

**Katedra Wytrzymałości i Technologii Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo – Hutnicza**

PRACA DOKTORSKA

**Temat: Wpływ technologicznych parametrów napawania
brązu na podłoże stalowe na wybrane
właściwości użytkowe napoin**

Wykonał: mgr inż. Tomasz Góral

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Skorupa

- Kraków 2007 -

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania
Panu Promotorowi
Prof. dr hab. inż. Andrzejowi Skorupie
za kilkuletnie kierowanie
moim rozwojem naukowym,
w szczególności zaś
za pomoc i cenne wskazówki
przy realizacji tej rozprawy.*

Autor

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	4
2. Własności i zastosowania brązów.....	6
3. Proces i metody napawania brązem.....	16
3.1. Proces	16
napawania.....	
3.2. Stosowane metody napawania	18
brązem.....	
3.2.1. Napawanie	18
gazowe.....	
3.2.2. Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną.....	20
3.2.3. Napawanie metodą TIG.....	21
3.2.4. Napawanie metodą MIG.....	23
3.2.5. Napawanie łukiem	25
krytym.....	
3.2.6. Napawanie plazmowe.....	27
3.2.7. Zestawienie podstawowych parametrów technologicznych i użytkowych	
metod	29
napawania.....	
3.3. Technologia przygotowania powierzchni przeznaczonych do napawania	
metodą MIG/MAG.....	30
4. Technologiczne parametry napawania brązem elektrodą topliwą w osłonie	
gazów mające wpływ na jakość, geometrię i wydajność procesu napawania.....	33
4.1 Prędkość podawania drutu elektrodowego.....	35
4.2. Napięcie	36
łuku.....	
4.3. Prędkość	37
napawania.....	
4.4. Skład chemiczny gazu	38
osłonowego.....	
4.5. Natężenie przepływu gazu osłonowego.....	45

4.6. Rodzaj drutu.....	47
4.7. Średnica drutu.....	48
4.8. Długość wolnego końca elektrody.....	49
4.9. Biegunowość i rodzaj prądu.....	50
4.10. Kąty nachylenia elektrody.....	51
4.11. Techniki układania ściągów.....	53
4.12. Indukcyjność obwodu spawalniczego.....	56
5. Napawanie brązu na podłoże stalowe.....	58
6. Ocena przydatności danego gatunku brązu jako materiału dodatkowego i stali jako materiału podłoża.....	62
6.1. Przydatność brązu jako materiału dodatkowego – spawalność brązów.....	62
6.2. Możliwość zastosowania określonego gatunku stali jako materiału podłoża.....	66
...	
6.3. Podsumowanie analizy literaturowej i teza pracy.....	72
7. Cel i zakres badań własnych.....	73
8. Materiały stosowane do badań.....	75
9. Urządzenia, aparatura i stanowisko wykorzystane do badania procesu napawania brązu metodą MIG.....	78
10. Przebieg i wyniki badań.....	90
10.1. Wyznaczenie korzystnych zakresów technologicznych parametrów napawania.....	90
10.2. Planowanie eksperymentu.....	98
10.2.1. Podstawy planowania eksperymentu.....	99
10.2.2. Klasyfikacja planów doświadczenia.....	100

10.2.3. Kryteria wyboru planu doświadczenia.....	102
10.3. Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoiny i głębokość wtopienia w osłonie czystego argonu.....	104
10.4. Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoiny, głębokość wtopienia i parametry wydajnościowe w osłonie mieszanek argonowo-helowych.....	115
10.5. Wpływ doboru podziałki ściągów na geometrię wykonanych warstw z brązu.....	132
10.6. Badania twardości.....	136
10.7 Badania składu chemicznego i metalograficzne.....	145
10.7.1 Badania metalograficzne.....	145
10.7.2 Badania składu chemicznego.....	152
10.8. Badania rentgenograficzne.....	160
10.9. Próba zginania.....	162
10.10. Badania tribologiczne.....	168
11. Wnioski.....	178
Literatura.....	180

