowo niewielkiej ilości prób i przy informacji co do sposobu kolejnego postępowania (tablica 6, rys. 9). Obszar badany zaplanowany jest z góry, co wyklucza chaotyczność postępowania.

W doborze parametrów zgrzewania, istotne znaczenie posiada eksperyment sterowany (czynny) (tablica 4). Planowanie eksperymentu w powiązaniu z elementami sekwencyjnego badania powierzchni odpowiedzi powinno znaleźć szerokie zastosowanie w pracach technologicznych z zakresu zgrzewania, jako nieskomplikowany sposób względnie szybkiego przybliżania się do obszaru odpowiedzi poszukiwanej. Etapy postępowania przy doświadczalnym poszukiwaniu najlepszych rozwiązań umożliwiają zalgorytmizować cykl badania powierzchni odpowiedzi (tablica 7).

6.2. Zagadnienie zgrzewania stali stopowych na podstawie wyników badań

Stale użyte do badań obejmują gatunki zróżnicowane zarówno pod względem procentowej zawartości węgla jak i składników stopowych (tablica 9). Podział ww. stali wg ich zastosowania i przeznaczenia obejmuje w zasadzie dwie podstawowe grupy: stale wysokostopowe (nierdzewne, kwasoodporne, żaroodporne, zaworowe) oraz stale narzędziowe (węglowe i stopowe). Gdyby utrzymać ww. podział stali jako pierwsze przybliżenie w ocenie warunków doboru parametrów zgrzewania, własności mechanicznych i technologicznych złączy, uzyskuje się podobieństwa i różnice cech technologicznych jak zestawiono w tabl. 15.



Rys. 36. Kształtowanie się jednostkowych sił docisków zgrzewania dla badanych stali stopowych na zgrzewarkach ZDZ w zależności od średnicy drutów zgrzewanych

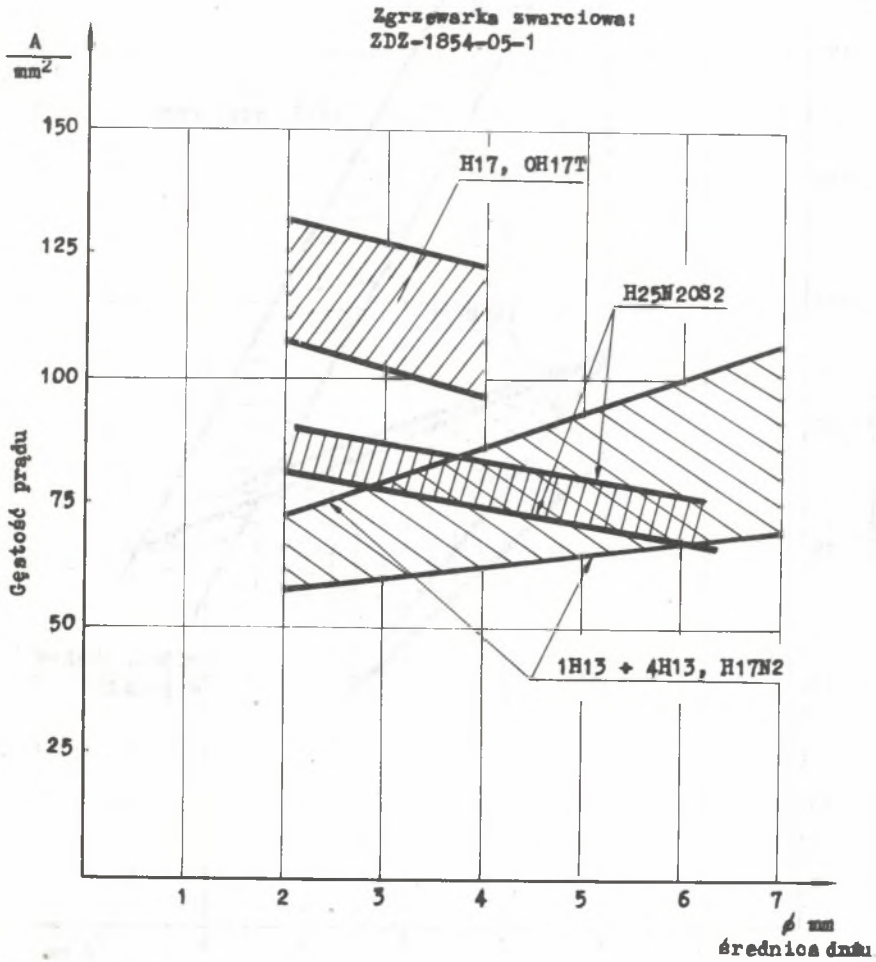
Badane stale, jak wynika z tablicy 15 w przeważającej większości charakteryzują różnice cech technologicznych, mniej podobieństwa. Podobieństwa występują tylko w kształtowaniu się docisków jednostkowych (rys. 36) i długości wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki (tablica 19). Szczegółowa analiza gęstości prądu zgrzewania (rys. 37-39) wykazuje silne zróżnicowanie tej wielkości w zależności od grupy strukturalnej stali stopowej.

Tablica 15

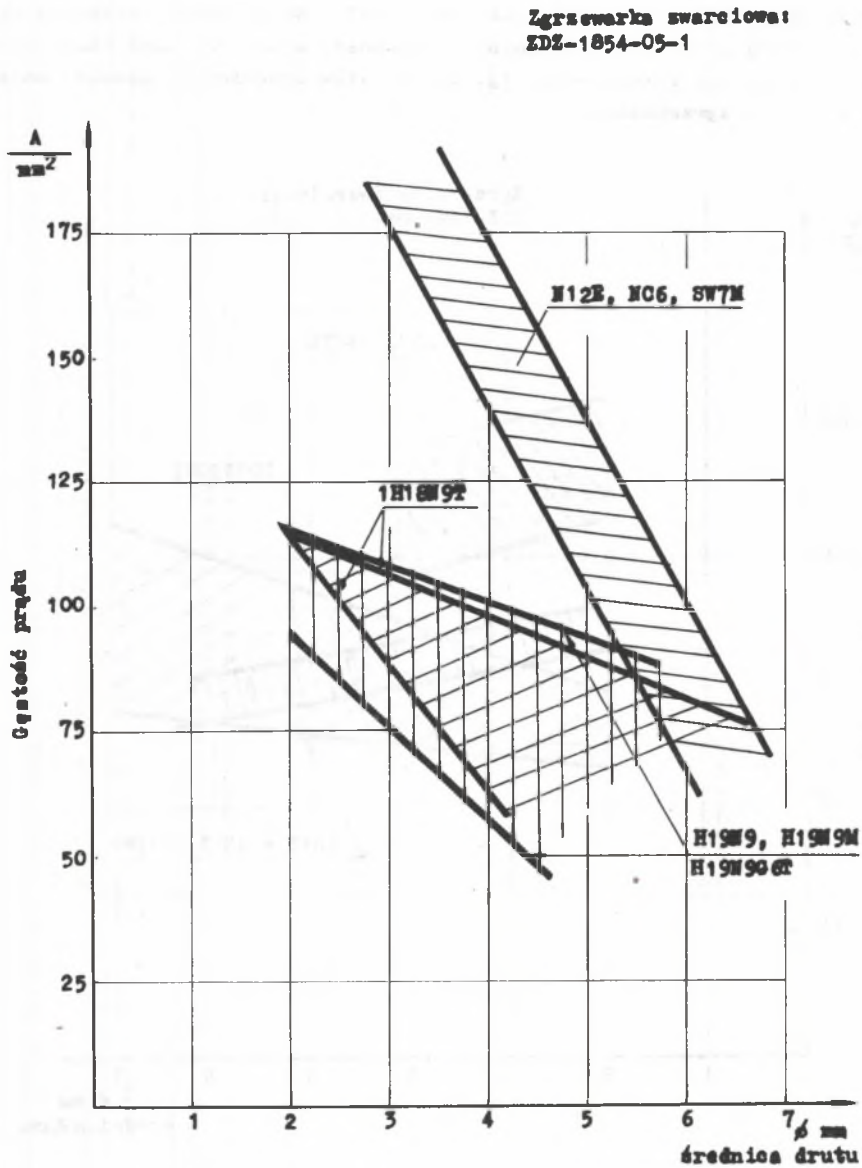
Ocena zgrzewalności stali na podsdawie kryteriów technologicznych

