

# LABORATORIUM

## Z PODSTAW SPAWALNICTWA



STANISŁAW KARPIŃSKI

JAN MOSZUMAŃSKI

KRZYSZTOF RADWAN-WIATROWSKI

**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA**

**Stanisław Karpiński, Jan Moszumański, Krzysztof Radwan-Wiatrowski**

**LABORATORIUM  
Z PODSTAW SPAWALNICTWA**

**KOSZALIN 2001**

# SKRYPT WYDZIAŁU MECHANICZNEGO

ISBN 83-88283-79-0

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej  
*Szymon Palkowski*

Opiniodawcy  
*Andrzej Ambroziak*  
*Andrzej Kolasa*

Redakcja  
*Bronisław Słowiński*

Projekt okładki  
*Tadeusz Walczak*

Skład, łamanie  
*Stanisław Karpiński*



62362



© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej  
Koszalin 2001

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ  
75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17

---

Koszalin 2001, wyd. I, ark. wyd. 10,0, format B-5, nakład 1200 egz.  
Druk: Drukarnia INTRO-DRUK, Koszalin

## SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE .....	11
ZASADY ODBYWANIA ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH .....	13
1. BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY W PROCESACH SPAVALNICZYCH .....	15
1.1. Wstęp .....	15
1.2. Zagrożenia zawodowe spawaczy .....	16
1.2.1. Porażenie prądem elektrycznym .....	16
1.2.2. Oddziaływanie promieniowania z łuku elektrycznego i płomienia ...	17
1.2.3. Oddziaływanie gazów, dymów i pyłów na organizm człowieka .....	17
1.2.4. Radioaktywność i pole elektromagnetyczne .....	18
1.2.5. Zagrożenia wybuchem lub pożarem .....	19
1.2.6. Poparzenia .....	19
1.2.7. Uszkodzenia mechaniczne .....	20
1.3. Znaki ostrzegawcze .....	20
1.4. Przepisy dozoru technicznego .....	21
2. SPAWANIE GAZOWE METALI .....	23
2.1. Charakterystyka spawania gazowego .....	23
2.2. Gazy techniczne stosowane w spawalnictwie .....	23
2.2.1. Wytwarzanie i właściwości acetylenu .....	23
2.2.2. Butle do acetylenu .....	24
2.2.3. Wytwarzanie i właściwości tlenu .....	25
2.2.4. Butle do gazów skroplonych .....	25
2.3. Reduktory ciśnienia .....	25
2.4. Palniki acetylenowo – tlenowe do spawania .....	27
2.5. Płomień acetylenowo – tlenowy .....	28
2.6. Technika spawania gazowego – podstawowe zasady technologiczne spawania stali węglowych .....	31
2.6.1. Przygotowanie elementów do spawania .....	31
2.6.2. Technika spawania gazowego .....	32

2.7. Podstawowe zasady technologiczne spawania stali, żeliwa, miedzi i mosiądzu .....	34
2.7.1. Spawanie stali węglowych .....	34
2.7.2. Spawanie żeliwa .....	35
2.7.3. Spawanie miedzi .....	35
2.7.4. Spawanie mosiądźców .....	35
2.8. Część praktyczna .....	36
2.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	36
2.8.2. Przebieg ćwiczenia .....	36
2.9. Literatura .....	36
3. RĘCZNE SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ OTULONĄ - MMA .....	37
3.1. Wstęp .....	37
3.2. Urządzenia do spawania elektrodami otulonymi .....	37
3.2.1. Parametry źródeł zasilania łuku spawalniczego .....	40
3.2.1.1. Właściwości źródeł zasilania łuku do spawania ręcznego .....	42
3.3. Podstawowe zasady spawania elektrodą otuloną .....	43
3.3.1. Wstęp .....	43
3.3.2. Elektrody otulone do spawania łukowego ręcznego .....	43
3.3.3. Dobór rodzaju elektrod i parametrów spawania .....	45
3.3.3.1. Dobór rodzaju elektrod do spawania .....	45
3.3.3.2. Dobór parametrów spawania .....	46
3.3.4. Przygotowanie materiałów do spawania .....	47
3.3.5. Zasady technologiczne spawania elektrodą otuloną .....	47
3.4. Część praktyczna .....	49
3.4.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	49
3.4.2. Przebieg ćwiczenia .....	49
3.5. Literatura .....	50
4. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ TOPLIWĄ W OSŁONACH GAZOWYCH – GMA .....	51
4.1. Wstęp .....	51
4.2. Spawanie metodą MAG/MIG .....	51
4.2.1. Istota procesu .....	51
4.2.2. Parametry spawania metodą MAG/MIG .....	53
4.2.3. Źródła zasilania łuku spawania metodą MAG/MIG .....	54
4.2.4. Spawanie w osłonie gazów aktywnych MAG .....	54

4.2.4.1. Charakterystyka metody .....	54
4.2.4.2. Materiały dodatkowe .....	55
4.2.5. Spawanie w osłonie gazów obojętnych MIG .....	56
4.2.6. Spawanie metodą TIME .....	56
4.3. Część praktyczna .....	57
4.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	57
4.3.2. Przebieg ćwiczenia .....	58
4.4. Literatura .....	58
5. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ NIETOPLIWĄ W OSŁONACH GAZOWYCH – TIG (GTA) .....	59
5.1. Wstęp .....	59
5.2. Źródła zasilania łuku do spawania metodą TIG .....	60
5.3. Parametry spawania .....	62
5.4. Materiały dodatkowe .....	63
5.5. Technologia i technika spawania metodą TIG .....	63
5.6. Część praktyczna .....	64
5.6.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	64
5.6.2. Przebieg ćwiczenia .....	64
5.7. Literatura .....	64
6. SPAWANIE ŁUKIEM KRYTYM – SAW .....	65
6.1. Istota spawania łukiem krytym .....	65
6.2. Urządzenia do spawania łukiem krytym .....	66
6.3. Topniki i druty elektrodowe do spawania stali .....	67
6.4. Technika spawania łukiem krytym .....	68
6.4.1. Parametry spawania .....	68
6.4.2. Techniki spawania .....	71
6.5. Przygotowanie brzegów blach do spawania łukiem krytym .....	74
6.6. Część praktyczna .....	77
6.6.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	77
6.6.2. Przebieg ćwiczenia .....	77
6.7. Literatura .....	78
7. SPAWANIE SKONCENTROWANĄ WIAZKĄ ENERGII .....	79
7.1. Spawanie plazmowe – PAW .....	79
7.1.1. Istota metody .....	79

7.1.2. Palniki plazmowe .....	79
7.1.3. Spawanie plazmowe – GTA .....	81
7.1.4. Technologia i technika spawania plazmowego – GTA .....	83
7.1.5. Spawanie plazmowe – GMA .....	84
7.2. Spawanie elektronowe .....	84
7.2.1. Istota spawania elektronowego .....	84
7.3. Spawanie laserowe .....	85
7.4. Część praktyczna .....	88
7.4.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	88
7.4.2. Przebieg ćwiczenia .....	88
7.5. Literatura .....	88
8. NAPAWANIE .....	89
8.1. Istota procesu i rodzaje napawania .....	89
8.2. Napawanie gazowe .....	90
8.2.1. Napawanie gazowe proszkami .....	90
8.2.2. Napawanie drutem lub prętem .....	91
8.3. Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną .....	92
8.4. Napawanie łukiem krytym .....	93
8.5. Napawanie łukowe w osłonie gazowej .....	94
8.5.1. Napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej – GTA .....	94
8.5.2. Napawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej – GMA ....	96
8.6. Napawanie plazmowe .....	97
8.7. Napawanie laserowe .....	98
8.8. Część praktyczna .....	99
8.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	99
8.8.2. Przebieg ćwiczenia .....	100
8.9. Literatura .....	100
9. NATRYSKIWANIE CIEPLNE .....	101
9.1. Wstęp .....	101
9.2. Natryskiwanie płomieniowe .....	102
9.2.1. Charakterystyka metody .....	102
9.2.2. Natryskiwanie gazowe proszkami .....	102
9.2.3. Natryskiwanie gazowe z użyciem drutu .....	103
9.2.4. Natryskiwanie gazowe prętami ceramicznymi .....	104
9.3. Natryskiwanie łukowe .....	105

9.4. Natryskiwanie plazmowe .....	106
9.5. Część praktyczna .....	108
9.5.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	108
9.5.2. Przebieg ćwiczenia .....	108
9.6. Literatura .....	108
10. ZGRZEWANIE .....	109
10.1. Wstęp .....	109
10.2. Zgrzewanie oporowe .....	110
10.2.1. Istota zgrzewania oporowego .....	110
10.2.2. Zgrzewanie oporowe punktowe .....	111
10.2.3. Zgrzewanie garbowe .....	116
10.2.4. Zgrzewanie liniowe .....	118
10.2.5. Zgrzewanie doczołowe .....	119
10.2.5.1. Zgrzewanie doczołowe zwarciove .....	119
10.2.5.2. Zgrzewanie doczołowe iskrowe .....	120
10.3. Część praktyczna .....	122
10.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	122
10.3.2. Przebieg ćwiczenia .....	122
10.4. Literatura .....	122
11. LUTOWANIE .....	123
11.1. Wstęp .....	123
11.2. Pojęcia technologiczne w procesie lutowania .....	124
11.3. Fizyczne aspekty procesu lutowania .....	124
11.4. Budowa lutowiny .....	126
11.5. Źródła ciepła w procesie lutowania .....	127
11.6. Lutowanie miękkie .....	128
11.6.1. Luty .....	128
11.6.2. Postać lutów miękkich .....	128
11.6.3. Topniki .....	129
11.6.4. Technologia lutowania miękkiego .....	130
11.7. Lutowanie twarde .....	130
11.7.1. Luty .....	130
11.7.2. Postać lutów twardych .....	131
11.7.3. Topniki .....	131
11.7.4. Technologia lutowania twardego .....	131



11.8. Część praktyczna .....	132
11.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	132
11.8.2. Przebieg ćwiczenia .....	132
11.9. Literatura .....	132
12. NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA SPAWALNICZE .....	133
12.1. Powstawanie i podział naprężeń własnych .....	133
12.2. Wpływ oddziaływania termicznego na powstanie naprężeń własnych .....	135
12.3. Wpływ temperatury na powstanie naprężeń i odkształceń .....	135
12.4. Czynniki wpływające na wartość naprężeń spawalniczych .....	137
12.5. Przyczyny i mechanizm powstawania odkształceń spawalniczych .....	138
12.6. Sposoby zmniejszania naprężeń i odkształceń spawalniczych .	140
12.7. Naprężenia dopuszczalne wg przepisów i norm .....	142
12.8. Część praktyczna .....	143
12.8.1. Wyposażenie aparaturowo - materiałowe .....	143
12.8.2. Przebieg ćwiczenia .....	143
12.9. Literatura .....	144
13. SPAWALNOŚĆ STALI .....	145
13.1. Pojęcie spawalności .....	145
13.1.1. Spawalność metalurgiczna stali .....	145
13.1.2. Spawalność technologiczna .....	148
13.1.3. Spawalność konstrukcyjna .....	148
13.2. Pękanie połączeń spawanych .....	148
13.3. Metody badań spawalności .....	150
13.4. Część praktyczna .....	152
13.4.1. Próba złącza teowego .....	152
13.4.1.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	152
13.4.1.2. Przebieg ćwiczenia .....	152
13.4.2. Badanie blachy o grubości do 2,5 mm – próba nadtapiania zwykła.	152
13.4.2.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	152
13.4.2.2. Przebieg ćwiczenia .....	153
13.4.3. Próba spawalności metodą Foke – Wulfa .....	153
13.4.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	153
13.4.3.2. Przebieg ćwiczenia .....	153

13.5. Literatura .....	154
<b>14. CIĘCIE TERMICZNE .....</b>	<b>155</b>
14.1. Istota cięcia termicznego .....	155
14.2. Cięcie tlenem .....	155
14.2.1. Palniki do cięcia tlenem .....	157
14.2.2. Zasady i warunki cięcia tlenem .....	157
14.2.3. Technika cięcia tlenem .....	160
14.2.4. Jakość powierzchni cięcia .....	161
14.3. Cięcie plazmowe - PAC .....	162
14.3.1. Istota cięcia strumieniem plazmy .....	162
14.3.2. Rodzaje palników do cięcia plazmowego .....	163
14.3.3. Parametry cięcia plazmowego .....	164
14.3.4. Gazy plazmotwórcze .....	164
14.4. Cięcie laserowe .....	165
14.4.1. Istota cięcia laserowego .....	165
14.4.2. Parametry cięcia laserowego .....	166
14.5. Cięcie łukowe .....	166
14.5.1. Cięcie łukowo – powietrzne elektrodą grafitową lub elektrodą otuloną .....	166
14.5.2. Cięcie łukowo – tlenowe .....	167
14.6. Część praktyczna .....	168
14.6.1. Wyposażenie aparaturowo- materiałowe .....	168
14.6.2. Przebieg ćwiczenia .....	168
14.7. Literatura .....	168
<b>15. KONTROLA JAKOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH .....</b>	<b>171</b>
15.1. Niezgodności spawalnicze (wady) w złączach spawanych, poziomy jakości .....	171
15.2. Metody badań złączy spawanych .....	173
15.2.1. Cel badań jakości złączy spawanych .....	173
15.2.2. Podział metod badań złączy spawanych .....	173
15.3. Główne metody badań nieniszczących .....	174
15.3.1. Badania wizualne (VT – Visual Testing) .....	174
15.3.1.1. Wstęp .....	174
15.3.1.2. Technika badań wizualnych .....	175
15.3.2. Badania radiograficzne (RT –Radiographic Testing) .....	176

15.3.2.1. Wstęp .....	176
15.3.2.2. Technika badań .....	177
15.3.2.3. Ocena jakości złączy spawanych .....	179
15.3.3. Badania ultradźwiękowe (UT – Ultrasonic Testing).....	180
15.3.3.1. Wstęp .....	180
15.3.3.2. Technika badań ultradźwiękowych .....	181
15.3.4. Badania magnetyczno proszkowe (MT – Magnetic Testing) .....	184
15.3.4.1. Wstęp .....	184
15.3.4.2. Technika badania magnetycznego .....	186
15.3.5. Badania penetracyjne .....	188
15.3.5.1. Wstęp .....	188
15.3.5.2. Technika badania penetracyjnego .....	188
15.4. Metody dodatkowe - badania niszczące .....	190
15.4.1. Wstęp .....	190
15.4.2. Próba rozciągania poprzecznego złącza .....	190
15.4.3. Próba rozciągania wzdłużnego spoiny .....	191
15.4.4. Próba zginania .....	192
15.4.5. Próba udarności .....	193
15.4.6. Próba twardości .....	195
15.4.7. Próba łamania .....	196
15.4.8. Badania makroskopowe .....	197
15.5. Część praktyczna .....	198
15.5.1. Badania nieniszczące .....	198
15.5.1.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	198
15.5.1.2. Przebieg ćwiczenia .....	199
15.5.2. Badania niszczące .....	199
15.5.2.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe .....	199
15.5.2.2. Przebieg ćwiczenia .....	199
15.6. Literatura .....	199
<b>WYKAZ PRZYTOCZONYCH NORM .....</b>	<b>200</b>

## WPROWADZENIE

Spawalnictwo jest to dział technik wytwarzania obejmujący procesy spajania, tj. trwałego łączenia metali przez uzyskanie ciągłości materiałowej w miejscu gdzie powstaje złącze.

Spawalnictwo obejmuje również procesy pokrewne spawania, do których zalicza się: napawanie, natryskiwanie (metalizacja), zgrzewanie, lutowanie oraz cięcie termiczne.

Mimo, że minęło ponad 115 lat od opatentowania w 1885 roku spawania łukowego przez Polaka inż. Stanisława Olszewskiego przy współudziale Rosjanina Mikołaja Benardosa, to metoda ta nadal ma szczególne znaczenie w podstawowych technikach wytwarzania, naprawach różnorodnych konstrukcji metalowych, podwyższeniu wartości użytkowych wyrobów, zwiększeniu wydajności wytwarzania. Dysponowanie w spawalnictwie racjonalnymi metodami łączenia i cięcia metali niejednokrotnie wypiera inne techniki wytwarzania, jak np. nitowanie, odlewanie czy kucie.

Spawanie łukowe od wielu lat było wiodącym procesem łączenia metali. Jednak ostatnie dziesięciolecie wyróżniają się osiągnięciami w zakresie rozwoju (ulepszeń) technik i technologii procesów spawalniczych coraz to nowszych i trudniejszych wymagań przemysłu. Rozwój ten można podzielić na następujące dziedziny:

- rozwój w zakresie projektowania konstrukcji spawanych, np.: energetyka jądrowa, kosmonautyka, lotnictwo, przemysł samochodowy itp.,
- rozwój w zakresie procesów spawalniczych:
  - nowa generacja wysokowydajnych źródeł do wytwarzania skoncentrowanej energii cieplnej, np.: urządzenia do wytwarzania łuku plazmowego, urządzenia laserowe, urządzenia elektronowe, urządzenia inwertorowe do spawania łukowego,
  - sterowanie parametrami spawalniczymi, np.: przenoszenie kropli ciekłego metalu spoiwa, stabilizacja łuku spawalniczego, czy też sterowanie płynnością stopionego metalu rodzimego i spoiwa,
  - monitoring procesu spawalniczego w czasie rzeczywistym spawania z zastosowaniem sieci neuronowych, logiki sygnałów rozmytych oraz czujników jakości złącza np.: monitoring kształtu wymiarów spoiny, kontrola powstawania wad podczas procesu spawania, czy też kontrola osłony gazowej jeziora spawalniczego,

- rozwój w zakresie materiałowym, np. materiałów konstrukcyjnych takich jak: stale duplex i superduplex, kompozytów metalowych i metalowo – ceramicznych oraz materiałów różnoimiennych,
- rozwój w zakresie automatyzacji procesów spawalniczych, gdzie w procesie spawania eliminuje się błędy wynikające z czynnika ludzkiego.

Spawalnictwo jest jednak rozległą dziedziną wiedzy, zaś jej zastosowanie w praktyce przemysłowej charakteryzuje się dużą różnorodnością urządzeń spawalniczych oraz materiałów dodatkowych. Spawalnictwo jest tym ważniejsze, że:

- spawanie, zgrzewanie, lutowanie i szereg innych spawalniczych procesów pokrewnych stało się codziennością w nowoczesnych procesach wytwórczych,
- większość inżynierów ponosi też odpowiedzialność za konstruowanie, budowę i eksploatację maszyn i urządzeń technicznych zawierających elementy spawane.

Dlatego też zadaniem autorów niniejszego skryptu jest przedstawienie podstawowej tematyki spawalnictwa w zakresie poszerzonym o nowe techniki i technologie oraz procesów pokrewnych spawaniu. W treści tematycznej skryptu odniesiono się również do ustaleń i wymogów norm PN – EN oraz PN – ISO.

Niniejszą treść tematyczną skryptu opracowano z myślą dla użytku studentów kierunku Mechanika i Budowa Maszyn niezależnie od obranych specjalności. Zamieszczony w nim zasób ogólnej wiedzy z zakresu spawalnictwa ma pomóc studentom w przygotowaniu się w wystarczającym stopniu do ćwiczeń laboratoryjnych z Techniki Wytwarzania – Podstawy Spawalnictwa, Technologii Spawania i Regeneracji oraz z Podstaw Inżynierii Przemysłowej niezależnie od realizowanych na ten temat wykładów.

Skrypt niniejszy zawiera 15 rozdziałów – tematów ćwiczeniowych. Każdy rozdział zawiera ogólny zasób wiedzy z zakresu określonego tematu, który jest niezbędny do przyswojenia przez studenta, ogólny opis przebiegu części praktycznej ćwiczenia oraz wykaz podstawowej literatury niezbędnej do poszerzenia wiedzy z przedstawionej tematyki ćwiczenia oraz wykładów.

*A u t o r z y*

## ZASADY ODBYWANIA ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH

1. Obecność na zajęciach laboratoryjnych jest obowiązkowa.
2. W razie nieobecności spowodowanej okolicznościami obiektywnymi student jest zobowiązany ustalić z prowadzącym sposób odrobienia tematu ćwiczeń laboratoryjnych, np. z inną grupą laboratoryjną.
3. Każdego ćwiczącego przed rozpoczęciem ćwiczeń laboratoryjnych obowiązuje znajomość teoretyczna materiału wiążącego się z bieżącym tematem ćwiczenia.
4. Zajęcia laboratoryjne rozpoczynają się sprawdzianem wiadomości z bieżącego tematu w formie kartkówki lub ustnych odpowiedzi oraz oddania sprawozdań z poprzednio odbytych ćwiczeń laboratoryjnych.
5. W razie uzyskania w trakcie ćwiczeń laboratoryjnych oceny niedostatecznej student zobowiązany jest do zaliczenia tego tematu podczas terminów konsultacji lub w innym ustalonym terminie.
6. Każdego uczestnika ćwiczeń laboratoryjnych obowiązują zasady bezpieczeństwa podczas odbywania ćwiczeń laboratoryjnych, a w szczególności zakazu używania w obrębie laboratorium otwartego ognia oraz zakaz uruchamiania urządzeń bez wyraźnego polecenia prowadzącego zajęcia.
7. Zajęcia rozpoczynają się każdorazowo zapoznaniem się z przepisami bhp na przedmiotowym stanowisku laboratoryjnym.
8. Każdy ćwiczący jest zobowiązany posiadać na sobie ubiór ochronny (fartuch), najlepiej drelichowy. Niedopuszczalne jest używanie fartucha z tkanin łatwo palnych, np. stilonowych.
9. Osoby nie posiadające ubioru ochronnego nie będą dopuszczone do odbycia ćwiczeń.
10. Przy bezpośrednim dokonywaniu procesów spawalniczych przez ćwiczących powinni oni posługiwać się indywidualnym sprzętem ochronnym w zależności od potrzeb (maski spawalnicze, okulary, fartuchy, rękawice).
11. W trakcie odbywania ćwiczeń każdy z uczestników zobowiązany jest do zanotowania danych z przebiegu części praktycznej ćwiczenia z przeznaczeniem do opracowania sprawozdania.
12. Z odbytych ćwiczeń laboratoryjnych ćwiczący samodzielnie opracowuje sprawozdanie według wzoru i oddaje na następnych zajęciach.

## 13. Wzór sprawozdania:

## 1) wzór tabelki

<b>Politechnika Koszalińska</b>	<b>LABORATORIUM z SPAWALNICTWA</b>			
<i>/nazwisko, imię/</i>	<b>Temat:</b>			
	<i>/grupa/</i>	<i>/specjalność/</i>	<i>/semestr/</i>	<i>/data/</i>

## 2) Wzór treści sprawozdania:

- a) krótki opis części teoretycznej tematu ćwiczenia na jednej stronie nie większej niż formatu A4,
- b) dokładny opis części praktycznej ćwiczenia z podaniem niżej wymienionych danych dotyczących, np.:
  - rodzaju stosowanych urządzeń spawalniczych i ich charakterystyk oraz oprzyrządowania stanowiska,
  - rodzaju stosowanych materiałów spawanych i dodatkowych oraz ich charakterystyka (np.: skład chemiczny, grubość, średnica, symbole, charakterystyka fizyko-chemiczna lub metalurgiczna itp.),
  - przygotowania materiałów do procesów spawalniczych (np. rysunki, pozycje, wzory, obliczenia, itp.),
  - parametrów technologicznych procesów spawalniczych i ich dobór,
- c) uwagi i wnioski dotyczące technologii i technik spawalniczych realizowanych w czasie ćwiczenia.

# 1. BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY W PROCESACH SPAWALNICZYCH

## 1.1. Wstęp

Problem bezpieczeństwa i higieny pracy obejmuje zagadnienia techniczne, higieniczno – sanitarne, organizacyjne i prawne. Skutki braków i niedociągnięć w tej dziedzinie prowadzą do występowania wypadków przy pracy oraz chorób zawodowych. Podobnie jak i w innych technologiach i technikach wytwarzania procesy spawalnicze wnoszą również niebezpieczeństwa zagrażające spawaczowi, otoczeniu oraz środowisku. Wskutek tego wprowadzono liczne przepisy, normy, instrukcje itp. mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa warunków pracy i ochrony środowiska.

Duże znaczenie dla zapobieżenia powstawania wypadków ma właściwe szkolenie pracowników lub załóg, a do wykonywania prac spawalniczych zatrudnianie spawaczy z odpowiednimi uprawnieniami spawalniczymi. Za szkolenie w zakresie bhp, dopuszczenie do pracy pracownika zgodnie z jego kwalifikacjami oraz za zapewnienie bezpiecznych warunków pracy odpowiada pracodawca. Z drugiej strony pracownicy są zobowiązani do ścisłego przestrzegania instrukcji obsługi urządzeń, instrukcji bezpieczeństwa oraz innych uregulowań dotyczących stanowiska pracy.

Stopień zagrożenia i szkodliwości zależy od rodzaju procesu spawalniczego, rodzaju materiału spawanego, od organizacji i warunków pracy, teoretycznego przygotowania pracownika, wyposażenia w środki ochrony osobistej oraz warunków bhp.

Źródłem wszelkich wypadków w procesach spawalniczych może być:

- porażenie prądem elektrycznym,
- porażenie oczu i skóry wskutek oddziaływania szkodliwego promieniowania ciepłego, nadfioletowego i podczerwonego,
- zatrucie szkodliwymi gazami i pyłami wydzielającymi się podczas procesu spawalniczego,
- radioaktywność i pole elektromagnetyczne,
- możliwość wybuchu lub pożaru,
- oparzenie kroplami płynnego metalu lub żużla i rozgrzanymi przedmiotami,
- skaleczenie, zranienie, zgniecenie i zaprószenie oczu podczas przygotowania przedmiotów do spawania,
- praca na wysokościach.



## 1.2. Zagrożenia zawodowe spawaczy

### 1.2.1. Porażenie prądem elektrycznym

Porażenie prądem elektrycznym przy wykonywaniu prac spawalniczych wiąże się z oddziaływaniem prądu elektrycznego na organizm ludzki, co pociąga za sobą niejednokrotnie uszkodzenie organów wewnętrznych, zewnętrznych lub śmierci. Prąd elektryczny przepływając przez ciało ludzkie wydziela znaczne ilości ciepła, działa na układ nerwowy, wywołuje zjawisko elektrolizy, a nawet może spowodować urazy mechaniczne.

Porażenie prądem elektrycznym układu nerwowego przejawia się zaburzeniami wzroku, słuchu i zmysłu równowagi, skurczu mięśni, zatrzymania oddechu oraz zakłócenia pracy serca. Zmiany te mogą być czasem nawet nieodwracalne. Najgroźniejsze w skutkach jest tzw. migotanie komór serca, co przy chwilowym jego trwaniu może doprowadzić do takiego omdlenia, że nie można wyczuć oddechu ani pracy serca, a porażony sprawia zaś wrażenie nieżywego.

Przeciętne natężenie prądu powyżej 0,025A powoduje ból i staje się niebezpieczne, powyżej 0,05A - powoduje utratę przytomności, a powyżej zaś 0,1A - powoduje skutki śmiertelne. Szczególnie niebezpieczny dla człowieka jest prąd przemienny o częstotliwości 40 ÷ 60 Hz ze względu na jego silne oddziaływanie na system układu nerwowego.

Kontaktowa oporność elektryczna ciała znacznie wzrasta, jeśli ciało człowieka chronione jest właściwą odzieżą ochronną, odpowiednim obuwiem czy innym sprzętem ochrony osobistej (np. dywanikami dielektrycznymi). Odzież wilgotna i zanieczyszczona tłuszczami oraz pyłami metalicznymi zwiększa stopień zagrożenia porażenia prądem elektrycznym.

Szczególnie niebezpieczne są wypadki związane z bezpośrednim kontaktem spawacza z pierwotnym obwodem elektrycznym urządzeń spawalniczych, ale znane są również przypadki śmiertelnego porażenia prądem elektrycznym o napięciu do 100V, będącego napięciem stanu jałowego większości używanych źródeł prądu spawania.

W celu zwiększenia stopnia bezpieczeństwa podczas prac spawalniczych należy przestrzegać następujących zasad:

- nie dotykać gołymi rękami urządzeń spawalniczych,
- dbać o dobry stan izolacji przewodów spawalniczych,
- unikać pracy w pomieszczeniach wilgotnych, stosować gumowe rękawice lub dywaniki dielektryczne,
- nie pracować indywidualnie w pomieszczeniach zamkniętych.

### **1.2.2. Oddziaływanie promieniowania z łuku elektrycznego i płomienia**

W procesie spawania łukowego wydzielają się promieniowanie świetlne (widzialne), podczerwone oraz nadfioletowe (niewidzialne). Promieniowanie świetlne oślepia oczy spawacza i nie pozwala na obserwowanie procesu spawania. Promienie podczerwone przenikają przez przezroczyste części oka i wywołują w nim po dłuższym czasie trwałe zmiany, przyczyniając się do zachorowalności na zaćmę. Najszybciej i dotkliwie daje się odczuć działanie promieniowania nadfioletowego, które wywołuje zapalenie spojówek, rogówki i powiek. Zapalenie to odczuwa się po kilku godzinach jako ból oka, łzawienie i światłowstręt. Ponadto promieniowanie nadfioletowe działa na skórę odsłoniętych części ciała powodując oparzenia podobne do oparzeń słonecznych.

Intensywność promieniowania zależy od metody spawania lub cięcia oraz przyjętych parametrów procesu.

W celu zabezpieczenia się przed szkodliwością oddziaływania promieniowania należy stosować środki ochrony indywidualnej spawacza (wg PN-EN 169, PN-EN 175, PN-EN 470), do których zalicza się:

- okulary ochronne,
- maski spawalnicze lub przyłbice spawalnicze,
- rękawice ochronne,
- odzież ochronna.

### **1.2.3. Oddziaływanie gazów, dymów i pyłów na organizm człowieka**

Spawanie i cięcie związane jest z wydzielaniem się gazów, pyłów i par metali, które mogą wpływać szkodliwie na organizm spawacza i innych osób przebywających w otoczeniu stanowiska spawalniczego. Powstawanie tych szkodliwych czynników są wynikiem topienia się materiału podstawowego, materiałów dodatkowych w postaci elektrod otulonych, topników, ulatniania lub rozpadu i jonizacji gazów spawalniczych oraz oparów pochodzących z cieczy odłuszczejących.

Ilość i skład dymów, pyłów i gazów wdychanych zależy od metody, parametrów spawania, rodzaju spawanych materiałów podstawowych i dodatkowych, pozycji spawania oraz jakości i wydajności stosowanych środków ochronnych spawacza.

Gazami najczęściej powstającymi w procesie spawania i cięcia stwarzającymi niebezpieczeństwo dla zdrowia spawacza są: ozon, tlenki azotu, tlenek węgla, fosgen, fluowodór i jego związki.

Wśród czynników szkodliwych w postaci pyłów i dymów i oparów metali szczególnie niebezpieczne są: związki cynku, arsenu, ołów i jego związki, kadm, nikiel, związki miedzi oraz związki aluminium i żelaza.

W celu zapobieżenia szkodliwego oddziaływania powyższych czynników szkodliwych na organizm człowieka wymagane jest stosowanie wentylacji o charakterze ogólnym lub miejscowym. Rodzaje i zakres stosowania wentylacji zależy od rodzaju stanowiska (prace doraźne, prace ciągłe) oraz od metody procesów spawalniczych (spawania, cięcia, zgrzewania, lutowania).

Szczególne uwagą i nadzorowaniem należy objąć spawaczy pracujących w zamkniętych pomieszczeniach (zbiornikach) wraz zapewnieniem szybkiego ich wyprowadzenia z tego pomieszczenia w przypadku zaśląbnięcia.

#### 1.2.4. Radioaktywność i pole elektromagnetyczne

Radioaktywność w czasie spawania występuje na wskutek stosowania w niektórych procesach spawalniczych elektrod wolframowych o zawartości  $1\div 2\%$   $\text{ThO}_2$ , który jest związkiem słabo radioaktywnym. Dwutlenek toru w dymie może wystąpić tylko w przypadku całkowitego braku wentylacji. W normalnych warunkach pracy stosowanie torowanych elektrod wolframowych nie stwarza zagrożenia z punktu widzenia bhp.

Najgroźniejszym źródłem radioaktywności przy spawaniu jest spawanie wiązką elektronów, a w szczególności przy spawaniu urządzeniami pracującymi pod napięciem powyżej 60 kV. Zagrożenie napromieniowaniem występuje również dla personelu wykonującego badania nieniszczące złączy spawanych metodą radiograficzną wykorzystując promieniowanie rentgenowskie X lub izotopowe  $\gamma$ .

Obsługa urządzeń do spawania elektronowego oraz badań radiograficznych musi być wyposażona w indywidualne wskaźniki napromieniowania.

W niektórych procesach spawalniczych występuje również pole elektromagnetyczne, które negatywnie wpływa na organizm ludzki. Szczególne znaczenie w oddziaływaniu na organizm ludzki posiadają następujące zjawiska:

1. Składowa magnetyczna wywołująca indukowanie się prądów wirowych w organizmie człowieka o gęstości większej od  $10 \text{ mA/m}^2$ .
2. Rezonans pola elektromagnetycznego powodujący np. zwiększony wpływ wapnia z komórek nerwowych.
3. Pole elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości. Podstawowym mechanizmem oddziaływaniem tego pola jest zamiana na ciepło energii pola zaabsorbowanego przez tkanki organizmu ludzkiego (tzw. efekt nasłórkowy), powodując przegrzanie tkanki organizmu.

### 1.2.5. Zagrożenie wybuchem lub pożarem

Podczas prowadzenia prac spawalniczych oraz składowaniu gazów technicznych oraz ich wykorzystywaniu do celów spawalniczych występują zagrożenia wybuchem i pożarem na wskutek następujących przyczyn:

- tworzenia się mieszanin wybuchowych,
- reakcji gazów z metalami oraz materiałami pochodzenia organicznego i nieorganicznego,
- niewłaściwej obsługi urządzeń spawalniczych, zbiorników oraz instalacji gazowych, np. rzucanie, uderzenie itp., co może spowodować powstanie pęknięć i nieszczelności,
- wzrostu ciśnienia gazów w wyniku bezpośredniego oddziaływania temperatury zewnętrznej np.: promieniowania słonecznego, grzejników centralnego ogrzewania itp.,
- nieszczelności zaworów lub reduktorów butli gazowych,
- używania do prac z butlami niewłaściwych narzędzi powodujących zaiskrzenie,
- używania otwartego ognia lub innych urządzeń grzewczych w bezpośredniej bliskości składowania gazów,
- wspólnego magazynowania gazów palnych z gazami podtrzymującymi palenie lub innymi substancjami, jak np. acetylenu, wodoru z tlenem lub innych gazów palnych z chlorem sprężonym,
- stosowania smarów przy konserwacji butli lub zaoliwionych narzędzi, czyściwa itp. przy gazach takich, jak: tlen sprężony, powietrze sprężone,
- zaprószenia ognia w trakcie wykonywania prac spawalniczych, np. przez rozżarzone cząstki metalu,
- zwarcia, uszkodzenia, przegrzania instalacji i urządzeń energetycznych.

### 1.2.6. Poparzenia

Ze względu na wysoką temperaturę występującą w procesach spawalniczych istnieje bezpośrednie zagrożenie poparzenia, którego przyczyny mogą być następujące:

1) bezpośrednio:

- w trakcie procesów podgrzewania wstępnego przedmiotu,
- poparzenia gorącym metalem spoiny,
- odpryskami metalu lub zużłta powstającego w czasie spawania,

- rozgrzaną elektrodą,
  - poparzenia płomieniem palnika,
  - w czasie wykonywania obróbki termicznej złącza,
- 2) pośrednie, w wyniku zapalenia się materiałów łatwopalnych w czasie prowadzenia prac spawalniczych.

### 1.2.7. Uszkodzenia mechaniczne

Najczęściej spotykanym uszkodzeniem mechanicznym występującym w procesach spawalniczych jest zaproszenie oka lub poparzenie odpryskami żużla podczas jego odbijania lub odpryskiem metalu podczas spawania jak i innych prac przygotowujących przedmiot do spawania.

Wszelkiego rodzaju skaleczenia, zranienia, zgniecenia itp. mogą powstać podczas prac przygotowawczych przedmiotów do spawania.

Szczególne uwagę należy zwracać podczas robót montażowych przy spawaniu konstrukcji stalowych na wysokościach. Spawacze do wykonywania tych prac powinni przejść badania psycho – techniczne i uzyskać zezwolenia lekarskie do spawania na wysokościach.

## 1.3. Znaki ostrzegawcze

Znaki bezpieczeństwa i hasła bhp mają bardzo duże znaczenia dla zwiększenia bezpieczeństwa pracy. Podstawowym przeznaczeniem znaków bezpieczeństwa i haseł bhp jest szybkie zwrócenie uwagi na obiekty oraz sytuacje dotyczące bezpieczeństwa i zdrowia. Należy je stosować wyłącznie do instruowania i ostrzegania o sytuacjach bezpośrednio związanych z bezpieczeństwem i zdrowiem.

W zależności od kształtu i zastosowanej kolorystyki wyróżnia się cztery podstawowe typy znaków bezpieczeństwa:

1. Znaki zakazu;  
kształt: koło  
tło: barwa biała  
obwódka okrągła i pas negujący: barwa czerwona  
symbol graficzny, obrazkowy lub tekst: barwa czarna.
2. Znaki nakazu;  
kształt: koło  
tło: barwa niebieska  
symbol graficzny, obrazkowy lub tekst: barwa biała.

3. Znaki ostrzegawcze;  
kształt: trójkąt równoboczny  
tło: barwa żółta  
symbol graficzny, obrazkowy lub tekst: barwa czarna.
4. Znaki informacyjne dotyczące warunków bezpiecznych;  
kształt: kwadrat lub prostokąt  
tło: barwa zielona (*w przypadku ochrony przeciwpożarowej barwa czerwona*)  
symbol graficzny, obrazkowy lub tekst: barwa biała.

Znaki bezpieczeństwa podzielone są w zależności od dziedzin, których dotyczą, na trzy następujące grupy:

- A. znaki ochrony przeciwpożarowej,
- B. znaki ewakuacyjne,
- C. znaki ochrony i higieny pracy.

**Znaki ochrony przeciwpożarowej** stosuje się w obszarach, dla których jest niezbędne i celowe podanie informacji publicznej o rozmieszczeniu lub rodzaju:

- urządzeń sygnalizacji pożarowej,
- sprzętu pożarniczego,
- środków ograniczających rozwój pożaru,
- obszarów i materiałów o szczególnym zagrożeniu pożarowym,
- środków ewakuacyjnych.

**Znaki ewakuacyjne** stosuje się w celu zapewnienia wizualnej informacji o przebiegu wyznaczonej drogi ewakuacyjnej zarówno przy świetle dziennym, sztucznym, jak i braku oświetlenia.

**Znaki ochrony i higieny pracy** poprzez kombinacje barwy i kształtu przekazują informację związaną z bezpieczeństwem o charakterze ogólnym, a ich symbol graficzny, obrazkowy lub tekst przekazuje konkretną informację związaną z bezpieczeństwem lub jego zagrożeniem.

## 1.4. Przepisy Urzędu Dozoru Technicznego

Jedną z grup urządzeń technicznych występujących dla potrzeb wykonywania procesów spawalniczych są urządzenia podlegające przepisom dozoru technicznego. Urządzenia te winny spełniać warunki wynikające z odpowiednich dokumentów, tzn.:

- warunków technicznych dozoru technicznego,
- norm powołanych przepisami dozoru technicznego,
- innych wymagań np. energetycznych, prób pomontażowych itp.

Wymagania dozoru technicznego polegają na zapewnieniu bezpośredniego nadzoru urządzeń, które mogą stworzyć zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzkiego oraz środowiska na skutek:

- rozprężania cieczy lub gazów będących pod ciśnieniem różnym od atmosferycznego,
- wyzwolenia energii potencjalnej lub kinetycznej, gdy przemieszcza się ludzi lub ładunki w ograniczonym zasięgu,
- rozprzestrzeniania się materiałów żrących lub trujących w czasie ich magazynowania lub transportu w zbiornikach bezciśnieniowych.

Do urządzeń należących do zabezpieczenia stanowiska i procesów spawalniczych objętych przepisami dozoru technicznego zalicza się:

- 1) przenośne i stałe wytwornice acetylenowe wraz ze zbiornikami służącymi do jego magazynowania, schładzania, osuszania oraz urządzenia zabezpieczające na przewodach rozprowadzających acetylen,
- 2) zbiorniki bezciśnieniowe o ciśnieniu nie wyższym niż 0,05MPa:
  - do transportu i magazynowania środków żrących,
  - do transportu i magazynowania środków trujących,
- 3) urządzenia ciśnieniowe, w których znajdują się ciecze lub gazy pod ciśnieniem różnym od atmosferycznego:
  - zbiorniki stałe o iloczynie nadciśnienia i pojemności wyższej od  $0,005\text{MPa} \times \text{m}^3$  do magazynowania cieczy i gazów lub prowadzenia w nich procesu technologicznego pod ciśnieniem wyższym od 0,05MPa,
  - zbiorniki przenośne (transportowe) o pojemności powyżej  $350\text{cm}^3$  do magazynowania cieczy lub gazów, zmieniające miejsce między napełnianiem a opróżnianiem (nie dotyczy zbiorników do napojów gazowanych),
- 4) dźwignice – środki transportu o ograniczonym zasięgu i ruchu przerywanym do przemieszczania osób lub ładunków np. suwnice, żurawie, dźwig towarowe, układnice do składowania towarów w magazynach itp.

W przypadku nie przestrzegania przez użytkownika (eksploatatora) warunków technicznych lub przepisów, właściwy organ dozoru technicznego (Rejonowy Inspektorat Dozoru Technicznego) wydaje decyzję administracyjną o wstrzymaniu dalszej eksploatacji urządzenia.

## 2. SPAWANIE GAZOWE METALI

### 2.1. Charakterystyka spawania gazowego

Spawanie gazowe należy do dawniejszych metod spawania, ale właściwy jego rozwój rozpoczął się dopiero pod koniec XIX wieku. W Polsce największy rozwój spawania gazowego przypada na lata 1910 - 1925, tj. od chwili uruchomienia w Warszawie pierwszej fabryki tlenu.

Spawanie gazowe polega na miejscowym stopieniu brzegów łączonych metali i ich stopów przy pomocy ciepła płomienia powstającego ze spalania gazu palnego i tlenu.

Spoina (miejsce łączenia) powstaje ze stopionego spoiwa i nadtopionych brzegów łączonych materiałów. Przy spawaniu blach cienkich można wykonać spoinę bez dodatku spoiwa stapiając odpowiednio przygotowane krawędzie np. cienkich blach (spoina brzeżna).

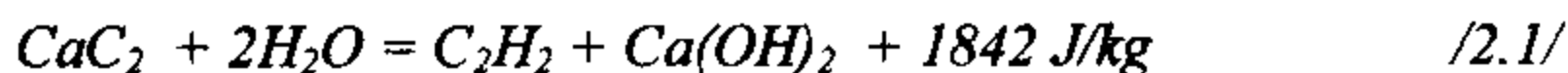
Zmieszanie gazów w odpowiednim stosunku, wytwarzanie płomienia oraz kierowanie nim odbywa się w przyrządzie zwanym palnikiem, do którego doprowadza się gaz palny i gaz podtrzymujący palenie (tlen).

### 2.2. Gazy techniczne stosowane w spawalnictwie

Ze względów metalurgicznych do spawania gazowego w zasadzie stosuje się tylko mieszaninę acetylenu ( $C_2H_2$ ) i tlenu ( $O_2$ ). Z powodu dość ograniczonego zastosowania pozostałych gazów palnych, tj. propanu ( $C_3H_8$ ), metanu ( $CH_4$ ), butanu ( $C_4H_{10}$ ), wodoru ( $H_2$ ), gazu ziemnego lub gazu koksowniczego w niniejszym skrypcie ograniczono się jedynie do omówienia powszechnie stosowanych dwóch pierwszych - acetylenu i tlenu.

#### 2.2.1. Wytwarzanie i właściwości acetylenu

**Acetylen** ( $C_2H_2$ ) otrzymuje się z karbidu (węglika wapnia  $CaC_2$ ) i wody w urządzeniach zwanych wytwornicami acetylenowymi, w myśl reakcji:



Jest to gaz nietrujący, ale usypiający, palny, bezbarwny, lżejszy od powietrza, o lekkim eterycznym zapachu wywołanym zanieczyszczeniem fosforowodorem  $PH_3$  oraz siarkowodorem  $H_2S$ .



Acetylen tworzy z powietrzem i tlenem mieszaniny wybuchowe, dlatego stanowiska spawalnicze muszą być wentylowane lub prace spawalnicze muszą być wykonywane na powietrzu. Acetylen również wykazuje duże powinowactwo chemiczne do miedzi oraz srebra i tworzy z tymi pierwiastkami związki wybuchowe zwane acetylenkami. Dlatego też armatura acetylenowa nie może być wykonywana ze stopów zawierających więcej niż 65% Cu i 25% Ag.

Acetylen skrapla się przy ciśnieniu atmosferycznym w temperaturze  $-83^{\circ}\text{C}$ , a przechodzi w stan stały w temperaturze  $-85^{\circ}\text{C}$ . W stanie stałym jak i ciekłym wybucha od tarcia lub wstrząsów.

Acetylen dla celów spawalniczych wykorzystywany jest w stanie rozpuszczonym w acetonie, w stalowych butlach acetylenowych wypełnionych masą porowatą.

### 2.2.2. Butle do acetyleny

Butle do acetyleny są przeznaczone do magazynowania i transportu acetyleny rozpuszczonego w acetonie pod ciśnieniem. Są one wypełnione wewnątrz masą porowatą oraz zawierają określoną ilość acetonu.

Przyjmuje się, że 1 kg rozpuszczonego acetyleny daje około  $920\text{ dm}^3$  gazu. Ilość acetyleny w butli określa się poprzez jej ważenie i odjęcie jej tary (wybita na szyjce butli).

Orientacyjnie we wnętrzu butli objętościowo zawiera się:  $\sim 40\%$  acetonu,  $\sim 20\%$  masy porowatej,  $\sim 28\%$  acetyleny rozpuszczonego w acetonie i  $\sim 12\%$  przestrzeni bezpieczeństwa. Masa porowata zapobiega rozpadowi cząstek acetyleny, szczególnie nad powierzchnią acetonu oraz przyspiesza rozpuszczanie i odparowanie acetyleny z roztworu, co pozwala również na jego zmagazynowanie pod ciśnieniem do około 2 MPa w warunkach normalnych. Objętość właściwa roztworu acetonu z acetylenem zależy od temperatury, co powoduje zmiany ciśnienia w butli. Do określenia ilości acetyleny w butli przeprowadza jej ważenie bez kołpaka i odjęciu tary (wybitej na głowicy butli). Z typowej butli spawalniczej acetyleny o pojemności  $40\text{ dm}^3$  można pobierać do  $1\text{ m}^3$  acetyleny na godzinę.

Butli acetylenowych nie należy opróżniać całkowicie, lecz pozostawiać nadciśnienie w zależności od temperatury otoczenia. Butle podlegają również okresowym badaniom przez instytucje Urzędu Dozoru Technicznego.

Podczas spawania lub cięcia na zaworze butlowym powinien być zawsze założony klucz, aby w razie potrzeby (cofnięcia płomienia) można było natychmiast zamknąć ten zawór.

### 2.2.3. Wytwarzanie i właściwości tlenu

Tlen ( $O_2$ ) otrzymuje się w procesie skraplania powietrza atmosferycznego poprzez doprowadzenie go do temperatury  $-191^\circ\text{C}$ . Ponieważ azot wrze w temperaturze  $-196^\circ\text{C}$ , a tlen przy temperaturze  $-183^\circ\text{C}$ , oba składniki powietrza dają się rozdzielić poprzez odparowanie azotu w granicach tych temperatur. Ciekły tlen przeprowadza się w stan gazowy i wtlacza do butli tlenowych pod ciśnieniem do 15 MPa.

Tlen jest gazem bezbarwnym, bez zapachu i niepalnym, lecz silnie podtrzymującym palenie. Tlen w bezpośredniej styczności z tłuszczami, smarami i olejami łączy się w sposób wybuchowy. Z tego też powodu zabrania się smarowania i konserwacji urządzeń i instalacji tlenowych wszelkiego rodzaju smarami i tłuszczami.

Tlen w butli zawiera zanieczyszczenia w postaci cząstek wody ( $H_2O$ ), azotu ( $N_2$ ) i resztek gazów szlachetnych. Przy gwałtownym rozprężaniu tlenu (poborze) woda może spowodować zamarznięcie zaworu redukcyjnego.

Ilość tlenu w butli określa się poprzez pomnożenie ciśnienia odczytanego na manometrze reduktora (MPa) przez pojemność butli ( $\text{dm}^3$ ), np.  $15\text{MPa} \times 40\text{dm}^3 = 600\text{dm}^3 = 6\text{m}^3$  tlenu. W rzeczywistości tlenu jest o 10% więcej, ponieważ przytoczona zależność dotyczy gazów doskonałych.

Zabrania się opróżniania butli tlenowych poniżej 0,05 MPa, ze względu na zapowietrzenie butli lub zanieczyszczenie wnętrza butli z zewnątrz.

### 2.2.4. Butle do gazów skroplonych

Butle do gazów skroplonych służą do magazynowania i transportu propanu, butanu lub ich mieszanin oraz dwutlenku węgla ( $CO_2$ ). Butle do dwutlenku węgla są w budowie takie same jak do gazów sprężonych.

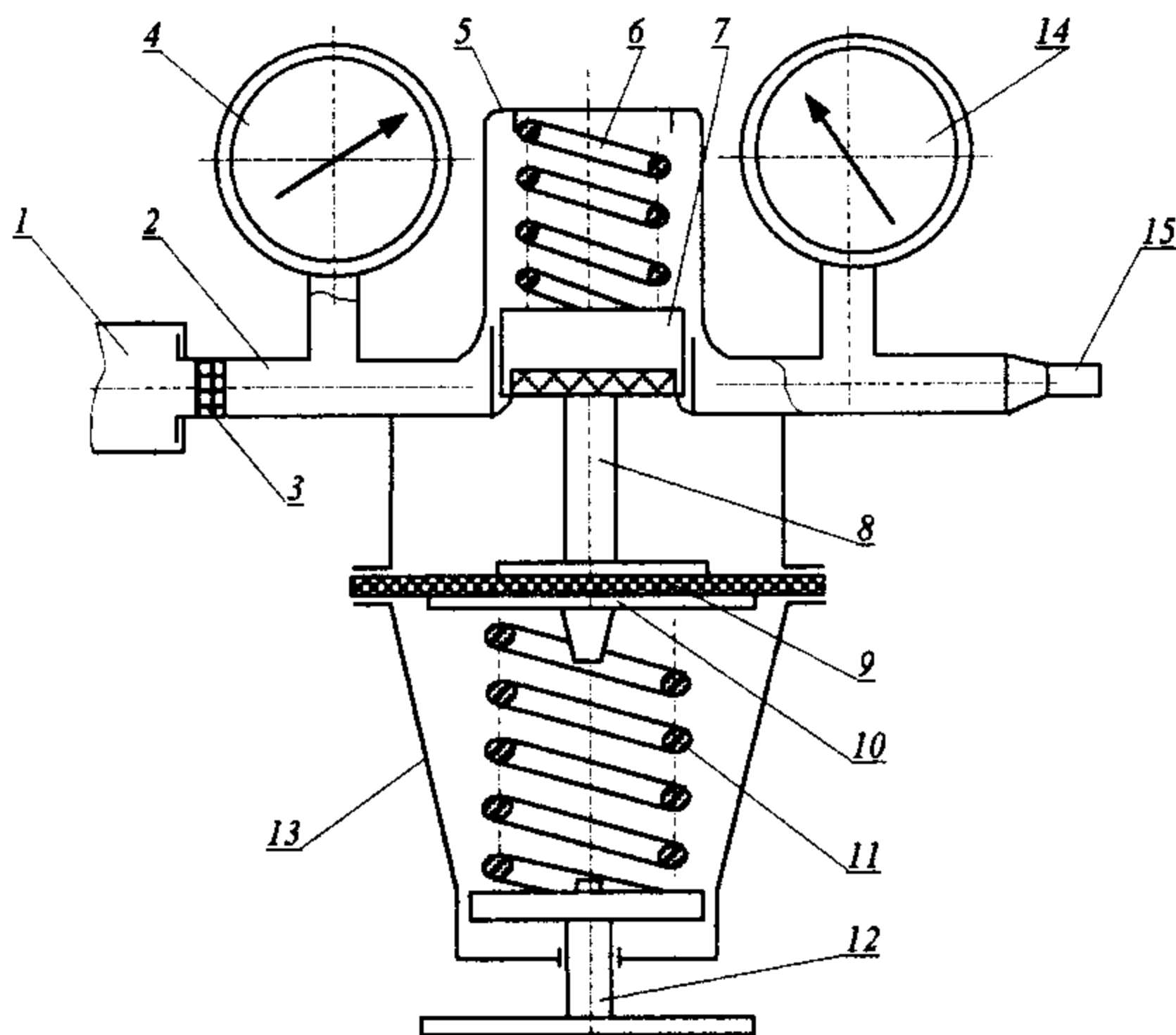
Butle do propan – butanu mogą być wykonane ze spawanych segmentów blaszanych.

## 2.3. Reduktory ciśnienia

Gazy zmagazynowane w butlach lub przesyłane siecią rurociągów nie mogą być bezpośrednio użyte do zasilania palników, ze względu na panujące w nich ciśnienie jak i możliwość spadku ciśnienia w butli podczas spawania. Fakt ten zmuszałby spawacza do ciągłej regulacji płomienia. W celu wyeliminowania wymienionych niedogodności stosuje się reduktory ciśnienia (różnych typów i odmian).

Zadaniem reduktorów jest obniżenie ciśnienia pobieranego (roboczego) gazu do wymaganej stałej wartości ciśnienia zasilania (roboczego) palników lub innych urządzeń spawalniczych niezależnie od zmiany ciśnienia w butli lub sieci.

Rozróżnia się reduktory dźwigniowe i bezdźwigniowe, które mogą posiadać jedną lub dwie komory rozprężania, a w zależności od tego można je dzielić na reduktory jednostopniowe i dwustopniowe. Reduktor jest zaopatrzony w dwa manometry: manometr wskazujący ciśnienie w butli i manometr wskazujący ciśnienie zredukowane (robocze) lub rotametr. Schemat reduktora jednostopniowego przedstawia rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat reduktora jednostopniowego: 1 – nakrętka, 2 – łącznik wlotowy, 3 – filtr, 4, 14 – manometry, 5 – korpus, 6 – sprężyna dociskowa, 7 – grzybek redukcyjny, 8 – popychacz, 9 – przepona, 10 – dysk, 11 – sprężyna nastawcza, 12 – śruba nastawcza, 13 – pokrywa, 15 – przyłączka

Ze względu na miejsce zamontowania i poboru gazu reduktory dzielą się na: butlowe, sieciowe i centralne.

Reduktory do butli dla poszczególnych rodzajów gazów spawalniczych w celu zabezpieczenia ich przed zamianą mogą różnić się między sobą sposobem zamocowania na zaworze butlowym. Na przykład reduktor acetylenowy łączony jest z zaworem butlowym za pomocą jarzma stalowego nakładanego z góry i dokręcanego kluczem, zaś reduktor tlenowy mocuje się za pomocą króćca z gwintem i nakrętki.

Do spawania palnikiem bezsmoczkowym (bezinjektorowym) stosowane są reduktory równoprężne, które w swojej budowie stanowią zespolenie dwóch reduktorów (tlenowego i acetylenowego). Zadaniem reduktora równoprężnego jest utrzymanie na stałym poziomie ciśnienia tlenu i acetylenu.

## 2.4. Palniki acetylenowo - tlenowe do spawania

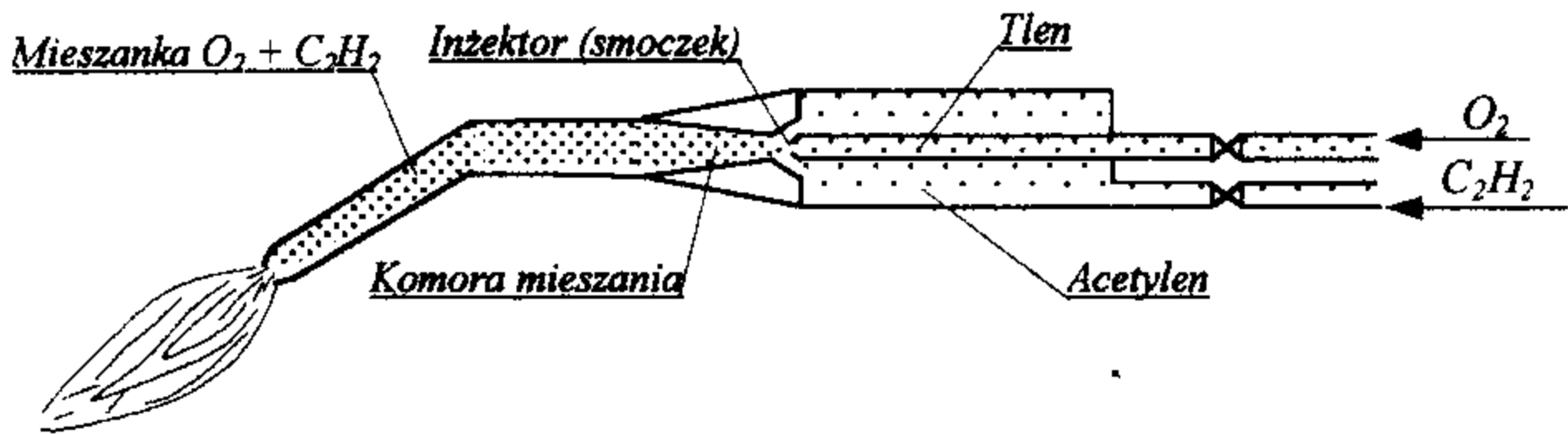
Zależnie od zasady działania i ciśnienia zasilania rozróżnia się palniki: smoczkowe niskiego i wysokiego ciśnienia, bezsmoczkowe wysokiego ciśnienia i równoprężne. Poza tym palniki mogą być ręczne i maszynowe. Palniki niskiego jak i wysokiego ciśnienia pracują na tej samej zasadzie. Różnica polega jedynie na tym, że ciśnienie zasilania gazu palnego w palnikach niskiego ciśnienia jest niskie i wynosi  $0,0005 \div 0,01$  MPa, a w palnikach wysokiego ciśnienia wynosi  $0,01 \div 0,15$  MPa.

Do spawania gazowego i cięcia ręcznego tlenem stosowane są głównie palniki smoczkowe (injektorowe) (rys. 2.2). Mają one łatwą regulację płomienia, a także są łatwe w obsłudze. W palnikach tego typu mieszanie gazu palnego z tlenem odbywa się wewnątrz palnika w komorze wyposażonej w smoczek (injektor). Smoczek służy do tego, aby tlen przepływający o wyższym ciśnieniu i z dużą prędkością mógł zasysać odpowiednią ilość acetylenu w celu otrzymania odpowiedniej ich proporcji w płomieniu.

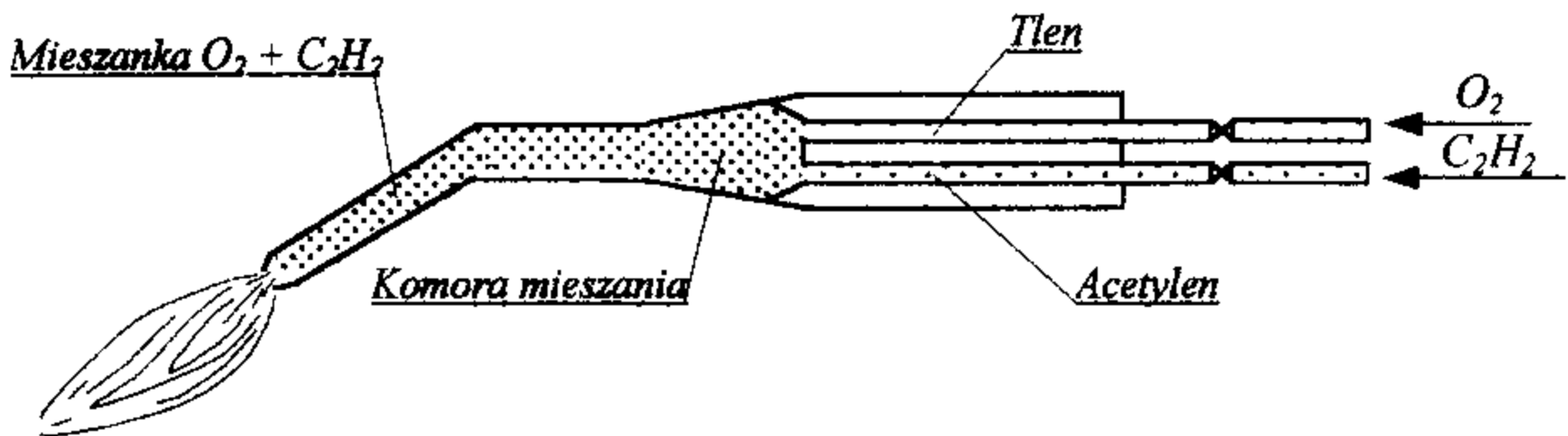
Palniki bezsmoczkowe (rys.2.3) nie mają smoczka, a pozostałe zespoły są takie same jak w palnikach smoczkowych. Mieszanie gazu palnego w palniku bezsmoczkowym może zachodzić:

- w powietrzu atmosferycznym poza wylotem palnika,
- w mieszalniku wewnątrz korpusu palnika.

Tego typu palnik nazywany jest równoprężnym i może być zasilany jedynie poprzez reduktor równoprężny (jednakowe ciśnienie gazu palnego i tlenu).



Rys. 2.2. Schemat działania palnika smoczkowego (inżektorowego)



Rys. 2.3. Schemat działania palnika bezsmoczkowego (bezinżektorowego)

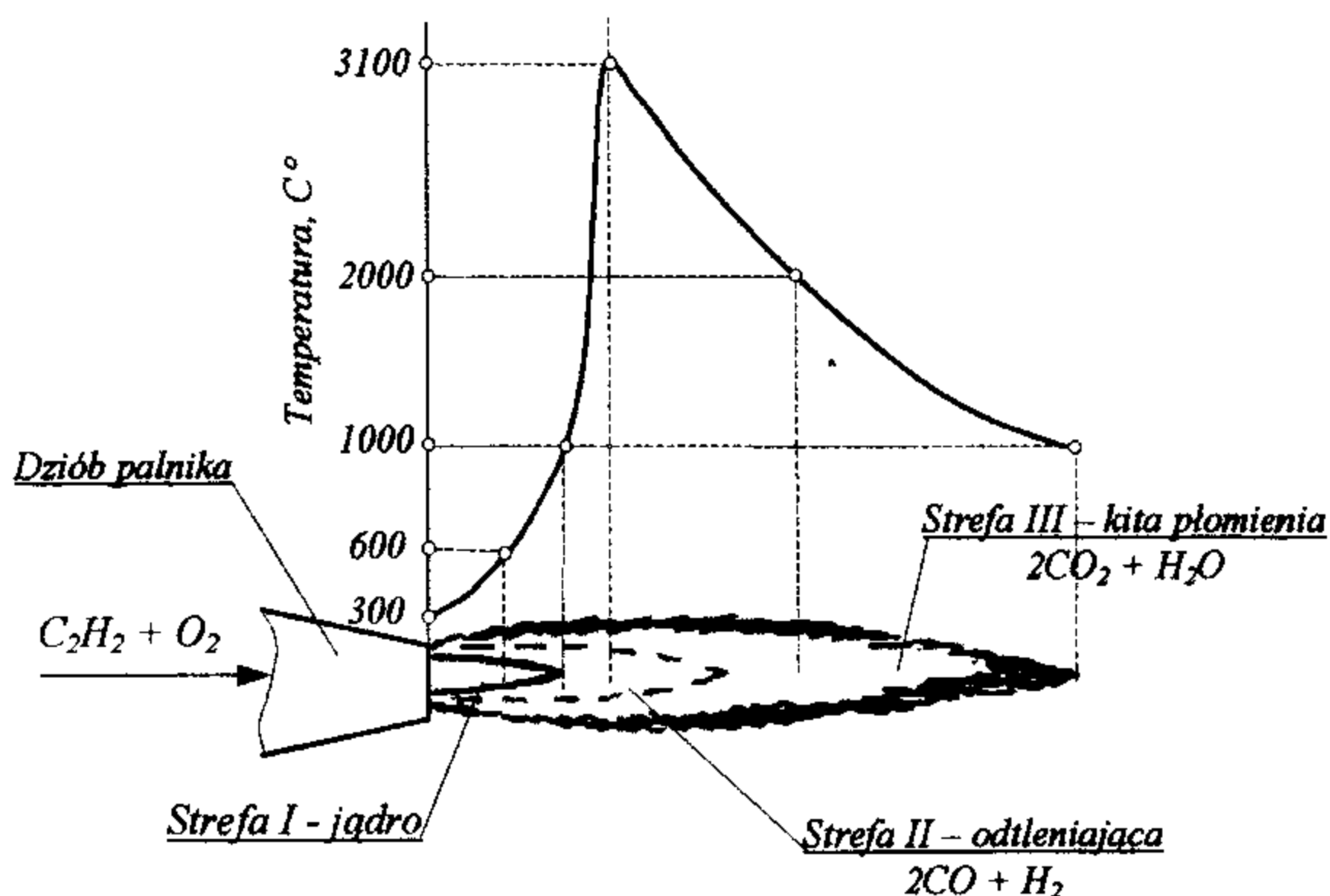
## 2.5. Płomień acetylenowo – tlenowy

Płomień acetylenowo – tlenowy jest najczęściej stosowany w procesach spawalniczych ze względu na właściwości redukujące jego produktów spalania i wysoką temperaturę płomienia. Płomień acetylenowo – tlenowy składa się z trzech stref: jądra, strefy odtleniającej i kity płomienia (rys. 2.4).

Płomień acetylenowo – tlenowy charakteryzuje się następującymi cechami:

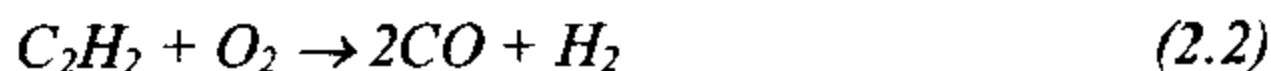
- wysoką temperaturą płomienia, która wynosi około  $3100^{\circ}\text{C}$ , w odległości 2 – 6 mm od końca jądra niezależnie od wielkości nasady palnika,
- łatwością regulacji płomienia palnika (płomień nie ulega zmianom podczas spawania),
- redukującym właściwościom gazów (strefa redukująca płomienia).

**Jądro** (strefa pierwsza) jest to jasno świecąca część płomienia, powstająca ze spalania gazów dopływających do palnika. Tworzenie się jądra jest zjawiskiem spowodowanym rozpadem acetyleny na wolny węgiel i wodór w płomieniu w temperaturze powyżej  $300^{\circ}\text{C}$ . Spalający się węgiel w atmosferze tlenu tworzy u wylotu dyszy ostro zakończone i jasno świece jądro o kształcie stożka.



Rys. 2.4. Wykres termiczny płomienia i rozmieszczenie jego stref

**Strefa odtleniająca** (strefa druga) jest to strefa powstała z rozżarzonych cząstek węgla niezupełnie spalonych w atmosferze dostarczonego tlenu tworząc tlenek węgla ( $CO$ ), który z wodorem ( $H_2$ ) powstałym z rozpadu acetylenu daje redukującą (odtleniającą) strefę płomienia. Powstałe w ten sposób gazy tej strefy zapobiegają przed zetknięciem się ciekłego metalu z tlenem i azotem z powietrza. Reakcja spalania acetylenu w tej strefie przebiega według równania:



**Kita** (strefa trzecia) – tworzą ją produkty spalania z strefy drugiej, gdzie tlenek węgla ( $CO$ ) łączy się z tlenem z powietrza dając dwutlenek węgla ( $CO_2$ ), zaś wodór z połączeniu z tlenem tworzy parę wodną ( $H_2O$ ). Strefa ta ze względu na występowanie w niej gazów wpływa ujemnie na jakość spoiny (mogą występować pęcherze gazowe z pary wodnej). Reakcje przebiegają według równań:



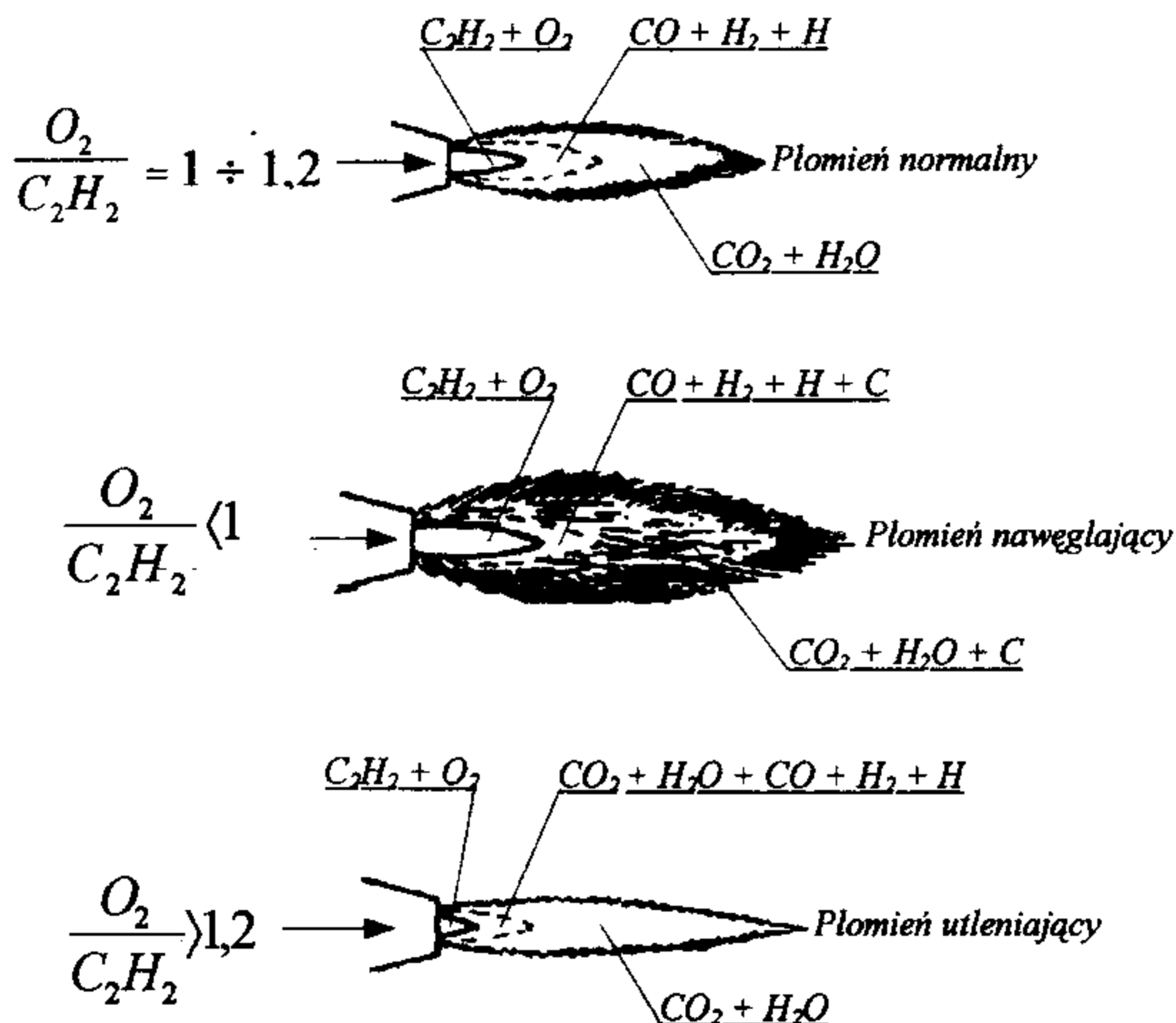
Na właściwości spoiny wpływa również sposób prowadzenia palnika podczas spawania. Na przykład dotykaniem końcem jądra topionego metalu powoduje nawęglanie spoiny na wskutek przenikania do niej cząstek węgla, co przy spawaniu stali powoduje twardość i kruchość spoiny.

W praktyce podczas spawania metali stosuje się trzy rodzaje płomieni: *plomień normalny*, *plomień nawęglający*, *plomień utleniający* (rys. 2.5).

**Plomień normalny** – jest to płomień o jasno świecącym jądrze. Z założenia teoretycznego objętościowy stosunek gazów wynosi 1:1. Jednak w praktyce zużycie tlenu jest większe, ponieważ na 1 litr acetylenu przypada 1,2 litra tlenu, co jest spowodowane większym pobieraniem tlenu przy jego większym ciśnieniu roboczym. Płomień taki stosowany jest przeważnie do spawania stali niskowęglowych, niskostopowych, żeliwa oraz miedzi.

**Plomień nawęglający** – z nadmiarem acetylenu. Ma jądro grube, jasno niebieski stożek oraz szeroką i wydłużoną kitę o kolorze wpadającym w odcień bladoczerwony. Płomień nawęglający stosowany jest do spawania aluminium i jego stopów lub do napawania gazowego spoiwami stelliteowymi.

**Plomień utleniający** – z nadmiarem tlenu. Ma jądro krótkie w kształcie ostrego stożka, długą wysmukłą kitę koloru niebieskoczerwonego. W porównaniu do pozostałych płomieni można go odróżnić po hałaśliwej pracy (szumie). Płomień utleniający stosuje się do spawania mosiądźców.

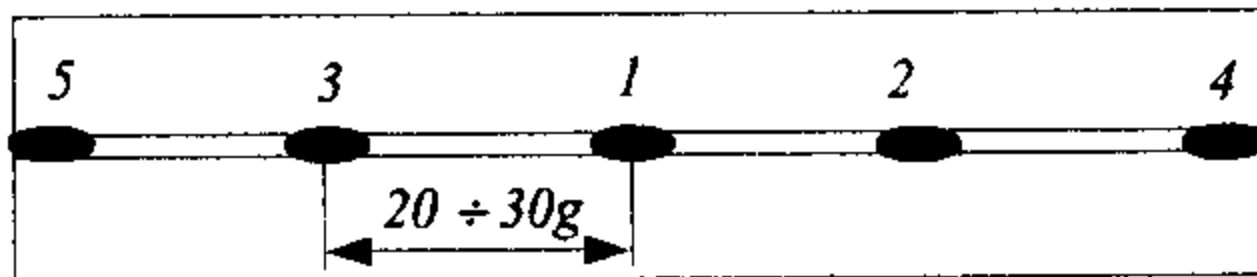


Rys. 2.5. Rodzaje płomieni acetylenowo – tlenowych





Spoiny szepne wykonuje się w odległościach  $20 \div 30$  g od siebie (pozdiałka spoina szepnych). Długość spoin szepnych może wynosić  $2 \div 5$  grubości materiału. Drugim sposobem zapobiegania przed odkształceniami jest wykorzystywanie specjalnych przyrządów. Spawanie w przyrządach ułatwia pracę spawacza i przyspiesza jej wykonanie. Do prostych przyrządów wykorzystywanych w spawaniu można zaliczyć: uchwyty klinowe, uchwyty śrubowe lub przyrządy szczękowo – śrubowe.



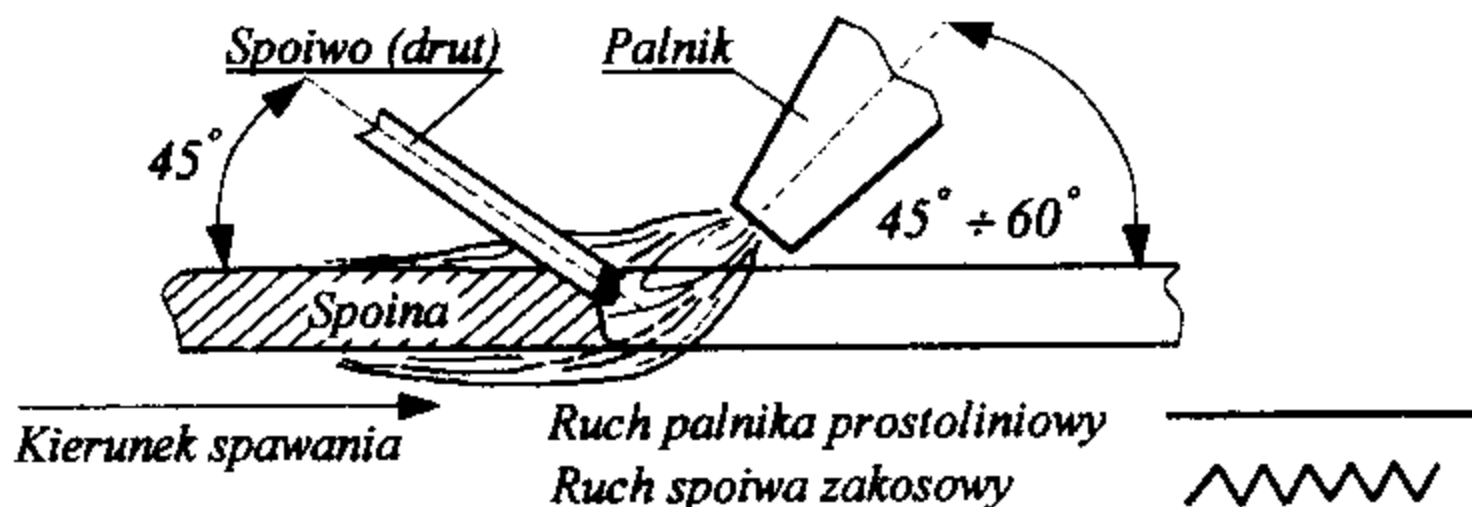
Rys. 2.7. Sposób wykonywania spoin szepnych

### 2.6.2. Technika spawania gazowego

W celu wykonania złączy o odpowiednich właściwościach mechanicznych, w sposób uzasadniony ekonomicznie i technologicznie, należy stosować znane i sprawdzone sposoby spawania gazowego. Poszczególne sposoby określają szczegółowo położenie palnika, materiału dodatkowego względem spawanych elementów, kształt przygotowanych brzegów w zależności od grubości spawanych elementów oraz usytuowania spoiny w przestrzeni.

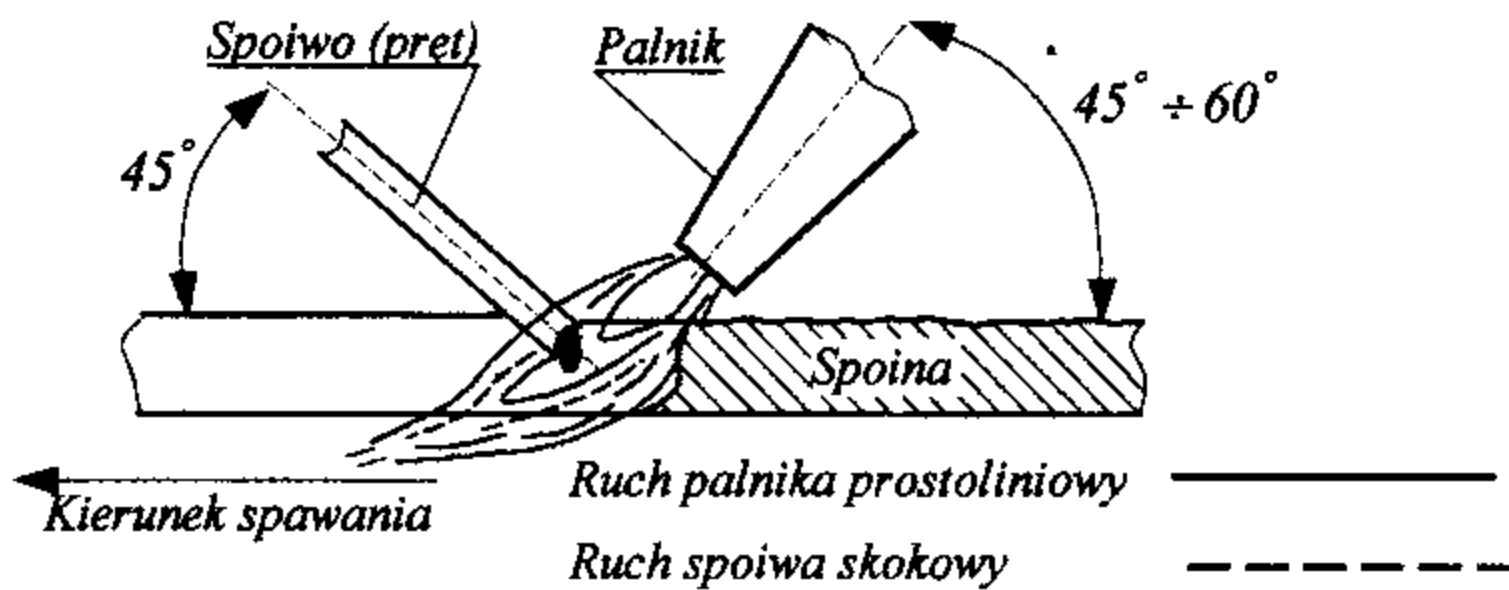
W zależności od kierunku przesuwania palnika i spoiwa względem wykonywanej spoiny rozróżnia się trzy techniki spawania gazowego: „w prawo” (rys. 2.8), „w lewo” (rys. 2.9) oraz w górę (rys. 2.10).

Przy spawaniu techniką „w prawo” (rys. 2.8) palnik pochylony jest w tym kierunku, w którym postępuje spawanie. Płomień skierowany jest na spoinę już wykonaną, jądro znajduje się wewnątrz rowka, koniec drutu (spoiwa) zaś pomiędzy spoiną już wykonaną a palnikiem. Płomień posuwa się po linii prostej, zaś drutem wykonuje się ruchy wahadłowe rozprowadzające metal po przekroju spoiny.

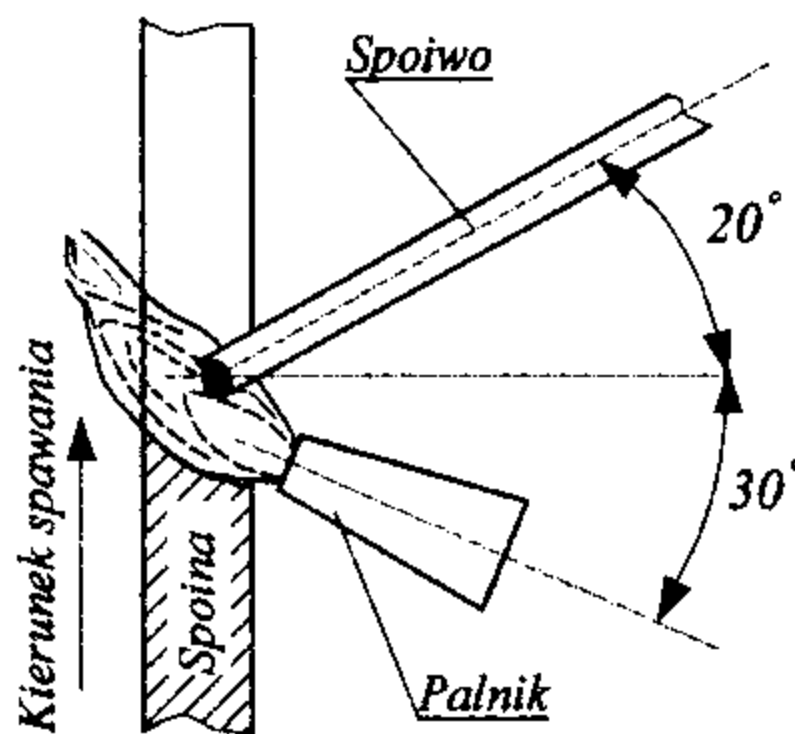


Rys. 2.8. Schemat spawania techniką „w prawo”

Technikę spawania „w prawo” stosuje się do spawania grubszych blach stalowych i miedzianych (ponad 4 mm) wymagających ukosowania zależnie od ich grubości na V, Y lub X, a w szczególności do spawania konstrukcji odpowiedzialnych, np.: rurociągów ciśnieniowych, itp.



Rys. 2.9. Schemat spawania techniką „w lewo”



Rys. 2.10. Schemat spawania „w górę”

Do zalet spawania techniką „w prawo” należy łatwiejsze utrzymanie „otworka” (łezki) w czasie wykonywania przetopu, zachodzi także w tym przypadku miejscowe wyżarzanie spoiny płomieniem działającym przez cały czas spawania. Ponadto spoina wolniej stygnie, wskutek tego gazy wchłonięte przez roztopiony metal mają możliwość wydzielenia się ze spoiny.

Wadą tej techniki jest trudność utrzymania równej powierzchni (lica) spoiny oraz mniejsza prędkość spawania ze względu, że brzegi materiału nie są uprzednio podgrzewane.

Przy spawaniu techniką „w lewo” (rys. 2.9.) palnik pochylony jest w kierunku odwrotnym do kierunku narastania spoiny, a płomień podgrzewa metal, który ma być spawany.

Spawanie cienkich blach (do 1 mm grubości) odbywa się bez dodawania spoiwa. Przy używaniu spoiwa palnik znajduje się między drutem a spoiną już wykonaną, to znaczy, że najpierw idzie drut, a za nim przesuwa się płomień palnika. Do zalet tej techniki można zaliczyć stosunkowo ładny wygląd spoiny oraz większą szybkość spawania. Do wad można zaliczyć stosunkowo szybkie stygnięcie spoiny, co wpływa na tworzenie się mikroporów, a także utwardzenie spoiny w stalach o wyższej zawartości węgla.

Spawanie techniką "w górę" (rys. 2.10) wymaga ustawienia blach łączonych w ten sposób, aby spoina była w położeniu pionowym. Technika ta polega na układaniu poziomych warstewek spoiwa w szczelinie pionowej między łączonymi brzegami przy jednoczesnym ich przetapianiu.

Szczególne rolę podczas spawania gazowego odgrywa również kąt pochylenia palnika względem powierzchni materiału spawanego i spoiny. Ogólnie przyjmuje się, że pochylenie palnika uzależnione jest od rodzaju i grubości spawanego materiału. Przy spawaniu blach cienkich palnik prowadzi się pod kątem mniejszym, a w miarę wzrastania grubości materiału kąt pochylenia palnika wzrasta. Prawidłowe prowadzenie palnika ułatwia przetopienie materiału na całej grubości oraz przyspiesza wykonanie spawania.

## **2.7. Podstawowe zasady technologiczne spawania stali, żeliwa, miedzi i mosiądzu**

### **2.7.1. Spawanie stali węglowych**

Stale węglowe o zawartości węgla do 0,22% C należą do stali łatwo spawalnych bez stosowania dodatkowych zabiegów cieplnych, a nawet istnieje możliwość spawania w warunkach niekorzystnych, tj. na mrozie (do  $-10^{\circ}\text{C}$ ).

Stale o podwyższonej zawartości węgla 0,22 do 0,35% C (stale o podwyższonej wytrzymałości) należą do stali trudniej spawalnych w normalnych warunkach. Stale te o grubości powyżej 25 mm należy przed spawaniem podgrzewać do temperatury  $150 \div 200^{\circ}\text{C}$  i podczas spawania podtrzymywać tę temperaturę. Po zakończonym spawaniu przeprowadzić wyżarzanie odprężające.

Do stali trudno spawalnych zalicza się stale o zawartości węgla 0,35 do 0,60% C. Stale te można jednak spawać przy zachowaniu odpowiednich warunków technologicznych, tj. spawać w temperaturze otoczenia powyżej  $15^{\circ}\text{C}$  i podgrzewać przed spawaniem do temperatury  $200 \div 300^{\circ}\text{C}$ . Po spawaniu konieczne jest przeprowadzenie wyżarzania normalizującego. Spawanie należy prowadzić możliwie szybko z zachowaniem powolnego stygnięcia.

Stale węglowe zawierające powyżej 0,60% C zaliczane są do stali praktycznie niespawalnych.

### 2.7.2. Spawanie żeliwa

Żeliwa należą do stopów żelaza trudniej spawalnych niż stal, ze względu na dużą zawartość węgla i innych dodatków stopowych. Niektóre żeliwa stopowe oraz żeliwo białe nie można spawać w ogóle. Spawanie żeliwa jest możliwe i daje dobre wyniki pod warunkiem przestrzegania określonych warunków technologicznych. Wyróżnia się następujące metody spawania gazowego żeliwa: spawanie na półgorąco i spawanie na gorąco.

Do spawania żeliwa należy stosować topnik w postaci proszku o nazwie handlowej Żel-Gaz, który ułatwia spawanie, rozpuszczając trudno topliwe tlenki powstające podczas spawania. Jako spoiwa do spawania używa się prętów żeliwnych, zawierających  $3 \div 4\%C$  i  $3 \div 4\%Si$ .