1.Wprowadzenie

Odkrycie i opatentowanie spawania łukowego przez Stanisława Olszewskiego i Mikołaja Benardosa w 1885r. umożliwiło powstanie nowych technologii łączenia i nakładania metali na inne powierzchnie. Jedną z technologii nanoszenia powłok metalicznych jest napawanie, które umożliwia kształtowanie warstwy wierzchniej i optymalizację własności użytkowych części maszyn. Z doświadczenia użytkowania maszyn wynika, że zużycie w postaci ubytków geometrycznych w obrębie warstwy wierzchniej jest bardziej intensywne od kontaktowego zużycia zmęczeniowego, co stanowi podstawę możliwości wielokrotnej regeneracji przez napawanie. Koszty takiej regeneracji są często niższe od kosztów wytworzenia nowych części. Niezależnie od stosowania napawania do regeneracji elementów zużytych, coraz częściej technikę tę stosuje się przy produkcji nowych części maszyn i urządzeń, jako metodę kształtowania własności warstwy wierzchniej.

Jednym z materiałów, które znalazły szerokie zastosowanie technologii napawania jest brąz. Zawdzięcza to swoim własnościom, a przede wszystkim odporności na korozję i możliwości zastosowania w węzłach tarcia.

Spawanie i napawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu MIG/MAG jest obecnie jednym z najpowszechniej stosowanych spawalniczych procesów wytwarzania. Prawie zupełny brak publikacji dotyczących napawania brązu na podłoże ze stali o ograniczonej spawalności metodą MIG przyczynił się do podjęcia tej tematyki.

Jednym z celów pracy było określenie oddziaływania technologicznych parametrów napawania metodą MIG na geometrię ściegu i głębokość wtopienia, co pozwala na opracowanie zasad właściwego ich doboru w celu zwiększenia wydajności i skrócenia czasu napawania z zapewnieniem założonych wcześniej kryteriów jakościowych układanych napoin, bez stosowania dodatkowego, specjalistycznego wyposażenia.

Istotnym czynnikiem umożliwiającym poprawę jakości procesu napawania MIG/MAG jest, oprócz nastawienia właściwych technologicznych parametrów napawania, dobór odpowiedniego gazu lub mieszanki osłonowej. Również i ta problematyka znalazła swoje odzwierciedlenie w pracy, szczególnie w postaci

badzeń wpływu rodzaju gazu osłonowego na parametry geometryczne napoin i głębokość wtopienia.

Praktycznym wynikiem pracy jest przedstawienie zalecanych zakresów technologicznych napawania, które gwarantują uzyskanie napoin spełniających założone wcześniej kryteria jakościowe, związane z geometrią napoin, głębokością wtopienia, strukturą, twardością, przyczepnością do podłoża, obecnością wad wewnętrznych, a wreszcie własnościami tribologicznymi.

2. Własności i zastosowania brązów

Brązy są to stopy miedzi, których głównym składnikiem stopowym ($> 2\%$) jest cyna, aluminium, krzem, mangan, ołów lub beryl. Są to odpowiednio brązy cynowe, aluminiowe (brązale), krzemowe, manganowe, ołowiowe lub berylowe. Brązy zawierające więcej niż jeden składnik stopowy - wieloskładnikowe, nazywane są brązami specjalnymi.

Barwa brązów zależna jest od składu - począwszy od ciemnoszarej (dla brązów o dużej zawartości cyny), poprzez żółtą, czerwonożółtą, aż do różowej, podobnej do czystej miedzi. Pod wpływem czynników atmosferycznych brązy powlekają się patyną, chroniącą przed dalszą korozją.

Brązy o niewysokiej zawartości głównego składnika stopowego (np. 8% cyny) są jednofazowe i plastyczne. Przy większej zawartości składnika stopowego, a zwłaszcza przy zawartości jeszcze innych składników stopowych, brązy mają strukturę dwufazową i są nieplastyczne. Kucie brązów jest dość trudne zarówno na zimno, jak i na gorąco. Brązy typu odlewniczego mają dobre własności odlewnicze (odlewy w piasku, w kokilach, pod ciśnieniem). Obróbka skrawaniem rozważanych tworzyw jest na ogół łatwa, wiór jest sypki. Niektóre brązy poddaje się obróbce cieplnej (hartowaniu, a zwłaszcza utwardzaniu dyspersyjnemu) w celu poprawienia własności mechanicznych [50].