Lp.	Podział stali według zastosowania i przeznaczenia	Charakterystyka zgrzewania wg kryteriów technologicznych						
		Warunki doboru parametrów zgrzewania			Własności mechaniczne i technologiczne złączy			
		Docisk jednostkowy	Gęstość prądu zgrzewania	Długość wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki	Skłonność do rozrostu ziarna	Struktura złączy na podstawie rozkładu twardości		Możliwość przeciągania złącza
						Hmax swc / H mat	Hmax swc / H zgrzeiny	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Stale wysokostopowe	Zbliżony do materiału obu grup stali w zakresie badanych średnic Ø 2-12 mm - rys. 36	Silnie zróżnicowana, zależna od grup strukturalnych stali	Można ująć jedną zależnością empiryczną - tablica 19	Istnieje zarówno w zgrzeinie jak swc. Nie zauważono w stalach gat. 1H18N9T H19N9G6T 50H21G9N4 H20S2M	Zróżnicowana, szczególnie w przypadku stali gat. 4H13 H10S2M	Zróżnicowana	W większości gatunków stali istnieje lub istnieje ograniczona
2	Stale narzędziowe		Zbliżona o charakteodwrotnie proporcjonalnym do średnicy drutu		Istnieje	Silnie zróżnicowana	Zróżnicowanie prawie nie występuje ze względu na duże twardości swc i zgrzeiny	Bez specjalnej obróbki cieplnej po zgrzewaniu złącza nie przeciągają się

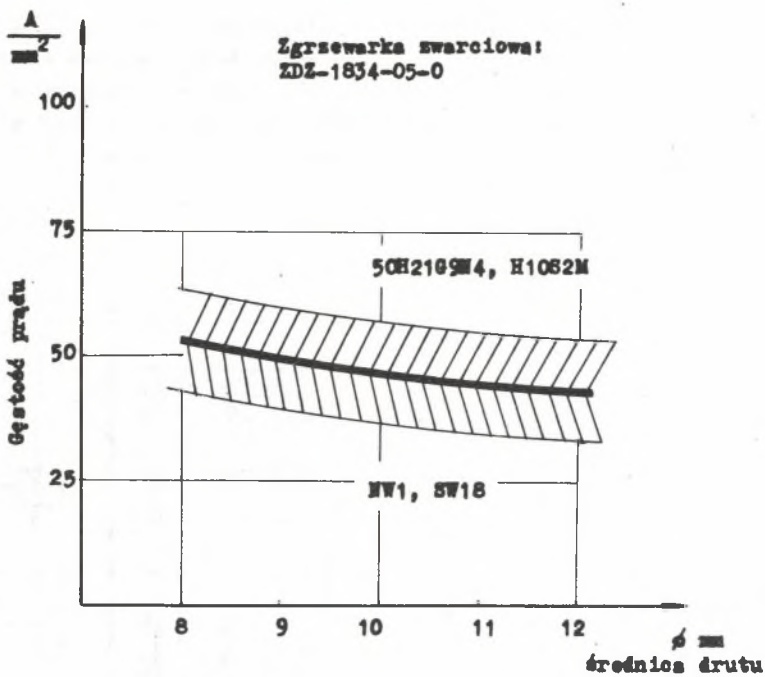
Wąskim zakresem doboru tej wielkości charakteryzują się stale narzędziowe i stal stopowa gat. H25N20S2 (rys. 37 i 38), znacznie większym pozostałe grupy stali. Jedynie stale gat. 1H13 - 4H13, H17N2 wykazują proporcjonalność gęstości do średnicy zgrzewanej, wszystkie inne charakteryzują się odwrotną zależnością, tj. ze wzrostem średnicy zgrzewanej maleje gęstość prądu zgrzewania.



Rys. 37. Kształtowanie się gęstości prądu zgrzewania w zależności od średnicy zgrzewanych drutów i badanych stali stopowych



Rys. 38. Kształtowanie się gęstości prądu zgrzewania w zależności od średnicy zgrzewanych drutów i badanych stali stopowych



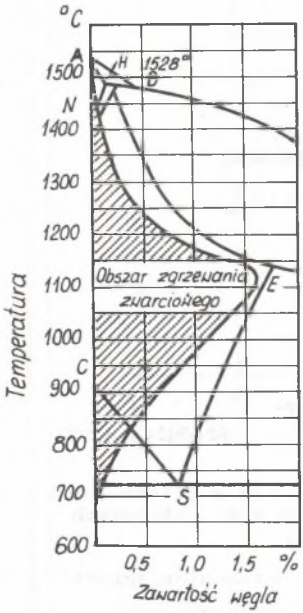
Rys. 39. Kształtowanie się gęstości prądu zgrzewania w zależności od średnicy zgrzewanych drutów i badanych stali stopowych

W trakcie badań wyróżniono sześć grup doboru parametrów zgrzewania stali, a to:

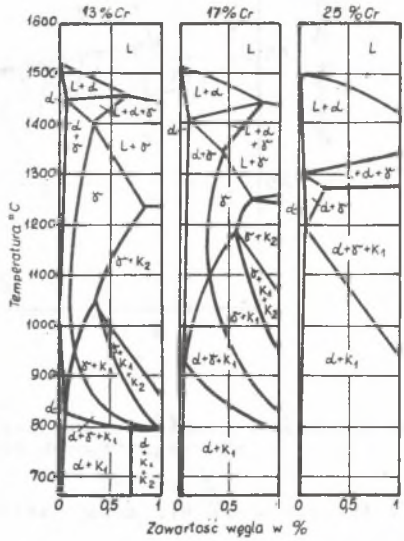
- 1H13, 2H13, 3H13, 4H13, H17N2 - rys. 16,
- H17, OH17T - rys. 18,
- 1H18N9T - rys. 20,
- H19N9, H19N9M, H19N9G6T - rys. 22,
- H25N20S2 - rys. 24,
- N12E, NC6, SW7M - rys. 26.

Rys. 39 stanowi rozszerzenie wykresów zestawionych na rys. 37 i rys. 38. Każdemu wykresowi z rys. 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 przyporządkowano nomogram do wyznaczania (w obszarze eksperymentowania) parametrów zgrzewania zwarciowego drutów na określonej zgrzewarce. Cechą charakterystyczną opracowanych nomogramów jest pewna dowolność i elastyczność w doborze wielkości parametrów; należy się nimi posługiwać przy opracowywaniu szczegółowych danych do zgrzewania. Dotyczy szczególnie to tych przypadków, kiedy technolog z uwagi na ograniczenia technologiczne nie ma możliwości określonego postępowania względnie schematycznego, a zalecane parametry są trudne do "przetransportowania" na wejście zgrzewarki. Danymi wyjściowymi do nomogramu są: zaczep transformatora zgrzewarki, nastawienie wyłącznika

krańcowego w działkach, rozstaw szczęk w milimetrach, siła docisku zgrzewania w dekaniutonach. Na podstawie wyżej wymienionych danych wyznacza się średnicę drutu zgrzewanego. Można odwrotnie postępować, na podstawie przyjętej średnicy drutu przeznaczonego do zgrzewania wyznacza się parametry zgrzewania zgodnie ze schematem postępowania podanym na rys. 17.



Rys. 40. Wpływ temperatury i składu chemicznego na zgrzewalność stali węglowych [12]



Rys. 41. Przekroje pionowe układu Fe-Cr-C dla stałych zawartości chromu 13% i 17% [36]

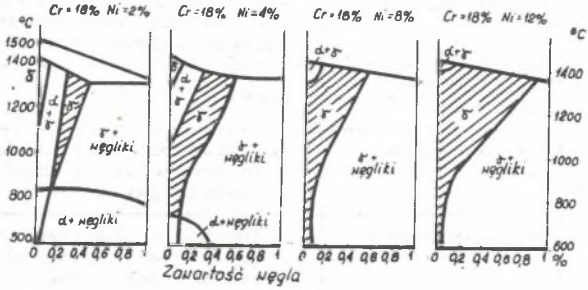
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że ogólną cechą charakteryzującą badane gatunki stali jest przede wszystkim ich różna i utrudniona zgrzewalność np. w porównaniu do stali niskowęglowych. Badane stale odznaczają się wąskim zakresem doboru parametrów zgrzewania, przy czym dobór parametrów jest szczególnie utrudniony ze względu na reprezentowane przez nich własności i struktury.