### 2.7.2. Spawanie miedzi

Miedź należy do metali trudno spawalnych ze względu na dużą przewodność cieplną i wyższą od miedzi temperaturę topnienia tlenków miedzi. Elementy miedziane o grubości powyżej 4 mm należy przed spawaniem podgrzewać do temperatury około  $600^{\circ}C$ , a podczas spawania stosować podkładki formujące grań spoiny. Do spawania stosuje się palnik o wydajności 3 razy większej niż przy spawaniu stali. Spoiwa do spawania zawierają domieszkę srebra w ilości  $0,5 \div 1\%Ag$ . Spoiny po wykonaniu odcinków po 100 mm zaleca się przekuwać dwustronnie w celu rozdrobnienia grubych kryształów miedzi, a jednocześnie zwiększenia wytrzymałości spoiny. Jako topnik używany jest proszek o nazwie handlowej Cupro-Gaz.

### 2.7.4. Spawanie mosiądzów

Mosiądz o zawartości do 35% cynku spawa się dobrze płomieniem gazowym, a powyżej tej granicy spawalność się pogarsza.

Do spawania mosiądzu dobiera się palnik tak jak do spawania stali wykorzystując płomień utleniający.

Odlewy mosiężne spawa się na gorąco w temperaturze około  $400 \div 500^{\circ}C$ , a następnie chłodzi na powietrzu w temperaturze otoczenia  $15^{\circ}C$ .

Do spawania używa się topnika o nazwie handlowej Ms-Gaz.

Brzegi blach przed spawaniem należy oczyścić ze wszelkich zanieczyszczeń. Materiały o grubości powyżej 5 mm najlepiej jest spawać z podgrzaniem do temperatury  $250 \div 300^{\circ}C$ . Spawanie należy wykonywać w pozycji podolnej (PA) oraz z dołu do góry (PF). Po spawaniu spoinę można przekuć na gorąco w temperaturze około  $500^{\circ}C$ .

## 2.8. Część praktyczna

### 2.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do spawania gazowego,
- butla tlenowa i acetylenowa z reduktorami,
- przewody spawalnicze i komplet palników inżektorowych,
- próbki z blachy niskowęglowej o grubości 2 mm i powyżej 4 mm,
- drut spawalniczy (spoiwo) o średnicy 2 i 3,2 mm,
- sprzęt pomocniczy i ochronny,
- instrukcja stanowiskowa spawania gazowego, plansze poglądowe oraz przekroje palników i reduktorów.

### 2.8.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją obsługi urządzeń i przebiegu części praktycznej ćwiczenia,
- przypomnienie przepisów bhp,
- zasady i sposób zapalania i gaszenia palnika oraz regulacji płomienia acetylenowo – tlenowego,
- zapoznanie z rodzajami płomieni i ich charakterystyką,
- zapoznanie się z techniką i zasadami technologicznymi spawania stali węglowych o różnej grubości,
- spawanie przez ćwiczących próbek,
- dyskusja i podsumowanie wyników.

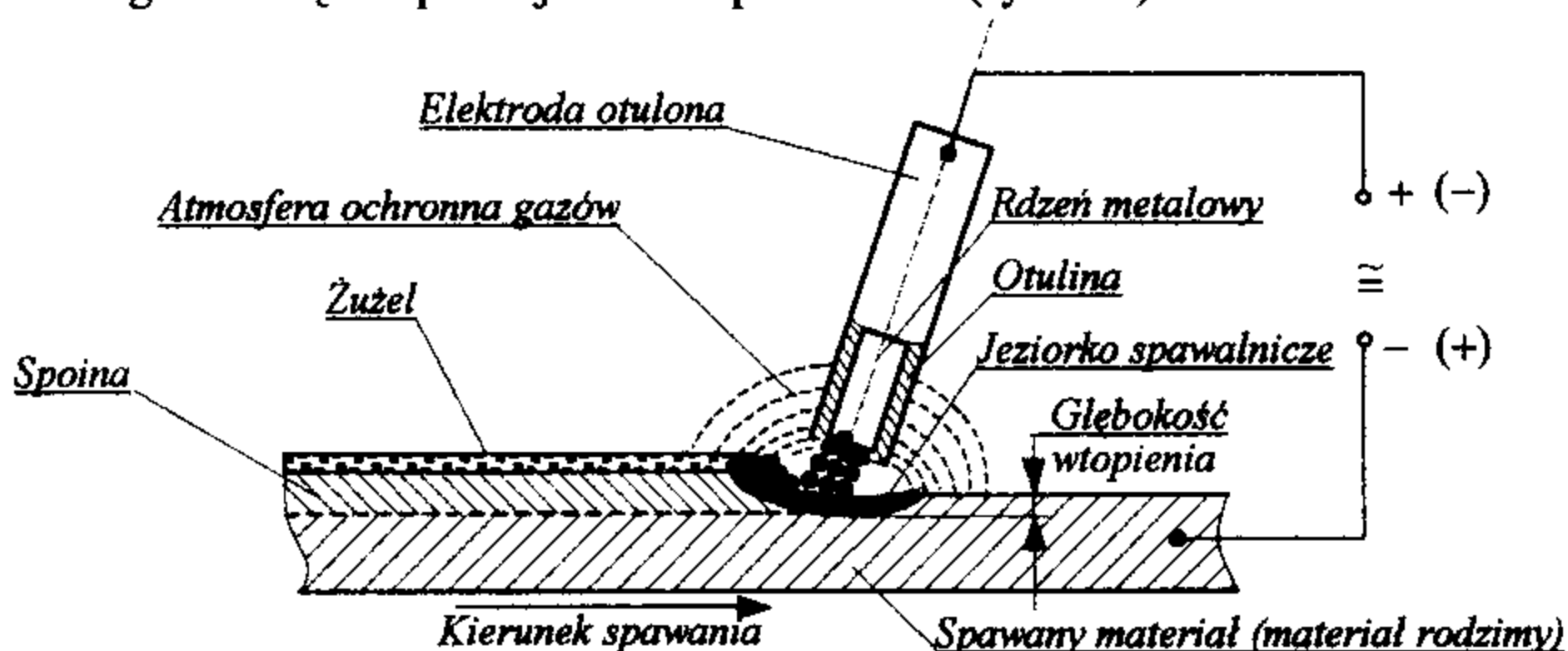
## 2.9. Literatura

1. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan – Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Pol. Koszalińska 2000.
2. Mistur L.: Spawanie gazowe, elektryczne i w osłonach gazów ochronnych. „KaBe”. Krosno 1999.
3. Praca zbiorowa. Poradnik inżyniera – spawalnictwo. Tom 1 i 2. WNT. Warszawa 1983.
4. Pałasz J.: Poradnik spawacza gazowego. WNT. Warszawa 1986.

## 3. RĘCZNE SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ OTULONĄ - MMA

### 3.1. Wstęp

Spawanie elektryczne łukowe elektrodą otuloną MMA (Manual Metal Arc) jest to proces łączenia metali ich stopów, gdzie źródłem ciepła jest łuk elektryczny, jarzący się między końcem elektrody, a materiałem spawanym. Ciepło jarzącego się łuku powoduje topienie się elektrody i brzegów przedmiotu spawanego tworząc wspólne jezioro spawalnicze (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Schemat przebiegu procesu spawania łukowego elektrodą otuloną

### 3.2. Urządzenia do spawania elektrodami otulonymi

Stanowisko do spawania elektrodami otulonymi składa się ze źródła zasilania łuku, przewodów prądowych oraz uchwytu elektrody.

Do zasilania łuku spawalniczego przy spawaniu elektrodami otulonymi w zależności od wymaganej technologii spawania mogą być stosowane następujące spawalnicze źródła energii (źródła zasilania łuku):

1/ transformatory spawalnicze (prąd przemienny) (rys.3.2 i 3.3),

2/ źródła prądu stałego:

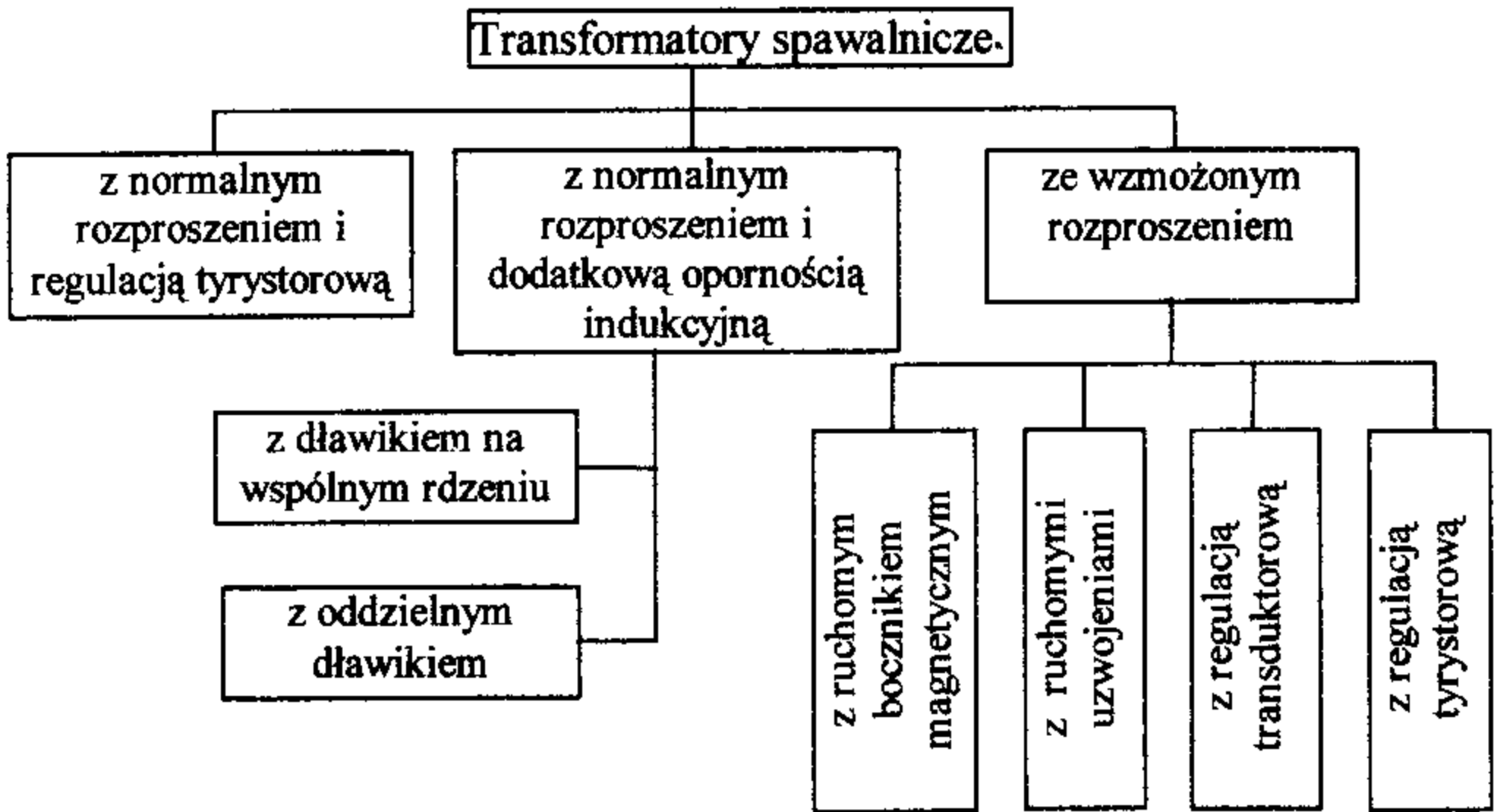
- prostowniki spawalnicze (rys. 3.4 i 3.5),

- przetwornice spawalnicze – elektromechaniczne,

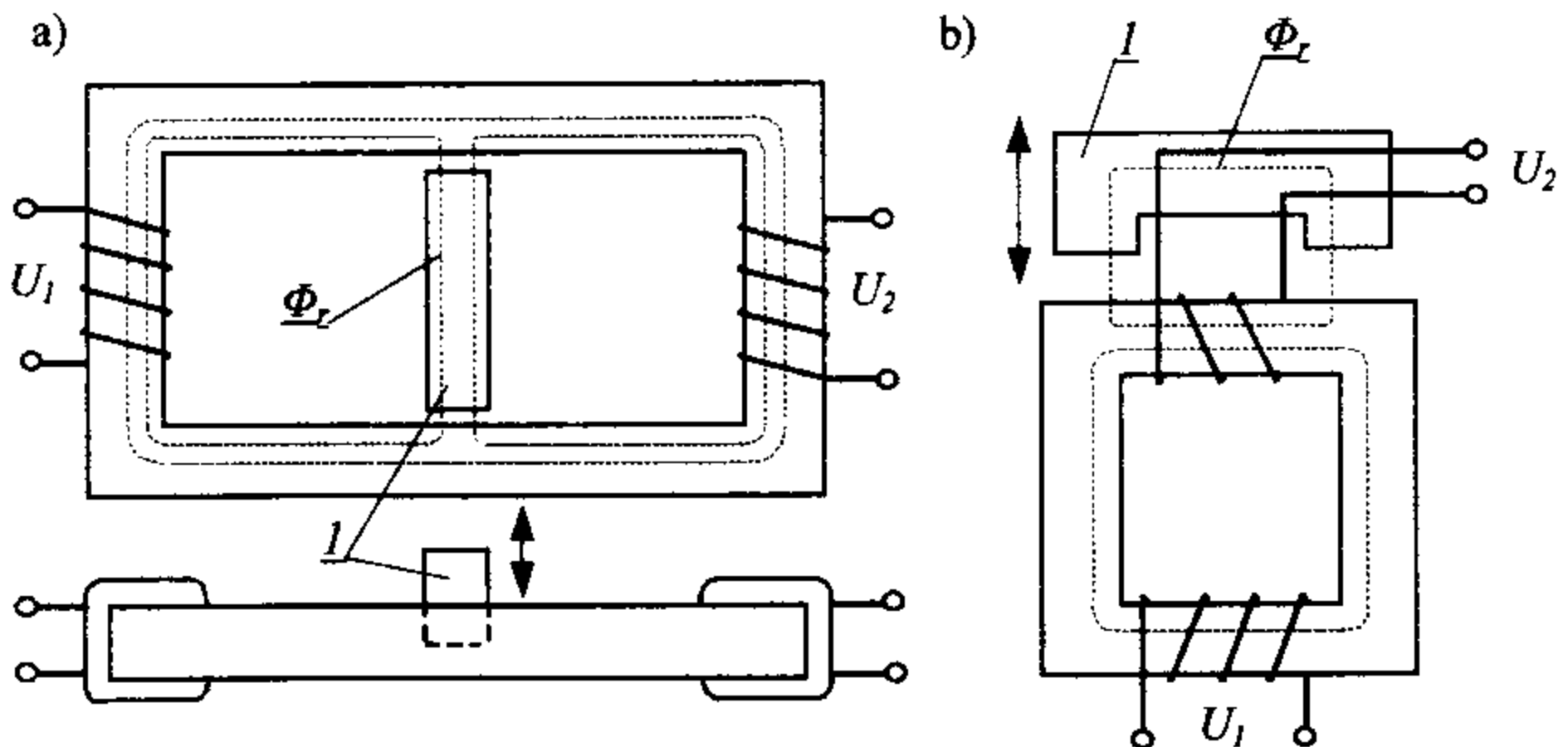
3/ prostowniki spawalnicze z wewnętrzną przemianą częstotliwości – inwertorowe (inwersyjne) (rys. 3.6).

Źródła zasilania łuku służą do przemiany energii elektrycznej o parametrach sieci zasilającej na energię elektryczną o parametrach niezbędnych do długotrwałego i stabilnego przebiegu procesu spawalniczego.

Źródłami zasilania łuku do spawania elektrodami otulonymi prądem przemiennym są różnego rodzaju transformatory spawalnicze. Ich różne odmiany przedstawiono na rysunku 3.2. Na rys. 3.3 pokazano zaś przykładowe schematy typowych transformatorów z bocznikiem magnetycznym.

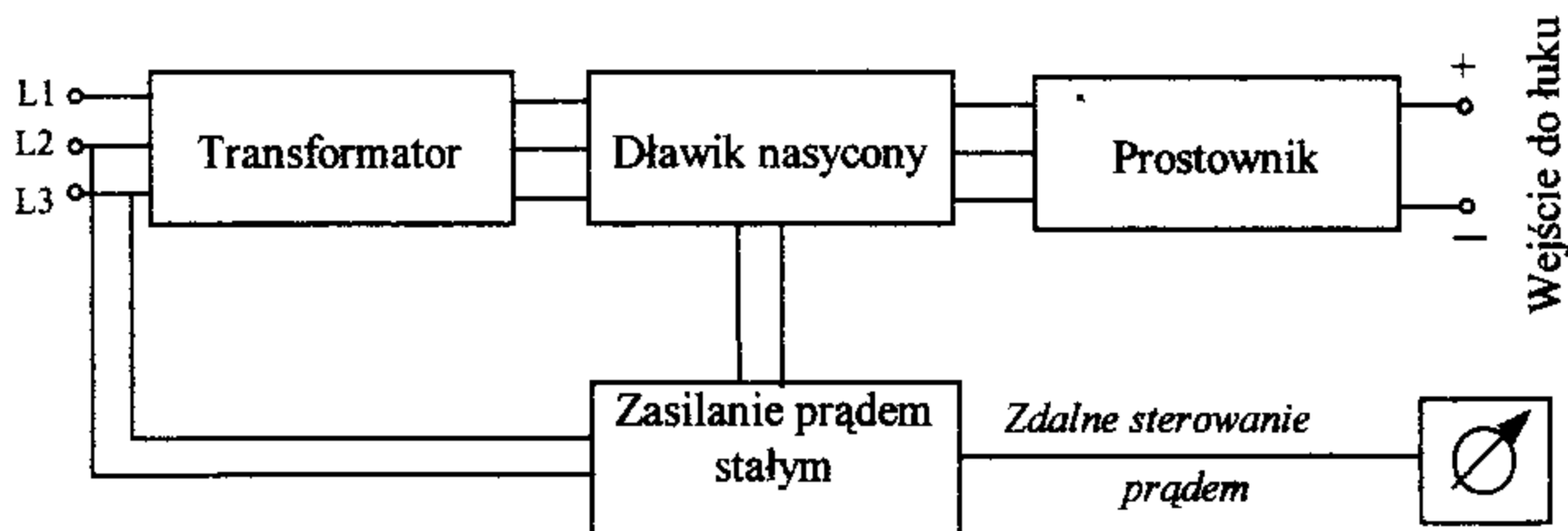


Rys. 3.2. Klasyfikacja budowy transformatorów spawalniczych

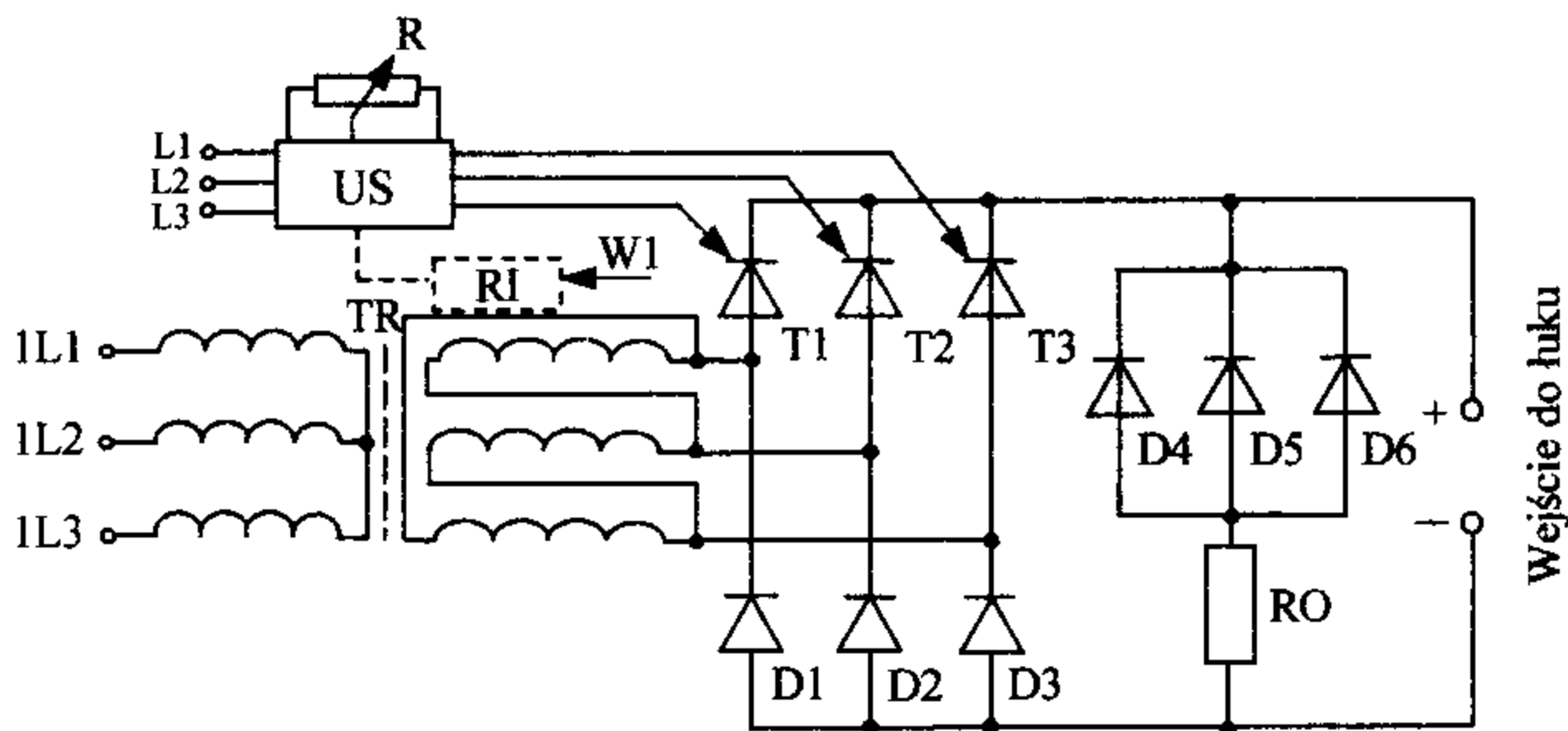


Rys. 3.3. Schematy przykładowych, typowych transformatorów z bocznikiem magnetycznym: a) transformator z ruchomym bocznikiem wsuwany w okno magnetowodu, b) transformator z ruchomym bocznikiem magnetycznym uzwojenia wtórne, l – bocznik magnetyczny,  $\Phi_r$  – strumień rozproszenia

Prostowniki spawalnicze są to przekształtniki prądu przemiennego na prąd wyprostowany o odpowiednio ukształtowanej charakterystyce zewnętrznej i o wymaganym zakresie nastawiania prądu spawania. Wyróżnia się prostowniki diodowe oraz tyrystorowe (rys. 3.4 i 3.5).



Rys. 3.4. Schemat blokowy prostownika spawalniczego z dławikiem nasyconym

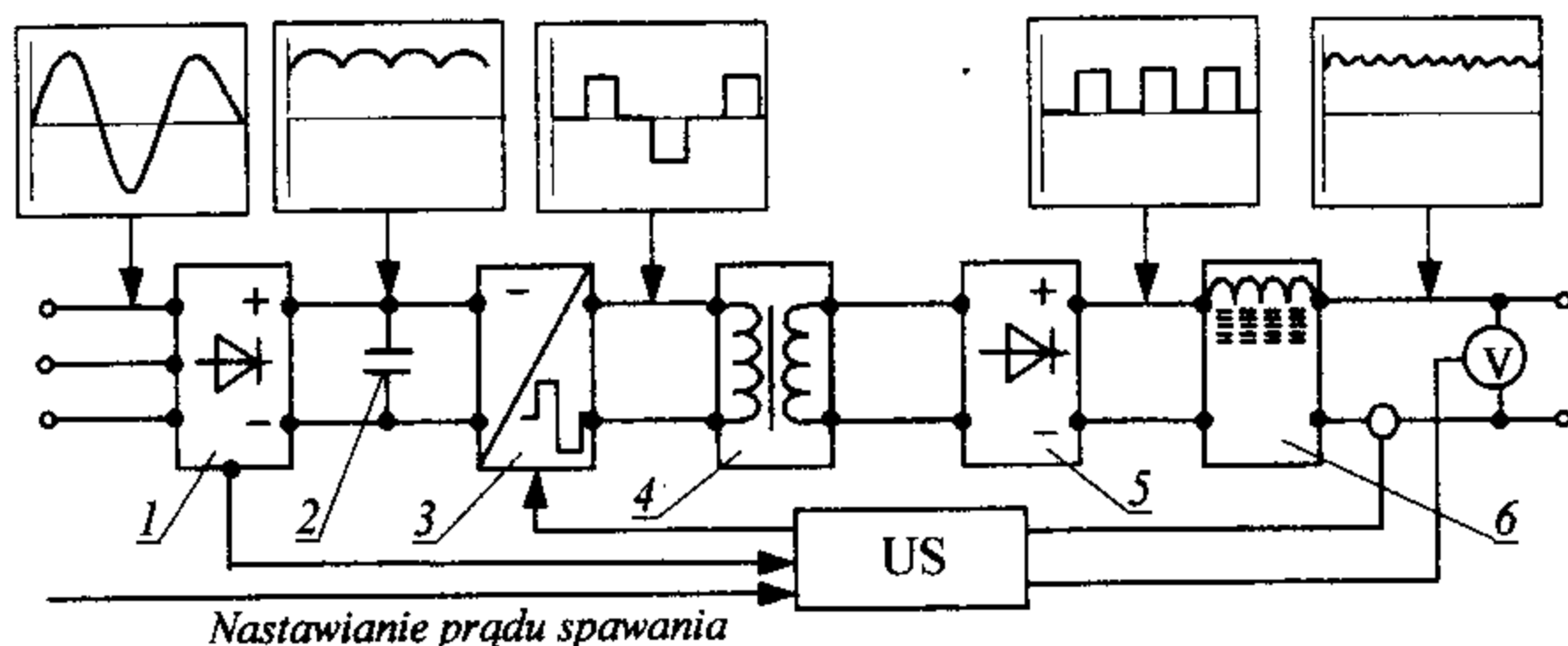


Rys. 3.5. Schemat ideowo – blokowy prostownika tyrystorowo - diodowego do spawania ręcznego: TR – transformator prostownikowy, D1, D2, D3 – diody prostownika głównego, T1, T2, T3 – tyrystory, D4, D5, D6 – diody pomocnicze, RO – rezystor ograniczający, US – układ sterowania, R – rezystor nastawczy prądu spawania, RI – regulator prądu spawania

Najnowszymi źródłami zasilania łuku są urządzenia inwertorowe zwane również inwersyjnymi (rys. 3.6). Ich powstanie stało się możliwe dzięki wprowadzeniu elementów energoelektronicznych (tyrystorów, tranzystorów) zdolnych do przenoszenia dużych mocy przy stosunkowo dużym napięciu.



Decydującą zaletą urządzeń inwertorowych są ich małe wymiary oraz możliwość spawania przy znacznie dużych natężeniach prądu. W urządzeniach inwertorowych istnieje możliwość sterowania prądem spawania i kształtowania charakterystyk statycznych.



Rys. 3.6. Schemat blokowy prostownika z wewnętrzną przemianą częstotliwości:  
 1 – prostownik napięcia sieci zasilającej, 2 – filtr pojemnościowy napięcia wyprostowanego, 3 – falownik tranzystorowy, 4 – transformator podwyższonej częstotliwości, 5 – prostownik wtórny podwyższonej częstotliwości, 6 – dławik filtrujący, US – układ sterowania, regulacji i zabezpieczeń

Przetwornice spawalnicze są to urządzenia dwumaszynowe, składające się z silnika napędowego i prądnicy spawalniczej. Układem napędowym prądnicy spawalniczej może być: asynchroniczny trójfazowy silnik elektryczny, silnik prądu stałego (np. do prac w kopalniach), silnik spalinowy (benzynowy lub wysokoprężny).

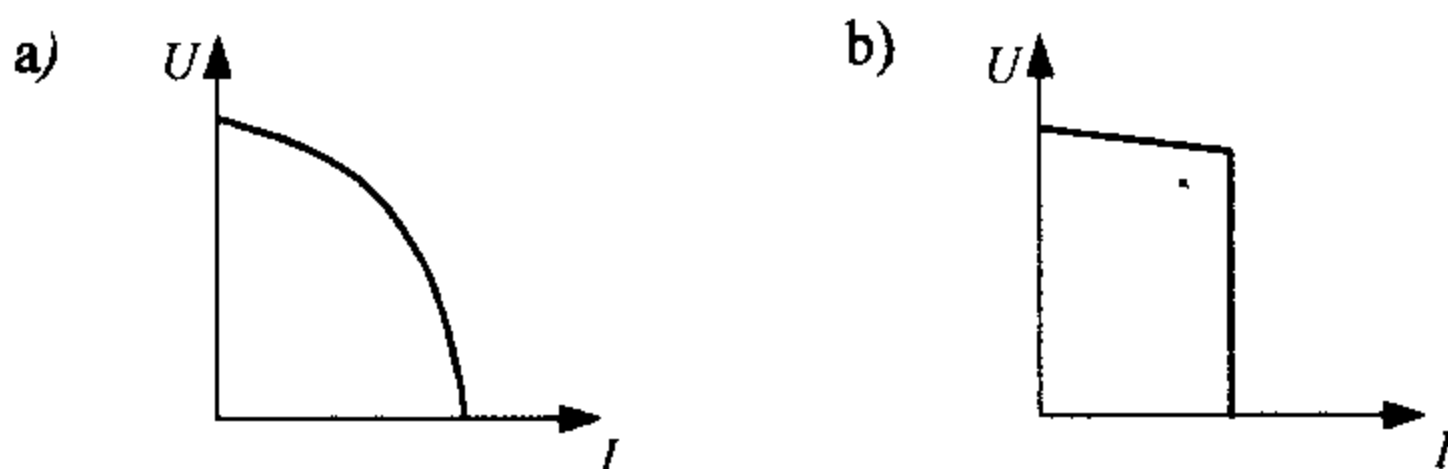
### 3.2.1. Parametry źródeł zasilania łuku spawalniczego

Najważniejszymi podstawowymi parametrami źródeł zasilania łuku są:

1. *Umowne napięcie w stanie obciążenia* jest to napięcie na zaciskach wyjściowych źródła zasilania łuku podczas przepływu prądu o wartościach przyjmowanych dla różnych metod spawania. Na przykład przy spawaniu ręcznym napięcie to wynosi  $U = 20 + 0,04I$ .

2. *Rodzaj charakterystyki statycznej (zewewnętrznej)*; jednym z warunków stabilności procesu spawania elektrodą otuloną jest opadająca lub stałoprądowa charakterystyka statyczna źródła zasilania łuku (rys. 3.7). Według PN-EN 60974-1 charakterystyka zewnętrzna jest uznawana za opadającą, jeżeli w określonym zakresie natężenia prądu spawania przy wzroście natężenia prądu napięcie obniża się poniżej 7V/100A.

3. *Napięcie w stanie jałowym* jest to napięcie na zaciskach wyjściowych źródła zasilania łuku przy otwartym obwodzie spawania, tzn. gdy prąd spawania jest równy zero.



Rys. 3.7. Charakterystyki statyczne (zewnętrzne) źródeł łuku do spawania ręcznego:  
a) charakterystyka opadająca, b) charakterystyka stałoprądowa

4. *Znamionowy prąd spawania* – jest to największy prąd przepływający w obwodzie spawalniczym przy umownym napięciu w stanie obciążenia (napięciu roboczym).

5. *Znamionowy cykl pracy; współczynnik obciążenia*. Proces spawalniczy ma charakter nieciągły, przerywany z uwagi na konieczność wymiany elektrod, odbijanie żużla itp. Z tego względu źródła zasilania łuku są projektowane pod względem właściwości termicznych (przyrostu temperatury głównych elementów obwodu spawalniczego), na pracę przerywaną. Wartość współczynnika obciążenia podawana jest w procentach, np. 60% przy 10 – minutowym cyklu pracy, tzn. 6 min. spawania i 4 min. przerwy.

Współczynnik obciążenia określany jest zależnością

$$X = \frac{t_r}{t_r + t_p} \cdot 100 \quad /3.1/$$

gdzie:  $t_r$  - czas przepływu prądu spawania,  $t_p$  - czas przerwy.

6. *Maksymalny prąd spawania* – jest to prąd, jaki może dostarczyć źródło zasilania łuku przy maksymalnym wysterowaniu, umownym napięciu w stanie obciążenia i zachowaniu dopuszczalnych przyrostów temperatury przy określonym cyklu pracy.

7. *Regulacja nastawiania prądu spawania*. Zakres parametrów prądowych może być regulowany (nastawiany) w sposób płynny, skokowy lub mieszany.

8. *Współczynniki energetyczne*. Należą do nich *sprawność* i *współczynnik mocy* ( $\cos \varphi$ ). Współczynniki energetyczne decydują o zużyciu energii wewnątrz urządzenia i o kosztach eksploatacyjnych.

### 3.2.1.1. Właściwości źródeł zasilania łuku do spawania ręcznego

Stabilność procesu spawania ręcznego zależy od wzajemnego położenia względem siebie charakterystyk statycznych źródła zasilania i łuku spawalniczego oraz od dynamiki obwodu spawalniczego (odpowiedź obwodu na występujące zakłócenia). Zakłóceniami procesu spawania najczęściej są: zmiana długości łuku w wyniku przemieszczania się kropli ciekłego metalu elektrody do jeziora spawalniczego, zmiana napięcia zasilania sieci energetycznej, zmiana składu gazu w łuku w wyniku nierównomiernego topienia się otuliny, zanieczyszczenia powierzchni spawanego materiału itp.

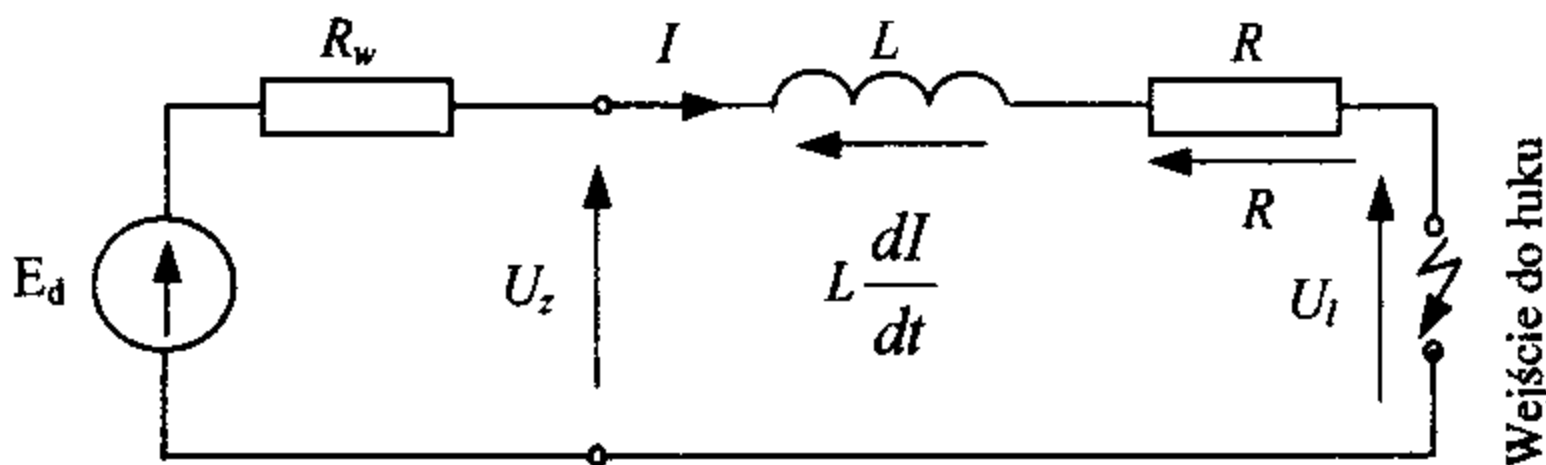
Ważną cechą wskazującą na przydatność źródła zasilania łuku do pracy ręcznej jest stromo opadająca charakterystyka statyczna, która zapewnia stabilność jarzenia się łuku.

Obwód spawalniczy składa się z dwóch zasadniczych elementów: źródła zasilania i łuku spawalniczego (rys. 3.8). W czasie pracy pomiędzy tymi dwoma elementami powinien zaistnieć stan równowagi energetycznej. Stan równowagi określa punkt pracy, w którym przecina się charakterystyka zewnętrzna źródła zasilania z charakterystyką łuku (rys. 3.9).

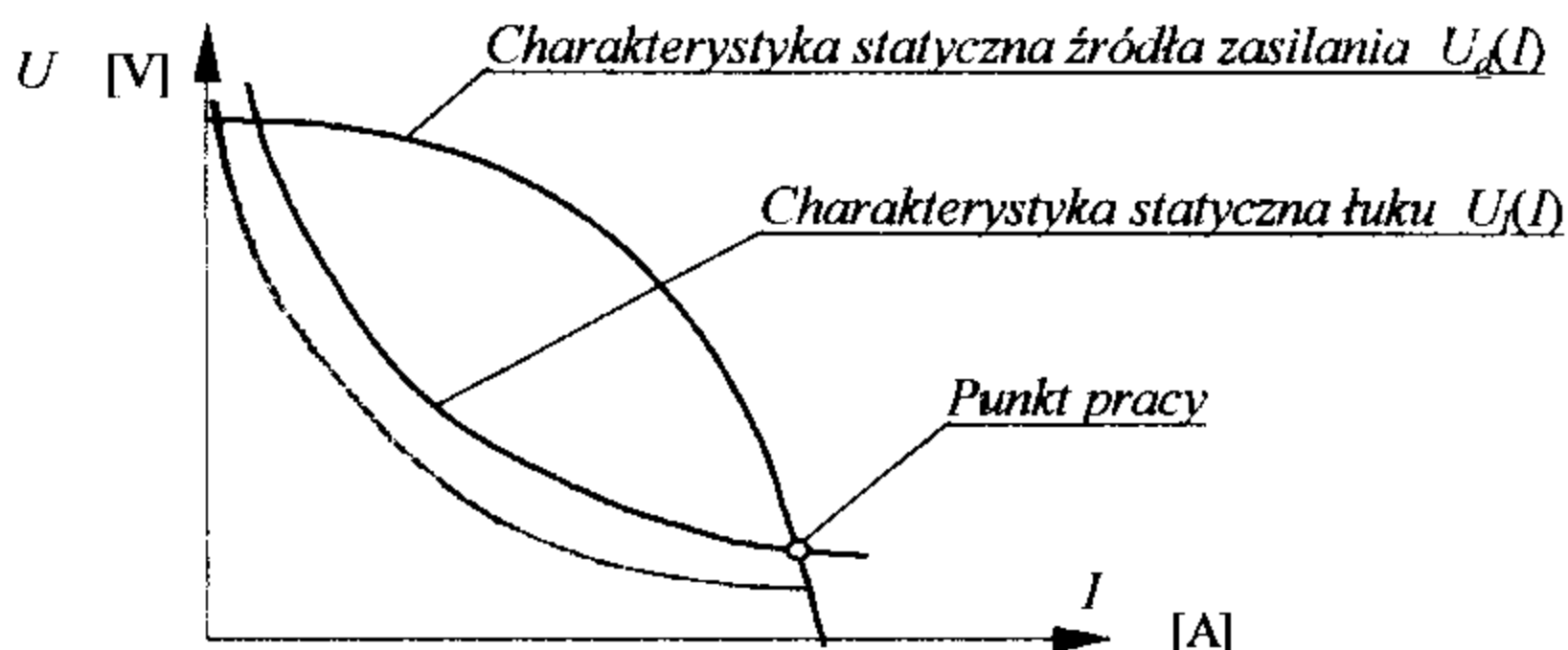
Charakterystyka statyczna źródła zasilania  $U_d(I)$  oraz łuku spawalniczego  $U_l(I)$  zależy od natężenia prądu i jest nieliniowa. Przy założeniu, że rezystancja obwodu jest równa zero ( $R = 0$ ) charakterystykę statyczną źródła zasilania łuku można zapisać w postaci napięciowej wzorem

$$U_d(I) = L \frac{dI}{dt} + U_l(I) \quad /3.2/$$

gdzie:  $L$  – indukcyjność własna obwodu,  $U_d(I)$  – charakterystyka statyczna źródła prądu,  $U_l(I)$  – charakterystyka statyczna łuku spawalniczego,



Rys. 3.8. Schemat elektrycznego obwodu spawalniczego:  $E_d$  – źródło zasilania łuku,  $L$  – indukcyjność obwodu,  $U_z$  – napięcie zasilania,  $U_l$  – napięcie łuku,  $R_w$  – rezystancja wewnętrzna źródła prądu,  $I$  – prąd spawania,  $R$  – oporność obwodu spawania



Rys. 3.9. Przykładowy przebieg charakterystyk statycznych źródła zasilania łuku oraz łuku spawalniczego

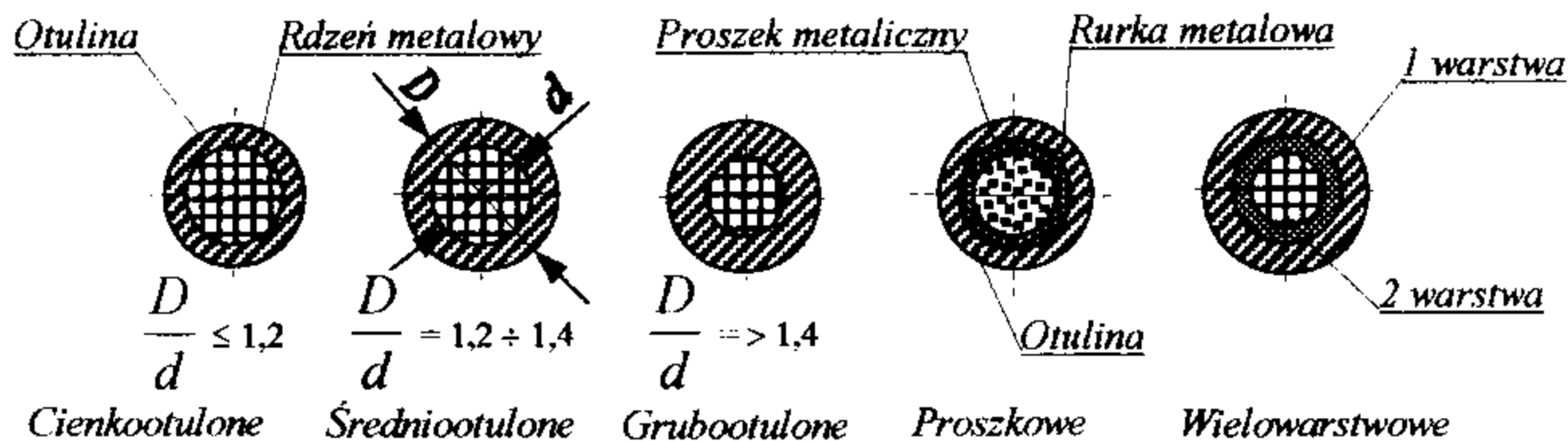
### 3.3. Podstawowe zasady spawania elektrodą otuloną

#### 3.3.1. Wstęp

Spawanie łukowe, ręczne elektrodą otuloną jest nadal szeroko rozpowszechnioną metodą spawania wynikającą z prostoty urządzeń spawalniczych jak i dostępności do miejsca układania spoin. Nowoczesne zasilacze łuku spawalniczego zapewniają dobrą stabilizację łuku, a niektóre z nich umożliwiają zdalną regulację natężenia prądu spawania, co bardzo ułatwia wykonywanie spoin w różnych warunkach spawania.

#### 3.3.2. Elektrody otulone do spawania łukowego ręcznego

Do spawania łukowego, ręcznego stosuje się obecnie prawie wyłącznie topliwe elektrody otulone. Elektrody otulone do ręcznego spawania mają otulinę o różnej grubości. W zależności od grubości otuliny i rodzaju rdzenia rozróżniamy następujące rodzaje elektrod – przykłady rys. 3.10.



Rys. 3.10. Podstawowe rodzaje elektrod otulonych

Ze względu zaś na rodzaj otuliny elektrody dzielą się na:

- **kwaśne (A)** – zawierające dużą ilość tlenków żelaza, tlenków manganu, krzemianów i żelazo – manganu oraz sproszkowanego żelaza. Odznaczają się dobrą spawalnością i dobrymi właściwościami mechanicznymi spoiny,
- **zasadowe (B)** – zawierające dużą ilość składników nisko wodorowych, czyli zasadowych węglanów wapnia i magnezu, fluoryt oraz proszki żelazny i żelazostopy. Odznaczają się dobrą spawalnością, ale jednak stapiają się trudniej od elektrod rutyłowych i kwaśnych; odznaczają się dobrymi właściwościami mechanicznymi spoiny. Zaleca się spawać nimi prądem stałym stosując plus na elektrodzie (biegunowość dodatnia),
- **celulozowe (C)** – zawierają znaczne ilości związków palnych organicznych (celulozy, krzemianów oraz odtleniaczy). Charakteryzują się dobrą spawalnością, spoina wykonana nimi jest dobrze odtleniona, lecz zawiera duże ilości wodoru,
- **rutyłowe (R)** – zawierają znaczne ilości rutyłu ( $TiO_2$  – powyżej 25%). Odznaczają się bardzo dobrą spawalnością,
- **utleniające (O)** – zawierają znaczną ilość tlenków żelaza, krzemionki i krzemianów oraz małą ilość składników odtleniających. Spoina zawiera znaczne ilości tlenków żelaza i azotu, co pogarsza właściwości mechaniczne spoiny,
- **elektrody o otulinach mieszanych (RA, RB, RC).**

W procesie spawania otulina elektrodowa spełnia następujące zadania:

- polepsza warunki zajarzania i jarzenia łuku elektrycznego (ułatwia jonizację),
- osłania łuk przed dostępem powietrza atmosferycznego dzięki osłonie gazowej, którą stanowią  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  oraz produkty ich rozpadu,
- wprowadza do obszaru spawania pierwiastki odtleniające, wiążące azot i rafinujących ciekły metal spoiny,
- wprowadza pierwiastki stopowe (w przypadkach koniecznych),
- może podwyższać uzysk elektrody poprzez wprowadzenie do niej proszku żelaza,
- zapewnia szybkie wypływanie z jeziora spawalniczego cząstek żużla oraz produktów utleniania,
- wytwarza warstwę żużla na powierzchni spoiny,
- stwarza warunki ułatwiające ułożenie spoiny w pozycjach, do których jest przeznaczony dany gatunek elektrody.

Elektrody ze względu na zastosowanie można podzielić na:

- 1/ połączeniowe do spawania stali niskowęglowych, średniowęglowych,
- 2/ połączeniowe – stopowe do spawania stali nisko- i wysokostopowych,
- 3/ elektrody do spawania żeliwa,
- 4/ elektrody do spawania metali nieżelaznych i ich stopów,
- 5/ elektrody do napawania.

Producenci elektrod otulonych nie zawsze jednoznacznie klasyfikują i oznaczają elektrody o tym samym przeznaczeniu, co utrudnia porównanie wyrobów między sobą. Zadanie to zostało ułatwione dzięki wprowadzeniu jednolitego europejskiego systemu oznaczania elektrod według norm PN-EN.

Oznaczenie elektrod do spawania stali o wysokiej wytrzymałości według PN-EN 757 ilustruje poniższy przykład:

### **PN – EN 757 E 42 6 Mn2NiMo B 3 2 H5**

gdzie:

- |                    |   |
|--------------------|---|
| <b>PN – EN 757</b> | - numer obowiązującej normy,  |
| <b>E</b>           | - symbol wyrobu (symbol elektrody otulonej do spawania ręcznego),                         |
| <b>42</b>          | - symbol charakteryzujący właściwości wytrzymałościowe (minimalną granicę plastyczności), |
| <b>6</b>           | - symbol charakteryzujący pracę łamania stopiwa,  |
| <b>Mn2NiMo</b>     | - symbole składu chemicznego stopiwa,   |
| <b>B</b>           | - symbol rodzaju otuliny,   |
| <b>3</b>           | - symbol uzysku stopiwa i rodzaju prądu spawania,   |
| <b>2</b>           | - symbol charakteryzujący pozycję spawania,   |
| <b>H5</b>          | - symbol charakteryzujący zawartość wodoru w stopiwie.                                    |

### **3.3.3. Dobór rodzaju elektrod i parametrów spawania**

#### **3.3.3.1. Dobór rodzaju elektrod do spawania**

Przy doborze rodzaju elektrody do spawania należy uwzględnić następujące czynniki:

- skład chemiczny spawanego metalu,
- wymagania odnośnie właściwości mechanicznych złącza,
- spawalność metalu,
- rodzaj urządzenia spawalniczego,
- grubość materiału spawanego,
- typ złącza i pozycja spawania.

### 3.3.3.2. Dobór parametrów spawania

Jakość procesu ręcznego spawania elektrodą otuloną jest uzależniona w dużym stopniu od umiejętności i doświadczenia spawacza.

Do podstawowych parametrów spawania elektrodą otuloną zalicza się:

1/ **średnica elektrody**. Średnicę elektrody dobiera się zależnie od grubości spawanego przedmiotu, sposobu przygotowania i rodzaju złącza i pozycji spawania. Poprawnie dobrana średnica elektrody to taka, dla której, przy danym natężeniu prądu i prędkości spawania, uzyskuje się spoinę o wymaganym kształcie i wymiarach w możliwie najkrótszym czasie spawania.

2/ **rodzaj i natężenie prądu spawania**. Natężenie prądu spawania dobiera się przede wszystkim od średnicy elektrody, rodzaju spawanego materiału, rodzaju wykonywanej spoiny oraz pozycji spawania. Średnią wartość natężenia prądu spawania można obliczyć, która wynosi:

- dla elektrod o średnicy  $d \leq 3,2$  mm;  $I = 35d$

- dla elektrod o średnicy  $d > 4$  mm;  $I = 45d$

3/ **długość łuku**. Długość łuku jest proporcjonalna do napięcia łuku i wywiera wpływ na charakter przenoszenia metalu w łuku spawalniczym, prędkość spawania i efektywność procesu spawania. Długość łuku spawalniczego ustala się orientacyjnie według zależności:

$$l = \frac{d}{2} + 1 \quad /3.4/$$

gdzie:  $l$  – długość łuku w mm,  $d$  – średnica rdzenia elektrody

Utrzymanie krótkiego łuku daje większą gwarancję otrzymania złącza o lepszych właściwościach mechanicznych. Natomiast nadmierne skracanie długości łuku może prowadzić do zażuzlenia spoiny, a nawet do przyklejenia się końca elektrody do spawanego materiału. Przy wydłużaniu łuku następuje wzrost napięcia, co prowadzi do dużego rozprysku metalu elektrodowego, łuk staje się mniej stabilny, a w przypadku granicznym następuje jego gaśnięcie.

4/ **prędkość spawania**, jest to prędkość przemieszczania się końca elektrody wzdłuż złącza spawanego. Prędkość spawania powinna być tak dobrana, aby jarzący się łuk nieznacznie wyprzedzał jezioro ciekłego metalu. Prędkość przesuwu elektrody wzdłuż złącza zależy od następujących czynników:

- rodzaju prądu, jego biegunowości i wartości,
- wartości napięcia łuku,
- pozycji spawania,
- grubości spawanego materiału,
- gatunku elektrody
- wymaganych ruchów końca elektrody.

### 3.3.4. Przygotowanie materiałów do spawania

Przed spawaniem należy wykonać szereg czynności, które obejmują:

- ukosowanie i czyszczenie brzegów materiału do spawania,
- dobór elektrod,
- suszenie elektrod w temperaturze  $200 \div 250^{\circ}\text{C}$ ,
- zestawienie i szepianie lub mocowanie elementów spawanych w przyrządach pomocniczych.

Ukosowanie (wg PN-EN 29692) ma na celu takie kształtowanie brzegów materiału spawanego, aby zapewnić prawidłowe przetopienie materiału na całej jego grubości. Kształt ukosowania zależy od grubości materiału, rodzaju spoiny (czołowe, pachwinowe) oraz pozycji spawania (wg PN-EN 26947).

Kształt ukosowania ma znaczny wpływ na odkształcenia spawalnicze. Z tego powodu też pole przekroju rowka powinno być jak najmniejsze. Ukosowanie w większości przypadków prowadzi się za pomocą metod cięcia termicznego, rzadziej przez struganie lub ścinanie.

W celu podniesienia dolnej granicy grubości blachy, dla której wymagane jest ukosowanie, są produkowane elektrody głębokowtapiające, które umożliwiają spawanie jednostronne do grubości  $6 \div 7$  mm oraz w spawaniu dwustronne do grubości  $12 \div 14$  mm.

Ostatnią czynnością w przygotowaniu materiałów do spawania jest szepianie elementów spawanych przy równoczesnym składaniu i dopasowaniu do siebie. Praktycznie spoiny szepne o długości  $15 \div 30$  mm wykonuje się w odstępach około 30 grubości spawanych elementów.

### 3.3.5. Zasady technologiczne spawania elektrodą otuloną

Spawanie konstrukcji może się odbywać w różnych pozycjach spawania jak i z zastosowaniem różnych rodzajach spoin (czołowe - BW, pachwinowe - FW) oraz złączy spawanych (doczołowe, teowe, krzyżowe, narożne, zakładkowe, otworowe). Według PN-EN 26947 wyróżnia się następujące pozycje spawania:

- |                          |      |
|--------------------------|------|
| • podolna                | - PA |
| • naboczna               | - PB |
| • naścienna              | - PC |
| • okapowa                | - PD |
| • sufitowa               | - PE |
| • pionowa z dołu do góry | - PF |
| • pionowa z góry na dół  | - PG |



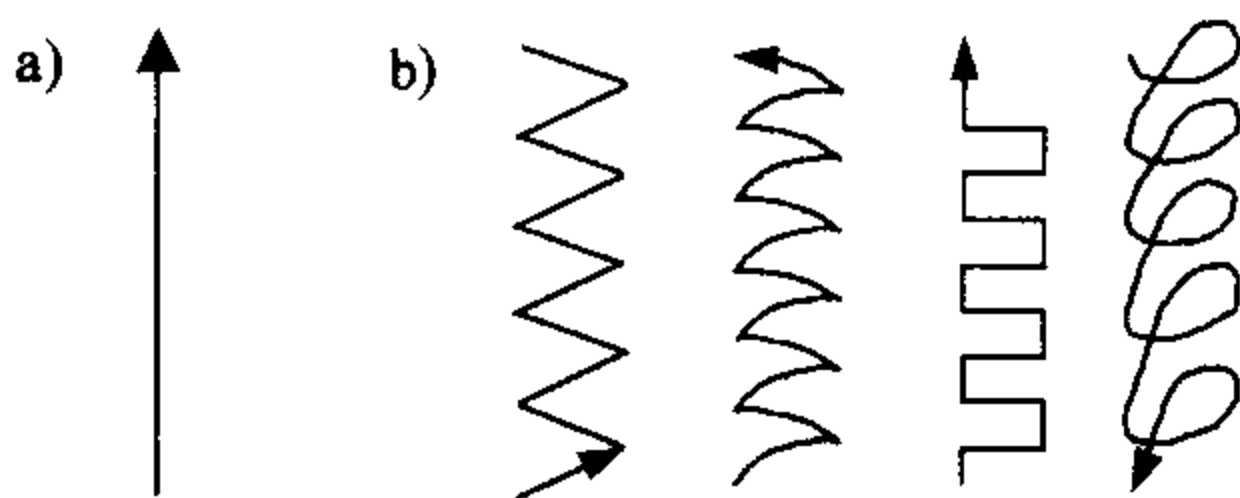
W niektórych przypadkach można manipulować przedmiotem spawanym, dążąc do uzyskania pozycji spawania podolnej (PA) lub nabocznej (PB). Spawanie w tych pozycjach jest najłatwiejsze oraz umożliwia otrzymanie spoin o najlepszej jakości. Znacznie trudniejsze jest spawanie w pozycji pionowej (PF, PG), a najtrudniejsze jest spawanie w pozycjach: sufitowej (PE), okapowej (PD) i naściennej (PC).

Spawanie powinno być prowadzone jak najkrótszym łukiem, gdyż wówczas wykorzystanie ciepła łuku elektrycznego jest najlepsze, jeziorko spawalnicze jest mniej narażone na utlenianie, a rozprysk metalu jest najmniejszy.

Im grubszą spawamy elektrodą, tym szybciej rowek spoiny wypełnia się metalem i czas spawania jest krótszy. Ze względu na koszty, pożądane jest spawanie grubszymi elektrodami przy odpowiednio dobranym wysokim natężeniu prądu. Wysokie natężenie daje głębszy wtop, co szczególnie jest ważne i ma duże znaczenie przy wykonywaniu spoin pachwinowych.

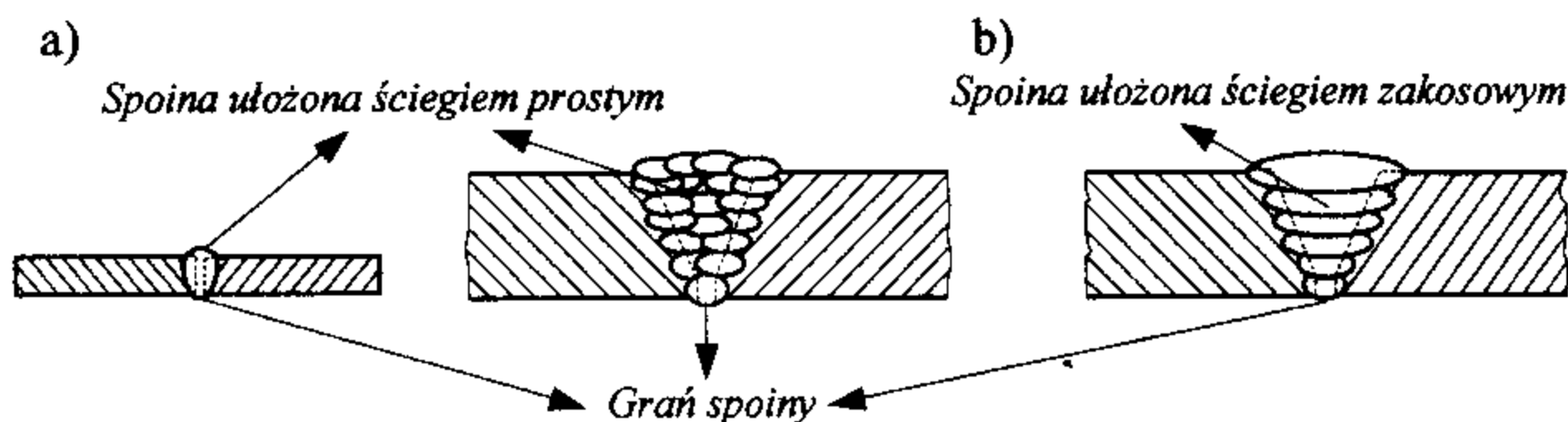
Wybór techniki spawania elektrodą otuloną zależy od grubości materiału, sposobu jego przygotowania, rodzaju złącza, pozycji spawania oraz od gatunku stosowanej elektrody.

W trakcie spawania (układania ściegów spoiny) w zależności od pozycji spawania, średnicy elektrody oraz kształtu ukosowanych krawędzi należy końcem elektrody wykonywać odpowiednie ruchy (rys. 3.11): proste (ścieg prosty) lub wahadłowe (ścieg zakosowy), tj. poprzecznie do linii spawania, w celu otrzymania spoiny o żądanej szerokości oraz ułatwienia spływania żużla poza jeziorko ciekłego metalu.



Rys. 3.11. Przykłady rodzajów ściegów; a – ścieg prosty, b – ścieg zakosowy

Spoiny wielowarstwowe na grubych blachach można wykonywać szerokimi ściegami wahadłowymi lub większą liczbą wąskich ściegów prostych. Najczęściej w tym przypadku ścieg graniowy spoiny wykonuje się elektrodą o mniejszej średnicy ruchem prostym, ponieważ inaczej trudno jest się dostać do dolnej warstwy metalu i uzyskać dokładny przetop (rys. 3.12). Ściegi proste stosuje się tylko w dolnej części gardzieli rowka, gdzie brak jest miejsca na ścieg szeroki (zakosowy).



Rys. 3.12. Przykłady technik spawania elektrodą otuloną; a) ścieg prosty, b) ścieg zakosowy

### 3.4. Część praktyczna

#### 3.4.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do spawania prądem stałym,
- stanowisko do spawania prądem przemiennym,
- suszarka do suszenia elektrod,
- gatunki elektrod: rutyłowe, kwaśne, zasadowe o średnicy 2,5 mm i 4,0 mm do spawania stali niskowęglowych,
- elektrody specjalne do spawania stali wysokostopowych o średnicy 2,5 mm i 3,2 mm,
- próbki ze stali niskowęglowej o grubości 3 mm i 10 mm,
- próbki ze stali wysokostopowej o grubości 2,5 ÷ 3,0 mm,
- termoidykatory kredkowe do pomiaru temperatury: 250°C, 450°C, 550°C, 650°C,
- sprzęt pomocniczy i ochronny,
- instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

#### 3.4.2. Przebieg ćwiczenia

Zakres niniejszego ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się szczegółowe z instrukcją obsługi urządzeń i przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie ćwiczących z gatunkami i doбором elektrod do spawania stali,
- zapoznanie ćwiczących z przygotowaniem materiałów do spawania i warunkami spawania stali,

- poznanie zasad doboru parametrów spawania na określonych urządzeniach spawalniczych i możliwości ich wykorzystania do technik spawania,
- poznanie techniki spawania stali niskowęglowej, wysokowęglowej i stali kwasoodpornej,
- spawanie przez ćwiczących próbnymi złączami o różnych grubościach i pozycjach,
- dyskusja i podsumowanie wyników do opracowania sprawozdania z przebiegu ćwiczenia.

### **3.5. Literatura**

1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o.o. Katowice 1996.
3. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.
4. Gourd L. M.: Podstawy technologii spawalniczych. WNT. Warszawa 1997.
5. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan – Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Politechnika Koszalińska 2000.

## 4. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ TOPLIwą W OSŁONACH GAZOWYCH - GMA

### 4.1. Wstęp

Spawanie elektrodą topliwą GMA (Gas Metal Arc) polega na stapianiu spawanego materiału i elektrody topliwej (spoiwa) ciepłem łuku elektrycznego jarzącego się między topliwą elektrodą a spawanym materiałem w osłonie gazu obojętnego lub gazu aktywnego.

W zależności od zastosowanych gazów osłonowych spawanie GMA można podzielić na następujące metody spawania:

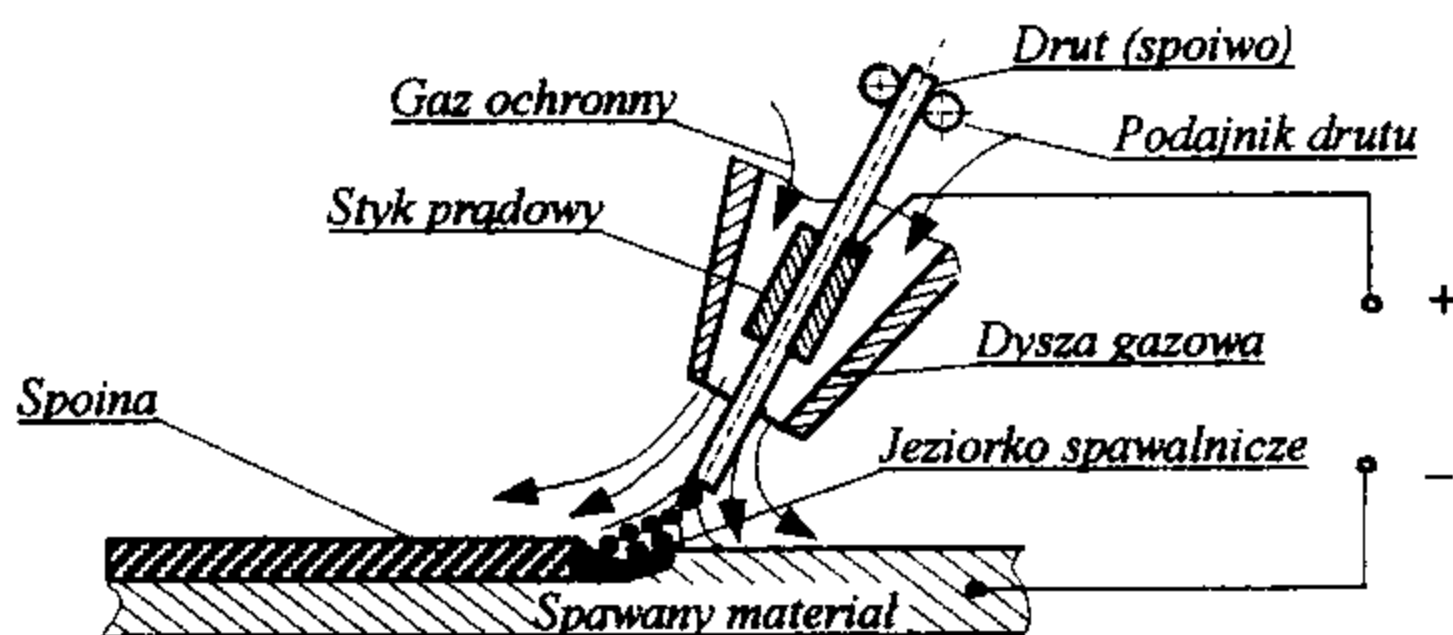
- metoda MIG (Metal Inert Gas) – spawanie w osłonie gazów obojętnych, tj.: *Ar*, *He*,
- metoda MAG (Metal Active Gas) – spawanie w osłonie gazów aktywnych, tj.:  $CO_2$  oraz mieszanek w postaci:  $CO_2 + O_2$ ,  $Ar + CO_2$ ,  $Ar + O_2$ ,  $Ar + CO_2 + O_2$ .

Spawanie metodą GMA może być wykonywane ręcznie, półautomatycznie, automatycznie oraz na stanowiskach zrobotyzowanych. Do zasilania łuku elektrycznego najczęściej wykorzystuje się prąd stały (DC) z biegunowością dodatnią lub prąd stały pulsujący.

### 4.2. Spawanie metodą MAG/MIG

#### 4.2.1. Istota procesu

Istotę spawania metodą MAG/MIG przedstawia rys. 4.1. Elektroda topliwa (spoiwo) przesuwana jest za pomocą podajnika przez styk prądowy (ślizg) podłączony do dodatniego bieguna źródła zasilania łuku.



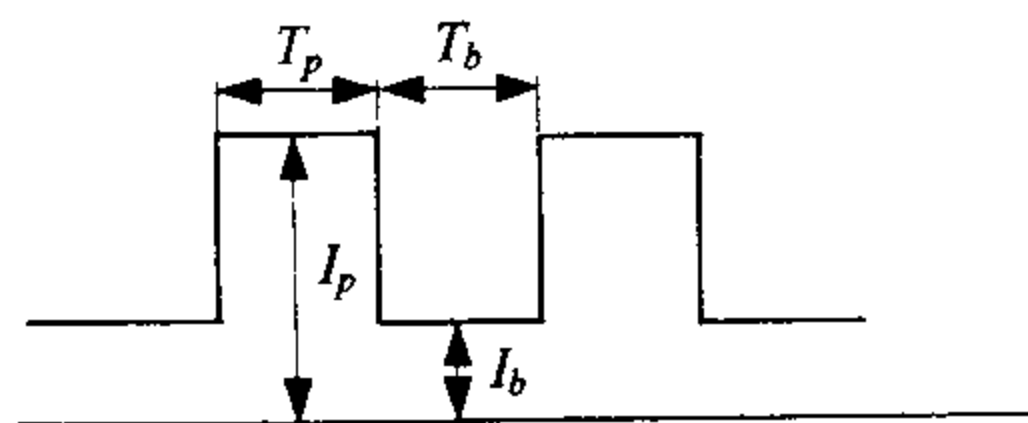
Rys. 4.1. Schemat procesu spawania elektrodą topliwą MAG/MIG

Spoiwo w postaci drutu litego lub proszkowego przechodzi przez dyszę, do której doprowadzony jest gaz osłonowy. Łuk elektryczny jarzy się między elektrodą topliwą a spawanym materiałem w osłonie wypływającego gazu osłonowego. Zadaniem wypływającego gazu osłonowego z dyszy uchwytu spawalniczego jest zabezpieczenie jeziora spawalniczego przed dostępem powietrza atmosferycznego. W związku z tym zarówno parametry spawania jak i ich kryteria doboru są inne niż przy spawaniu elektrodą otuloną.

Stapiany metal z drutu elektrodowego przy spawaniu metodą MAG/MIG może przechodzić przez słup łuku do jeziora spawalniczego czterema sposobami:

- *zwarciowo*, w którym kropla roztopionego metalu zwiera się z jeziorkiem spoiny, łuk gaśnie, a szybko narastający prąd zwarcia powoduje przerwanie zwarcia i powrót łuku. Cykl ten powtarza się regularnie. Częstotliwość powtarzania łuku zwarciowego zależy od napięcia łuku, prądu spawania, średnicy elektrody oraz rodzaju gazu osłonowego,
- *kropłowo*, nazywanym też *mieszanym*. Sposób ten występuje przy pośrednich parametrach zasilania łuku, które są za wysokie dla spawania zwarciowego, a za niskie dla spawania natryskowego. W tym przypadku metal do jeziora spoiny przechodzi grubymi kroplami, które czasem powodują zwarcia,
- *natryskowo*, zwanym też *drobnokropłowym*. Występuje przy wyższych parametrach spawania, tj. wyższym napięciu i natężeniu prądu spawania,
- *prądem stałym pulsującym* (rys. 4.2.). Przechodzenie metalu tym sposobem jest uzależnione od gazu osłonowego, natężenia prądu oraz rodzaju źródła prądu spawania.

Spawanie z zastosowaniem łuku zwarciowego, jak i prądem pulsującym umożliwia zmniejszenie natężenia prądu, co pozwala na spawanie w pozycjach przymusowych oraz spawanie blach cienkich od 0,8 do 3 mm w każdej pozycji lub do wykonywania spoin przetopowych.



Rys. 4.2. Przykładowy schemat przebiegu prądu pulsującego:  $I_p$  – prąd impulsu spawania,  $I_b$  – prąd bazowy,  $T_p$  – czas trwania impulsu prądu spawania,  $T_b$  – czas trwania prądu bazowego

Spawanie z zastosowaniem natryskowego przechodzenia metalu elektrodowego (stopiwa) jest stosowane do spawania we wszystkich pozycjach, ale najlepsze wyniki osiąga się przy spawaniu w pozycji podolnej i nabocznej.

Spawanie metodą MAG/MIG charakteryzuje się następującymi zaletami:

- niskimi kosztami materiałów dodatkowych,
- wysoką wydajnością, szczególnie przy spawaniu w pozycjach przymusowych,
- możliwością obserwacji łuku podczas spawania.

#### **4.2.2. Parametry spawania metodą MAG/MIG**

Podstawowymi parametrami spawania metodą MAG/MIG są:

- rodzaj i natężenie prądu spawania,
- napięcie łuku,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego,
- prędkość podawania drutu elektrodowego,
- rodzaj i średnica drutu elektrodowego,
- prędkość spawania,
- długość wolnego końca (wylotu) drutu elektrodowego,
- pochylenie elektrody topliwej.

Spawanie metodami MAG/MIG przy danym natężeniu prądu spawania odbywa się przy stałej prędkości podawania drutu elektrodowego. W tym przypadku zasilanie podajnika drutu jest niezależne od napięcia łuku elektrycznego.

Stała długość łuku utrzymywana jest samoczynnie na zasadzie tzw. samoregulacji prędkości topienia się drutu elektrodowego (zmienna prędkość stapiania spoiwa w wyniku zmian natężenia prądu przy zmianie długości łuku).

Dobór parametrów spawania metodami MAG/MIG zależy od:

- sposobu przechodzenia stopiwa do jeziora spawalniczego,
- średnicy drutu elektrodowego,
- grubości spawanego metalu,
- pozycji spawania,
- rodzaju wykonywanej spoiny.

Natężenie przepływu gazu osłonowego ustala się na przepływomierzu (rotametrze), przy czym jego wielkość powinna wynosić:  $10 \div 14$  l/min przy spawaniu drutami o średnicy  $0,6 \div 1,2$  mm i  $14 \div 25$  l/min przy spawaniu drutami o średnicy  $1,6 \div 2,4$  mm.

Przygotowanie brzegów materiałów do spawania wykonuje się wg ustaleń normy PN – EN 29692.

### 4.2.3. Źródła zasilania łuku do spawania metodą MAG/MIG

Źródłami zasilania łuku do spawania metodą MAG/MIG mogą być:

- prostowniki diodowe, w których wybór charakterystyki statycznej do konkretnych warunków spawania odbywa się przez przełączanie zaczepek na uzwojeniu pierwotnym transformatora,
- prostowniki tyrystorowe, w których zmiana charakterystyki statycznej odbywa się w sposób płynny poprzez zmianę wysterowania tyrystorów,
- urządzenia z wewnętrzną przemianą częstotliwości (inwertorowe), w których istnieje możliwość kształtowania charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz możliwość sterowania przenoszeniem ciekłego metalu do jeziora spawalniczego.

### 4.2.4. Spawanie w osłonie gazów aktywnych - MAG

#### 4.2.4.1. Charakterystyka metody

W osłonie gazów aktywnych można spawać stale zwykłe, niskowęglowe oraz stale o podwyższonej wytrzymałości.

Spawanie w osłonie gazów aktywnych z powodu utleniającej atmosfery w przestrzeni łuku elektrycznego nie zapewnia pełnej ochrony jeziora spawalniczego przed utlenianiem. W tym przypadku w procesie metalurgicznym podczas spawania istotną rolę spełniają produkty rozpadu  $CO_2$  ( $CO + O_2$ ) oraz  $O_2$ , które reagują z płynnym metalem. Wysoka temperatura łuku ułatwia proces utleniania ciekłego metalu oraz składników stopowych, co może być powodem występowania pęcherzy gazowych w spoinach. Ponadto również w tym przypadku brak żużla uniemożliwia wprowadzenie dodatkowych pierwiastków do spoiny. Z tego też względu druty do spawania metodą MAG muszą zawierać w swoim składzie chemicznym dostateczną ilość pierwiastków o dużym powinowactwie do tlenu, jak: *Si*, *Mn*, *Al* i *Ti* (wg PN – EN 440, PN – EN 758 i PN – EN 12534). Pierwiastki te mają za zadanie odtlenienie spoiny, jak i również rozpuszczając się w ciekłym metalu, uzupełniają jego skład chemiczny do wymaganej zawartości tych składników.

Do spawania tą metodą stosowane są najczęściej miedziowane druty elektrodowe o średnicy: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 i 2,4 mm, zwinięte w szpulach, które zakłada się na podajnik.

Podajnik drutu jest urządzeniem służącym do stałego podawania gołego drutu do uchwytu spawalniczego jako elektrody stapiającej się w łuku elektrycznym. Podajniki mogą być jako oddzielne urządzenie przenośne lub zabudowane wewnątrz źródła zasilania łuku.

#### 4.2.4.2. Materiały dodatkowe

Gazy osłonowe zabezpieczają ciekły metal i przestrzeń łuku przed dostępem powietrza atmosferycznego oraz oddziałują w sposób chemiczny z tym metalem. Do spawania metodą MAG zgodnie z normą PN – EN 439 stosuje się czysty  $CO_2$  o symbolu **C1**;  $CO_2 + 30\%O_2$  o symbolu **C2** oraz mieszanki dwuskładnikowe lub trójskładnikowe o symbolach: **M11 ÷ M14**, **M21 ÷ M24**, **M31 ÷ M33**.

Dodatek  $CO_2$ , tlenu lub obu tych gazów do argonu poprawia stabilność jarzenia się łuku i zapewnia płynniejsze przenoszenie metalu w łuku. Obniża też napięcie powierzchniowe ciekłego metalu. Pozwala to na znaczny wzrost prędkości spawania i korzystny wpływ na kształt geometryczny spoiny (gładsze i bardziej płaskie lico), co z kolei umożliwia uzyskanie znacznych oszczędności w zużyciu drutu elektrodowego. Osłonowe mieszanki gazowe wyraźnie ograniczają ilość rozprysków w porównaniu do  $CO_2$ .

Oznaczenie (symbole) drutów elektrodowych do spawania metodą MAG ilustrują poniższe przykłady:

*Przykład oznaczenia drutu pełnego:*

**PN – EN 440 G 42 4 M14 G3Si2**

gdzie:

- |             |  |
|-------------|--|
| PN – EN 440 | – symbol obowiązującej normy,                    |
| G           | – symbol drutu pełnego,                          |
| 42          | – symbol własności wytrzymałościowych stopiwa,   |
| 4           | – symbol temperatury łamania stopiwa,            |
| M14         | – symbol rodzaju gazu osłonowego wg PN – EN 439, |
| G3Si2       | – symbol składu chemicznego drutu elektrodowego. |

*Przykład oznaczenia drutu proszkowego:*

**PN – EN 758 T 46 3 M1Ni R M21 1 H5**

gdzie:

- |             |  |
|-------------|--|
| PN – EN 758 | – numer obowiązującej normy,   |
| T           | – symbol drutu proszkowego,  |
| 46          | – 46 symbol własności wytrzymałościowych stopiwa,  |
| 3           | – symbol temperatury łamania stopiwa,  |
| Mn1Ni       | – symbol składu chemicznego stopiwa,   |
| R           | – symbol rodzaju proszku w drucie (R - rutyłowy, wolno krzepnący; P - rutyłowy, szybko krzepnący; B - zasadowy; M - proszek metalowy), |



M21	– symbol rodzaju gazu osłonowego wg PN – EN 439,
1	– symbol pozycji spawania,
H5	– symbol zawartości wodoru w stopiwie.

Dwutlenek węgla stosowany do celów spawalniczych musi być czysty i nie zawierać wilgoci. Czystość  $CO_2$  wymagana warunkami technicznymi powinna być wyższa od 98%. Przy dużym natężeniu wypływu gazu z butli wzrasta szybkość jego rozprężania, co związane jest ze znacznym pobieraniem ciepła z otoczenia. W efekcie końcowym prowadzi to do zestalania (sublimacji) gazu między zaworem butlowym a reduktorem. Przed tym zjawiskiem zabezpiecza się poprzez umieszczenie między butlą a reduktorem podgrzewacza gazu (oporowy element grzejny zasilany prądem przemiennym).

#### 4.2.5. Spawanie w osłonie gazów obojętnych MIG

Spawanie w osłonie gazów obojętnych metodą MIG ma zastosowanie do spawania stali wysokostopowych (nierdzewnych, kwasoodpornych i żaroodpornych), miedzi, aluminium i jego stopów.

Zasada spawania metodą MIG jest podobna do spawania metodą MAG. Stosuje się te same urządzenia i aparaturę, a spoiwo dobiera się o przybliżonym składzie chemicznym do spawanego metalu, zaś dla metali nieżelaznych z dodatkowo zwiększoną zawartością pierwiastków odtleniających, taki jak: *Ti*, *Si*.

Gazami osłonowymi w metodzie MIG zgodnie z PN-EN 439 są: czysty argon o symbolu I1, czysty hel o symbolu I2 oraz mieszanka helu z argonem o symbolu I3.

#### 4.2.6. Spawanie metodą TIME

Spawanie metodą TIME (Transferred Ionized Molten Energy) jest podobne do spawania metodą GMA, lecz różni się składem mieszanki gazu osłonowego. Charakteryzuje się ona też bardzo wysoką wydajnością.

Stosowany w tej metodzie gaz osłonowy jest mieszanką czteroskładnikową  $He + CO_2 + O_2 + Ar$ , gdzie argon tworzy stabilny słup łuku plazmowego, hel zwiększa przewodnictwo cieplne łuku, a tlen i dwutlenek węgla obniża napięcie powierzchniowe kropli topiącego się drutu oraz jeziora spawalniczego.

Źródłami zasilania łuku w metodzie TIME mogą być wyłącznie źródła inwertorowe, pozwalające na dokładną regulację i programowanie parametrów spawania.

Przechodzenie materiału elektrodowego do jeziora spawalniczego w metodzie TIME może się odbywać następującymi sposobami: *zwarciovo, natryskowo, rotacyjnie (zjawisko wirowania łuku)*. W zależności od sposobu przechodzenia kropli ciekłego metalu do jeziora spawalniczego uzyskuje się różne kształty spoin przy zachowaniu jednakowego wtopienia.

Uzyskane złącza charakteryzują się wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi, a spoiny mają duży stopień czystości i niską zawartość tlenu.

Do spawania metodą TIME wymagane są specjalne podajniki drutu elektrodowego, umożliwiające osiąganie bardzo dużych prędkości podawania, co w konsekwencji pozwala na bardzo dużą wydajność spawania.

Metodą TIME można spawać stale niestopowe, niskostopowe oraz wysokostopowe.

Skład mieszanki gazowej dobierany jest w zależności od rodzaju spawanego materiału.

### **4.3. Część praktyczna**

#### **4.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe**

- a) stanowisko do spawania metodą MAG:
  - prostownik spawalniczy do spawania metodą MAG,
  - podajnik drutu elektrodowego,
  - butla z CO<sub>2</sub> wraz z reduktorem i podgrzewaczem,
  - drut do spawania stali o podwyższonej wytrzymałości,
  - odcinki blach ze stali o podwyższonej wytrzymałości o gr. 10 mm,
  - sprzęt ochronny,
  - instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe,
- b) stanowisko do spawania metodą MIG:
  - automat do spawania (inwertorowy),
  - butla z argonem (I1) wraz z reduktorem,
  - drut do spawania stali wysokostopowej,
  - odcinki blach ze stali wysokostopowej o grubości 2 mm,
  - sprzęt ochronny,
  - instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

### 4.3.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją stanowiskową spawania metodą MAG/MIG oraz przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- omówienie przepisów bhp,
- zapoznanie się z wyposażeniem stanowisk do spawania metodą MAG i MIG,
- zapoznanie się z techniką i zasadami spawania elektrodą topliwą w osłonie gazowej,
- analiza uzyskanych wyników spawania wymienionymi metodami,
- dyskusja i podsumowanie przebiegu ćwiczenia.

### 4.4. Literatura

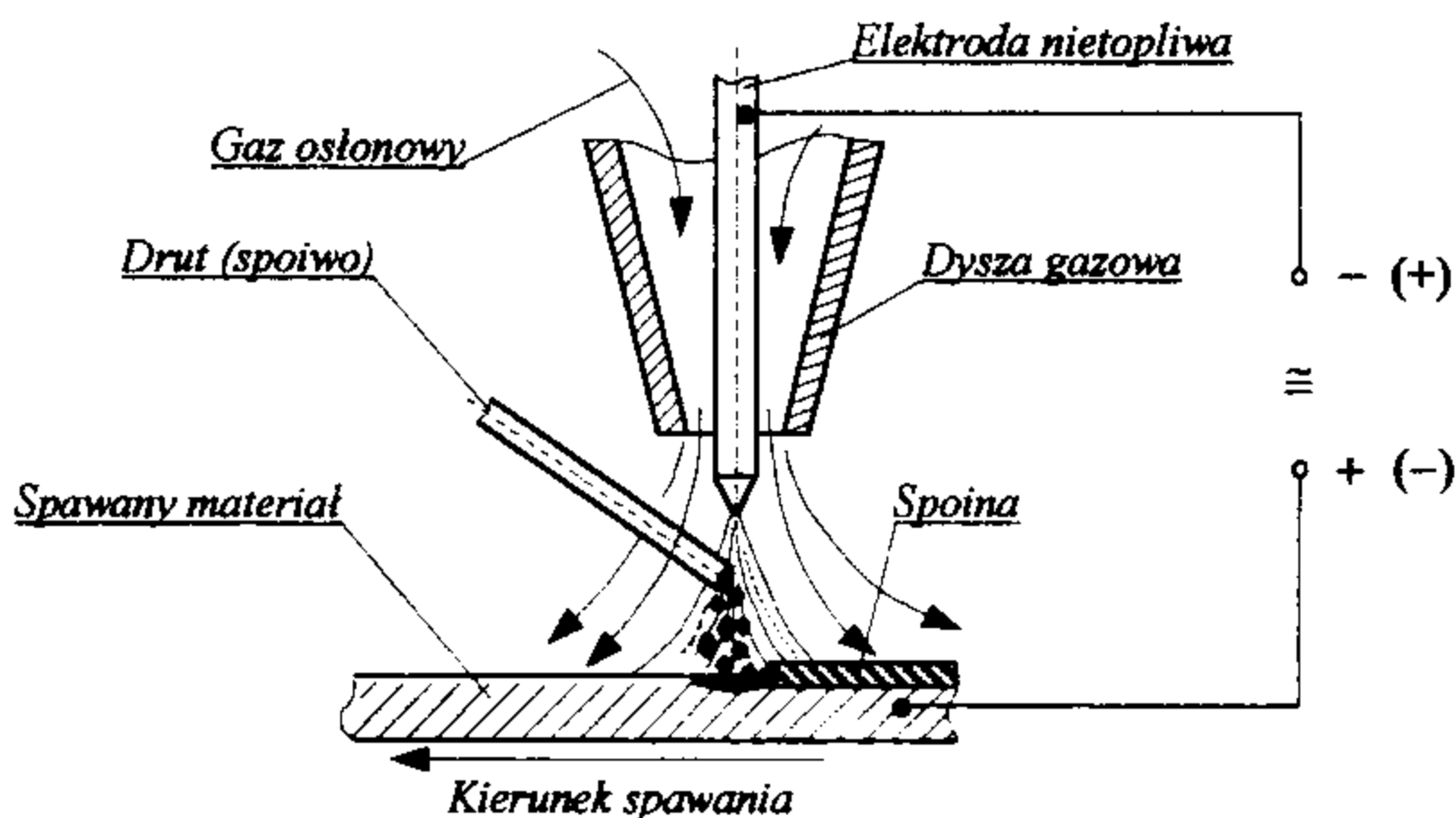
1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o. o. Katowice 1996.
3. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.
4. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan - Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Politechnika Koszalińska 2000.

## 5. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ NIETOPLIwą W OSŁONACH GAZOWYCH – TIG (GTA)

### 5.1. Wstęp

Istotę spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej oznaczoną symbolami TIG (Tungsten Inert Gas) lub GTA (Gas Tungsten Arc) przedstawia rysunek 5.1.

W metodzie TIG gazem osłonowym jest argon, hel lub ich mieszaniny (gazy obojętne), a elektroda jest wykonana z wolframu z dodatkiem któregoś z tlenków: cyrkonu, toru, lantanu, itru lub innych pierwiastków charakteryzujących się dużą termoemisją elektronów. Innym sposobem spawania może być spawanie elektrodą nietopliwą wykonaną np. z grafitu, gdzie gazem osłonowym może być gaz reaktywny.



Rys. 5.1. Schemat spawania metodą TIG (GTA)

W metodzie TIG elektroda nietopliwa umieszczona jest w dyszy, do której doprowadzony jest gaz osłonowy. Spoina powstaje w wyniku stapienia ciepłem łuku elektrycznego krawędzi łączonych elementów, a do jeziora spawalniczego spoiwo jest dodatkowo podawane z boku ręcznie lub automatycznie.

Wyływający podczas spawania z dyszy gaz osłonowy zabezpiecza przestrzeń łuku i jezioro spawalnicze przed dostępem otaczającego powietrza atmosferycznego.

## 5.2. Źródła zasilania łuku do spawania metodą TIG

Łuk spawalniczy przy spawaniu metodą TIG może być zasilany prądem stałym, prądem pulsującym lub prądem przemiennym.

Źródła zasilania łuku do spawania metodą TIG posiadają opadającą lub stało-prądową charakterystykę statyczną, tj. taką samą, jak do spawania elektrodami otulonymi.

Do spawania stali, niklu i jego stopów oraz miedzi i jej stopów stosuje się prostowniki tyrystorowe lub inwertorowe, pozwalające na spawanie prądem stałym lub pulsującym.