Najczęściej wykorzystywaną cechą powierzchni pokrytych brązem jest odporność na korozję. Większość brązów jest odporna na korozję atmosferyczną, wodną i na środowisko roztworów soli. Brązy są odporne na działanie roztworów zasadowych (wyłączając roztwory amoniakowe) i wielu kwasów, zwłaszcza o charakterze redukującym. Natomiast nie mają one odporności na działanie siarki i jej związków (tworzy się siarczki miedzi). Nie można ich stosować w temperaturze powyżej $200-260^{\circ}\text{C}$ [8,11,41]. Brązy stosowane są również do nakładania powłok ochronnych na powierzchnie pracujące w warunkach zużycia adhezyjnego, erozji, kawitacji i obciążenia udarowego [32,11,41]. Brązy krzemowe nie są uważane za dobre na powierzchnie ślizgowe i dlatego używane są tylko do zapewnienia odporności na korozję [41] i obciążenia udarowe [32]. Stopy miedzi z cynkiem o umiarkowanej odporności na korozję wykorzystuje się na miękkie powierzchnie nośne. Brązy cynowe i bardziej miękkie brązy aluminiowe (do 12% Al) stosuje się na miękkie powierzchnie nośne i powierzchnie odporne na korozję.

Jeżeli powierzchnia nośna powinna być twardsza od drugiej powierzchni współpracującej zaleca się stosowanie twardszych brązów aluminiowych (powyżej 12% Al) [8,11,41]. Brązy aluminiowe mają dużą odporność na obciążenia dynamiczne, pogarszającą się ze zwiększaniem zawartości aluminium i zapewniają lepszą odporność na ścieranie typu metal-metal w porównaniu ze stalami oraz dość dobrą odporność korozyjną. Brązy typu Cu-Al-Mn-Ni cechują się zwiększoną odpornością na erozję, kawitację i mają dobre własności mechaniczne [32].

Typowe zastosowania brązów to naprawa odlewów z brązu oraz napawanie dużych śrub okrętowych, tłoków hydraulicznych, przewodnic, łożysk ślizgowych, młotów, części urządzeń górniczych, zaworów, walców papierniczych, matryc ciągadeł, kół zębatych i zębatek. Brązy aluminiowe (13÷15% Al) są stosowane do napawania przewodnic dużych ciśnieniowych maszyn odlewniczych [32,11,41].

Napawanie warstw wierzchnich brązem stosuje się w celu nadania odpowiednich własności użytkowych powierzchni ślizgowych łożysk i suwaków różnych elementów maszyn, powierzchni uszczelniających w przemysłowej armaturze wodnej oraz parowej, a także w wirnikach pomp odśrodkowych [20,59].

Brązy i inne stopy miedzi stosowane jako materiały dodatkowe do napawania, wraz z ich właściwościami i zastosowaniem przedstawiono w tabelicy 2.1.

Tablica 2.1 Brązy i inne stopy miedzi do napawania, ich właściwości i zastosowania [8,11]

Oznaczenie	Skład chemiczny materiałów dodatkowych [%]	Właściwości mechaniczne przy ściskaniu		Twardość HB	Zastosowanie
		R_e [Mpa]	R_{sp} [Mpa]		
CuZnB	Cu 56-60, Sn 0,75-1,10, Fe 0,25-1,25, Si 0,04-0,15, Ni 0,2-0,8, Zn reszta	560	146	95 ^{a,e}	łożyska i powierzchnie odporne na korozję
CuZnC	Cu 56-60, Sn 0,75-1,10, Fe 0,25-1,25, Si 0,04-0,15, Zn reszta	525	133	90 ^{a,e}	

Tablica 2.1 Brązy i inne stopy miedzi do napawania, ich właściwości i zastosowania - cd.