Pojęcie dobrej zgrzewalności wiąże się niewątpliwie z istnieniem dużego zakresu pola austenitu γ (rys. 40), małą różnicą temperatur topnienia i krzepnięcia danego stopu oraz wysokimi własnościami plastycznymi w wysokich temperaturach [12, 13].

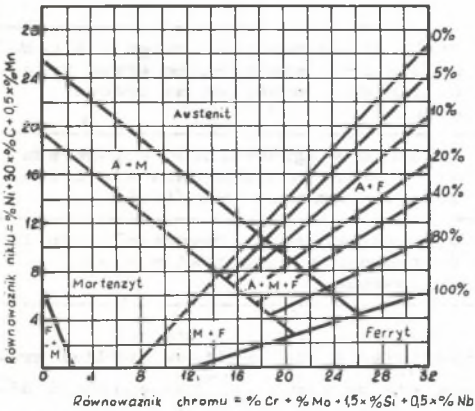
Stale stopowe chromowe w zależności od procentowej zawartości chromu i węgla są martenzytyczne lub ferrytyczne. Przy zawartości 13% Cr, jak wynika z rys. 41, nawet najniższe zawartości węgla nie zapewniają stabilności struktury ferrytycznej w całym zakresie temperatur. Pomiędzy 1000 a 1100°C

występuje w stopach, praktycznie nie zawierających węgla, zakres dwufazowy, rozszerzający się w miarę wzrostu zawartości węgla.

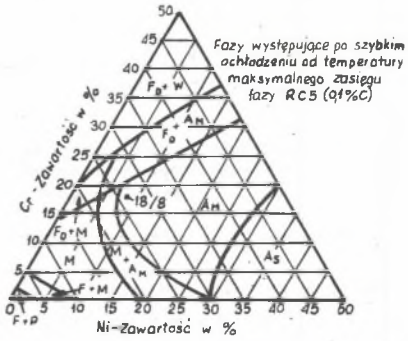
Przy zawartości węgla ok. 0,1% pojawia się zakres jednorodnego austenitu, umożliwiając hartowanie takich stopów na martenzyt. W stalach chromowych przy zawartości 17% Cr i bardzo niskich zawartościach węgla (poniżej 0,065%) występuje zakres, w którym ferryt jest fazą stabilną od temperatur niskich aż do linii solidusu. Przy większych zawartościach węgla występuje zakres dwufazowy $\alpha + \gamma$ [61, 35, 36, 67].



Rys. 42. Wpływ niklu na obszar γ w stali z 18% Cr [67]



Rys. 43. Przegląd struktury stali stopowych w zależności od zawartości pierwiastków stopowych [35]



Rys. 44. Struktury stopów Fe-Cr-Ni po oziębieniu od temperatury największego zasięgu austenitu [36]

Powszechnie stosowane stale austenityczne są głównie modyfikacjami pierwotnego składu 18-8 [61, 36, 67]. Gatunki austenityczne chromowo-niklowe (1H18N9T, H19N9, H19N9M, H18N9G6T) różnią się przede wszystkim zawartością węgla i ilością modyfikacji stopowych (Mn, Si, Mo, Ti). Przy niskiej zawartości węgla stale te posiadają jednorodną strukturę austenityczną.

Tablica 16

Schemat kształtowania się zgrzewalności operatywnej stali (zgrzewanie zwarciowe)

Grupa strukturalna	Rodzaj stali	Zgrzewalność
1	2	3
Półferrytyczna	Średniostopowa	Skłonność do rozrostu ziarn. Stal zgrzewalna przy zastosowaniu specjalnych cykli zgrzewania
Ferrytyczna	Wysokostopowa	Stale bardzo wrażliwe na przegrzanie, skłonne do rozrostu ziarn w strefie wpływu ciepła - SWC
Perlityczna	Niskowęglowa (max 0,25% C)	Dobra
	Średniowęglowa 0,25 < C% ≤ 0,5	Skłonność do hartowania się stali i do tworzenia pęknięć zarówno w zgrzeinie jak i SWC
	Wysokowęglowa >0,5% C	Skłonność do hartowania się stali i do tworzenia pęknięć zarówno w zgrzeinie jak i SWC
	Niskostopowa max 0,3% C do 3% dodatków stopowych	Skłonność do hartowania się stali i możliwość pojawiania się pęknięć
Martenzytyczna	Średniostopowa	Stale po zgrzewaniu wymagają obróbki cieplnej szczególnie przed przeciąganiem - wrażliwe na procesy cieplne
Austenityczna	Wysokostopowa	Utrudniona zgrzewalność - pogarsza się w miarę zmniejszania się ilorazu równoważników [Ni]/[Cr]
Ledeburytyczna	Wysokostopowe - szybkotnące	Duża skłonność do rozrostu ziarn i do tworzenia eutektyki w styku zgrzewania

Wzrost zawartości węgla prowadzi do wydzielania się węglików wzdłuż granic γ - fazy. Obszar austenitu zwiększa się ze wzrostem koncentracji niklu, szczególnie przy temperaturach ok. 1000°C (rys. 42-44), co świadczy o zwiększaniu się rozpuszczalności węglików ze wzrostem koncentracji niklu (w temp. 1200°C graniczna rozpuszczalność węgla wynosi 0,40%).

Zamieszczony schemat (tabl. 16) ilustruje kształtowanie się zgrzewalności stali w danej grupie strukturalnej. Schemat opracowano na podstawie badań prowadzonych w Instytucie. Podział grup oparty jest o struktury uzyskiwane podczas chłodzenia stali w spokojnym powietrzu. Stwierdzono w trakcie badań dużą intensywność hartowania się złączy ze stali gat. 1H13-4H13 (rys. 10).

Brak przemiany bainitycznej oraz stosunkowo wąski zakres przemiany perlitycznej tych stali składają się na to, że złącza po zgrzewaniu ostygają z prędkościami wystarczającymi, aby zaszła przemiana martenzytyczna bez względu na prędkość chłodzenia w zakresie niższych temperatur [35, 36].

Obserwuje się różną zgrzewalność stali chromoniklowych austenityczno-ferrytycznych. Stale, nawet o zbliżonych własnościach i składach chemicznych, np. 1H18N9T i H19N9, H19N9M, H19N9G6T wymagają stosowania różnych parametrów zgrzewania i wyraźnie stanowią odrębne grupy pod względem doboru parametrów zgrzewania (rys. 20, 22).

Tablica 17

Warunki wyżarzania złączy na zgrzewarkach typu ZDZ

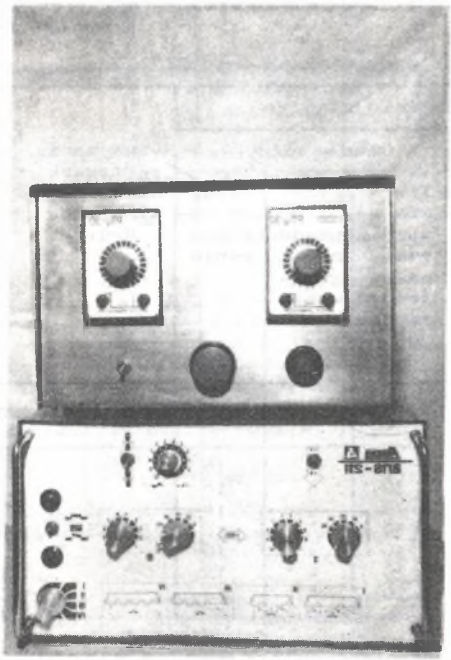
Lp.	Oznaczenie stali	Średnica drutu Φ mm	Parametry wyżarzania złączy						Oznaczenie zgrzewarki na której wyżarzano druty
			Kolejność zabiegów wyżarzania	Numer zaczepu transformatora zgrzewarki	Czas				
					Nagrzewania do temp. wyżarzania s	Trwania wyżarzania w jednym zabiegu s	Przepływu prądu nagrzewania okr	Przerwy nagrzewania okr	
1	NW11	11	1 2	II/4 II/4	5 0,5	30 30	1 1	4 4	ZDZ-1834-05-0
2	SW18	11,5	1 2 3 4 5 6 7	II/5 II/4 II/2 I/8 I/6 I/3 I/1	5 5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	30 30 30 30 30 30 30	4 4 4 4 4 4 4	16 16 16 16 16 16 16	ZDZ-1834-05-0