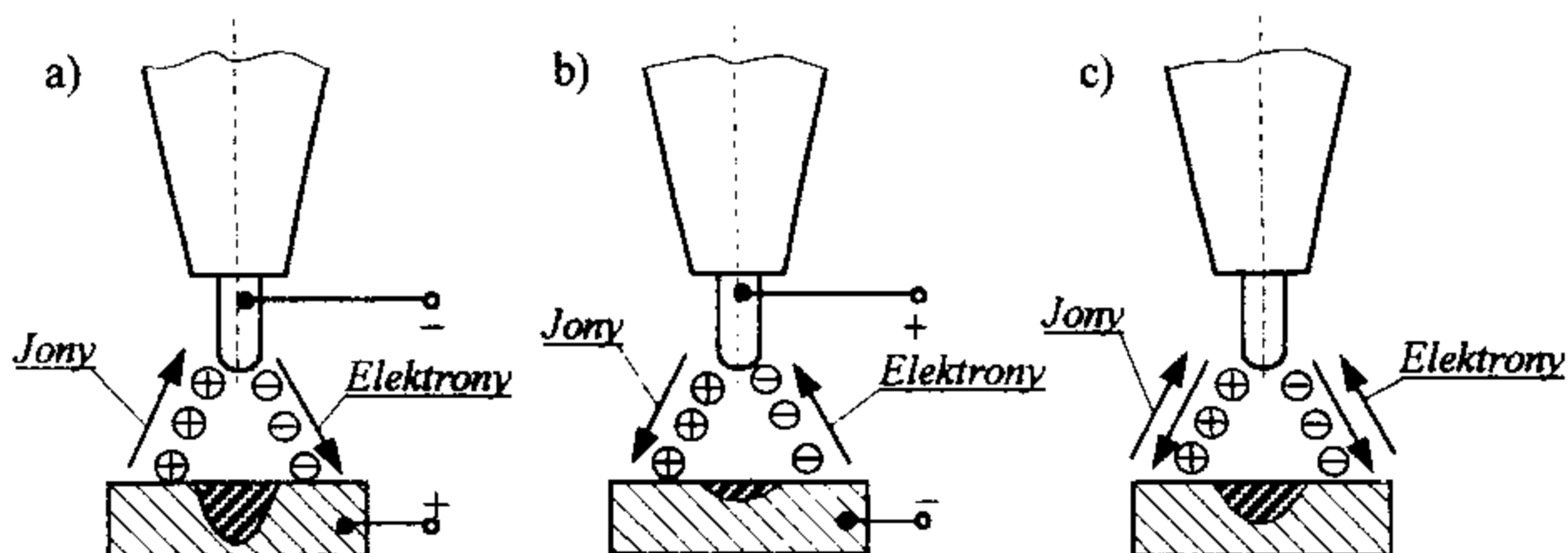
Do spawania brązów aluminiowych, aluminium, magnezu i ich stopów stosuje się transformatory spawalnicze lub źródła inwertorowe.

Źródła zasilania łuku do spawania metodą TIG wyposażane są dodatkowo w urządzenia sterujące procesem spawania, np.: układ sterowania chłodzeniem palnika, sterowanie przepływem gazu ochronnego, bezstykowe zajarzanie łuku elektrycznego, programowanie i sterowanie parametrami spawania itp.

Urządzeniem umożliwiającym bezstykowe zajarzanie łuku elektrycznego jest tzw. jonizator wytwarzający wysokie napięcie, zdolne do przebicia przestrzeni międzyelektrodowej i zainicjowania łuku elektrycznego.

Spawanie prądem stałym (DC), prądem pulsującym przy ujemnej biegunowości elektrody, stwarza najlepsze warunki pod względem jej obciążenia termicznego (rys. 5.2a). Ilość ciepła wydzielonego w materiale jest prawie dwukrotnie większa niż na elektrodzie. Spawanie prądem stałym oraz pulsującym o biegunowości ujemnej ma zastosowanie do spawania stali węglowych i niskostopowych, stali stopowych, miedzi, brązów (bez brązów aluminiowych), niklu i jego stopów oraz tytanu.

Przy spawaniu z biegunowością dodatnią elektroda wolframowa staje się anodą, a jeziorko spawalnicze katodą. W tym przypadku występuje zjawisko rozpraszania warstwy tlenków w wyniku tzw. rozpylania katodowego. Na płamce katodowej (jeziorku spawalniczym) pod działaniem elektronów i jonów argonu warstewka tlenków zostaje rozbijana i usuwana na boki odsłaniając czysty metal (rys. 5.2b). Elektroda jest bombardowana przez rozpędzone elektrony, które przekazując jej swoją energię kinetyczną, zamieniają w energię cieplną, co powoduje nadmierne nagrzewanie się elektrody. Ilość ciepła do stopienia materiału spawanego jest wtedy mniejsza, co obniża jednocześnie głębokość wtopu. Prąd stały biegunowości dodatniej praktycznie nie jest stosowany ze względu na małą sprawność procesu spawania oraz przeciążenie termiczne elektrody wolframowej.

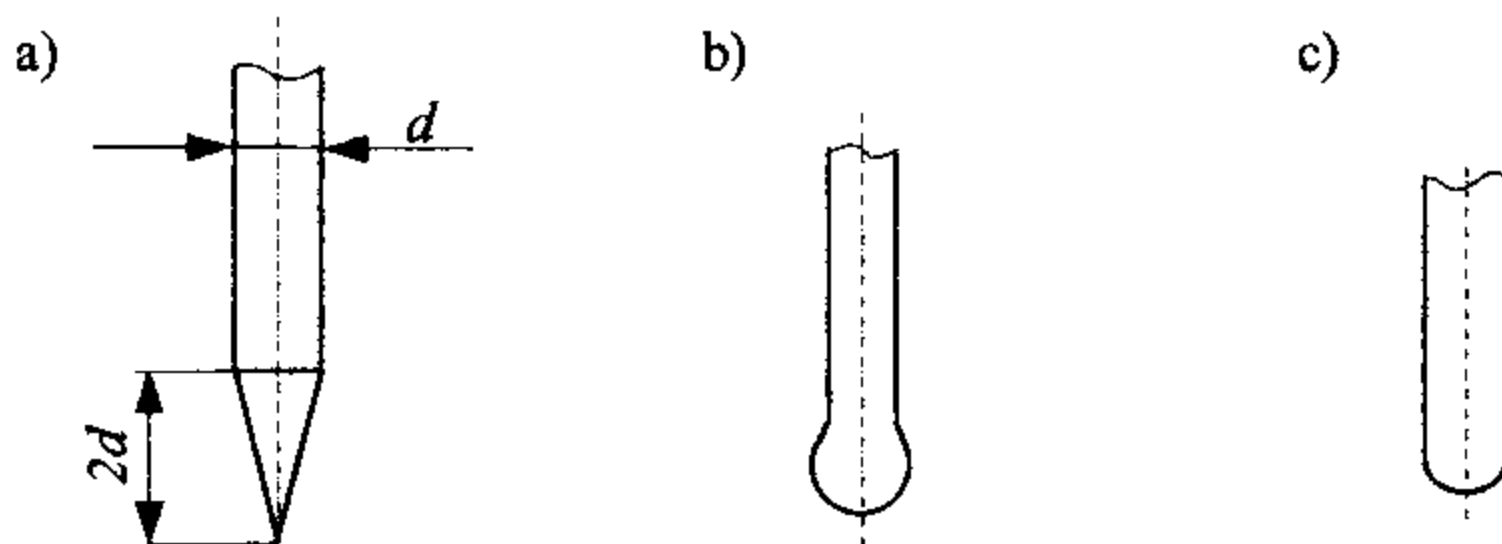


Rys. 5.2. Wpływ rodzaju prądu i biegunowości łuku na rozpylanie (rozpraszczenie) katodowe oraz ilość wydzielanego ciepła podczas spawania metodą TIG: a) prąd stały, biegunowość ujemna – rozpylania katodowego brak, b) prąd stały, biegunowość dodatnia – rozpylanie katodowe występuje, c) prąd przemienny – rozpylanie katodowe występuje co pół okresu

Spawanie prądem przemiennym (AC) łączy wszystkie wady i zalety spawania prądem stałym biegunowości dodatniej jak i biegunowości ujemnej.

W przypadku kiedy elektroda jest anodą występuje niszczenie warstwy tlenków (rys. 5.2c), zaś kiedy jest katodą następuje wydzielanie się dużych ilości ciepła na materiale, co pozwala na zwiększenie głębokości wtopu i prędkości spawania. W przypadku spawania prądem przemiennym elektroda jest obciążana okresowo, co pozwala również na zwiększenie prądu spawania. Prąd przemienny ma szczególne zastosowanie do spawania brązów aluminiowych, aluminium i magnezu oraz ich stopów.

W zależności od rodzaju prądu spawania dobiera się również kształt końca elektrody. Kształt końca elektrody podczas spawania metodą TIG przy zastosowaniu różnych biegunowości i prądu spawania przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Przykłady kształtu końca elektrody przy spawaniu metodą TIG: a) przy biegunowości ujemnej (koniec w postaci stożka), b) przy biegunowości dodatniej (koniec w postaci ciekłej kropli), c) dla prądu przemiennego

### 5.3. Parametry spawania

Do podstawowych parametrów spawania metodą TIG zalicza się:

- rodzaj i natężenie prądu spawania,
- napięcie łuku,
- prędkość spawania,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego,
- średnica (przekrój) i rodzaj materiału elektrody nietopliwej,
- średnica i rodzaj materiału dodatkowego.

*Natężenie prądu* ma decydujący wpływ na głębokość wtopienia, szerokość spoiny oraz prędkość spawania. Wielkość natężenia prądu jest jednak ograniczona ze względu na niebezpieczeństwo przegrzania końcówki elektrody wolframowej i jej nadtopienie.

*Napięcie łuku* decyduje w zależności od rodzaju gazu ochronnego o długości łuku oraz o kształcie spoiny i ściśle zależy od zastosowanego natężenia prądu spawania oraz rodzaju materiału elektrody. Przy wzroście napięcia łuku wzrasta szerokość lica spoiny, maleje głębokość wtopu, pogarsza się stabilność jarzenia łuku oraz występuje zachwianie osłony jeziora spawalniczego.

*Prędkość spawania* decyduje o energii liniowej spawania, a więc i też o ilości doprowadzonego ciepła do miejsca spawania.

*Gaz osłonowy* podczas spawania nie tylko ma za zadanie osłaniać elektrodę nietopliwą i jezioro spawalnicze przed dostępem powietrza atmosferycznego, ale także decyduje o energii liniowej spawania (napięcie łuku), kształcie spoiny, a nawet o składzie chemicznym stopiwa.

Podstawowymi właściwościami fizycznymi gazów podczas spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej, decydującymi o ich wpływie na proces spawania są:

- przewodnictwo cieplne,
- energia jonizacji,
- ciężar właściwy,
- punkt rosy,
- dysocjacja i rekombinacja gazu.

Przewodnictwo cieplne gazu osłonowego decyduje o kształcie spoiny.

I tak na przykład hel charakteryzuje się bardzo dobrym przewodnictwem cieplnym, powoduje, że słup łuku jest szeroki i na większym obszarze wprowadzane jest ciepło. Spoina w tym przypadku jest szeroka i dość płytka o gładkim, płaskim licu. Argon natomiast jest gazem o niskim przewodnictwie cieplnym, co sprawia, że łuk w osłonie argonu ma wąski gorący rdzeń i znacznie chłodniejszą strefę zewnętrzną. Spoina wykonana w osłonie argonu ma większą głębokość wtopienia i węższe lico niż przy spawaniu w osłonie helu.

## 5.4. Materiały dodatkowe

W procesie spawania metodą TIG gazy osłonowe dają pełną ochronę ciekłego metalu (jeziorka spawalniczego) przed dostępem powietrza atmosferycznego. W związku z powyższym zmiany składu chemicznego na skutek przetopienia materiału rodzimego i spoiwa są bardzo małe, dlatego też spoiwo do spawania może mieć ten sam skład chemiczny co spawany materiał.

Materiałem dodatkowym do spawania może być spoiwo w postaci drutu lub wąskich ścinków blach. Do spawania stali niestopowych i drobnoziarnistych stosuje się druty spawalnicze wg PN – EN 1668.

Zgodnie zaś z PN – EN 439 do spawania metodą TIG stosuje się następujące gazy osłonowe: argon o symbolu **I1**, hel o symbolu **I2** oraz następujące mieszanki:  $Ar + He$  o symbolu **I3**,  $Ar + H_2$  o symbolu **R1** lub **R2**. Dobór rodzaju gazu i ich mieszanek uzależniony jest od grubości i rodzaju spawanego materiału.

## 5.5. Technologia i technika spawania metodą TIG

Spawanie metodą TIG (GTA) wymaga szczególnie dokładnego oczyszczenia brzegów spawanych przedmiotów z wszelkich zanieczyszczeń występujących w postaci tlenków, rdzy, zgorzelin, smarów itp. Szczególnie jest to ważne przy spawaniu aluminium i jego stopów. Czyszczenie powierzchni z zanieczyszczeń może być wykonywane mechanicznie za pomocą szczotek drucianych lub poprzez zastosowanie specjalnych zestawów chemicznych do czyszczenia powierzchni aluminium i jego stopów.

Spawanie TIG może być wykonywane we wszystkich pozycjach: ręcznie, półautomatycznie lub automatycznie. W zależności od grubości i rodzaju spawanego materiału spawanie może być prowadzone techniką „w lewo” lub „w prawo”, podobnie jak przy spawaniu gazowym.

Spawanie metodą TIG może być prowadzone bez udziału materiału dodatkowego i wtedy spoinę tworzy się z nadtopionych brzegów spawanych materiałów lub z materiałem dodatkowym (spoiwem). Ukosowanie i kształt rowka zależy od grubości materiału, warunków spawania oraz specyfiki konstrukcyjno – technologicznej złącza. Zalecane wymiary rowków spoin ujęto w normie PN – EN 29692.



## 5.6. Część praktyczna

### 5.6.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe:

- a) stanowisko do spawania metodą TIG:
- inwertorowe źródło prądu oraz butla z argonem wraz z reduktorem,
  - drut do spawania stali wysokostopowej,
  - odcinki blach ze stali wysokostopowej o grubości 2,5 mm,
  - drut miedziany,
  - odcinki blach miedzianych o grubości 2 mm,
  - drut do spawania stopu aluminiowego,
  - odcinki blach ze stopu aluminiowego o grubości 5 mm,
  - sprzęt ochronny, instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

### 5.6.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją stanowiskową spawania metodą TIG, oraz z przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie się z wyposażeniem stanowiska do spawania metodą TIG,
- zapoznanie się z techniką i zasadami spawania stali wysokostopowej oraz miedzi prądem stałym i pulsującym,
- zapoznanie się z techniką spawania aluminium,
- analiza uzyskanych wyników spawania według ww. metody i technik,
- dyskusja i podsumowanie wyników.

## 5.7. Literatura

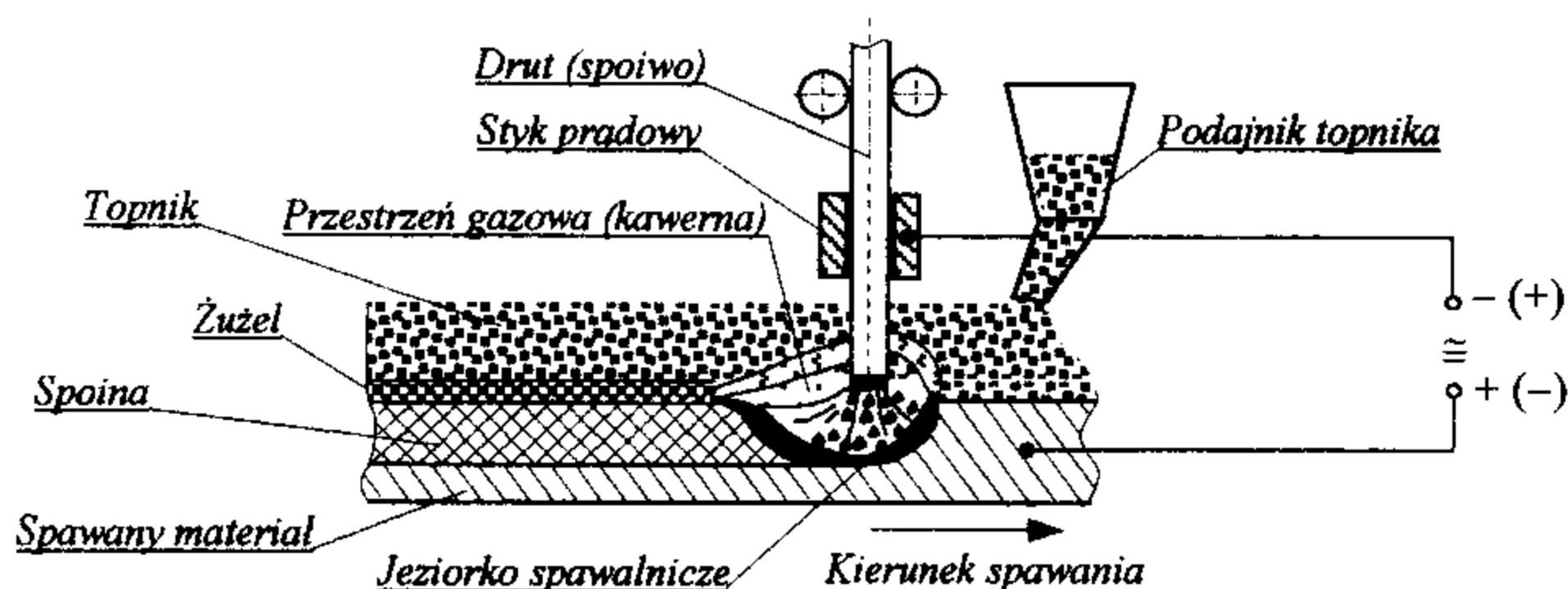
1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o.o. Katowice 1996.
3. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.
4. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan-Wiatrowski K.: Materiały spawalnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Politechnika Koszalińska 2000.

## 6. SPAWANIE ŁUKIEM KRYTYM - SAW

### 6.1. Istota spawania łukiem krytym

Spawanie łukiem krytym (pod topnikiem) SAW (Submerged Arc Welding) polega na wykorzystaniu ciepła wytworzonego w łuku elektrycznym, powstałym między elektrodą topliwą, a spawanym przedmiotem w przestrzeni odizolowanej od otaczającej atmosfery warstwą topnika.

Na przygotowane krawędzie spawanego materiału sypie się w obrębie elektrody (spoiwa) topnik ze specjalnego zasobnika. Łuk jarzy się pomiędzy materiałem spawanym a elektrodą. Podczas jarzenia się łuku tworzy się jezioro ciekłego metalu, powstaje przestrzeń gazowa (kawerna) przykryta ciekłym żuzłem i pozostałym nie roztopionym topnikiem. Kawerna izoluje łuk przed oddziaływaniem powietrza atmosferycznego. Duża gęstość prądu i kierunek ciśnienia gazów sprzyja ruchowi ciekłego metalu i żuzła w jeziorze, co zapewnia głęboki przetop materiału rodzimego, a w końcowym efekcie - dobrą jakość złączy spawanych (rys. 6.1). Omawiana metoda może być wykorzystana do spawania stali: niskowęglowych, o podwyższonej wytrzymałości, austenitycznych oraz niektórych stopów aluminium, miedzi jak i do napawania. Może być prowadzona w sposób i automatyczny (najczęściej) lub półautomatyczny.



Rys. 6.1. Schemat procesu spawania łukiem krytym

Spawanie łukiem krytym charakteryzuje się następującymi zaletami:

- możliwością spawania blach o znacznej grubości bez potrzeby ich ukosowania,
- dużą prędkością spawania,
- małym rozpryskiem metalu podczas spawania,
- możliwością stapiania dużej ilości spoiwa (ważne przy napawaniu),
- dużą głębokością wtopienia,

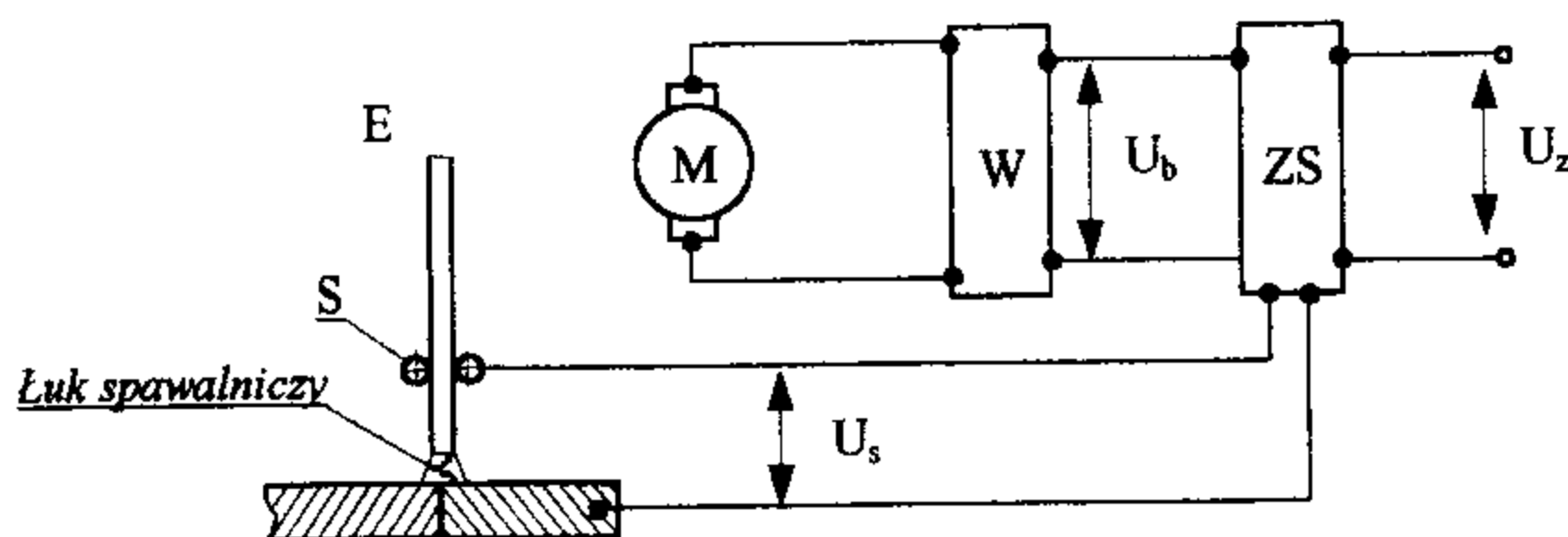
- małym zużyciem spoiwa w odniesieniu do grubości spawanych elementów,
- dobrą jakością wykonanej spoiny,
- korzystnymi warunkami pracy (mała ilość wydzielających się gazów i brak widocznego łuku),
- brakiem wymagań zdolności manualnych od spawacza (operatora).

## 6.2. Urządzenia do spawania łukiem krytym

Automaty do spawania łukiem krytym są stosowane w wielu odmianach konstrukcyjnych w zależności od przeznaczenia (spawanie określonych grup konstrukcyjnych), wartości znamionowej prądu spawania, pozycji spawania itp. Niezależnie od powyższych rozwiązań automat do spawania łukiem krytym składa się z następujących podstawowych zespołów i podzespołów:

- źródła prądu spawania – stałego lub przemiennego,
- mechanizmu posuwu automatu,
- głowicy z mechanizmem napędu rolek podających elektrodę z zespołem mocowania szpuli drutu elektrodowego,
- układu podawania topnika (ze zbieraczem lub bez zbieracza nie roztopionego topnika),
- układu sterowania wraz z pulpitem sterowniczym.

Współczesne automaty spawalnicze są zasilane prądem stałym ze względu na zastosowanie prostowników tyrystorowych, umożliwiających regulację prądu spawania oraz zasilania z trzech faz energetycznych. Drut elektrodowy może być podawany ze stałą prędkością przy wykorzystaniu zjawiska samoregulacji prędkości topienia się drutu lub w układzie ze stabilizacją długości łuku (rys. 6.2).



Rys. 6.2. Schemat blokowy automatycznej stabilizacji łuku; E – elektroda (drut elektrodowy), M – silnik, S – styk prądowy W – wzmacniacz, ZS – zespół sumujący,  $U_s$  – napięcie łuku,  $U_z$  – napięcie zadane,  $U_b$  – sygnał błędny

Do zasilania automatów ze stabilizacją długości łuku są stosowane źródła zasilania łuku o opadającej statycznej charakterystyce zewnętrznej. Natomiast do zasilania automatów z wykorzystaniem zjawiska samoregulacji prędkości topienia się drutu – źródła o charakterystyce płaskiej.

### 6.3. Topniki i druty elektrodowe do spawania stali

Materiałami dodatkowymi do spawania łukiem krytym są topniki: topione, aglomerowane i mieszane oraz spoiwo: druty pełne, proszkowe (rdzeniowe) i taśmy. Topnik do spawania łukiem krytym dobierany jest w zależności od składu chemicznego materiału spawanego, materiału elektrody (spoiwa) oraz wymaganych parametrów spawania. Ze względu na skład chemiczny topniki mogą być: neutralne (nie wprowadzające pierwiastków stopowych do spoiny), aktywne (wprowadzające do spoiny *Mn*, *Si* lub inne pierwiastki stopowe). Oznaczenie drutów do spawania łukiem krytym oraz topników - wg PN – EN 756 i PN – EN 760 ilustrują poniższe przykłady.

*Przykład oznaczenia kombinacji drut elektrodowy - topnik:*

**PN - EN 756 S 46 3 AS S1Si**

gdzie:

<b>PN – EN 756</b>	- numer obowiązującej normy,
<b>S</b>	- symbol metody spawania (spawanie, łukiem krytym),
<b>46</b>	- symbol charakteryzujący właściwości wytrzymałościowe stopiwa (minimalna granica plastyczności),
<b>3</b>	- symbol charakteryzujący pracę łamania stopiwa,
<b>AS</b>	- symbol charakteryzujący rodzaj topnika,
<b>S1Si</b>	- symbol charakteryzujący skład chemiczny drutu.

*Przykład oznaczenia topnika:*

**Fluks PN - EN 760 A AS 1 67 AC H15**

gdzie:

<b>PN - EN 760</b>	- numer obowiązującej normy,
<b>A</b>	- symbol metody wytwarzania topnika (A – topnik aglomerowany, F – topnik topiony, M – topnik mieszany),
<b>AS</b>	- symbol rodzaju topnika,
<b>1</b>	- symbol klasy zastosowania topnika,
<b>67</b>	- symbol stopnia wzrostu zawartości Si i Mn,
<b>AC</b>	- symbol rodzaju prądu spawania (AC – prąd przemienny, DC – prąd stały),
<b>H15</b>	- symbol zawartości wodoru w stopiwie.

Ze względu na zastosowanie topniki dzielą się na trzy klasy:

1 – topniki do spawania i napawania stali niskowęglowych i niskostopowych konstrukcyjnych i o zwiększonej odporności na pękanie; topniki te oprócz Mn i Si nie zawierają innych składników stopowych,

2 – topniki do spawania i napawania stali nierdzewnych, żaroodpornych i chromowo – niklowych oraz niklu i stopów niklu,

3 – topniki do napawania.

Jeśli topnik jest przydatny do spawania prądem przemiennym, to w zasadzie jest przydatny do spawania prądem stałym.

Drut elektrodowy (spoiwo) do spawania łukiem krytym posiada powierzchnię miedziowaną dla zapewnienia dobrego styku prądowego z końcówką prądową (ślizgiem). Są stosowane też druty nie miedziowane o czystej powierzchni metalicznej pakowane w szczelne próżniowo opakowania. Skład chemiczny drutów dobiera się w zależności od rodzaju spawanego materiału i rodzaju topnika. Do spawania tą metodą mogą być używane druty pełne oraz proszkowe (rdzeniowe).

## 6.4. Technika spawania łukiem krytym

### 6.4.1. Parametry spawania

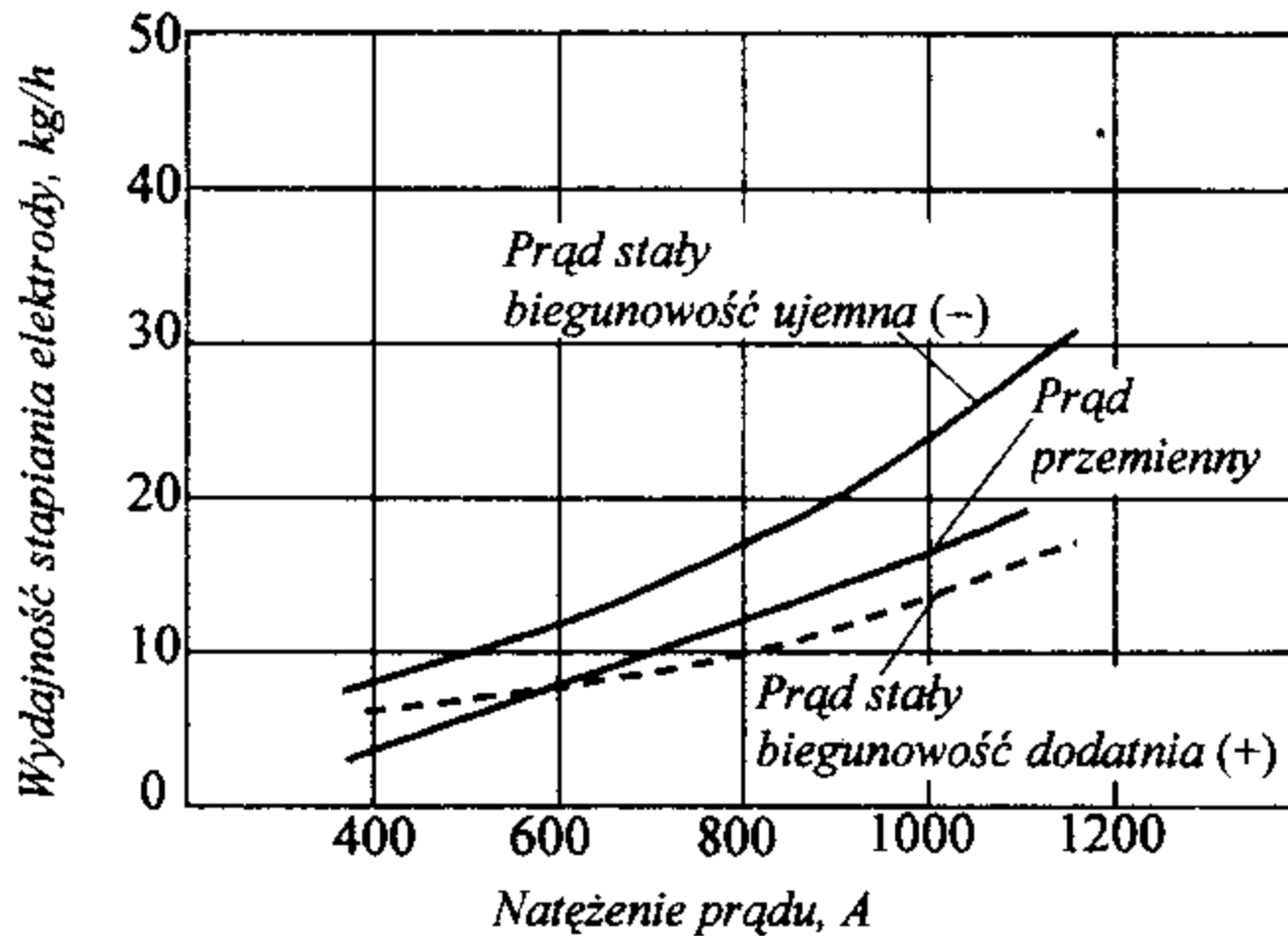
Spawanie łukiem krytym może być prowadzone prądem stałym o biegunowości ujemnej, dodatniej oraz prądem przemiennym, zależnie od technologicznych wymagań. Spawanie prądem stałym jest powszechnie stosowane ze względu na korzystne warunki regulacji kształtu spoiny, większej głębokości wtopienia i prędkości spawania oraz łatwiejsze zajarzenie łuku. Największą wydajność stapiania drutu uzyskuje się przy spawaniu z zastosowaniem biegunowości ujemnej, lecz wtedy głębokość wtopienia jest mniejsza.

W technice spawania łukiem krytym podstawowym zadaniem jest określenie i utrzymanie stabilnych parametrów spawania.

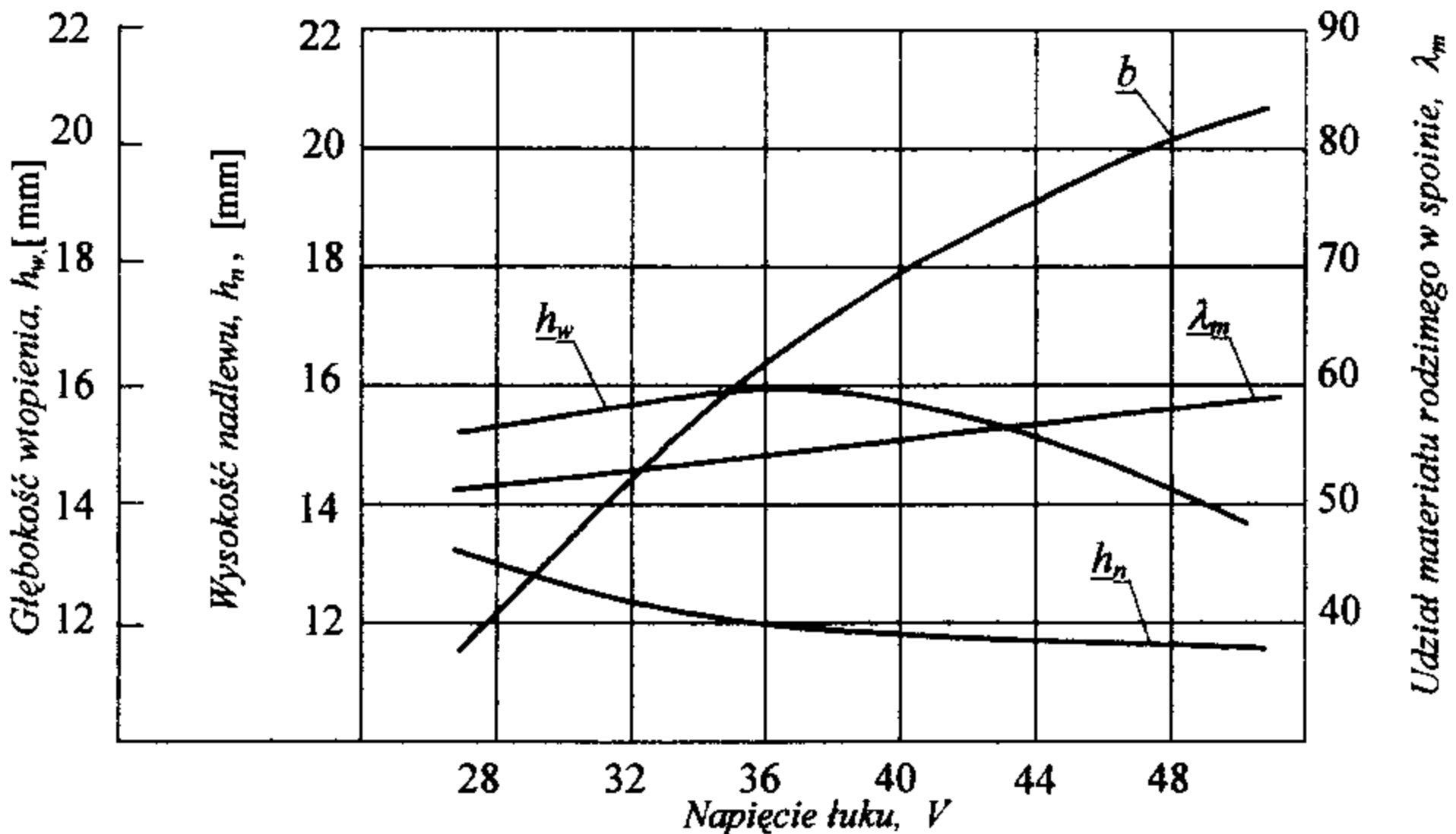
Do podstawowych parametrów spawania łukiem krytym zalicza się:

- **nateżenie prądu;** wraz ze wzrostem nateżenia prądu spawania zwiększa się ilość ciepła wydzielonego w łuku, co decyduje o prędkości stapiania elektrody, głębokości wtopienia oraz udziale materiału rodzimego w spoinie (rys. 6.3). Zbyt duże nateżenie prądu może prowadzić do przetopienia złącza na wskroś i wycieku metalu ze spoiny łącznie z zachwianiem stabilności procesu spawania,
- **napięcie łuku;** zmiana napięcia łuku pociąga za sobą zmianę długości łuku, co wpływa na ilość ciepła zużywanego na stopienie materiału rodzimego i topnika (rys. 6.4).

Zwiększenie napięcia łuku poszerza lico spoiny i zmniejsza głębokość wtopienia.



Rys. 6.3. Wpływ rodzaju, biegunowości i natężenia prądu na wydajność stapienia elektrody podczas spawania łukiem krytym



Rys. 6.4. Wpływ napięcia łuku przy spawaniu łukiem krytym na kształt spoiny i udział materiału rodzimego w spoinie  $\lambda_m$ :

$h_w$  – głębokość wtopienia  $h_n$  – wysokość nadlewu,  $b$  – szerokość lica spoiny

Zwiększenie długości łuku powoduje powiększenie przestrzeni gazowej (kawerny), a ciekły metal w jeziorce jest lepiej odgazowany; przy tym wzrasta zużycie topnika. Nadmierne zwiększenie napięcia łuku sprawia znaczne obniżenie głębokości wtopienia, łuk jarzy się niestabilnie, pojawiają się podtopienia. Przy mniejszych wartościach napięcia łuk jest bardziej stabilny (sztywny), mniej wrażliwy na ugięcie łuku, spoina jest wąska o wysokim nadlewie. Przy zbyt małym napięciu łuku mogą się pojawić przyklejenia i podtopienia, a stopiony żużel jest trudny do usunięcia,

- **prędkość spawania;** prędkość spawania jest również jednym z parametrów decydującym w istotny sposób o głębokości wtopienia i kształcie spoiny. W miarę zwiększania prędkości spawania zwiększa się w spoinie ilość materiału pochodzącego ze spawanych elementów. Przy nadmiernych prędkościach spawania spoina staje się porowata, o wąskim, nierównomiernym licu i z podtopieniami.

Przy małych prędkościach spawania występuje podpływanie pod łuk elektryczny znacznie powiększonego jeziorca ciekłego metalu hamując jego siłę dynamiczną. W tym przypadku głębokość wtopienia jest mniejsza, a spoina jest wysoka, ma duży nadlew z podwiniętymi brzegami.

- **średnica elektrody (wymiary elektrody taśmowej);** średnica drutu elektrodowego przy stałym natężeniu prądu decyduje o głębokości wtopienia. Związane jest to z gęstością prądu i tym samym energią łuku. Zmniejszenie średnicy drutu elektrodowego przy stałym natężeniu prądu powoduje zwiększenie głębokości wtopienia,
- **długość wolnego końca elektrody;** wpływa na wydajność stapiania i prędkość stapiania drutu elektrodowego,
- **grubość i szerokość warstwy topnika;** grubość i szerokość warstwy topnika decyduje o jakości spoiny. Przy zbyt dużej grubości warstwy topnika maleje objętość komory spawania, łuk jest tłumiony, gazy mają utrudnione wyjście, co prowadzi do nierównomierności lica spoiny,
- **kąt pochylenia elektrody lub złącza spawanego;** pochylenie elektrody jak i pochylenie złącza spawanego wpływa na kształt spoiny oraz głębokość wtopienia. Związane jest to z przypadkiem podpływania ciekłego metalu pod łuk jak i jego odpływanie spod łuku odsłaniając materiał rodzimy.

Spawanie elektrodą pochyłą w kierunku spawania nie wpływa istotnie na tworzenie się spoiny, jedynie nieznacznie zwiększa się wtopienie. Przy spawaniu elektrodą pochyłą w kierunku przeciwnym do kierunku spawania szerokość spoiny się zwiększa, a wtopienie zmniejsza.

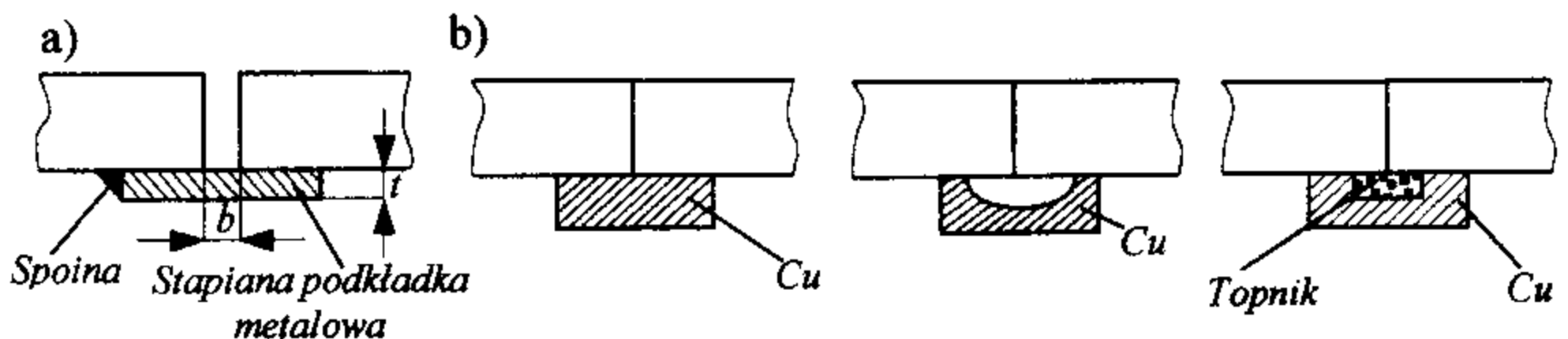
Przy spawaniu z góry na dół ciekły metal ma tendencję do podpływania pod elektrodę, co powoduje mniejsze wtopienie. Przy spawaniu z dołu do góry warstwa ciekłego metalu pod elektrodą jest cieńsza, łuk wnika głębiej w metal i wtopienie jest większe.

## 6.4.2. Techniki spawania

Elementy płaskie w zależności od grubości mogą być spawane jednostronnie lub dwustronnie, a spoiny mogą być wykonywane jednowarstwowo lub wielowarstwowo. Z uwagi, że spawanie wielowarstwowe charakteryzuje się mniejszą wydajnością w praktyce najczęściej wykorzystuje się spawanie jednowarstwowe. Przygotowanie brzegów blach dla złączy doczołowych wykonuje się wg zaleceń umieszczonych w tablicy 6.1.

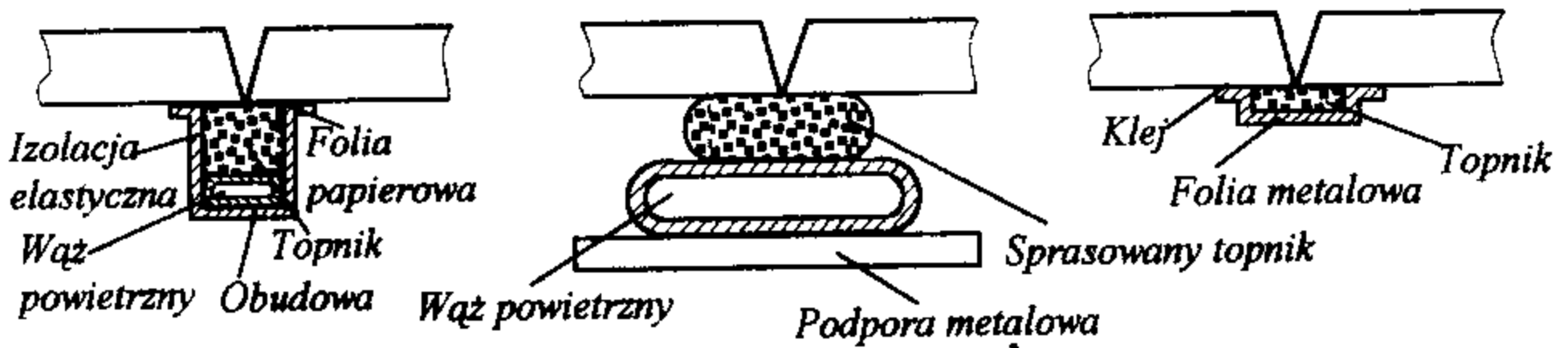
Przy spawaniu łukiem krytym ilość metalu w jeziorce spawalniczym jest znacznie większa niż przy spawaniu elektrodami otulonymi, a temperatura kąpieli metalowej jest dużo wyższa. Jest to przyczyną większej rzadkoplątności metalu i utrzymania go w stanie ciekłym przez dłuższy okres, co z kolei może powodować wyciekanie metalu ze szczeliny między dosuniętymi do siebie spawanymi elementami. Dla zapobieżenia możliwości wyciekania metalu oraz formowania grani stosuje się następujące rodzaje podkładek (rys. 6.5 i rys. 6.6):

- podkładowki metalowe stapiane,
- podkładowki miedziane,
- podkładowki ceramiczne,
- podkładowki topnikowe (z węzłem ciśnieniowym, taśmy topnikowe).



Rys. 6.5. Przykłady podkładek metalowych do formowania grani przy spawaniu jednostronnym: a) podkładka metalowa stapiana, b) przykłady podkładek miedzianych



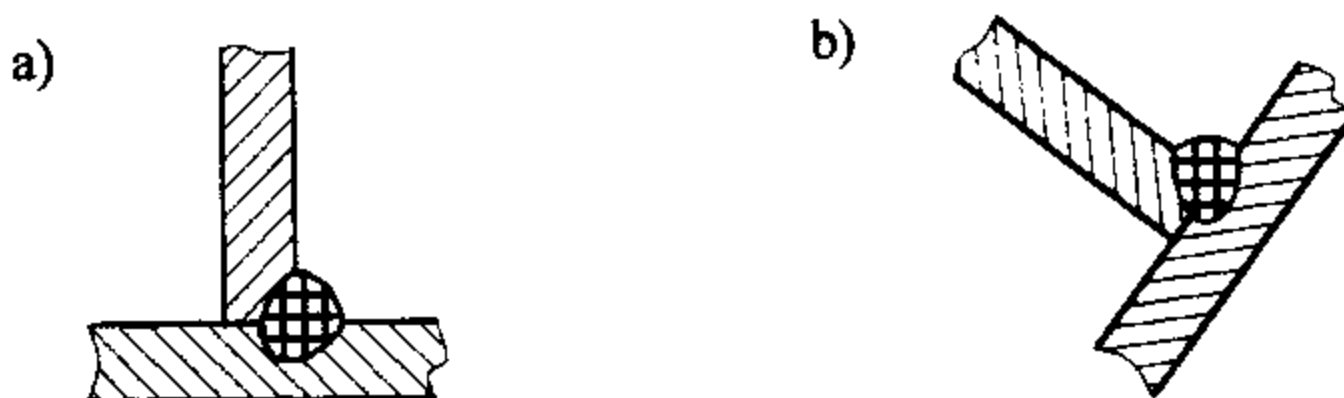


Rys. 6.6. Przykłady podkładek topnikowych do formowania grani przy spawaniu jednostronnym łukiem krytym

Podkładki miedziane formujące grań spoiny mogą być wykonywane jako pełne lub z kanałami do chłodzenia wodnego. Tego typu podkładki stosowane są najczęściej w spawaniu na zautomatyzowanych stanowiskach o dużej wydajności spawania.

Podkładki topnikowe mogą mieć różną postać, zależną od wymiarów i kształtu konstrukcji spawanej. Topnik przylegający w podkładce do obszaru graniowego jest częściowo stapiany przez ciepło łuku i ciekły metal spoiny. Dla umożliwienia dociśnięcia topnika do grani spoiny może być zastosowany wąż wypełniony sprężonym powietrzem. Oprócz ciśnieniowych podkładek topnikowych stosowane są również taśmy topnikowe, które są wykonane w postaci wyprofilowanej folii aluminiowej wypełnionej warstwą topnika połączonego lepiszczem, a po stronie przylegania - warstwą kleju zabezpieczonego taśmą papierową.

Metoda spawania łukiem krytym umożliwia spawanie w pozycji podłonej (PA), nabocznej (PB), naściennej (PC), pionowej (PF) spoin czołowych. Spoiny pachwinowe mogą być wykonywane w pozycji podłonej w położeniu przymusowym (rys. 6.7a) lub korytkowym (rys. 6.7.b).



Rys. 6.7. Przykłady wykonania spoin pachwinowych: a) przymusowe (PB), b) korytkowe (PA)

W celu podniesienia wydajności spawania łukiem krytym w zastosowaniu produkcyjnym stosuje się następujące techniki spawania:

1. Spawanie wieloelektrodowe:
  - dwie elektrody zasilane z jednego źródła prądu,
  - dwie, trzy lub cztery elektrody zasilane z oddzielnych źródeł prądu.
2. Spawanie z podawaniem dodatkowego proszku metalicznego.
3. Spawanie wąskoszczelinowe.

Spawanie wąskoszczelinowe ma szczególne zastosowanie w spawaniu elementów konstrukcyjnych o znacznych grubościach. Spawanie wąskoszczelinowe w porównaniu z konwencjonalnymi metodami spawania blach grubych charakteryzuje się następującymi zaletami:

- dużą wydajnością spawania dzięki wąskiemu rowkowi (rys. 6.8) złącza i małemu udziałowi spoiwa w złączu,
- małą energią liniową spawania, wąską strefą wpływu ciepła (SWC) i minimalnym udziałem materiału rodzimego w spoinie,
- małymi naprężeniami i odkształceniami spawalniczymi,
- dobrymi właściwościami mechanicznymi złącza.

Do spawania wąskoszczelinowego zaleca się topniki aglomerowane o możliwie największej zasadowości, wysokiej temperaturze mięknięcia i małej przewodności elektrycznej.



Rys. 6.8. Przykład rowka spawalniczego; a) przy spawaniu tradycyjnym, b) przy spawaniu wąskoszczelinowym

W spawaniu wąskoszczelinowym niezwykle ważne jest prowadzenie drutu elektrodowego w rowku spoiny. Niewłaściwe jego usytuowanie względem brzegów rowka prowadzi bowiem do powstawania wad w złączu w postaci przyklejeń oraz zażużeń. Z tego też względu urządzenia do spawania wąskoszczelinowego są wyposażone w systemy kontroli i korekcji prowadzenia druty elektrodowego.

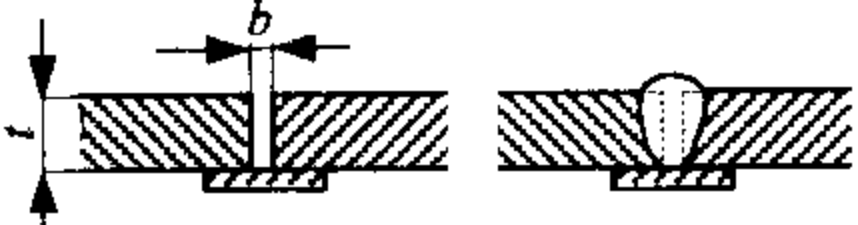
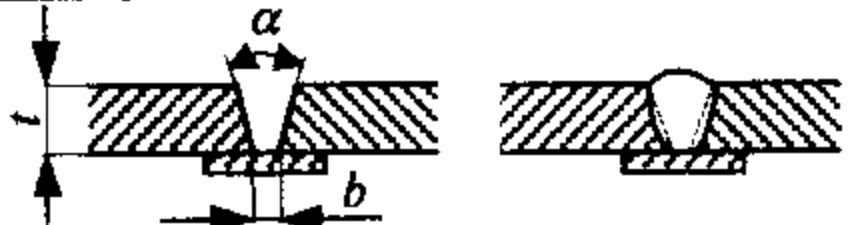
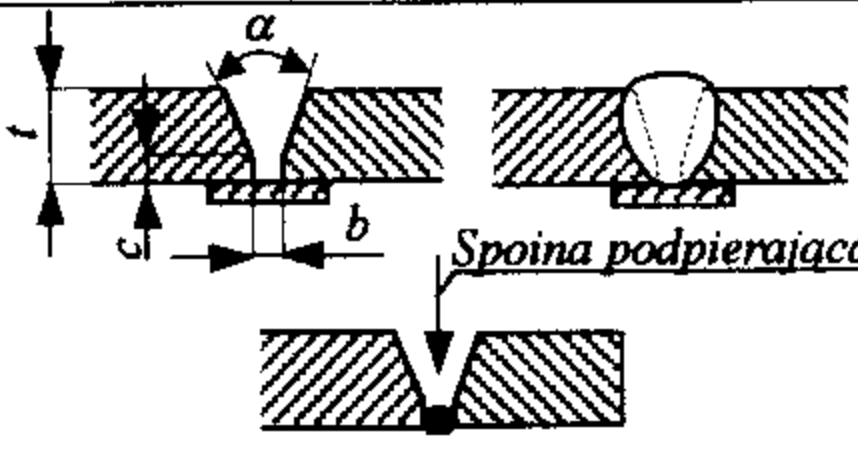
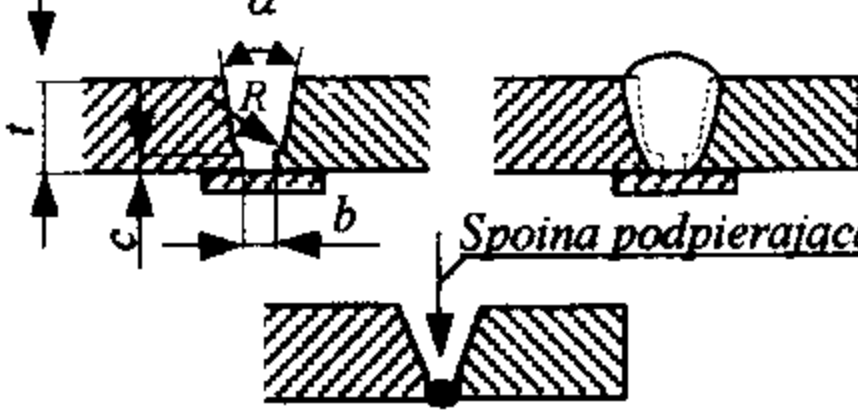
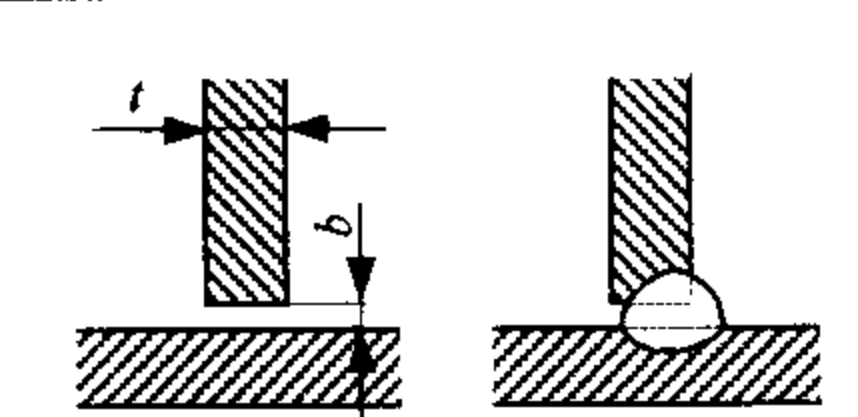
Spawanie wąskoszczelinowe łukiem krytym może być prowadzone techniką układania warstw złącza jednym, dwoma lub trzema ścięgami.

Parametry spawania wąskoszczelinowego nie różnią się w sposób zasadniczy od parametrów tradycyjnego spawania łukiem krytym.

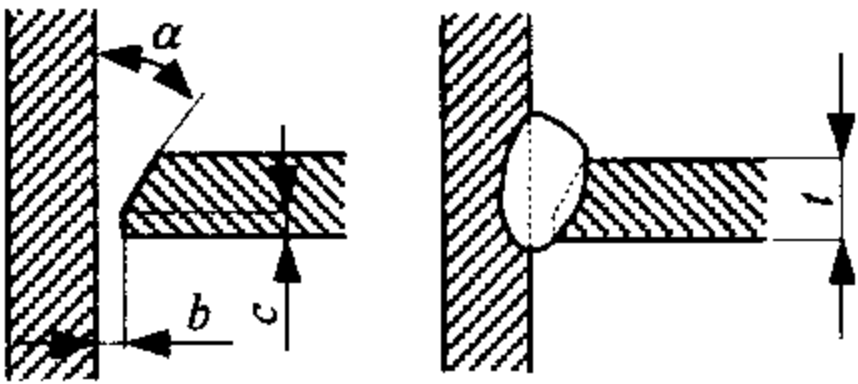
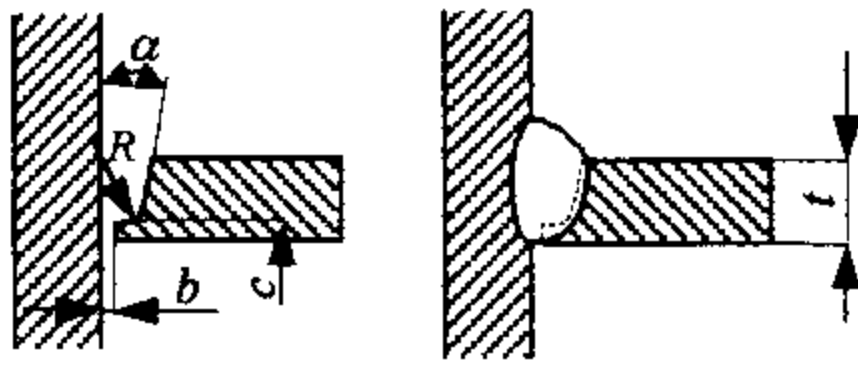
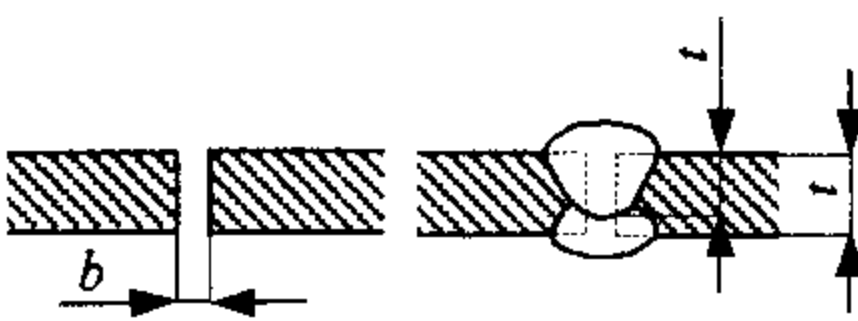
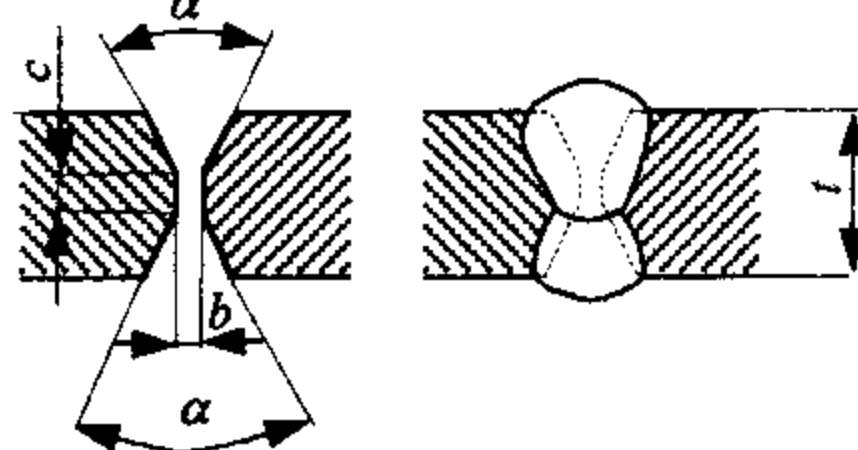
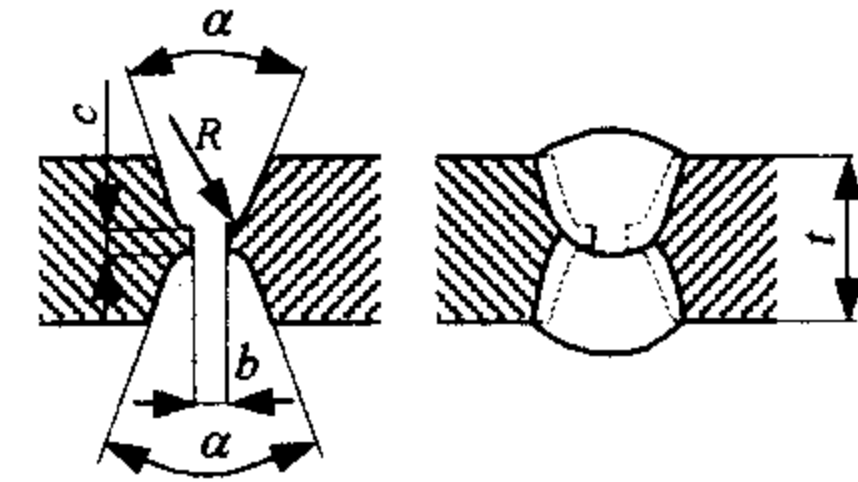
## 6.5. Przygotowanie brzegów blach do spawania łukiem krytym

Spawanie łukiem krytym wymaga odpowiedniego przygotowania brzegów spawanego materiału. Wymiary rowka spoiny mają decydujący wpływ na kształt nadlewu lica, możliwość wycieku spoiwa z rowka spawalniczego oraz fizykochemiczne właściwości spoiny. Najczęściej stosowane rowki spoiny przedstawia tablica 6.1.

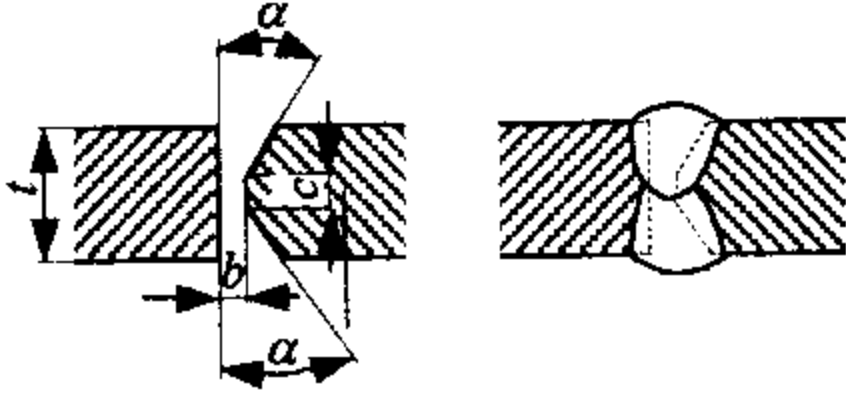
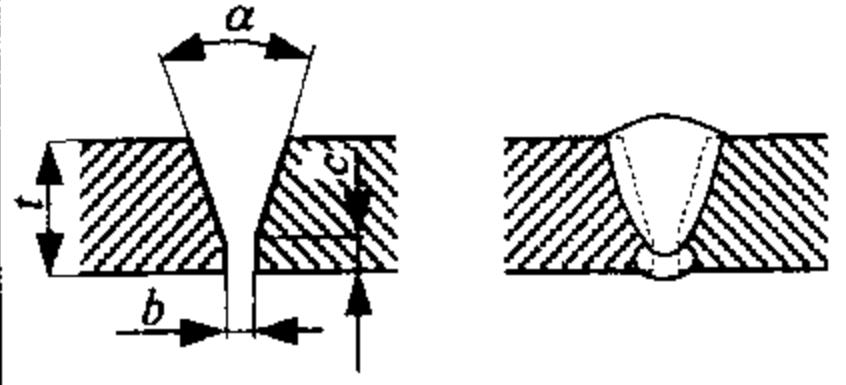
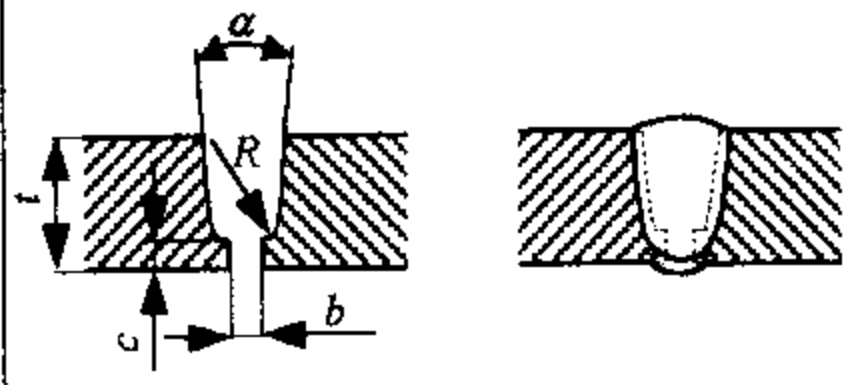
Tablica 6.1. Wymiary najczęściej stosowanych rowków przy spawaniu łukiem krytym

Nazwa spoiny	Przekrój złączy przed i po spawaniu	Wymiary				
		$t$	$b$	$c$	$R$	$\alpha$
		mm				
Spoina I		2 ÷ 12 6 ÷ 15	0 ÷ 1 2 ÷ 5	- -	- -	- -
Spoina V		4 ÷ 20 20 ÷ 50	2 ÷ 4 4 ÷ 16	-	-	30 ÷ 50 20 ÷ 35
Spoina Y		0 ÷ 30	2 ÷ 4	2 ÷ 6	-	50 ÷ 70
Spoina U		30 ÷ 60	0 ÷ 3	3 ÷ 5	5 ÷ 8	20 ÷ 30
Spoina L		3 ÷ 5 > 5	0 ÷ 1 0 ÷ 1,5	- -	- -	- -

Ciąg dalszy tab. 6.1

Nazwa spoiny	Przekrój złączy przed i po spawaniu	Wymiary				
		<i>t</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i>	$\alpha$ (°)
		mm				
Spoina $\frac{1}{2}Y$		5 ÷ 20	0 ÷ 2	2 ÷ 4	-	45 ÷ 50
Spoina J		> 20	0 ÷ 1	3 ÷ 5	10 ÷ 12	10 ÷ 20
Spoina 2I		4 ÷ 12 4 ÷ 16 6 ÷ 22 >22÷30 >30÷40 >40÷50	2 ÷ 3 0 ÷ 1,5 2 ÷ 4 5 ÷ 7 7 ÷ 9 9 ÷ 11	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -
Spoina X		14 ÷ 50	0 ÷ 1	5 ÷ 10	-	50 ÷ 60
Spoina 2U		> 30	0 ÷ 1	5 ÷ 10	5 ÷ 8	20 ÷ 30

Ciąg dalszy tab. 6.1

Nazwa spoiny	Przekrój złączy przed i po spawaniu	Wymiary				
		$t$	$b$	$c$	$R$	$\alpha$
		mm				
Spoina K		> 10	0 ÷ 1	3 ÷ 10	-	50 ÷ 60
Spoina Y		12 ÷ 30 12 ÷ 30	0 ÷ 1 2 ÷ 4	5 ÷ 12 2 ÷ 4	- -	50 ÷ 60 50 ÷ 60
Spoina U		> 30 > 30	0 ÷ 1 2 ÷ 4	5 ÷ 12 2 ÷ 4	5 ÷ 9 5 ÷ 9	20 ÷ 24 20 ÷ 24

## **6.6. Część praktyczna**

### **6.6.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe:**

- stanowisko do spawania łukiem krytym,
- drut elektrodowy do spawania stali niskowęglowej,
- topnik,
- odcinki blach ze stali niskowęglowej o grubości 5mm i 14 mm,
- spoinomierz,
- suwmiarka,
- sprzęt ochrony osobistej spawacza,
- instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

### **6.6.2. Przebieg ćwiczenia**

Zakres niniejszego ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się szczegółowe z instrukcją stanowiskową spawania łukiem krytym oraz przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie ćwiczących z gatunkami drutów elektrodowych i topników oraz ich doбором do spawania stali,
- zapoznanie ćwiczących z przygotowaniem materiałów do spawania łukiem krytym,
- poznanie zasad doboru parametrów spawania,
- próby spawania złączy przy różnych parametrach prądowych i różnej prędkości,
- ocena uzyskanych spoin, pomiary kształtu zewnętrznego spoin,
- dyskusja i podsumowanie wyników niezbędnych ćwiczenia do opracowania sprawozdania z przebiegu ćwiczenia.

## 6.7. Literatura

1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o o. Katowice 1996.
3. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.
4. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan- Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Politechnika Koszalińska 2000.

## 7. SPAWANIE SKONCENTROWANĄ WIĄZKĄ ENERGII

### 7.1. Spawanie plazmowe - PAW

#### 7.1.1. Istota metody

Spawanie plazmowe PAW (Plasma Arc Welding) jest procesem łączenia metali i ich stopów, w którym trwałe połączenie uzyskuje się dzięki stapianiu brzegów łączonych materiałów i materiału dodatkowego ciepłem łuku plazmowego. Plazmę stanowi strumień silnie zjonizowanego gazu wypływającego z dyszy palnika. Duża koncentracja wolnych elektronów, jonów i pojedynczych atomów zjonizowanego gazu prowadzi do zjawiska rekombinacji, w wyniku czego powstają neutralne atomy oddające energię w postaci ciepła.

Spawanie plazmowe ze względu na budowę urządzeń dzieli się na spawanie mikroplazmowe (0,1 ÷ 20 A), stosowane do łączenia cienkich materiałów o grubości do 1,5 mm oraz spawanie plazmowe (powyżej 20 A) do łączenia materiałów powyżej 1,5 mm grubości.

Spawanie plazmowe stosuje się głównie do spawania stali wysokostopowych (kwaso- i żaroodpornych), stopów metali nieżelaznych (z wyjątkiem aluminium i jego stopów), stopów niklu, tytanu, molibdenu oraz wolframu.

#### 7.1.2. Palniki plazmowe

Spawanie plazmowe może być prowadzone przy użyciu elektrody nietopliwej – GTA (rys. 7.1) i elektrody topliwej – GMA (rys. 7.2). Podstawowym źródłem ciepła do zjonizowania gazu jest łuk elektryczny jarzący się pomiędzy elektrodą (katodą) palnika i materiałem spawanym (anodą). Łuk plazmowy jest stabilizowany i koncentrowany w dyszy palnika, najczęściej wykonanej z miedzi. Podstawowym zadaniem dyszy palnika jest zawężenie wyładowania łuku elektrycznego i tym samym skoncentrowanie jego energii na niewielkiej powierzchni. Zjawisko to prowadzi do dalszego wzrostu temperatury plazmy i przewodności elektrycznej (wzrost gęstości przewodzonego prądu), a dzięki temu do zawężenia obszaru magnetycznego (ang. pinch effect) wokół łuku plazmowego.

Gaz plazmowy w procesie spawania spełnia także inne następujące funkcje:

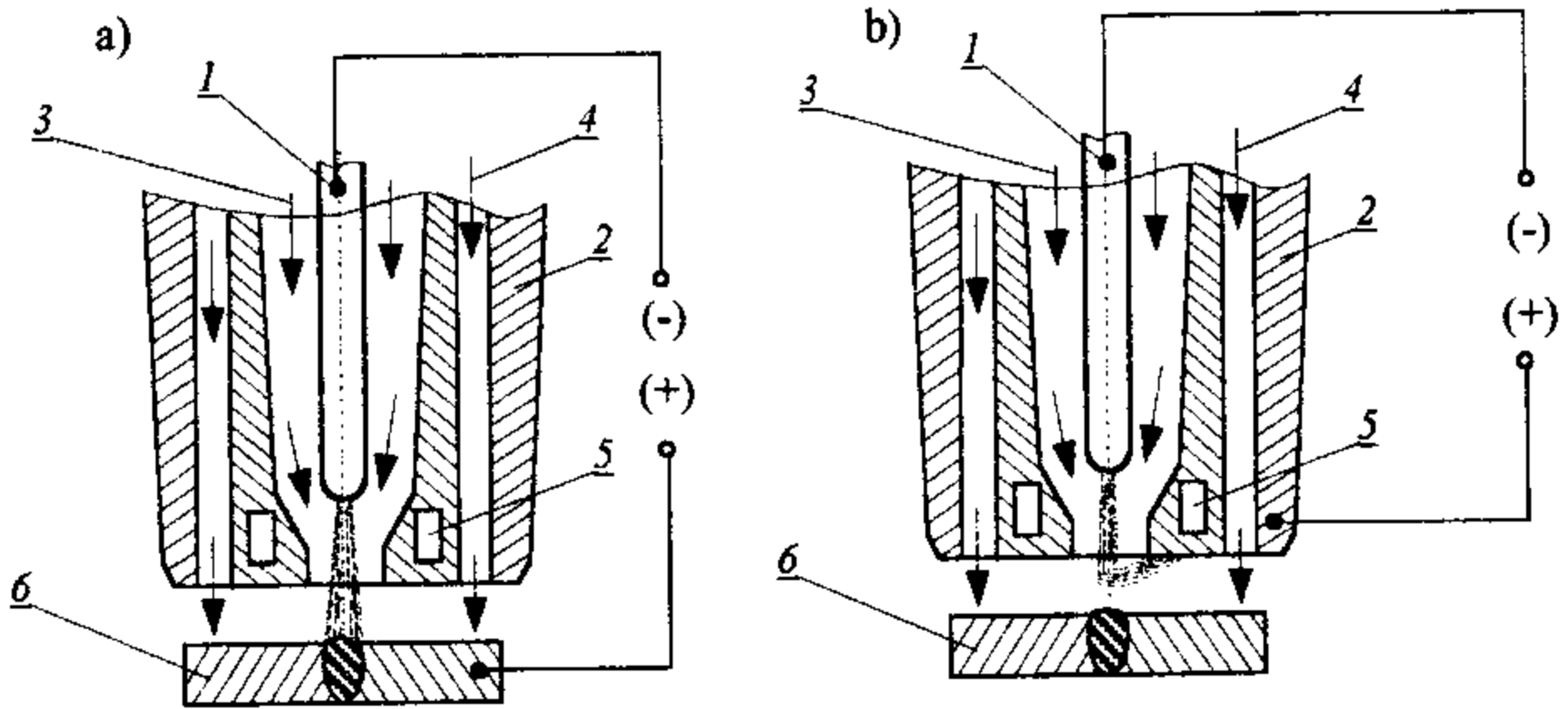
- chroni katodę przed utlenianiem,
- stabilizuje łuk zabezpieczając palnik przed zniszczeniem,



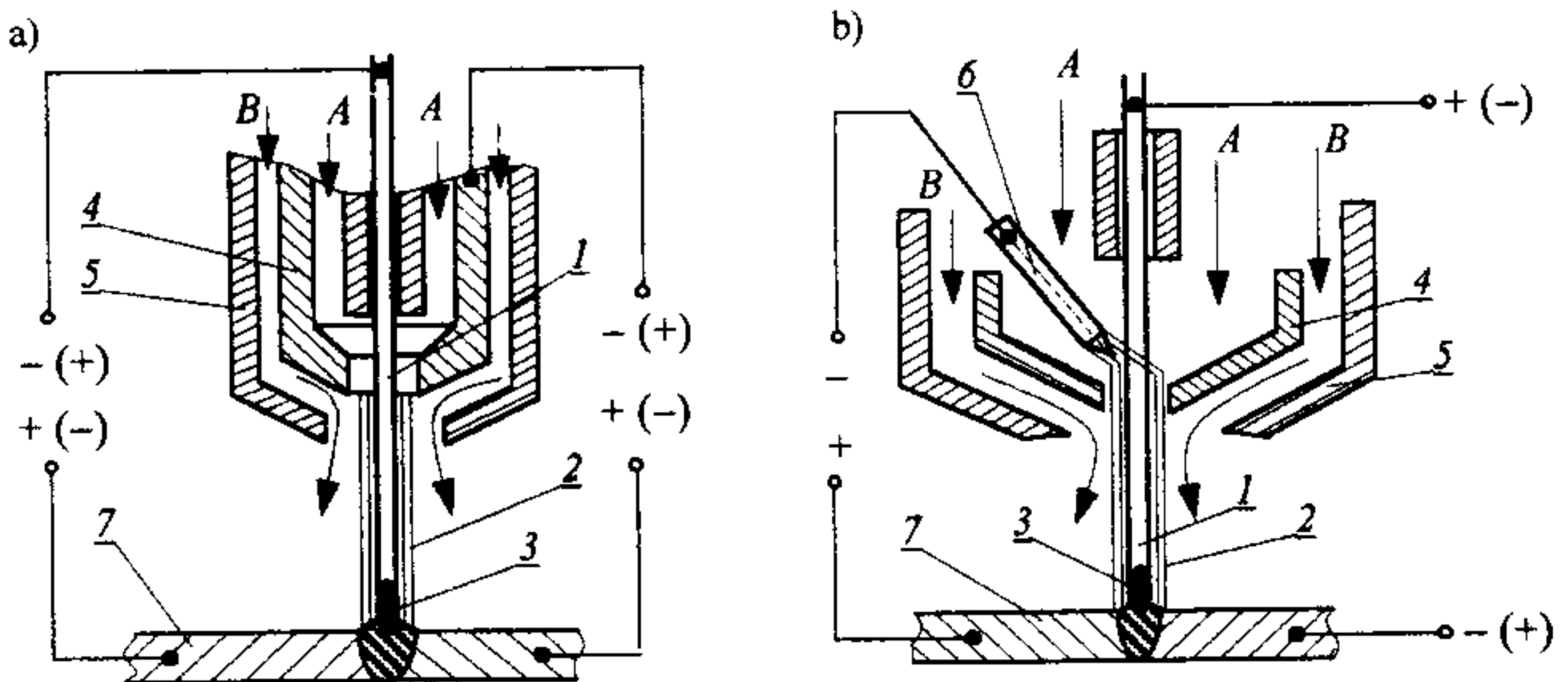
- tworzy osłonę anodowej części łuku.

Głównymi zaletami spawania plazmowego jest:

- łatwość regulacji mocy łuku plazmowego oraz parametrów gazowo-dynamicznych,
- niezależność kształtu łuku od zmiany odległości palnika od spawanego materiału,
- bardzo duża stabilność kierunkowa łuku plazmowego.



Rys. 7.1. Schemat budowy palnika do spawania plazmowego GTA: a) palnik z łukiem zależnym, b) palnik z łukiem niezależnym; 1 – elektroda wolframowa, 2 – dysza plazmowa, 3 – gaz plazmotwórczy, 4 – gaz osłonowy, 5 – chłodzenie wodne dyszy, 6 – materiał spawany



Rys. 7.2. Schemat palnika plazmowego GMA: a) z dyszą plazmową stanowiącą elektrodę łuku plazmowego, b) z elektrodą nietopliwą wolframową: 1 – drut spawalniczy, 2 – łuk plazmowy, 3 – łuk GMA, 4 – dysza plazmowa, 5 – dysza gazu ochronnego, 6 – elektroda wolframowa nietopliwa, 7 – materiał spawany, A – gaz plazmowy, B – gaz osłonowy

### 7.1.3. Spawanie plazmowe - GTA

Spawanie plazmowe GTA polega na stapianiu brzegów łączonych materiałów za pomocą zawężonego łuku plazmowego jarzącego się między elektrodą nietopliwą a materiałem spawanym. Spawanie może być prowadzone prądem przemiennym (AC) lub prądem stałym (DC) o opadającej charakterystyce statycznej źródła zasilania łuku plazmowego. Spawanie może być prowadzone łukiem o stałej wartości prądu lub prądem pulsującym o biegunowości ujemnej.

Podczas spawania plazmowego GTA z łukiem zależnym przedmiot spawany stanowi część obwodu elektrycznego, a łuk plazmowy przemieszcza się od nietopliwej elektrody do przedmiotu. Ciepło spawania jest wytwarzane na przedmiocie z płamki anodowej łuku elektrycznego oraz ze strumienia plazmy (rys. 7.1a).

Przy spawaniu plazmowym z łukiem niezależnym obwód elektryczny zamyka się wewnątrz palnika, tj. łuk jarzy się między elektrodą nietopliwą, a miedzianą dyszą zawężającą (rys. 7.1b). W tym przypadku ciepło spawania jest uzyskiwane wyłącznie z gorącego gazu plazmowego wypływającego z dyszy na zewnątrz palnika. Ten sposób spawania znajduje zastosowanie do spawania materiałów nie przewodzących prądu elektrycznego.

Urządzenia do spawania plazmowego posiadają zwykle w jednej obudowie wszystkie zespoły do zasilania i sterowania, zespoły instalacji wody chłodzącej palnik oraz zespoły instalacji gazu plazmowego i osłonowego. Do zespołów zasilania i sterowania należą: źródło zasilania łuku pomocniczego, jonizator, układ załączania i kontroli przepływu wody chłodzącej oraz przepływu gazów.

Zasilacz pomocniczy służy do zasilania łuku pomocniczego jarzącego się wewnątrz palnika ułatwiającego zajarzanie łuku plazmowego pomiędzy elektrodą, a spawanym materiałem.

Spawanie plazmowe GTA charakteryzuje się następującymi zaletami:

- możliwością regulacji prędkości i kształtu strumienia plazmy,
- dużą prędkością spawania,
- wąskim ścięciem o dużej głębokości przetopienia,
- mniejszymi odkształceniami i naprężeniami spawalniczymi,
- większą entalpią łuku,
- większą koncentracją energii liniowej i większą sprawnością łuku.

Dzięki specyficznym cechom łuku plazmowego, spawanie to ma zastosowanie dla materiałów o grubości od 0,025 mm do ok. 50 mm. Spawane mogą być praktycznie wszystkie metale jak i ich stopy. Szczególnie dobre wyniki spawania uzyskuje się przy spawaniu stali węglowych, niskostopowych,

wysokostopowych, stali austenitycznych, miedzi i jej stopów, niklu i stopów niklu, stopów kobaltu i tytanu. Szczególnie szerokie zastosowanie posiada spawanie mikroplazmowe elementów o grubości od 0,025 mm do 1,5 mm.

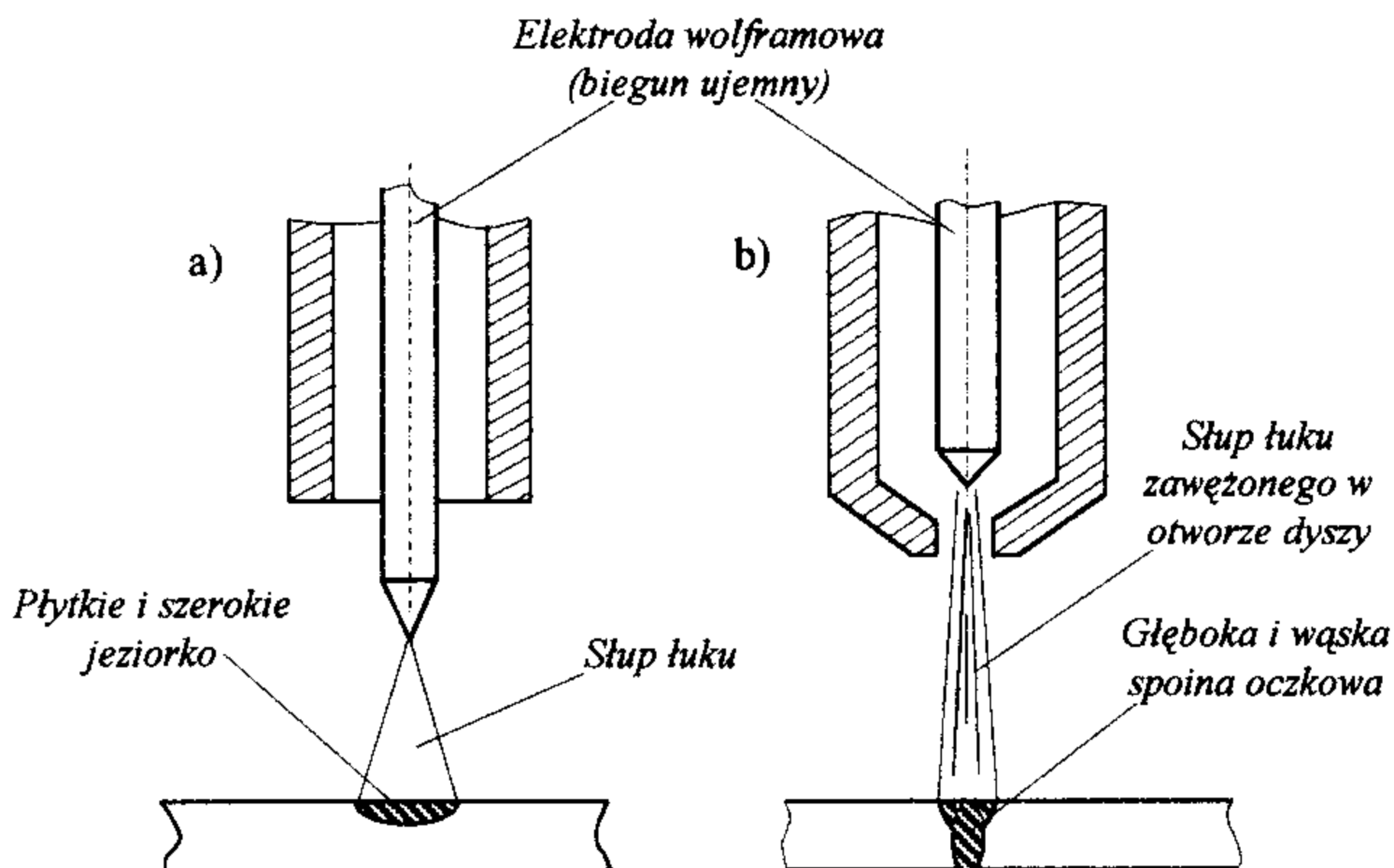
Do podstawowych parametrów spawania plazmowego GTA zalicza się:

1. **Natężenie prądu** – zwiększenie natężenia prądu powoduje zwiększenie stopnia jonizacji gazu plazmowego oraz zwiększenie energii liniowej łuku. Tym samym zwiększa się głębokość przetopienia, szerokość spoiny od strony lica i od strony grani oraz wydajność i prędkość spawania. Wpływ natężenia prądu na jakość spoiny jest uzależniony od prędkości spawania, rodzaju i natężenia przepływu gazu plazmowego.
2. **Napięcie łuku i odległość dyszy od spawanego przedmiotu** – uzależnione są od natężenia prądu i rodzaju ilości gazu plazmowego. Łuk plazmowy wychodzący z palnika plazmowego ma zasadniczo postać kolumnową o stosunkowo dużej długości. Stąd obszar jak i intensywność wydzielania ciepła na przedmiocie spawanym jest stała przy zmianach odległości dyszy w granicach  $\pm 1,5 \div 2,0$  mm. Jest to wielka zaleta przy spawaniu ręcznym lub zmechanizowanym, eliminująca budowę dodatkowych układów regulacji długości łuku.
3. **Prędkość spawania** – ustalana jest w zależności od wymaganej energii liniowej spawania, rodzaju i kształtu złącza oraz techniki spawania. Na przykład ze wzrostem natężenia prądu, przy danej grubości złącza należy zwiększyć prędkość spawania.
4. **Rodzaj i natężenie przepływu gazu plazmowego i ochronnego** – dobór gazu plazmowego i ochronnego jest uzależniony od jego entalpii i przewodności cieplnej oraz oddziaływania chemicznego na spawany materiał. Gaz plazmowy musi być obojętny chemicznie względem elektrody nietopliwej ze względu na jej trwałość. Podstawowym gazem plazmowym jest argon oraz mieszaniny:  $Ar + He$ ,  $Ar + H_2$ . Jako gaz osłonowy stosuje się:  $Ar$ ,  $He$ ,  $Ar + He$ ,  $Ar + H_2$ ,  $Ar + N_2$  (wg PN - EN 439). Zawężające oddziaływanie gazu osłonowego na łuk plazmowy jak i możliwość regulacji w szerokim zakresie kształtu łuku, wymaga dokładnego doboru natężenia przepływu gazu plazmowego i osłonowego.
5. **Rodzaj i średnica elektrody wolframowej** – elektrody nietopliwe do spawania plazmowego GTA najczęściej wykonane są z wolframu z dodatkiem tlenków, któregoś z pierwiastków o małej mocy wyjścia elektronu, np. 0,2 ÷ 3% tlenków  $ThO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $LaO_3$ ,  $Y_2O_3$ .
6. **Kształt i wymiary dyszy plazmowej**. Główną częścią palnika plazmowego jest dysza, której podstawowymi wymiarami są: średnica i wysokość otworu zawężającego. Dysza palnika zawęża mechanicznie łuk plazmowy i przez to zwiększa ilość wydzielającego się w nim ciepła.

### 7.1.4. Technologia i technika spawania plazmowego GTA

Spawanie plazmowe GTA może być wykonywane dwoma technikami:

- z jeziorkiem spoiny (rys. 7.3a),
- z pełnym przetopieniem materiału, z tzw. oczkiem kontrolnym (rys. 7.3b).



Rys. 7.3. Schemat technik spawania: a) z jeziorkiem spoiny, b) z oczkiem kontrolnym

Techniką spawania „z jeziorkiem spoiny” mogą być wykonywane złącza doczołowe, teowe, kątowe, krzyżowe, zakładkowe, nakładkowe i przylgowe w pozycji podolnej oraz w pozycjach przymusowych z zastosowaniem prądu pulsującego.

Technika spawania „z oczkiem kontrolnym” ma zastosowanie wyłącznie do wykonywania za jednym przejściem połączeń ze spoinami czołowymi, a głównie złączy doczołowych o grubości 1,5 ÷ 15 mm, w zależności od rodzaju spawanego materiału.

W obu wymienionych technikach może być stosowany prąd stały (DC) z biegunowością ujemną lub prąd przemienny (AC), zasilający łuk plazmowy w sposób ciągły, pulsujący lub modulowany.