Oznaczenie	Skład chemiczny materiałów dodatkowych [%]	Właściwości mechaniczne przy ściskaniu		Twardość HB	Zastosowanie
		R_e [Mpa]	R_{sp} [Mpa]		
CuZnD	Cu 46-50, Sn 0,75-1,10, Si 0,04-0,15, Ni 9-11, Zn reszta	595	154	100 ^{a,e}	powierzchnie odporne na korozję
CuSiA	Cu 91 min., Si 2,8-4, Zn 1,5 max., Sn 1,5 max., Mn 1,5 max, inne 0,5	405	140	80 ^{a,e} , 100 ^{a,d}	
CuSi	Si 2,8-4, Sn 1,5 max., Mn 1,5 max, Fe 0,5, inne 0,5, Cu reszta	420	133	95 ^{a,d}	
CuSnA	Sn 4-6, P 0,10-0,35, Cu reszta	280	63	70 ^{a,e} , 85 ^{a,d}	łożyska i powierzchnie odporne na korozję
CuSnC	Sn 7-9, P 0,05-0,35, Cu reszta	350	70	90 ^{a,c} , 95 ^{a,d}	
CuSnD	Sn 9-11, P 0,10-0,30, Cu reszta	455	84	90 ^{a,e} , 110 ^{a,d}	powierzchnie nośne
CuSnE	Pb 14-18, Sn 5-7, P 0,3-0,5, Cu reszta	140	35	50 ^{a,e}	tylko na maźnice lokomotyw uwzględniając porowatość w celu zatrzymania oleju
CuAlA-1	Al 6-9, Cu reszta	730	110	125 ^{b,d}	powierzchnie odporne na korozję
CuAlA-2	Al 9-11, Fe 1,5 max., Cu reszta	840	175	150 ^{b,c} , 160 ^{b,d}	łożyska i powierzchnie odporne na korozję
CuAlB	Al 10,25-11,75, Fe 3-4,25, Cu reszta	910	182	160 ^{b,c} , 270 ^{b,d}	łożyska i powierzchnie odporne na kawitację
CuAlC	Al 12-13, Fe 3-5, Cu reszta	1000	315	200 ^{b,c} , 269 ^{b,d}	
CuAlD	Al 13-14, Fe 3-5, Cu reszta	1100	350	205 ^{b,c} , 340 ^{b,d}	powierzchnie nośne
CuAlE	Al 14-15, Fe 3-5, Cu reszta	1200	465	300 ^{b,c} , 390 ^{b,d}	
Brąz NiAl	Al 8,5-9,5, Ni 4-5,5, Fe 3-5, Mn 0,6-3,5, Cu reszta	910	315	187 ^{b,c} , 196 ^{b,d}	powierzchnie odporne na korozję i erozję
Brąz MnNiAl	Al 7-8, Fe 2-4, Ni 1,5-3, Mn 11-14, Cu reszta	945	210	185 ^{b,c} , 217 ^{b,d}	

^a dla 500 kg obciążenia podczas pomiaru twardości, ^b dla 3000 kg obciążenia podczas pomiaru twardości, ^c dla napoin uzyskanych metodą MMA, ^d dla napoin uzyskanych napawaniem w osłonie gazu obojętnego, ^e dla napoin uzyskanych napawaniem acetylenowo-tlenowym

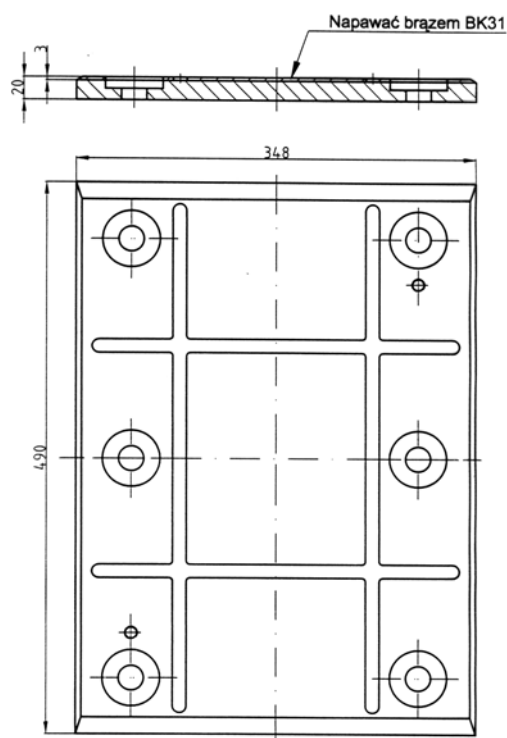
Wykorzystanie brązu obejmuje także wykonanie zastępczych części maszyn i urządzeń ze stali o napawanych powierzchniach brązem zamiast z miedzi lub brązu [8].