Tablica 18

Zestawienie własności mechanicznych złączy wyżarzanych wg warunków tablicy 16

Lp.	Oznaczenie stali	Średnica drutu Φ mm	Wyniki badań				Oznaczenie zgrzewarki na której wyżarzano druty
			Praca młota udarowego podczas łamania złącza Nm		Kąt gięcia o		
			niewyżarzonego	wyżarzonego	przed wyżarzaniu	po wyżarzaniu	
1	NW11	11	0-3	9	0	10	ZDZ-1834-05-0
2	SW18	11,5	0-3	8-10	0	5	ZDZ-1834-05-0

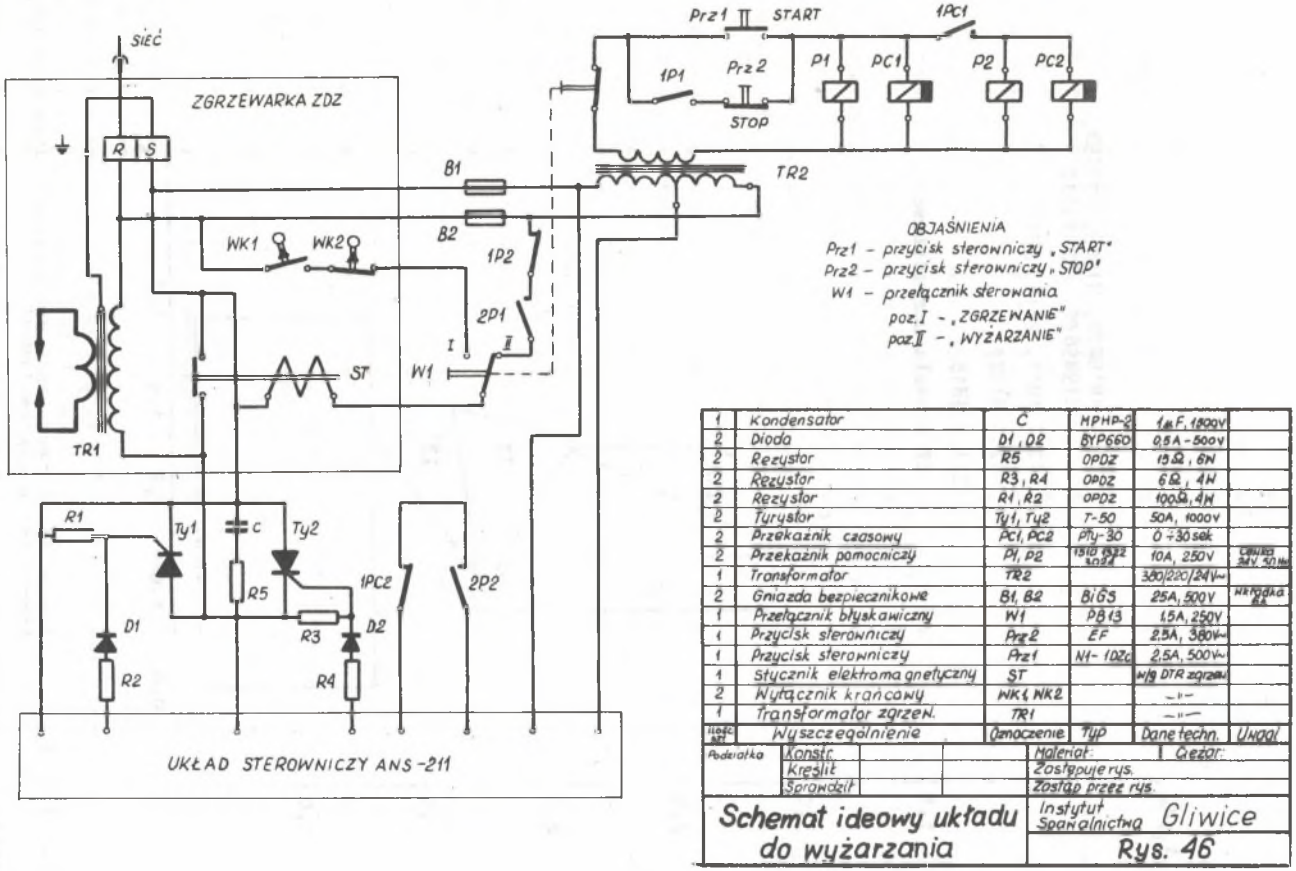
Nie zaobserwowano pęknięć w strefie wpływu ciepła złączy stali narzędziowych przy ich równomiernym nagrzewaniu w czasie zgrzewania, co zresztą jest podstawowym warunkiem poprawnego prowadzenia procesu łączenia. Złącza stali narzędziowych, szczególnie gat. SW18, SW7M zaleca się po zgrzewaniu poddawać uplastycznieniu przez ich programowe wyżarzanie bezpośrednio w zgrzewarce, odpowiednio przystosowanej do tej operacji technologicznej (tablica 17, rys. 45, 46). Zabieg zmniejsza niebezpieczeństwo pękania złączy bezpośrednio po zgrzewaniu i powinien poprzedzać właściwą ich obróbkę cieplną w piecach (tablica 18).



Rys. 45. Ogólny widok przystawki do zgrzewarki doczołowej zwarciowej zastosowanej do sterowania procesem wyżarzania

Własności mechaniczne złączy zgrzewanych zwarciowo zależą przede wszystkim od rodzaju i gatunku materiału wejściowego. Materiały, które w wyniku zachodzących podczas zgrzewania procesów cieplnych nie wykazują większych zmian swoich własności mechanicznych, wytrzymują próbę przeciągania bez dodatkowych zabiegów technologicznych, np. grupa stali 18-8 (tablica 4). Stale gat. 1H13, 2H13, 3H13, H17N2 wymagają przed przeciąganiem stosowania obróbki cieplnej w piecach (właściwej dla danego gatunku materiału). Nie wyklucza się również możliwości przeciągania po zgrzewaniu obrobionych odpowiednio cieplnie materiałów gat. H25N20S2, NC6, 4H13, SW7M, SW18. Z uwagi na własności technologiczne i strukturę tych materiałów obróbka cieplna drutów w piecu powinna być skorygowana i dostosowana do połączeń zgrzewanych, co stanowi niewątpliwe utrudnienie w warunkach produkcyjnych.

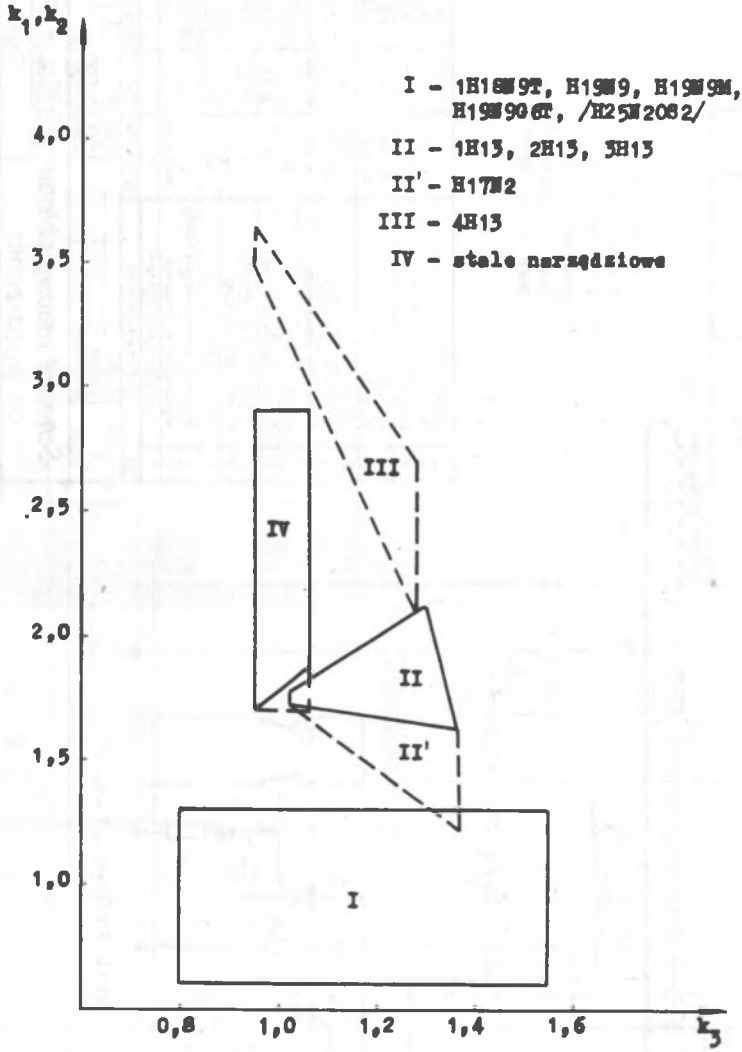
Pewna systematyka w możliwościach przewidywania zdolności do przeciągania po zgrzewaniu badanych stali zarysowuje się, gdy scharakteryzuje się złącza współczynnikami rozkładu twardości k_1, k_2, k_3, będącymi ilorazami maksymalnych twardości: strefy wpływu ciepła do materiału (k_1), zgrzeiny do materiału (k_2), strefy wpływu ciepła do zgrzeiny (k_3). Wyniki badań wyraźnie grupują się na wykresie (rys. 47) w czterech obszarach warunkujących przygotowanie pod względem obróbki cieplnej złączy po zgrzewaniu do przeciągania. Obszary I-IV (wyznaczane współczynnikami k_1-k_3) informują o