### 7.1.5. Spawanie plazmowe GMA

Spawanie plazmowe GMA jest połączeniem cech spawania plazmowego GTA i spawania elektrodą topliwą GMA. Istota spawania plazmowego GMA polega na tym, że drut spawalniczy podawany jest w sposób ciągły do jeziora spoiny, a łuk elektryczny jarzący się między końcem drutu a przedmiotem spawanym jest otoczony zjonizowanym cieplnie gazem – plazmą.

Łuk elektryczny jest zajarzany prądem o dużej częstotliwości, między spawanym przedmiotem, a nietopliwą elektrodą wolframową.

Gazem plazmowym może być: *Ar*, *He* lub ich mieszaniny. Gazem osłonowym w zależności o rodzaju spawanego metalu, może być: *Ar*, *He* lub ich mieszaniny, a w przypadku spawania stali węglowych i wysokostopowych mieszanki aktywne *Ar + CO<sub>2</sub>*.

## 7.2. Spawanie elektronowe

### 7.2.1. Istota spawania elektronowego

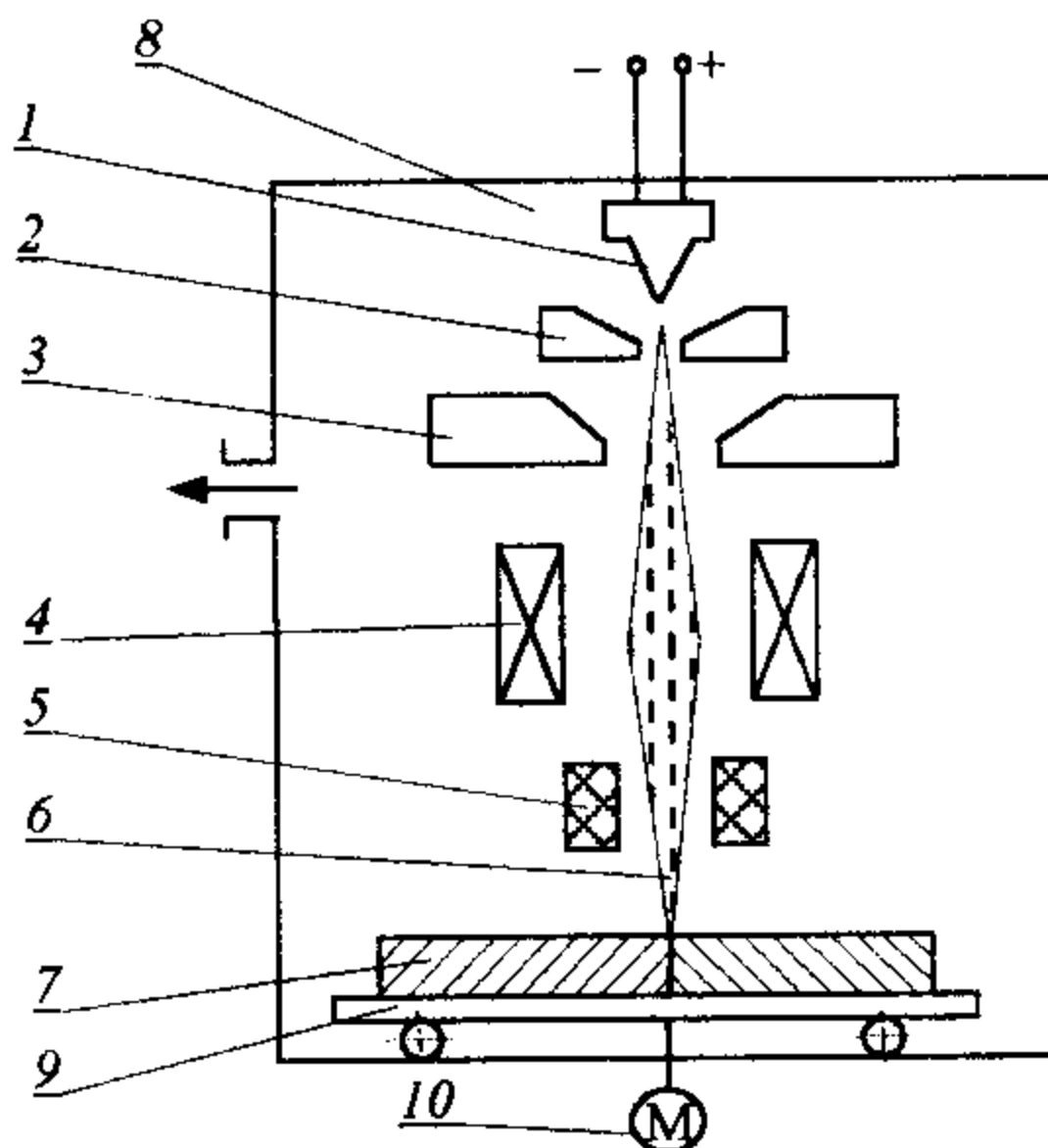
Spawanie elektronowe polega na nagraniu i stopieniu powierzchni styku spawanego materiału strumieniem lub wiązką elektronów (rys. 7.4). Elektroda wolframowa umieszczona w próżni pod wpływem działania energii elektrycznej (5 ÷ 200 kV) nagrzewa się do wysokiej temperatury i staje się jednocześnie źródłem emisji elektronów. Rozpędzone elektrony są doprowadzane do miejsca spawania w postaci stożkowej wiązki o wierzchołku skierowanym w stronę spawanego materiału. Bombardowanie obszaru spawania wiązką elektronów powoduje zamianę energii kinetycznej elektronów na energię cieplną absorbowaną przez spawany przedmiot i stapiającą spawany obszar.

Wiązka elektronowa stosowana jako źródło ciepła do spawania charakteryzuje się następującymi zaletami:

- bardzo dużą koncentracją mocy,
- dużą łatwością zmiany koncentracji mocy,
- łatwością precyzyjnego sterowania wiązką w miejscu topienia,
- łatwością sterowania głębokością spawania,
- umożliwia wykonanie spoiny w warunkach bardzo dużej czystości, przy braku atmosfery aktywnej,
- minimalną strefą wpływu ciepła (SWC),
- nieznacznymi odkształceniami spawalniczymi,
- możliwością spawania metali o różnych właściwościach fizykochemicznych.

Spawanie elektronowe stosuje się do łączenia metali aktywnych chemicznie i trudno topliwych, jak wolfram (*W*), tytan (*Ti*), tantal (*Ta*), niob (*Nb*), cyrkon (*Zr*), molibden (*Mo*), stale wysokostopowe, aluminium, nikiel i stopy tych metali. Grubość łączonych części może wynosić  $0,3 \div 25$  mm.

Główne kierunki zastosowania spawania elektronowego to: energetyka jądrowa, przemysł elektroniczny i urządzenia napędów rakietowych. Dzięki dużej koncentracji i ogniskowaniu energii cieplnej spawanie przebiega bardzo szybko, a powstałe spoiny są wąskie, nieosiągalne innymi metodami.

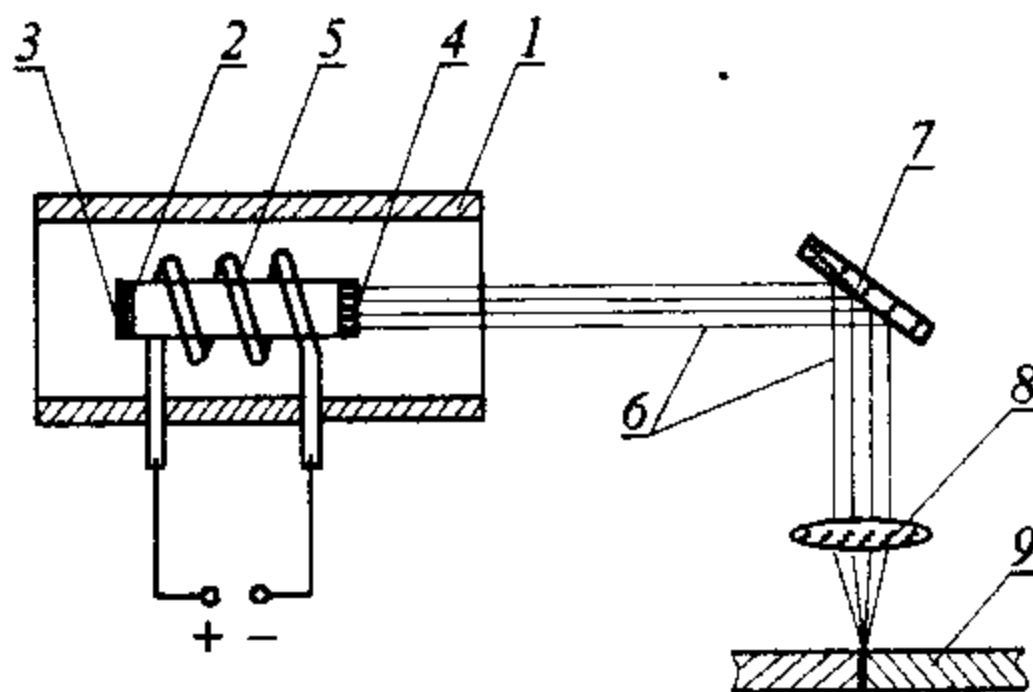


Rys. 7.4. Schemat procesu spawania elektronowego: 1 – katoda, 2 – elektroda sterująca, 3 – anoda, 4 – cewka skupiająca, 5 – cewka magnetyczna ogniskująca wiązkę elektronów, 6 – wiązka elektronowa, 7 – materiał spawany, 8 – komora próżniowa, 9 – manipulator, 10 – napęd manipulatora

### 7.3. Spawanie laserowe

Najnowszym odkrytym nośnikiem energii wykorzystywanej do spawania i cięcia metali oraz tworzyw sztucznych jest promień laserowy. Nazwa *laser* jest skrótem złożonym z pierwszych liter słów od nazwy w języku angielskim zjawiska tworzenia koherentnego promieniowania elektromagnetycznego „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”.

Działanie lasera polega na emitowaniu silnej wiązki równoległych, elektromagnetycznych promieni monochromatycznych o bardzo małej średnicy. Schematy budowy laserów przedstawiono na rys. 7.5 (laser na ciele stałym) oraz rys. 7.6 (laser gazowy).

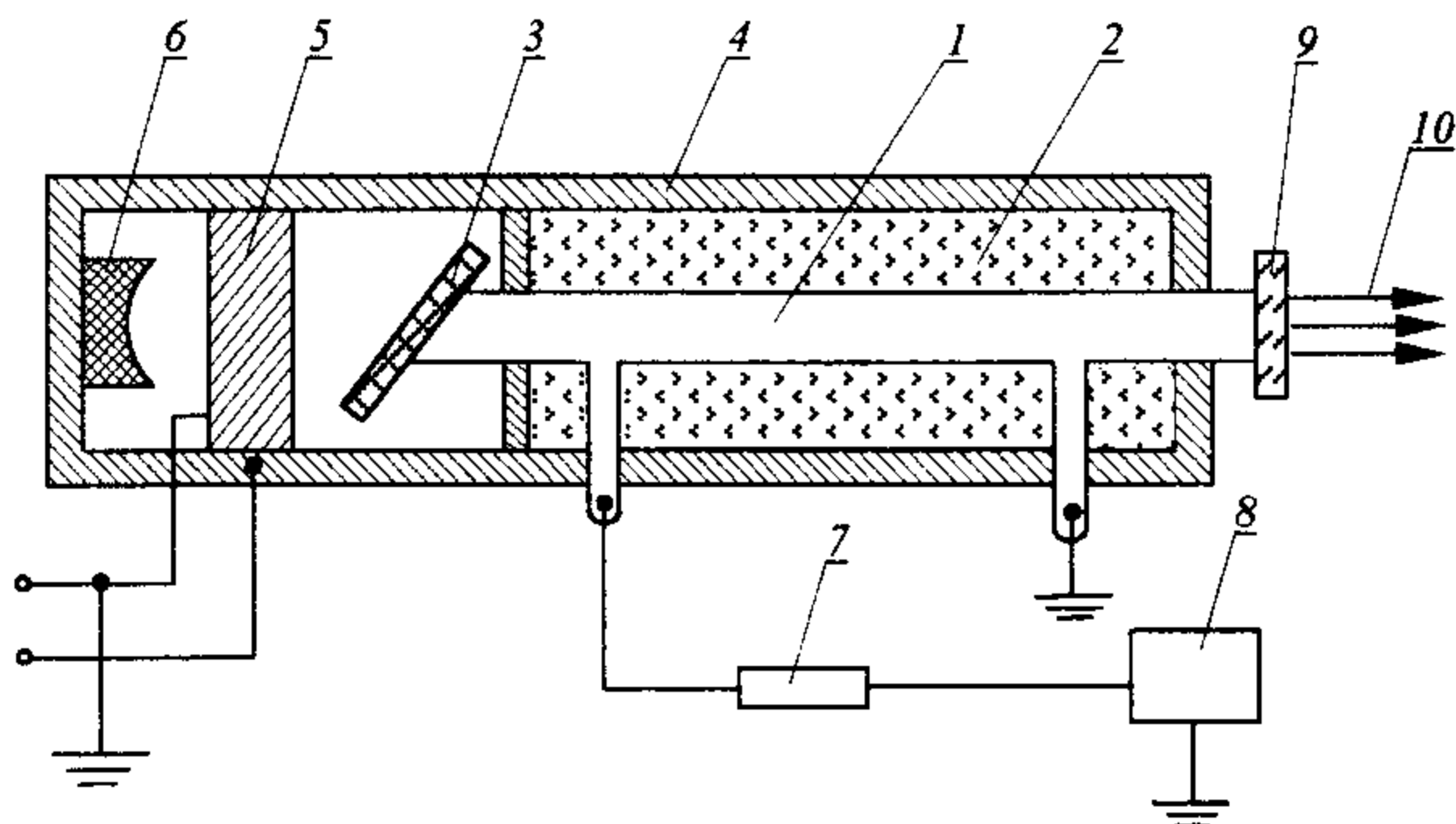


Rys. 7.5. Schemat budowy przykładowego urządzenia do spawania laserowego laserem stałym; 1 – reflektor, 2 – pręt laserowy, 3 – zwierciadło nieprzepuszczalne, 4 – zwierciadło częściowo przepuszczalne, 5 – lampa błyskowa pompująca, 6 – wiązka laserowa, 7 – zwierciadło kierujące, 8 – ogniskujący układ optyczny, 9 – spawany przedmiot

Proces spawania laserowego polega na stapianiu obszaru styku łączonych elementów ciepłem otrzymanym w wyniku doprowadzenia do tego obszaru skoncentrowanej wiązki światła koherentnego, o bardzo dużej gęstości mocy wynoszącej ok.  $10^2 \div 10^{11}$  W/mm<sup>2</sup>.

Spawanie laserowe z wielu względów przypomina spawanie wiązką elektronów. Padanie wiązki laserowej na powierzchnię przedmiotu wywołuje ciepło powodujące powstawanie jeziora spawalniczego. Spawanie może odbywać się „z jeziorkiem spoiny” lub z pełnym przetopieniem, tzw. „oczkiem kontrolnym” oraz z udziałem materiału dodatkowego (drutem zimnym lub gorącym). Bardzo duże gęstości mocy wiązki laserowej pozwalają na minimalizację energii wymaganej do stopienia materiału, uzyskanie bardzo małej strefy SWC jak i minimalnych odkształceń spawalniczych.

Wiązka promieni laserowych z łatwością przechodzi przez powietrze. Jest to oczywista zaleta spawania laserem, ale spoina jest narażona na zanieczyszczenia atmosferyczne. Dlatego też ciekły metal jeziora spawalniczego musi być chroniony za pomocą osłony gazu obojętnego (argonu lub helu), podobnie jak przy spawaniu metodą TIG.



Rys. 7.6. Schemat budowy przykładowego lasera gazowego; 1 – rura gazowa wypełniona mieszanką  $CO_2 + N_2 + He$ , 2 – woda chłodząca, 3 – okienko Brewstera wykonane z  $GaAs$ , 4 – obudowa, 5 – przetwornik regulujący długość fali wiązki laserowej, 6 – zwierciadło nieprzepuszczalne o promieniu krzywizny 3 m, 7 – oporność balastowa, 8 – źródło zasilania wysokim napięciem, 9 – zwierciadło częściowo przepuszczalne, 10 – wiązka laserowa

Spawanie laserowe znajduje zastosowanie do łączenia następujących metali i ich stopów: stali węglowych, niskostopowych, wysokostopowych, niklu i stopów niklu, kobaltu, tytanu i stopów tytanu oraz pozostałych metali trudno topliwych. Złącza wykonane metodą spawania laserowego charakteryzują się najwyższymi właściwościami w porównaniu do innych spawalniczych metod łączenia. Ponadto nie ma ograniczeń metalurgicznych, jeśli chodzi o spawanie stali nieuspokojonych, staliw, materiałów porowatych, spieków itp. Łączyć można ze sobą metale nawet znacznie różniące się właściwościami fizycznymi pod warunkiem, że w spoinie nie powstaną kruche związki międzymetaliczne. Nie ma również trudności w spawaniu metali i ich stopów o różnych właściwościach elektrycznych. Spawanie laserowe umożliwia również wykonywanie spoin z wykorzystaniem światłowodów w niedostępnych miejscach konstrukcji spawanych.



## **7.4. Część praktyczna**

### **7.4.1. Wyposażenie aparaturowo - materiałowe**

- a) stanowisko do spawania plazmowego:
- mikrospawarka plazmowa,
  - butle z argonem i reduktorami,
  - próbki ze stali kwasoodpornej o grubości 0,5 mm,
  - próbki z stali niskowęglowej o grubości 0,5 mm,
  - sprzęt pomocniczy i ochronny,
  - instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

### **7.4.2. Przebieg ćwiczenia**

Zakres niniejszego ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją stanowiskową spawania plazmowego oraz przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie ćwiczących z budową palnika plazmowego,
- zapoznanie ćwiczących z techniką spawania plazmowego,
- próby spawania plazmowego,
- dyskusja i podsumowanie wyników niezbędnych do opracowania sprawozdania z przebiegu ćwiczenia.

## **7.5. Literatura**

1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o.o. Katowice 1996.
1. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.
2. Karpiński S., Lorbiecki P., Radwan – Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza – spawanie. Politechnika Koszalińska 2000.

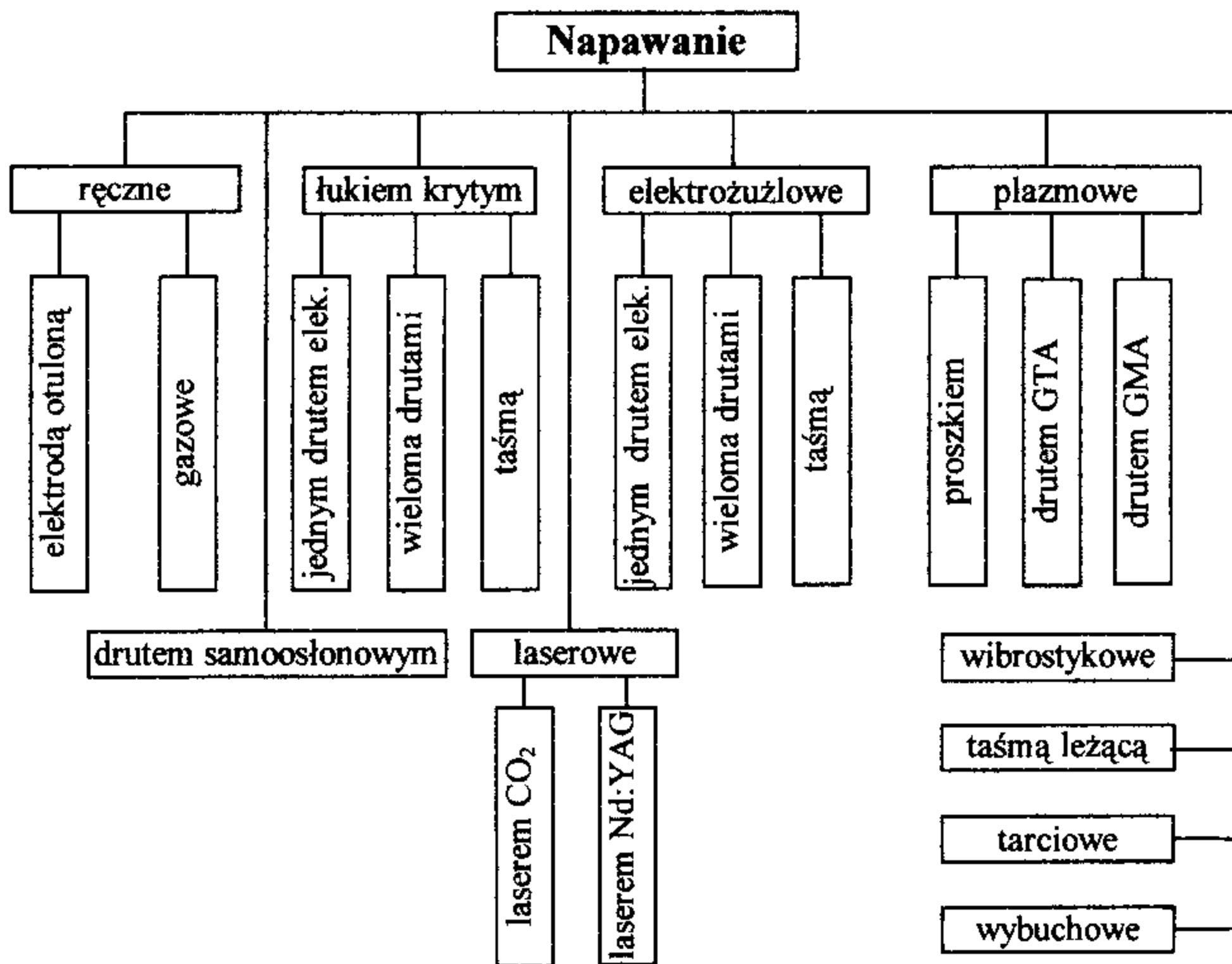
## 8. NAPAWANIE

### 8.1. Istota procesu i rodzaje napawania

Jak wiadomo części maszyn i narzędzia ulegają zużyciu spowodowanemu wieloma czynnikami takimi jak np.: tarcie, odkształceniem, erozją, kawitacją, oddziaływaniem temperatury itp. Jedną z metod uszlachetniania powierzchni roboczych części maszyn i narzędzi w kierunku podniesienia jej odporności na zużycie jest napawanie materiałem o wyższych właściwościach użytkowych. Innym zastosowaniem napawania jest regeneracja, czyli przywrócenie poprzednich właściwości użytkowych.

Napawanie polega na nakładaniu na powierzchnię napawanego przedmiotu warstwy stopionego materiału dodatkowego przy jednoczesnym topieniu podłoża. Możliwość napawania jest uzależniona od właściwości materiału, określonej pojęciem spawalności (metalurgicznej, technologicznej, konstrukcyjnej) oraz od rzeczywistego stanu powierzchni napawanego przedmiotu.

Klasyfikację metod napawania i ich odmian przedstawiono na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Klasyfikacja podstawowych metod napawania i ich odmian

## 8.2. Napawanie gazowe

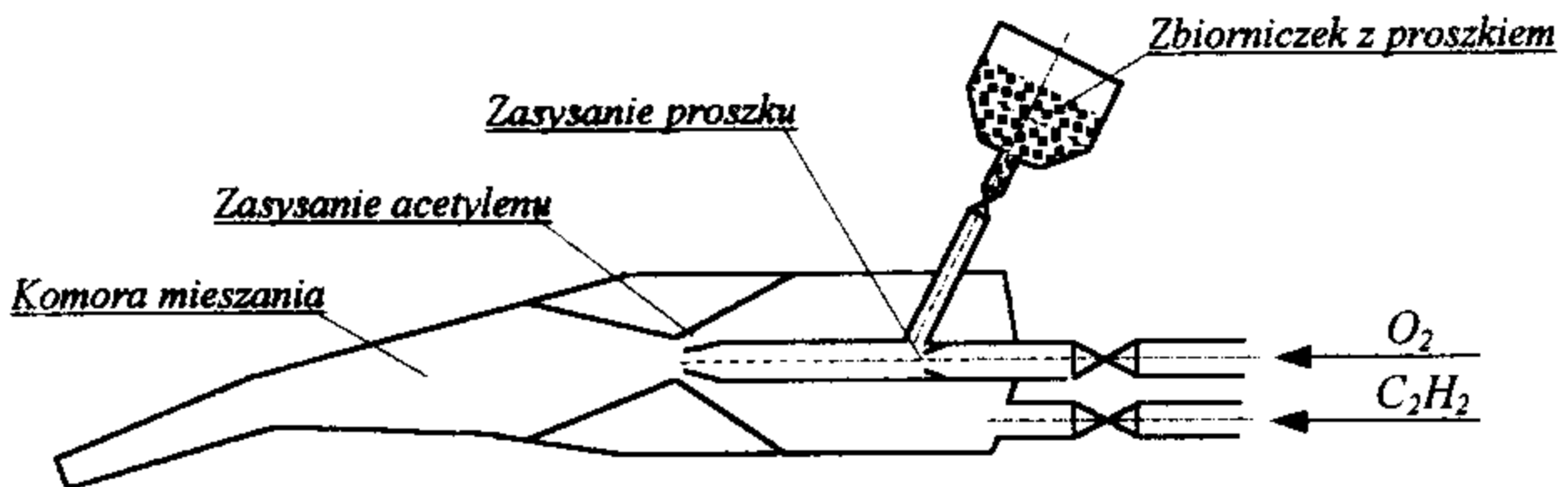
Napawanie gazowe jest procesem polegającym na nakładaniu na powierzchnię przedmiotu spoiwa stopionego za pomocą płomienia gazowego (najczęściej acetylenowo – tlenowego). Spoiwo w napawaniu gazowym może być w postaci: proszku metalicznego, drutu pełnego, drutu proszkowego lub w postaci odlanej pałeczki.

Napawanie gazowe umożliwia nakładanie bardzo gładkich napoin o bardzo dobrej jakości. Zaletą tej metody są niskie koszty urządzeń, duża ekonomiczność napawania, zwłaszcza cienkich warstw o małej powierzchni. Metoda ta ma jednak i wady, do których zalicza się: konieczność stosowania podgrzewania wstępnego, niebezpieczeństwo powstania naprężeń spawalniczych, niekorzystnych zmian strukturalnych w napawanym podłożu czy też konieczności stosowania dodatkowej obróbki cieplnej po napawaniu.

### 8.2.1. Napawanie gazowe proszkami

Jedną z odmian napawania gazowego jest napawanie gazowe proszkami, gdzie spoiwem jest proszek metaliczny o granulacji  $30 \div 90 \mu\text{m}$ .

Do napawania gazowego proszkami stosuje się specjalny palnik acetylenowo – tlenowy wyposażony w zbiorniczek proszku. Proszek ze zbiorniczka jest zasysany przez strumień tlenu i wydostaje się wraz mieszanką gazową z końcówki palnika (rys. 8.2).



Rys. 8.2. Schemat palnika do napawania gazowego proszkami

Wydostający się z dyszy palnika proszek ulega stopieniu ciepłem płomienia gazowego i energią kinetyczną gazów jest rzucany na nadtopione podłoże, gdzie następuje jego wtopienie się z podłożem. Dobierając odpowiednio warunki technologiczne napawania można ułożyć warstwę stopioną z podłożem.

Do podstawowych parametrów napawania gazowego proszkami zalicza się:

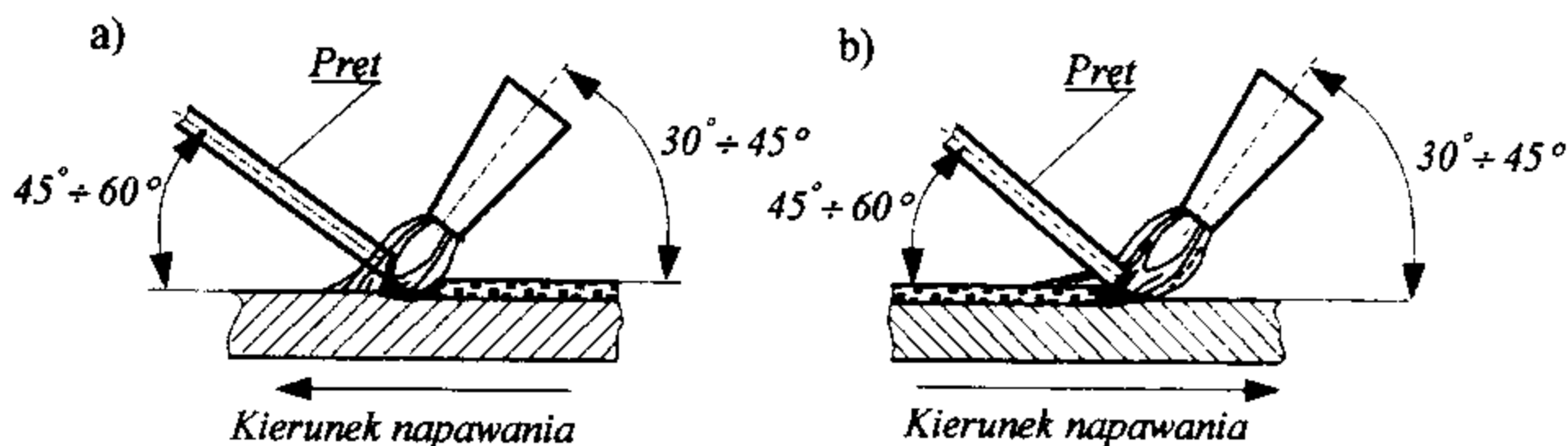
- rodzaj i ciśnienie gazu palnego,
- odległość dyszy palnika od powierzchni napawanej,
- średnica dyszy palnika,
- wielkość granulacji proszku,
- natężenie przepływu proszku.

Napawanie gazowe proszkami wymaga dokładnej regulacji płomienia i precyzyjnego prowadzenia palnika w czasie nadtapiania podłoża. Dla większości metali i stopów zalecany jest płomień neutralny lub lekko nawęglający.

Najczęściej napawanie gazowe proszkami znajduje zastosowanie do napraw regeneracyjnych oraz produkcji części maszyn i urządzeń o małych wymiarach i złożonych kształtach. Podstawowym materiałem do nakładania napoiny są proszki na osnowie niklu oraz proszki stelitowe.

### 8.2.2. Napawanie gazowe drutem lub prętem

Napawanie drutem lub prętem (palczką) polega na podgrzaniu końca materiału dodatkowego (spoiwa) w strefie zewnętrznej płomienia palnika gazowego, a następnie przesuwaniu go do obszaru płomienia o największej temperaturze i stapianiu (rys. 8.2). Jednocześnie energia cieplna płomienia nadtapia nieznacznie powierzchnię napawanego materiału.



Rys. 8.2. Schemat napawania gazowego prętem: a) – techniką w lewo, b) – techniką w prawo

Napawanie może być prowadzone techniką „w lewo” lub „w prawo”. Napawanie techniką „w lewo” pozwala na nieznaczne przetopienie materiału podłoża i stosunkowo duże stapienie materiału dodatkowego, co również wpływa na dużą wydajność napawania. W technice napawania w „prawo” energia cieplna płomienia w znacznej części jest zużywana na przetopienie podłoża.

W obu przypadkach napawania materiał dodatkowy powinien zwilżać nadtopioną powierzchnię i rozplýwać się równomiernie na powierzchni. W celu zachowania równowagi cieplnej między nagrzewaniem powierzchni napawanego przedmiotu a procesem topienia drutu lub pręta, stosuje się względny ruch wahadłowy płomienia i pręta powodujący przemiennie nadtapianie podłoża z następnym stapianiem materiału dodatkowego.

Napawanie gazowe materiałem dodatkowym (spoiwem) w postaci drutu lub pręta stosuje się najczęściej do napawania części maszyn i urządzeń.

### 8.3. Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną

Napawanie łukowe ręczne jest to proces, w którym elektroda otulona ulega stopieniu w łuku elektrycznym, a stopiwo wraz ze stopionym równocześnie podłożem tworzy napoinę. Wysoka temperatura łuku powoduje nadtopienie podłoża w takim stopniu, że jego udział w napoinie jest dość znaczny i może stanowić nawet 40%. W celu uzyskania wymaganego składu napoiny wykonuje się napawanie wielowarstwowo. Praktycznie dopiero w trzeciej warstwie uzyskuje się wymagany skład chemiczny napoiny określony recepturą elektrody otulonej.

Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną można prowadzić prądem przemiennym (AC) lub prądem stałym (DC), stosując biegunowość ujemną lub dodatnią. Dobór źródła zasilania łuku i biegunowości uzależniony jest podobnie jak w spawaniu ręcznym od rodzaju i gatunku elektrody.

Do podstawowych parametrów napawania elektrodami otulonymi zalicza się:

- rodzaj i natężenie prądu,
- napięcie łuku,
- prędkość napawania,
- średnica elektrody,
- sposób prowadzenia elektrody względem napawanej powierzchni.

Napawanie ręczne elektrodą otuloną należy prowadzić w pozycji podolnej, zapewniającej najwyższą jakość i wydajność procesu. Pochylenie elektrody powinno wynosić ok.  $70 \div 80^\circ$  względem powierzchni napawanej w kierunku przeciwnym do kierunku napawania, przy tym koniec elektrody wykonuje wahadłowy ruch poprzeczny. Ruch wahadłowy i pochylenie elektrody zapewnia mniejszy udział materiału rodzimego w napoinie.

Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną ze względu na uniwersalność i poręczność prowadzenia procesu, niską ceną oraz dużą dostępnością materiałów dodatkowych praktycznie o dowolnym składzie chemicznym nadal

jest szeroko stosowane do napawania przedmiotów o małych powierzchniach, skomplikowanych gabarytach i w miejscach trudno dostępnych.

Stosowane obecnie elektrody do napawania można podzielić na następujące gatunki:

- elektrody niskostopowe,
- elektrody wysokostopowe,
- elektrody do napawania narzędzi do pracy na zimno,
- elektrody do napawania narzędzi do pracy na gorąco,
- elektrody do napawania narzędzi skrawających,
- elektrody do napawania żeliwa.

#### **8.4. Napawanie łukiem krytym**

Napawanie łukiem krytym jest procesem podobnym do spawania z tą różnicą, że jarzący się łuk elektryczny między elektrodą topliwą a napawanym przedmiotem, pod ochronną warstwą topnika stapia materiał elektrody i warstwę przypowierzchniową przedmiotu. Metoda napawania łukiem krytym jest atrakcyjna ze względu na dużą wydajność i wysoką jakość uzyskiwanych napoin oraz możliwość automatyzacji i mechanizacji.

Do napawania łukiem krytym mogą być stosowane spoiwa w postaci drutu litego, proszkowego oraz taśmy litej lub z rdzeniem proszkowym. Napawanie może być prowadzone jedną głowicą lub wielogłowicowo.

Skład chemiczny topników do napawania jest dobierany tak, aby spełniał funkcje metalurgiczne i spawalnicze (wg PN – EN 760). Zadaniem topnika w procesie napawania łukiem krytym jest:

- regulacja składu chemicznego napoiny,
- zapewnienie dużej stabilności jarzenia się łuku ,
- rafinujące oddziaływanie na ciekły metal napoiny,
- formowanie powierzchni lica napoiny.

Podstawowymi zaś parametrami napawania łukiem krytym są:

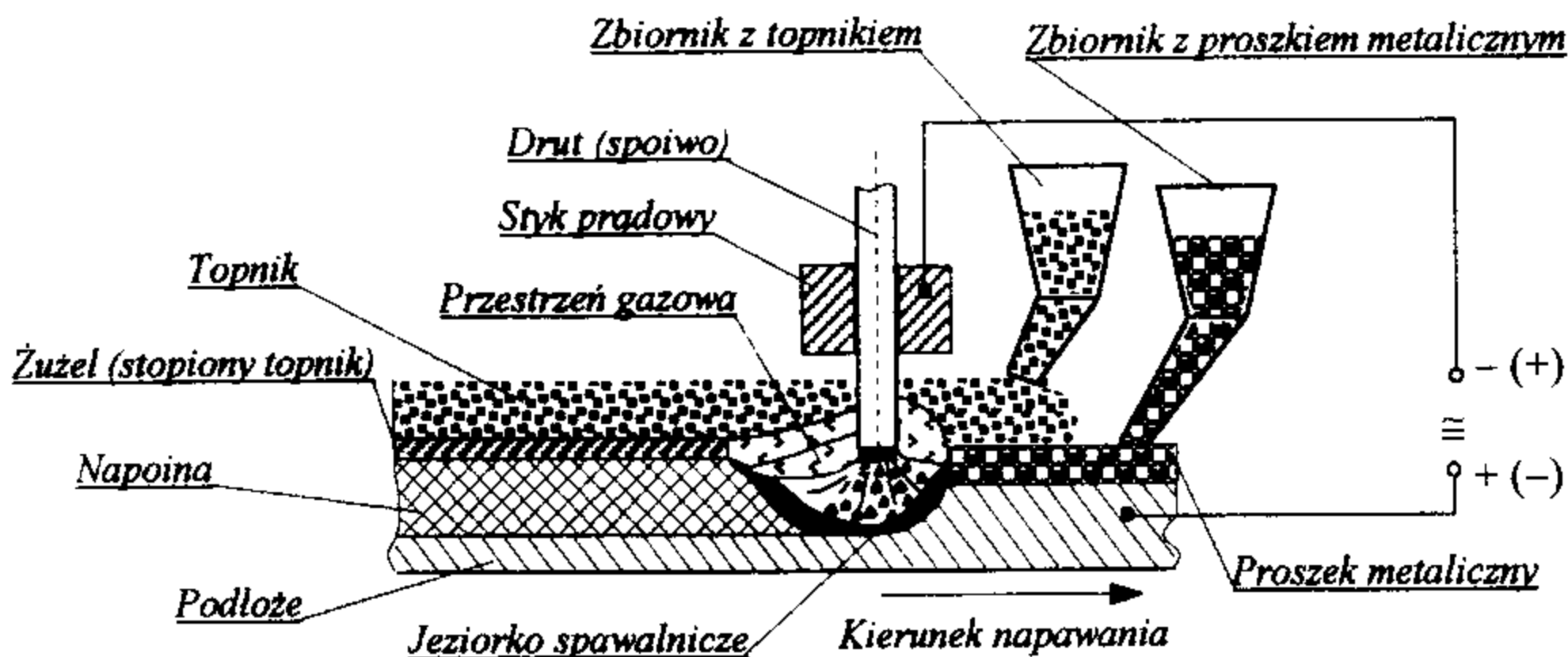
- rodzaj i natężenie prądu,
- napięcie łuku,
- prędkość spawania,
- wymiar i rodzaj elektrody,
- długość wolnego wylotu elektrody,
- rodzaj topnika,
- częstotliwość i zasięg ruchu wahadłowego głowicy spawalniczej.

Optymalne warunki technologiczne napawania dobiera się według zasad stosowanych przy spawaniu łukiem krytym.

Napawanie łukiem krytym prowadzone może być prądem stałym (DC) z biegunowością dodatnią lub ujemną oraz prądem przemiennym (AC). Napawanie prądem stałym umożliwia dokładniejsze formowanie kształtu napoiny, łatwiejsze zajarzanie łuku oraz duże prędkości napawania.

Udział materiału podłoża w napoinie jest mniejszy przy napawaniu prądem stałym o biegunowości ujemnej niż przy napawaniu prądem stałym o biegunowości dodatniej oraz przy napawaniu prądem przemiennym, choć zależy to też w dużym stopniu od rodzaju topnika.

Jedną z technik napawania łukiem krytym jest napawanie jedną elektrodą z wypełniaczem (rys. 8.3). W metodzie tej proszek metaliczny ze specjalnego podajnika jest zasypywany przed drutem elektrodowym. Na proszek metaliczny zasypywany jest z kolei topnik. Skład chemiczny proszku metalicznego i drutu elektrodowego (spoiwa) dobiera się w zależności od wymaganego składu chemicznego napoiny.



Rys. 8.3. Schemat procesu napawania łukiem krytym z wypełniaczem w postaci proszku metalicznego

## 8.5. Napawanie łukowe w osłonie gazowej

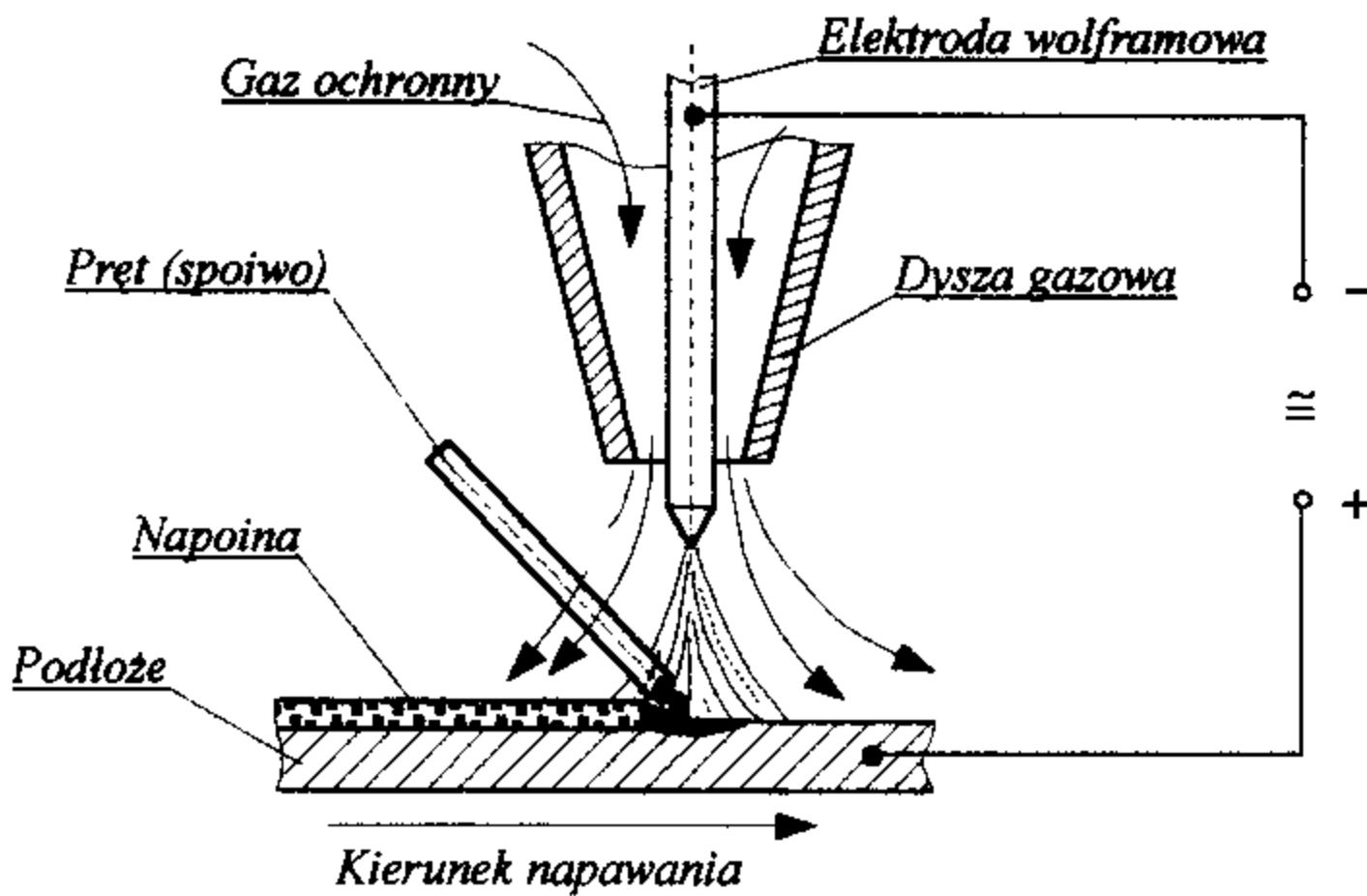
### 8.5.1. Napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej - GTA

Napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej ( $Ar$ ,  $He$ ) polega na wprowadzeniu materiału dodatkowego do obszaru łuku jarzącego się między nietopliwą elektrodą wolframową a napawanym przedmiotem w osłonie gazu obojętnego. Metoda ta często nazywana jest napawaniem metodą TIG

(proces podobny do spawania tą metodą). Materiał dodatkowy (spoiwo) ulega stopieniu i tworzy napoinę na nadtopionej powierzchni podłoża (rys. 8.4).

Materiał dodatkowy może mieć postać pręta litego, drutu litego lub proszkowego, który jest wprowadzany w obszar łuku GTA ręcznie lub automatycznie.

Napawanie dokonuje się prądem stałym o biegunowości ujemnej lub prądem przemiennym. Źródło prądu powinno mieć opadającą charakterystykę statyczną, podobnie jak przy spawaniu elektrodami otulonymi.



Rys. 8.4. Schemat napawania łukowego metodą GTA

Do podstawowych parametrów napawania ręcznego i automatycznego GTA zalicza się:

- rodzaj i natężenie prądu napawania,
- napięcie łuku,
- prędkość napawania,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego,
- wymiary materiału dodatkowego (np. średnica),
- prędkość podawania materiału dodatkowego.

Optymalne parametry napawania GTA dobiera się podobnie jak przy spawaniu metodą TIG, uwzględniając przy tym wymagania wynikające z właściwości eksploatacyjnych napoiny, jej wymiarów, dostępności i wielkości obszaru napawanego oraz udziału metalu podłoża w napoinie.

Napawanie GTA może być wykonywane techniką w „lewo” lub „w prawo”. Napawanie techniką w „lewo” zapewnia najmniejszą głębokość przetopienia podłoża i największą wydajność napawania.

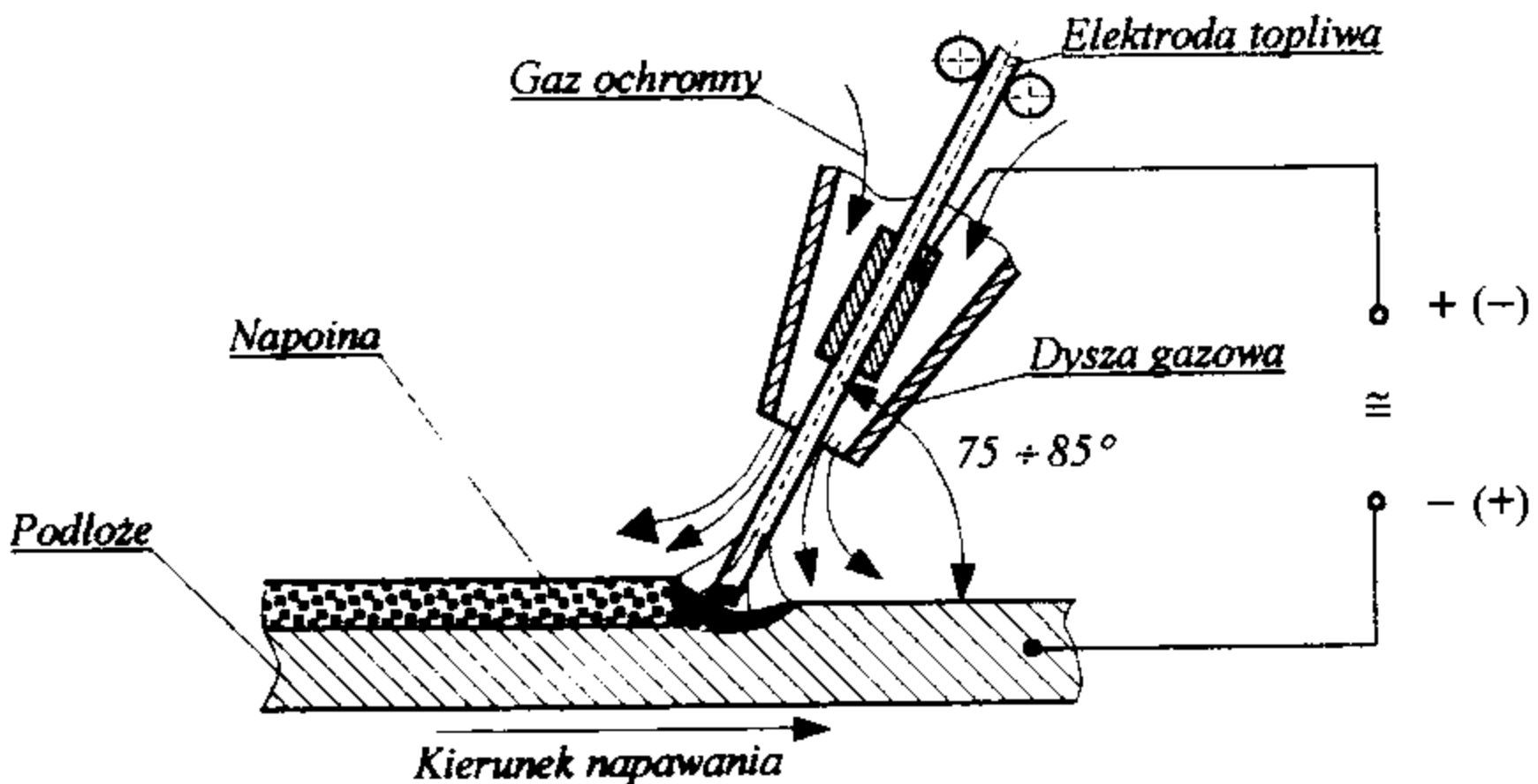


Technika napawania „w prawo” stosowana jest w celu dokładnego przetopienia i wymieszania się metalu z podłożem pierwszej warstwy napoiny.

Napawanie GTA charakteryzuje mała wydajność, wysokie koszty procesu, co sprawia, że wykorzystanie tej metody znajduje zastosowanie tylko do napawania stali wysokostopowych, stopów miedzi, kobaltu, niklu i aluminium.

### 8.5.2. Napawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej- GMA

Napawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej ( $Ar$ ,  $He$ ,  $CO_2$  lub ich mieszanek z  $O_2$ ,  $H_2$  lub  $N_2$ ) polega na stapianiu metalu elektrody i nadtopianiu metalu podłoża ciepłem łuku spawalniczego jarzącego się między elektrodą topliwą a napawanym przedmiotem, które razem tworzą napoinę (rys. 8.5). W założeniu napawanie GMA nie różni się zasadniczo od spawania metodą MIG i MAG.



Rys. 8.5. Schemat napawania łukowego metodą GMA

Podstawowymi parametrami napawania metodą GMA są:

- rodzaj i natężenie prądu napawania,
- prędkość podawania drutu elektrodowego,
- napięcie łuku,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego,
- rodzaj i średnica drutu elektrodowego,
- długość wolnego końca elektrody.

Sposób doboru parametrów napawania jest podobny do sposobu doboru parametrów przy do spawaniu w metodach MIG, MAG drutem litym lub drutem proszkowym.

Napawanie GMA drutem litym jest prowadzone techniką „w prawo” prądem stałym biegunowości dodatniej z wykorzystaniem łuku zwarciovego, natryskowego lub impulsowego.

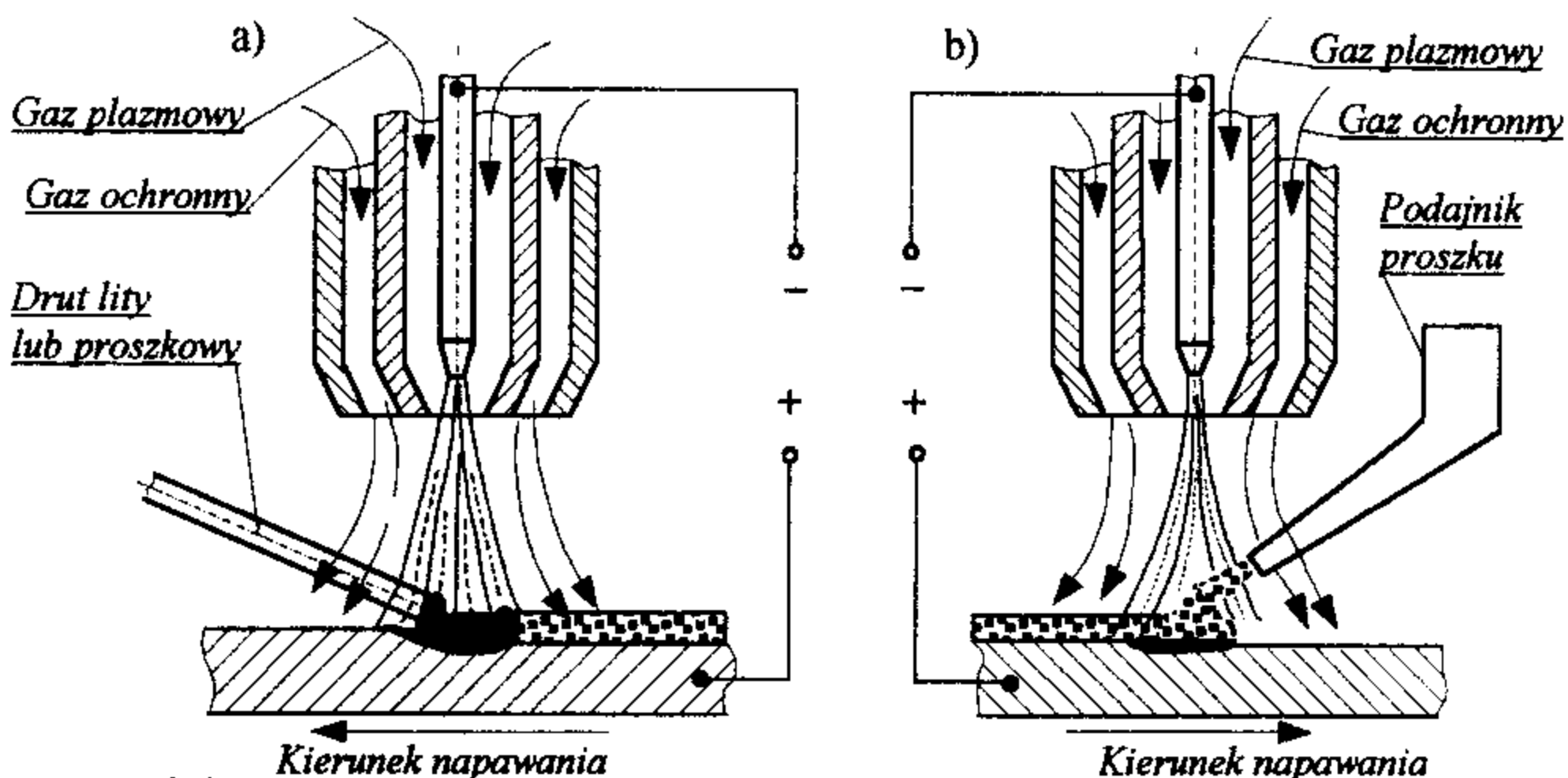
Napawanie z zastosowaniem biegunowości ujemnej wykonuje się przy napawaniu topnikowymi drutami proszkowymi techniką „w lewo”. W niektórych przypadkach można napawać drutem litym stosując tą biegunowość dla zmniejszenia udziału metalu podłoża w napoinie. Dzieje się to jednak kosztem niestabilności jarzenia się łuku i zwiększonego rozprysku metalu.

Mechanizm przenoszenia metalu elektrodowego w łuku spawalniczym zależy od parametrów prądowych napawania, rodzaju osłony gazowej, składu chemicznego i średnicy drutu elektrodowego oraz długości wolnego końca elektrody.

Napawanie GMA umożliwia nakładanie powłok prawie o dowolnym składzie chemicznym i dość znacznych grubościach tak na powierzchniach płaskich jak i obrotowych.

## 8.6. Napawanie plazmowe

Napawanie plazmowe polega na wykorzystaniu silnie zjonizowanych gazów plazmotwórczych do stapiania podłoża i materiału dodatkowego w postaci proszku, drutu lub pręta, który wraz z metalem nieznacznie nadtopionego podłoża tworzy napoinę (rys. 8.6). Strumień plazmowy do napawania może być wytwarzany w plazmotronach z łukiem zależnym.



Rys. 8.6. Schemat procesu napawania plazmowego: a) z podawaniem drutu w obszar łuku plazmowego, b) z podawaniem proszku w obszar łuku plazmowego

Do napawania plazmowego stosowane są następujące gazy: argon, hel oraz ich mieszanki z wodorem. Odpowiednio dobrany skład mieszanek pozwala na uzyskanie różnych temperatur i entalpii łuku plazmowego.

Podstawowymi parametrami napawania plazmowego są:

- natężenie prądu łuku głównego,
- natężenie prądu łuku pomocniczego,
- napięcie łuku plazmowego,
- prędkość napawania,
- średnica dyszy plazmowej,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu plazmowego,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego,
- rodzaj i prędkość podawania proszku lub drutu.

Napawanie plazmowe jest prowadzone wyłącznie prądem stałym (DC) z zastosowaniem biegunowości ujemnej o stałej wartości lub prądem pulsującym.

Duża stabilność łuku plazmowego umożliwia napawanie w szerokim zakresie natężenia prądu. Ze wzrostem natężenia prądu wzrasta wydajność napawania, ale również i przetopienie materiału podłoża, co zwiększa jego udział w napoinie. Poprzez odpowiedni dobór parametrów napawania, głównie natężenia prądu łuku plazmowego, prędkości napawania i zużycia materiału dodatkowego, możliwe jest wykonanie napoiny o wysokiej czystości metalurgicznej i minimalnym udziale materiału podłoża w napoinie.

Napawanie plazmowe stosowane jest głównie do wykonywania napoin o specjalnych właściwościach ze stopów metali oraz kompozytów metalowo – ceramicznych.

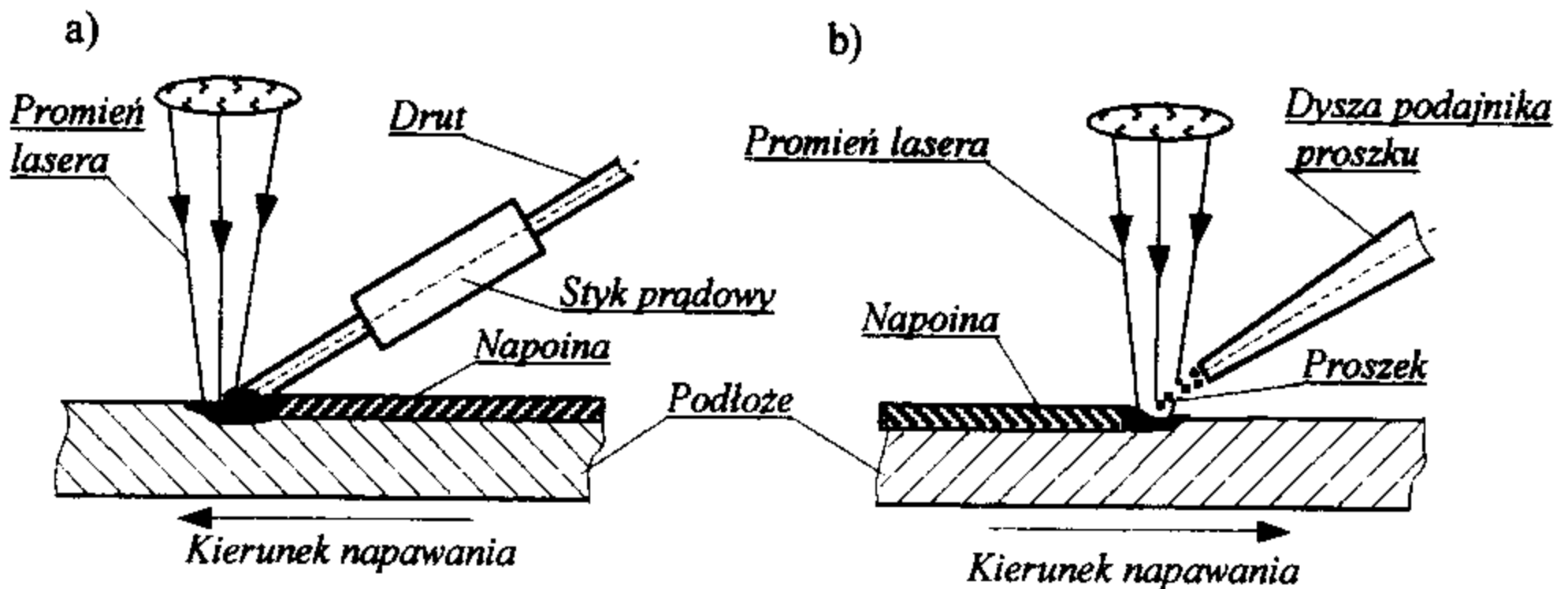
## 8.7. Napawanie laserowe

Napawanie laserowe jest to sposób wykonywania napoiny poprzez podawanie materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu do strefy oddziaływania promienia laserowego na powierzchnię przedmiotu napawanego. Stopiony materiał dodatkowy wraz z nieznacznie nadtopionym podłożem tworzy napoinę (rys. 8.7).

Do podstawowych wyróżniających się cech napawania laserowego można zaliczyć:

- ułatwione wykonywanie napoin z materiałów znacznie różniących się składem chemicznym od materiału podłoża,
- bardzo mały udział materiału podłoża w napoinie,
- bardzo wysoka jakość wykonanych napoin,

- bardzo wysoka dokładność i powtarzalność napawania dowolnych powierzchni,
- możliwe ułożenie bardzo cienkich warstw,
- bardzo wąska strefa wpływu ciepła (SWC), małe naprężenia i odkształcenia spawalnicze.



Rys. 8.7. Schemat procesu napawania laserowego: a) gorącym drutem, b) proszkiem

## 8.8. Część praktyczna

### 8.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do napawania gazowego,
  - butle z tlenem i acetylenem wraz z reduktorami,
  - przewody spawalnicze i palnik do napawania gazowo – proszkowego,
  - palnik do napawania gazowego,
  - proszek stelitowy o granulacji  $40 \div 80 \mu\text{m}$ ,
  - drut spawalniczy do spawania gazowego stali,
- prostownik spawalniczy,
  - elektrody do napawania stali,
- stanowisko do spawania łukiem krytym,
  - stal niskowęglowa o grubości  $12 \div 14 \text{ mm}$ ,
  - drut spawalniczy do napawania łukiem krytym stali,
  - topnik do napawania łukiem krytym,
- sprzęt pomocniczy i ochronny,
- instrukcje stanowiskowe, plansze poglądowe.

### 8.8.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją stanowiskową napawania gazowego i przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- omówienie przepisów bhp,
- zapoznanie się z budową i zasadą działania palnika do napawania gazowego,
- zapoznanie się z techniką i zasadami napawania gazowego, elektrodą otuloną, łukiem krytym,
- próby napawania gazowego, elektrodą otuloną oraz łukiem krytym przez ćwiczących,
- podsumowanie uzyskanych wyników.

### 8.9. Literatura

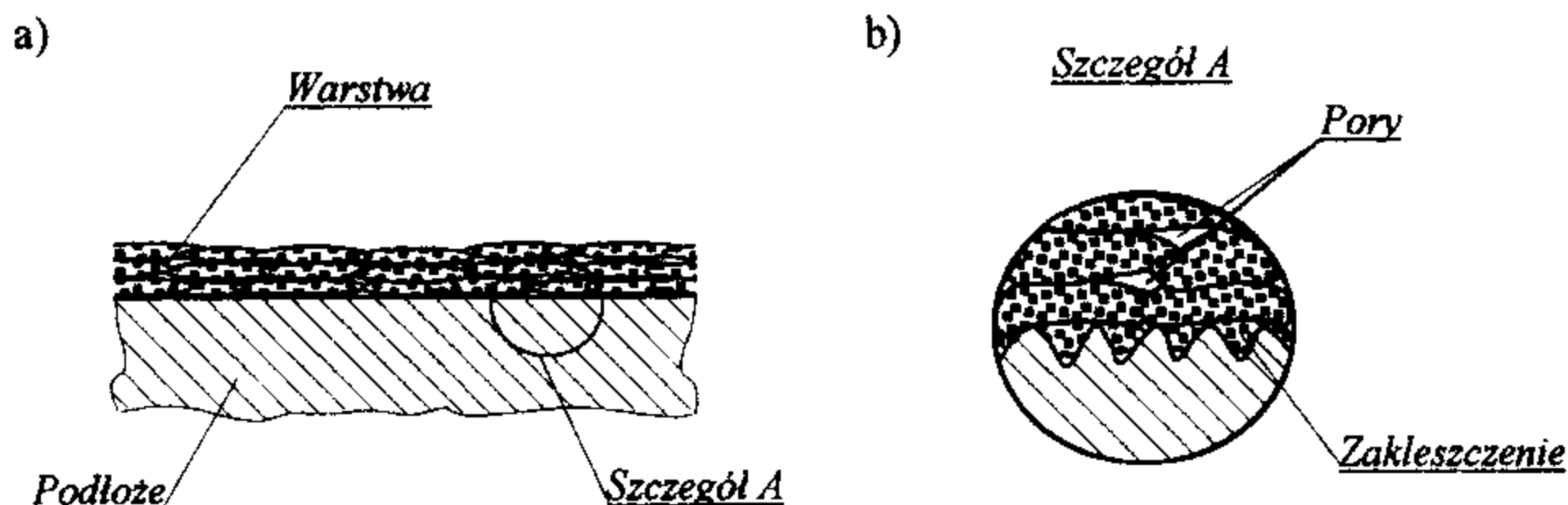
1. Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wydawnictwo „Śląsk” Spółka z o.o. Katowice 1996.
2. Dziubiński J., Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne. WNT. Warszawa 1985.

## 9. NATRYSKIWANIE CIEPLNE

### 9.1. Wstęp

Natryskiwanie cieplne (dawniej zwane metalizacją natryskową) jest procesem nakładania warstw z materiałów metalowych, ceramicznych, cermetali, węglików, tworzyw sztucznych oraz innych materiałów na podłoże metalowe lub niemetalowe w postaci roztopionych cząstek materiału natryskiwanego. Roztopione i rozpylone cząstki materiału natryskiwanego w czasie lotu mają najczęściej kształt kulisty, które w wyniku energii kinetycznej gazów zostają narzucone na natryskiwane podłoże. W momencie zderzenia z podłożem kulista cząstka ulega rozplaszczeniu, co zwiększa jej powierzchnię styku z podłożem. Pod wpływem siły uderzenia cząstki odkształcone zaklinowują się w nierównościach powierzchni natryskiwanej tworząc łuskowatą oraz porowatą strukturę warstwy (rys. 9.1a).

Wiązanie powłoki z podłożem jest wynikiem zakleszczenia się cząstek materiału natryskiwanego w nierównościach podłoża (adhezji mechanicznej) i adhezji fizycznej (rys. 9.1b).



Rys. 9.1. Schemat połączenia warstwy z podłożem: a) struktura warstwy, b) szczegół mikrozarysu strefy połączenia

Źródłem ciepła do stapienia materiału dodatkowego w postaci proszku, pręta, drutu litego lub proszkowego może być: płomień gazowy, łuk elektryczny lub łuk plazmowy.

Dla polepszenia przyczepności natryskiwanej warstwy do podłoża należy stworzyć ku temu odpowiednie warunki. Można je zapewnić poprzez zastosowanie następujących obróbek powierzchni: gwintowanie, gwintowanie z radełkowaniem, bruzdowanie z radełkowaniem oraz obróbkę strumieniowo – ścierną.

Szczególne znaczenie w przygotowaniu powierzchni do natryskiwania ma usunięcie z powierzchni wszelkiego rodzaju tlenków, tłuszczów oraz śladów wilgoci.

Natryskiwanie ze względu na zastosowanie warstw może być wykonywane w celu:

- zwiększenia odporności na ścieranie warstwy wierzchniej, np. powłoki węglkowe,
- tworzenia powłok antykorozyjnych np. powłoki cynkowe, aluminiowe i inne,
- tworzenia powłok dekoracyjnych.

Odporność korozyjna natryskiwanych powłok zależy głównie od rodzaju materiału użytego do natryskiwania i właściwości ośrodka, w którym powłoka ma funkcjonować. Dokonując wyboru materiału na powłokę antykorozyjną należy wziąć pod uwagę szereg napięciowy metali i porównać potencjał elektrochemiczny metalu podłoża z metalem natryskiwany.

## 9.2. Natryskiwanie płomieniowe

### 9.2.1. Charakterystyka metody

Natryskiwanie płomieniowe polega na nakładaniu warstw w stanie ciekłym lub częściowo stopionym na powierzchni przedmiotów ciepłem płomienia gazowego. Materiały służące do natryskiwania płomieniowego mogą być w postaci proszku, drutu lub pręta.

Ze względu na sposób stapiania i przenoszenia materiału natryskiwanie płomieniowe można podzielić na:

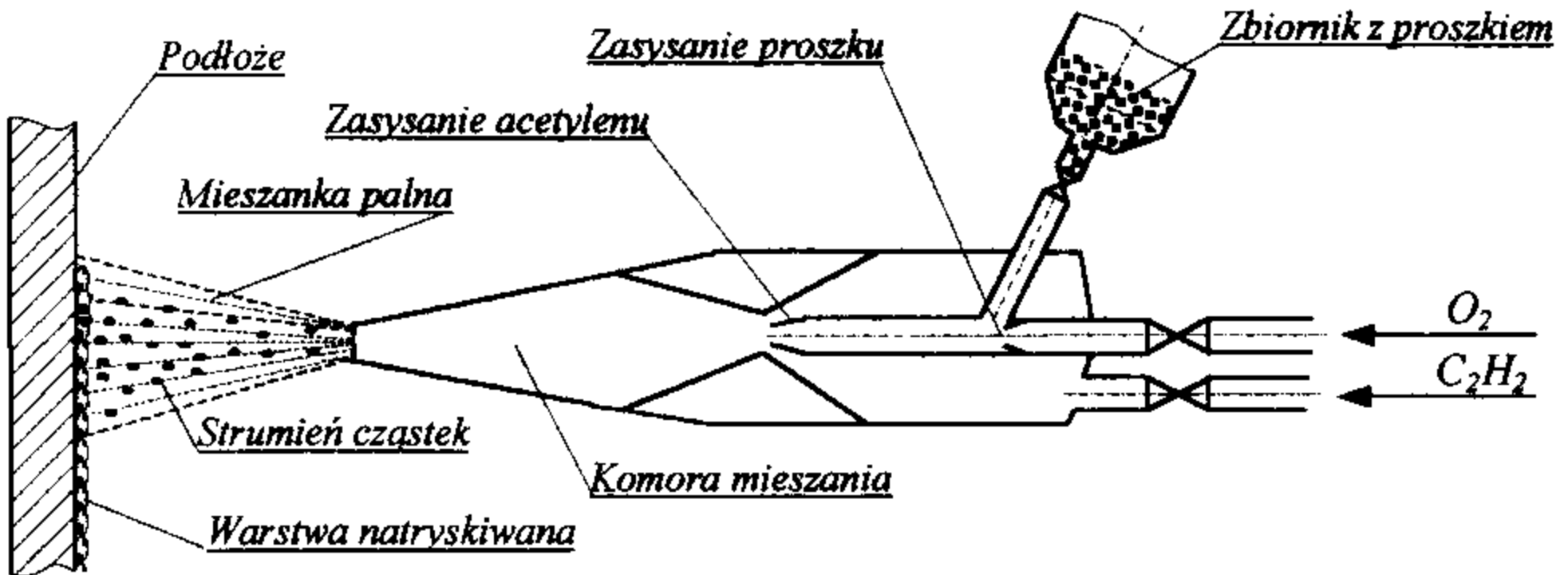
- natryskiwanie gazowe proszkami,
- natryskiwanie gazowe z użyciem drutu,
- natryskiwanie gazowe z użyciem prętów,
- natryskiwanie proszkowe detonacyjne.

### 9.2.2. Natryskiwanie gazowe proszkami

Natryskiwanie gazowe proszkami jest procesem polegającym na podawaniu proszku z pojemnika pistoletu do płomienia acetylenowo – tlenowego, gdzie ulega on stopieniu i ciśnieniem gazów płomienia lub sprężonego powietrza jest rzucały na natryskiwany powierzchnię. Zasada działania pistoletu do natryskiwania jest podobna do zasady działania pistoletu do napawiania gazowego proszkami, jednak budowa palnika umożliwia nadanie cząstkom proszku znacznie większych prędkości (rys. 9.2).

W zależności od wymagań stawianych powłokom stosuje się natryskiwanie gazowe na zimno lub gorąco (wstępne podgrzanie przedmiotu natryskiwanego).

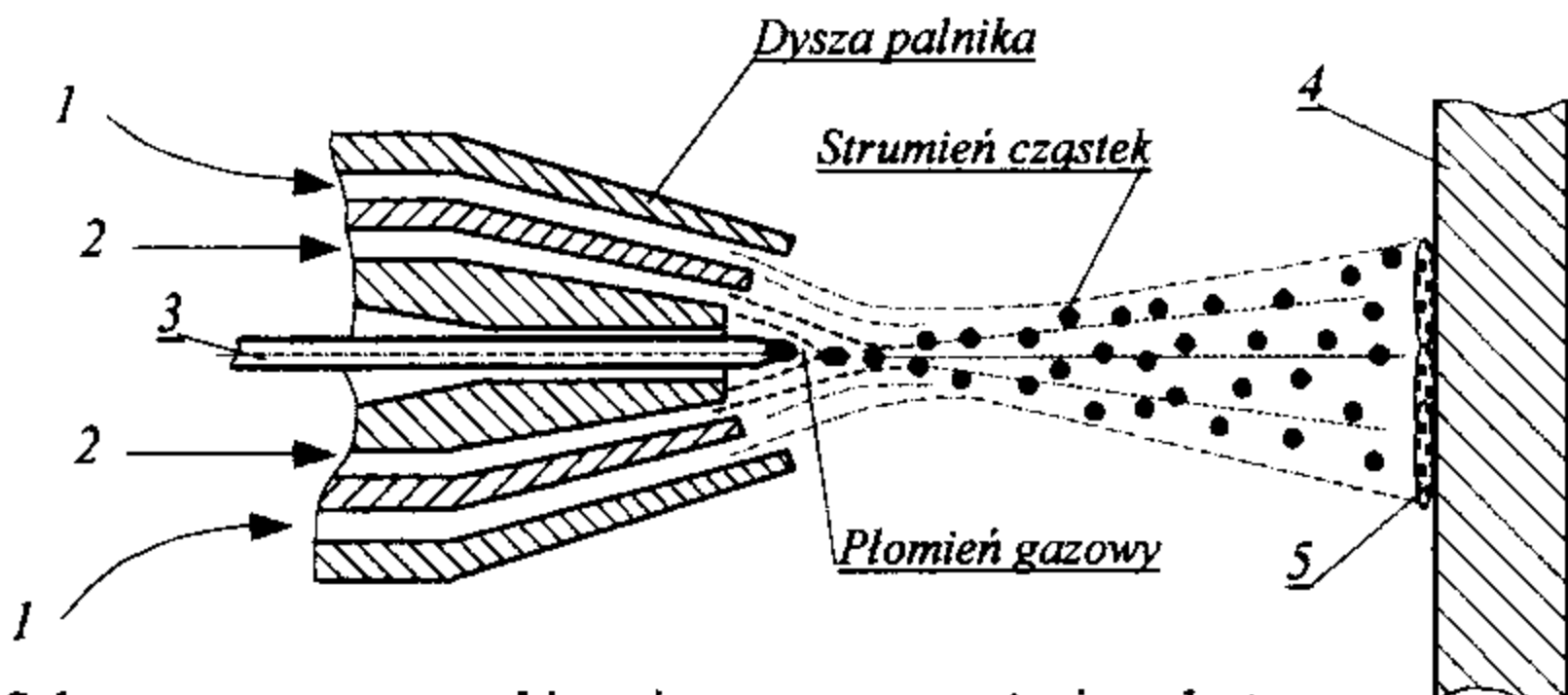
Natryskiwanie gazowo – proszkowe ma zastosowanie do nakładania powłok z większości metali, ale najczęściej używane do nakładania powłok przetapialnych są materiały oparte o: *Co*, *Ni*, *Cr*, *B*. Powłoki te po natryskiwaniu przetapia się dodatkowo płomieniem gazowym, co jednocześnie poprawia ich przyczepność w wyniku dyfuzyjnego połączenia powłoki z podłożem.



Rys. 9.2. Schemat procesu natryskiwania gazowo – proszkowego

### 9.2.3. Natryskiwanie gazowe z użyciem drutu

Natryskiwanie gazowe z użyciem drutu polega na ciągłym stapianiu i rozpylaniu w płomieniu gazowym drutu metalowego podawanego w sposób ciągły.



Rys. 9.3. Schemat procesu natryskiwania gazowego z użyciem drutu:

- 1 – dopływ sprężonego powietrza, 2 – dopływ mieszanki gazowej,  
3 – drut, 4 – materiał natryskiwany, 5 – natryskwana warstwa



Rozpylone cząstki ciekłego metalu rzucają się strumieniem sprężonego powietrza na uprzednio przygotowane podłoże (rys. 9.3).

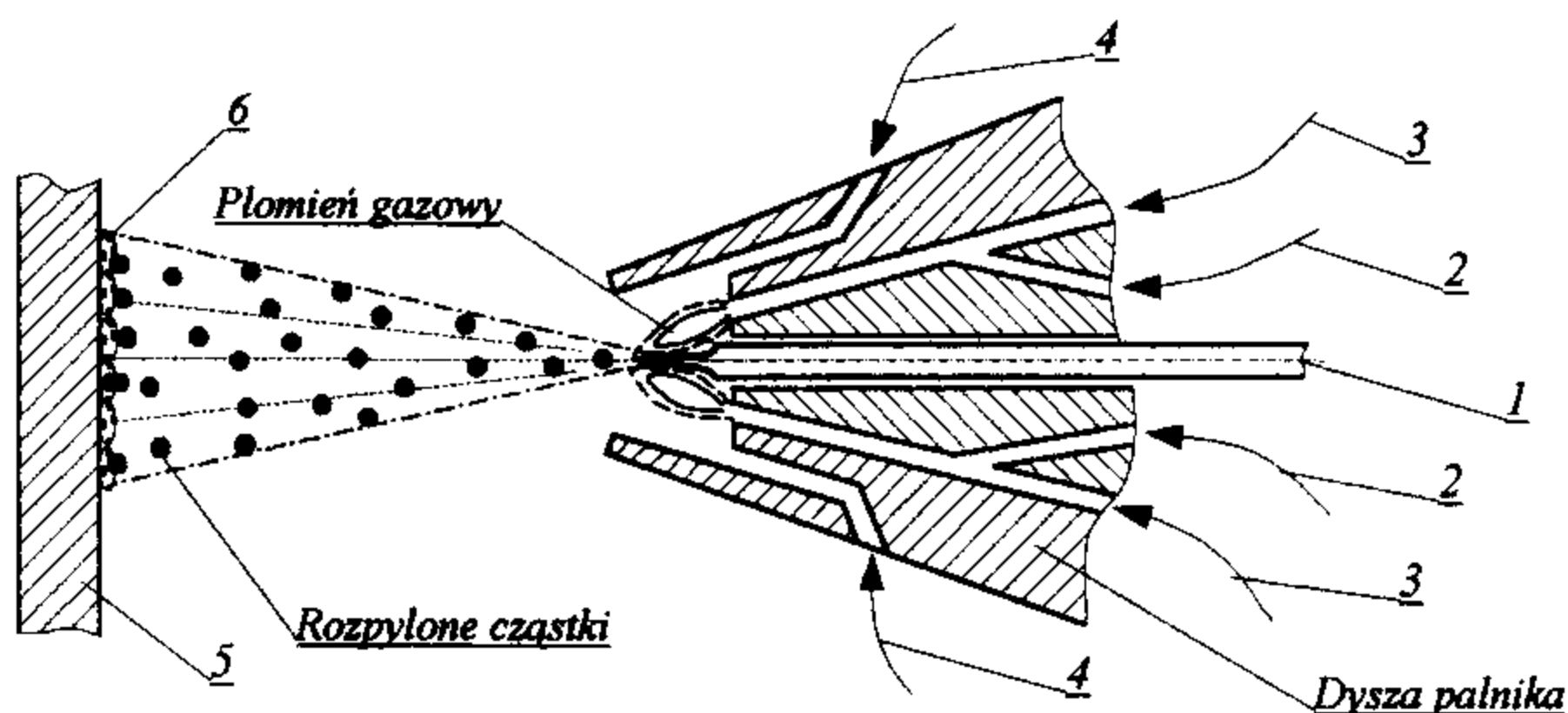
Natryskiwanie gazowe przy użyciu drutu ma zastosowanie dla metali i ich stopów, które nie parują lub nie dysocjują przed osiągnięciem temperatury topnienia. Natryskiwać można przedmioty o dowolnym kształcie i wielkości z metali i ich stopów, materiałów ceramicznych, tworzyw sztucznych, szkła i drewna.

Proces natryskiwania wyżej wymienioną metodą nie wywiera ujemnego wpływu na właściwości podłoża natryskiwanego, gdyż jego temperatura w trakcie natryskiwania nie przekracza  $250^{\circ}\text{C}$ .

#### 9.2.4. Natryskiwanie gazowe prętami ceramicznymi

Natryskiwanie gazowe prętami ceramicznymi polega na ciągłym stapianiu i rozpylaniu w płomieniu gazowym pręta ceramicznego podawanego w sposób ciągły. Rozpylone cząstki rzucają się strumieniem sprężonego powietrza na uprzednio przygotowane podłoże.

Ze względu na wysokie temperatury natryskiwania ceramiki oraz niskie przewodnictwo cieplne materiałów ceramicznych, pistolety do natryskiwania ceramiki różnią się konstrukcją od pistoletów do natryskiwania drutem metalowym. Schemat budowy i działania palnika do tej metody natryskiwania przedstawiono na rys. 9.4.



Rys. 9.4. Schemat działania palnika do natryskiwania gazowego prętami ceramicznymi:  
1 – pręt ceramiczny, 2 – wlot  $\text{C}_2\text{H}_2$ , 3 – wlot  $\text{O}_2$ , 4 – wlot sprężonego powietrza, 5 – przedmiot natryskiwany, 6 – natryskiwana warstwa

Proces natryskiwania prętem ceramicznym przebiega podobnie jak natryskiwanie gazowe drutem. Podstawowymi parametrami decydującymi o jakości warstwy natryskiwanej są:

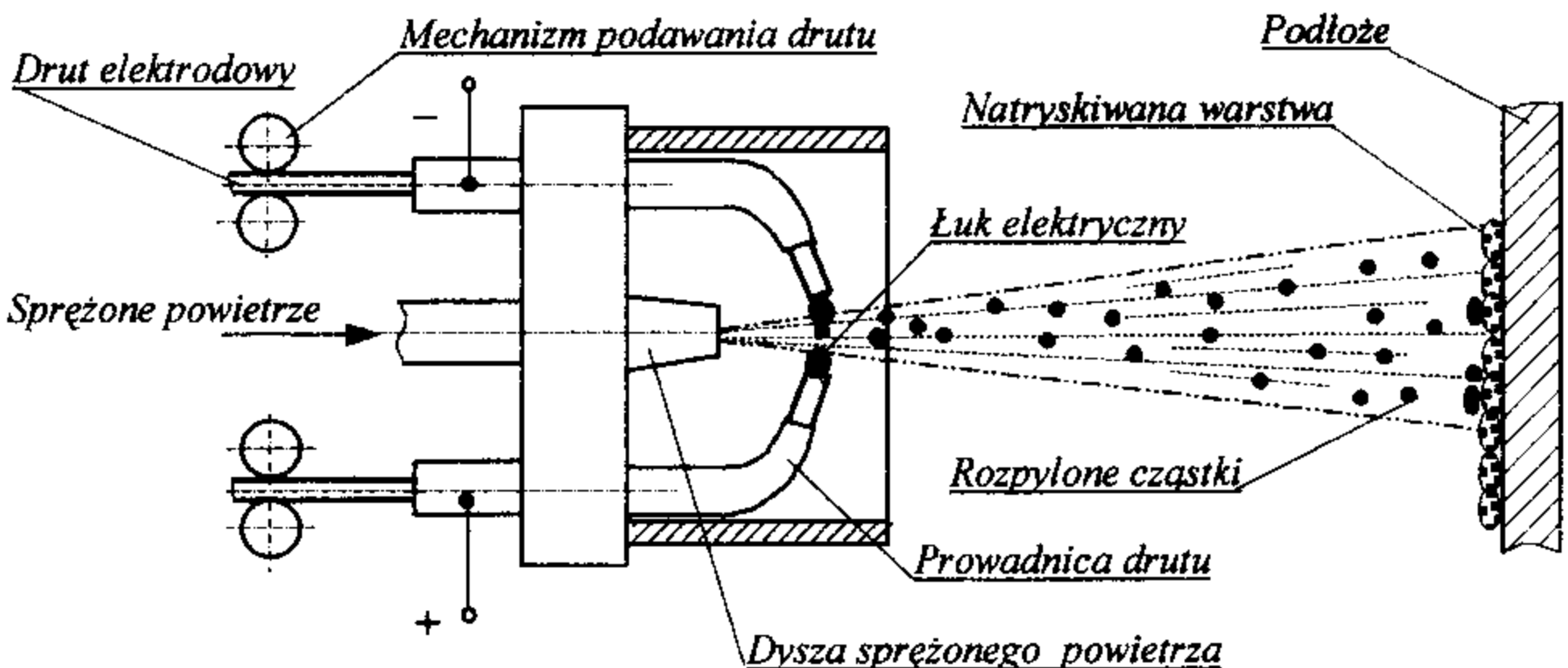
- temperatura płomienia gazowego,
- średnica pręta ceramicznego,
- odległość dyszy pistoletu od powierzchni podłoża,
- ciśnienie powietrza,
- prędkość podawania pręta ceramicznego,
- prędkość przesuwu palnika.

Do natryskiwania mogą być użyte materiały ceramiczne, których temperatura topnienia jest niższa od  $2800^{\circ}\text{C}$ . Stosuje się głównie materiały ceramiczne żaroodporne, odporne na ścieranie lub korozję oraz jako izolatory cieplne i elektryczne.

### 9.3. Natryskiwanie łukowe

Natryskiwanie łukowe polega na tym, że metal końców dwu przewodzących prąd elektryczny drutów w postaci litej lub proszkowej jest ciągle stapiany ciepłem łuku elektrycznego jarzącego się między tymi drutami, a ciekłe cząstki są rzucane strumieniem sprężonego powietrza na przygotowane podłoże. Schemat budowy i działania palnika do tej metody natryskiwania przedstawiono na rys. 9.5.

Do wytwarzania łuku elektrycznego pomiędzy drutami z materiału powłokowego stosowane są prostowniki spawalnicze.



Rys. 9.5. Schemat procesu natryskiwania łukowego

Aby uniknąć utlenienia się metalu podczas natryskiwania i zapewnienia mu jednorodności składu chemicznego stosuje się w miejsce sprężonego powietrza inne gazy, takie jak: azot, wodór lub argon.

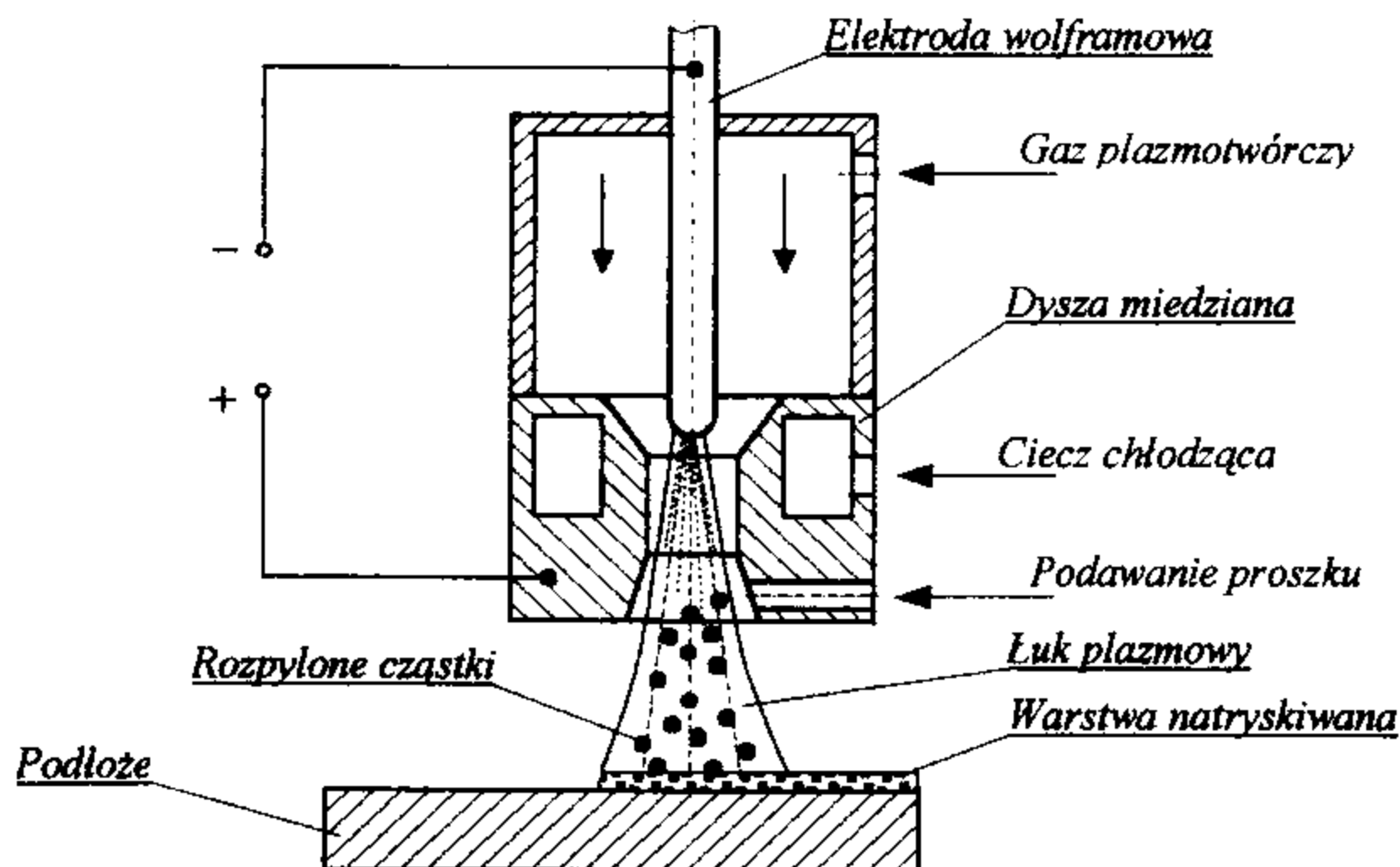
Do podstawowych parametrów natryskiwania łukowego zalicza się:

- natężenie prądu,
- napięcie łuku,
- średnica drutu,
- prędkość podawania drutu,
- ciśnienie powietrza lub innego gazu,
- odległość dyszy pistoletu od powierzchni podłoża,
- prędkość przesuwu pistoletu.