Szczególnym przykładem zastosowania warstw wykonanych z brązu na podłożu stalowym może być japońska walcarka czterokłatkowa do blach znajdująca się w Hucie im. Tadeusza Sendzimira. Warstwy z brązu w tej walcarce wykorzystywane są jako powierzchnie uszczelniające i ślizgowe. Elementy zawierające warstwy z brązu podlegające naprawie - regeneracji to:

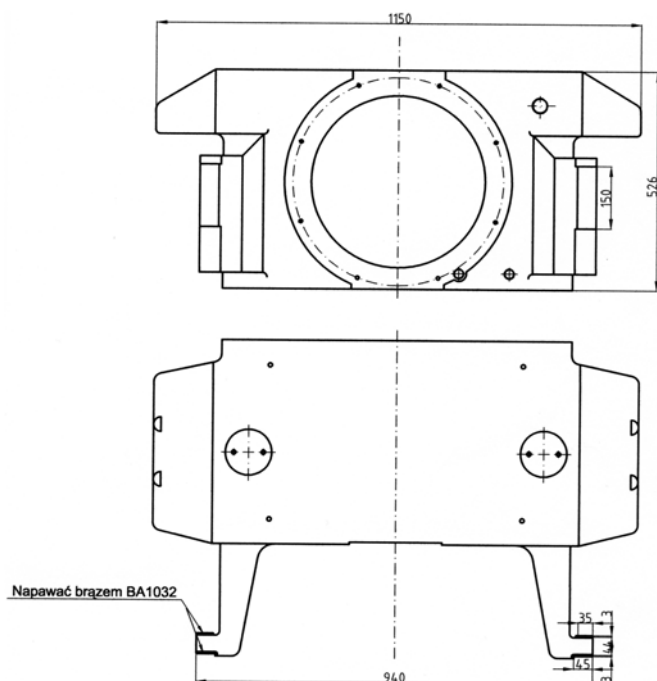
- nakładki poduszek tzw. „ślizgi” (rys. 2.1),
- łapa poduszki górnej (rys. 2.2),
- wspornik poduszki (rys. 2.3),
- cylinder (rys.2.4) i nurnik (rys. 2.5) wyginania ujemnego walca oporowego.

Nakładki poduszki (rys. 2.1) posiadają warstwy z brązu BK31 lub cynowego CuSn6 o grubości 3 mm nałożone na materiał odpowiadający stali St3S. Następnym elementem, którego regeneracja jest możliwa przez napawanie brązem jest poduszka górna walcarki (rys. 2.2). Na łapach poduszki znajdują się warstwy z brązu ulegające zużyciu. Skład chemiczny staliwa, z którego wykonano poduszkę jest zbliżony do składu chemicznego stali gatunku 45. Nałożona warstwa o grubości 3 mm wykonana była z brązu aluminiowego BA1032. We wsporniku poduszki (rys. 2.3) wykonanym ze stali gatunku 45 zastosowano warstwy z brązu BA1032 o grubości 2,5 mm. Kolejnymi elementami walcarki posiadającymi warstwy z brązu były cylinder (rys. 2.4) i nurnik (rys. 2.5). Cylinder i nurnik wykonane są ze stali gatunku 45. Cylinder w miejscach styku z nurnikiem we wcześniejszych latach napawano brązem BA1032, a obecnie brązem BK31. Nurnik pokryty jest brązem BA1032. Oba elementy mają warstwy brązu o grubości 1,5 mm. Nakładki poduszki naprawiano do tej pory przez planowanie powierzchni roboczej z brązu i dodawanie pod nakładkę blachy o grubości 0,5-2 mm, równej grubości zebranej warstwy brązu. Druga metoda naprawy polegała na przykręcaniu na stalową płytę blachy z brązu o odpowiedniej grubości. Trzecia, najdroższa metoda naprawy, polegała na wykonaniu całej nakładki poduszki walcarki z brązu BK31. Pozostałe elementy regenerowano w większości przypadków przez napawanie elektrodą otuloną ECuSn7 o średnicy 4 lub 3,2 mm produkcji Zakładu Doświadczalnego Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach lub przez napawanie plazmowe brązem. Metoda