1	Kondensator	C	MPHP-2	1 μF, 1800V	
2	Dioda	D1, D2	BYP660	0,5A - 500V	
2	Rezystor	R5	OPDZ	15Ω, 6W	
2	Rezystor	R3, R4	OPDZ	6Ω, 4W	
2	Rezystor	R1, R2	OPDZ	100Ω, 4W	
2	Tyrystor	Ty1, Ty2	T-50	50A, 1000V	
2	Przekaźnik czasowy	Pc1, PC2	PTy-30	0 ÷ 30 sek	
2	Przekaźnik pomocniczy	P1, P2	1310 (522 1014)	10A, 250V	Cewka 24V, 50Hz
1	Transformator	TR2		380/220/24V~	
2	Gniazda bezpiecznikowe	B1, B2	BiG3	25A, 500V	Wkładka B25
1	Przełącznik błyskawiczny	W1	PB13	1,5A, 250V	
1	Przycisk sterowniczy	Prz2	EF	2,5A, 380V~	
1	Przycisk sterowniczy	Prz1	N1-10Zc	2,5A, 500V~	
1	Stycznik elektromagnetyczny	ST		W/g DTR zgrzew.	
2	Wyłącznik krańcowy	WK1, WK2		—"—	
1	Transformator zgrzew.	TR1		—"—	
Lp. Nr	Wyszczególnienie	Oznaczenie	Typ	Dane techn.	Uwagi

Podziałka	Konstr.		Materiał:	Ciężar:
	Kreślił		Zastępuje rys.	
	Sprawdził		Zastąp przez rys.	

Rys. 46. Schemat ideowy układu do wyżarzania



Rys. 47. Zdolność do przeciągania po zgrzewaniu zwarciowym drutów o określonych gatunkach stali

Oznaczenia: I - przeciąganie nieutrudnione, II - przeciąganie możliwe po obróbce cieplnej złączy, II' - przeciąganie utrudnione, wymagana obróbka cieplna złączy, III-IV - nie wykluoza się możliwości przeciągania po specjalnej obróbce cieplnej złączy

gradacji trudności w możliwościach przeciągania drutu po zgrzewaniu i są równocześnie odzwierciedleniem zgrzewalności stali. Omówiony wykres posiada znaczenie poglądowo-użytkowe, można uogólnić go na inne gatunki stali węglowych. Sprawdzono go z wynikiem pozytywnym dla niżej podanych stali poddawanych przeciąganiu:

- bez obróbki cieplnej, stal gat. St3A Ø 12 mm - obszar I
- z obróbką cieplną, stal gat. D45, D55 - obszar II.

Wykres umożliwia graficzną interpretację zgrzewalności operatywnej stali z punktu widzenia ich zdolności do przeciągania.

Opracowane parametry zgrzewania (tablice 11, 12, rys. 16-31) gwarantują uzyskanie złączy o własnościach mechanicznych podanych w tablicach 13 i 14 pod warunkiem, że powierzchnie części podlegające łączeniu i powierzchnie boczne pozbawione będą zanieczyszczeń (w postaci zgorzeliny, warstwy rdzy, smarów itp.) oraz dużych uskoków pozostających po cięciu drutów przecinarką. Zgorzelina lub rdza, pokrywająca pręty w miejscu styku z elektrodami, utrudnia a niekiedy wręcz uniemożliwia prowadzenie procesu zgrzewania. Czoła prętów przygotowanych do zgrzewania doczołowego powinny być prostopadłe do osi (podstawowy wymóg technologiczny do procesu zgrzewania).

W procesie zgrzewania zwarciowego oporność styku wywiera istotny wpływ na cały przebieg procesu i na sposób nagrzewania się drutów w strefie łączenia. Przy rozpatrywaniu bilansu ciepła podczas zgrzewania zwarciowego poprawnie przygotowanych powierzchni czołowych ilość ciepła wydzielająca się w styku nie przewyższa 10-15% ogólnej ilości wydzielonego ciepła podczas zgrzewania. Wydziela się ono w wąskiej strefie w krótkim czasie, powodując wzrost temperatury nagrzania powierzchni czołowych do temperatury topnienia metalu. Oporność styku posiada zasadnicze znaczenie w koncentracji ciepła podczas przepływania prądu i pozostaje w ścisłej zależności z siłą docisku zgrzewania. Przy małych dociskach zgrzewania wzrasta wprawdzie intensywność wydzielania się ciepła w miejscach styku, ale przy równoczesnym pogorszeniu równomierności nagrzewania drutu w przekroju łączonym. Nierównomierność nagrzewania stanowi prawidłowość zgrzewania zwarciowego i traktowana jest jako funkcja losowa w rozłożeniu punktów styku, biorących udział w procesie nagrzewania powierzchni czołowych. Wzrasta ona ze wzrostem średnicy drutów zgrzewanych. Nierównomierność nagrzewania stanowi poważne utrudnienie w poprawnym prowadzeniu procesu zgrzewania. Podczas zgrzewania dużych przekrojów pojęcie nierównomierności nagrzewania w styku należy rozszerzyć o efekt nierównomierności powierzchniowej - całość zjawiska sprowadza się do nierównomierności objętościowej.

Wzrost czasu zgrzewania łagodzi zjawisko nierównomierności nagrzewania, wzrasta rola przewodnictwa ciepła działającego stabilizująco na kinetykę wyrównywania temperatur w przekroju łączenia.

Dokładność przygotowania powierzchni drutów do zgrzewania w poważnym stopniu umożliwia praktycznie wpływać i sterować nierównomiernością nagrzewania i eliminować ujemne skutki tego zjawiska.

Ścisłe przestrzeganie ustalonych warunków procesu technologicznego (przygotowanie drutów do zgrzewania, parametrów zgrzewania, obróbki cieplnej złączy itp.) oraz prawidłowej obsługi i eksploatacji zgrzewarki gwarantują uzyskanie połączeń o stabilnych własnościach mechanicznych. W przypadku tym wady złączy mogą się pojawiać jedynie w wyniku wad materiałowych lub uszkodzenia (rozregulowania) zgrzewarki.

6.3. Podsumowanie

Na podsumowanie wyników badań składają się zestawienia parametrów zgrzewania w postaci zależności empirycznych. Przez analogię i porównanie do zestawionych w tablicy 1 zależności empirycznych procesu zgrzewania stali niskowęglowych opracowano w pracy zależności empiryczne dla badanych stali.