Z uwagi na dużą wydajność oraz niski koszt energii i robocizny natryskiwanie łukowe jest jednym z najtańszych procesów natryskiwania.

#### 9.4. Natryskiwanie plazmowe

Natryskiwanie plazmowe polega na stapianiu materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu ciepłem łuku plazmowego i rzucaniu roztopionych cząstek materiału energią kinetyczną gazu plazmowego na przygotowane podłoże (rys. 9.6).



Rys. 9.6. Schemat palnika do natryskiwania plazmowego proszkowego

Łuk plazmowy jarzy się między nietopliwą elektrodą wolframową (katoda), a elektrodą miedzianą (anoda), stanowiącą jednocześnie dyszę wylotową dla strumienia plazmy i natryskiwanych cząstek. Gazami stosowanymi do wytworzenia plazmy mogą być: argon (*Ar*), hel (*He*), wodór (*H<sub>2</sub>*), azot (*N<sub>2</sub>*) oraz ich mieszaniny w zależności od wymaganej temperatury łuku plazmowego.

Proces natryskiwania plazmowego umożliwia natryskiwanie materiałów o cennych właściwościach fizykochemicznych, jak: tytan, wolfram, molibden, chrom, itp., węgliki (np. *Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>*, *WC*), borki, azotki, tlenki (np. *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub>*, *ZrO<sub>2</sub>*, *Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, *Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*), cermetale oraz innych materiałów o wysokiej temperaturze topnienia, co np. jest niemożliwe przy innych metodach natryskiwania.

Podstawowymi parametrami natryskiwania plazmowego są:

- natężenie prądu,
- napięcie łuku,
- rodzaj i natężenie przepływu gazu plazmotwórczego,
- wydajność podawania proszku lub drutu,
- odległość dyszy palnika od natryskiwanej powierzchni,
- prędkość przesuwu palnika.

Natryskiwanie plazmowe może być wykonywane ręcznie lub automatycznie.

Technika prowadzenia palnika plazmowego względem natryskiwanej powierzchni jest podobna do techniki prowadzenia palnika przy natryskiwaniu płomieniowym. Ze względu na bardzo wysoką temperaturę strumienia plazmy (od kilku do kilkunastu tysięcy °C) oraz znaczne przegrzanie cząstek proszku lub drutu, w tym procesie może wystąpić nadmierne przegrzanie powłoki, a przez to i obniżenie jej właściwości mechanicznych i fizycznych. Uwzględniając powyższy fakt, w niektórych przypadkach natryskiwania plazmowego stosuje się dodatkowe chłodzenie natryskiwanego obszaru nadmuchem np. powietrza, argonu, azotu lub *CO<sub>2</sub>*, w zależności od reaktywności materiału podłoża i powłoki.

Przy nakładaniu powłok, w których materiał natryskiwany znacznie różni się od materiału podłoża współczynnikiem rozszerzalności cieplnej należy stosować międzywarstwy z materiału o mniejszych różnicach rozszerzalności cieplnej (natryskiwanie wielowarstwowe).

Bardzo ważne znaczenie w natryskiwaniu plazmowym ma przygotowanie powierzchni elementów przed natryskiwaniem w celu uzyskania odpowiedniej przyczepności warstwy do podłoża. Do tego celu stosuje się obróbkę strumieniowo – ścierną.

## 9.5. Część praktyczna

### 9.5.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- a) stanowisko do natryskiwania płomieniowego drutem:
  - butla tlenowa i acetylenowa oraz sprężone powietrze,
  - palnik do natryskiwania płomieniowego drutem,
  - drut z brązu o średnicy 3 mm,
  - sprzęt pomocniczy i ochronny,
  - instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe,
- b) stanowisko do natryskiwania plazmowego:
  - podajnik proszku,
  - butla z argonem i wodorem wyposażone w reduktory,
  - czyszczarka strumieniowo – ścierna,
  - blacha ze stali niskowęglowej o grubości 12 – 14 mm,
  - wałek ze stali niskowęglowej o średnicy 30 mm i dł. 150 mm,
  - proszek stellitowy o granulacji  $30 \div 60 \mu\text{m}$ ,
  - termoindykator kredkowy do pomiaru temperatury:  $100^{\circ}\text{C}$  i  $250^{\circ}\text{C}$ ,
  - sprzęt pomocniczy i ochronny,
  - instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

### 9.5.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją stanowiskową natryskiwania płomieniowego drutem i natryskiwania plazmowego oraz przebiegiem części praktycznej ćwiczenia wraz z uwzględnieniem przepisów bhp,
- zapoznanie się z budową i zasadą działania palnika do natryskiwania płomieniowego drutem oraz palnika plazmowego,
- przygotowanie powierzchni do natryskiwania,
- próby natryskiwania płomieniowego drutem i natryskiwania plazmowego,
- określenie wpływu przygotowania powierzchni przedmiotu oraz temperatury natryskiwania plazmowego na jakość warstwy natryskiwanej,
- analiza uzyskanych wyników natryskiwania,
- dyskusja i podsumowanie ćwiczenia.

## 9.6. Literatura

1. Dziubiński J., Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne. WNT. Warszawa 1985

## 10. ZGRZEWANIE METALI

### 10.1. Wstęp

Ze względu na różne mechanizmy tworzenia trwałego połączenia przy zgrzewaniu można wyróżnić następujące metody: *zgrzewanie elektryczne oporowe, zgrzewanie łukiem wirującym, zgrzewanie udarowe, zgrzewanie w stanie stałym*. Podstawowa różnica w podziale zgrzewania jest oparta na zaistniałych zjawiskach fizyko – chemicznych i metalurgicznych powodujących powstanie zgrzeiny. W zgrzewaniu oporowym trwałe połączenie uzyskuje się w wyniku nagrzania obszaru styku łączonych przedmiotów prądem elektrycznym i odkształcenia plastycznego tego obszaru odpowiednią siłą docisku.

Proces zgrzewania łukiem wirującym polega na przemieszczaniu stałym polem magnetycznym łuku spawalniczego, jarzącego się między zgrzewanymi przedmiotami. Ciepło łuku nadtapia powierzchnie czołowe przedmiotów oraz wywierana jest siła docisku, która wyciska ciekły metal ze zgrzeiny.

W zgrzewaniu udarowym trwałe połączenie otrzymuje się w wyniku działania ciepła łuku elektrycznego o bardzo dużej gęstości prądu, wytworzonego poprzez krótkotrwałe rozładowanie energii elektrycznej /baterii kondensatorów lub energii indukcyjnej uzwojenia wtórnego transformatora/ między łączonymi przedmiotami oraz wywarcia siły docisku.

Natomiast w procesach zgrzewania w stanie stałym podstawowe mechanizmy tworzenia trwałego połączenia zawierają:

- wzrost temperatury w wyniku tarcia lub znacznego odkształcenia plastycznego (ultradźwiękowe, wybuchowe i zgrzewanie tarciove),
- odkształcenie plastyczne, tarcie, mechanizm pełzania i dyfuzję zachodzące w temperaturze otoczenia (zgrzewanie zgmiotowe),
- podgrzanie odsłoniętych czystych powierzchni od 0,6 do 0,8 temperatury topnienia i odkształcenie plastyczne (zgrzewanie dyfuzyjne).

Zgrzewanie w stanie stałym występuje na wskutek odsłonięcia czystych powierzchni metalicznych obu łączonych przedmiotów w obszarze styku i zbliżenie ich na odległość parametrów sieci krystalicznej. Dalszy proces trwałego połączenia może zachodzić poprzez: procesy dyfuzji aktywowane cieplnie i polem naprężeń, tworzenie nowych granic ziaren, sferoidyzację i rozpuszczanie tlenków, rekrytalizację. Ostatecznie w wyniku powyższych zjawisk następuje utworzenie stabilnej struktury krystalicznej zgrzeiny.

Mechanizmy zapewniające zgrzanie metali w stanie stałym są uzależnione w różnym stopniu od następujących parametrów: *stanu przygotowania powierzchni łączonych przedmiotów, siły docisku, czasu przebiegu procesu oraz temperatury zgrzewania*.

## 10.2. Zgrzewanie oporowe

### 10.2.1. Istota zgrzewania oporowego

Zgrzewanie oporowe elektryczne (rezystancyjne) jest procesem, w którym trwałe połączenie uzyskuje się w wyniku wydzielonego ciepła w obszarze styku łączonych przedmiotów wskutek przepływającego prądu elektrycznego i odpowiedniego odkształcenia plastycznego w tym obszarze. Połączenie powstaje dzięki międzycząsteczkowym i międzyatomowym siłom wiązania.

Ze względu na geometrię łączonych przedmiotów, jak i wymaganego kształtu zgrzeiny, zgrzewanie oporowe dzieli się na:

- zgrzewanie punktowe, garbowe,
- liniowe,
- zgrzewanie doczołowe (zwarciowe, iskrowe),
- zgrzewanie prądami wielkiej częstotliwości.

Przy zgrzewaniu oporowym przedmioty zgrzewane włączone są w obwód prądu zgrzewania. Przez zetknięcie ich ze sobą zamyka się obwód prądu, a obszar styku wskutek oporu elektrycznego ulega silnemu rozgrzaniu aż do temperatury topnienia, co w efekcie prowadzi do powstania ciekłego jądra zgrzeiny. Gdy jądro to osiągnie wymagane wymiary, przerywany jest dopływ prądu i wywierany jest dodatkowy docisk, którego zadaniem jest spęczenie krzepnącego metalu jądra zgrzeiny.

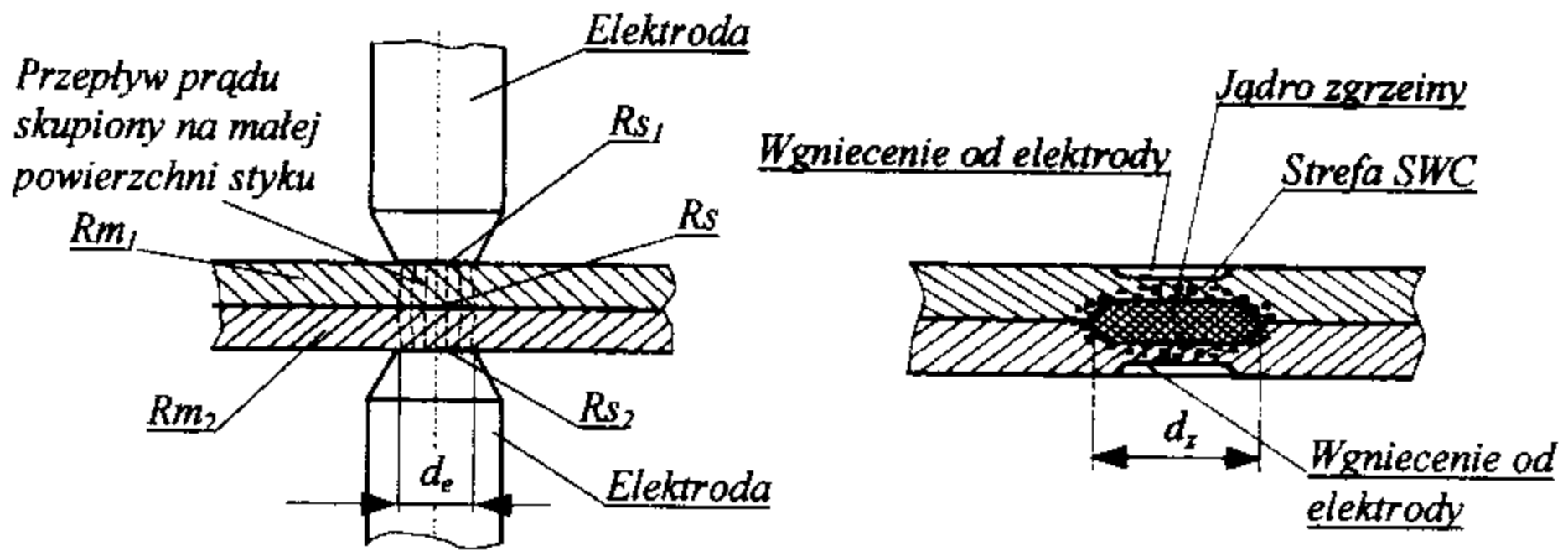
W trakcie przepływu prądu w procesie zgrzewania oporowego wydzielają się w strefie zgrzewania ciepło, którego ilość jest ustalona wzorem Joule'a-Lenza

$$Q = \int_0^t J^2(t) R(t) dt \quad [J] \quad /10.1/$$

gdzie:  $J(t)$  – natężenie prądu zgrzewania [A];  $R(t)$  – całkowita oporność elektryczna obszaru zgrzewania [ $\Omega$ ];  $t$  – czas zgrzewania (czas przepływu prądu zgrzewania) [s]

Jak wynika z powyższego wzoru na nagrzewanie strefy zgrzeiny zasadniczy wpływ ma natężenie prądu, które w procesie zgrzewania może wynosić do kilkudziesięciu tysięcy amperów.

Całkowita oporność obszaru zgrzewania składa się z oporności przejścia między elektrodami i materiałem zgrzewanym  $R_{s1+2}$ , oporności styku między zgrzewanymi przedmiotami  $R_s$  oraz oporności materiału zgrzewanego  $R_{m1+2}$  (rys. 10.1).



Rys. 10.1. Rodzaje oporności styków przy zgrzewaniu oporowym i budowa zgrzeiny na przykładzie zgrzewania punktowego

$$R = R_{s1} + R_{m1} + R_s + R_{s2} + R_{m2} \quad /10.2/$$

W zależności od sposobu zgrzewania, parametrów zgrzewania, stanu powierzchni styku przedmiotów oraz rodzaju zgrzewanych metali wymienione oporności różnią się znacznie. W początkowej fazie zgrzewania największa jest oporność styku  $R_s$  i w tym miejscu wydziela się największa ilość ciepła, co umożliwia powstanie zgrzeiny. Wielkość oporności styku  $R_s$  zależy także od stanu przygotowania powierzchni, rodzaju materiału oraz siły docisku.

### 10.2.2. Zgrzewanie oporowe punktowe

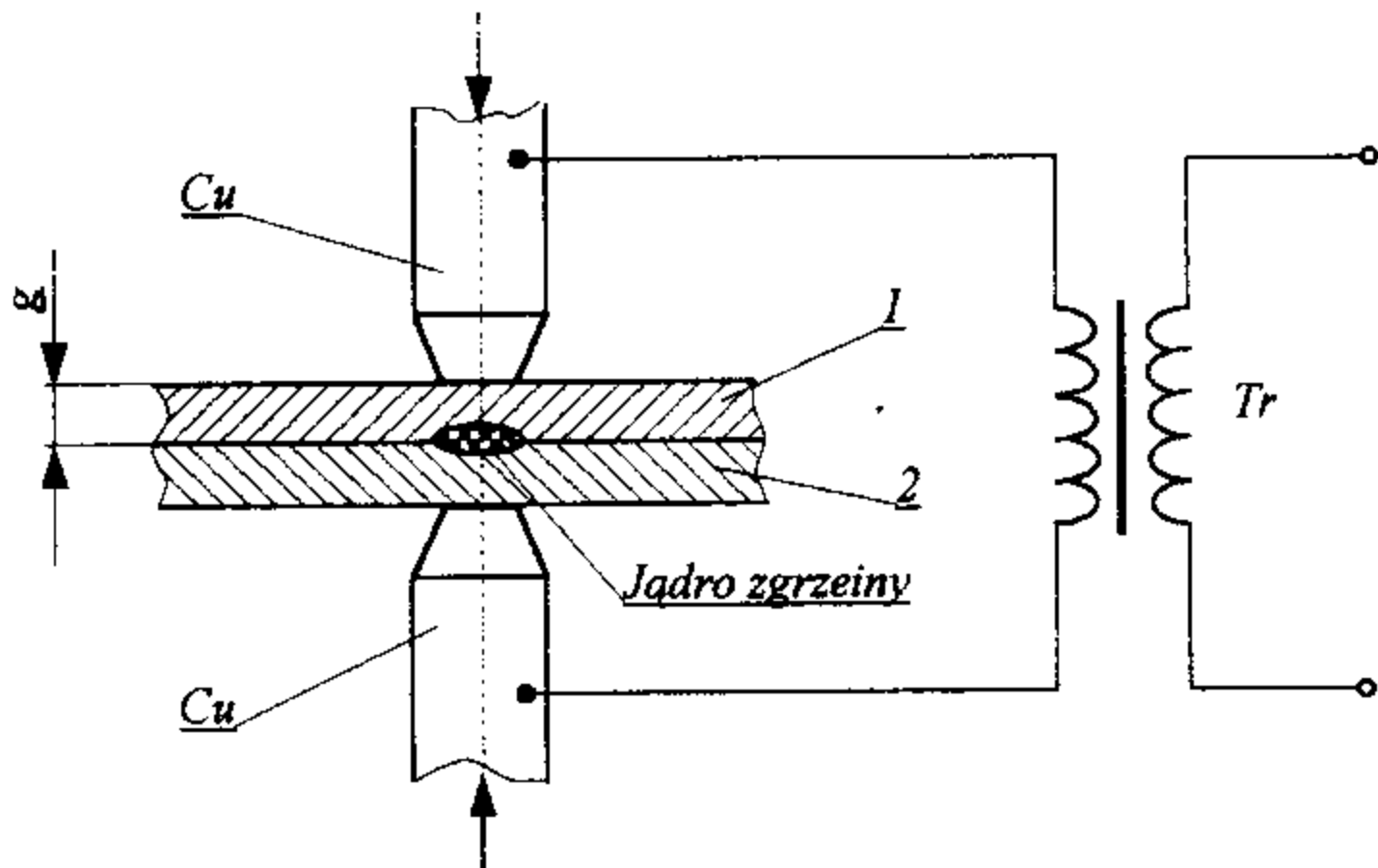
Proces zgrzewania punktowego polega na przepływie prądu przez elementy ułożone jeden na drugim i dociśnięte do siebie elektrodami o przekroju kołowym. Połączenie następuje w obszarze styku obu elektrod co powoduje utworzenie ciekłego jądra zgrzeiny w wyniku nagrzewania oporowego (rys. 10.2). Gdy ciekłe jądro zgrzeiny osiągnie wymagane wymiary (wg wzoru 10.4), przepływ prądu zostaje przerywany i wywierany jest docisk spęczania.

Rozgrzany metal zgrzewanych elementów zostaje wymieszany pod wpływem siły docisku działającej na elektrody, tworząc trwałe połączenie w postaci zgrzeiny (rys. 10.1 i 10.2). Średnica jądra zgrzeiny zależy od średnicy elektrod. Średnicę elektrody dobiera się według wzoru (10.3):

$$d_e = 5 \sqrt{g} \quad /10.3/$$

gdzie:  $g$  – grubość zgrzewanych elementów,  
 $d_e$  – średnica zgrzeiny





Rys. 10.2. Zasada zgrzewania punktowego: 1 i 2 – elementy zgrzewane, Cu – elektroda miedziana, g – grubość elementu, Tr – transformator

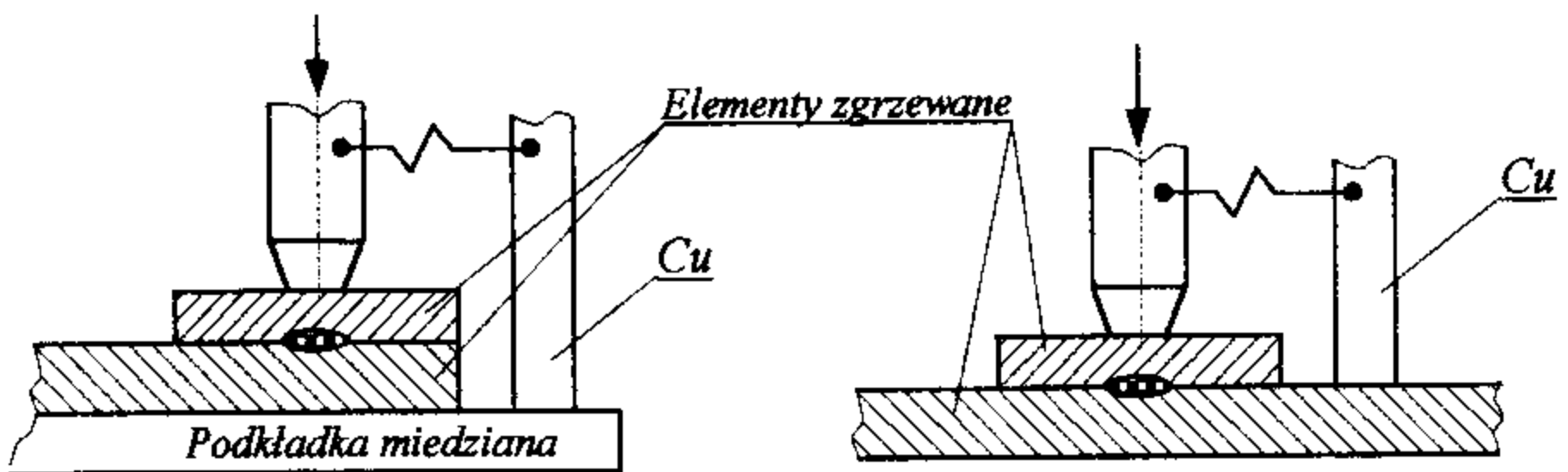
Poprawnie wykonana zgrzeina powinna mieć średnicę według wzoru

$$d_z = (0,8 \div 1,1)d_e \quad /10.4/$$

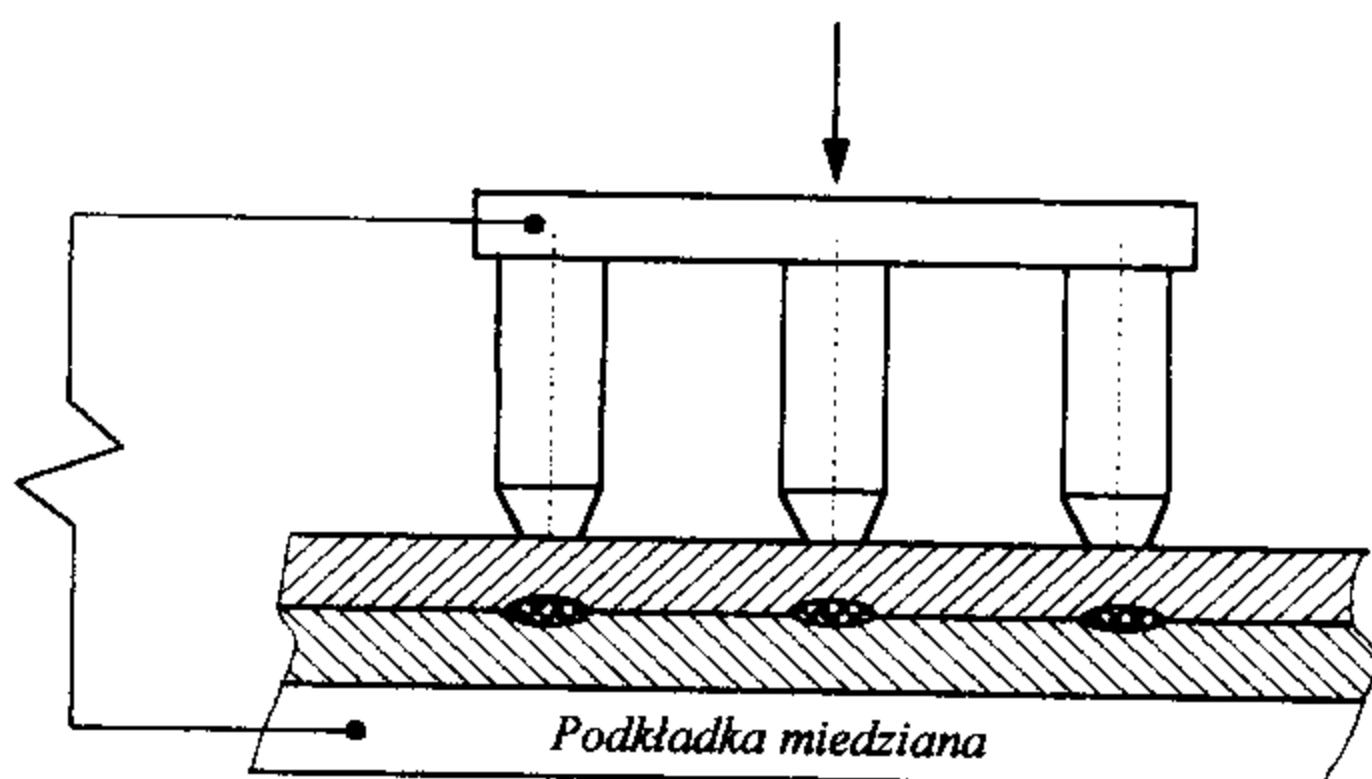
Zgrzewanie punktowe może być prowadzone jednopunktowo lub wielopunktowo w zależności od rodzaju i kształtu zgrzewanych konstrukcji.

Doprowadzenie prądu do obszaru zgrzewania może być prowadzone różnymi technikami, w zależności od wielkości, kształtu konstrukcji, dostępu elektrod zgrzewarki do elementów zgrzewanych jak i specjalnych wymagań co do wyglądu powierzchni obszaru zgrzewania (rys. 10.3, 10.4 i 10.5).

Dopuszczalne wgniecenie od elektrody może wynosić 0,1g.



Rys. 10.3. Schematy zgrzewania jednostronnego jednopunktowego

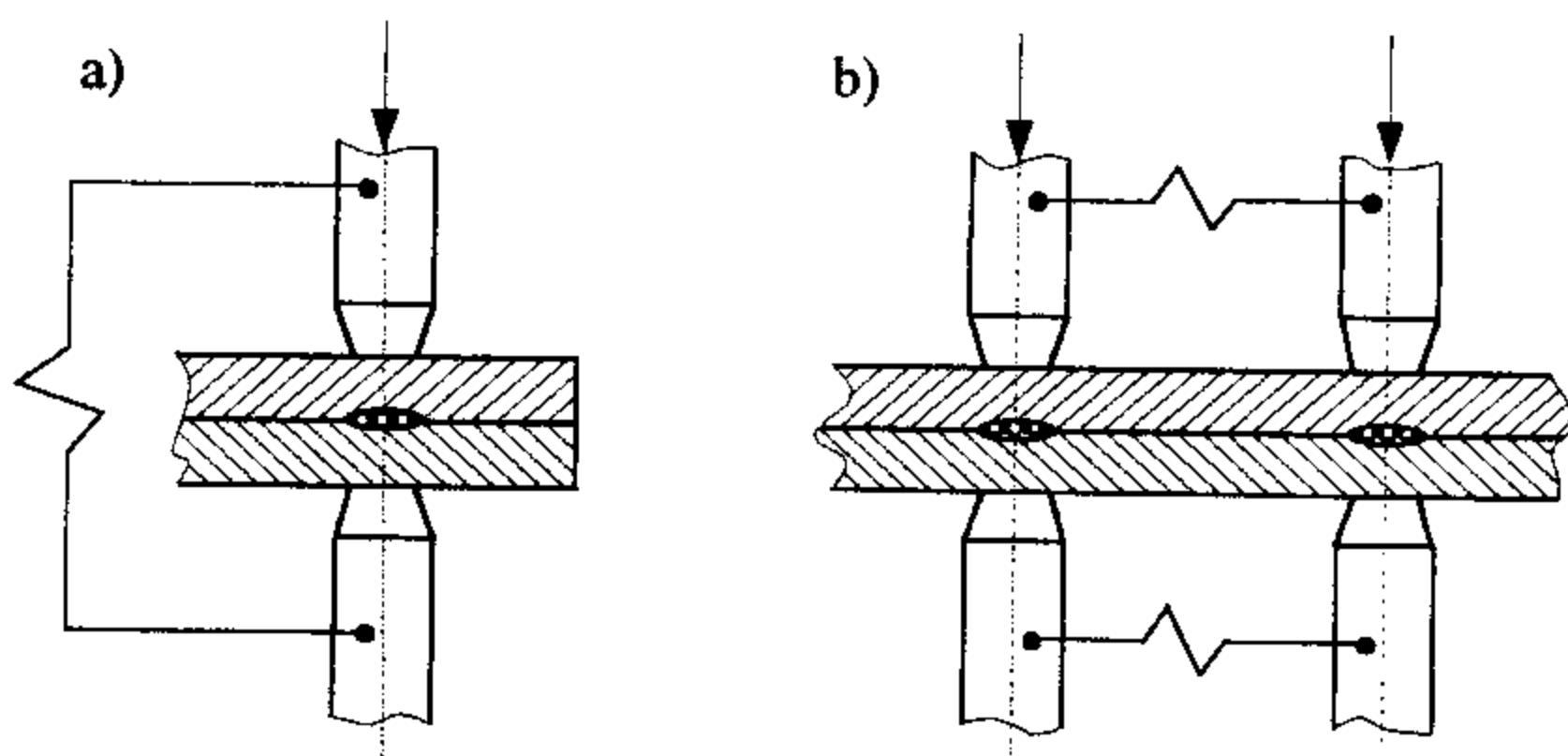


Rys. 10.4. Schemat zgrzewania jednostronnego wielopunktowego

Do podstawowych parametrów zgrzewania punktowego zalicza się:

- natężenie prądu zgrzewania,
- siła docisku elektrod,
- czas zgrzewania,
- kształt i średnica czynna elektrody.

Parametry zgrzewania punktowego dobiera się w zależności od rodzaju metalu, jego grubości, kształtu i wymiarów elementów zgrzewanych oraz wymagań dodatkowych stawianych danej konstrukcji.



Rys. 10.5. Zgrzewanie oporowe dwustronne: a – zgrzewanie jednopunktowe, b – zgrzewanie dwupunktowe

Natężenie prądu zgrzewania decyduje o ilości ciepła wydzielającego się w złączu, prędkości jego nagrzewania i chłodzenia, czyli decyduje o jakości tego złącza. Zbyt małe natężenie prądu zgrzewania prowadzi do powstania małego

jądra zgrzeiny, a nawet do przyklejenia. Zbyt duże zaś natężenie prądu powoduje nadmierne nagrzewanie się miejsca styku i szybkie powstanie ciekłego jądra zgrzeiny, które rozrasta się i pod działaniem gazów i par metali powoduje wyprysk ciekłego metalu na zewnątrz. Zwykle takiemu wypływowi towarzyszy nadmierne wgniecenie od elektrody w materiał zgrzewany.

*Siła docisku elektrod* zapewnia dokładny styk powierzchni roboczej elektrod z powierzchnią zgrzewanych przedmiotów oraz ma wpływ na proces formowania się struktury metalograficznej zgrzeiny.

*Czas zgrzewania* jest parametrem ściśle związanym z natężeniem prądu zgrzewania i siłą docisku. W zależności od zastosowanego programu zgrzewania czas zgrzewania może zawierać następujące czasy składowe:

- czas docisku wstępnego,
- czas podgrzewania,
- czas przepływu prądu zgrzewania lub impulsów zgrzewania i przerw między nimi,
- czas docisku końcowego,
- czas obróbki cieplnej.

Czas zgrzewania punktowego dobierany jest wspólnie z natężeniem prądu zgrzewania, ponieważ oba te parametry będą decydować o ilości wydzielonego ciepła w złączu.

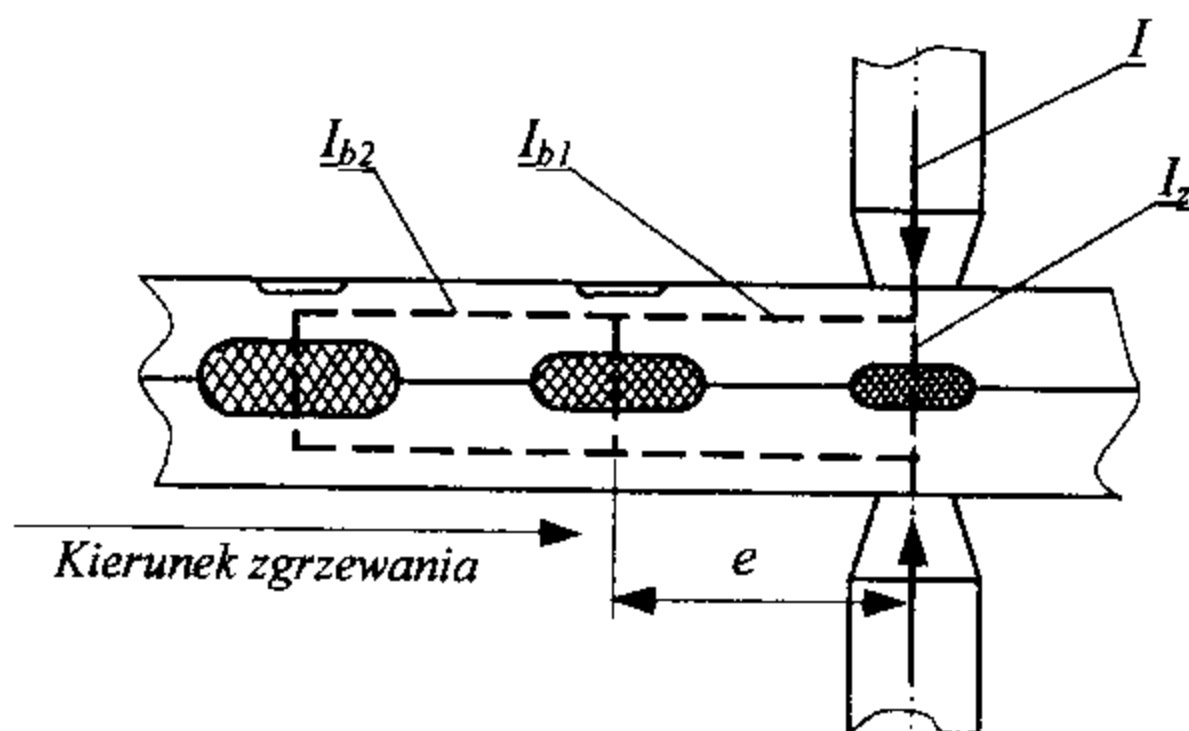
*Powierzchnia styku elektrody* może być płaska lub kulista, w zależności od rodzaju zgrzewanych materiałów i konstrukcji zgrzewarki. Średnicę powierzchni elektrody lub promień zaokrąglenia końcówki roboczej elektrody ustala się na podstawie optymalizacji wszystkich parametrów zgrzewania.

Zgrzewanie oporowe punktowe może być prowadzone prądem stałym oraz przemiennym. Zgrzewanie prądem stałym stało się możliwe dzięki wprowadzeniu do użytkowania zgrzewarek inwertorowych prądu stałego o wysokiej częstotliwości nawet do 10 kHz.

Zgrzewanie oporowe punktowe jest stosowane do połączenia blach w co najmniej w kilku punktach. Złącza punktowe należy tak projektować, aby zgrzeiny w wykonanej konstrukcji pracowały na działanie sił ścinających. Zgrzeiny grupuje się w złączu, zależnie od rodzaju konstrukcji w jednym lub kilku rzędach. Ze względu na zjawisko bocznikowania prądu zgrzewania należy stosować odpowiednie odległości między zgrzeinami, tzw. podziałkę zgrzein. Bocznikowanie jest zjawiskiem niekorzystnym ponieważ każda następna zgrzeina wymaga zwiększenia prądu zgrzewania. W czasie wykonywania pierwszej zgrzeiny cały prąd przepływa między elektrodami najkrótszą drogą. W czasie następnych zgrzein metalowe połączenie poprzedniej zgrzeiny stanowi dla prądu dodatkową ścieżkę o małej oporności. Całkowity prąd rozdziela się pomiędzy

nowe miejsce styku i istniejącą zgrzeinę. Stosunek rozdziału prądu zależy głównie od odległości między punktami styku blach. Przy tym samym natężeniu prądu druga zgrzeina zawsze będzie mniejsza (rys. 10.6).

W zgrzewaniu oporowym punktowym przyjmuje się, że podziałka ( $e$ ) nie powinna być mniejsza od  $3d_e$  (rys. 10.6). Natomiast zgrzeiny skrajne wykonuje się w odległości co najmniej  $1,5d_e$  od krawędzi zgrzewanych elementów w celu uniknięcia odkształcenia brzegów i wyprysku ciekłego metalu na zewnątrz.



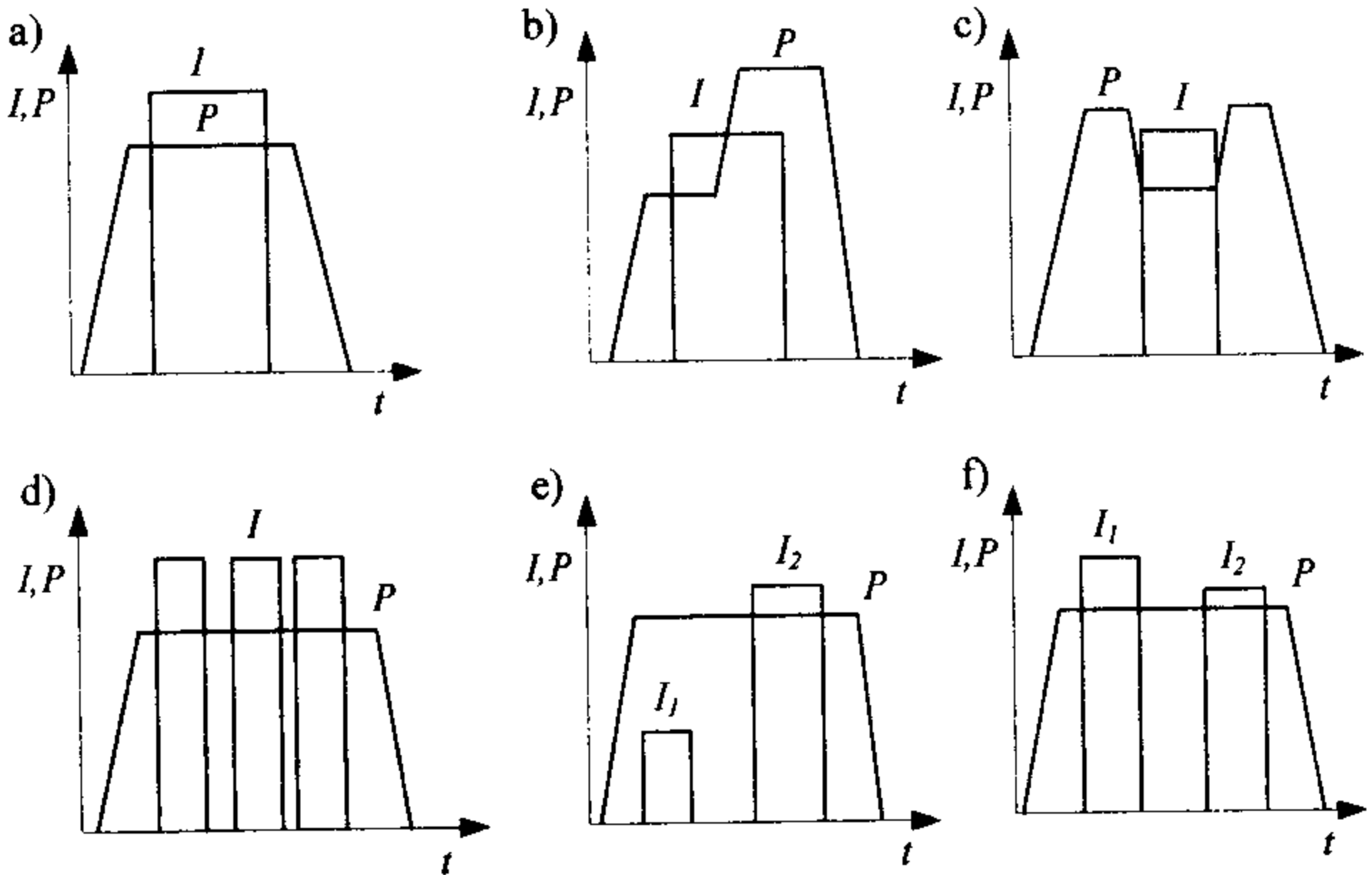
Rys. 10.6. Zjawisko bocznikowania prądu elektrycznego podczas zgrzewania punkowego:  $e$  – podziałka szwu,  $I$  – prąd zasilania,  $I_z$  – prąd zgrzewania,  $I_{b1}$  – prąd bocznikowania przez pierwszą wykonaną zgrzeinę,  $I_{b2}$  – prąd bocznikowania przez drugą wykonaną zgrzeinę

Zgrzewanie przedmiotów o tych samych grubościach może być dokonywane przy zastosowaniu parametrów miękkich lub twardych. Parametry miękkie charakteryzują się mniejszym prądem zgrzewania, dłuższym czasem i mniejszą siłą docisku. Parametry twarde – to większy prąd zgrzewania, krótszy czas i większa siła docisku.

Moment docisku elektrod, siła i czas trwania docisku, moment włączenia prądu, wielkość natężenia prądu i czas jego przepływu są programowane w tzw. programie zgrzewania, obejmującym pełny przebieg operacji składających się na wykonanie zgrzeiny (rys. 10.7).

Na rys. 10.7 przedstawiono przykłady różnego rodzaju programów zgrzewania, które mogą być stosowane w praktyce. W programie najprostszego typu (rys. 10.7a) docisk elektrod jest stały; prąd o praktycznie stałym natężeniu przebiega bez przerw. Wykres przedstawiony na rys. 10.7b jest przewidziany dla zgrzewania z operacją przekuwania (polepszenie struktury poprzez zwiększony docisk przed wyłączeniem prądu i w okresie stygnięcia). Na wykresie 10.7c przedstawiono program zgrzewania ze wzmocnionym początkowym

dociskiem (dobre umiejscowienie styku), ze zmniejszonym dociskiem podczas zgrzewania oraz przekuwanie pod zwiększonym dociskiem. Rysunek 10.7d przedstawia program zgrzewania z zastosowaniem szeregu impulsów, które stopniowo doprowadzają metal do stanu ciastowatości (zalecane przy zgrzewaniu grubych blach). Cykl pracy o zmiennych impulsach prądowych o różnym charakterze przedstawia rys. 10.7e (gdzie:  $I_1$  – prąd podgrzewania,  $I_2$  – prąd zgrzewania) i 10.7f (gdzie:  $I_1$  – prąd zgrzewania,  $I_2$  – prąd wyżarzania).

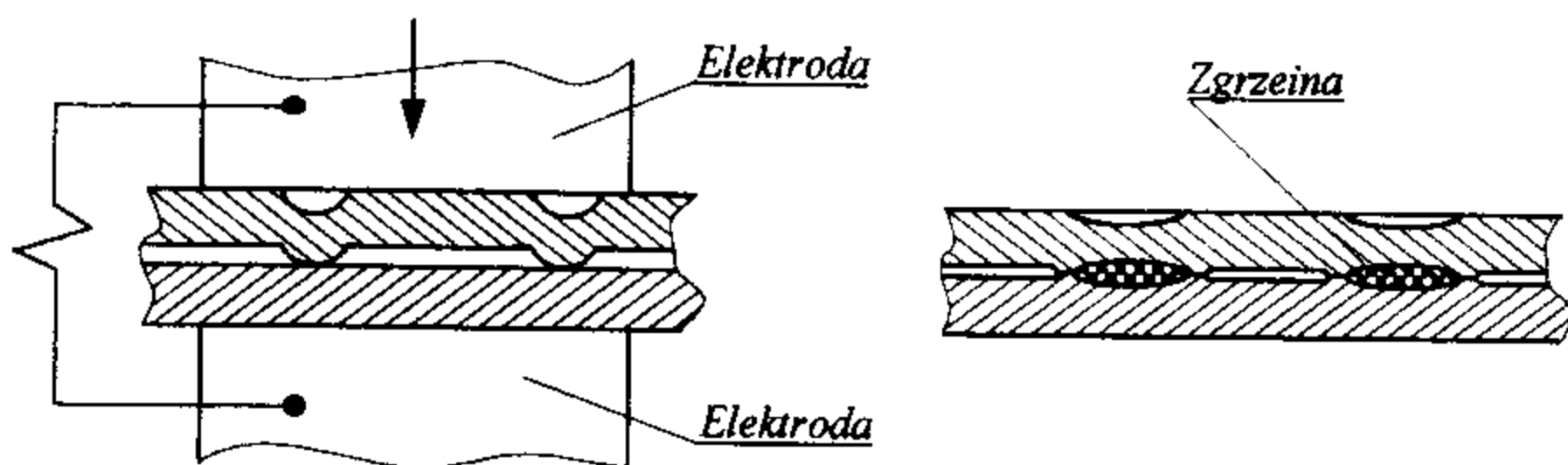


Rys. 10.7. Przykłady programów zgrzewania:  $I$  – prąd zgrzewania,  $P$  – siła docisku

### 10.2.3. Zgrzewanie garbowe

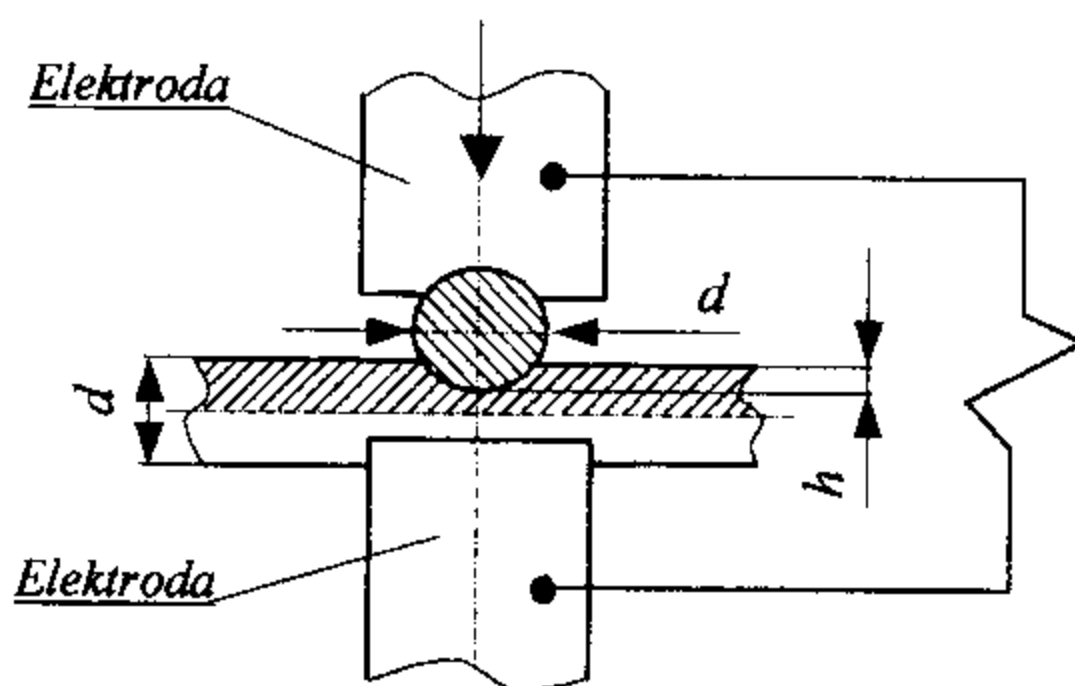
Zgrzewanie garbowe jest odmianą (modyfikacją) zgrzewania oporowego punktowego. W tym sposobie zgrzewania wielkość i rozmieszczenie punktów zgrzewania są z góry określone przez wytłoczenie garbów na jednej z części łączonych (rys. 10.8). Przy dociśnięciu obu części na zgrzewarce między płaskimi elektrodami o dużej powierzchni z jednoczesnym przepuszczeniem prądu silnie nagrzane garby ulegają spłaszczeniu i otrzymuje się w tych miejscach zgrzeiny podobne do zgrzein punktowych.

Zgrzewanie garbowe stosowane jest głównie do złączy przylgowych, przy tym szereg zgrzein może być wykonane przez jedną parę płaskich elektrod.



Rys. 10.8. Schemat procesu zgrzewania garbowego przedmiotu płaskiego z garbem

Jednym ze sposobów zgrzewania garbowego jest zgrzewanie prętów na krzyż (wykorzystanie garbów naturalnych) (rys. 10.9).



Rys. 10.9. Schemat garbowego zgrzewania oporowego złącza krzyżowego prętów

Dodatkowym wskaźnikiem procesu charakteryzującym warunki zgrzewania jest sumaryczna wartość osadzenia złącza ( $h$ ), która orientacyjnie powinna wynosić co najmniej  $0,25d$ . Najkorzystniejszy jest układ prętów ułożonych pod kątem  $90^\circ$ . Przy ułożeniu prętów pod kątem nie mniejszym niż  $60^\circ$  warunki zgrzewania pozostają nie zmienione. Dalsze zmniejszanie kąta powoduje konieczność zwiększenia prądu i czasu zgrzewania.

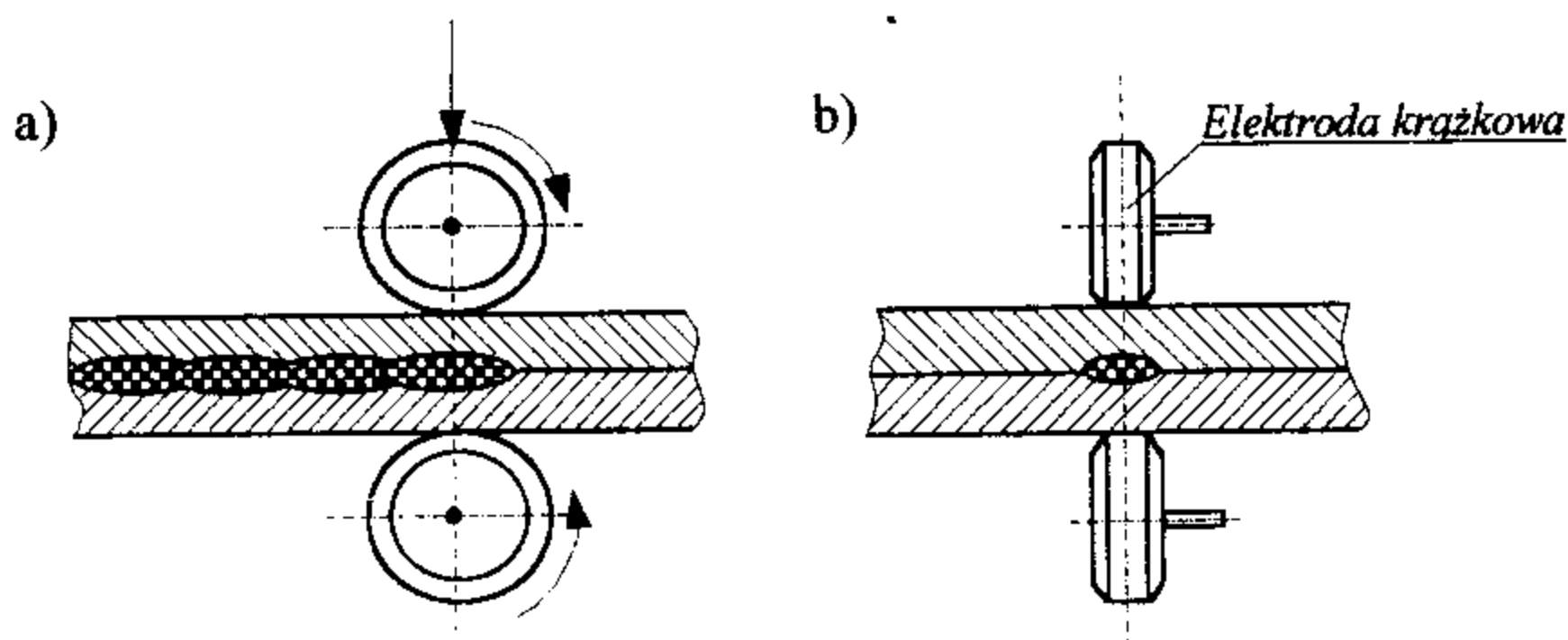
Podstawowymi parametrami zgrzewania garbowego są:

- natężenie prądu,
- czas zgrzewania,
- siła docisku.

Podobnie jak w zgrzewaniu punktowym, w zgrzewaniu garbowym stosuje się proste i złożone programy zgrzewania, jak i również z procesami podgrzewania i obróbki cieplnej.

### 10.2.4. Zgrzewanie liniowe

Zgrzewanie oporowe liniowe polega na łączeniu elementów za pomocą szwu wielu zgrzein, czyli zespołu zgrzein punktowych, ułożonych w jednej linii zgrzewania w wyniku zastosowania elektrod krążkowych (rys. 10.9).



Rys. 10.9. Schemat zgrzewania liniowego: a – przekrój podłużny przez zgrzeinę, b – przekrój poprzeczny

Zgrzeina liniowa powstaje poprzez kolejne nakładanie się zgrzein punktowych w wyniku przepływu prądu zgrzewania jak i wywierania siły docisku przez elektrody krążkowe. Występują tu podobne zjawiska cieplne i elektryczne jak przy zgrzewaniu punktowym. Jednak występuje tu intensywniejsze bocznikowanie prądu zgrzewania.

Ze względu na sposób tworzenia się zgrzeiny w zgrzewaniu liniowym można wyróżnić następujące programy:

- 1) z ciągłym ruchem elektrod krążkowych względem zgrzewanego przedmiotu i ciągłym przepływem prądu,
- 2) z ciągłym ruchem elektrod krążkowych względem zgrzewanego przedmiotu i z przerywanym przepływem prądu,
- 3) z przerywanym ruchem elektrod krążkowych i przerywanym włączeniem prądu, tzw. zgrzewanie krokowe.

We wszystkich wyżej wymienionych programach zgrzewania siła docisku jest stała w ciągu całego procesu zgrzewania, podobnie jak przy zgrzewaniu punktowym. Zgrzewanie może być prowadzone jednostronnie (wykorzystując podkładkę miedzianą) lub dwustronnie jednym lub dwoma szwami.

Do podstawowych parametrów zgrzewania liniowego zalicza się:

- natężenie prądu zgrzewania,
- siła docisku,
- prędkość zgrzewania,

- czas przepływu prądu zgrzewania,
- czas przerwy w przepływie prądu,
- wymiary robocze elektrody krążkowej (średnica, szerokość robocza elektrody).

Natężenie prądu i czas zgrzewania powinny być tak dobrane, aby mogły powstać poszczególne punkty zgrzein tworzących łańcuch zgrzein (szew). Czas przerwy i prędkość zgrzewania dobiera się w ten sposób, żeby uzyskać optymalną podziałkę i zachodzenie na siebie poszczególnych punktów zgrzeiny na  $1/3 - 1/2$  ich długości. Wielkość podziałki uzależniona jest od grubości i rodzaju zgrzewanych metali.

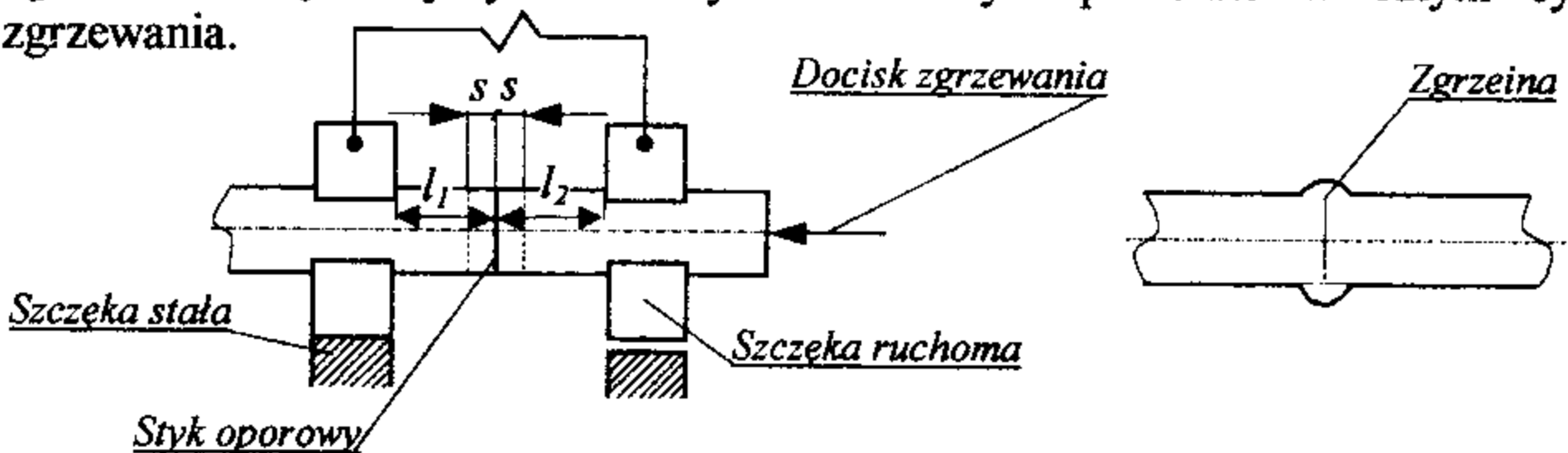
Szerokość części roboczej elektrody oraz jej średnicę dobiera się w zależności od grubości zgrzewanych przedmiotów i rodzaju metalu.

## 10.2.5. Zgrzewanie doczołowe

### 10.2.5.1. Zgrzewanie doczołowe zwarciove

Zgrzewanie doczołowe zwarciove jest procesem, w którym trwałe połączenie otrzymuje się dzięki nagrzewaniu oporowemu silnie dociśniętych do siebie powierzchni styku przedmiotów i następnie odkształceniu plastycznemu po osiągnięciu wymaganej temperatury zgrzewania (rys. 10.10).

Przy zgrzewaniu zwarciowym przekroje łączonych przedmiotów dociśka się do siebie przed włączeniem prądu. Gdy metal pod działaniem prądu rozgrzeje się do stanu uplastycznienia (ciastowatości), następuje charakterystyczne spęczenie metalu w miejscu łączonym. Natężenie prądu oraz siła docisku zgrzewania są utrzymywane zwykle na stałym poziomie w całym cyklu zgrzewania.



Rys. 10.10. Schemat zgrzewania zwarciowego pręta:  $s$  – naddatek na spęczenie,  $l_1, l_2$  – długość mocowania

W zgrzewaniu zwarciowym szczególną rolę odgrywa czystość powierzchni zewnętrznej w obszarze mocowania w szczękach zgrzewarki jak i



powierzchni czołowych zgrzewanych przedmiotów. Jeżeli powierzchnie czołowe nie są dokładnie dopasowane lub zanieczyszczone, to w miejscach słabiej rozgrzanych może wystąpić przyklejenie.

Podstawowymi parametrami zgrzewania zwarciovego są:

- natężenie prądu,
- siła docisku,
- długość umocowania,
- naddatek na spęczanie,
- czas zgrzewania (czas przepływu prądu).

Zgrzewanie zwarciove znajduje zastosowanie do łączenia prętów, rur, kształtowników, obręczy, ogniw łańcuchów wykonanych ze stali węglowych, niskostopowych, wysokostopowych, stopów oporowych, miedzi i jej stopów, aluminium i jego stopów, stopów niklu oraz metali szlachetnych. Metoda ta ma jednak małą sprawność energetyczną do łączenia przedmiotów o większych przekrojach.

#### 10.2.5.2. Zgrzewanie doczołowe iskrowe

W metodzie zgrzewania doczołowego iskrowego prąd zgrzewania jest włączany przy styku otwartym, a docisk następuje na samym końcu procesu (rys. 10.11a). Podczas zbliżania się obu części zgrzewanych prąd przepływa najpierw między nielicznymi wysuniętymi punktami styku, nadtapiając nierówności przekroju. Utworzone „mostki” ciekłego metalu i tlenków zostają wyrzucane w postaci snopów iskier pozostawiając na łączonej powierzchni drobne wgłębienia (kratery) (rys. 10.11b). Proces ten trwa tak długo, aż powierzchnie łączone pokryją się jednolitą warstewką płynnego metalu, a dalsze głębsze warstwy osiągną temperaturę plastyczności.

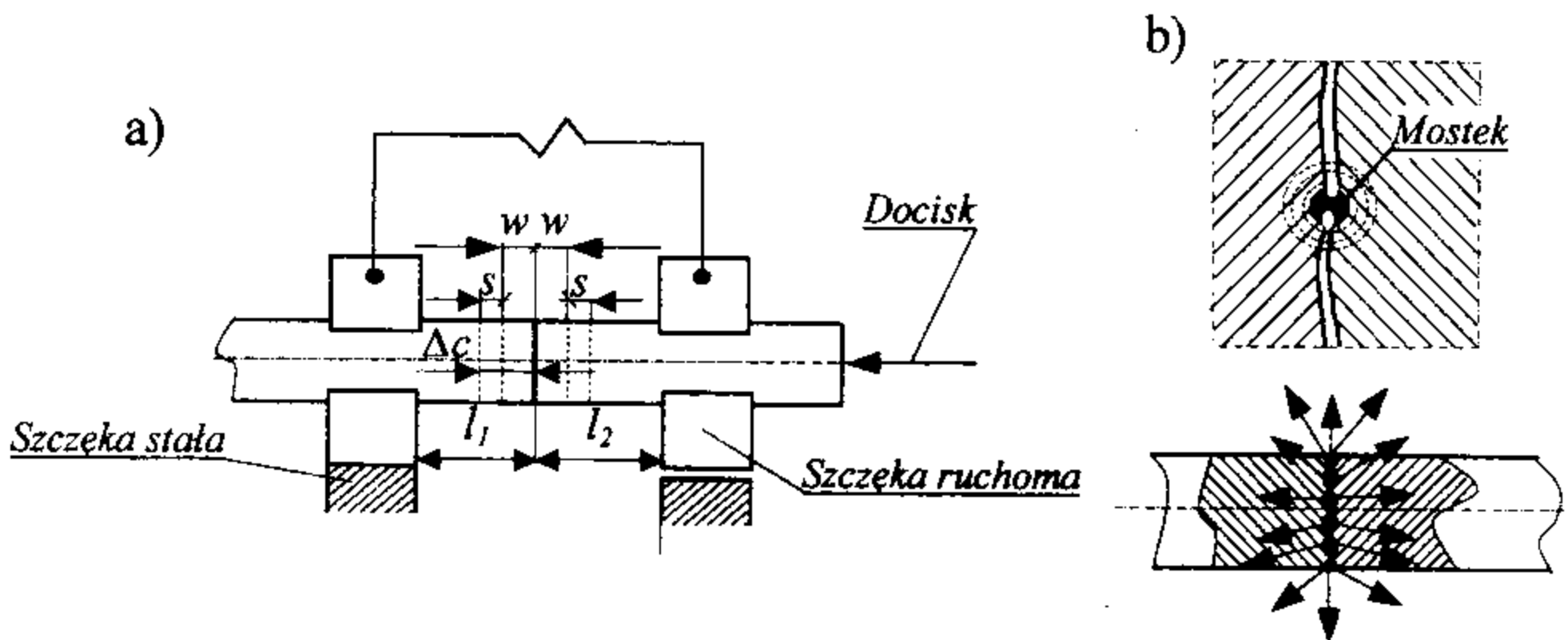
Gdy przy końcu drogi ruchomej szczęki iskrzenie obejmie całą powierzchnię, następuje silny docisk, stopiony metal i żużel zostają wyciśnięte na zewnątrz w postaci wypływki (rąbka), którą usuwa się przez oszlifowanie.

Ze względu na charakter przebiegu procesu zgrzewania rozróżnia się zgrzewanie z wyiskrzaniem ciągłym oraz zgrzewanie iskrowe z podgrzewaniem, którego zadaniem jest ułatwienie zapoczątkowania wyiskrzania.

W porównaniu ze zgrzewaniem zwarciovym zgrzewanie oporowe iskrowe charakteryzuje się następującymi zaletami:

- tańsze przygotowanie powierzchni zgrzewanych, które nie wymagają dokładnej obróbki, czystości ani dopasowania, gdyż wyrównanie powierzchni następuje samoczynnie poprzez proces wyiskrzania, a nadtopiony metal i jego pary zapobiegają przenikaniu tlenu i azotu do roztopionych powierzchni,

- mniejsze zużycie prądu i większa szybkość procesu,
- wyższe wartości właściwości wytrzymałościowych złącza.



Rys. 10.11. Schemat zgrzewania iskrowego: a – zasada zgrzewania, b- schemat powstawania mostków;  $s$  – naddatek na spęczanie,  $w$  – naddatek na wyiskrzanie,  $\Delta c$  – całkowity naddatek na wyiskrzanie i spęczanie,  $l_1, l_2$  – długość mocowania

Do podstawowych parametrów zgrzewania iskrowego zalicza się:

- naddatek na wyiskrzanie,
- naddatek na spęczanie,
- prędkość wyiskrzania,
- natężenie prądu zgrzewania,
- prędkość spęczania,
- siłą docisku spęczania,
- długość mocowania.

Zgrzewanie oporowe iskrowe znajduje szerokie zastosowanie do łączenia doczołowego: rur, drutów, prętów, kształtowników, odkuwek, taśm, obręczy, blach, narzędzi skrawających, wałów itp. Można zgrzewać przedmioty wykonane ze stali węglowych, niskostopowych, wysokostopowych, miedzi i jej stopów, aluminium i jego stopów, tytanu oraz żeliw sferoidalnych. Możliwe jest również łączenie stali z miedzią, miedzi z aluminium, stali niskowęglowych ze stalą narzędziową.

### 10.3. Część praktyczna

#### 10.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- zgrzewarka do zgrzewania punktowego,
- zgrzewarka kleszczowa z elektrodami do zgrzewania prętów na krzyż,
- zgrzewarka oporowa doczołowa,
- przyrząd do pomiaru natężenia prądu zgrzewania,
- próbki z blachy niskowęglowej (odcinki taśmy) o grubości 0,8 ÷ 1,2 mm,
- pręty ze stali niskowęglowych o średnicy 5 mm,
- sprzęt pomocniczy i ochronny,
- plansze poglądowe,
- instrukcje stanowiskowe zgrzewania.

#### 10.3.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się z instrukcją obsługi zgrzewarek, bhp i przebiegu części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie się z budową zgrzewarek oraz doбором parametrów zgrzewania,
- zapoznanie ćwiczących z techniką zgrzewania stali i innych metali,
- wykonanie przez ćwiczących złączy zgrzewanych punktowo, garbowo i doczołowo,
- przeprowadzenie badań wykonanych złączy,
- dyskusja i podsumowanie wyników ćwiczenia.

### 10.4. Literatura

1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i ciecie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Służalec A.: Technologia zgrzewania. Politechnika Częstochowska. Częstochowa 1975.
3. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT. Warszawa 1998.

## 11. LUTOWANIE

### 11.1. Wstęp

Lutowanie jest jedną z metod spajania metali. Polega na trwałym łączeniu metali jednakowych lub różnorodnych przy pomocy metalu dodatkowego, zwanego *lutem*. Podczas lutowania brzegi elementów łączonych są w stanie stałym, natomiast ciekły lut doprowadza się do szczeliny między elementy łączone. Lut po stopieniu, gdy już stanowi część złącza lutowanego, nosi nazwę *lutowia*.

Lutowanie znajduje bardzo szerokie zastosowanie zarówno w postaci lutowania ręcznego, jak i w masowej, zautomatyzowanej produkcji. Na ogół lutowanie ma zastosowanie w przypadkach, gdy:

- grubość przedmiotów jest niewielka (blaszki, rurki itp.),
- przedmiot nie może być nagrzany do wysokiej temperatury (obawa przed powstaniem naprężeń),
- wymagania wytrzymałościowe są niewielkie, a złącze musi zapewnić tylko szczelność albo dobrą przewodność elektryczną,
- łączy się dwa różne metale, a nie ma możliwości zastosowania innych spawalniczych metod spajania,
- łączy się metal z niemetałem, np. miedź ze szkłem czy też z ceramiką lub kompozytami,
- duża ilość złączy jest blisko siebie, a wielokrotne podgrzewanie jest niepożądane.

W zależności od temperatury topnienia rozróżniamy luty miękkie i luty twarde, co w efekcie spowodowało powstanie pojęcia technologicznego: *lutowanie miękkie* i *lutowanie twarde*. Przyjęto, że lutowanie miękkie to takie, którego temperatura topnienia lutu nie przekracza  $450^{\circ}\text{C}$ . Powyżej tej temperatury mamy do czynienia z lutowaniem twardym.

W procesie lutowania powinna wystąpić następująca zależność temperaturowa:

$$T_s < T_l \leq T_p < T_m \quad //11.1//$$

gdzie:

$T_s$  - temperatura topnienia lutu,

$T_l$  - temperatura lutowania,

$T_p$  - temperatura nagrzania części lutowanych (jest to temperatura całkowitego lub lokalnego nagrzania),

$T_m$  - temperatura topnienia niższej topliwego materiału.

Przy doborze lutów i topnika do lutowania metali konstrukcyjnych bierze się pod uwagę zwilżalność i rozplýwność lutu, wytrzymałość przyszłego złącza, jego przewodność elektryczną i cieplną, plastyczność, temperaturę lutowania oraz metodę lutowania.

## 11.2. Pojęcia technologiczne w procesie lutowania

W procesie lutowania występują następujące pojęcia technologiczne:

**Lutowność** – zdolność łączonych metali i lutu do tworzenia złącza lutowanego o odpowiednich założonych własnościach w danych warunkach.

**Lutowina** – odpowiednik spoiny – stop wiążący łączone elementy.

**Lutowie** – stopiony lut w procesie lutowania.

**Szczelina lutownicza** – przestrzeń utworzona pomiędzy elementami łączonymi, która jest wypełniana roztopionym lutem.

**Topniki lutownicze** – substancje chemiczne powierzchniowo aktywne, których zadaniem jest utworzenie powłoki rozpuszczającej tlenki łączonych metali oraz zmniejszających napięcie powierzchniowe ciekłego lutu względem powierzchni lutowanego metalu.

## 11.3. Fizyczne aspekty procesu lutowania

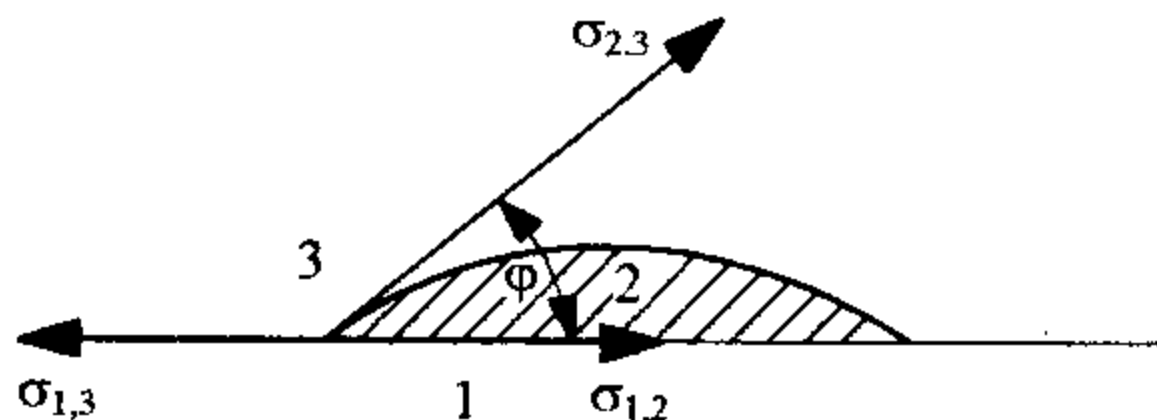
W procesie lutowania jak wiemy nie występuje wymieszanie stopionego lutu z materiałem łączonych elementów, występują w nim natomiast zjawiska **zwilżalności, rozplýwności, dyfuzja, adhezja, kohezja i kapilarność złącza**.

**Zwilżalność** – lut stapiany na powierzchni podgrzanego metalu może tworzyć:

- cienką, nie splekaną i rozpostartą powłokę, której kąt zetknięcia z powierzchnią elementu lutowanego jest bliski  $0^\circ$ ,
- kroplę spłaszczoną w sposób trwały o ostrym kącie styku z powierzchnią elementu lutowanego,
- kroplę kulistą, która po pewnym przegrzaniu spłaszcza się, ale w czasie stygnięcia tworzy ponownie kroplę kulistą, tworząc kąt zetknięcia  $\geq 90^\circ$ .

W wymienionych wyżej trzech przypadkach mamy do czynienia ze stopniem zwilżania, który określany jest przez kąt zetknięcia lutu z powierzchnią podłoża -  $\varphi$ . Kąt ten jest zwany kątem zwilżania (rys. 11.1).

**Rozplýwność** – rozplýwność lutu (rozprowadzenie lutu po powierzchni) jest ściśle związana ze zwilżalnością. Na stopień i charakter rozplýwności ma wpływ współzależność chemiczna lutu i łączonego metalu, temperatura procesu, aktywność temperaturowa.



Rys. 11.1. Rozkład napięć powierzchniowych w procesie zwilżania stałego metalu przez płynny lut: 1 – metal zwilżany, 2 – płynny lut, 3 – medium wspomagające proces zwilżania, 4 –  $\varphi$  kąt zwilżania,  $\sigma_{1,2}$  – napięcie na granicy faz zwilżanego metalu stałego i płynnego lutu,  $\sigma_{2,3}$  – napięcie na granicy faz płynnego lutu i ciekłego topnika,  $\sigma_{1,3}$  – napięcie na granicy faz zwilżanego metalu stałego i ciekłego topnika

Rozpływność lutu określa się w pewnych określonych warunkach porównawczo jako wielkość powierzchni pokrytej lutem oraz wyznacza jako współczynnik rozpływności, który oblicza się w dwojaki sposób:

$$\Theta_s = \frac{S_{sr} + S_o}{S_o} \quad /11.2/$$

gdzie:

$\Theta_s$  – współczynnik rozpływności,  
 $S_{sr}$  – średnia powierzchnia zajęta przez lut,  
 $S_o$  – rzut płaski kulki lutu.

$$\Theta_H = \frac{D - H}{H} 100\% \quad /11.3/$$

gdzie:

H – wysokość stopionej kulki lutu nad powierzchnią metalu,  
D – średnica kulki lutu.

Za lutowność dostateczną przyjęto uważać taką, przy której ten współczynnik jest większy od 70%.

**Kapilarność – włoskowatość** – zjawisko, które występuje w procesie lutowania ściśle współzależy ze zwilżalnością. Ma to znaczenie przy wypełnianiu szczeliny między powierzchniami lutowanymi. Płynny lut w zależności od zwilżalności tworzy menisk wklęsły lub wypukły. Menisk wypukły powstaje w wyniku niedostatecznej zwilżalności.

**Dyfuzja** – zdolność przenikania cząstek łączonego metalu do płynnego lutu i odwrotnie; czynnik istotny w procesie lutowania. Zdolność tę charakteryzuje współczynnik dyfuzji  $D$ :

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{\alpha}{RT}} \quad /11.4/$$

gdzie:

- $D_0$  - współczynnik stały dla danej sieci krystalograficznej,
- $e$  - podstawa logarytmu naturalnego,
- $T$  - temperatura,
- $R$  - stała gazowa,
- $\alpha$  - energia aktywacji (energia potrzebna do oderwania atomu z położenia równowagi).

Czynnikami wpływającymi na szybkość i głębokość dyfuzji są:

- temperatura lutowania – decyduje o płynności lutu i zdolności penetrującej jego cząsteczek,
- czas trwania procesu lutowania – decyduje o głębokości dyfuzji, im większy czas trwania tym głębsza dyfuzja,
- przewodność cieplna – im niższa przewodność cieplna, tym wolniej, płycej i trudniej przebiega dyfuzja,
- czystość powierzchni lutowanych – ułatwia przebieg procesu dyfuzji,
- dobór układu metal lutowany – lut – powinien uwzględniać zdolność do wzajemnej dyfuzji.

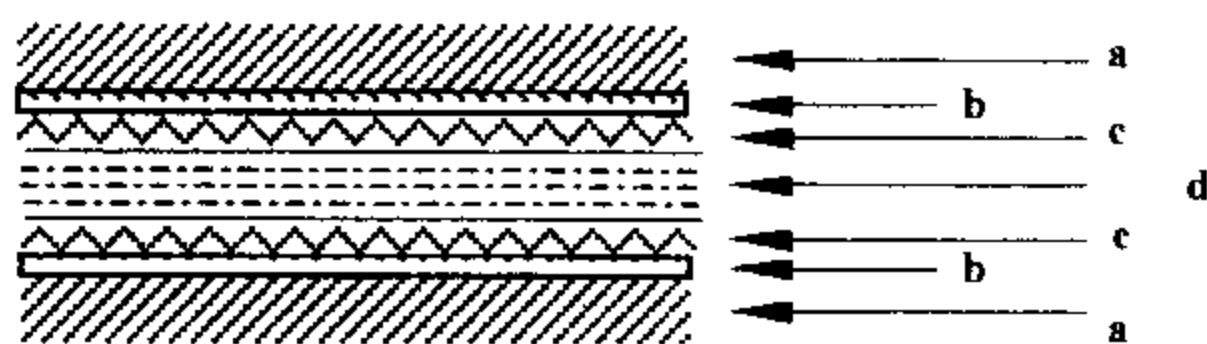
**Adhezja** – jest to zjawisko przyciągania między cząsteczkami ciekłego lutu, a cząsteczkami lutowanych elementów.

**Kohezja** – siły spójności między cząsteczkami ciekłego lutu.

Zjawiska adhezji i kohezji decydują o możliwości wystąpienia zdolności zwilżania przez lut powierzchni lutowanych, czyli siły adhezji muszą być większe od sił kohezji.

## 11.4. Budowa lutowiny

Zasadniczo lutowina składa się z czterech następujących warstw – patrz rys. 11.2. Występowanie wszystkich czterech stref razem nie musi mieć miejsca. Strefa **b** rzadko jest widoczna wyraźnie, a strefy **c** i **d** są trudno rozpoznawalne w przypadkach gdy lutowina jest wąska i objęta całkowitą dyfuzją.



Rys. 11.2. Schemat budowy złącza lutowanego: a - materiał rodzimy o nie zmienionym składzie chemicznym, b - strefa dyfuzji o większej zawartości metalu lutowanego, c - strefa dyfuzji o większej zawartości lutu, d - lut o nie zmienionym składzie chemicznym

### 11.5. Źródło ciepła w procesie lutowania

Sposób doprowadzenia ciepła do elementów lutowanych spowodował powstanie różnych źródeł ciepła wykorzystywanych w procesie lutowania.

Źródła te można podzielić na:

- nagrzewające poprzez:
  - przewodność,
  - konwekcję,
  - promieniowanie
- nagrzewanie specjalnymi sposobami.

W nagrzewaniu przez przewodność stosuje się urządzenia, które w pierwszej kolejności same zostają podgrzane. Następnie źródła te przez bezpośredni kontakt z lutowanym przedmiotem przekazują nagromadzone ciepło, nagrzewając lut i elementy do wymaganej temperatury. Ma to miejsce przy zastosowaniu do lutowania lutownicą, za pomocą gorących płyt czy w odpowiednich kąpielach.

Nagrzewanie konwekcyjne ma miejsce, gdy nośnikiem ciepła jest powietrze, chociaż częściej stosowane są gazy obojętne, aktywne lub ich mieszaniny. Takie nagrzewanie występuje szczególnie przy lutowaniu palnikiem gazowym, w strumieniu gorącego gazu oraz w piecach.

Nagrzewanie przez promieniowanie występuje zasadniczo w przypadkach wymienionych powyżej, ale znaczenia nabiera dopiero w trakcie lutowania promieniami świetlnymi, emitowanymi przez odpowiednie lampy.

Specjalnymi sposobami nagrzewania są:

- nagrzewanie oporowe,
- nagrzewanie indukcyjne.

W zależności od zastosowania źródła ciepła lutowanie można podzielić na:

- lutowanie lutownicą,
- gazowe,
- kąpielowe,
- piecowe,



- oporowe,
- indukcyjne,
- ultradźwiękowe,
- tarciove,
- promieniami świetlnymi,
- chemiczne.

## 11.6. Lutowanie miękkie

### 11.6.1. Luty

Luty miękkie charakteryzują się niską temperaturą topnienia mieszczącą się w przedziale od kilkudziesięciu do 450° C, stosunkowo niską wytrzymałością, niską trwałością i dobrą plastycznością. Natomiast zaletą tych lutów jest możliwość wykonania połączeń w stosunkowo niskich temperaturach.

Składnikami podstawowymi lutów miękkich są metale niskotopliwe takie jak:

- cyna (232°C),
- ołów (327°C),
- antymon (631°C),
- cynk (419°C),
- kadm (321°C),
- bizmut (271°C),

Przeważnie luty miękkie są dwu lub więcej składnikowe. Wśród lutów miękkich zastosowanie mają (wg PN – EN 29453, PN – EN 23677):

- luty cynowo-ołowiowe,
- luty bezantymonowe,
- luty antymonowe,
- luty średnioantymonowe,
- luty cynowe,
- luty ołowiowe,
- luty cynkowe,
- luty kadmowe,
- luty bizmutowe i indowe.

### 11.6.2. Postać lutów miękkich

Luty miękkie występują w postaci: drutów litych, prętów, gąsek, granulek, folii, proszków, past oraz specjalnych kształtek. W przypadku lutów

cynowo-ołowiowych występują jako druty z rdzeniem topnikowym, najczęściej na bazie kalafonii (tzw. tinol). Ilość rdzeni dla tych lutów może wahać się w granicach od jednego do kilku. Złożoność przekroju drutu rdzeniowego spowodowana jest dążeniem do optymalnych warunków dozowania topnika wraz ze stapianiem się drutu (lutu).

### 11.6.3. Topniki

W procesie lutowania miękkiego używa się dwóch rodzajów topników – topniki nieorganiczne i topniki organiczne (wg PN – EN 29454-1). Chlorek cynku jest podstawowym topnikiem wśród topników nieorganicznych i stosowany jest najczęściej jako 20÷40% roztwór wodny. Temperatura topnienia chlorku cynku wynosi 283°C, a po jej przekroczeniu osiąga on maksymalną aktywność. Ograniczeniem stosowania topników zawierających tylko chlorek cynku jest to, że temperatury topnienia większości lutów miękkich, szczególnie lutów cynowo-ołowiowych jest znacznie niższa. To spowodowało, że najczęściej jako topniki nieorganiczne stosuje się wodne roztwory dwóch soli: chlorku cynku i chlorku amonu. Temperatura topnienia chlorku amonu jest większa niż temperatura topnienia chlorku cynku i wynosi 350°C, ale zmieszane w odpowiednim stosunku tworzą eutektykę o temperaturze topnienia 177°C. Topnik taki można stosować do lutowania wszystkimi lutami cynowo-ołowiowymi.

Topniki zawierające chlorek amonu i chlorek cynku można stosować do lutowania prawie wszystkich metali i stopów, wyjątkiem są elementy cynkowe i ocynkowane. Do lutowania tych elementów bardziej korzystne jest stosowanie topnika będącego roztworem wodnym kwasu solnego. Pozostałości topników nieorganicznych są silnie korozyjne, więc należy je stosować w przypadku, gdy jest możliwość ich usunięcia po procesie lutowania.

Wśród topników organicznych najpowszechniej stosowana jest kalafonia, otrzymywana z żywicy sosnowej. Podczas procesu lutowania, kalafonia reaguje z tlenkami miedzi i niektórych innych metali. W związku z powyższym stosowana jest w przemyśle elektronicznym w procesie lutowania obwodów drukowanych i innych podzespołów elektronicznych.

Do lutowania metali miękkich, szczególnie aluminium i jego stopów stosuje się topniki zawierające związki organiczne i nieorganiczne. Są to fluoroborany (amonu, cynku, kadmu), chlorki (amonu, cynku, litu, ołowiu, potasu), trójetyloamina. Topnikiem służącym do pobielania powierzchni jest tak zwany topnik reakcyjny zawierający chlorek cynawy i chlorek cynku.

### 11.6.4. Technologia lutowania miękkiego

Lutowanie miękkie jest najbardziej rozpowszechnioną metodą spajania, dzięki wykorzystaniu niskiej temperatury procesu i małej ilości dostarczanego ciepła. Metoda stosowana jest w produkcji masowej jak i w jednostkowej oraz przy naprawach.

Przed przystąpieniem do lutowania, w zależności od rodzaju łączonych metali należy dobrać odpowiedni lut i topnik. Powierzchnie, które będą łączone ze sobą należy bardzo dokładnie oczyścić i ściśle dopasować. W następnej kolejności w trakcie nagrzewania наносimy topnik. Kolejną czynnością jest pokrycie miejsca lutowania cienką warstwą lutu (pobielenie). Po pokryciu powierzchni lutem dociskamy elementy lutowanego siebie i ogrzewamy je aż do chwili rozplątnięcia się lutu.

W przypadku stosowania topników aktywnych chemicznie należy po ostygnięciu miejsca lutowania dokładnie wmyć wodą. Jest to czynność konieczna celem zabezpieczenia powierzchni przed korozją.

## 11.7. Lutowanie twarde

### 11.7.1. Luty

Lutami twardymi są luty, których temperatura topnienia przekracza  $450^{\circ}\text{C}$ . Najczęściej temperatura topnienia stosowanych lutów twardych mieści się w zakresie od  $550^{\circ}\text{C}$  do  $1100^{\circ}\text{C}$ .

Podstawową różnicą a jednocześnie zaletą lutów twardych w porównaniu z lutami miękkimi jest ich wytrzymałość, która jest wielokrotnie wyższa. Dodatkowo elementy lutowane tymi lutami mogą pracować w różnorodnych i zmiennych warunkach obciążeniowych, chemicznych i temperaturowych. Proces lutowania twardego przeprowadza się w znacznie wyższych temperaturach, co wymaga stosowania źródeł ciepła o większej mocy.

Luty twarde stosowane do lutowania metali ciężkich są stopami na osnowie miedzi, srebra i niklu, zaś do lutowania metali lekkich stosuje się luty na osnowie aluminium i magnezu.

Stosowane luty twarde to (wg PN – EN 1044):

- luty miedziane,
- luty miedziano-fosforowe,
- luty mosiężne i brązowe,
- luty miedziano-niklowe,
- luty srebrne,
- luty niklowe,

- luty na osnowie złota, platyny i palladu,
- luty aluminiowe i magnezowe.

### 11.7.2. Postać lutów twardych

Luty twarde występują w postaci: prętów otulonych, prętów rdzeniowych, pasków, drutów, blach, taśm, folii, granulek, proszków oraz past metalicznych.

### 11.7.3. Topniki

Większość topników do lutowania twardego zawiera boraks o temperaturze topnienia  $741^{\circ}\text{C}$  i kwas borowy o temperaturze topnienia  $577^{\circ}\text{C}$ . Zmieniając w odpowiedni sposób ilość boraksu i kwasu borowego można uzyskać temperaturę topnienia topnika w zakresie od  $580^{\circ}\text{C}$  do  $780^{\circ}\text{C}$ . Oba te związki reagują najaktywniej z tlenkami miedzi, cynku i żelaza. Topniki które zawierają boraks i kwas borowy stosuje się do lutowania stali węglowych, niskostopowych i miedzi oraz niektórych jej stopów przy użyciu lutów mosiężnych i srebrnych. Klasyfikację i techniczne warunki dostawy określa norma PN – EN 1045.

Do lutowania stali wysokostopowych oraz stopów metali o bardziej trwałych tlenkach stosuje się topniki, zawierające prócz boraksu i kwasu borowego dodatki aktywne w postaci chlorków, fluorków i fluoroboranów.