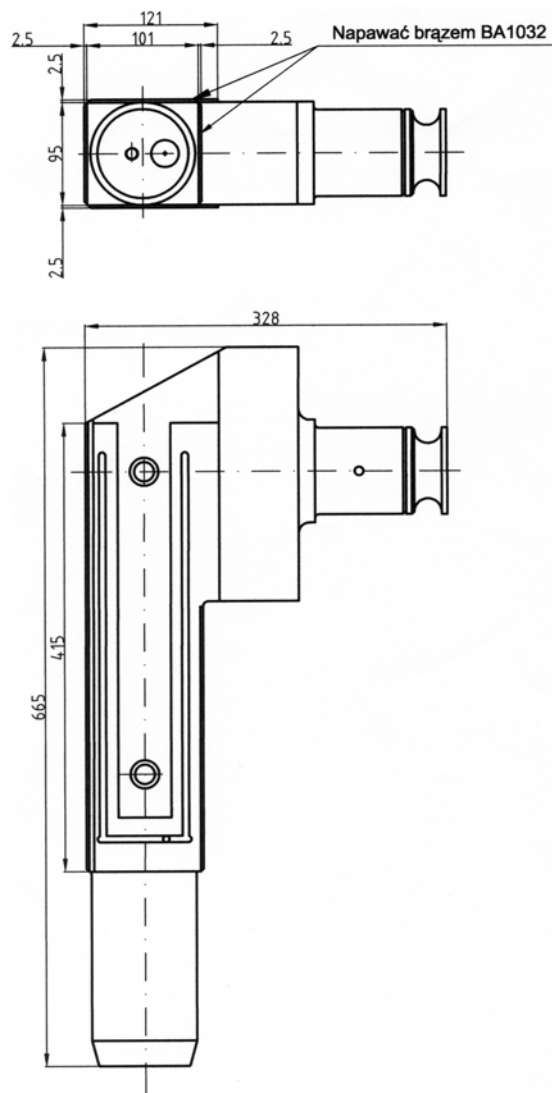
napawania elektrodą otuloną nie była wydajna i nie nadawała się do wszystkich elementów. Natomiast napawanie plazmowe było bardzo kosztowne głównie ze względu na cenę proszku.



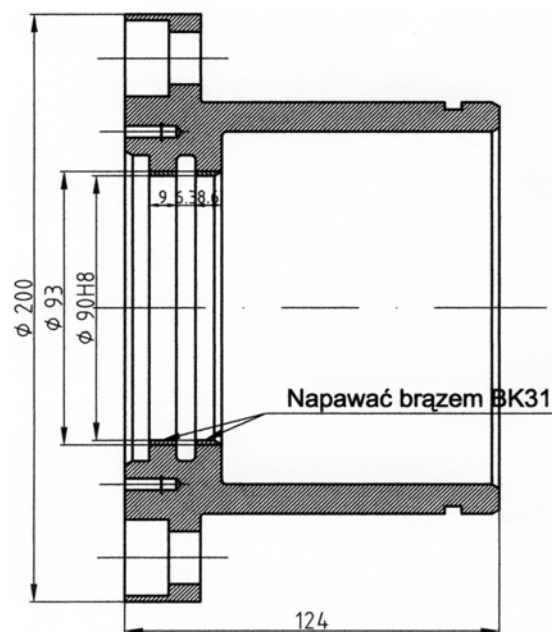
Rys. 2.1. Nakładka poduszki



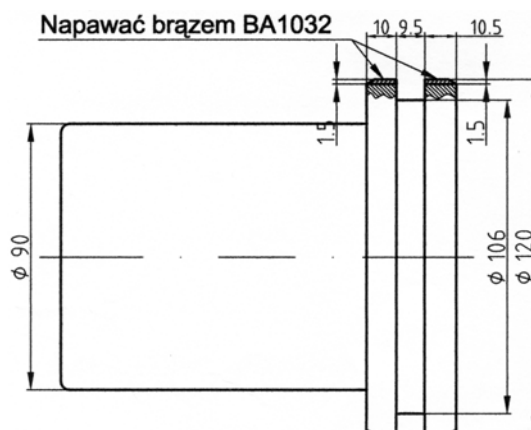
Rys. 2.2. Poduszka górna



Rys. 2.3. Wspornik poduszki



Rys. 2.4. Cylinder



Rys. 2.5. Nurnik

Wszystkie wymienione wcześniej elementy walcarki można regenerować przez napawanie warstw brązu metodą MIG.