Tablica 19

Zależności empiryczne
doboru podstawowych parametrów zgrzewania zwarciowego stali stopowych

Lp.	Parametr zgrzewania	d mm	Zależność empiryczna	Typy zgrzewarek i inne uwagi
1	2	3	4	5
1	Długość wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki - l_1 w mm dla drutów o średnicy d w mm	2	d	ZDZ-1854-05-1
		3	0,85 d	
		4	0,8 d	
		5	0,7 d	
		6	0,65 d	
		7	0,55 d	
			0,75 d	Przeciętnie
		6	d	ZDZ-1834-05-0
		7	0,85 d	
		8	0,8 d	
		9-10	0,7 d	
		11-12	0,6 d	
			0,8 d	Przeciętnie
2	Naddatek na zgrzewanie l - mm	-	$(0,4-0,7)l_1$	-

cd. tablicy 19

1	2		3	4	5
3	Naddatki na spęczanie l_s - mm	pod prądem l_{si} - mm	-	$(0,4-0,85)l_s$	-
		bez prądu l_{so} - mm	-	$(0,6-0,15)l_s$	-
4	Czas przepływu prądu zgrzewania - s		-	Zależy od gęstości prądu najczęściej 0,5-6	-

Tablica 20

Zależności empiryczne
doboru podstawowych parametrów zgrzewania zwarciowego stali stopowych

Lp.	Parametr i oznaczenie	Gatunek stali	Zależność ogólna	Wartość współczynników A	B	Zależność empiryczna	Tolerancja zmiany parametru Δ ±	Uwagi
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Gęstość prądu zgrzewania j [A/mm²]	1H13-4H13, H17N2	j = Ad+B zakres zmian gęstości 180-35	1,6	65	j = 1,6d+65	± 20	ZDZ-1854-05-1
		H17, OH17T		-5	130	j = -5d+130	± 10	
		1H18N9T		-7,4	120	j = -7,4+120	± 5 dla d ⩽ 3 mm ± 20 dla d > 3 mm	
		H19N9 H19N9M H19N9G6T		-10	120	j = -10d+120	± 10 dla d ⩽ 3 mm ± 15 dla d > 3 mm	
		H25N20S2		-3,5	93	j = -3,5d+93	± 5	
		N12E, NC6, SW7M		-35	300	j =-35d+300	± 8,5	
		50H21G9N4 H10S2M H17N2		-1,4	60	j ⩾ -1,4d+60	max +10	ZDZ-1834-05-0
		NW1, SW18				j ⩽ -1,4d+60	min -10	

cd. tablicy 20

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Jednostkowa siła docisku spęczania lub zgrzewania p [daN/mm^2]	Wszystkie gatunki badanych stali stopowych	$p = \frac{A}{d}$	10	-	$p = \frac{10}{d}$ Zakres zmian jednostkowych sił docisku spęczania lub zgrzewania 7-0,7	+4 -3 Wartości "+" dla $d \leqslant 3$ mm Wartości "-" dla $d > 3$ mm	Zależności obowiązują dla zgrzewarek ZDZ - 1854-05-1 - 1834-05-0

Zależności zestawione w tablicach 19 i 20 mają przede wszystkim informacyjny aspekt rozwiązywania zagadnienia w początkowym etapie optymalizacji. Zestawione w literaturze dane technologiczne z tego zakresu tematyki tworzą zbiór rozproszonych elementów informacyjnych, nie zawsze zresztą tematycznie dostępnych technologowi. Ogólne zasady doboru parametrów zgrzewania stali stopowych, jakie można spotkać w literaturze, [1, 13, 16, 40-48, 57, 64, 69, 78] wzmiankują, że:

- moc zgrzewania powinna być zmniejszona ok. 1,5-2 razy w odniesieniu do stali niskowęglowych,
- docisk spęczania powinien być zwiększony średnio ok. 1,5-2 razy w odniesieniu do stali niskowęglowych,
- długość wysunięcia drutów ze szczęk zgrzewarki powinna wynosi (0,6-1)d, gdzie d jest średnicą drutu zgrzewanego,
- długość naddatku na spęczanie pod prądem powinna wynosić ok. 0,7 długości całkowitego naddatku na spęczanie.

Syntetyczne ujęcie informacji przyczynić się powinno do uściślenia tych spraw.

7. WNIOSKI

Z badań i analizy doświadczalnego poszukiwania najlepszych parametrów zgrzewania wynika:

1. Dobór parametrów zgrzewania jest czynnością kierunkową i innowację w tym zakresie można uzyskać tylko na drodze cyklu działania zorganizowanego, przy maksymalnym wykorzystaniu informacji i ukierunkowanego doświadczenia.
2. Technolog przystępujący do opracowywania parametrów zgrzewania wysuwa co najmniej dwie hipotezy:
   - o wielkościach parametrów zgrzewania podlegających wyznaczaniu,
   - o zakresach parametrów zgrzewania, w granicach których może przebiegać poprawnie proces zgrzewania.

   Analiza wejściowych danych, którym technolog przypisuje w sposób subiektywny pewne prawdopodobieństwa sukcesu, stanowi mimo woli wstępny etap opracowywania technologii.
3. Dotychczasowa praktyka raczej utwierdza w przekonaniu, że w fazie formułowania hipotez powinno się uwzględniać możliwie dużą ilość danych apriorycznych (wstępnych). Im więcej można powiedzieć o procesie zgrzewania a priori, tym więcej informacji o mechanizmie procesu zgrzewania można otrzymać w wyniku każdego następnego doświadczenia.
4. Sposoby wypracowania "programowania" decyzji odnośnie doboru parametrów w praktyce są bardzo różne, często jednak polegają na oszacowaniu w przybliżeniu dodatnich i ujemnych skutków zamierzonego wyboru. Przeważa zdecydowanie typ intuicyjnego sposobu podejmowania decyzji.
5. Zaproponowany w pracy cykl badania, oparty na zorganizowanym działaniu, podczas opracowywania optymalnych parametrów zgrzewania eliminuje chaotyczność postępowania przy równoczesnej informacji co do kolejnych etapów postępowania (rys. 3, tablica 4).
6. Faza postępowania, związana z planowaniem eksperymentu, z elementami sekwencyjnego badania powierzchni odpowiedzi metodą gradientu powinna znaleźć szerokie zastosowanie w pracach technologicznych z zakresu zgrzewania jako nieskomplikowany sposób względnie szybkiego przybliżania się do odpowiedzi poszukiwanej.

Z badań zgrzewania, ustalania parametrów zgrzewania i zależności empirycznych wynika:

1. W trakcie badań wyróżniono sześć grup doboru parametrów, dla których opracowano szczegółowe parametry zgrzewania (rys. 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30). Opracowane parametry gwarantują uzyskanie złączy o włas-

nościach podanych w tabl. 13 i 14 pod warunkiem, że powierzchnie części podlegające łączeniu i powierzchnie boczne pozbawione będą zanieczyszczeń (w postaci zgorzeliny, warstwy rdzy, smarów itp.) oraz dużych uskoków pozostających po cięciu drutów przecinarką.

2. Szczegółowym parametrom zgrzewania przyporządkowano nomogramy do wyznaczania (w obszarze eksperymentalnym) parametrów zgrzewania zwarciowego drutów stopowych (rys. 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31). Cechą charakterystyczną opracowanych nomogramów jest pewna dowolność i elastyczność w doborze wielkości parametrów; należy się nimi posługiwać przy opracowywaniu szczegółowych danych do zgrzewania.
3. Analiza gęstości prądu zgrzewania wykazuje silne zróżnicowanie tej wielkości w zależności od grupy strukturalnej stali stopowej (rys. 37-39). Wąskim zakresem doboru tej wielkości charakteryzują się stale narzędziowe i stal stopowa gat. H25N20S2, (rys. 37, 38); znacznie większym pozostałe grupy stali. Podobieństwa występują w kształtowaniu się docisków jednostkowych zgrzewania i długości wysunięcia materiału ze szczęk zgrzewarki (rys. 36, tablica 19).
4. Parametry zgrzewania zestawione w tablicach 19 i 20 są zależnościami empirycznymi i mogą służyć do szybkiego wyznaczania parametrów w początkowym etapie optymalizacji.