Osobną grupę stanowią topniki do lutowania twardego aluminium, magnezu i jego stopów. Topnikami tymi są mieszaniny chlorków i fluorków sodu, potasu, litu, cynku, kadmu, aluminium, których zakres temperaturowy maksymalnej aktywności wynosi od  $450^{\circ}\text{C}$  do  $600^{\circ}\text{C}$ . Specjalną odmianą topników do lutowania twardego są tzw. topniki lotne, które charakteryzują się dużą intensywnością parowania już w temperaturze pokojowej. Topnik lotny to roztwór alkoholowy estru metylowego kwasu borowego z dodatkiem odpowiednich składników stabilizujących i uaktywniających.

### 11.7.4. Technologia lutowania twardego

Proces lutowania twardego przeprowadza się w temperaturze bliskiej temperatury topnienia łączonych elementów. Należy przy tym pamiętać, aby nie doprowadzić do nadtopienia krawędzi.

Lutowanie twarde łączonych elementów stosuje się w przypadkach gdy nie zachodzi konieczność nadtapiania krawędzi oraz uzyskanie połączenia szczelnego i o dużej wytrzymałości połączenia.

Przed przystąpieniem do lutowania należy dobrać lut i topnik w zależności od rodzaju łączonych metali. Następnie należy powierzchnie elementów łączonych dokładnie oczyścić i dopasować. Dalszą czynnością jest naniesienie topnika w postaci np. pasty przed rozpoczęciem lutowania lub proszku już w momencie nagrzewania. Lut dodaje się w chwili uzyskania właściwej temperatury lutowania.

## 11.8. Część praktyczna

### 11.8.1. Wyposażenie aparaturowo - materiałowe

- lutownice transformatorowe i oporowe,
- stanowisko do lutowania płomieniem acetylenowo-tlenowym,
- lut cynowo-ołowiany w laskach,
- lut cynowo-ołowiany (tinol),
- lut miedziany w postaci drutu o  $\phi$  2÷3 mm,
- topnik do lutowania miękkiego – chlorek cynku,
- pasta lutownicza (np. SnCu3),
- topnik do lutowania twardego – boraks,
- płytki z blachy niskowęglowej o grubości 3÷4 mm i o wymiarach 40x40 mm,
- taśma stalowa o grubości 1÷1,5 mm o długości 50÷70 mm,
- materiały pomocnicze, instrukcja stanowiskowa, plansze.

### 11.8.1 Przebieg ćwiczenia

Zakres niniejszego ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się ze szczegółową instrukcją obsługi urządzeń i przebiegiem części praktycznej ćwiczenia,
- zapoznanie ćwiczących z zasadami i technologią lutowania miękkiego i twardego,
- dobór odpowiednich lutów i topników dla poszczególnych metod lutowania i materiałów lutowanych,
- lutowanie miękkie i twarde elementów wskazanych przez prowadzącego,
- dyskusja i podsumowanie wyników ćwiczenia.

## 11.9. Literatura

1. Radomski T., Ciszewski A.: Lutowanie. WNT. Warszawa 1971.
2. Praca zbiorowa. Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo. WNT. Warszawa 1983.

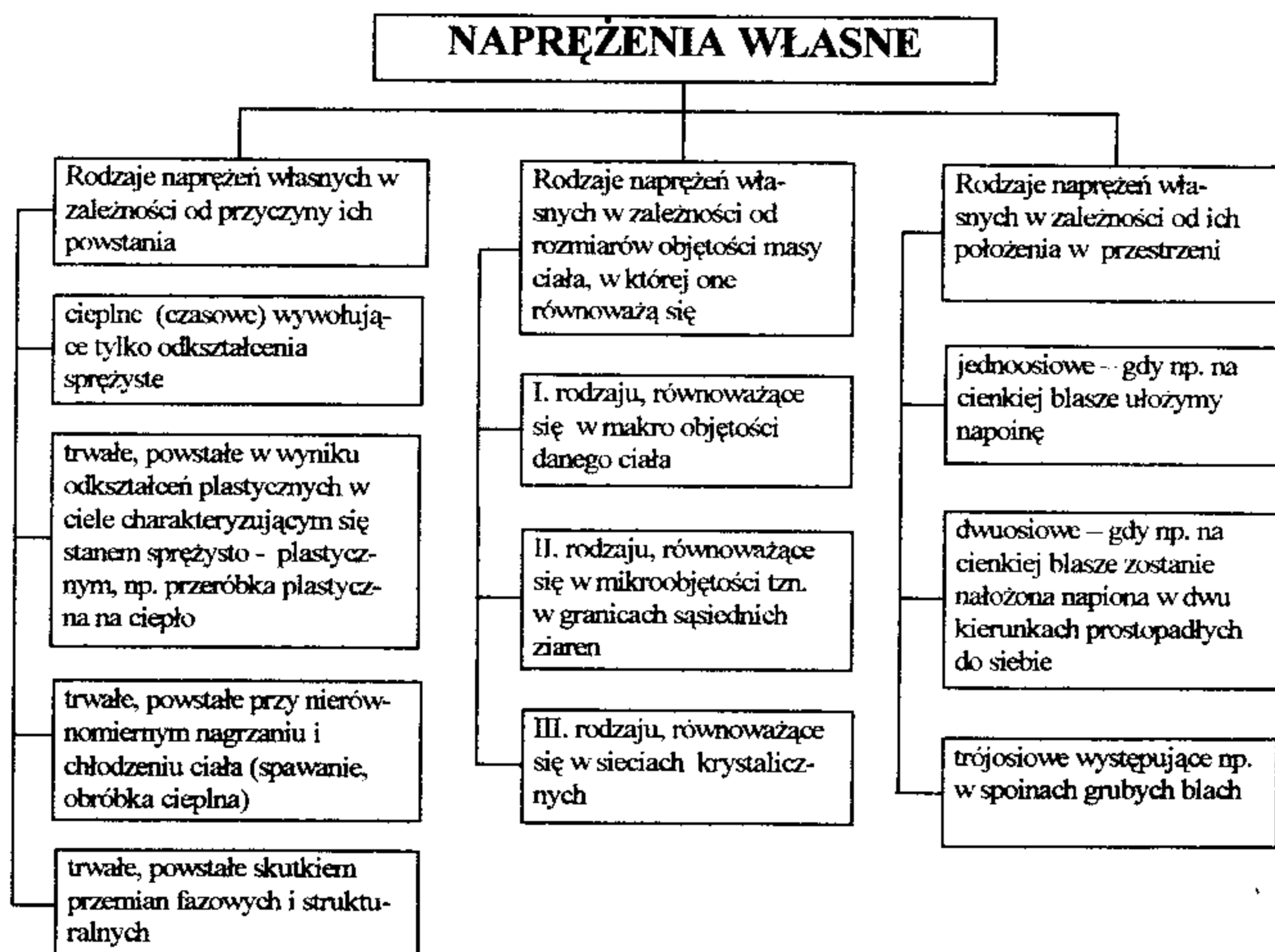
## 12. NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA SPAWALNICZE

### 12.1. Powstawanie i podział naprężeń własnych

W trakcie procesów technologicznych, zarówno podczas wytwarzania wyrobów hutniczych, jak też podczas wytwarzania konstrukcji, następują lokalne znaczne zmiany właściwości mechanicznych metali, które powinny być uwzględnione przy projektowaniu konstrukcji, a zwłaszcza spawanych. Zmianom właściwości mechanicznych metali w toku procesów przetwórczych towarzyszy zazwyczaj powstawanie naprężeń własnych, tj. takich które istnieją w elementach nie obciążonych zewnątrz.

Naprężenia własne można zdefiniować jako naprężenia, które równoważą się wzajemnie wewnątrz pewnego obszaru ciała i występują bez obciążenia zewnętrznego.

Naprężenia własne można podzielić w sposób przedstawiony na poniższym rysunku 12.1.



Rys. 12.1. Schemat podziału naprężeń własnych

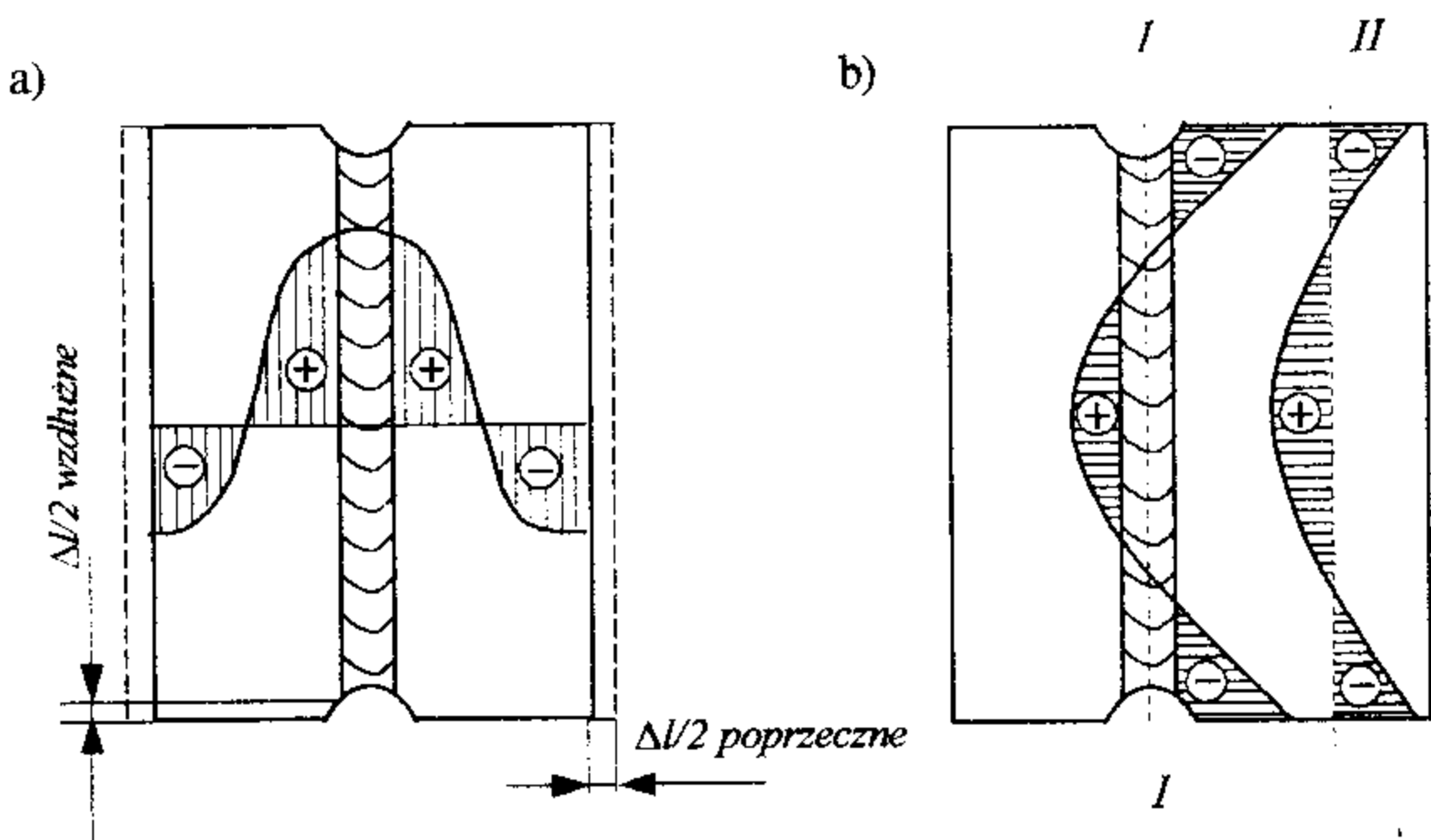
Bezpośrednimi przyczynami wywołującymi naprężenia własne są:

- nierównomierne nagrzanie i stygnięcie elementu,
- przemiany strukturalne związane ze zmianą objętości niektórych składników struktury,
- odkształcenie elementu na zimno z przekroczeniem granicy plastyczności w części przekroju.

Źródłem powstawania naprężeń spawalniczych są więc procesy cieplne zachodzące przy spawaniu oraz towarzyszące im przemiany strukturalne.

Na rysunku 12.2a przedstawiono naprężenia wzdłużne, które są składowymi normalnymi naprężeń własnych w przekroju prostopadłym do osi wzdłużnej spoiny. W spoinie i przylegającej do niej strefie materiału, gdzie nagrzanie spowodowało plastyczne skrócenie, występują naprężenia rozciągające, a dalej od spoiny naprężenia ściskające. Oprócz naprężeń wzdłużnych występują również naprężenia normalne w przekrojach równoległych do osi wzdłużnej spoiny, czyli naprężenia poprzeczne. Wartości naprężeń wzdłużnych i poprzecznych maleją wraz ze zbliżeniem się rozpatrywanego przekroju do brzegu płyty (rys. 12.2b).

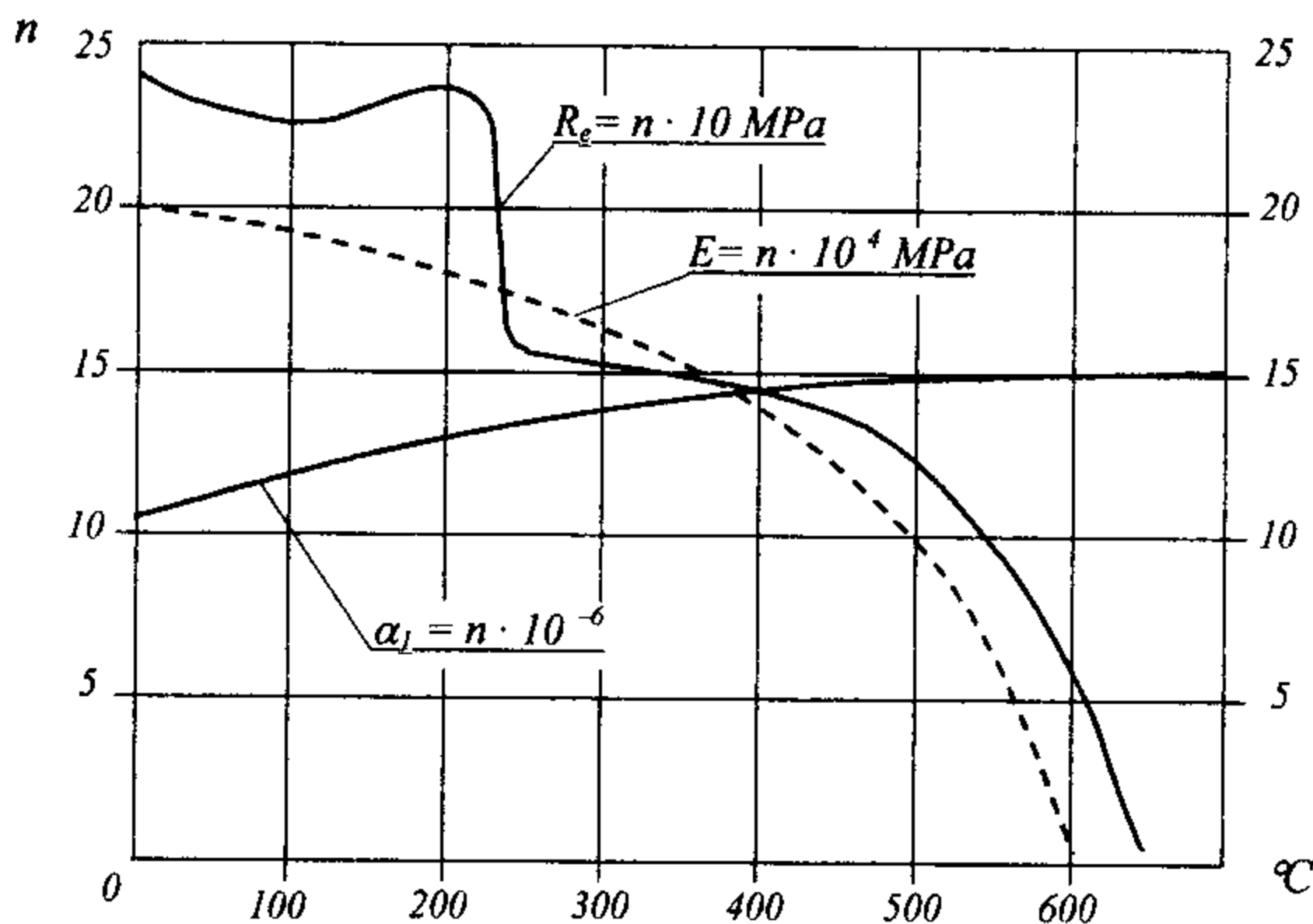
Właściwości wytrzymałościowe metali zmieniają się ze wzrostem temperatury. Aby lepiej zrozumieć powstawanie naprężeń własnych przy spawaniu np. stali należy zapoznać się ze zmianami jej właściwości fizycznych zachodzącymi w wyższych temperaturach.



12.2. Naprężenia spawalnicze w złączu doczołowym

## 12.2. Wpływ oddziaływania termicznego na powstanie naprężeń własnych

Na rys. 12.3 przedstawiono zmiany właściwości fizycznych stali miękkiej spawalnej w zależności od temperatury, tj. zmiany modułu sprężystości podłużnej  $E$  czyli modułu Yunga, granicy plastyczności  $R_e$  i współczynnika rozszerzalności  $\alpha_l$  w zależności od temperatury. W zakresie temperatur od 500 do 600°C moduł sprężystości maleje, tak że praktycznie biorąc stal w temperaturze powyżej 600°C traci właściwości sprężyste. Podobnie przebiega zmiana granicy plastyczności. Natomiast współczynnik rozszerzalności wzrasta tylko nieznacznie.



Rys. 12.3. Wpływ temperatury na zmianę właściwości fizycznych miękkiej stali węglowej

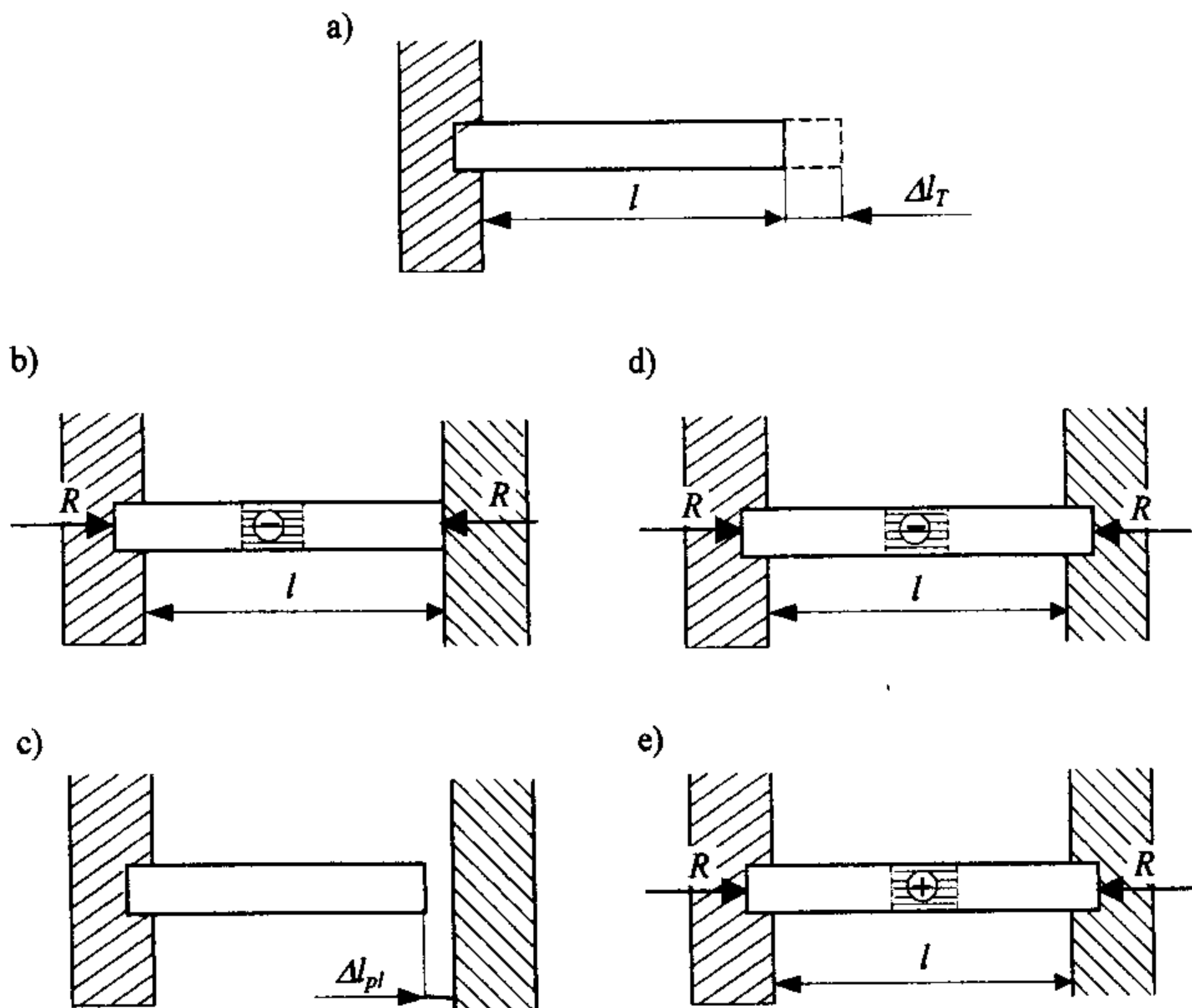
## 12.3. Wpływ temperatury na powstanie naprężeń i odkształceń

Mechanizm powstawania odkształceń i naprężeń własnych można rozpatrzeć na przykładzie nagrzanego pręta. Jeśli pręt o długości  $l$  jest zamocowany jednostronnie i posiada możliwość swobodnego wydłużania się (rys. 12.4a) to po równomiernym podgrzaniu go na całym przekroju do temperatury  $T$ , wydłuży się on o odcinek  $\Delta l_T$ , a po ostudzeniu powróci do



wymiarów wyjściowych. Nie występują tu naprężenia własne ani też trwałe odkształcenia. W przypadku zaś, gdy jeden koniec pręta jest sztywno zamocowany, a drugi opiera się swobodnie o niepodatną ściankę (rys. 12.4b) powstaje sytuacja, że pręt podczas nagrzania nie mogąc się wydłużyć – spęcza się. W pręcie pojawiają się naprężenia ściskające.

Obliczenia wskazują, że jeśli pręt wykonany jest ze stali niskowęglowej o granicy plastyczności  $R_e = 235 \text{ MPa}$ , to nagrzanie go do temperatury nie przekraczającej  $100^\circ\text{C}$  spowoduje tylko powstanie w nim odkształceń sprężystych. Przekroczenie jednak tej temperatury powoduje powstanie w nim oprócz odkształceń sprężystych jak i również odkształceń plastycznych. Innymi słowy, jeśli temperatura nagrzania nie przekracza  $100^\circ\text{C}$ , to po ostudzeniu nie powstaną w pręcie odkształcenia plastyczne, po przekroczeniu zaś tej temperatury nastąpi skrócenie pręta o odcinek  $\Delta l_{pl}$  (rys. 12.4c).



Rys. 12.4. Schemat powstawania odkształceń i naprężeń własnych w pręcie jednostronnie i dwustronnie utwierdzonym

Na rys. 12.4d,e przedstawiono przypadek, gdy pręt zamocowany jest swoimi końcami w niepodatnych ściankach. Po podgrzaniu tego pręta do temperatury nie powodującej powstawania odkształceń cieplnych przekraczających odkształcenia sprężyste, nie powstaną w nim trwałe odkształcenia, ani naprężenia własne. Nagrzanie natomiast pręta do temperatury powodującej jego wydłużenie przekraczające odkształcenie sprężyste doprowadzi do pojawienia się w nim naprężeń ściskających (np. rys. 12.4d). Podczas stygnięcia pręt nie ma ze względu na sztywne zamocowanie możliwości swobodnego skrócenia się o odcięk  $\Delta l_{pl}$ , o który wydłużyłby się w przypadku swobodnego zamocowania. Chłodzenie pręta w warunkach zamocowania obu jego końców powoduje więc efekt rozciągania (rys. 12.4e).

## 12.4. Czynniki wpływające na wartość naprężeń spawalniczych

Przy analizie problemu naprężeń spawalniczych należy odróżnić dwa zagadnienia: problem naprężeń spawalniczych i problem sił wewnętrznych działających na konstrukcję spawaną.

Wartość naprężeń spawalniczych zależy od następujących czynników:

- 1) wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału spawanego,
- 2) skurczu liniowego wywołanego krzepnięciem metalu,
- 3) wysokości granicy plastyczności materiału,
- 4) właściwości plastycznych materiału,
- 5) sztywności konstrukcji.

Czynniki te są na ogół związane z fizycznymi właściwościami spawanego materiału i dlatego też nie można mieć na nie decydującego wpływu. Jedynie sztywność konstrukcji można zmienić w większym zakresie. Zwiększenie współczynnika rozszerzalności cieplnej, skurczu wywołanego krzepnięciem metalu, granicy plastyczności i sztywności konstrukcji pociąga za sobą wzrost naprężeń.

Plastyczność materiału wywiera natomiast wpływ na rodzaj odkształcenia – w materiałach o wysokiej plastyczności naprężenia odkształcają plastycznie spawaną konstrukcję, natomiast w materiałach kruchych wywołują pęknięcia.

Siły skurczowe powstające w złączu spawanym zależą od:

- szerokości strefy wpływu ciepła,
- długości spoiny,
- sposobu układania spoiny.

Wszystkie te trzy czynniki zależne są od przyjętej technologii spawania. Zwiększenie szerokości strefy wpływu ciepła sprzyja wzrostowi sił wywołujących odkształcenie spawanego materiału. Wielkość tej strefy zależna jest od przewodności cieplnej materiału spawanego i intensywności źródła ciepła. Większą strefę wpływu ciepła dają źródła o większej intensywności.

## 12.5. Przyczyny i mechanizm powstawania odkształceń spawalniczych

Procesom spawalniczym w większości przypadków towarzyszą odkształcenia wywołane przede wszystkim nierównomiernym nagrzaniem przedmiotu i w mniejszym stopniu skurczem spoiny.

Aby móc skutecznie łagodzić naprężenia cieplne i przeciwdziałać niepożądanym ich skutkom należy chociaż pobieżnie zapoznać się z mechanizmem ich powstawania.

Skoncentrowane źródło ciepła szybko i silnie nagrzewa niewielkie objętości metalu leżące w bezpośrednim zasięgu jego działania. Takim źródłem ciepła może być:

- łuk elektryczny,
- płomień palnika gazowego,
- ciepło wydzielające się w wyniku spalania metalu podczas cięcia gazowo – tlenowego,
- inne postacie energii elektrycznej np. nagrzewanie oporowe, plazmowe, indukcyjne itp.

Ograniczona część metalu zwiększając w krótkim czasie swoją objętość pod wpływem wysokiej temperatury ulega spęcznieniu, gdyż sąsiadujące „zimne” otoczenie nie zezwala na swobodne rozszerzanie się. Podczas stygnięcia w miejscu poprzedniego spęcznienia powstają naprężenia rozciągające, mogące prowadzić do odkształceń, a nawet i pęknięć. W przypadku spawania dodatkowe naprężenia wywołane są skurczem odlewniczym krzepnącej spoiny.

Pod wpływem doprowadzonego ciepła następuje przestrzenne (jednoczesne we wszystkich kierunkach) rozszerzanie się nagrzanego miejsca, a podczas stygnięcia również jego przestrzenne kurczenie się,

Celem ułatwienia opisu skutków oddziaływania cieplnego wyodrębnia się zwykle trzy rodzaje skurczu w odniesieniu do osi spoiny, a mianowicie: skurcz poprzeczny, skurcz wzdłużny i skurcz kątowy, mimo że skurcze te występują jednocześnie.

Znajomość wielkości skurczu ma duże znaczenie tak przy projektowaniu jak i wykonaniu konstrukcji spawanych.

Skurcz poprzeczny „ $S_{poprz.}$ ” orientacyjnie można obliczyć z zależności:

$$S_{poprz.} = 0,18 \left( \frac{F_s}{g} \right) + 0,05b \quad /12.1/$$

gdzie:  $F_s$  - przekrój poprzeczny spoiny wraz z wtopieniem,  
 $g$  - grubość spawanych elementów,  
 $b$  - odstęp między krawędziami spawanych elementów (w grani).

Przy grubości spawanych elementów  $g > 25$  zamiast współczynnika 0,18 można przyjąć 0,20.

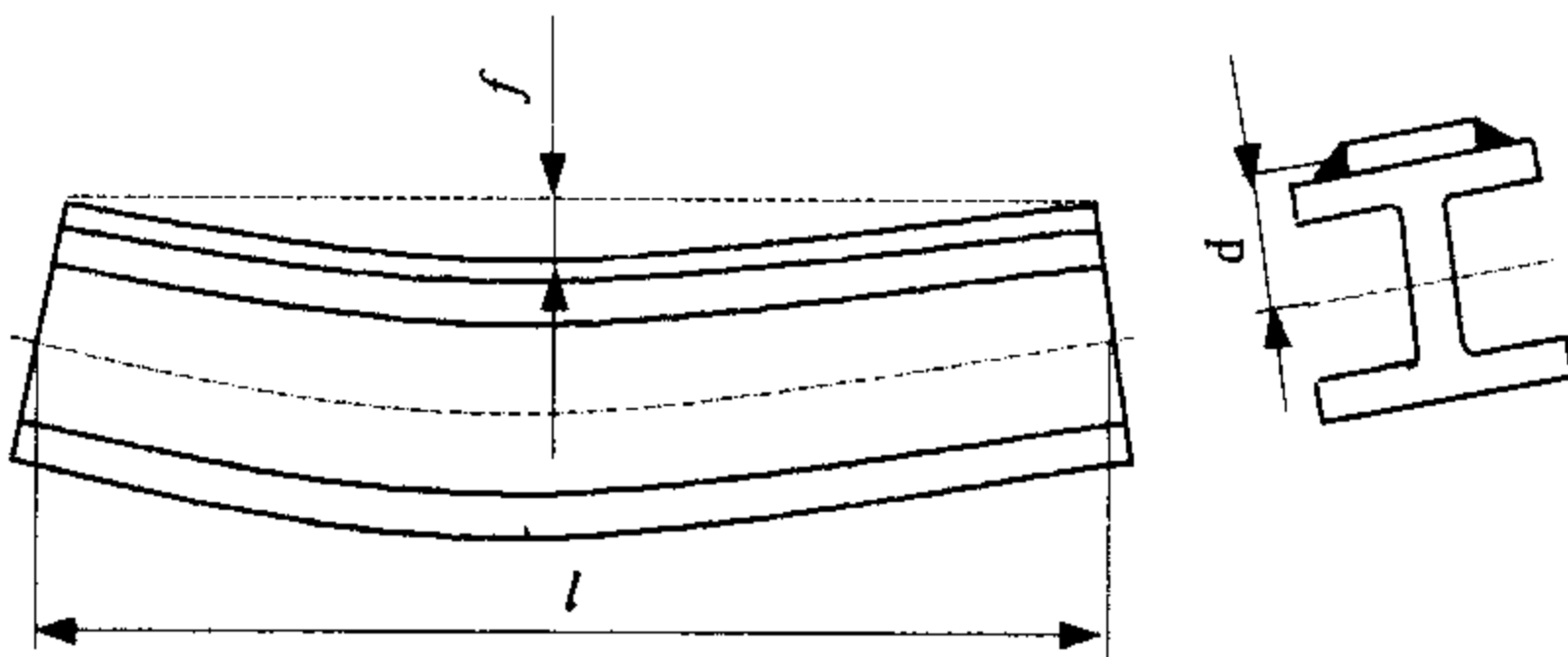
Wielkość skurczu podłużnego „ $S_{podl.}$ ” zależna jest od stosunku przekroju spoiny do przekroju porzecznego złącza. Im większa będzie wartość tego stosunku tym większego skurczu należy się spodziewać. Wielkość tą można orientacyjnie obliczyć z zależności:

$$S_{podl.} = 0,025 \left( \frac{F_s}{F_b} \right) \quad /12.2/$$

gdzie:  $F_s$  - przekrój poprzeczny spoiny wraz z wtopieniem,  
 $F_b$  - przekrój poprzeczny blach spawanych.

Z doświadczeń wynika, że wartość skurczu podłużnego waha się w granicach  $0,1 \div 0,3$  mm/mb spoiny.

Skurcz podłużny oprócz skrócenia złącza może spowodować jego wygięcie, jeżeli spoina nie jest ułożona w osi ciężkości złącza. Przykład takiego złącza przedstawia rys. 12.5.



Rys. 12.5. Wygięcie wzdłużne dźwigara wywołane działaniem siły skurczowej mimośrodowo względem osi obojętnej konstrukcji belki

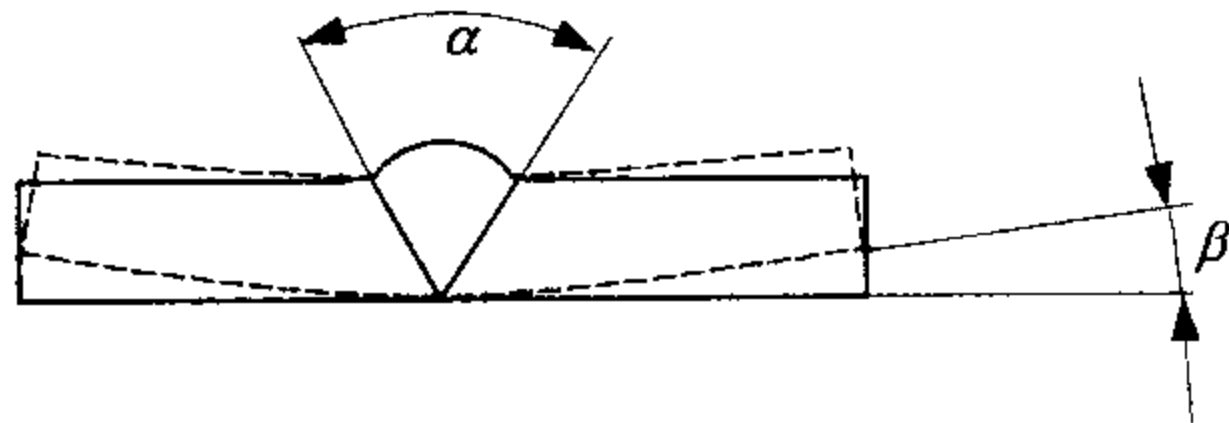
Wielkość strzałki wygięcia „ $f$ ” można z pewnym przybliżeniem obliczyć ze wzoru:

$$f = \frac{F_s d l^2}{200I} \quad /12.3/$$

gdzie:  $F_s$  - przekrój spoiny z uwzględnieniem wtopienia,  
 $d$  - odległość między osiami obojętymi przekroju spawanego elementu i spoiny,  
 $l$  - długość spoiny,  
 $I$  - moment bezwładności przekroju złącza,  
 $f$  - strzałka wygięcia.

Z kolei odkształcenie katowe  $\beta$  przy spoinie jednowarstwowej zależne jest głównie od kąta zukosowania rowka spawalniczego  $\alpha$  (rys. 12.6).

Im kąt zukosowania  $\alpha$  będzie większy, tym odkształcenie katowe złącza  $\beta$  będzie również większe, zaś w przypadku spoin wielowarstwowych wartość odkształcenia katowego zmienia się w zależności od liczby warstw. Wartość ta zależy też w tym przypadku od kształtu rowka spawalniczego i grubości złącza.



Rys. 12.6. Katowe odkształcenie złącza doczołowego

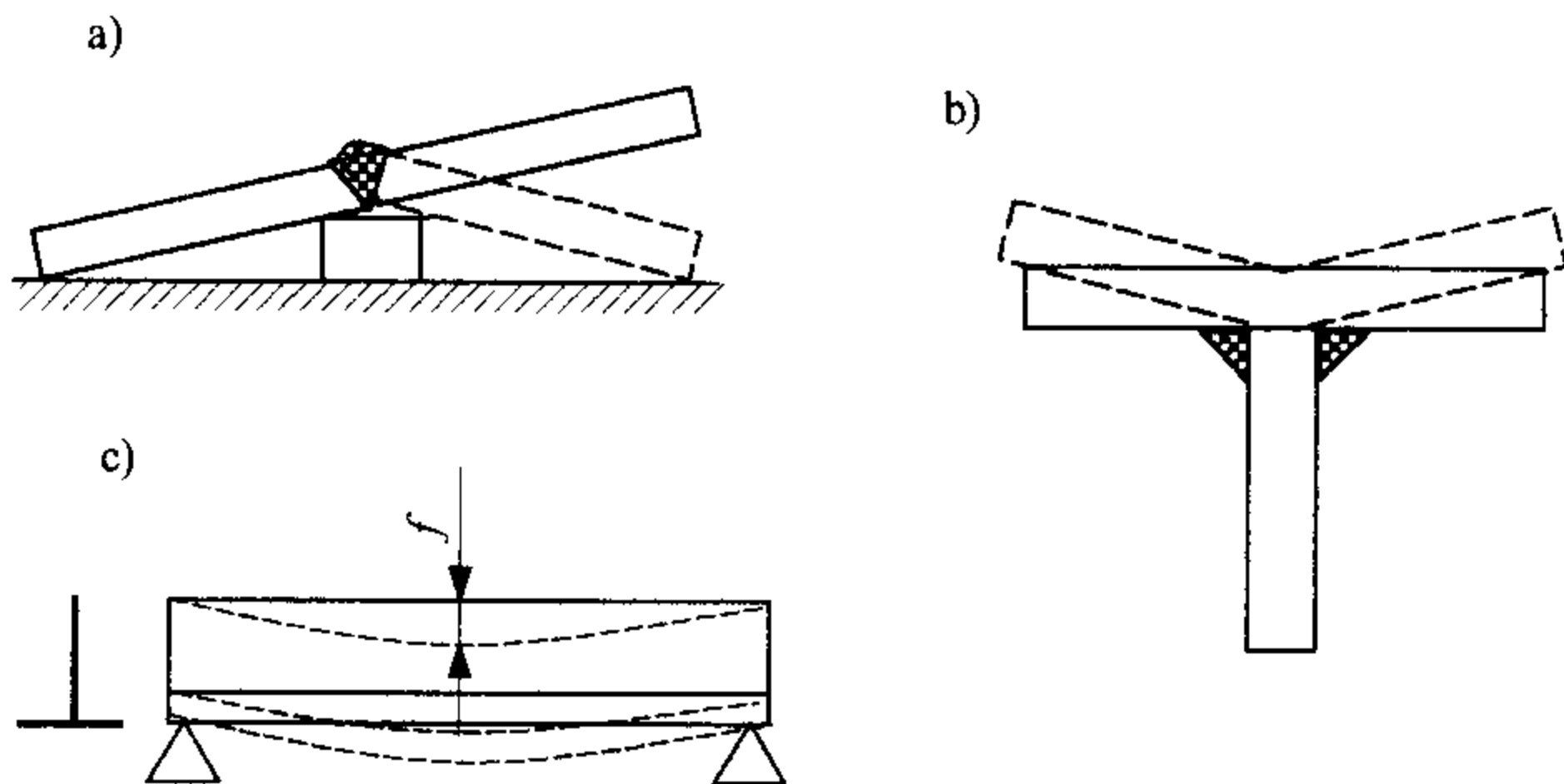
## 12.6. Sposoby zmniejszania naprężeń i odkształceń spawalniczych

Odkształcenia i naprężenia spawalnicze decydują niejednokrotnie o właściwościach eksploatacyjnych wytworzonej konstrukcji. Na rozkład naprężeń własnych nie możemy wpływać w decydujący sposób, możemy tylko niekiedy pozbawić konstrukcję tych naprężeń całkowicie lub częściowo.

Obliczanie teoretyczne wartości odkształceń spawalniczych jest sprawą trudną, szczególnie w przypadku, gdy konstrukcja jest złożona. Dlatego zostaną tu podane ogólne zasady prowadzące do wytwarzania konstrukcji spawanych z możliwie małymi odkształceniami oraz metody usuwania tych odkształceń.

W projektowanych złączach spawanych tam, gdzie jest to możliwe, spoiny czołowe powinny mieć pierwszeństwo przed spoinami pachwinowymi. W miarę możliwości spoiny powinny być symetryczne (X, K, 2U), ze względu na zmniejszenie przekroju poprzecznego, gdyż z jego wzrostem powiększają się odkształcenia. Należy przewidzieć optymalne metody spawania z punktu widzenia zmniejszenia odkształceń. Najbardziej odpowiednimi metodami spawania są te, które charakteryzują się najmniejszą ilością wprowadzanego ciepła na jednostkę długości spoiny.

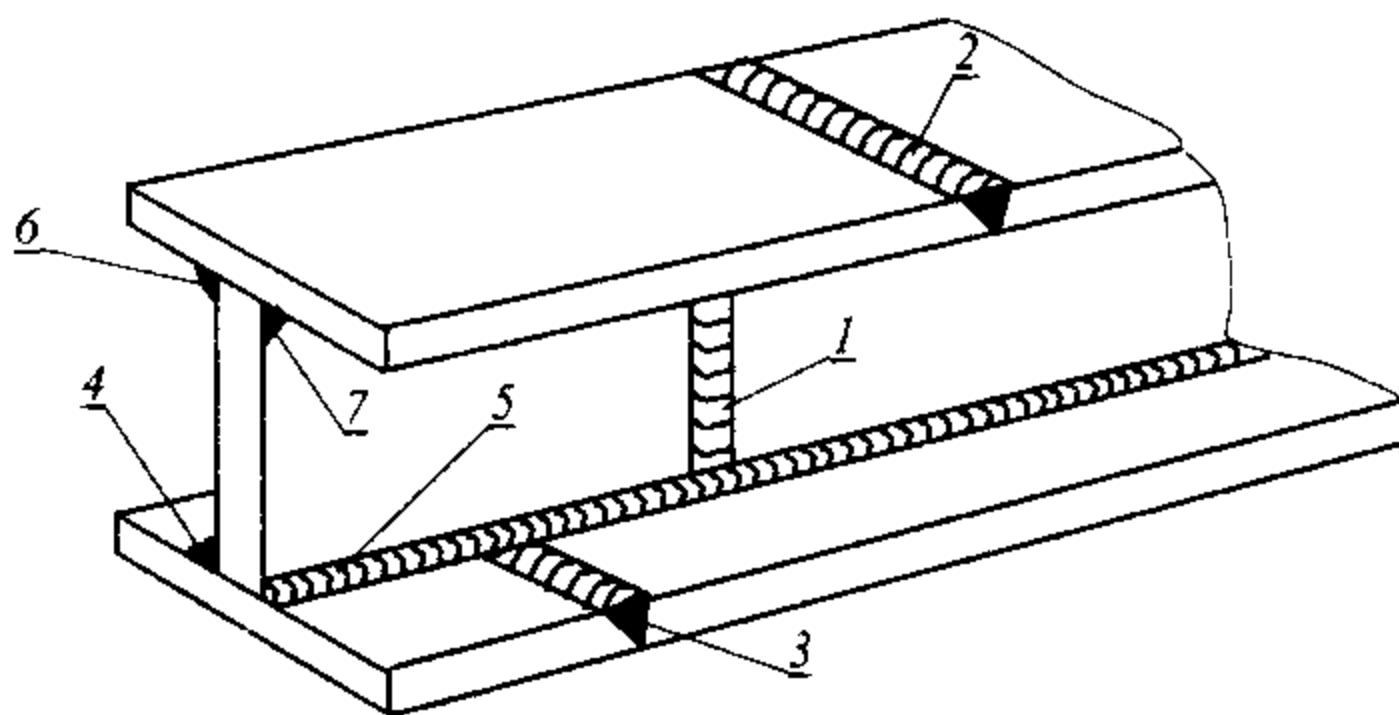
Znając kierunek i wielkość odkształceń, którym ulegają spawane elementy, możemy zapobiegać im wprowadzając wstępnie przeciwne odkształcenia. Uzyskuje się je poprzez układanie elementów pod pewnym kątem, który zostanie zredukowany podczas spawania (rys. 12.7).



Rys. 12.7. Sposoby zmniejszania odkształceń w złączach spawanych: a) ułożenie blach pod kątem przed spawaniem w złączu doczołowym, b) wstępne wygięcie pasa w złączu teowym przed spawaniem, c) wstępne wygięcie dźwigara teowego przed spawaniem,

Na wielkość odkształceń spawalniczych duży wpływ ma kolejność układania spoin. Na rysunku 12.8 przedstawiono spawaną belkę dwuteową. Belkę tę można wykonać układając spoiny w kolejności 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 lub 1 – 4 – 5 – 6 – 7 – 2 – 3 pod warunkiem, że spoiny pachwinowe w pobliżu spoin czołowych 2 i 3 zostaną wykonane jako ostatnie, aby spoiny czołowe posiadały możliwość swobodnego odkształcania się.

Usuwanie naprężeń spawalniczych wymaga zastosowania wyżarzania odpężającego, polegającego na powolnym podgrzaniu złącza do temperatury 600°C (dla stali niskowęglowej), wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym chłodzeniu. Przy czym temperatura przedmiotu w całej jego objętości powinna zawsze być jednakowa. Najlepsze rezultaty daje podgrzanie całych elementów w piecach (chłodzi się je razem z piecem), lecz przy nieumiejętnym ułożeniu ich mogą powstać znaczne odkształcenia, gdyż w temperaturze 600°C granica plastyczności stali niskowęglowej jest bardzo niska. Bardzo duże elementy wyżarza się miejscowo, stosując podgrzewanie gazem lub prądem elektrycznym za pomocą specjalnych grzałek.



Rys. 12.8. Kolejność wykonania spoin decydująca o wielkości odkształceń spawalniczych

## 12.7. Naprężenia dopuszczalne wg przepisów i norm

Naprężenia dopuszczalne dla spoin są ustalane przy pomocy współczynników w stosunku do naprężeń dopuszczalnych na rozciąganie „ $k$ ” dla materiału rodzimego. Mnożąc wartość naprężenia dopuszczalnego przez odpowiedni współczynnik „ $s$ ” wg zależności:

$$k_s = s \cdot k \quad /12.4/$$

otrzymuje się naprężenie dopuszczalne dla połączeń spawanych, gdzie:

- $k_s$  - naprężenie dopuszczalne dla połączeń spawanych,
- $s$  - współczynnik zależny od rodzaju spoiny i rodzaju naprężeń,
- $k$  - naprężenia dopuszczalne na rozciąganie materiału rodzimego.

Zależnie od rodzaju naprężeń występujących w spoinach należy przyjmować następujące wartości współczynnika „s”:

- spoiny czołowe, ściskane osiowo i przy zginaniu 1,0
- spoiny czołowe, rozciągane osiowo i przy zginaniu 0,8 i 1,0
- spoiny czołowe, ścinane 0,6
- spoiny pachwinowe, ściskane, rozciągane i ścinane 0,65

*Przykład:* jeżeli np. naprężenie dopuszczalne na rozciąganie dla stali niskowęglowej w budownictwie wynosi 137 MPa, to dla spoin czołowych w złączach rozciąganych, wykonanych z tej stali naprężenie dopuszczalne nie może przekroczyć  $k_s=137 \cdot 0,8=110$  MPa.

## 12.8. Część praktyczna

### 12.8.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do spawania elektrycznego, ręcznego,
- elektrody połączeniowe, kwaśne lub rutyłowe o średnicy 3,2 mm,
- dwie blachy ze stali niskowęglowej o wymiarach 250 x 100 x 10 mm, zukosowane na długości po jednej stronie na „V”,
- dwie blachy ze stali niskowęglowej o wymiarach 630 x 75 x 5 mm i 630 x 70 x 5 mm,
- stół traserski,
- suwmiarka, linijka, spoinomierz, kątomierz.

### 12.8.2. Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest uświadomienie studentom faktu powstawania w elementach spawanych w procesie spawania naprężeń i odkształceń wraz z ewentualnymi ich skutkami. W tym celu uczestniczą oni w pierwszej części ćwiczenia w wykonaniu próbnego złącza doczołowego z blach ze stali o wymiarach 250 x 100 x 10. Przy spawaniu tego złącza należy przyjąć odstęp między krawędziami w progu równy 3 mm. Przed spawaniem blachy należy dokładnie zmierzyć. Po ostudzeniu ww. złącza studenci dokonują pomiaru skurczów: poprzecznego, podłużnego i kąтового.

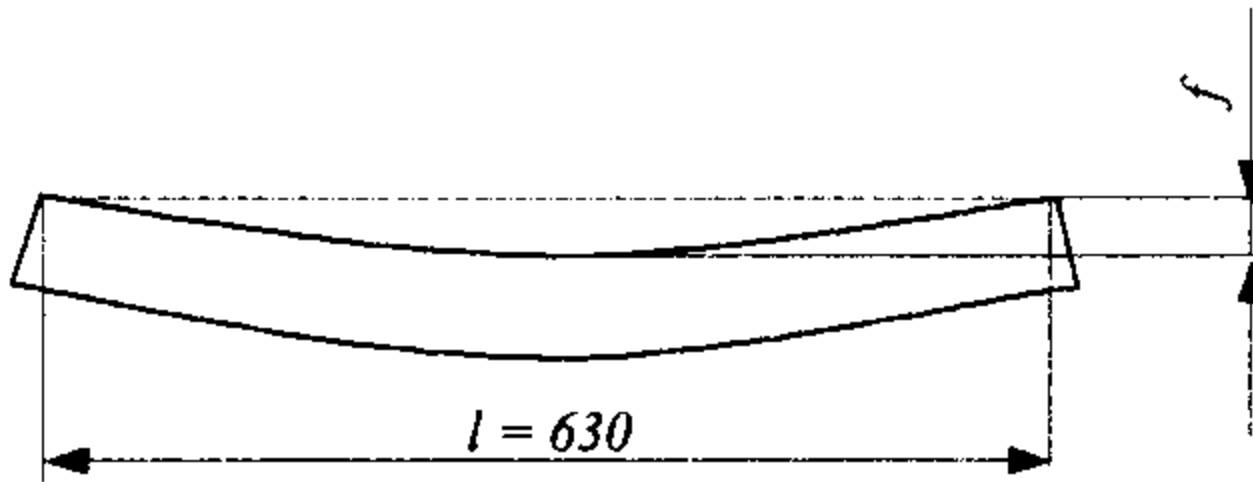
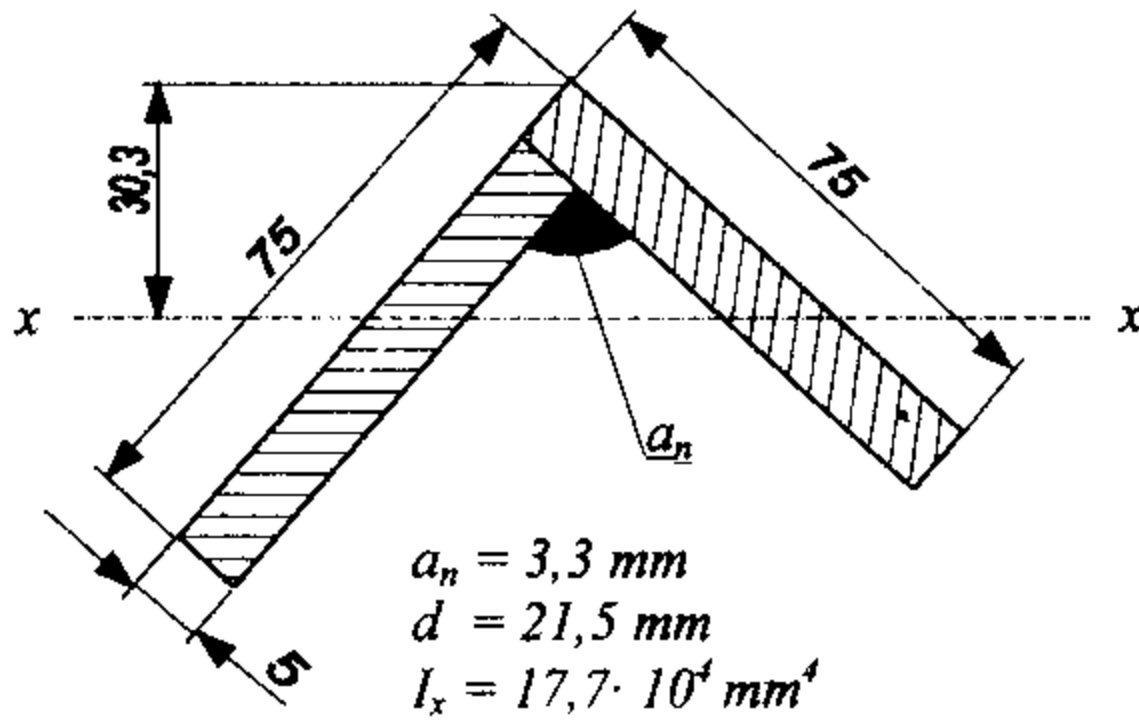
Uzyskane wyniki pomiarów ww. skurczów należy porównać z wynikami z obliczeń wg wzorów 12.1 i 12.2.

W drugiej części ćwiczenia studenci uczestniczą w wykonaniu złącza kąтового, jak na rys. 12.9 z blach o wymiarach 630x75x5mm i 630x70x5mm.

Powstałą w wyniku wygięcia złącza strzałkę „f” należy zmierzyć, a wynik pomiaru porównać z wartością z obliczeń wg wzoru 12.3.

Ćwiczenie kończy się dyskusją i podsumowaniem.





Rys. 12.9. Sposób wykonania złącza kąтового oraz dane do obliczeń strzałki wygięcia

## 12.9. Literatura

1. Praca zbiorowa. Poradnik Inżyniera .Spawalnictwo. WNT. Warszawa 1983.
2. Sędek P.: Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych. Wydawnictwo „Biuro Gamma”. Warszawa.
3. Boretii Z i inni.: Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych. Arkady. Warszawa 1997.

## 13. SPAWALNOŚĆ STALI

### 13.1. Pojęcie spawalności

Między materiałem spoiny, a materiałem rodzimym istnieje zawsze niejednorodność wyrażająca się w różnicach strukturalnych, właściwościach mechanicznych i stanie naprężeniowym wewnątrz materiału. Ta niejednorodność może być bardzo mała, nie mająca istotnego znaczenia praktycznego, w innych przypadkach może być bardzo duża na tyle, że jako element konstrukcyjny nie spełnia odpowiednich stawianych mu wymagań, a poszczególne zaś części materiału rodzimego tego złącza mogą być łączone za pomocą spawania. Mówimy, że materiał taki nie jest spawalny. Ze względu na złożoność zagadnienia nie jest łatwo krótkim zdaniem precyzyjnie zdefiniować pojęcie spawalności. W literaturze przedmiotowej spotyka się różne, mniej lub więcej trafne definicje spawalności metali. Uwzględniając zakres przedmiotowy tego skryptu podajemy niniejszym definicję spawalności zbliżoną do ustaleń Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (MIS), a więc:

**Spawalność jest to zdolność metalu do tworzenia połączeń spawanych o pewnych z góry określonych właściwościach.**

Spawalność jakiegoś metalu lub stopu jest zależna tak od właściwości samego materiału, tj. od jego składu chemicznego, wielkości ziarna, stanu naprężeń, jak również od technologicznych warunków spawania i rozwiązania konstrukcyjnego złącza spawanego. W związku z tym rozróżniamy spawalność *metalurgiczną, technologiczną i konstrukcyjną*.

#### 13.1.1. Spawalność metalurgiczna stali

Spawalność metalurgiczna stali zależna jest od jej składu chemicznego, struktury, zawartości gazów, wtrąceń niemetalicznych i naprężeń własnych. Na podstawie znajomości składu chemicznego stali można wstępnie w sposób przybliżony określić jej właściwości spawalnicze, w oparciu o wprowadzony przez M. F. Tremletta wzór na tzw. równoważnik chemiczny węgla:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{P}{2} \quad //13.1//$$

W przytoczonym wzorze nie uwzględnia się dwu ostatnich członów, gdy  $Cu < 0,5\%$ , a  $P < 0,5\%$ . Wzór 13.1 powstał w wyniku doświadczeń, zaś współczynniki liczbowe przy poszczególnych pierwiastkach występujących

w stali obrazują ich wpływ na twardość martenzytu w porównaniu do wpływu węgla. Na przykład nikiel wywiera 15 razy mniejszy wpływ na twardość martenzytu od węgla, podczas gdy molibden – tylko 4 razy mniejszy.

Według ustaleń Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (MIS) ww. wzór ma postać uproszczoną:

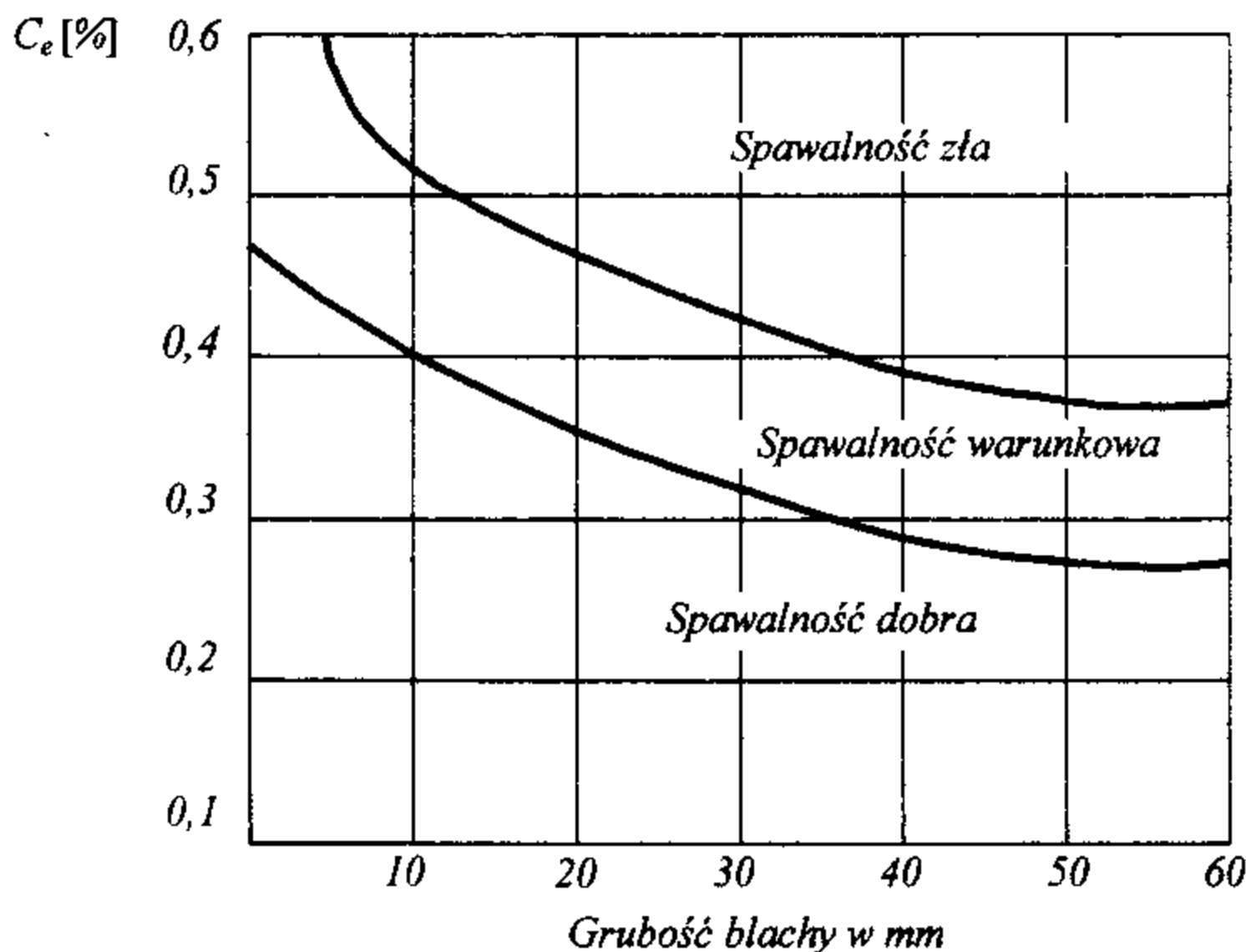
$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{30} \quad /13.2/$$

Nadmienić należy, że według wzoru Tremletta nie można określić spawalności wszystkich stali, lecz stali niskostopowych. W przypadku zaś stali węglowych o jej spawalności decyduje zawartość węgla ( $C < 0,25\%$  wag.)

Struktura stalowego złącza spawanego i jego twardość zależą w decydującym stopniu od składu chemicznego stali i od szybkości chłodzenia złącza. Twardość ta może być obliczona według ustalonych doświadczalnie zależności:

$$HV_{min} = 1200 \cdot C_e - 260 \quad (\text{twardości minimalne}) \quad /13.3/$$

$$HV_{max} = 1200 \cdot C_e - 200 \quad (\text{twardości maksymalne}) \quad /13.4/$$



Rys. 13.1. Zależność spawalności stali od wartości  $C_e$  i od grubości blachy spawanej

Na podstawie wielu doświadczeń praktycznych stwierdzono, że maksymalna twardość w strefie przejściowej złącza ze stali dobrze spawalnych nie powinna przekraczać 350HV.

Przytoczone równanie Tremletta obowiązuje dla spoin układanych na blachach o grubości 12,7 mm. Z uwagi na to, że przy określonej wartości równoważnika węgla  $C_e$ , spawalność zależy również od grubości spawanej stali. Wygodnie jest posługiwać się wykresem na rys. 13.1 dla zorientowania się jaką technologię spawania należy w konkretnym przypadku zastosować. Z rys. 13.1 widać, że stal o równoważniku węgla np. 0,4 w zależności od grubości spawanego materiału może posiadać spawalność dobrą, warunkową lub złą.

Aby w strefie wpływu ciepła (SWC) nie wystąpiły w czasie spawania lub po spawaniu pęknięcia, trzeba w zależności od wartości równoważnika węgla  $C_e$  zastosować odpowiednią technologię spawania (patrz zabiegi technologiczne poniżej).

**Główne zabiegi technologiczne stosowane przy spawaniu stali w zależności od wartości równoważnika węgla  $C_e$ :**

$$C_e < 0,4$$

- 1) zabiegi specjalne, takie jak podgrzewanie wstępne czy wyżarzanie są niepotrzebne,
- 2) wszystkie elektrody są przydatne (rutylowe, zasadowe, kwaśne),

$$C_e = 0,4 \div 0,48$$

- 1) podgrzewanie do temperatury  $100 \div 200^\circ\text{C}$  przy użyciu elektrod zwykłych (kwaśnych, rutylowych i celulozowych), albo
- 2) bez podgrzewania przy użyciu elektrod zasadowych,

$$C_e = 0,48 \div 0,55$$

- 1) podgrzewanie do temperatury  $200 \div 300^\circ\text{C}$  przy użyciu elektrod zwykłych, albo
- 2) bez podgrzewania przy użyciu elektrod austenitycznych, albo
- 3) spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego,

$$C_e > 0,55$$

- 1) podgrzewanie do temperatury  $300 \div 370^\circ\text{C}$  przy użyciu elektrod zasadowych, albo
- 2) bez podgrzewania przy użyciu elektrod austenitycznych, albo
- 3) spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego.

### 13.1.2. Spawalność technologiczna

Spawalność technologiczna zależna jest od warunków spawania, a w szczególności od metody spawania, natężenia prądu, średnicy elektrody, prędkości spawania, temperatury spawanego przedmiotu, techniki spawania. Wymienione czynniki wpływają w dużym stopniu na wielkość i rodzaj naprężeń spawalniczych.

### 13.1.3. Spawalność konstrukcyjna

Spawalność konstrukcyjna zależna jest od sztywności konstrukcji, rodzaju i wielkości przekroju spoiny, wielkości przekroju łączonych elementów. Wszystkie te czynniki decydują ostatecznie o wartości i rozkładzie naprężeń spawalniczych.

## 13.2. Pękanie połączeń spawanych

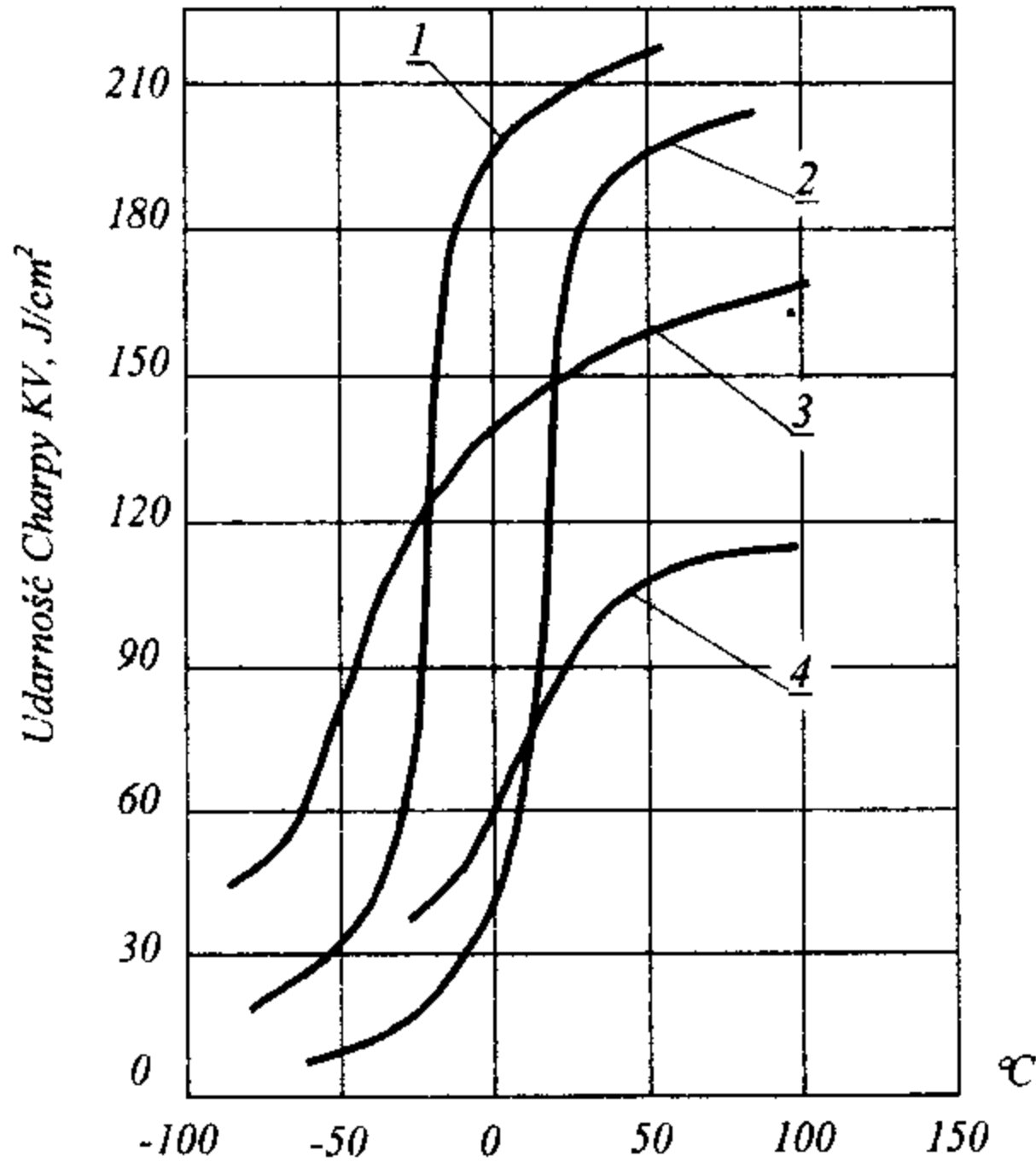
Podstawą do oceny spawalności węglowych i niskostopowych stali konstrukcyjnych są następujące kryteria:

- odporność stali na kruche pękanie,
- wrażliwość na pękanie na gorąco i na zimno.

**Kruche pęknięcia** stanowią bardzo poważne niebezpieczeństwo dla konstrukcji, gdyż powstają na ogół bez odkształceń plastycznych i przy niskich obciążeniach zewnętrznych. Zapoczątkowanie kruchych pęknięć może być spowodowane obecnością wad w spoinach, trójosiowym stanem naprężeń spawalniczych i zmianą właściwości plastycznych materiału w różnych temperaturach eksploatacji. Zależnie od temperatury, w której następuje wyraźna utrata plastyczności, zwanej temperaturą przejścia (rys. 13.2) – można ocenić stopień przydatności stali na zaprojektowaną konstrukcję.

Odporność na kruche pękanie i wrażliwość na działanie karbu najczęściej ocenia się w oparciu o wyniki prób udarności określonych na próbkach typu Charpy prowadzonych w różnych temperaturach.

W wyniku procesu cieplnego spawania w stali powstają zmiany objętościowe wywołane skurczem, zmianą faz i struktury. Powstałe pod wpływem zmian objętościowych naprężenia wewnętrzne wywołują odkształcenia materiału, w wyniku których mogą tworzyć się pęknięcia, jeżeli materiał jest w stanie niedostatecznie plastycznym. Właśnie w stanie niedostatecznie plastycznym znajduje się materiał nagrany lub ochłodzony do temperatury bliskich solidusu. Jest to tzw. zakres kruchości wysokotemperaturowej.



Rys. 13.2. Zależność udarności materiału rodzimego i stopiwa od temperatury badania:  
 1 – drobnoziarnista stal ( $C - Mn$ ), 2 – stal węglowa ( $0,2\%C$ ), stopiwo elektrod zasadowych, 4 – stopiwo elektrod rutylowych

**Pękanie na gorąco** – skłonność stali do pęknięć na gorąco jest większa w tych przypadkach, gdy występują w jej strukturze niskotopliwe eutektyki. Szczególne znaczenie ma tu siarka. Korzystny wpływ na obniżenie skłonności na pęknięcia gorące spowodowane siarką wywiera mangan. Mangan łącząc się z siarką tworzy wysokotopliwe siarczki manganu  $MnS$ , wydzielające się nie na granicach ziaren, jak to jest z eutektyką ( $FeS + Fe$ ), lecz w ziarnach.

**Pękanie na zimno** – pęknięciami na zimno nazywamy zespół nieciągłości w złączu spawanym występujący przeważnie w strefie wpływu ciepła, czasami też w spoinie. Pęknięciom tym ulegają szczególnie często stale o zwiększonej zawartości węgla, spawane na zimno. Tego typu wady charakteryzuje jedna wspólna cecha, powstają one głównie w wyniku przemiany strukturalnej plastycznego austenitu w twarde martenzyt lub struktury bainityczne. Podstawowe znaczenie w powstawaniu pęknięć mają: temperatura przemiany martenzytycznej, zawartość węgla i wodoru w stali znajdującej się w stanie naprężeniowym i podlegającej pewnym odkształceniom plastycznym.

### 13.3. Metody badań spawalności

Badanie spawalności w najszerszym tego słowa znaczeniu można podzielić na kilka grup:

1. Wstępne badania spawalności:
  - wstępna ocena spawalności w oparciu o skład chemiczny,
  - obliczenie równoważnika węgla,
  - wstępna ocena spawalności w oparciu o wykres CTPc - S (czas, temperatura, przemiana ciągła - spawanie). Wykresy te są sporządzone dla danego gatunku stali, na podstawie pomiarów dylatometrycznych lub magnetometrycznych i pozwalają określić początek i koniec przemiany austenitu w danych warunkach chłodzenia;
2. Próby wykonania spoin i złączy spawanych na badanym materiale:
  - dobór właściwej energii liniowej spawania,
  - dobór materiałów dodatkowych i optymalnego kształtu brzegów łączonych,
  - badania właściwości mechanicznych złącza spawanego przy określonych materiałach dodatkowych,
  - badania skłonności stopiwa i strefy wpływu ciepła do pęknięć na zimno i gorąco;
3. Badania wpływu spawania na możliwość powstawania kruchych pęknięć;
4. Badania specjalne:
  - wpływ danej technologii spawania i materiałów dodatkowych na odporność korozyjną,
  - wpływ spawania na wytrzymałość zmęczeniową,
  - wpływ spawania na odporność na pełzanie,
  - wpływ spawania na odporność na obciążenia dynamiczne;
5. Badania kwalifikacyjne i kontrolne;
  - badania związane z uznaniem materiału podstawowego, technologii spawania i materiałów dodatkowych przez instytucję kwalifikacyjną,
  - badania związane z wydaniem dla zakładu przez instytucję nadzorującą zezwolenia na spawanie określonego gatunku stali,
  - badania związane z kontrolą umiejętności spawania danego gatunku stali przez spawacza.

Z uwagi na dużą ilość i skomplikowany charakter działania czynników wpływających na spawalność stali, ustalenie odpowiedniej jednoznacznej próby spawalności jest trudne. Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa zaproponował sklasyfikowanie wszystkich istniejących prób na następujące grupy:

- 1) próby do określenia bezpośrednich wpływów oddziaływania cieplnego,
- 2) próby dla określenia skłonności do pęknięć w czasie i po spawaniu,
- 3) próby odporności stali na kruche pęknięcie i wrażliwości na działanie karbu.

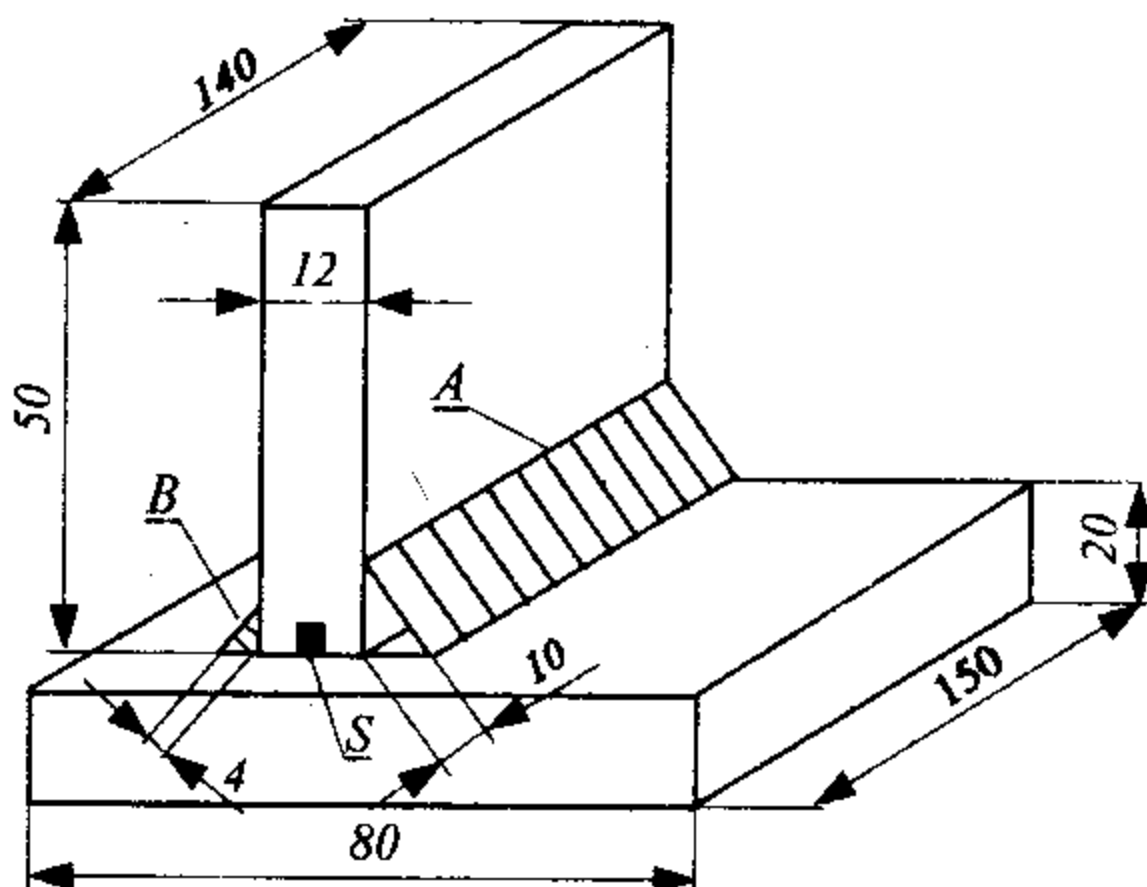
Do grupy pierwszej należą:

- próba rozciągania według PN-EN-876, PN-EN-895,
- próba zginania płaskiego złącza doczołowego według PN-EN-910,
- próba udarności złącza doczołowego według PN-EN-875,
- próba twardości złącza według PN-EN-283-3,
- próba łamania według PN-EN-1320.

Na drodze doświadczalnej ustalono, że jeśli dla stali konstrukcyjnej udarność w strefie wpływu ciepła spadnie poniżej  $\sim 30\text{J/cm}^2$ , to stal taka odznacza się niewystarczającą spawalnością.

Zadaniem przytoczonych prób z grupy drugiej jest ustalenie skłonności do pęknięć na zimno lub na gorąco w materiale rodzimym lub w spoinie w warunkach spawania. Najczęściej stosowane są próby to: próba złącza teowego o wymiarach jak na rysunku 13.3.

Odporność na kruche pęknięcie i wrażliwość na działanie karbu najczęściej ocenia się w oparciu o wyniki prób udarnościowych w różnych temperaturach.



Rys. 13.3. Próba złącza teowego: *A* – spoina wielościegowa, *B* – spoina jednościegowa, *S* – spoina szczepna



## 13.4. Część praktyczna

### 13.4.1. Próba złącza teowego

#### 13.4.1.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do spawania łukowego z wyposażeniem,
- dwa odcinki blachy ze stali o zawartości węgla od 0,4 do 0,6%, o wymiarach 80 x 150 x 20 mm i 50 x 140 x 12 mm,
- elektrody połączeniowe o średnicy 3,2 mm,
- spoinomierz,
- szkło powiększające (5 ÷ 10)x,
- penetrant do wykrywania pęknięć,
- instrukcja stanowiskowa, plansze poglądowe.

#### 13.4.1.2. Przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na położeniu dwóch spoin – pierwszej *A* o grubości 10 mm, która powoduje odkształcenie kątowe rzędu 8 stopni oraz drugiej *B* – cienkiej o grubości 4 mm. W chwili gdy spoina *A* ma jeszcze wysoką temperaturę układa się cienką kontrolną spoinę *B*, która w czasie jej szybkiego stygnięcia podlega naprężeniom niszczącym wywołanym przede wszystkim wolnym stygnięciem spoiny *A* (rys. 13.3).

Wykonanie:

- szczepianie blachy od czoła (spoina szczepna „S”),
- ułożenie spoiny *A* kilkoma ściegami (4) ściegami w pozycji nabocznej,
- ułożenie spoiny *B* jednym ściegiem w pozycji nabocznej,
- oględziny złącza w celu wykrycia ewentualnych pęknięć.

### 13.4.2. Badanie blachy o grubości do 2,5 mm – próba nadtapiania zwykła

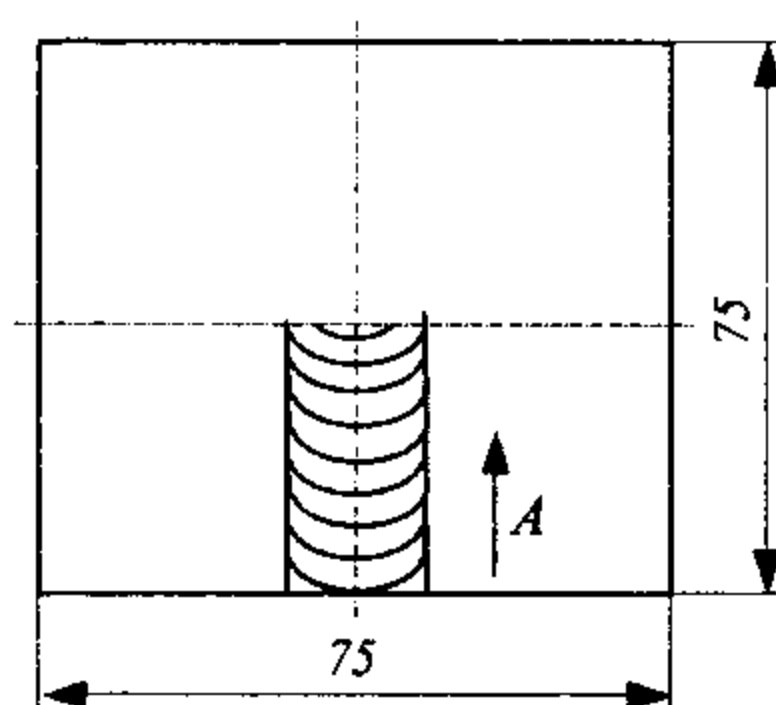
#### 13.4.2.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

- stanowisko do spawania gazowego z palnikiem z nasadką nr 2,
- po jednej próbce z blachy o wymiarach 75 x 75 x 2 mm ze stali niskowęglowych,
- szkło powiększające,
- suwmiarka.

### 13.4.2.2. Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie skłonności cienkiej blachy stalowej do pęknięć w czasie spawania, a przeprowadza się go w następującej kolejności:

- nadtapianie powierzchniowe próbki płomieniem tlenowo - acetylenowym od punktu *A* (rys. 13.4). Proces nadtapiania powinien być prowadzony bardzo szybko, aby wywołać duże naprężenia spawalnicze w próbce,
- chłodzenie próbki na powietrzu,
- oględziny za pomocą szkła powiększającego,
- pomiar długości ewentualnych pęknięć.



Rys. 13.4. Próba do określania spawalności za pomocą nadtapiania

### 13.4.3. Próba spawalności metodą Foke – Wulfa

#### 13.4.3.1. Wyposażenie aparaturowo – materiałowe

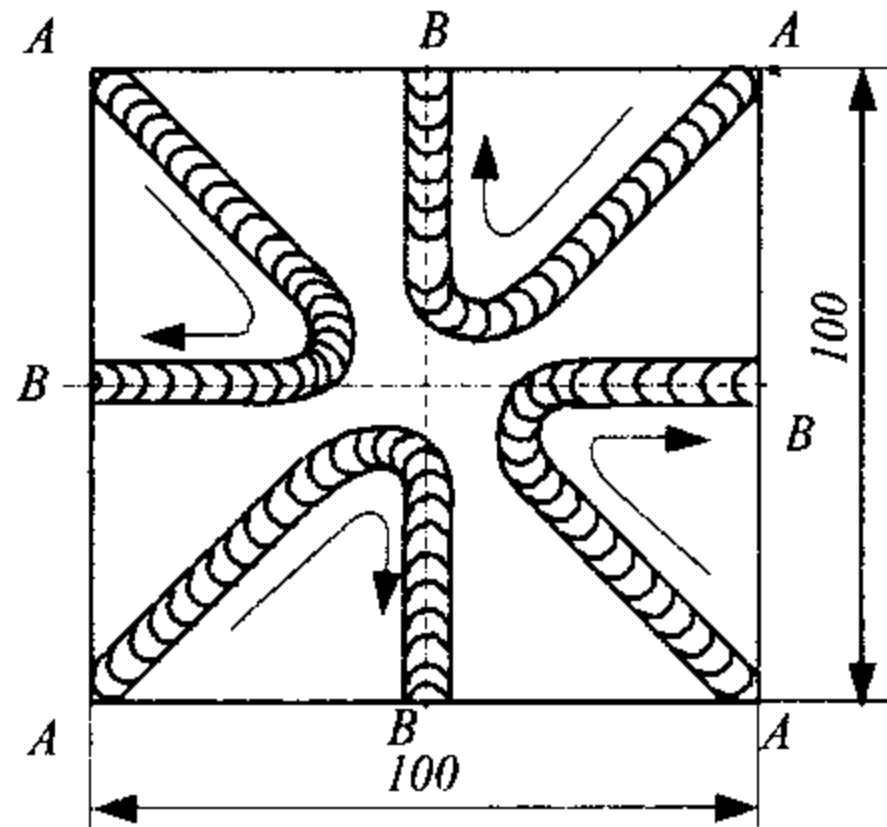
- stanowisko do spawania gazowego z palnikiem do spawania gazowego,
- próbki badanej blachy o wymiarach 100 x 100 x 2 ze stali niskowęglowej i stali wysokowęglowej,
- stanowisko do spawania gazowego,
- szkło powiększające,
- suwmiarka.

#### 13.4.3.2. Przebieg ćwiczenia

Celem próby jest określenie skłonności do pęknięcia blach stalowych o podwyższonej wytrzymałości. Ćwiczenie polega na:

- przeprowadzeniu nadtapiania próbek wg schematu podanego na rys. 13.5. Natapiania płomieniem należy przeprowadzić każdorazowo z narożnika próbki (punkt *A*), a zakończyć w punkcie *B*,

- chłodzeniu nadtopionej próbki na powietrzu,
- przeprowadzeniu oględzin próbki przy pomocy szkła powiększającego,
- pomiarze długości ewentualnych pęknięć, porównaniu ze sobą wyników nadtapiania próbek z różnych stali wraz z przeanalizowaniem wyników.



Rys. 13.5. Próba nadtapiania wg metody Foke – Wulfa

Całość ćwiczenia kończy się dyskusją i podsumowaniem.

### 13.5. Literatura

1. Praca zbiorowa. Poradnik inżyniera Spawalnictwo. Tom 1 i 2 .WNT. Warszawa 1983.

## 14. CIĘCIE TERMICZNE

### 14.1. Istota cięcia termicznego

Cięcie termiczne jest to proces rozdzielania materiału wzdłuż linii cięcia na całej jego grubości, w którym wskutek dostarczonej energii cieplnej materiał zostaje doprowadzony do stanu ciekłego i jednocześnie wydmuchany energią kinetyczną strumienia gazu lub taki proces, w którym materiał w miejscu rozdzielania zostaje spalony (utleniony) w strumieniu czystego tlenu.

Do metod cięcia termicznego zalicza się: cięcie tlenem oraz cięcie plazmowe, laserowe, łukowe, tlenowo – łukowe, tlenowo – proszkowe oraz procesy pokrewne cięciu termicznemu takie, jak np.: żłobienie, skórowanie, itp. Wybór metody cięcia termicznego zależy od rodzaju materiału ciętego oraz jego grubości.

W wymaganiach stawianych procesom cięcia termicznego dąży się, aby zastosowana metoda cięcia pozwalała na:

- jak najmniejsze zużycie energii,
- uzyskanie możliwie jak najwęższej szczeliny cięcia,
- jak najmniejsze oddziaływanie procesu cieplnego na cięty materiał,
- jak najwyższą jakość powierzchni cięcia.

### 14.2. Cięcie tlenem

Cięcie tlenem polega na spalaniu metalu w stanie stałym strumieniem czystego tlenu (rys. 14.1). Proces cięcia rozpoczyna się od miejscowego nagrzania metalu płomieniem palnika do temperatury zapłonu, powyżej której zachodzi reakcja egzotermiczna spalania. W przypadku czystego żelaza temperatura zapłonu wynosi  $1050^{\circ}\text{C}$ , zaś temperatura topnienia powstałych tlenków -  $1370^{\circ}\text{C}$  (tablica 14.4 i 14.5). Aby cięcie tlenem było możliwe muszą zaistnieć następujące warunki:

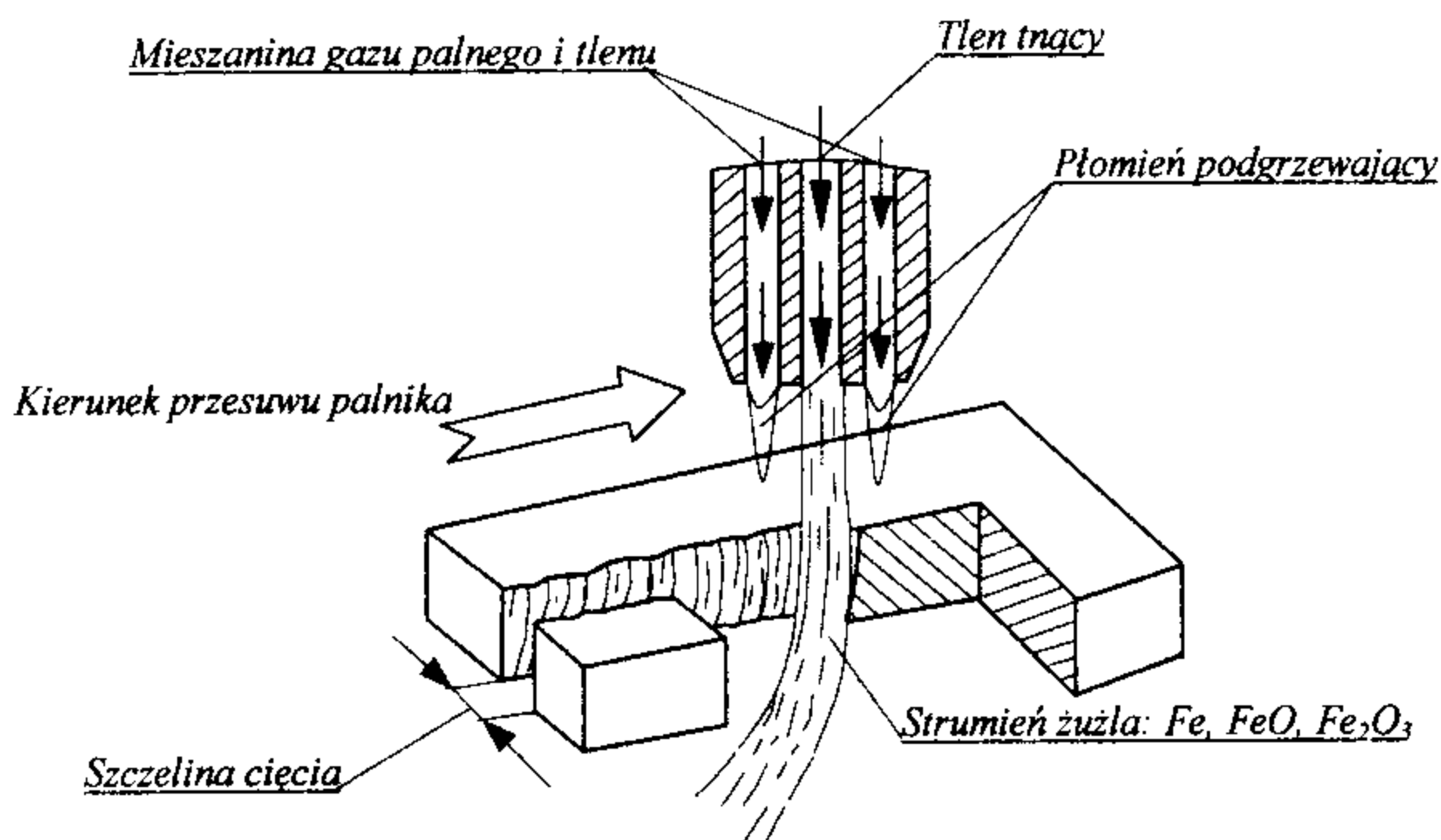
- metal powinien być palny w tlenie, a reakcja spalania musi być reakcją egzotermiczną,
- temperatura zapłonu metalu w tlenie powinna być niższa od temperatury topnienia metalu. Warunek ten spełniają tylko metale na osnowie żelaza oraz tytan i wanad,
- temperatura topnienia powstającego w procesie cięcia żużła (tlenków) powinna być niższa od temperatury topnienia przecinanego metalu,
- powstający w procesie cięcia żużel powinien być rzadkoplłynny,
- metal powinien mieć mały współczynnik przewodnictwa cieplnego,

- ilość energii cieplnej wytworzonej w palniku powinna utrzymać temperaturę nagrzania w szczelinie cięcia powyżej temperatury zapłonu metalu w tlenie.