Z badań przeciągania złączy po zgrzewaniu oraz uplastyczniania złączy stali narzędziowych przez ich wyżarzanie w zgrzewarce wynika:

1. Możliwość przeciągania bezpośrednio po zgrzewaniu kręgów walcówki i drutów stalowych grup: austenitycznych, austenityczno-ferrytycznych oraz wstępnie poddanych po zgrzewaniu (właściwej dla danego gatunku materiału) obróbce cieplnej w piecach - stali grupy martenzytycznej.
2. Nie wyklucza się możliwości przeciągania po zgrzewaniu obrobionych cieplnie innych gatunków stali wysokostopowych i narzędziowych (np. gat. H25N20S2, NC6, 4H13, SW7M, SW18). Obróbka cieplna drutów w piecu powinna być skorygowana i dostosowana do połączeń zgrzewanych.
3. Złącza stali narzędziowych, szczególnie gat. SW7M, SW18 zaleca się po zgrzewaniu poddawać uplastycznianiu przez ich programowe wyżarzanie bezpośrednio w zgrzewarce. Zabieg zmniejsza niebezpieczeństwo pękania złączy bezpośrednio po zgrzewaniu i powinien poprzedzać właściwą ich obróbkę cieplną w piecach.

ZAKOŃCZENIE

Wyniki badań stanowią podstawę do opracowania dla przemysłu ujednoliconych warunków technologicznych procesu zgrzewania doczołowego zwarciowego drutów na zgrzewarkach produkcji krajowej. Właściwy dobór podstawowych parametrów zgrzewania przyczyni się bezpośrednio do racjonalnej eksploatacji zgrzewarek i do dyscypliny w utrzymaniu wysokiej jakości złączy.

LITERATURA

[1] Akselrod F.A., Zajcew M.P. i inni: Kontaktnaja swarka, Wysszaja Szkoła, Moskwa 1964.

[2] Akselrod F.A., Mirkin A.M.: Oborudowanije dla swarki dawlenijem, Wysszaja Szkoła, Moskwa 1975.

[3] Aleksandrow E.A.: Osnowy tieorij ebristiczeskich reszerij, Sowietskoje Radio, Moskwa 1975.

[4] Ałow A.A.: Osnowy tieorij processow swarki i pajki, Maszinostrojenije, Moskwa 1964.

[5] Bagrianskij K.W., Dobrotina Z.A., Chrienow K.K.: Teiorija swarocznych processow. Wyd. Charkowskij Uniwiersitiet. Charkow 1968.

[6] Barskij W.D., Kogan Ł.A.: Prakticzeskoj matematiko-statisticzeskoj analiz w koksochimii, Metallurgija, Moskwa 1975.

[7] Brunst W.: Das elektrische Widerstandsschweissen, Berlin 1952.

[8] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali, WNT, Warszawa 1975.

[9] Czyrski W.: Spawanie stali stopowych, PWT, Warszawa 1953.

[10] Czyrski W., Pilarczyk J.: Spawanie stali, PWT, Warszawa 1960.

[11] Droper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana (tłumaczenie z jęz. ang. Applied Regression Analysis), WNT, Warszawa 1973.

[12] Gielman A.S.: Kontaktnaja elektroswarka, Maszgiz, Moskwa 1949.

[13] Gielman A.S.: Tiechnologija i oborudowanije kontaktnoj elektroswarki, Maszgiz, Moskwa 1960.

[14] Gorskij W.G., Adler J.P.: Planirowanije promyszlennych ekspierimientow, Metallurgija, Moskwa 1974.

[15] Gudremon E.: Specjalnyje stali, tom I i II (tłumaczenie z jęz. niemieckiego: Handbuch der Sonderstahlkunde), Metalurgizdat, Moskwa 1959, 1960.

[16] Kabanow N.S., Sliepak:E.S.: Tiechnologija stykowoj kontaktnoj swarki, Maszgiz, Moskwa 1961.

[17] Kabanov N.S., Sliepak E.S.: Technołogija stykowoj kontaktnoj swarki, Maszinostrojenije, Moskwa 1970.

[18] Kabanow N.S.: Swarka na kontaktnych maszinach, Wysszaja Szkoła, wyd. 2, Moskwa 1973.

[19] Kacprzyński B.: Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne, WNT, Warszawa 1974.

[20] Kackowskij N.I.: Swarka wysokolegirowannych stalej. Technika, Kijów 1975.

[21] Kazimirow A.A.: Optimizacija proizwodstwiennowo processa, tiechniczeskowo urownija i koncentracji proizwodstwa swarnych konstrukcij. Naukowaja Dumka, Kijów 1974.

[22] Kisljuk F.I.: Elektriczeskaja kontaktnaja swarka, Oborongiz 1950.

[23] Koczergin K.A.: Osnowy kontaktnoj swarki, Maszgiz, Moskwa 1955.

[24] Koczergin K.A.: Swarka dawlenijem, Maszinostrojenije, Leningrad 1972.

[25] Konorski B., Krysicki W.: Nomografia i graficzne metody obliczeniowe zastosowania w technice, WNT, Warszawa 1973.

[26] Kubiszyn I.: Zgrzewanie oporowe blach i prętów stalowych, MPM, Warszawa 1971.

[27] Kubiszyn I.: Opracowanie technologii zgrzewania kręgów walcówki i drutu w gat. stali nierdzewnych, kwasoodpornych i narzędziowych dla potrzeb ciągnienia. Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa nr Bb-54, Gliwice 1975.

[28] Kvaczev: Wybor optymalnowo reżima kontaktnoj toczecznoj swarki mietodom planirowanija ekspierimenta. Awtomaticzeskaja Swarka nr 2 1971.

[29] Laszko H.F., Laszko-Awiakjan S.W.: Metałłowiedienije swarki, Maszgiz. Moskwa 1954.

[30] Legras J.: Praktyczne metody analizy numerycznej. WNT, Warszawa 1974.

[31] Lheureux G.E., Belotle E.J.: Le soudage par resistance, Dunod, Paryż 1965.

[32] Linnik J.W.: Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania obserwacji (tłumaczenie z jęz. rosyjskiego: Metod najmienszich kwadratow i osnowy matematiko-statisticzeskoj tieorii obrabotki nabljudienij), PWN, Warszawa 1962.

[33] Liwszic B.G.: Metałłografija, Metalurgizdat, Moskwa 1963.

[34] Luenberger D.G.: Teoria optymalizacji (tłumaczenie z jęz. angielskiego: Optimization by Vector Space Methods), PWN, Warszawa 1974.

[35] Malkiewicz T.: Metaloznawstwo stopów żelaza, tom II, PWN, Warszawa - Kraków 1971.

[36] Malkiewicz T.: Metaloznawstwo stopów żelaza, wyd. 2, PWN, Warszawa - Kraków 1976.

[37] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu, WNT, Warszawa 1976.

[38] Masterow W.A.: Praktika statisticzeskowo planirowanija ekspierimenta technologii bimetałłow, Metallurgija, Moskwa 1974.

[39] Moroń W.: Wstęp do fizyki metali, część I, Wyd. UŚ Katowice 1974.

[40] Materiały Firmy Electromecanique Les multiples applications du soudage electrique par resistance dans les constructions en beton arme, 1970.

[41] Materiały Firmy Sciaky. Le Soudage en bout par etinclage 1971.

[42] Materiały Firmy British Federal Welder Butt Welding Machines Biuletyn nr 15 1968. Biuletyn nr 401, 1972.

[43] Materiały prospektowe "Maszynoeksport". Masziny dla eliektriczeskoj kontaktnoj stykowoj swarki moszcznostju do 100 kVA, 1973.

[44] Materiały firmy Schlatter Abgrat - Zangen typ E1, typ E2. 1975.

[45] Materiały American Welding Society. Soudage par Resistance. Wyd. uzupełnione firmy Lanquepin, 1976.

[46] Materiały firmy Schlatter. Draht - Stumpf - Schweissmaschinen Typ E, 1976.

[47] Materiały firmy Schlatter Feindraht - Stumpfschweissmaschinen typ S, 1976.

[48] Michalski R.: Zgrzewanie oporowe, Poradnik, WNT, Warszawa 1970.

[49] Miller D.W., Starr M.K.: Praktyka i teoria decyzji (tłumaczenie z jęz. angielskiego: Executiwe Decisions and Operations Researd), PWN, Warszawa 1971.

[50] Mothes J.: Sytuacje niepewne a podejmowanie decyzji w przemyśle (tłumaczenie z jęz. francuskiego: Incertitudes et decisions industrielles) WNT, Warszawa 1972.

[51] Nalimow W.W., Czernowa N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych (tłumaczenie z jęz. rosyjskiego: Statisticzeskije metody planirowanija ekstremalnych ekspierimentow), WNT,Warszawa 1967.

[52] Negre J.: Le soudage Electrique par resistance, Paryż 1962.

[53] O'Shaughnessy J.: Metodologia decyzji (tłumaczenie z jęz. angielskiego: Inquiry and Decision), PWE, Warszawa 1975.

[54] Moore Peter G.: Ryzyko w podejmowaniu decyzji (tłumaczenie z jęz. angielskiego: Risk in Business Decission), PWE, Warszawa 1975.

[55] Pierwozwanskij A.A.; Poisk, Nauk, Moskwa 1970.

[56] Pietrow G.L., Tumarew A.S.: Tieorija swarocznych processow, Wysszaja Szkoła, Moskwa 1967.

[57] Pliwa L.: Odporowe swarowani w praxi, SNTL, Praga 1960.

[58] Pogodin-Aleksiejev G.I.: Tieorija swarocznych processow, Maszgiz Moskwa 1950.

[59] Poradnik zgrzewania firmy SCIAKY. Memento du Soudage Electrique 1976.

[60] Praca zbiorowa. Odporove svarovani, Praga 1959.

[61] Praca zbiorowa pod redakcją F. Stauba: Atlas mikrostruktur stali, Śląsk, Katowice 1970.

[62] Praca zbiorowa pod redakcją T. Kasprzaka: Badania operacyjne w nowoczesnym zarządzaniu, PWE, Warszawa 1974.

[63] Praca zbiorowa pod redakcją B.E. Patona: Tiechnologija elektriczeskoj swarki mietałłow i spławow pławlenijem, Maszinostrojenije,Moskwa 1974.

[64] Praca pod redakcją B.D. Orłowa: Tiechnołogija i oborudowanije kontaktnoj swarki, Maszinostrojenije, Moskwa 1975.

[65] Prohorow N.N.: Fiziczeskije prociessy w mietałłach pri swarkie, tom II, Metałłurgija, Moskwa 1976.

[66] Puchow G.E., Hatiaszwili C.S.: Modieli technologiczeskich processow, Tiechnika, Kijów 1974.

[67] Seferian D.: Metałłurgija swarki, GNTIML, Moskwa 1963.

[68] Sjerfiejew N.P., Fejgenson M.S.: Elektryczne zgrzewanie oporowe (tłumaczenie z jęz. rosyjskiego: Elektriczeskaja kontaktnaja swarka) PWT, Warszawa 1955.

[69] Sprawocznik po swarkie, tom 4, Naszinostrojenije, Moskwa 1971.

[70] Strzałkowski A., Sliżyński A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów, PWN, Warszawa 1969.

[71] Szewczenko W.S.: Wwiedienije w optimalnoje projektirowanije maszin, Nauka i Tiechnika, Mińsk 1974.

[72] Węgrzyn J.: Spawalność nierdzewnych stali o zawartości 17% Cr. Praca habilitacyjna, 1962.

[73] Wolczenko W.N. i inni: Kontrol kaczestwa swarki, Maszinostrojenije, Moskwa 1975.

[74] Wołgin L.N.: Optymalizacja (tłumaczenie z jęz. rosyjskiego:Problema optimalnosti w tieorieticzeskoj kibernietikie), WNT, Warszawa 1970.

[75] Zielliński R.: Metody Monte Carlo, WNT, Warszawa 1970.

[76] Zieliński R.: Tablice statystyczne, PWN, Warszawa 1972.

[77] Zieliński R.: Wybrane zagadnienia optymalizacji statystycznej. Analiza powierzchni odpowiedzi. Planowanie doświadczeń ekstremalnych, PWN, Warszawa 1974.

[78] Zalecenia - Tabellenbuch Sweiss - und Lottechnik. Praca pod redakcją A. Neumana. VEB Verlag Technik, Berlin 1976.

[79] Zaks I.A.: Swarka raznorodnych stalej, Maszinostrojenije, Leningrad 1973.

ANALIZA PARAMETRÓW ZGRZEWANIA ZWARCIOWEGO
WYBRANYCH GATUNKÓW STALI WĘGLOWYCH I STOPOWYCH

S t r e s z c z e n i e

Podstawowe znaczenie dla dziedziny zgrzewania posiada opracowywanie tzw. optymalnych parametrów zgrzewania i temu problemowi poświęcono pracę.

Celem badań było przeanalizowanie zagadnienia poszukiwania najlepszych rozwiązań, wytypowanie skutecznej metody czynnego opracowywania optymalnych parametrów zgrzewania oraz opracowanie zoptymalizowanych parametrów zgrzewania drutów na zgrzewarkach zwarciowych produkcji krajowej z możliwością adaptacji ich na dowolne typy zgrzewarek zwarciowych pochodzenia zagranicznego. Prowadzone badania oprócz aspektu poznawczego mają wypełnić istniejącą lukę w temacie zgrzewania zwarciowego stali stopowych.

Badania i ustalanie parametrów zgrzewania przeprowadzono na drutach reprezentujących 19 gatunków stali zróżnicowanych zarówno pod względem procentowej zawartości węgla jak i składników stopowych.

W ramach tematu opracowano podstawowe algorytmy i programy w języku BASIC na minikomputer MERA-303, na którym wykonano szczegółowe obliczenia związane z badaniem powierzchni odpowiedzi i ustaleniem zależności empirycznych.

Zestawione w pracy wyniki naświetlają zagadnienia zgrzewania zwarciowego z punktu widzenia technologicznego i w powiązaniu z nowoczesnymi elementami teorii planowania eksperymentów eksponują parametry zgrzewania jako podstawowy zbiór wielkości poszukiwanych.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ
СОПРОТИВЛЕНИЕМ ИЗБРАННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ
СОРТОВ СТАЛЕЙ

Р е з ю м е

Основное значение в области контактной сварки имеет разработка так званых оптимальных режимов сварки и этому вопросу предназначено работу.

Целью проведённых исследований являлся вопрос поисков найлучших решений, подбор эффективного метода активной разработки оптимальных режимов контактной сварки а также разработка оптимальных режимов стыковой сварки сопротивлением проволок на отечественных стыковых машинах с возможностью их адаптирования на любые типы стыковых машин заграничного происхождения. Ведённые исследования кроме познавательного аспекта должны заполнить существующий пробел по теме контактной стыковой сварки сопротивлением легированных сталей.

Исследования и определение режимов стыковой сварки проведено на проволоках представляющих 19 сортов сталей отличающихся не только содержанием углерода но и легирующими компонентами.

В решения темы разработано основные алгоритмы и программы на языке BASIC Бейзик на вычислительную машину типа MERA-303 Мера-303 , на которой проведено всесторонние расчёты связанные с испытанием поверхности отклика и определением эмирических зависимостей.

Приведённые в работе результаты освещают вопрос стыковой сварки сопротивлением с технологической точки зрения в сопоставлении с современными элементами теории планирования экспериментов, экспонируют режимы сварки как основное множество разыскиванных величин.

THE ANALYSIS OF THE RESISTANCE BUTT WELDING PARAMETERS
FOR SEVERAL SELECTED ALLOY AND CARBON STEELS

S u m m a r y

The elaboration of the so-called optimum resistance welding parameters is of fundamental importance for the resistance welding technology and for this reason the research work on the subject has been carried out.

The purpose of the study was triple: to analise the problem of searching the best solutions, to point at the effective method of active elaboration of the optimum resistance welding parameters and to elaborate the optimum parameters for wire resistance welding with the use of home and foreign made resistance welders. The study had to cover the gap in the subject of the resistance butt welding of alloyed steels.

The investigation and elaboration of the resistance welding parameters have been carried out for 19 different steel wires containing different quantities of carbon and other alloying elements.

In the range of the subject, the fundamental algorithms and programs in the BASIC language for the minicomputer MERA-303 have been prepared and the detailed calculations concerning the response surface and empirical relations studies have been carried out.

The results of the study explain the resistance butt welding from the technological point of view and in connexion with the recent elements of the experiments planning theory show of the resistance welding parameters as a fundamental collection of searched grandeurs.