Temperatura płomienia podgrzewającego ma duży wpływ na szybkie i skoncentrowane nagrzanie metalu do temperatury zapłonu. Im temperatura jest wyższa, tym szybciej następuje wymiana ciepła między płomieniem a materiałem. Zadaniem płomienia podgrzewającego jest:

- usunięcie zanieczyszczeń z powierzchni cięcia,
- podgrzanie ciętego metalu powyżej temperatury jego zapłonu, w celu umożliwienia procesu cięcia,
- ochrona strumienia tlenu tnącego przed dostępem powietrza.

Bardzo duży wpływ na przebieg oraz ekonomiczność procesu cięcia (zużycie tlenu, szybkość cięcia, jakość powierzchni cięcia) ma czystość tlenu. Do cięcia powinien być stosowany tlen o czystości powyżej 99,5 %. Każde zanieczyszczenie tlenu o 1 % zmniejsza szybkość i jakość cięcia o 15 %.



Rys. 14.1. Schematyczne przedstawienie zasady cięcia tlenem

Jako gazy palne do cięcia tlenem oprócz acetylenu mogą być stosowane: propadien metylo – acetylenu ( $C_3H_4$ ), propylen ( $C_3H_6$ ), metan ( $CH_4$ ), propan ( $C_3H_8$ ) lub ich mieszaniny.

Gazy palne dla płomienia podgrzewającego są dobierane uwzględniając następujące kryteria:

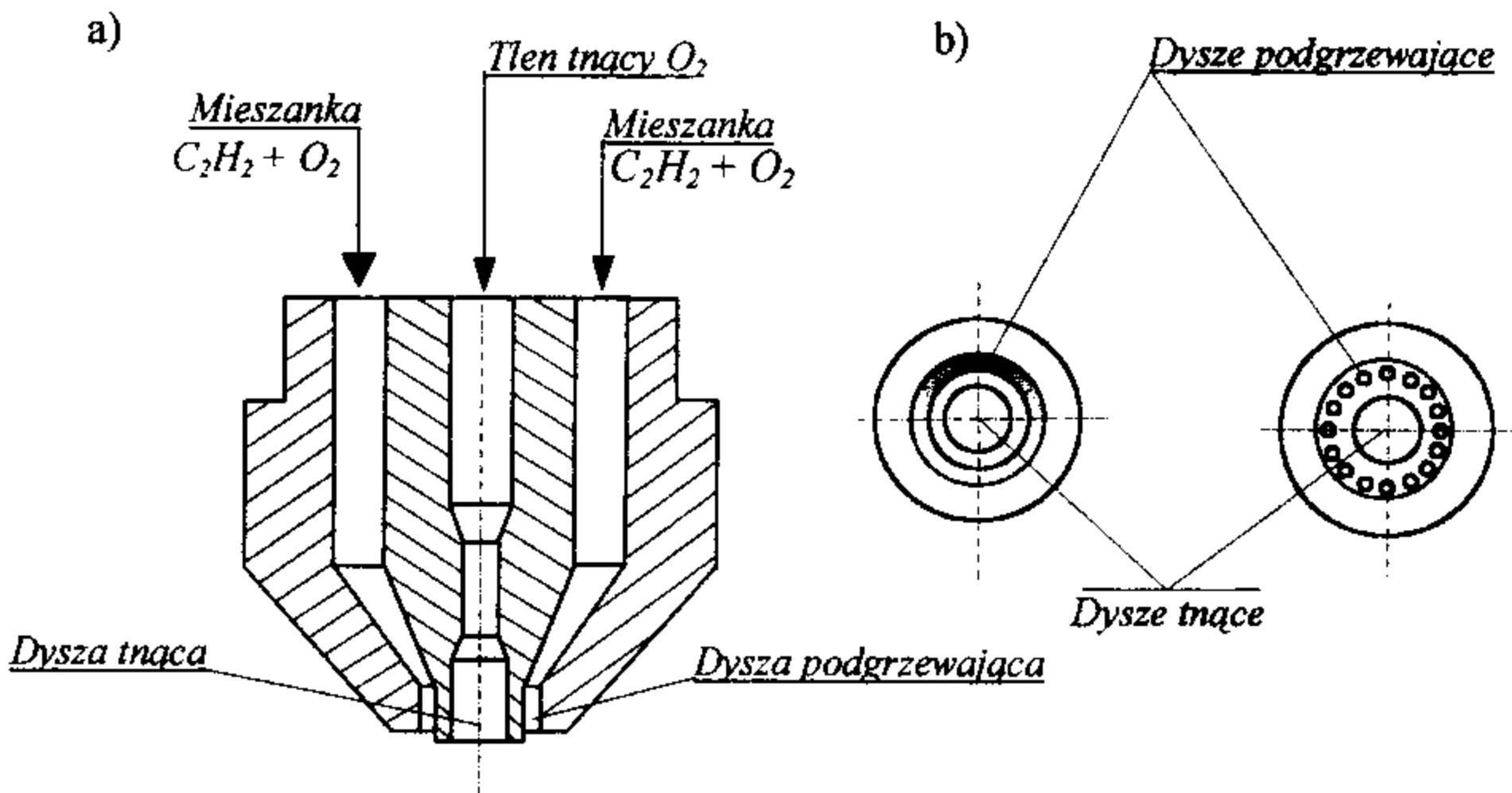
- czas wymagany dla podgrzania obszaru cięcia do temperatury zapłonu,
- koszt gazu palnego i tlenu płomienia podgrzewającego,
- wpływ na prędkość cięcia oraz ukosowania czy żłobienia,
- bezpieczeństwo obsługi urządzeń spawalniczych oraz transportu gazu.

Ze względów ekonomicznych (mniejsze koszty gazów i rzadsza wymiana butli) coraz częściej do cięcia tlenem stosuje się propan.

### 14.2.1. Palniki do cięcia tlenem

Palniki do cięcia tlenem mogą być przeznaczone do cięcia ręcznego i do cięcia maszynowego. Ze względu na zastosowanie odróżnia się np.: palniki do cięcia, palniki do skórowania, palniki do żłobienia, palniki do obcinania nitów itp.

Palniki do ręcznego cięcia tlenem w odróżnieniu od palników do spawania gazowego posiadają dodatkowo głowicę (rys. 14.2), w której umieszczone są dwie dysze: dysza podgrzewająca i dysza tnąca oraz posiadają dodatkowy zawór tlenu tnącego. W zależności od grubości materiału przecinanego dysze są wymienne.



Rys. 14.2. Budowa głowicy palnika do cięcia ręcznego: a) schemat budowy głowicy, b) schemat rozwiązań konstrukcyjnych dysz

### 14.2.2. Zasady i warunki cięcia tlenem

Do metali i stopów, które nie dają się ciąć tlenem lub cięcie, których jest utrudnione oraz niemożliwe należą: stale wysokostopowe (nierdzewne, kwasoodporne, żaroodporne), żeliwo, miedź, brąz, mosiądz, aluminium i jego stopy. Zasadniczą przeszkodą przy cięciu wymienionych metali i ich stopów są tlenki powstające podczas cięcia, które mają znacznie wyższą temperaturę topnienia od przecinanego materiału (tab. 14.1).

Duży wpływ na proces cięcia tlenem stali ma zawartość w niej węgla (rys. 14.3). Jak wpływają na proces cięcia stali jej ewentualne składniki stopowe przedstawiono w tabelicy 14.2.

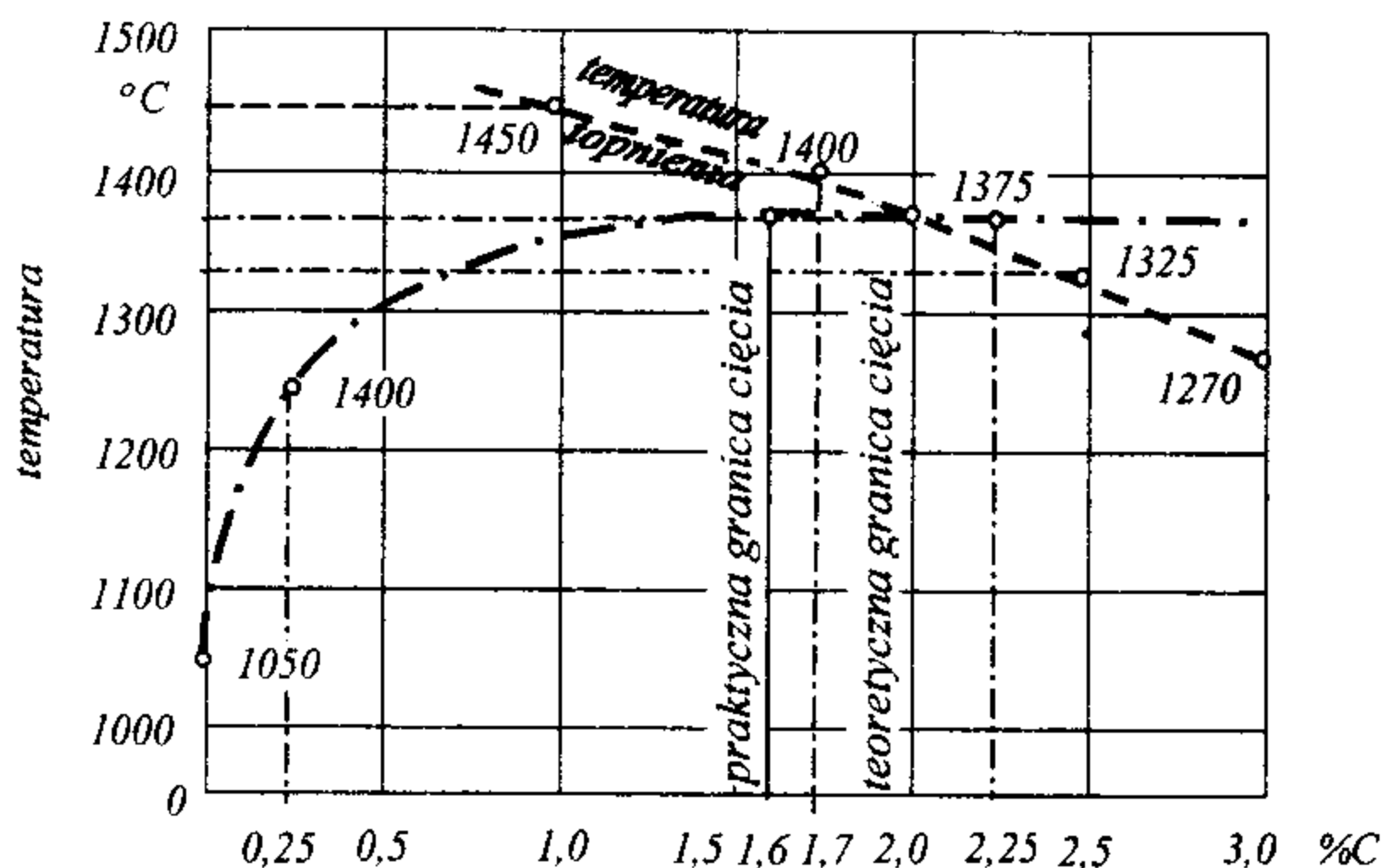
Tablica 14.1. Temperatury topnienia niektórych metali (stopów) oraz ich tlenków

Rodzaj materiału	Temperatura topnienia metalu, °C	Temperatura topnienia tlenków, °C	Możliwości cięcia tlenem
Stal niskowęglowa	1480	1330	cięcie łatwe
Żeliwo	1200	1330	cięcie trudne zwykłym palnikiem
Miedź	1083	1336	cięcie niemożliwe
Aluminium	660	2050	cięcie niemożliwe
Chrom	1600	1990	cięcie niemożliwe
Mangan	1250	1560	cięcie niemożliwe
Kobalt	1490	1810	cięcie niemożliwe

Tablica 14.2. Wpływ składników stopowych stali na proces cięcia tlenem stali

Składnik stopowy	Zawartość, %	Możliwości cięcia tlenem
	do 0,5	nie przeszkadza w cięciu
	0,5 ÷ 1,5	cięcie utrudnione, wymagane podgrzewanie wstępne
	powyżej 1,5	cięcie niemożliwe
Mn	do 13	nie przeszkadza w cięciu
	powyżej 13	wymagane podgrzewanie wstępne
Si	do 0,5	nie przeszkadza w cięciu
	0,5 ÷ 2	wymagane podgrzewanie wstępne
	powyżej 2	cięcie utrudnione
Ni	do 15	cięcie możliwe specjalnym palnikiem przy użyciu topnika
	15 ÷ 30	cięcie utrudnione
	powyżej 30	cięcie niemożliwe
Cr	do 2	cięcie możliwe
	2 ÷ 5	wymagane podgrzewanie wstępne
	powyżej 5	cięcie niemożliwe
Mo	do 0,5	nie utrudnia cięcia
	0,5 ÷ 2	cięcie utrudnione
	powyżej 2	cięcie niemożliwe

Składniki stopowe będące w stali mogą podhartowywać materiał w strefie cięcia powodując pęknięcia powierzchniowe. Dlatego też stale o wartości powyżej 0,35%C lub stale z pierwiastkami zwiększającymi hartowność materiału muszą być podgrzewane wstępnie przed rozpoczęciem procesu cięcia.



Rys. 14.3. Wpływ zawartości węgla w stali na temperaturę zapłonu podczas cięcia

Temperaturę wstępnego podgrzewania eliminującego podhartowanie w strefie wpływu ciepła dobiera się w zależności od wartości obliczonego równoważnika węgla  $C_e$  (tab. 14.3).

Tablica 14.3. Temperatura wstępnego podgrzewania stali przed cięciem tlenowym w zależności od wartości  $C_e$

Wielkość równoważnika węgla $C_e$ , %	Temperatura wstępnego podgrzewania, °C	Warunki chłodzenia
poniżej 0,35	20	na powietrzu
0,35 ÷ 0,4	20 ÷ 100	
0,4 ÷ 0,5	100 ÷ 200	
0,5 ÷ 0,6	200 ÷ 300	
powyżej 0,6	350 ÷ 500	w piecu

Oprócz hartowania się powierzchni cięcia oraz ich okolic (SWC) mogą występować również takie zmiany jak:

- 1/ nawęglanie się powierzchni, gdyż żelaza wypala się więcej niż węgla,
- 2/ zmniejszenie zawartości składników stopowych takich jak: chromu, manganu, krzemu w wyniku wypalania ich z powierzchni,
- 3/ wzrost zawartości pierwiastków stopowych takich, jak: niklu, miedzi w wyniku podpływania ich ku powierzchni cięcia.



### 14.2.3. Technika cięcia tlenem

Zależnie od stopnia zmechanizowania procesu cięcia wyróżnia się cięcie ręczne, półautomatyczne i automatyczne.

Rozpoczęcie procesu cięcia tlenem powinno być poprzedzone:

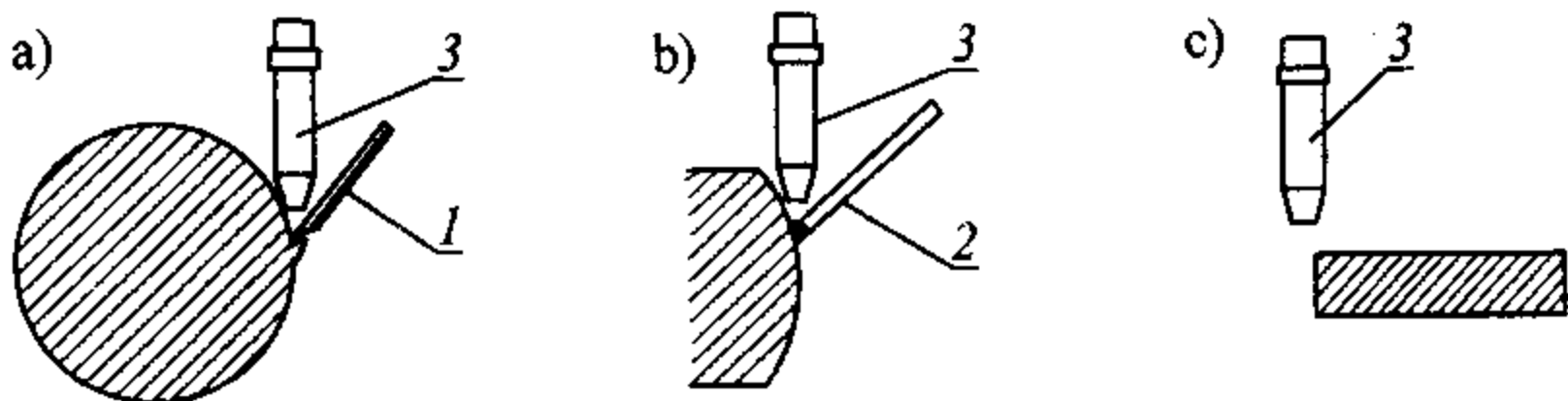
- oczyszczeniem powierzchni przecinanego materiału z rdzy, zgorzelin, farby, smarów itp.,
- wytrasowaniem linii cięcia,
- regulacją płomienia podgrzewającego (płomień normalny) oraz ciśnienia tlenu tnącego,
- w razie potrzeby zabezpieczeniem przecinanego materiału przed odkształceniem,
- podgrzaniem wstępnym materiału przecinanego (w razie konieczności), patrz tablica 14.2 i 14.3.

Przystępując do cięcia należy nagrzać materiał przecinany w miejscu, gdzie chcemy rozpocząć cięcie do temperatury zapłonu (czerwonego żaru), a następnie otworzyć zawór tlenu tnącego. Płomień podgrzewający reguluje się przy otwartym przepływie tlenu tnącego.

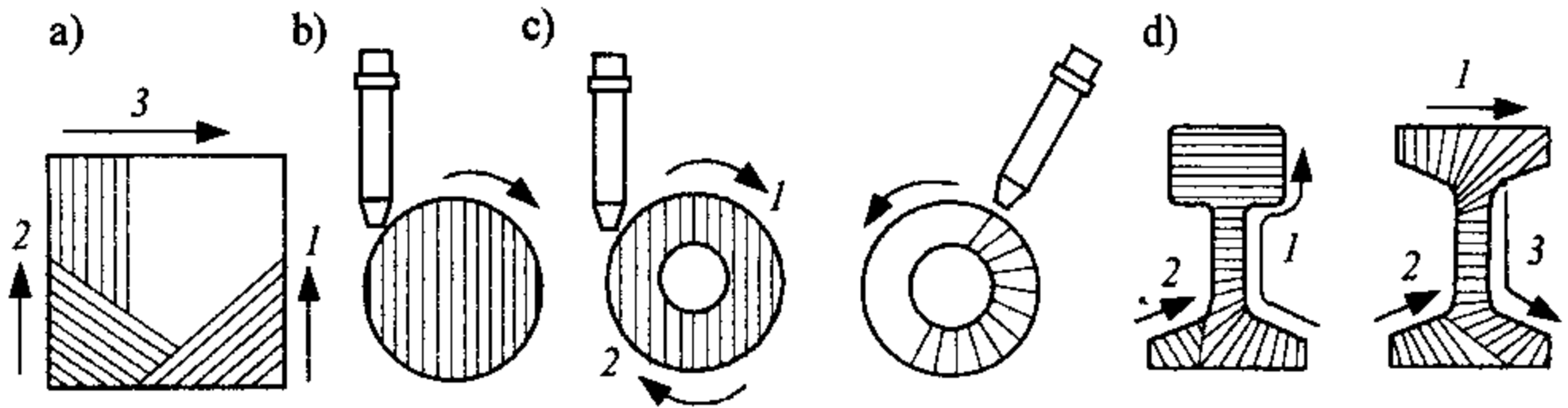
Płomień palnika zasilanego innymi gazami (wodór, propan – butan, gaz ziemny itp.) reguluje się przy zamkniętym przepływie tlenu tnącego.

Blachy, przedmioty płaskie przecina się za jednym przejściem palnika na całej grubości materiału przecinanego. Przedmioty o grubościach przewyższających możliwości cięcia palnikiem oraz o nieregularnych kształtach przecina się w kilku ruchach palnika (rys. 14.4 i rys. 14.5). W trakcie cięcia należy dobrać taki kierunek ruchu palnika, aby wycinany przedmiot był jak najdłużej związany z arkuszem blachy. Zapobiega to odkształceniom przedmiotu.

W zależności od zaistniałych potrzeb cięcie można rozpoczynać na krawędziach ostrych lub zaokrąglonych oraz od środka przecinanego materiału. Rozpoczynając cięcie od środka należy uprzednio wywiercić otwór lub go wypalić palnikiem.



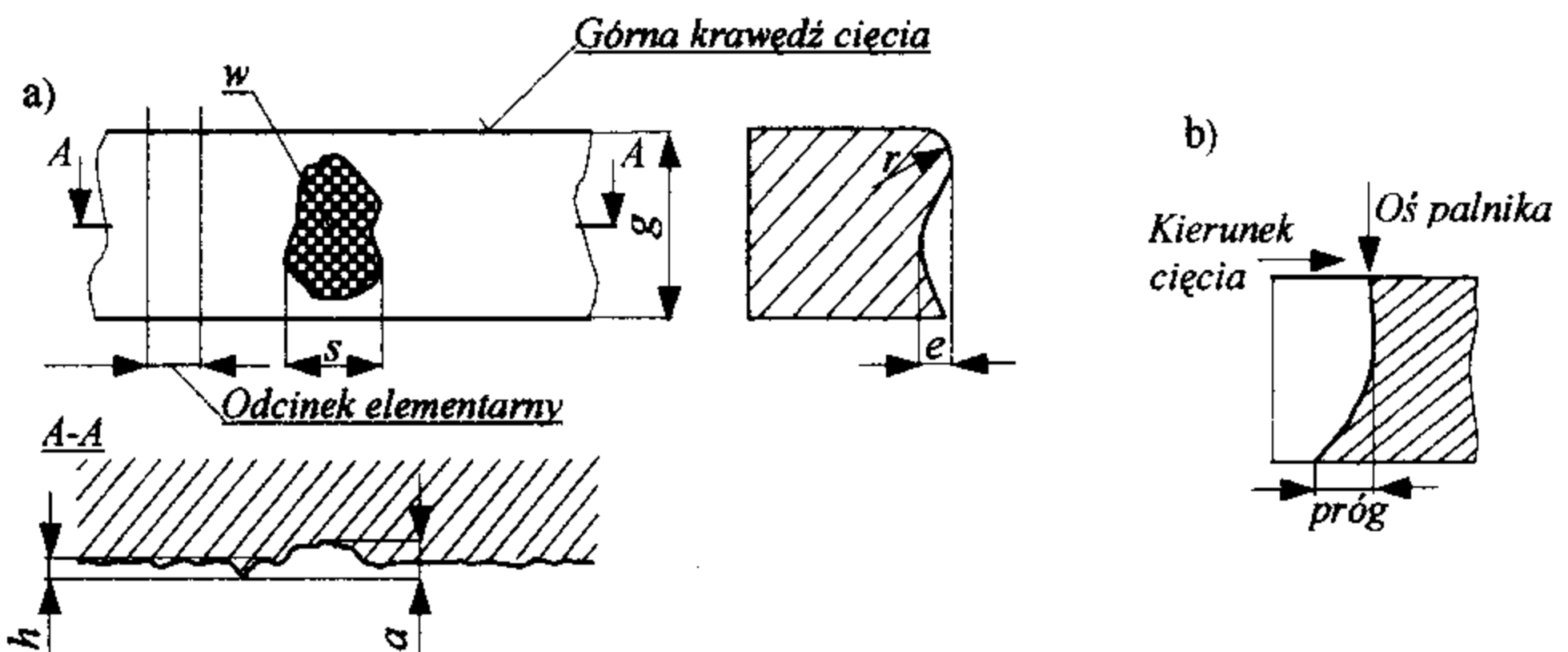
Rys. 14.4. Sposoby rozpoczynania cięcia: a, b) na powierzchniach wypukłych, c) blach; 1 - przecinak do wykonania odstającego zacięcia, 2- drut stalowy, 3 - palnik



Rys. 14.5. Przykłady przecinania palnikiem przedmiotów o różnych kształtach:  
 a) bloków kwadratowych, b) wałów pełnych, c) wałów wydrążonych,  
 d) szyn i dźwigarów dwuteowych; 1,2,3 – kolejne ruchy palnika podczas cięcia

#### 14.2.4. Jakość powierzchni cięcia

Podczas wykonywania procesu cięcia stali występują nieuniknione zakłócenia parametrów wynikających np.: z drgań układu prowadzenia palnika, działania płomienia oraz rozprężania strugi tlenu tnącego. Zakłócenia te powodują powstawanie nierówności (wad) powierzchni cięcia. Do wad powierzchni cięcia można zaliczyć (rys. 14.6): Klasyfikację jakości i tolerancji wymiarowych powierzchni ciętych tlenem zawiera norma PN – EN 29606-3.



Rys. 14.6. Charakterystyka powierzchni cięcia: a) parametry powierzchni cięcia;  
 a – głębokość wżeru, e – różnica płaskości, g – grubość materiału,  
 h – głębokość rowka, r – promień nadtopienia górnej powierzchni,  
 w – wżery, s – szerokość wżeru,  
 b) tworzenie się progu podczas cięcia

- 1/ rowki, usytuowane zgodnie z kierunkiem strugi tlenu tnącego,
- 2/ próg, występujący przy zwiększonej prędkości cięcia,
- 3/ wżery,
- 4/ różnice płaskości powierzchni cięcia,
- 5/ nadtopienie górnej krawędzi ciętego materiału.

Na jakość powierzchni cięcia mają wpływ następujące parametry cięcia:

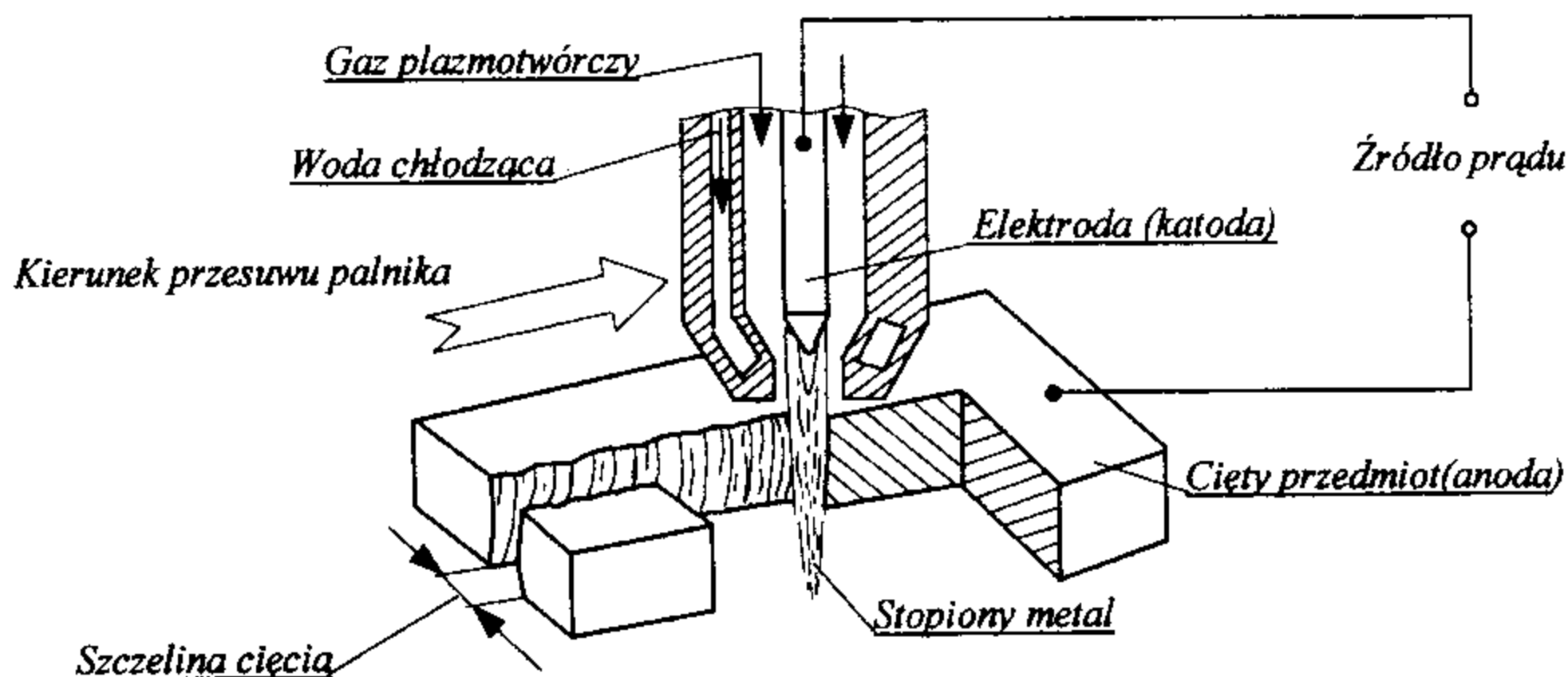
- odległość dyszy palnika od powierzchni przecinanej,
- ciśnienie tlenu tnącego,
- szybkość cięcia,
- jakość tlenu.

### 14.3. Cięcie plazmowe - PAC

#### 14.3.1. Istota cięcia strumieniem plazmy

Cięcie strumieniem plazmy PAC (Plasma Arc Cutting) polega na wykorzystaniu bardzo wysokiej temperatury ( $1500^{\circ}\text{C} \div 25000^{\circ}\text{C}$ ) oraz bardzo dużej prędkości wylotowej gazów wychodzących z dyszy palnika plazmowego do stapiania i wydmuchiwania metalu ze szczeliny cięcia (rys. 14.7).

Plazmę otrzymuje się przez przepuszczenie gazu (argon, wodór, azot, tlen, powietrze lub mieszaniny tych gazów) przez skoncentrowany w dyszy palnika łuk elektryczny. Na wskutek wysokiej temperatury łuku następuje częściowo jonizacja i rozpad (dysocjacja) gazów, które tworzą mieszaninę o dużej zdolności emisyjnej, składającej się ze swobodnych jonów dodatnich, cząstek oraz elektronów.



Rys. 14.7. Schematyczne przedstawienie zasady cięcia plazmowego

Wadą procesu cięcia plazmowego jest wysoki poziom hałasu, zagrożenie porażenia prądem elektrycznym, silne promieniowanie łuku, duża ilość gazów i dymów.

W porównaniu z innymi metodami cięcia plazmowe wykazuje następujące zalety:

- 1/ wielokrotnie większa prędkość cięcia,
- 2/ duża gładkość powierzchni ciecicia,
- 3/ bardzo mała strefa wpływu ciepła,
- 4/ znaczne obniżenie kosztów cięcia.

### 14.3.2. Rodzaje palników do cięcia plazmowego

Dla różnych odmian cięcia plazmowego zachodzi potrzeba stosowania palników o różnej konstrukcji, różnych elektrod i kształt dysz. W praktyce stosuje się palniki do cięcia ręcznego jak i maszynowego (rys. 14.8) z łukiem: zewnętrznym (zależnym) i wewnętrznym (niezależnym).



Rys. 14.8. Możliwe rodzaje konstrukcji palników plazmowych

Źródła prądu i palniki do ciecicia muszą być dobierane w zależności od grubości przecinanych materiałów. Cienkie blachy można ciąć z zastosowaniem niedrogich, chłodzonych gazem palnikami tylko wówczas, gdy czas włączenia jest stosunkowo krótki (aby palnik i źródło prądu nie zostały przegrzane).

Do cięcia grubszych materiałów stosuje się źródła prądu o dużej mocy i palniki plazmowe chłodzone wodą.

Palniki o łuku wewnętrznym, gdzie łuk jarzy się między elektrodą, a dyszą miedzianą stosuje się do cięcia materiałów nie przewodzących prądu elektrycznego (np. ceramika). Zaś do cięcia metali używa się palników z łukiem zewnętrznym.

Coraz częstsze zastosowanie znajduje cięcie maszynowe palnikami plazmowymi pod lustrem wody, co znacznie ogranicza poziom hałasu, wydzielanie gazów i oparów, a także zmniejsza odkształcenia przecinanych elementów.

### 14.3.3. Parametry cięcia plazmowego

Do podstawowych parametrów cięcia strumieniem plazmy zalicza się:

- moc łuku plazmowego,
- prędkość cięcia,
- średnica dyszy palnika,
- natężenie przepływu gazu plazmotwórczego,
- rodzaj i konstrukcja elektrody,
- średnica dyszy zawężającej,
- położenie palnika względem ciętego materiału.

Na jakość powierzchni cięcia mają wpływ: natężenie prądu, zużycie gazów, prędkość cięcia i odległość palnika od materiału.

### 14.3.4. Gazy plazmotwórcze

Przy cięciu plazmowym mogą być stosowane następujące gazy plazmotwórcze:

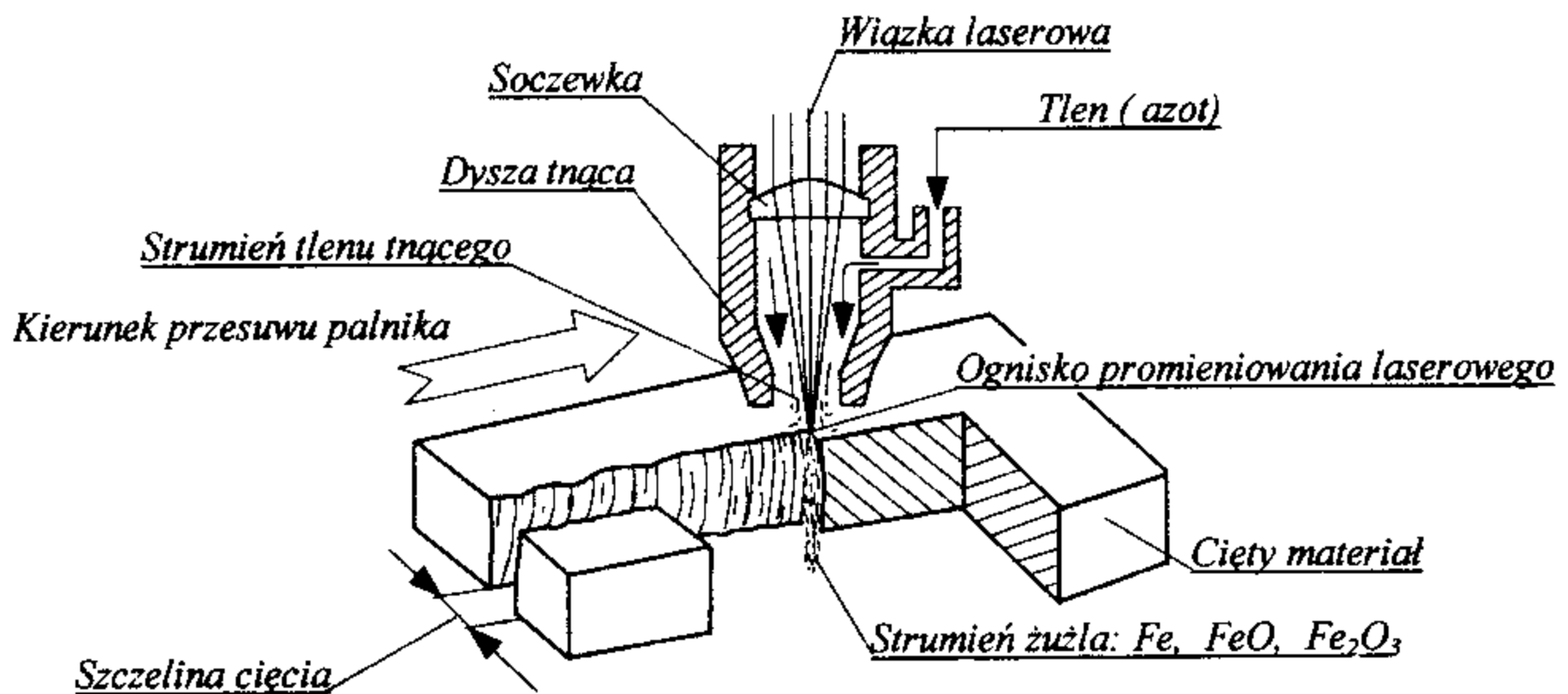
- **mieszanki argonowo – wodorowe**, są bardzo dobrymi gazami plazmotwórczymi do cięcia grubszych blach ze stali chromowo-niklowych, aluminium i jego stopów,
- **azot** stosowany do cięcia materiałów ze stali niestopowych o mniejszych grubościach. W postaci mieszanki z wodorem jest stosowany również do cięcia stali chromowo-niklowych i stopów aluminium.
- **tlen** jest stosowany głównie do cięcia materiałów ze stali niestopowych o małych grubościach. W wyniku oddziaływania tlenu na stopiony materiał zmniejsza się lepkość strumienia ciekłego metalu, który staje się bardziej płynny, co zapobiega tworzeniu się sopli.

- **sprężone powietrze** jako gaz plazmotwórczy stosowane jest głównie do cięcia ręcznego cieńszych przedmiotów. Sprężone powietrze nie może zawierać oparów oleju i wilgoci. Łączy ono w sobie zalety cięcia plazmowego azotem i tlenem.

## 14.4. Cięcie laserowe

### 14.4.1. Istota cięcia laserowego

Cięcie laserowe jest procesem, w którym energia promieniowania laserowego ciągłego lub impulsowego powoduje miejscowe stopienie lub stopienie i odparowanie ciętego materiału. Aby uzyskać wymaganą do cięcia laserowego ilość ciepła na powierzchni ciętego materiału promień lasera musi zostać zogniskowany przez odpowiednie soczewki lub system luster. W wyniku absorpcji promieniowania laserowego przedmiot nagrzewa się do temperatury topnienia, a zaś dodatkowo wiązka gazu reaktywnego lub obojętnego wydmuchuje ciekły metal i pary metalu ze szczeliny cięcia (rys. 14.9).



Rys. 14.9. Schematyczne przedstawienie zasady cięcia laserowego. Tlen jako gaz tnący do cięcia laserowego poprzez spalanie (azot do cięcia poprzez stapianie)

Proces cięcia laserowego może być prowadzony tak ręcznie, jak i automatycznie na stanowiskach zrobotyzowanych ze sterowaniem numerycznym z możliwością cięcia trójwymiarowego.

W procesach spawalniczych stosowane są lasery gazowe ( $\text{CO}_2$ ) oraz lasery stałe typu Nd:YAG i Nd:Glass.

Cięcie laserowe można podzielić na trzy metody:

- cięcie laserowe poprzez spalanie (utlenianie),
- cięcie laserowe poprzez stapianie,
- cięcie laserowe z wykorzystaniem sublimacji.

Istotną zaletą cięcia laserowego są wąskie szczeliny cięcia, precyzyjne kontury krawędzi, małe tolerancje wymiarowe ciętych elementów oraz małe odkształcenia cieplne.

#### 14.4.2. Parametry cięcia laserowego

Do podstawowych parametrów cięcia laserowego zalicza się:

- gęstość mocy wiązki laserowej,
- rodzaj gazu towarzyszącego procesowi cięcia i jego ciśnienie,
- średnica ogniska wiązki,
- długość ogniska wiązki,
- prędkość cięcia.

Lasery gazowe i stałe mogą dostarczać energię w postaci impulsów o sterowanej mocy i czasie ich trwania lub jako ciągłą wiązkę energii.

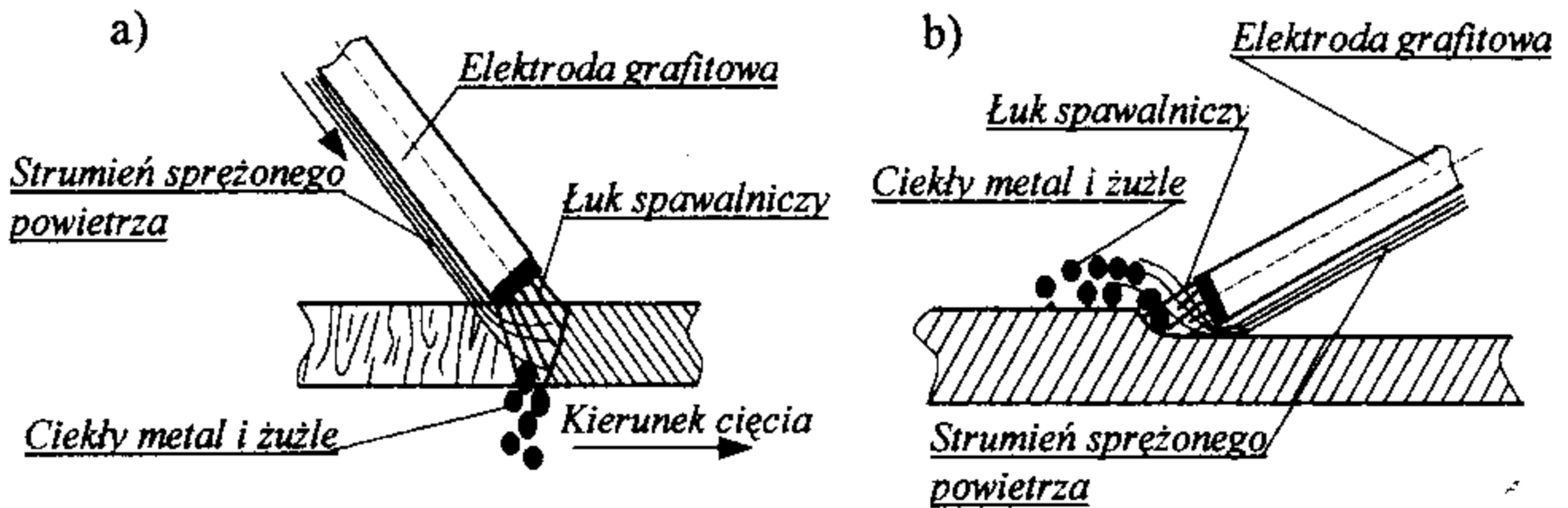
Możliwe jest cięcie z dużymi prędkościami uzyskując dobrą jakość powierzchni cięcia wszystkich materiałów konstrukcyjnych. Umożliwia również wykonywanie otworów o średnicy od 0,0025 mm do 1,5 mm i głębokości do 25 mm we wszystkich pozycjach. Do wykonywania otworów w materiałach metalicznych są wykorzystywane lasery stałe typu Nd:YAG i Nd:Glass, a do materiałów niemetalicznych lasery gazowe CO<sub>2</sub>.

### 14.5. Cięcie łukowe

#### 14.5.1. Cięcie łukowo – powietrzne elektrodą grafitową lub elektrodą otuloną

Proces cięcia łukowo - powietrznego elektrodą grafitową oraz proces żłobienia polega na stapianiu ciętego metalu ciepłem łuku jarzącego się między elektrodą grafitową (otuloną) a ciętym metalem i wydmuchaniu stopionego metalu silnym strumieniem sprężonego powietrza (rys. 14.10). Proces ten może być również zastosowany do żłobienia i skórowania wszystkich metali, które można stopić ciepłem łuku elektrycznego.

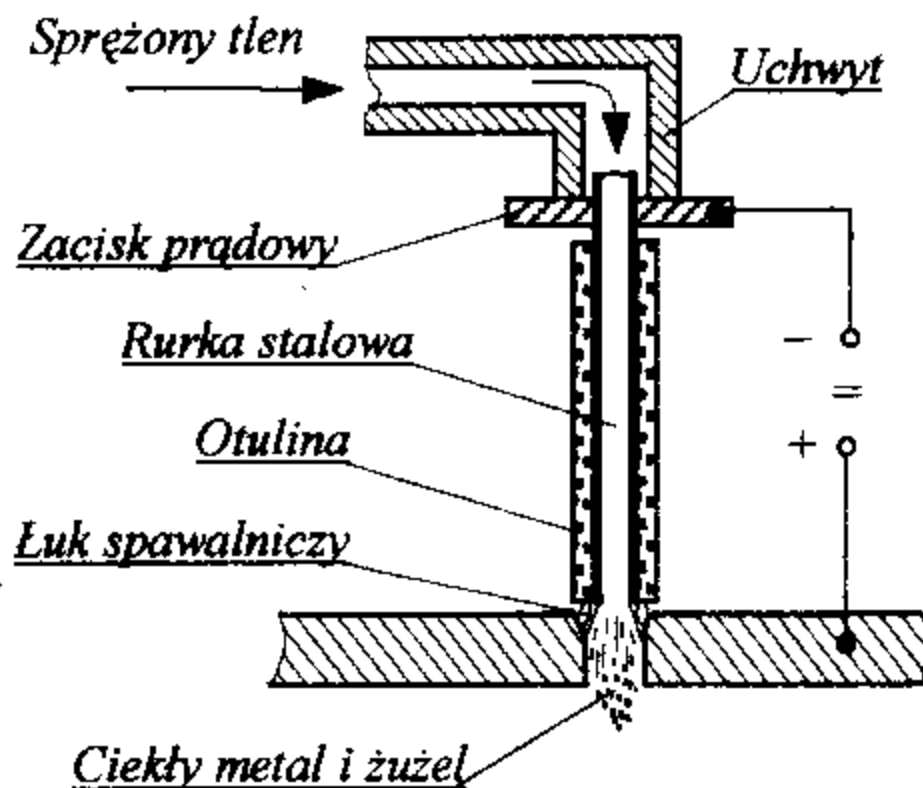
Łuk elektryczny może być zasilany prądem stałym o biegunowości dodatniej lub prądem przemiennym. Elektrody grafitowe pokryte są cienką warstwą miedzi.



Rys. 14.10. Schematyczne przedstawienie procesu łukowo - powietrznego: a) cięcia, b) żłobienia

### 14.5.2. Cięcie łukowo – tlenowe

Proces cięcia łukowo – tlenowego polega na stapianiu ciepłem łuku elektrycznego oraz spalaniu metalu tlenem, którego strumień usuwa żużel i ciekły metal podobnie jak przy cięciu tlenem (rys. 14.11). W metodzie tej stosowane są elektrody rurkowe, których otulina rutyłowa zapewnia w obszarze cięcia stabilizację jarzenia się łuku, zwiększa rzadkoplątność powstających tlenków oraz ułatwia ich usunięcie ze szczeliny cięcia. Metodę tą można również zastosować do żłobienia lub przebijania.



Rys. 14.11. Schemat zasady cięcia łukowo – tlenowego



## 14.6. Część praktyczna

### 14.6.1. Wyposażenie aparaturowo - materiałowe

- a) stanowisko do cięcia tlenem:
  - butle: tlenowa i acetylenowa z reduktorami,
  - przewody spawalnicze, palnik do cięcia tlenowego,
  - odcinki blach ze stali niestopowej, stali stopowej, miedzi i stopu aluminium o grubości 4 mm,
- b) stanowisko do cięcia plazmowego:
  - przecinarka plazmowa,
  - próbki jak do cięcia tlenem,
- c) stanowisko cięcia i żłobienia łukowego elektrodą grafitową oraz elektrodą otuloną:
  - elektroda grafitowa i elektroda otulona do cięcia łukowego,
  - sprężone powietrze,
  - odcinki blach ze stali niestopowej o grubości 12 mm.

### 14.6.2. Przebieg ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- zapoznanie się instrukcją obsługi urządzeń i przebiegu części praktycznej ćwiczenia,
- przypomnienie przepisów bhp,
- zasady i sposób regulacji płomienia do cięcia tlenem,
- zapoznanie się z techniką i zasadami cięcia tlenem, cięcia plazmowego, cięcia i żłobienia elektrodą grafitową i elektrodą otuloną,
- porównanie jakości cięcia i określenie wpływu parametrów na jakość powierzchni cięcia. Dyskusja i podsumowanie wyników ćwiczenia.

## 14.7. Literatura

1. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. WNT. Warszawa 1999.
2. Mistur L.: Spawanie gazowe, elektryczne i w osłonach gazów ochronnych. „KaBe”. Krosno 1999.
3. Pałasz J.: Poradnik spawacza gazowego. WNT. Warszawa 1986.
4. Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. Wydanie drugie. WNT. Warszawa 1998.

Tablica 14.4. Właściwości fizyczne niektórych metali

Pierwiastek / stal	Temperatura topnienia °C	Temperatura wrzenia °C	Ciepło topnienia kJ/mol	Ciepło parowania w tempera- turze wrzenia kJ/mol	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Przewod- ność cieplna 0÷ 100°C kW/ (kg·°C)	Ciepło właściwe kJ/ (kg·°C)	Współ- czynnik rozszer- zalności liniowej w 20°C $\alpha \cdot 10^6$ 1/°C
<b>Ag</b>	961	2210	11,41	250,80	10500	480,00	225,72	19,10
<b>Al</b>	660	2480	10,45	290,92	2700	238,26	915,42	23,50
<b>Au</b>	1063	2950	12,79	341,92	19300	292,60	129,58	14,10
<b>Be</b>	1284	2400	11,70	308,48	1850	167,20	2010,58	13,00
<b>Bi</b>	271	1510	10,86	171,79	9800	7,94	96,14	13,40
<b>Ca</b>	850	1690	8,65	161,34	1540		664,62	22,00
<b>Cd</b>	321	765	6,39	99,48	8640	83,60	234,08	31,00
<b>Co</b>	1495	2900	15,48		8710	68,97	434,72	12,50
<b>Cr</b>	1850	2430	15,25	298,45	7100	68,97	459,80	6,50
<b>Cu</b>	1083	2590	12,99	304,30	8960	392,92	384,56	17,00
<b>Fe</b>	1539	3070	15,17	339,83	7870	71,06	455,62	12,1
<b>Mg</b>	650	1103	8,69	133,76	1740	167,20	1036,64	26,0
<b>Mn</b>	1260	2150	14,63	230,73	7400		489,06	23,00
<b>Mo</b>	2620	5550		505,78	10300	142,12	259,16	5,10
<b>Nb</b>	2410	3000			8600		267,52	7,20
<b>Ni</b>	1455	3000	17,68	373,69	8900	87,78	451,34	13,3
<b>Pb</b>	327	1740	4,97	178,48	11340			
<b>Pd</b>	1552		16,72	459,80	11900			
<b>Pt</b>	1769	4240	19,69	468,16	21940			
<b>Re</b>	3167				21000			
<b>Si</b>	1440	2600	46,39	303,46	2340			
<b>Sn</b>	231	2730	7,06	292,60	7360			
<b>Ta</b>	2850				16600			
<b>Te</b>	450	990	17,55		6240			
<b>Ti</b>	1660	3260	18,81	403,37	4500			
<b>V</b>	1915	3350			6000			
<b>W</b>	3410	6000	50,99	735,68	19300			
<b>Zn</b>	419,5	907	7,18	114,95	7140			
<b>Zr</b>	1860	4760		535,04	6490			
<b>Stal 0,2%C</b>	1490÷ 1520							
<b>Stal 0,8%C</b>	1380÷ 1490							

Tablica 14.5. Temperatura topnienia, gęstość tlenków prostych i złożonych, fluorków i chlorków występujących w żuźlach.

Skład chemiczny	Temperatura topnienia °C	Gęstość w 20 °C kg/dm <sup>3</sup>	Symbol chemiczny	Temperatura topnienia °C	Gęstość w 20°C kg/dm <sup>3</sup>
<b>FeO</b>	1370	4,7 ÷ 5,5	<b>MgO·SiO<sub>2</sub></b>	1560	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1560	5,2	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub></b>	1487	3,00
<b>MnO</b>	1785	4,8; 5,2; 5,5	<b>CaO·SiO<sub>2</sub></b>	1216	4,70
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	S, R 1275	2,3	<b>2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1436	
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	1597	4,9; 5,2	<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	450	1,85
<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	1705	4,9	<b>BaF<sub>2</sub></b>	1280	4,80
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2277	5,0	<b>BeF<sub>2</sub></b>	800	2,01
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1825	4,2; 4,3	<b>AlF<sub>3</sub></b>	1040	2,90
<b>CaO</b>	2570	3,4	<b>AlCl<sub>3</sub></b>	194	2,44
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	S 250		<b>LiF</b>	446	4,00
<b>MgO</b>	2700	3,6	<b>LiCl</b>	614	2,07
<b>K<sub>2</sub>O</b>	R 350	2,3	<b>MgCl<sub>2</sub></b>	708	2,30
<b>SiO<sub>2</sub></b>	1710	2,3; 2,6	<b>MgF<sub>2</sub></b>	1396	2,90; 3,20
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2050	3,9; 4,0	<b>KCl</b>	776	2,0
<b>FeO·SiO<sub>2</sub></b>	1350	3,0	<b>KF</b>	880	2,5
<b>2FeO·SiO<sub>2</sub></b>	1320	4,3	<b>NaCl</b>	801	2,16
<b>MnO·SiO<sub>2</sub></b>	1285	3,6	<b>NaF</b>	990	2,8
<b>2MnO·SiO<sub>2</sub></b>	1305	4,1	<b>CaCl<sub>2</sub></b>	772	2,5
<b>CaO·SiO<sub>2</sub></b>	1510		<b>CaF<sub>2</sub></b>	1360	3,18

## 15. KONTROLA JAKOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH

### 15.1. Niezgodności spawalnicze (wady) w złączach spawanych, poziomy jakości

Niezgodności spawalnicze (wady spoiny) z punktu widzenia kontroli jakości dzielą się na:

- niezgodności zewnętrzne (wady zewnętrzne),
- niezgodności wewnętrzne (wady wewnętrzne).

Klasyfikację niezgodności spawalniczych (wad) jakie mogą występować w złączu spawanym metali są przedstawione w normie PN-EN 26520. W zależności od rodzaju i wymiarów niezgodności spawalniczych ustala się **poziom jakości złącza spawanego**. Dla każdego **poziomu jakości** określone są maksymalne rzeczywiste wymiary niezgodności.

Norma PN-EN 25817 określa graniczne wymiary niezgodności spawalniczych dla określenia poziomu jakości. Norma ta ustala 3 poziomy jakości według niezgodności spawalniczych występujących w badanym złączu. Poziomy jakości oznaczono literami **B, C, D** w zależności od kategorii wymagań:

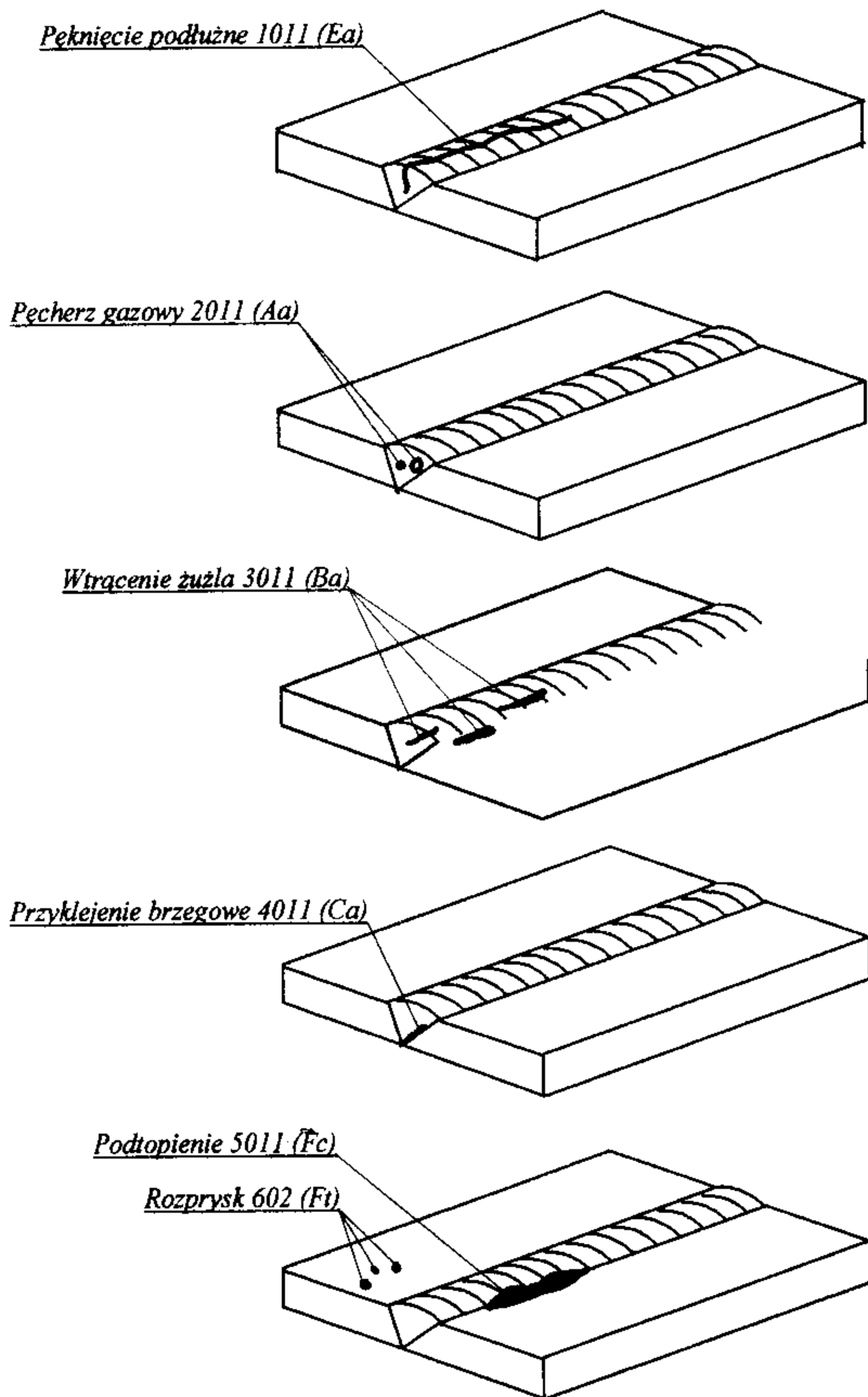
- poziom **B** - wymagania ostre,
- poziom **C** - wymagania średnie,
- poziom **D** - wymagania łagodne.

(wg normy PN-89/M-69777 odpowiada to 5-ciu klasom wadliwości złącza spawanego).

Zgodnie z PN-EN 288-1 podstawowe grupy niezgodności spawalniczych są oznaczone liczbą trzycyfrową (wg PN-75/M-69703 - litera alfabetu), natomiast liczbą czterocyfrową oznacza się podgrupy niezgodności. Wyodrębnia się 6 podstawowych grup niezgodności spawalniczych (patrz rys. 15.1):

1. Pęknięcia	100	(wg PN-75/M-69703 E)
2. Pustki (pęcherze)	200	(wg PN-75/M-69703 A)
3. Wtrącenia stałe	300	(wg PN-75/M-69703 B)
4. Przyklejenia lub brak przetopu	400	(wg PN-75/M-69703 C,D)
5. Niezgodności dotyczące kształtu	500	(wg PN-75/M-69703 F)
6. Inne niezgodności nie wymienione w pkt. 5	600	(wg PN-75/M-69703 F)

Poziom jakości wykonanego złącza spawanego określa się na odcinku pomiarowym o długości  $N = 100\text{mm}$  (wg PN-89/M-69777 - odcinek normalny). Jest to odcinek o największej ilości wykrytych niezgodności spawalniczych (wad) w złączu spawanym.



Rys. 15.1. Przykładowe niezgodności spawalnicze

## 15.2. Metody badań złączy spawanych

### 15.2.1. Cel określenia jakości złączy spawanych

Celem badań złączy spawanych jest określenie ich jakości, tzn. określenie poziomu jakości wykonanego złącza względem poziomu jakości złącza ustalonego przez projektanta konstrukcji spawanej (wg PN-89/M-69777 - klasa wadliwości złącza wykonanego względem dopuszczalnej klasy wadliwości). Jakość konstrukcji spawanych, głównie – wykonanych złączy zależy ściśle od przestrzegania wymagań zawartych w normach dotyczących techniki spawania, materiałów spawalniczych oraz kwalifikacji personelu spawalniczego (spawaczy, techników, inżynierów).

### 15.2.2. Podział metod badań złączy spawanych

Ocena jakości złączy spawanych opiera się na wynikach badań nieniszczących oraz dodatkowo na badaniach niszczących. Jako badania główne uznawane są:

- badania wizualne (VT),
- badania radiograficzne (RT),
- badania ultradźwiękowe (UT),

oraz uzupełniające:

- badania penetracyjne (PT),
- badania magnetyczne (MT),
- badania metodą prądów wirowych (ET).

Zasady przeprowadzania badań wg tych metod nieniszczących (NDT – Non Destructive Testing) oraz wymagania związane z interpretacją wskazań od niezgodności (wad) w tych metodach harmonizują i porządkują normy PN-EN, PN-ISO.

Dodatkowymi badaniami złączy spawanych dla określenia ich wytrzymałości oraz wytrzymałości spoiny są badania niszczące do których zaliczamy:

- próbę rozciągania poprzecznego złącza,
- próbę rozciągania wzdłużnego spoiny,
- próbę zginania ,
- próbę łamania ,
- próbę udarności,
- próbę twardości,
- badania makroskopowe.

Ważnym warunkiem prawidłowej oceny jakości złączy spawanych jest wybór metody badania. W przypadku wykrywania niezgodności spawalniczych wewnętrznych rodzaj badania ustalamy na podstawie grubości łączonych elementów wg tablicy 15.1:

Tablica 15.1. Ogólnie akceptowane metody wykrywania niezgodności wewnętrznych w stalowych złączach doczołowych i teowych z pełnym przetopem

Materiał i rodzaj złącza	Grubość elementów złącza [ mm ]		
	$t < 8$	$8 < t < 40$	$40 < t < 100$
Stale niestopowe - złącza doczołowe	RT lub (UT)	RT lub (UT)	UT lub (RT)
Stale niestopowe - złącza teowe	(UT) lub (RT)	(UT) lub (RT)	UT lub (RT)
Stale stopowe - złącza doczołowe	RT	RT lub (UT)*	RT lub UT*
Stale stopowe - złącza teowe	(UT)* lub (RT)	(UT)* i/lub (RT)	(UT)* lub (RT)

( ) istnieje ograniczenie w stosunku do metody. Powinna być uzupełniona o PT, MT i/lub VT pojedynczych warstw.  
\* jeżeli UT jest nie wykonywana, złącze powinno być badane odpowiednią metodą dla wykrywania niezgodności powierzchniowych.

## 15.3. Główne metody badań nieniszczących

### 15.3.1. Badania wizualne (VT – Visual Testing)

#### 15.3.1.1. Wstęp

Ocena jakości gotowego złącza spawanego jest podstawowym celem badań wizualnych i temu celowi podporządkowany jest przebieg badań. Badania wizualne (VT) przeprowadza się w oparciu o normy PN-EN 12062 i PN-EN 970 i definiuje jako proces kontroli prowadzonej okiem nieuzbrojonym lub przy użyciu różnych zestawów pomocniczych, mających na celu sprawdzenie czy obiekt spełnia określone wymagania.

Badania polegają na:

1. Pomiarze:

- a) długości złącza,
- b) głębokości podtopień,
- c) wysokości nadlewu,
- d) kształtu spoiny pachwinowej.

2. Kontroli przygotowanych elementów do spawania:

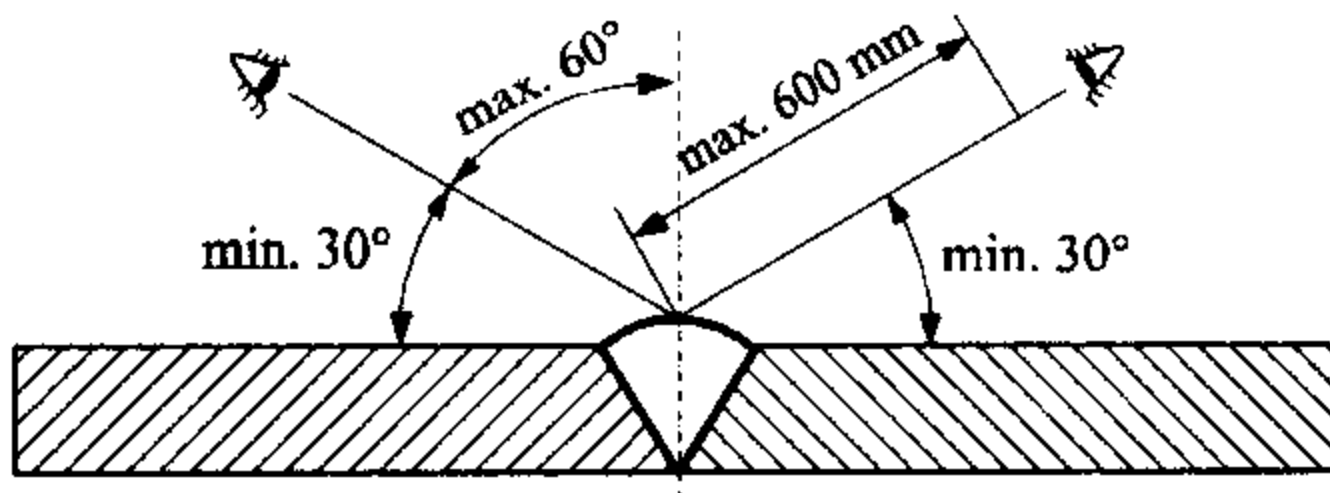
- a) sprawdzenie kształtów i wymiarów,

- b) sprawdzenie przylegania i płaskości,
  - c) sprawdzenie zgodności z rysunkiem.
3. Kontroli procesu spawania:
- a) czyszczenie po wykonaniu poszczególnych ściegów,
  - b) kontrola obecności pęknięć i innych niezgodności spawalniczych,
  - c) kontrola wtopienia międzyściegowego i materiału podstawowego,
  - d) kontrola procesu żłobienia.
4. Kontrola wykonanych spoin:
- a) czyszczenie i obróbka mechaniczna,
  - b) kształt i wymiary złączy,
  - c) kontrola grani i nadlewu spoiny,
  - d) kontrola obróbki cieplnej,
  - e) kontrola złączy po naprawie.

O ile jest to możliwe badaniom wizualnym (VT) należy poddać złącze z obu stron to znaczy od strony lica i od strony grani.

### 15.3.1.2. Technika badań wizualnych

Przed przystąpieniem do badań wizualnych należy miejsce badania przygotować, to znaczy usunąć wszelkie zanieczyszczenia utrudniające kontrolę. Szerokość obszaru kontrolowanego od granicy lico-materiał podstawowy wynosi po 10 mm w każdą stronę. Po wykonaniu czynności przygotowawczych i przeprowadzeniu kontroli, wszystkie zaobserwowane niezgodności spawalnicze i nieprawidłowości wykonawcze opisujemy. Na badanym złączu określamy odcinek pomiarowy o długości  $N=100$  mm, na którym określamy poziom jakości (PJA). Wymagany dostęp do złącza jaki powinien być możliwy dla przeprowadzenia badania VT przedstawia rys. 15.2.



Rys. 15.2. Badania wizualne (VT) - wymagany dostęp do badanego złącza

Do przeprowadzenia badań wizualnych wykorzystuje się następujące przyrządy, które bezwzględnie powinny posiadać atesty – certyfikaty dopuszczający je do badań:



- spoinomierze,
- profilometry spoin pachwinowych,
- szczelinomierze,
- sprawdziany hakowe do pomiaru przesunięcia brzegów,
- suwmiarki,
- liniały lub taśmy miernicze z podziałką,
- lupa o powiększeniu od 2 do 5×.

Norma PN-EN 970 nie ustala poziomów dopuszczalności niezgodności spawalniczych (wad), odsyłając badającego do normy PN-EN 12062, która określa poziom jakości (PJA), poziom badania (PBA) i poziom akceptacji (PAK) dla tej metody badania.

**Poziom Jakości (PJA)** – są to ustalone granice nieciągłości (wad) odpowiadające spodziewanej jakości spoiny,

**Poziom Badania (PBA)** – jest to stopień dokładności wyboru nastawianych parametrów, przy których stosowana jest metoda badania,

**Poziom Akceptacji (PAK)** – jest to poziom badania poniżej którego wykryte niezgodności spawalnicze są akceptowane.

Badania wizualne umożliwiają wykrycie niezgodności spawalniczych typu: **500** – niezgodności dotyczące kształtu, **600** – inne niezgodności nie wymienione w grupie **500**, **100** – jeśli wychodzą na powierzchnię oraz **400** – brak przetopu złącza spawanego jednostronnie.

### 15.3.2. Badania radiograficzne (RT – Radiographic Testing)

#### 15.3.2.1. Wstęp

Badania radiograficzne złączy spawanych mają najdłuższą tradycję oraz niekwestionowaną czołową pozycję spośród innych metod badań nieniszczących. Wykorzystuje się tu zjawisko pochłaniania elektromagnetycznego promieniowania jonizującego przechodzącego przez materię i jego rejestracji na błonach rentgenowskich (defektofilmach) (rys. 15.3).

W radiografii przemysłowej stosowane są następujące rodzaje promieniowania (wg PN-EN 444):

- a) *promieniowanie rentgenowskie* (Rtg) – uzyskuje się je w wyniku bombardowania anody przez wiązkę elektronów z katody w wysokiej próżni spowodowane wysokim napięciem między katodą i anodą (powyżej 70 kV),

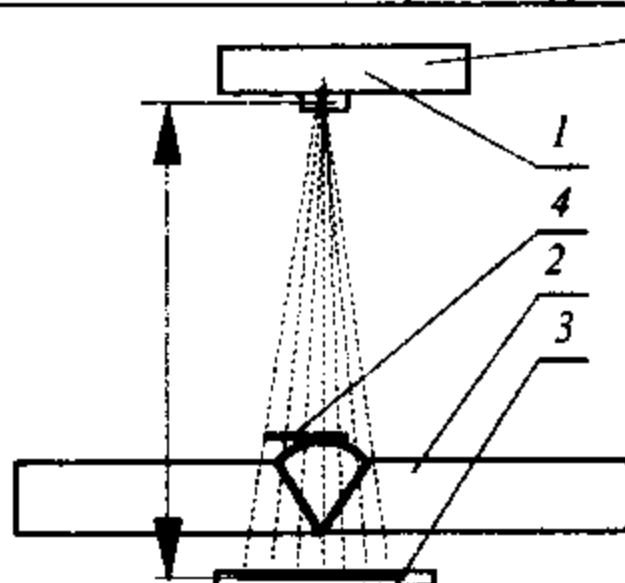
- b) *promieniowanie gamma* – promieniowanie emitowane przez izotopy niektórych pierwiastków promieniotwórczych takich jak: kobalt 60 (Co 60), iryd 192 (Ir 192), tull 170 (Tm 170), selen 75 (Se 75), cez 137 (Cs 137).

### 15.3.2.2. Technika badania

Przed przystąpieniem do badania, miejsce badania należy oczyścić z zanieczyszczeń, które mogą spowodować wystąpienie pozornych niezgodności spawalniczych (wad).

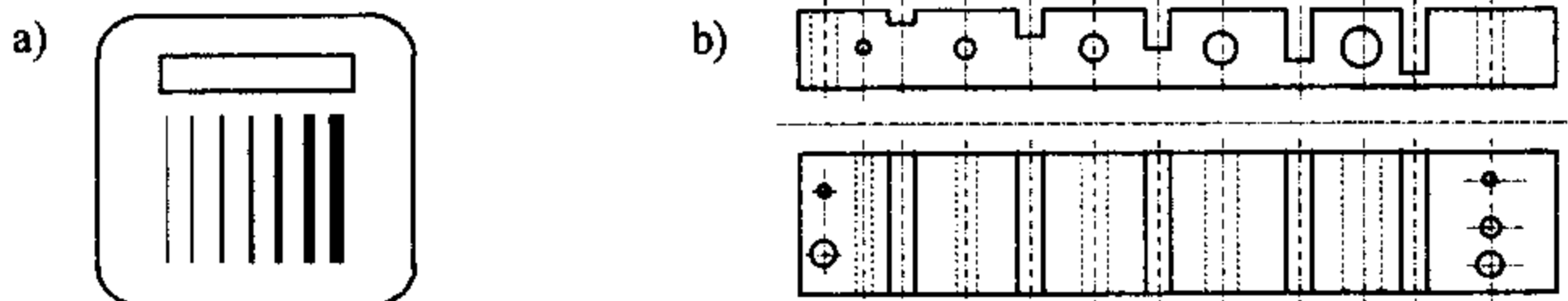
Na rysunku 15.3 przedstawiono schematycznie technikę prześwietlania z zastosowaniem aparatu glowicowego Rtg i aparatu gamma.

Źródło promieniowania: lampa rentgenowska lub gamma



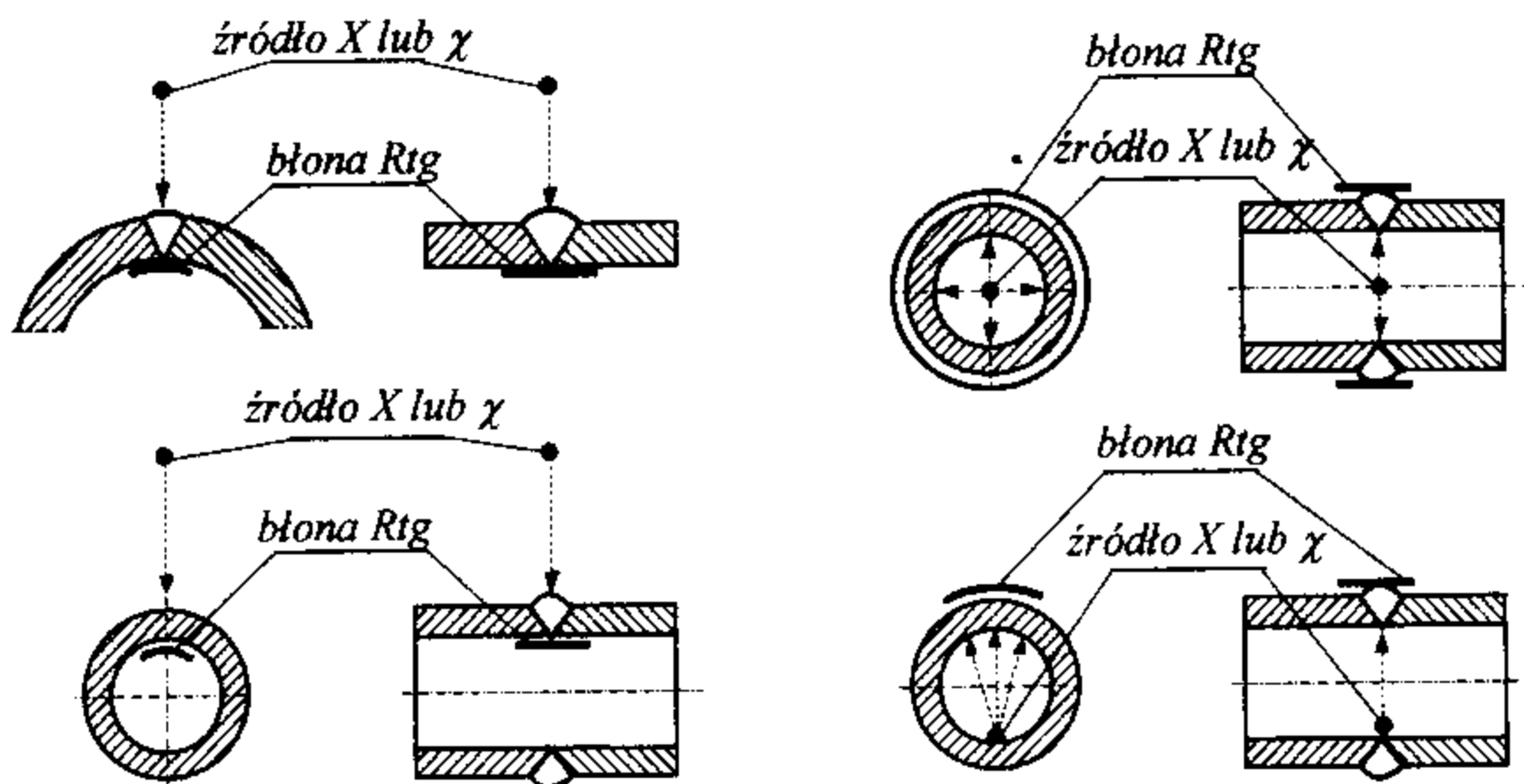
Rys. 15.3. Schemat prześwietlania

Strumień promieniowania jonizującego ze źródła (1) zostaje skierowany na złącze spawane (2). Po przeciwnej stronie złącza znajduje się kasetka z błoną rentgenowską i okładkami wzmacniającymi (3). Okładki wzmacniające obraz mogą być ołowiane (o grubości od 0,05 do 0,1 mm) lub fluorescencyjne. Jakość obrazu radiograficznego kontroluje się przy użyciu wskaźników jakości obrazu (4) zgodnie z wymaganiami norm (rys. 15.4).

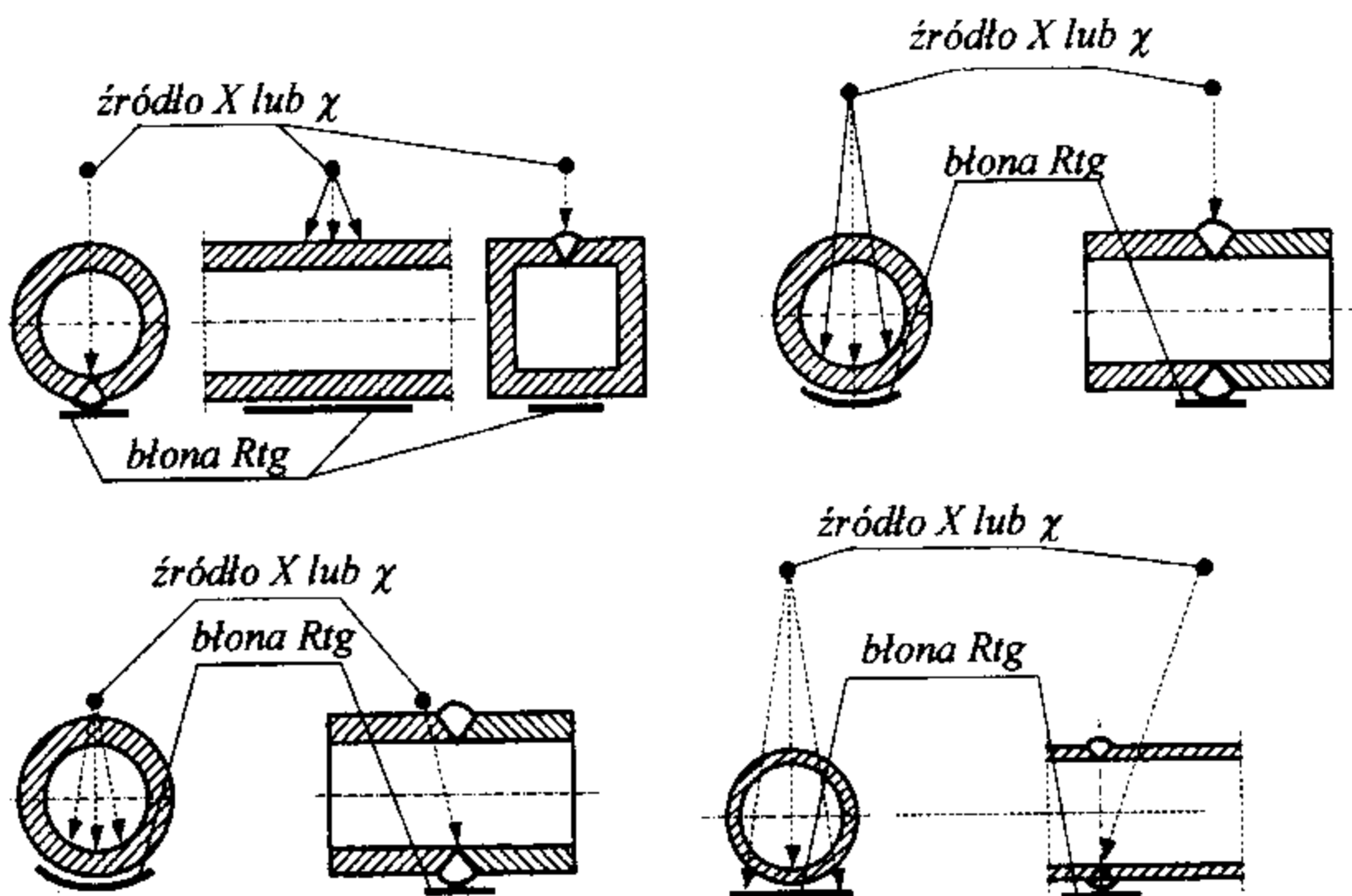


Rys. 15.4. Przykłady wskaźników: a – pręcikowy, b – schodkowo – otworkowy

W badaniach radiograficznych stosuje się metody prześwietlania: przez jedną ściankę (rys. 15.5) i przez dwie ścianki (rys. 15.6).



Rys. 15.5. Schematy metody prześwietlania przez jedną ściankę



Rys. 15.6. Schematy metody prześwietlania przez dwie ścianki

### 15.3.2.3. Ocena jakości złączy spawanych

Oceniając złącze na podstawie obrazu radiograficznego, a więc na podstawie wskazań widocznych na radiogramie (radiogram to błona rentgenowska po obróbce fotochemicznej) ustalamy wymiary niezgodności (wad) i porównujemy z granicznymi wartościami niezgodności (wad), dla określonego poziomu akceptacji (PAK) złącza. Granice dopuszczalności niezgodności spawalniczych złączy doczołowych odpowiadają poziomom jakości określonym w normie PN-EN 25817, przy czym poziomom jakości B i C odpowiada technika badania charakteryzująca się podwyższoną wykrywalnością, natomiast poziom D – charakteryzuje się normalną wykrywalnością. Ponadto są stosowane określenia:

- niezgodności miejscowe (punktowe),
- niezgodności ciągłe.

Niezgodności o długości do 25% kontrolowanego odcinka uważa się za miejscowe zaś powyżej 25% długości kontrolowanego odcinka – za ciągłe.

Norma PN-EN 25817 ustala trzy poziomy akceptacji (PAK) oznaczone cyframi 1, 2, 3 dla określonego poziomu jakości (PJA) wykonanego złącza spawanego jak to przedstawiono w tabelicy 15.2.

Tablica 15.2. Poziomy akceptacji (PAK) i poziomy badania (PBA) w zależności od poziomu jakości złącza (PJA)

Poziomy jakości (PJA)	Techniki i poziomy badania (PBA)	Poziomy akceptacji (PAK)
B	B	1
C	B	2
D	A	3

Zakwalifikowanie do jednego z trzech poziomów jakości opiera się na następujących założeniach:

- odcinkiem podstawowym na którym dokonuje się oceny niezgodności jest odcinek pomiarowy  $N=100$  mm,
- dla każdego poziomu jakości określone są maksymalne wymiary niezgodności (wad) na odcinku pomiarowym złącza,
- na podstawie wskazań widocznych na radiogramie ustalamy wymiary wskazań i porównujemy je z granicznymi wskazaniem dla określonego poziomu akceptacji (PAK) złącza.

### 15.3.3. Badania ultradźwiękowe (UT – Ultrasonic Testing)

#### 15.3.3.1. Wstęp

Fale ultradźwiękowe powstają w wyniku odkształcenia mechanicznego płytki piezoelektrycznej przez doprowadzenie do jej przeciwległych powierzchni różnoimiennych ładunków elektrycznych.

W badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych wykorzystuje się zakres częstotliwości, który powinien mieścić się w przedziale od 0,5 MHz do 10 MHz. Stosowanie fal o tej częstotliwości drgań jest podyktowane tym, że dopiero przy tych częstotliwościach drgania wprowadzane do badanego złącza rozchodzą się w postaci ukierunkowanej wiązki fal, co umożliwia lokalizację wskazań niezgodności (wad) spawalniczych.

Norma PN-EN 583-5 podaje schemat postępowania jakim należy się posługiwać przy kwalifikacji wewnętrznych niezgodności spawalniczych. Podaje zakres grubości łączonych elementów dla których można stosować metodę ultradźwiękową. Wynosi ona od 8 mm do 100 mm grubości łączonych elementów, przy czym zakres może być rozszerzony na inne materiały i o grubości ponad 100 mm. Tablica 15.3 podaje wymagane poziomy badania (PBA) i poziomy akceptacji (PAK) jakie należy zastosować celem ujawnienia odpowiedniego poziomu jakości (PJA).

Tablica 15.3. Wymagane poziomy badania (PBA) oraz poziomy akceptacji (PAK) dla poziomów jakości (PJA) złączy spawanych

Poziomy jakości (PJA)	Poziomy i techniki badania (PBA)	Poziom akceptacji (PAK)
<b>B</b>	Co najmniej <b>PBA-B</b>	<b>2</b>
<b>C</b>	Co najmniej <b>PBA-A</b>	<b>3</b>
<b>D</b>	nie dotyczy	nie dotyczy

Tablica 15.4. Zalecane poziomy badania (PBA) złączy spawanych metodą UT

Poziom badania (PBA)	Poziom jakości (PJA)
<b>A</b>	<b>C</b>
<b>B</b>	<b>B</b>
<b>C</b>	wg uzgodnienia
<b>D</b>	specjalne zastosowanie

Dla standardowych poziomów jakości (PJA) stosuje się odpowiednie poziomy badania (PBA) co przedstawia tablica 15.4. Im poziom jakości ostrzejszy tym badanie powinno być przeprowadzone w taki sposób, aby

prawdopodobieństwo uzyskania wskazań (wykrycia wad) było jak największe. Osiąga się to przez zwiększenie liczby obszarów przeszukiwania (rys. 15.8 i 15.9) oraz usuwanie nadlewów dla umożliwienia prowadzenia głowicy (sondy) po powierzchni spoiny.

### 15.3.3.2. Technika badań ultradźwiękowych

W badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych stosowane są trzy metody (wg PN-EN 1714):

- metoda echa – stosuje się jedną głowicę (sondę), która pracuje jako nadawczo-odbiorcza,
- metoda przepuszczania (metoda cienia) – stosuje się dwie głowice (sondy) z których jedna pracuje jako nadawcza a druga jako odbiorcza,
- metoda rezonansu – stosuje się głowicę (sondę), która wytwarza falę stojącą.

Przed przystąpieniem do badania, w pierwszej kolejności należy zapoznać się z konstrukcją elementów badanych, miejscem badania oraz z ustaleniami znajdującymi się w opisie na rysunku technicznym, dotyczącymi badania złączy spawanych oraz przyjętego poziomu jakości (PJA). Udowodnienie, że złącze spawane spełnia wymagania dla przyjętego poziomu jakości (PJA) zmusza do przeprowadzenia badania z dokładnością określoną poziomem badania (PBA), oraz orzeczenia na podstawie wyników badań, że wykryte wskazania od niezgodności (wad) nie przekraczają wartości dopuszczalnych ustalonych dla odpowiedniego poziomu akceptacji (PAK). Następnie należy przygotować powierzchnię usuwając z obszaru badania wszystkie zanieczyszczenia w postaci rdzy, farb, lakierów oraz jeśli występują – z odprysków.

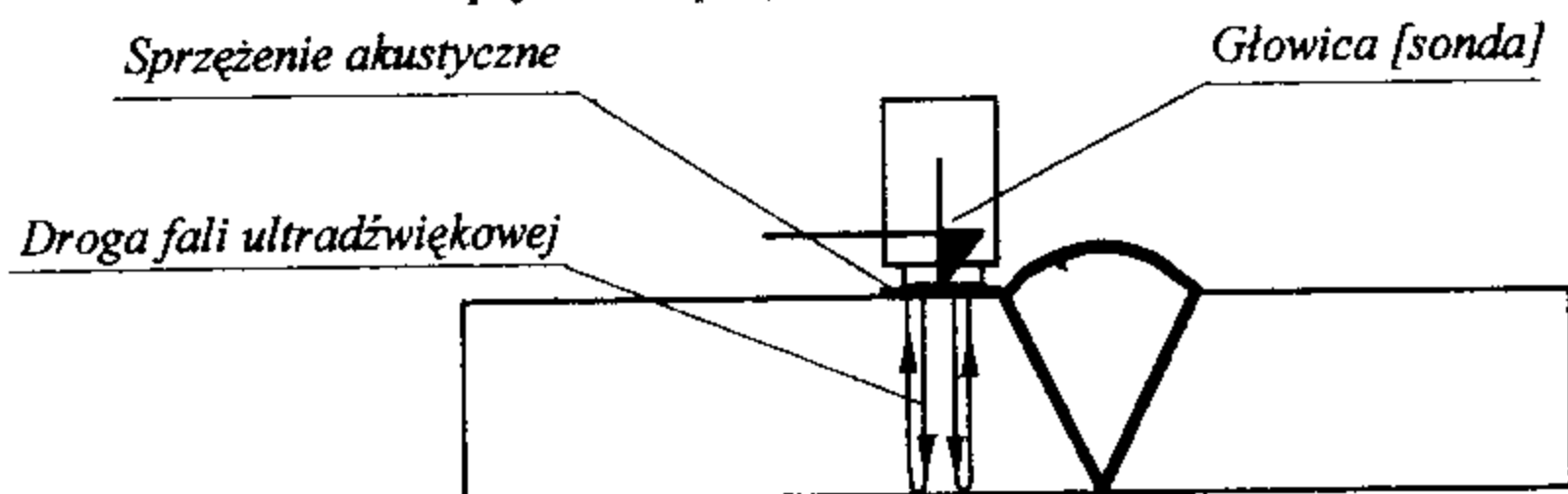
Kolejną czynnością jest dobór metody i parametrów badania. Wielkością wyjściową jest grubość łączonych elementów i gatunek materiału spawanego. Dodatkowo należy zapoznać się z technologią spawania:

- sposobem przygotowania brzegów do spawania, budową spoiny,
- rodzajem i jakością spoiwa, topnika i gazów, pozycją spawania,
- kwalifikacją spawacza.

Powyższe informacje ułatwią w zorientowaniu się jakie niezgodności (wady) spawalnicze mogą wystąpić w złączy.

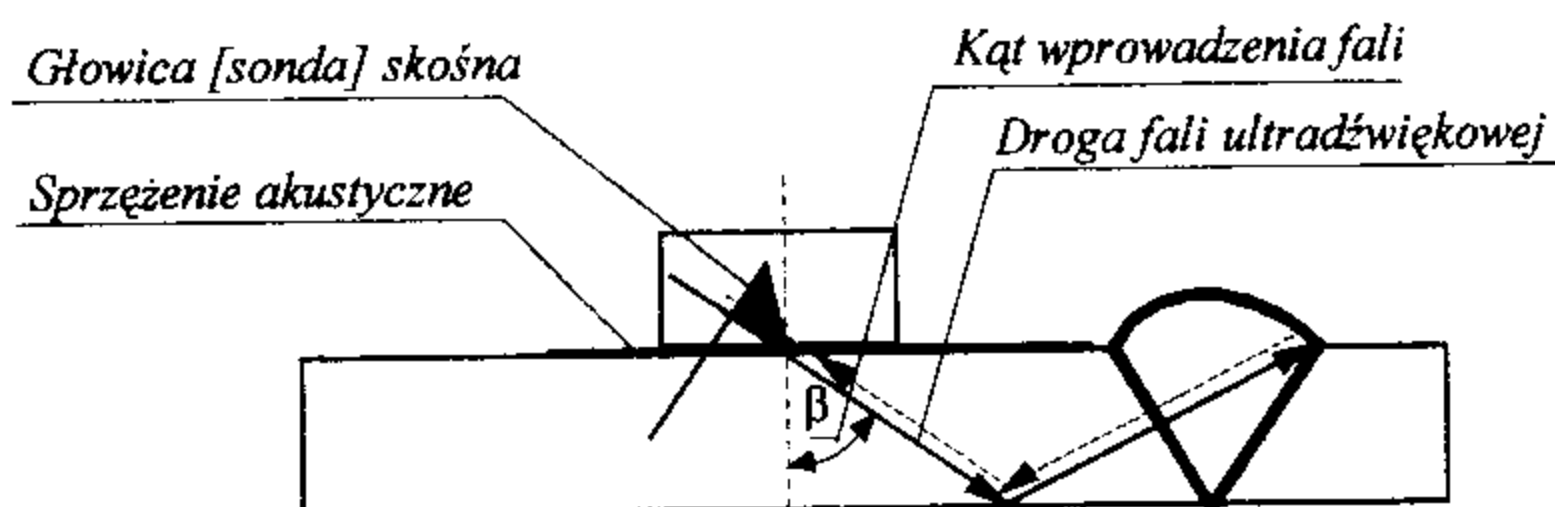
Po dokonaniu czynności przygotowawczych i doborze parametrów, obszar badania pokrywamy czynnikiem który tworzy tzw. sprzężenie akustyczne umożliwiające wniknięcie fali ultradźwiękowej do badanego złącza. Czynnikiem tym może być: olej, smar stały, woda z detergentem, klej malarski, itp. Do badania mogą być stosowane następujące głowice ultradźwiękowe (sondy):

- normalne – kąt wprowadzenia wiązki fali  $\beta=90^\circ$  (wykrywanie rozwarstwień w strefie wpływu ciepła) – rys. 15.7,



Rys. 15.7. Schemat wprowadzania wiązki fali głowicą normalną

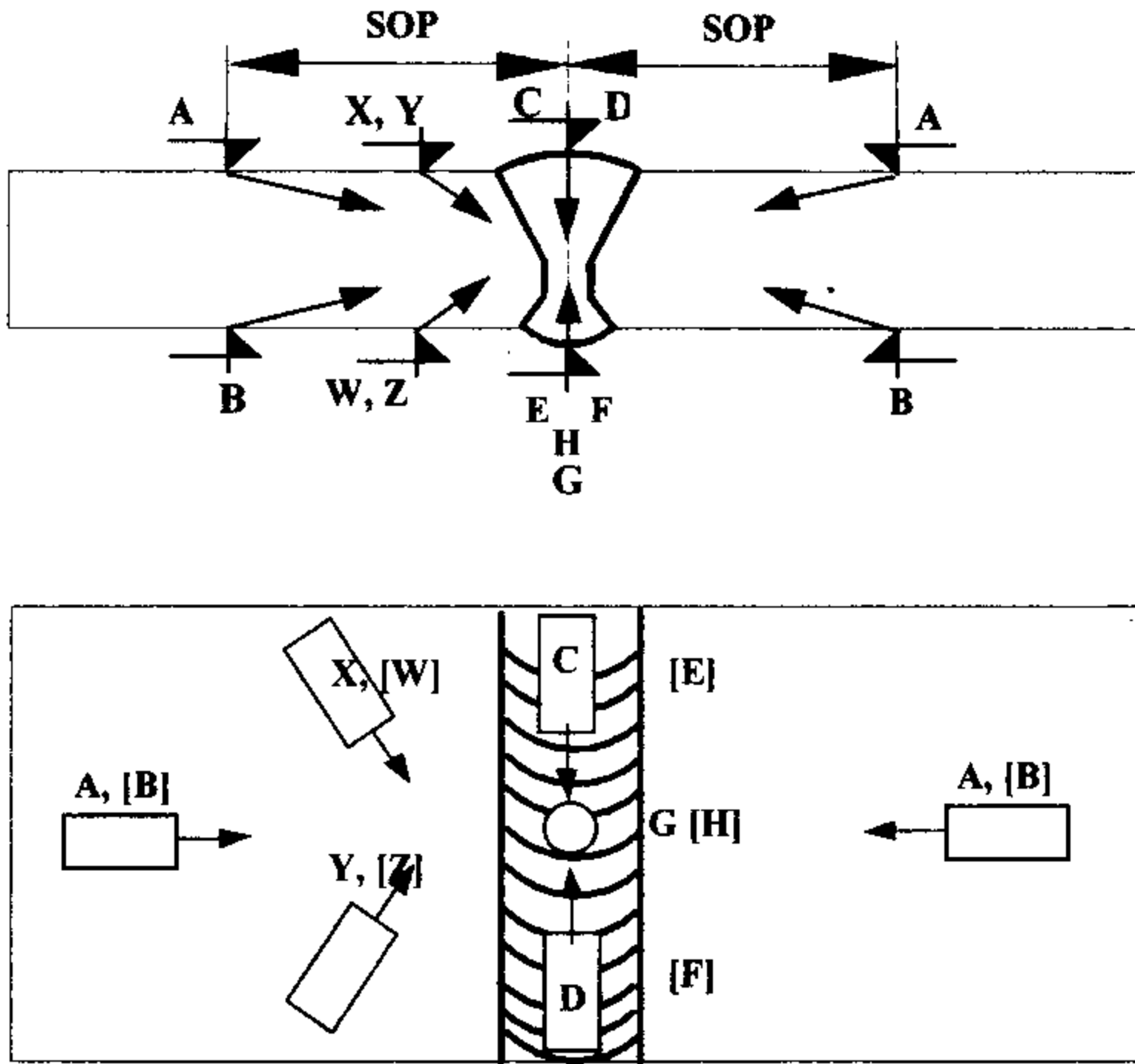
- skośne (kątowe) – kąt wprowadzenia wiązki fali  $\beta=45^\circ$ ,  $\beta=60^\circ$ ,  $\beta=70^\circ$  - rys. 15.8.



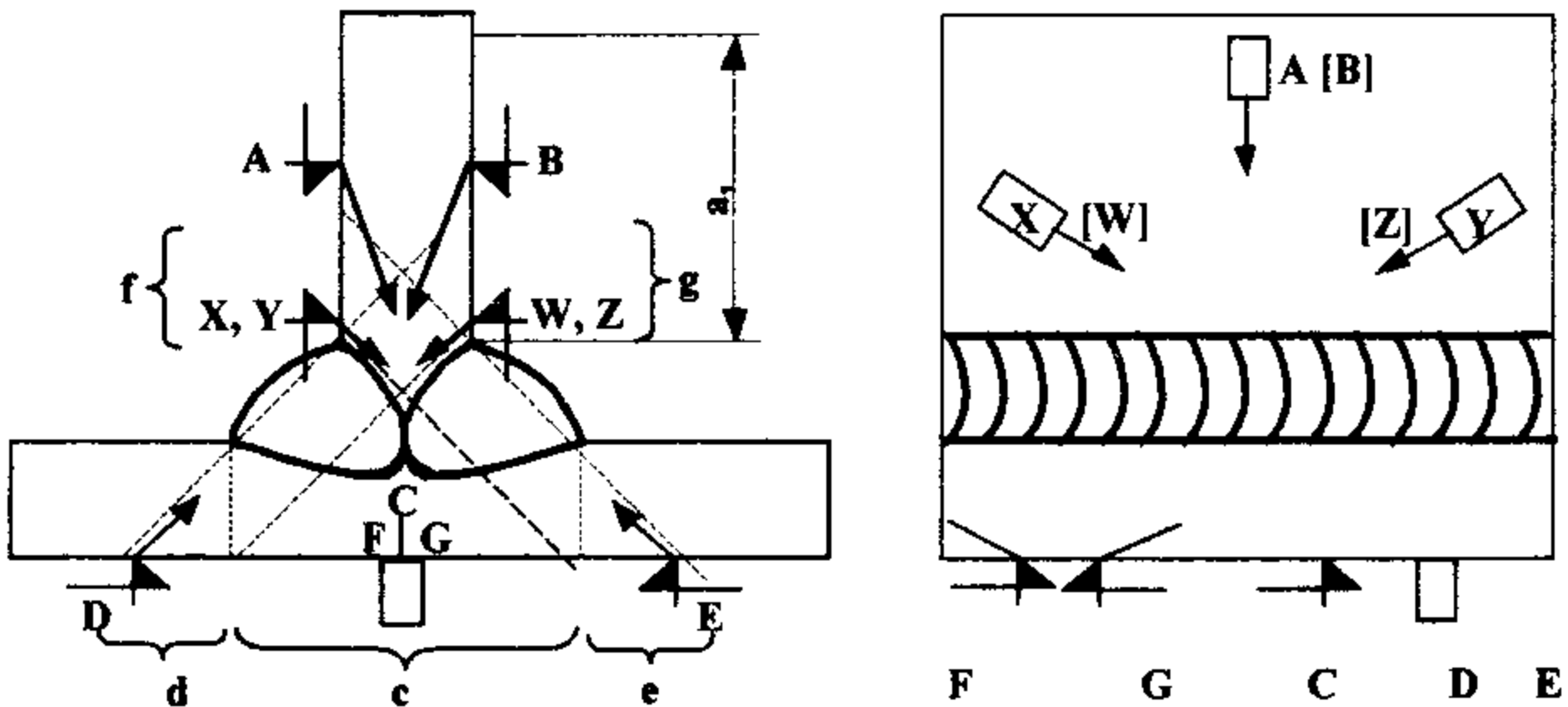
Rys. 15.8. Schemat wprowadzania wiązki fali głowicą skośną (kątową)

Badania przeprowadzamy z wielu obszarów przeszukiwania (rys. 15.9 i 15.10).

W trakcie badania zaznaczamy w sposób trwały wykryte wskazania celem ich naniesienia na protokół badania. Wykryte wskazania porównujemy z wartościami granicznymi dla określenia poziomu jakości (PJA) wykonanego złącza względem poziomu jakości (PJA) określonego w dokumentacji. Określenia tego dokonujemy na odcinku pomiarowym  $N = 100$  mm (odcinek o największej ilości wskazań niezgodności (wad) spawalniczych).



Rys. 15.9. Obszary przeszukiwania złączy doczołowych: SOP – szerokość obszaru przesuwu, A ... – pozycje głowic skośnych od strony lica złącza, [B] ... – pozycje głowic skośnych od strony grani złącza.



Rys. 15.10. Obszary przeszukiwania złączy teowych. A, B, ... – pozycje głowic skośnych, a, b, ... – szerokość obszaru przesuwu

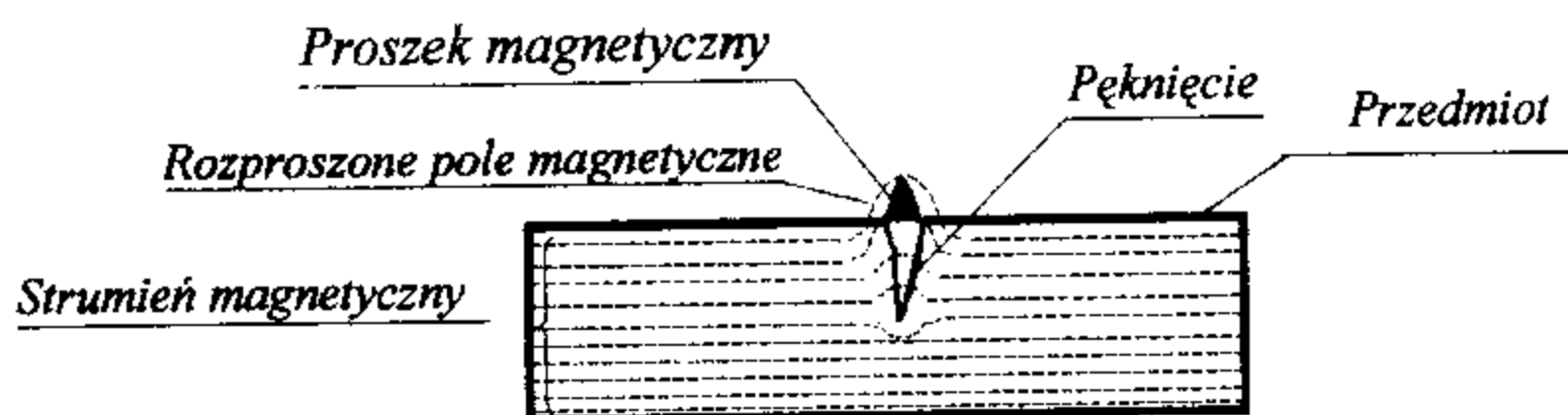


W trakcie badania zaznaczamy w sposób trwały wykryte wskazania celem ich naniesienia na protokół badania. Wykryte wskazania porównujemy z wartościami granicznymi dla określenia poziomu jakości (PJA) wykonanego złącza względem poziomu jakości (PJA) określonego w dokumentacji. Określenia tego dokonujemy na odcinku pomiarowym  $N = 100$  mm (odcinek o największej ilości wskazań niezgodności (wad) spawalniczych).

### 15.3.4. Badania magnetyczno-proszkowe (MT – Magnetic Testing)

#### 15.3.4.1. Wstęp

Badania magnetyczno-proszkowe należą do często stosowanych w praktyce przemysłowej z grupy metod badań nieniszczących. Polegają one na wykrywaniu zaburzeń wytworzonego pola magnetycznego, spowodowanych mikropęknięciami powierzchniowymi i podpowierzchniowymi np. złącza spawanego. Detektorem wykrywania tych zaburzeń jest proszek magnetyczny (przeważnie jest to sproszkowany magnetyt), który układa się zgodnie z występowaniem tych zaburzeń (rys. 15.11).



Rys. 15.11. Rozproszenie pola magnetycznego wokół nieciągłości powierzchniowych

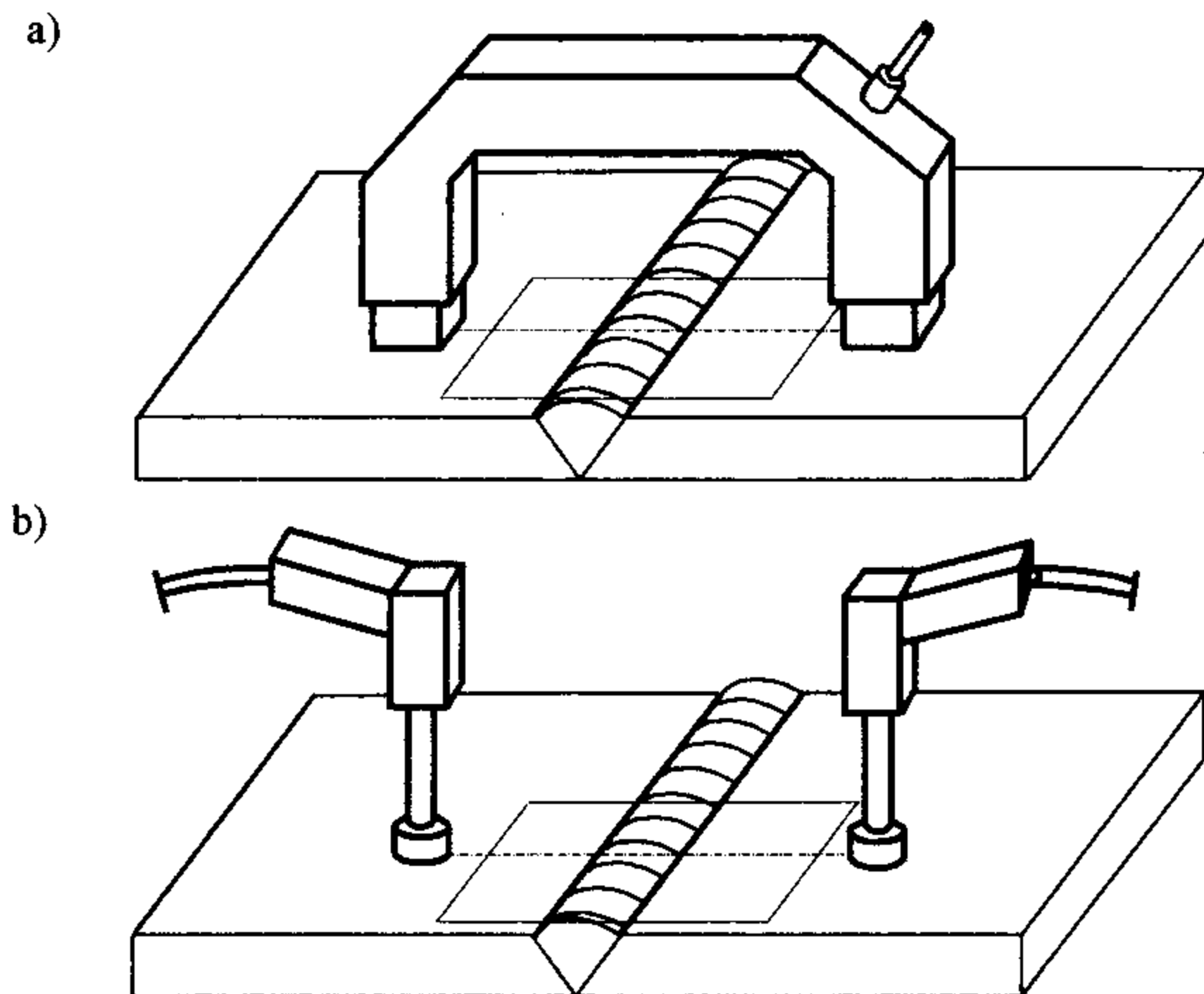
W zależności od sposobu nanoszenia proszku magnetycznego wyodrębnia się dwie metody:

- proszkowa sucha – przedmiot z badanym złączem spawanym umieszczamy w zbiorniku zamkniętym, w którym wytwarzamy chmurę proszkową utworzoną z suchego proszku magnetycznego.
- proszkowa mokra – tworzymy zawiesinę proszku magnetycznego z wodą lub olejem, którą наносimy na badane złącze spawane

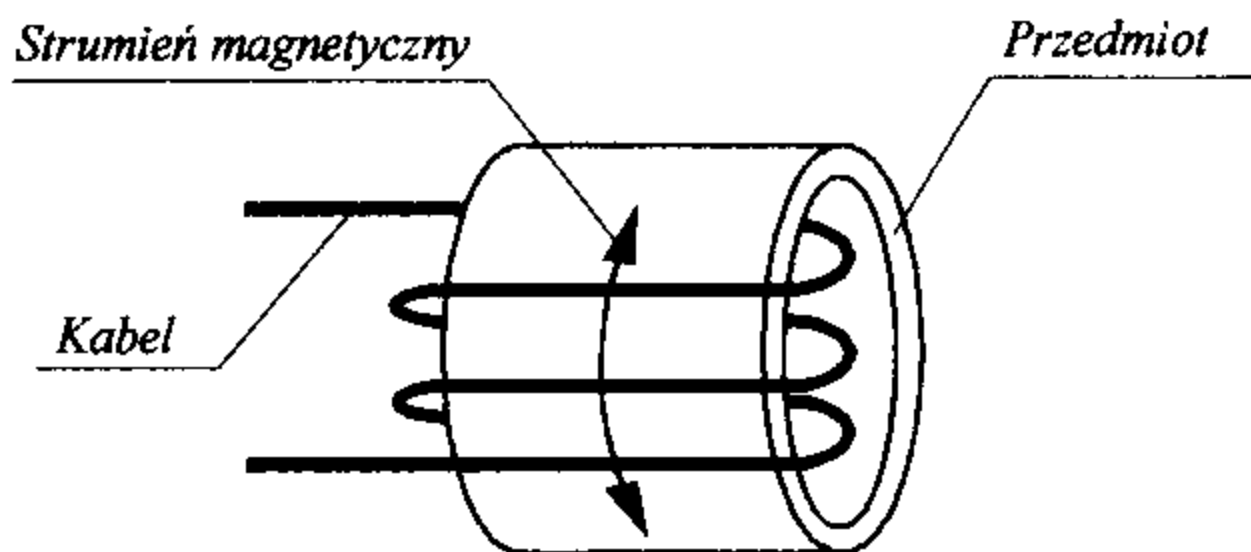
Pole magnetyczne może być wzbudzane za pomocą:

- jarzma stykowego (rys. 15.12a),
- elektrod (rys. 15.12b),

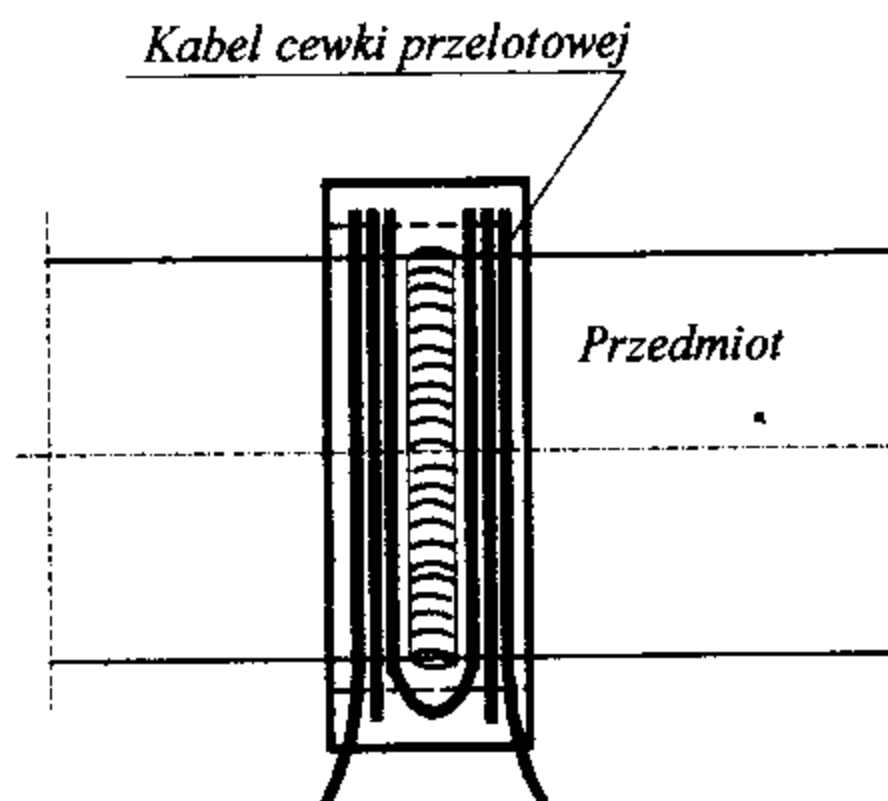
- magnesu stałego,
- kabla z prądem lub cewki (rys. 15.13 i 15.14).



Rys. 15.12. Badania przy zastosowaniu: a - jarzma stykowego, b - elektrod



Rys. 15.13. Badania przy zastosowaniu kabla



Rys. 15.14. Badania przy zastosowaniu cewki przelotowej

W zależności od rodzaju nieciągłości (wad) jakie chcemy wykryć, to znaczy pęknięć poprzecznych, pęknięć wzdłużnych czy pęknięć poprzecznych i wzdłużnych jednocześnie stosujemy następujące sposoby magnesowania:

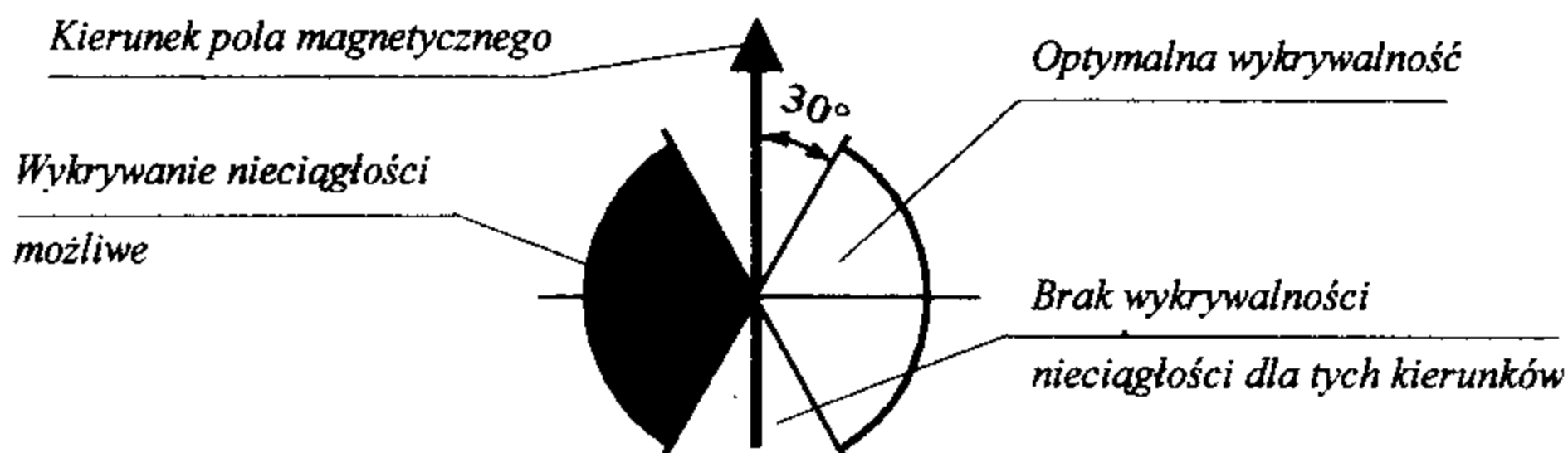
- magnesowanie poprzeczne,
- magnesowanie wzdłużne,
- magnesowanie poprzeczne i wzdłużne jednocześnie.

#### 15.3.4.2. Technika badania magnetycznego

Przed przystąpieniem do badań, wykonawca badania musi uzyskać informacje dotyczące rodzaju materiału podstawowego, spoiwa, umiejscowienia złącza badanego, przygotowania brzegów do spawania, oznaczenia miejsc poprawianych, parametrów obróbki cieplnej po spawaniu, określenia stanu badanej powierzchni. Wykrycie nieciągłości wymaga zastosowania magnesowania w co najmniej dwóch kierunkach w przybliżeniu prostopadłych do siebie, z wymaganiem, że kierunek wzbudzania pola magnesowania powinien być odchyłony minimum o  $30^\circ$  w stosunku do kierunku występowania nieciągłości (rys. 15.15).

Przy przeprowadzeniu badań magnetyczno-proszkowych należy uczynić co następuje:

- a) przygotować powierzchnię – z powierzchni badania należy usunąć zanieczyszczenia takie jak: zgorzelinę, zendrę, rdzę, farbę, lakier,
- b) przeprowadzić początkowe odmagnesowanie – wykonuje się dla usunięcia wszelkich przylegających zanieczyszczeń oraz pól magnetycznych.



Rys. 15.15. Kierunki wykrywania nieciągłości

Przy przeprowadzeniu badań magnetyczno-proszkowych należy uczynić co następuje:

- c) przygotować powierzchnię – z powierzchni badania należy usunąć zanieczyszczenia takie jak: zgorzelinę, zendrę, rdzę, farbę, lakier,
- d) przeprowadzić początkowe odmagnesowanie – wykonuje się dla usunięcia wszelkich przylegających zanieczyszczeń oraz pól magnetycznych,
- e) odtłuścić i osuszyć powierzchnię – tą czynność przeprowadzać należy bardzo starannie, bo zanieczyszczenia te mogą zakrywać istniejące nieciągłości i utrudniać powstawanie wskazań,
- f) przeprowadzić magnesowanie – rodzaj magnesowania uzależniony jest od kształtu oraz usytuowania nieciągłości,
- g) nanieść proszek w postaci suchej lub w zawieszynie na badane złącze – czynność tę przeprowadza się w czasie magnesowania,
- h) obserwować powierzchnię – obserwacja powierzchni badanej powinna być dokonywana przy odpowiednim oświetleniu, przy czym szczególną uwagę należy zwrócić na miejsca w których występuje koncentracja naprężeń. Wykryte wskazania mogą być rzeczywiste lub fałszywe, tworzące się na skutek istniejących nierówności powierzchni, uskoków, miejscowych zmian przewodzenia lub zbyt dużego natężenia pola magnetycznego,
- i) oznaczyć miejsca wadliwe – wykonuje się za pomocą specjalnych znaczników lub markerów,
- j) ocenić i udokumentować – nieciągłości wykryte można utrwalić na zwykłej bibule lub specjalnej taśmie samoprzylepnej,
- k) odmagnesować – w zasadzie przy zastosowaniu do wzbudzenia pola magnetycznego prądu przemiennego nie zachodzi konieczność roz-magnesowania.

Dobór środka badawczego (proszków i zawiesin) uzależnione są od wymaganego poziomu akceptacji (PAK) oraz nierówności lica złącza. Normy dotyczące powierzchniowych metod badania złączy spawanych nie precyzują kryteriów doboru technik czy parametrów badania.

### **15.3.5. Badania penetracyjne**

#### **15.3.5.1. Wstęp**

Badania metodą penetracyjną przeprowadza się w celu wykrycia niezgodności (wad) spawalniczych występujących na powierzchni złącza spawanego z elementów o grubości co najmniej 3 mm. Szczególnie ma ona zastosowanie do złączy spawanych wykonanych ze stali austenitycznych, aluminium, niklu, miedzi i tytanu.

Metody penetracyjne polegają na wykorzystaniu zjawiska wnikanie cieczy w otwarte szczeliny powierzchniowe. Po wnikięciu penetranta w szczeliny usuwa się jego nadmiar z powierzchni, a te części penetranta, które wnikięły do szczeliny wywabia się na powierzchnię za pomocą tzw. wywoływacza. Aby wskazania były wyraźnie widoczne ciecz penetrująca i wywoływacz powinny dawać duży kontrast.

Istnieją dwa sposoby uzyskania wysokiego kontrastu. Pierwszy sposób polega na zastosowaniu cieczy penetrującej (penetranta) o kolorze czerwonym i białego wywoływacza – penetracja barwna. Drugi sposób, to ciecz penetrująca zawiera dodatki fluorescencyjne. Po wywołaniu cieczy ze szczeliny obserwację przeprowadza się w świetle ultrafioletowym w pomieszczeniu zaciemnionym – penetracja fluorescencyjna.

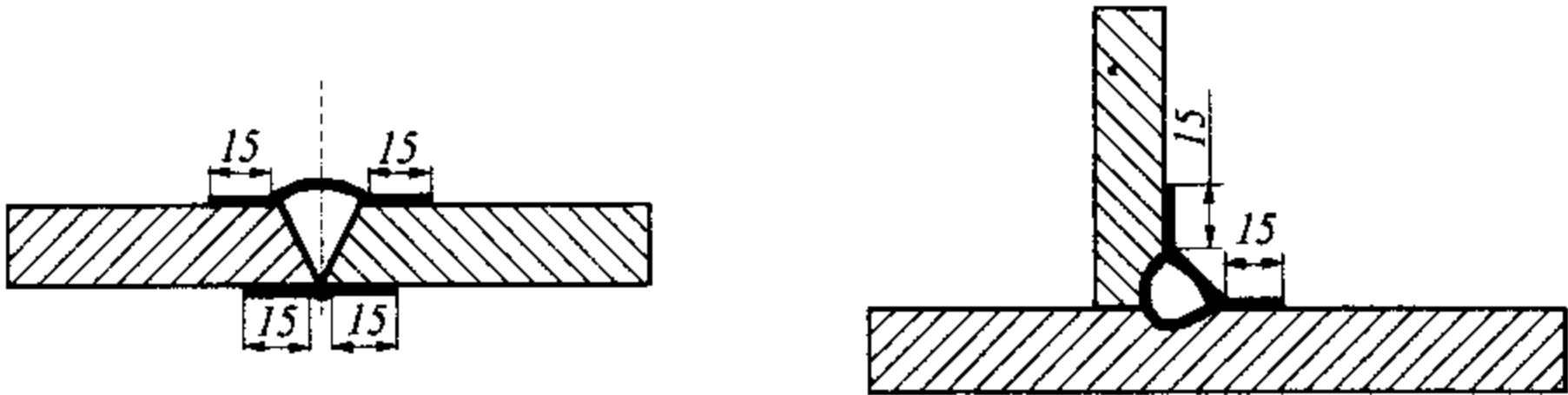
#### **15.3.3.2 Technika badania penetracyjnego**

Przy wyborze zestawu penetracyjnego należy uwzględnić nie tylko przewidywaną technikę badania obejmującą sposób nanoszenia zestawu, sposób usuwania nadmiaru penetranta czy warunki kontroli wizualnej ale również zgodność penetrantów między sobą i względem badanego materiału.

W trakcie przeprowadzania badań penetracyjnych należy postępować zgodnie z następującymi czynnościami:

- a) oczyścić badane złącze – oczyszczenie jest konieczne, ponieważ ciecz może tylko wnikać w otwarte szczeliny,
- b) osuszyć badane złącze – osuszanie jest niezbędne tylko wtedy, gdy do wstępnego oczyszczania zastosowano słabo odparowujące roztwory wodne lub rozpuszczalniki,

- c) nanieść ciecz penetrującą (penetrant) na badane złącze – ciecze penetrujące (penetranty) nanosi się sposobem zanurzeniowym, natryskowym lub ręcznie za pomocą pędzla lub tamponu. Rysunek 15.16 przedstawia minimalne odległości nanoszenia penetranta od granicy materiał-lico,



Rys. 15.16. Minimalna szerokość strefy badania metodą penetracyjną złączy w mm.

- d) pozostawić penetrant przez określony czas (czas wnikania określony jest na etykiecie) na powierzchni złącza,
- e) usunąć nadmiar penetranta z badanego złącza – do usuwania nadmiaru penetrantów z powierzchni złącza służą zmywacze, woda. Można również usunąć nadmiar poprzez ścieranie szmatami względnie wiórami drzewnymi. Penetranty nie zmywalne wodą usuwane są za pomocą emulgatorów. Tworzą one z penetrantem mieszaninę łatwo usuwalną za pomocą wody,
- f) osuszyć powierzchnię złącza po zmyciu penetranta – osuszenie przeprowadza się, gdy zmywania dokonano za pomocą wody a jako wywoływacz może być zastosowany proszek suchy lub ciecz zawierająca rozpuszczalniki organiczne,
- g) nanieść wywoływacz na badane złącze – ma on za zadanie wyciągnięcie penetranta ze szczeliny. Stosuje się wywoływacze suche i mokre,
- h) obserwować wskazania i przeprowadzić interpretację wyników – obserwacje przeprowadza się w świetle białym przy penetracji barwnej i w świetle ultrafioletowym, gdy stosujemy penetrację fluorescencyjną,
- i) przeprowadzić oczyszczenie końcowe badanego złącza.

Za pomocą metod penetracyjnych wykrywać można szczeliny o szerokości ok.  $1\mu\text{m}$  i nieco mniejsze. Kontrola wizualna powinna być przeprowadzona dwukrotnie – wstępnie, bezpośrednio po nałożeniu lub wysuszeniu wywoływacza i ostatecznie po upływie czasu wywoływania (czas wywołania określony jest na etykiecie opakowania wywoływacza).

## 15.4. Metody dodatkowe - badania niszczące

### 15.4.1. Wstęp

Badania niszczące stanowią grupę badań uzupełniających. Po tego rodzaju badaniach element spawany nie nadaje się do eksploatacji. Tę grupę badań stanowią:

- próba rozciągania poprzecznego wg PN-EN 895,
- próba rozciągania wzdłużnego spoiny wg PN-EN 876,
- próba zginania wg PN-EN 910,
- próba udarności wg PN-EN 875,
- próba twardości wg PN-EN 1043-1, PN-EN 1043-2,
- próba łamania wg PN-EN 1320,
- badania makroskopowe wg PN-EN 1321.

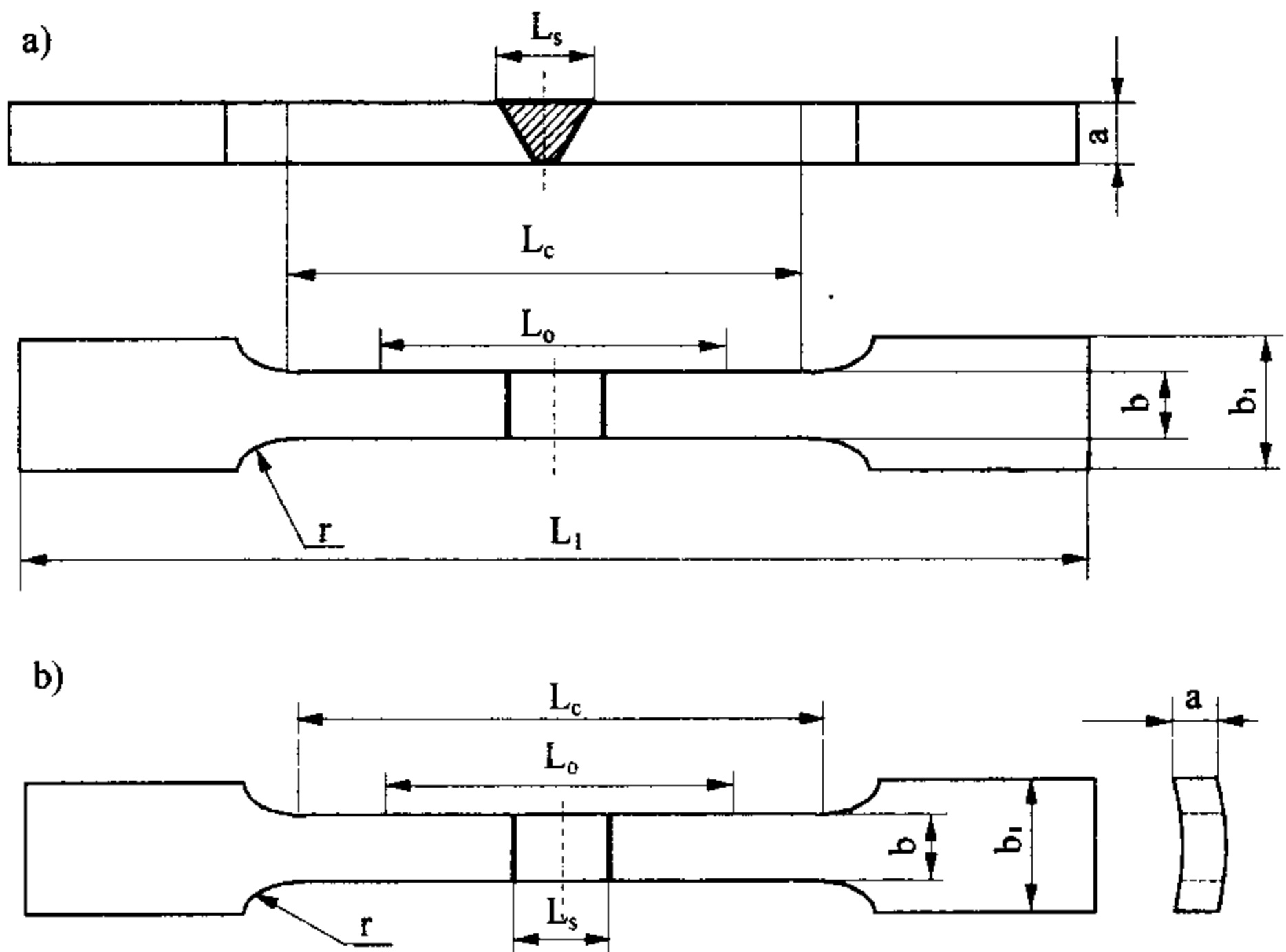
Materiały stosowane na różnego rodzaju konstrukcje muszą mieć ściśle określone właściwości mechaniczne. W przypadku konstrukcji spawanych wymagania te dotyczą również złączy spawanych. Dąży się do tego, aby złącza spawane miały zbliżone właściwości do materiału podstawowego. Badania niszczące złączy spawanych umożliwiają sprawdzenie tych właściwości. Są one stosowane zarówno do materiału podstawowego jak i do materiału dodatkowego, stosuje się również do złączy próbnych, doświadczalnych wykonywanych w ramach sprawdzenia nowych metod spawania, technologii specjalnych czy zastosowania nowych materiałów.

### 15.4.2. Próba rozciągania poprzecznego złącza

Próbie rozciągania poprzecznego przeprowadza się w celu określenia wytrzymałości na rozciąganie i położenia przelomu spawanych złączy doczołowych. Próbie przeprowadza się przez rozciąganie w sposób ciągły aż do zerwania. Przygotowanie powierzchni próbki powinno się odbywać za pomocą obróbki skrawaniem lub szlifowania. Pobieranie próbek wykonuje się w ten sposób, żeby po obróbce mechanicznej oś spoiny znajdowała się w środku długości pomiarowej próbki.

Kształt próbki oraz wymiary istotne dla przeprowadzenia próby przedstawia rys. 15.17. Na całej długości  $L_c$  (długość pomiarowa) nie powinno być rys ani karbów usytuowanych poprzecznie (za wyjątkiem podtopień).

Próbie wytrzymałości na rozciąganie przeprowadza się na maszynie wytrzymałościowej, a miarą tej próby jest zarejestrowana maksymalna siła zrywająca. W trakcie przeprowadzania próby o ile jest to konieczne można równocześnie wykonać wykres przebiegu obciążenia.



Rys. 15.17. Próbkki do rozciągania poprzecznego złącza: a) blach, b) rur

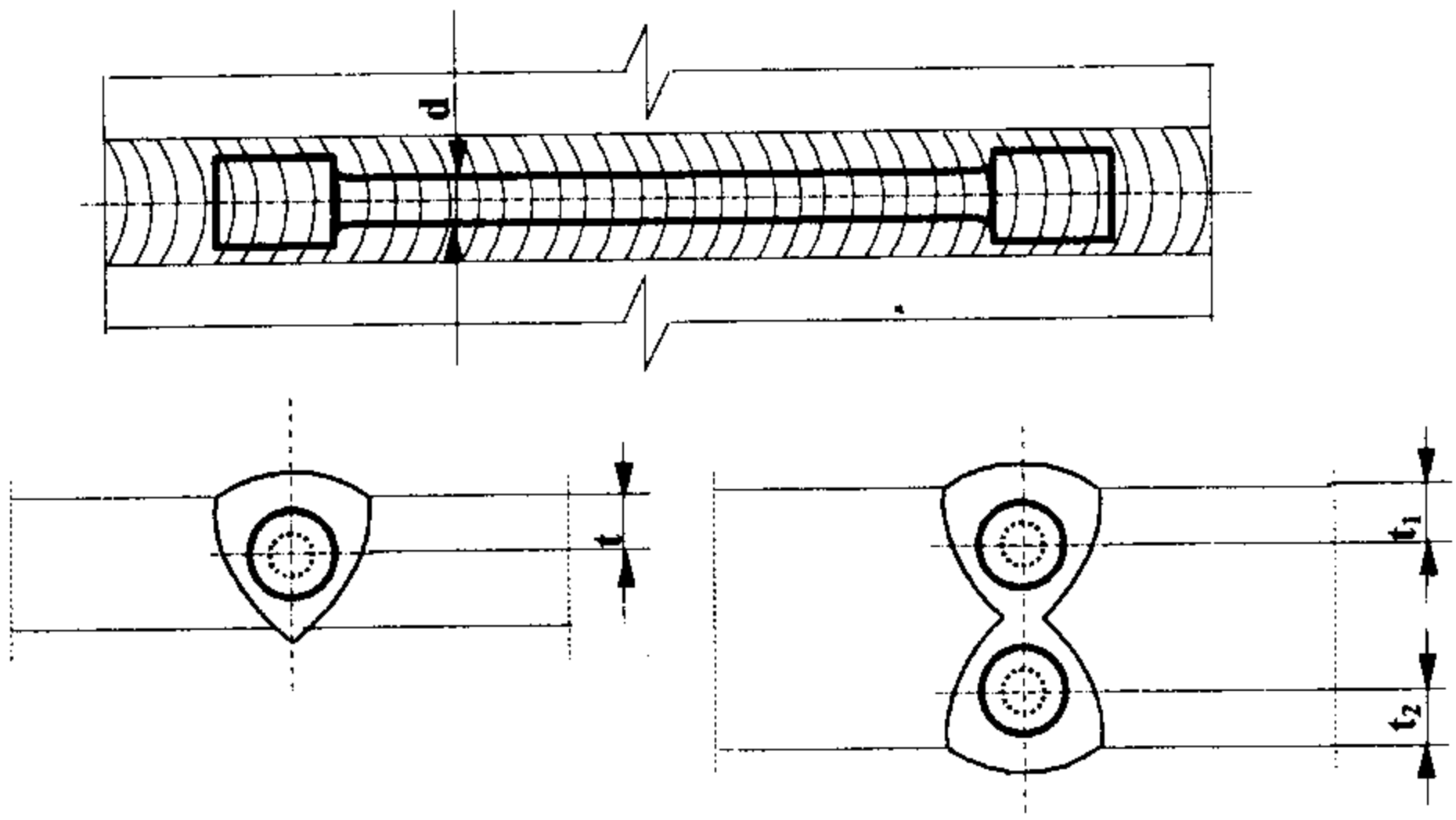
Po przeprowadzeniu próby, w zerwanej próbce oceniamy przez oglądzi-ny przełom i notujemy zaobserwowane niezgodności spawalniczych, które mo- głyby niekorzystnie wpłynąć na wynik próby rozciągania.

### 15.4.3. Próba rozciągania wzdłużnego spoiny

Próbkę rozciągania wzdłużnego przeprowadza się w celu określenia wła- sności mechanicznych spoin złączy doczołowych. Próbkę okrągłą pobraną wzdłuż spoiny (rys. 15.18) poddaje się rozciąganiu w sposób ciągły aż do ze- rwania. Do wykonania takiej próbki należy stosować tylko obróbkę mecha- niczną wiórowa.

Średnica próbki  $d$  powinna zazwyczaj wynosić 10 mm, jeżeli nie jest to możliwe, dopuszcza się średnice mniejsze, ale nie mniejsze niż 4 mm,  $t$  – mini- malna odległość położenia próbki od powierzchni. Po zerwaniu próbki, dokonu- jemy oceny powierzchni przełomu i notujemy ewentualne nieciągłości spawal- nicze które mogłyby negatywnie wpłynąć na wynik próby.





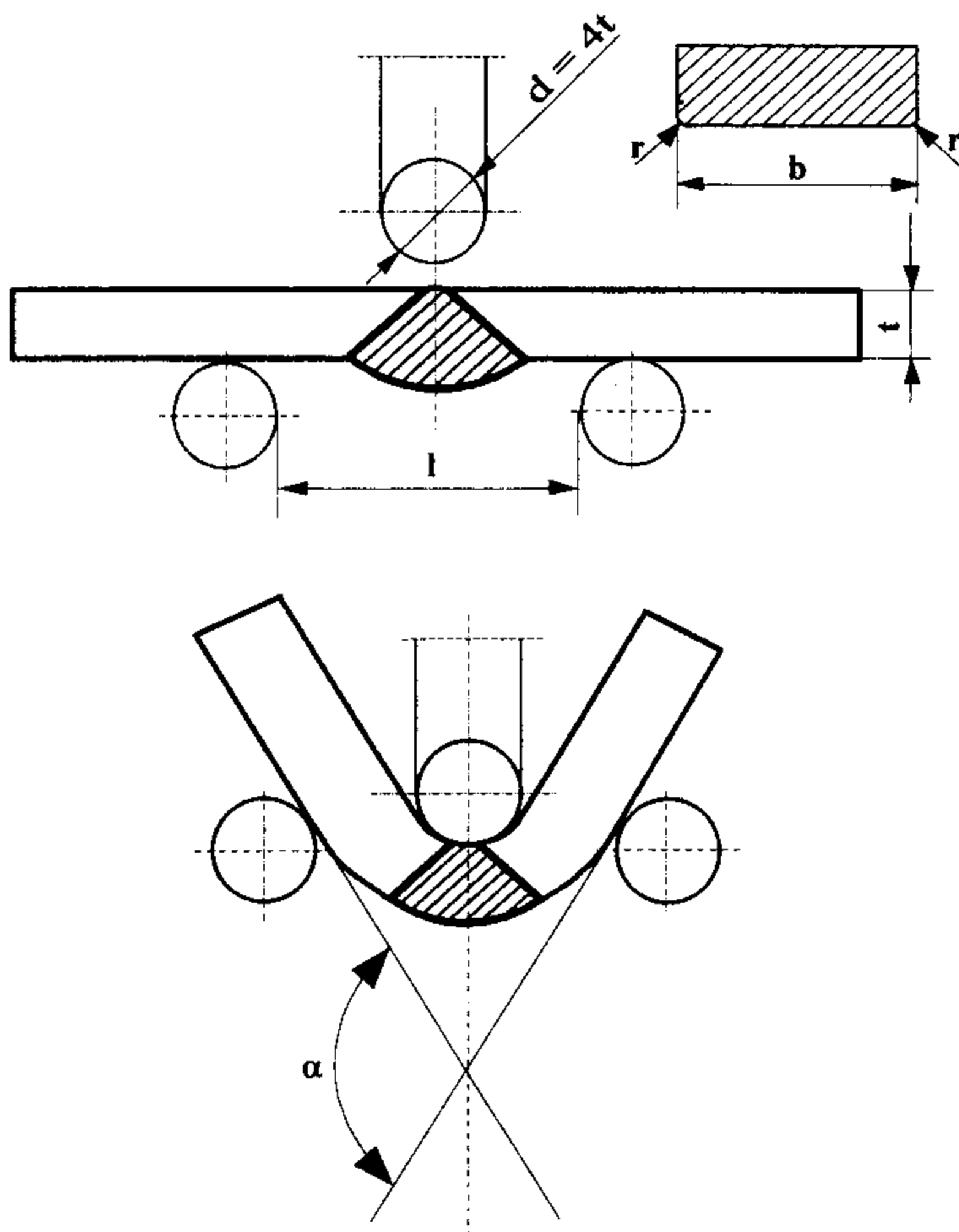
Rys. 15.18. Próba rozciągania wzdłużnego spoiny

#### 15.4.4. Próba zginania

Próbie zginania przeprowadza się celem określenia plastyczności spoiny oraz strefy przyspoinowej – strefy wpływu ciepła. Plastyczność tę określa kąt  $\alpha$  do jakiego należy giąć odpowiednio przygotowaną próbkę. Do próby należy stosować trzpień gnący lub rolkę wewnętrzną o średnicy  $d$  (zgodnie z odpowiednią normą wyrobu) co przedstawia rys. 15.19. Próbie rozciągania wzdłużnego przeprowadza się na maszynie wytrzymałościowej, a miarą przeprowadzonej próby jest kąt zginania  $\alpha$ . Próbie zginania uważa się za zakończoną gdy kąt zginania  $\alpha$  jest zgodny z odpowiednią normą wyrobu. Dla materiału podstawowego lub spoiwa o mniejszej ciągliwości można ustalić inne kryteria próby gięcia.

Próbie należy przeprowadzać, umieszczając próbkę na dwóch podporach utworzonych przez dwie równoległe rolki – przyjmuje się odległość między rostkami  $l = d + 2t$  do  $d + 3t$ , gdzie  $t$  - grubość próbki, a  $d$  - średnica trzpienia gnącego. Spoina powinna znajdować się po środku między rostkami podporowymi. Próbkę należy tak zginać, aby w środku rozpiętości obciążenie rosło stopniowo i w sposób ciągły. Trzpień gnący powinien znajdować się w osi spoiny prostopadle do powierzchni próbki (rys. 15.19). Próbie zginania poprzecznego przeprowadzamy raz z rozciąganiem lica a raz z rozciąganiem grani. Promień zaokrąglenia próbki „ $r$ ” należy wykonać po stronie, na której jest rozciągana powierzchnia i nie powinien być większy od 3 mm.

Podczas próby nie mogą ujawnić się w próbkach badanych naderwania większe od 3 mm występujące w dowolnym kierunku. Naderwania, które pojawiają się w czasie trwania próby w narożach próbek, nie uwzględnia się przy ocenie.



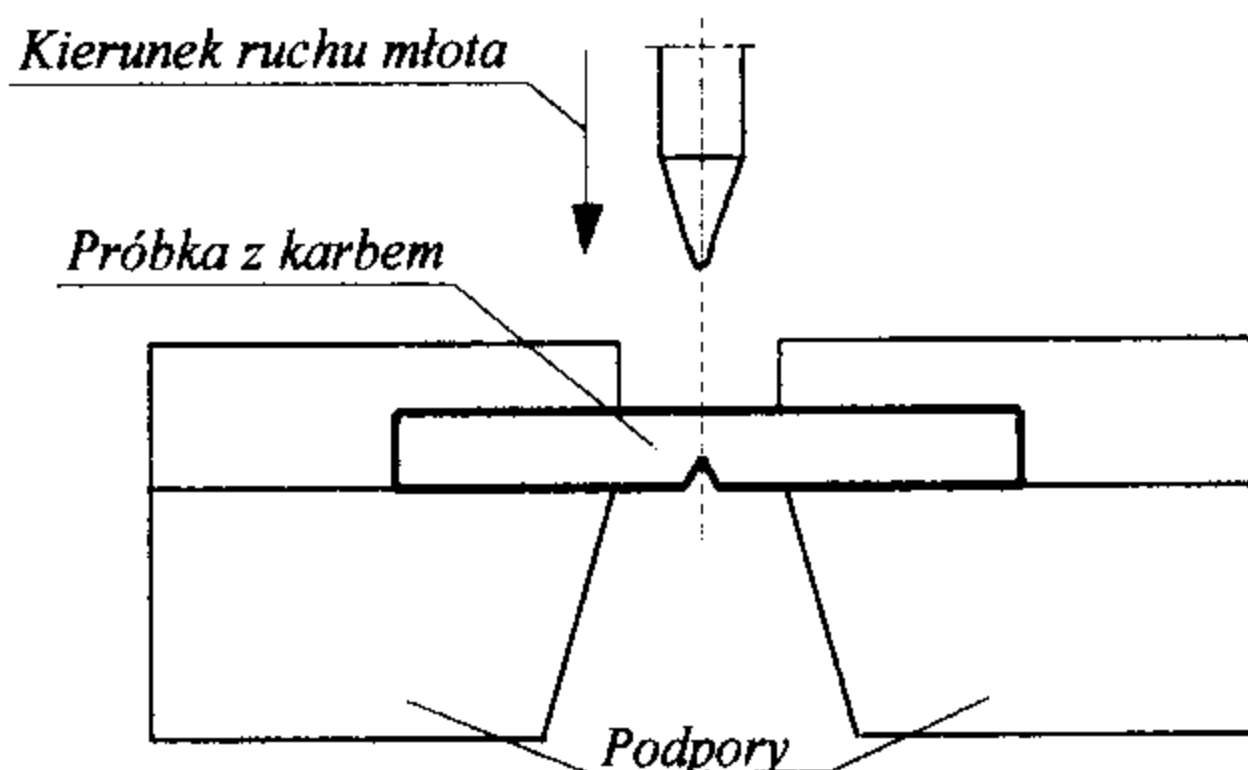
Rys. 15.19. Próba zginania złącza spawanego

#### 15.4.5. Próba udarności

Próbie udarności wykonuje się dla oceny zachowania złącza spawanego w warunkach kruchej pęknięcia. Badania przeprowadza się używając próbek V, W, T (V - próbka z karbem Charpy V; W - próbka z karbem w spoinie;

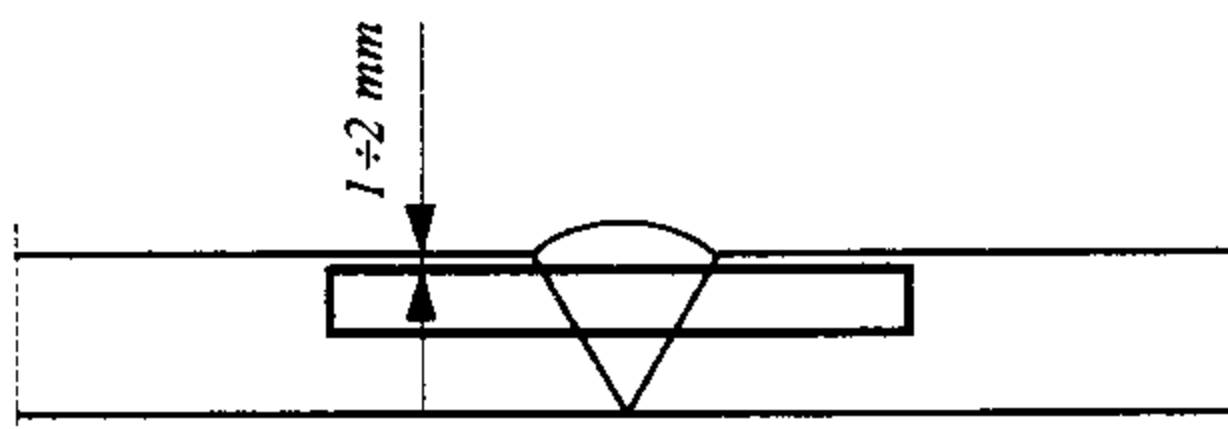
T - próbka z karbem naciętym na grubości materiału), badanie udarności strefy wpływu ciepła wykonuje się na próbkach typu V,H,T (V - próbka z karbem Charpy; H - próbka z karbem naciętym w strefie wpływu ciepła; T - próbka z karbem naciętym na grubości materiału). Próba udarności polega ona na złamaniu przez jednokrotne uderzenie młota wahadłowego próbki z karbem i pomiarze pracy uderzenia odpowiadającej energii potrzebnej na złamanie próbki.

Próbka jest podparta swobodnie na dwóch podporach młota wahadłowego, karbem stroną przeciwną do kierunku ruchu młota (rys. 15.20).



Rys. 15.20. Położenie próbki na podporach w czasie próby udarności

Dla każdego rozmieszczenia próbek należy pobrać zestaw składający się z trzech próbek do badań. Próbki należy pobierać poprzecznie do spoiny w odległości od 1 mm do 2 mm od powierzchni materiału podstawowego (rys. 15.21).



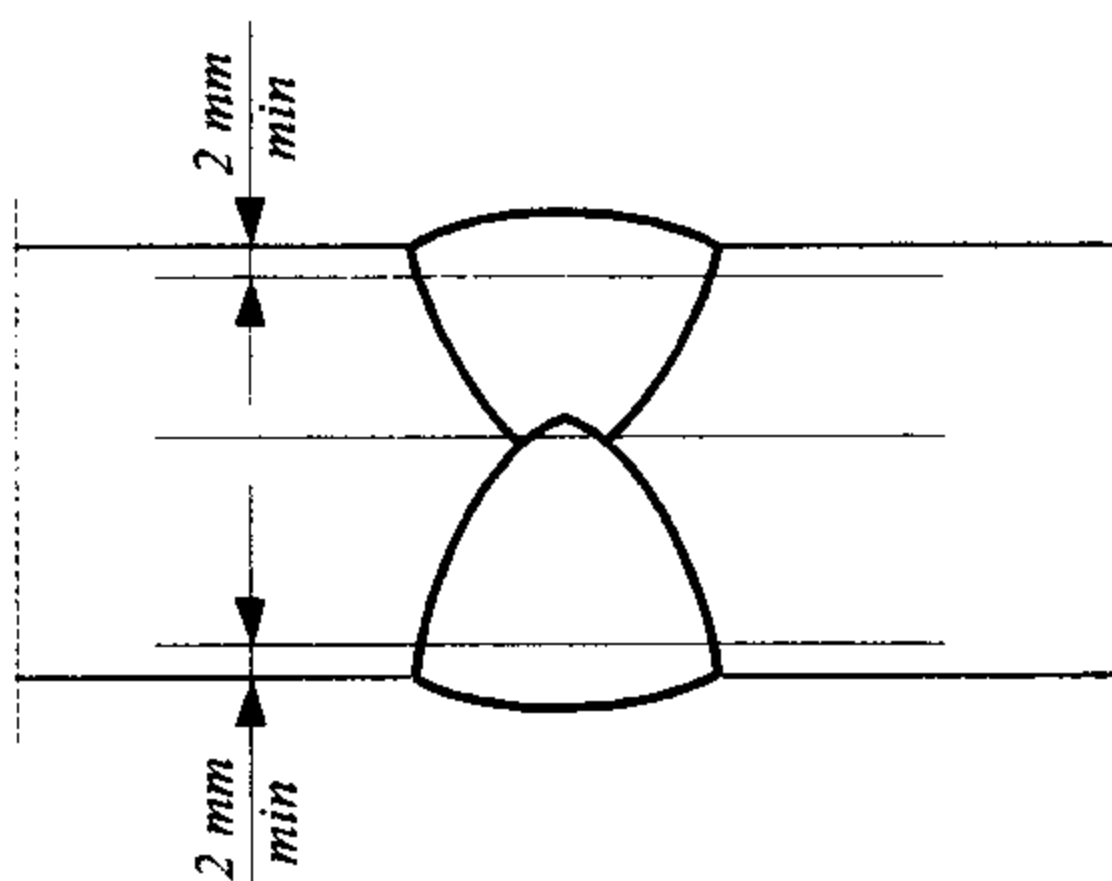
Rys. 15.21. Miejsce pobierania próbek do badania udarności

Temperatura badania oraz praca łamania powinny być zgodne z wymaganiami dotyczącymi konstrukcji i podanymi w odpowiednich normach.

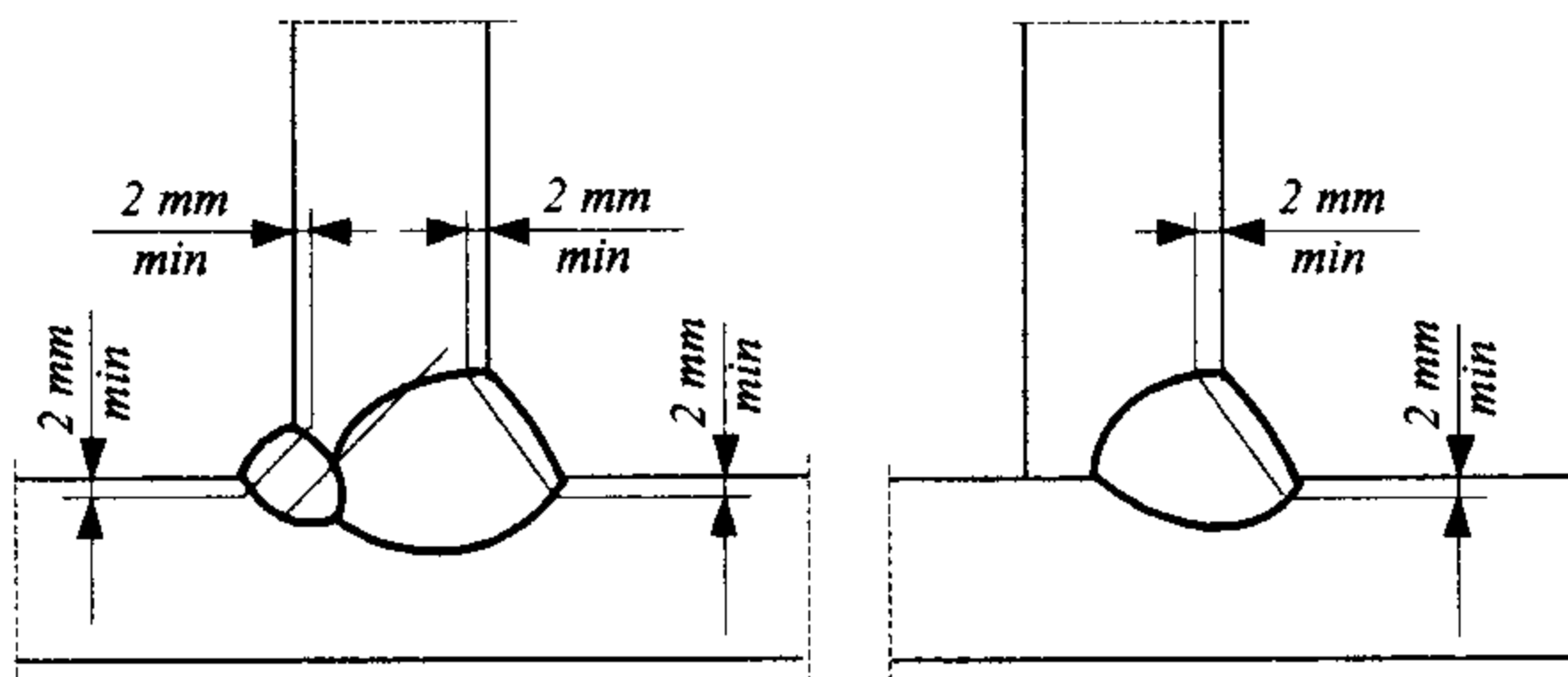
### 15.4.6. Próba twardości

Próbie twardości złącza spawanego przeprowadzamy dla ustalenia rozkładu twardości w złączu spawanym. Przed badaniem powierzchnię próbki obrabia się, poleruje oraz trawi celem ujawnienia zarysu spoiny.

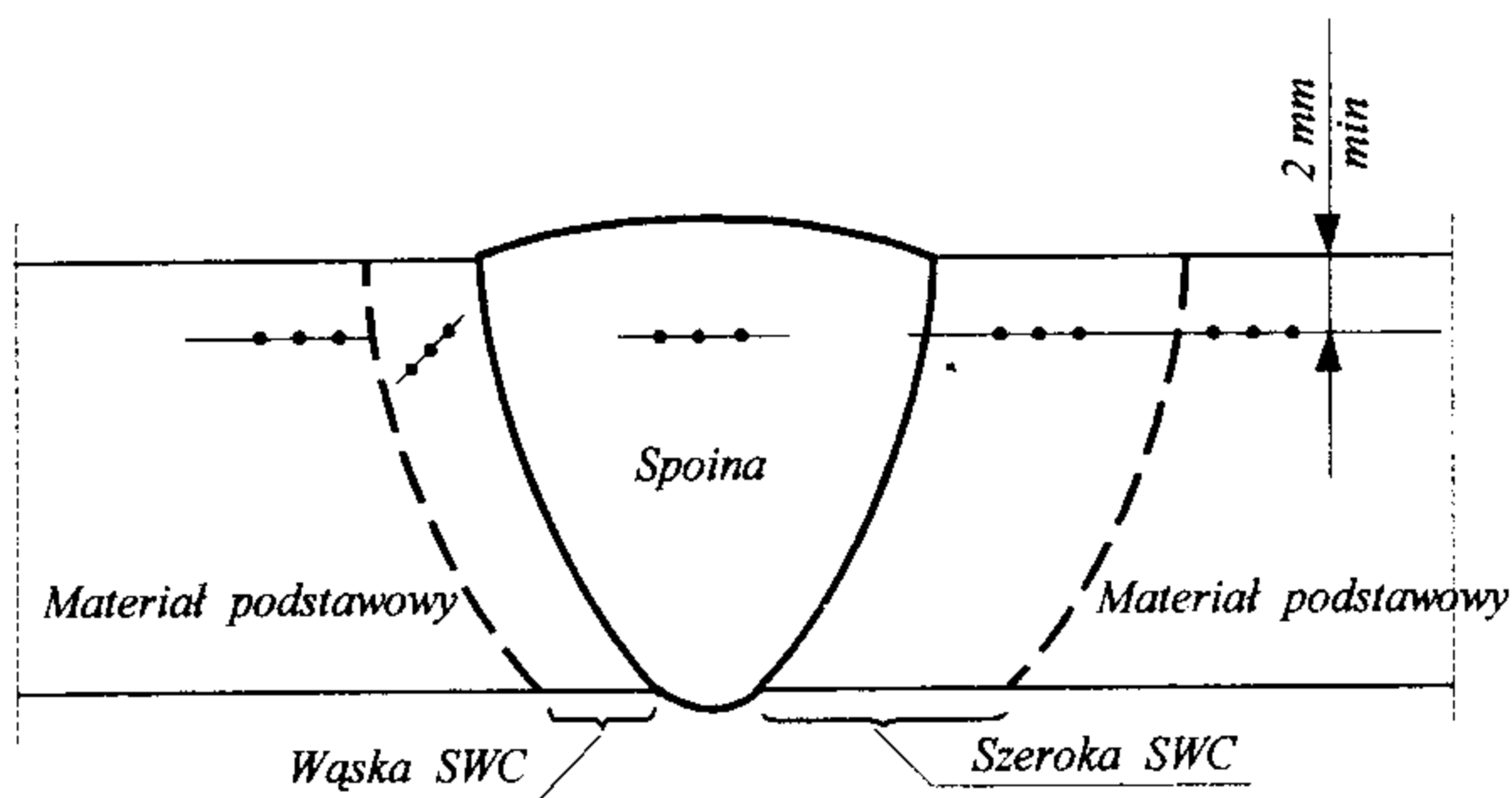
Pomiar ten przeprowadzamy w spoinie, w strefie wpływu ciepła (SWC) oraz w materiale podstawowym stosując metodę Vickers'a HV10 (liczba 10 oznacza siłę nacisku = 981N). Pierwszy rząd odcisków powinien być usytuowany nie mniej niż 2 mm od powierzchni łączonych elementów (rys.15.22, 15.23, 15.24).



Rys. 15.22. Rozmieszczenie obszarów pomiaru twardości – spoina czołowa dwustronna



Rys. 15.23. Rozmieszczenie obszarów pomiaru twardości – spoiny pachwinowe



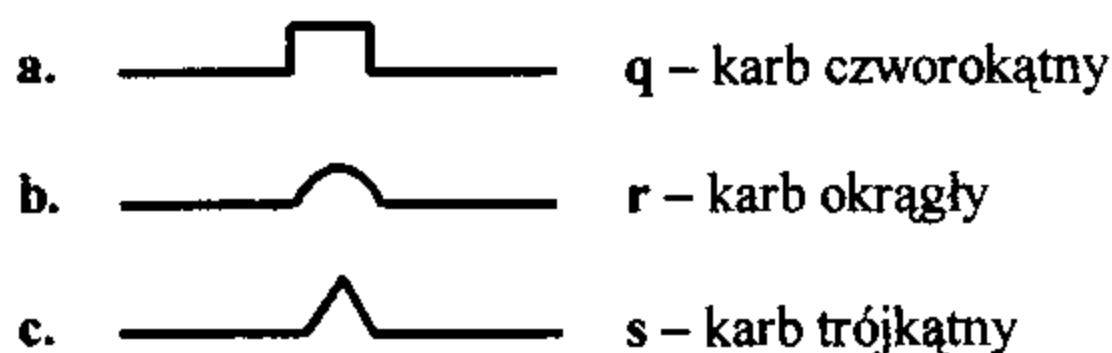
Rys. 15.24. Rozmieszczenie obszarów pomiaru twardości – spoina czołowa

#### 15.4.7. Próba łamania

Próbie łamania przeprowadza się w celu uzyskania informacji o rodzaju, wielkości oraz rozłożeniu na powierzchni przelomu niezgodności spawalniczych takich jak: pęcherze, przyklejenia, braki przetopu, pęknięcia oraz wtrącenia. Przelom w wyniku próby łamania powinien przebiegać przez spoinę złącza dla prawidłowej oceny powierzchni przelomu. Łamanie spoin blach i rur można ułatwić stosując:

- usunięcie nadlewów spoin,
- nacięcie karbów na obu brzegach spoiny,
- nacięcie karbów w nadlewie spoiny.

Rodzaje karbów stosowanych do próbek dla przeprowadzenia próby łamania przedstawiono na rysunku 15.25.



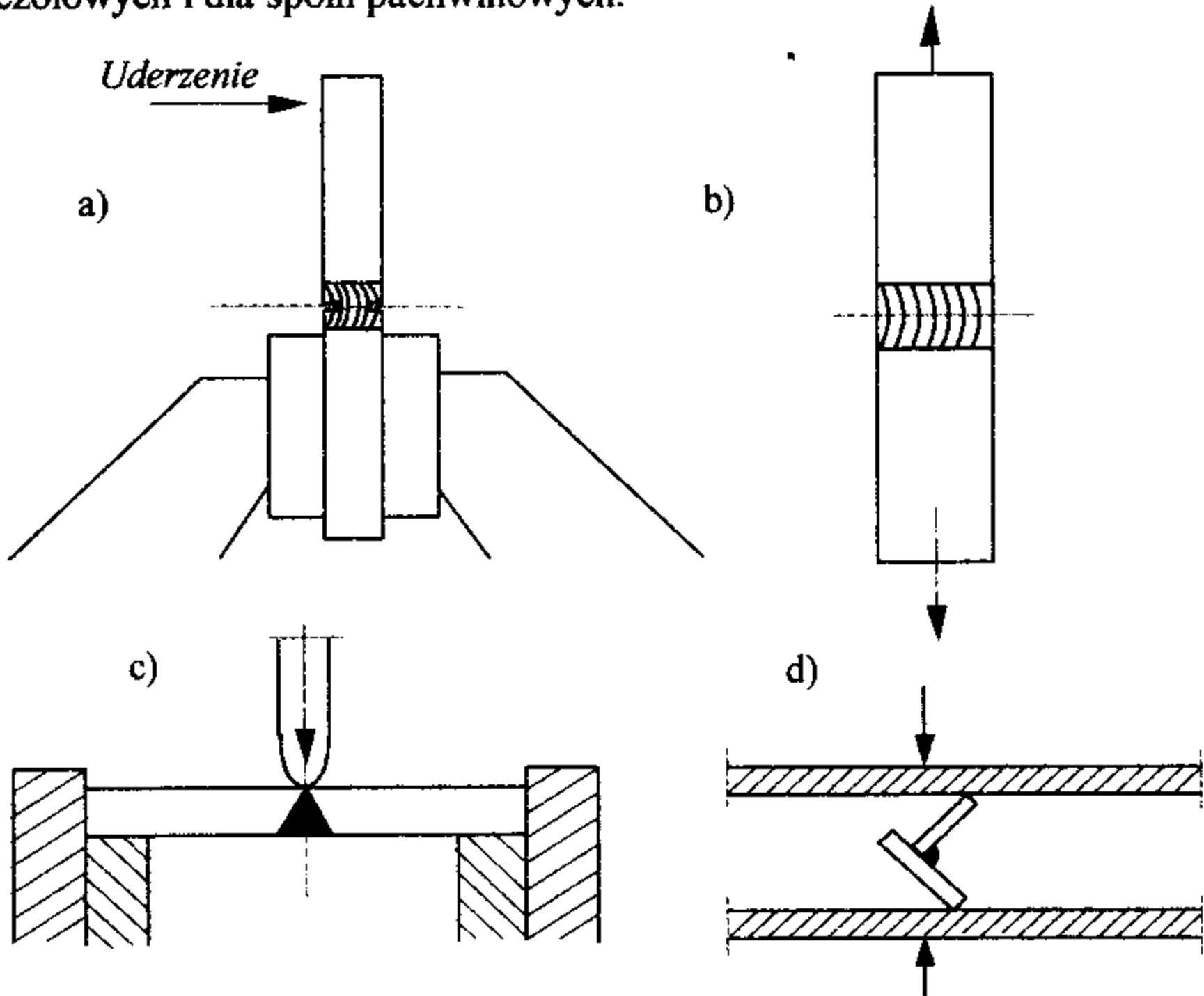
Rys. 15.25. Rodzaje karbów stosowanych przy próbie łamania

Próbie łamania przeprowadzamy stosując:

- dynamiczne uderzenie, np. młotkiem,

- dociskowe obciążenie w imadle, maszynie do zginania lub prasie warsztatowej,
- rozciąganie (nie stosowane przy próbie łamania spoiny pachwinowej).

Na rysunku 15.26 przedstawiono przykłady wykonania próby łamania dla spoin czołowych i dla spoin pachwinowych.



Rys. 15.26. Przykłady sposobów łamania spoin: a, b, c - czołowych  
d - spoiny pachwinowej

#### 15.4.8. Badania makroskopowe

Badania makroskopowe należy przeprowadzać na próbkach trawionych, tak aby widoczna była linia wtopu, strefa wpływu ciepła (SWC) oraz poszczególne ściegi układane w trakcie spawania wielowarstwowego. Obejmują one również materiał podstawowy. Płaszczyzny wyciętej próbki lub przelomu przeznaczone do badania obrabiamy mechanicznie aż do całkowitego usunięcia nierówności powstałych podczas wycinania próbki. Następnie płaszczyzny badane szlifuje się, uważając aby nie przegrzać powierzchni. Po szlifowaniu powierzchnię próbki poddaje się procesowi trawienia dla ujawnienia linii wtopu, szerokości strefy wpływu ciepła (SWC). Do trawienia powierzchni badanej stosujemy m odczynniki chemiczne.

Badania makroskopowe pozwalają określić charakter krystalizacji metalu spoiny, makro niezgodności spawalnicze w niej występujące, jakość wtopienia metalu spoiny do metalu podstawowego, szerokości SWC, makrostrukturę materiału rodzimego i jego wady.

## **15.5. Część praktyczna**

### **15.5.1. Badania nieniszczące**

#### **15.5.1.1. Wyposażenie aparaturowo - materiałowe**

- badania wizualne (VT):
  - typowe złącze doczołowe z niezgodnościami spawalniczymi zewnętrznymi,
  - spoinomierz, suwmiarka, linijka,
- badania rentgenowskie (RT):
  - lampa rentgenowska,
  - normy do wyznaczania stopnia wielkości i stopnia nasilenia niezgodności spawalniczych,
  - radiogramy złączy spawanych z zarejestrowanymi niezgodnościami, kasety z defektofilmami, wzorce pręcikowe, negatoskop,
- badania ultradźwiękowe (UT):
  - defektoskop ultradźwiękowy UNIPAN 510,
  - głowica normalna 4N10 na fale podłużne, głowica skośna 4T70A7 na fale poprzeczne, wzorce W1, W2, wzorzec z niezgodnościami sztucznymi,
  - stalowe złącze doczołowe z blach o  $g=10$  mm zawierające niezgodności spawalnicze,
  - środek sprzęgający np.: lej, suwmiarka, linijka,
- badania penetracyjne (PT):
  - komplet penetrantów barwnych,
  - złącze doczołowe z mikropęknięciami,
  - lupka Fresnela, linijka,
- badania magnetyczno-proszkowe (MT):
  - defektoskop magnetyczny DM10,
  - stalowe złącze doczołowe z mikropęknięciami,
  - zawiesina proszku magnetycznego w wodzie,
  - lupka Fresnela.

### 15.5.1.2. Przebieg ćwiczenia

Przebieg ćwiczenia polega na zaznajomieniu ćwiczących ze sposobami przeprowadzenia badań przedmiotowymi metodami, sposobem określania i opisywania wykrytych niezgodności spawalniczych oraz określeniu poziomu jakości zbadanego złącza spawanego.

### 15.5.2. Badania niszczące

#### 15.5.2.1. Wyposażenie aparaturowo-materialowe

- próba rozciągania poprzecznego złącza, próba rozciągania wzdłużnego spoiny, próba zginania, próba łamania,
  - maszyna wytrzymałościowa ZD40,
  - próbki do badań wytrzymałościowych
  - suwmiarka, linijka, kątomierz,
- próba udarności,
  - młot Charpy,
  - próbka z karbem V,
- próba twardości,
  - twardościomierz Vickersa HV10,
  - próbki ze zglądem złącza.

#### 15.5.2.2. Przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie ma na celu zapoznanie ćwiczących ze sposobami wykonania przedmiotowych metod badań niszczących, ze sposobami zapisu i oceną uzyskanych wyników oraz określeniem zauważonych niezgodności spawalniczych, które mogłyby być przyczyną uzyskanego wyniku negatywnego.

### 15.6. Literatura

1. Pawłowski Z.: Badania nieniszczące. Poradnik. ODOK SIMP. Warszawa 1988.
2. Deputat J.: Badania ultradźwiękowe. Inst. Metalurgii Żelaza. Gliwice 1979
3. Malara W.: Badania radiograficzne. Inst. Metalurgii Żelaza. Gliwice 1981.
4. Jezierski G.: Radiografia przemysłowa. WNT. Warszawa 1993.
5. Stryk A.: Defektoskopia magnetyczno-proszkowa. Inst. Metalurgii Żelaza. Gliwice 1082.
6. Ostrowski R., Bigda Cz., Bigda L.: Wykrywanie wad powierzchniowych metodami penetracyjnymi. WNT. Warszawa 1972.
7. Praca zbiorowa.: Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. WNT. Warszawa 1983.
8. Karpiński St., Lorbiecki P., Radwan-Wiatrowski K.: Materiały pomocnicze do laboratorium spawalnictwa. Część pierwsza. Spawanie. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2000.



## WYKAZ PRZYTOCZONYCH NORM EUROPEJSKICH

1. PN – EN 169 Ochrona indywidualna oczu. Filtry spawalnicze i filtry dla technik pokrewnych. Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecenia.
2. PN – EN 175 Ochrona indywidualna. Środki ochrony oczu i twarzy stosowane przy spawaniu i technikach pokrewnych.
3. PN – EN 288-1 Wymagania dotyczące technologii spawania metali i jej uznawanie. Postanowienia ogólne dotyczące spawania.
4. PN – EN 288-3 Wymagania dotyczące technologii spawania metali i jej uznawanie. Badania technologii spawania łukowego stali.
5. PN – EN 439 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Gazy osłonowe do spawania i cięcia.
6. PN – EN 444 Badania nieniszczące. Ogólne zasady badań radiograficznych materiałów metalowych za pomocą promieniowania X i gamma.
7. PN – EN 440 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe i spoiwo do spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych.
8. PN – EN 470 Odzież ochronna spawaczy i zawodów pokrewnych.
9. PN – EN 499 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody otulone do ręcznego spawania stali niestopowych i drobnoziarnistych. Oznaczenie.
10. PN – EN 583-5 Badania nieniszczące. Charakteryzacja i wymiarowanie nieciągłości.
11. PN – EN 756 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe i kombinacje drut – topnik do spawania łukiem krytym stali niestopowych i drobnoziarnistych.
12. PN – EN 757 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody otulone do ręcznego spawania stali o wysokiej wytrzymałości.
13. PN – EN 758 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty proszkowe do spawania łukowego w osłonie i bez osłony gazowej stali niestopowych i drobnoziarnistych. Oznaczenie.
13. PN – EN 760 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Topniki do spawania łukiem krytym. Oznaczenia.
14. PN – EN 875 Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba udarności. Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie.

15. PN – EN 876 Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek wzdluznych ze spoin złączy spawanych.
16. PN – EN 895 Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych.
17. PN – EN 910 Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba zginania.
18. PN – EN 970 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne.
19. PN – EN 1043-1 Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba twardości. Próba twardości złączy spawanych łukowo.
20. PN – EN 1043-2 Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba mikrotwardości złączy spawanych łukowo.
21. PN – EN 1044 Spawalnictwo. Lutowanie twarde. Spoiwa.
22. PN – EN 1045 Lutowanie twarde. Topniki do lutowania twardego. Klasyfikacja i warunki dostawy.
23. PN – EN 1320 Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba łamania.
24. PN – EN 1321 Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
25. PN – EN 1599 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali żarostojalnych. Oznaczenie.
26. PN – EN 1600 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody do spawania stali nierdzewnych i żaroodpornych. Klasyfikacja.
27. PN – EN 1668 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Pręty, druty i stopiwo do spawania łukowego w osłonach gazów elektrodą wolframową stali niestopowych i drobnoziarnistych. Oznaczenie.
28. PN – EN 1714 Spawalnictwo. Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych.
29. PN – EN 12062 Badania nieniszczące. Zasady ogólne dotyczące materiałów metalowych.
30. PN – EN 12070 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego stali o zwiększonej odporności na pełzanie. Klasyfikacja.

31. PN – EN 12071 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty proszkowe do spawania w osłonie gazowej stali o zwiększonej odporności na pełzanie. Klasyfikacja.
32. PN – EN 12072 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego stali nierdzewnych i żaroodpornych. Klasyfikacja.
33. PN – EN 12073 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty proszkowe do spawania w osłonie gazowej i bez osłony gazowej stali niestopowych i żaroodpornych. Klasyfikacja.
34. PN – EN 12534 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe i stopiwo do spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów stali o wysokiej wytrzymałości. Oznaczenie.
35. PN – EN 12536 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Pręty do spawania gazowego stali niestopowych i o zwiększonej odporności na pełzanie. Klasyfikacja.
36. PN – EN 23677 Spawalnictwo. Luty do lutowania miękkiego, twardego i lutospawania. Oznaczenie.
37. PN – EN 25817 Wytyczne do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych.
38. PN – EN 26520 Klasyfikacja niezgodności spawalniczych w złączach spawanych metali wraz z objaśnieniami.
39. PN – EN 29013 Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja jakości i tolerancji wymiarowych powierzchni ciętych termicznie (cięcie tlenem).
40. PN – EN 29453 Spawalnictwo. Luty miękkie. Skład chemiczny i postacie.
41. PN – EN 29454 Spawalnictwo. Topniki do lutowania miękkiego. Oznaczenie i wymagania. Oznaczenie etykietowania i pakowania.
42. PN – EN 29692 Spawalnictwo. Spawanie łukowe ręczne elektrodami otulonymi i w osłonach gazowych oraz spawanie gazowe. Przygotowanie brzegów do spawania.
43. PN – EN 26947 Spoiny. Pozycje spawania. Definicje kąta pochylenia i obrotu.

61361



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