Powyższe zastosowania dotyczyły regeneracyjnego nanoszenia warstw z brązu. Przykładami wykonywania nowych elementów poprzez napawanie brązem elementów stalowych może być zastępowanie w trakcie remontów maszyn zużytych tulei z brązu, tulejami wykonanymi ze stali z napawaną warstwą z brązu. Tuleje te występują np. w połączeniach sworzniowych maszyn budowlanych (rys. 2.6 -13). Na tuleję stalową napawa się najczęściej brąz aluminiowy lub dla mniej obciążonych połączeń brąz cynowy.



Rys. 2.6. Koparka kołowa Liebherr



Rys. 2.7. Połączenie ramienia z łyżką



Rys. 2.8. Koparko - ładowarka



Rys. 2.9. Połączenie ramienia z łyżką czołową



Rys. 2.10. Połączenie ramienia z łyżką tylną



Rys. 2.11. Koparka gąsienicowa

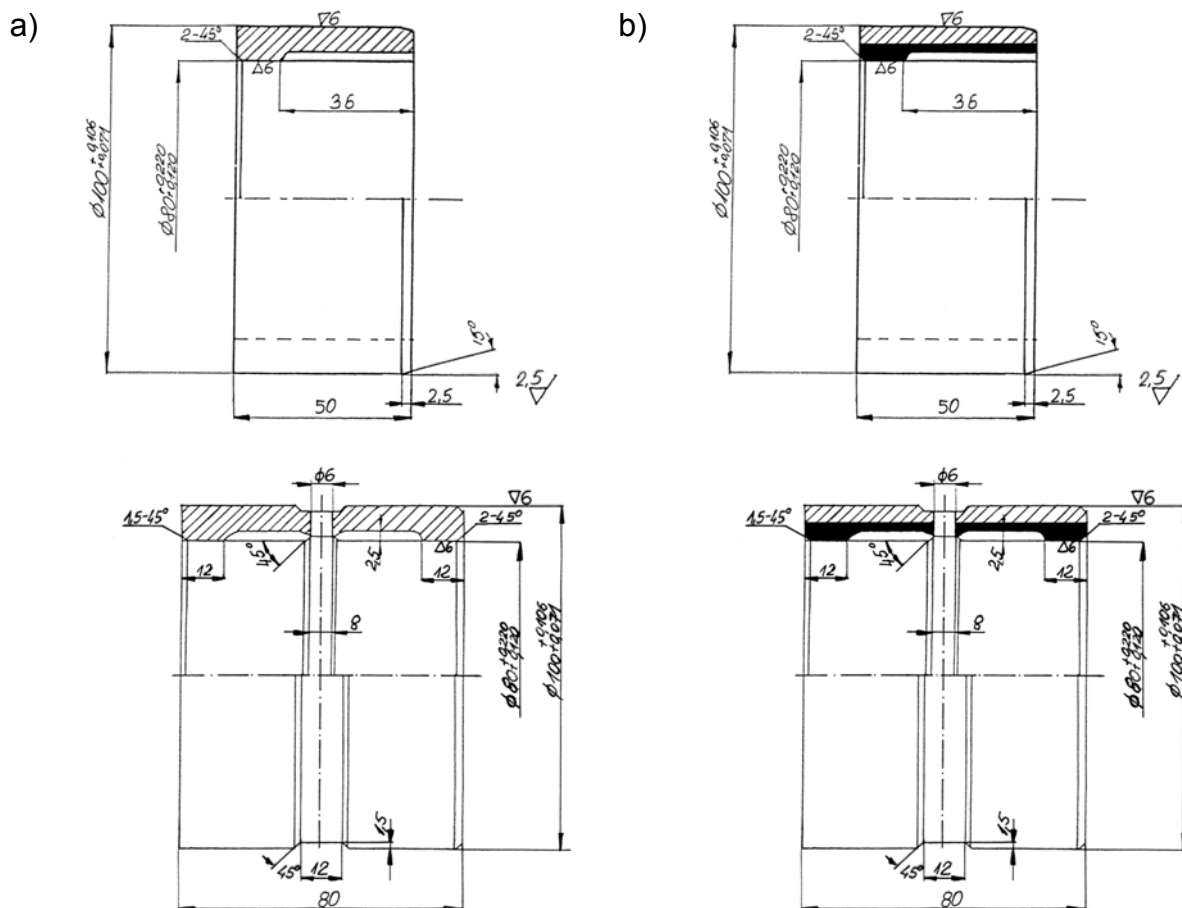


Rys.2.12. Połączenie ramion



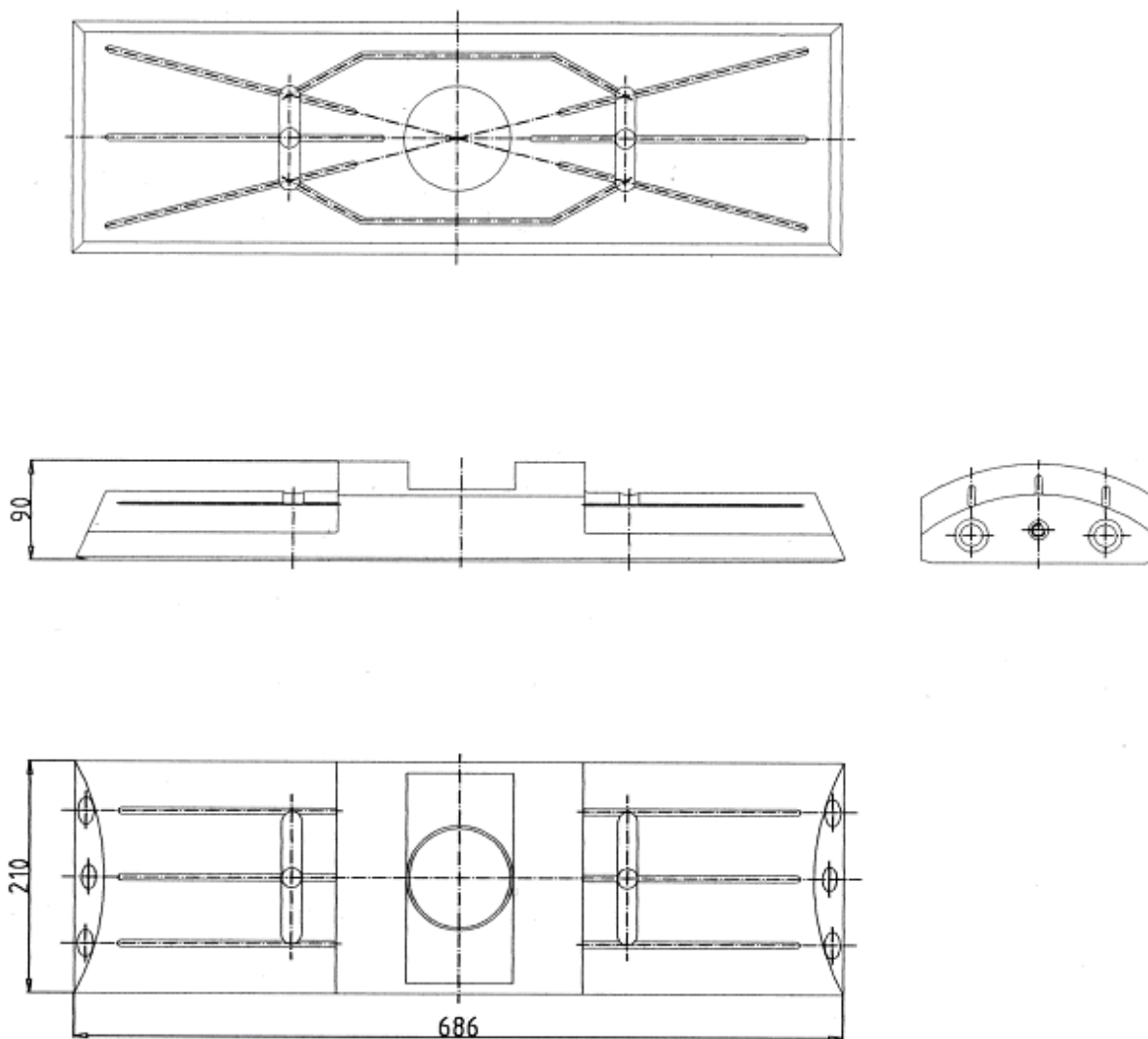
Rys. 2.13. Połączenie ramienia z łyżką

Na rysunku 2.14 przedstawiono wymiary tulei brązowej stosowanej w koparce Menck 250H. Nowe tuleje wykonywano ze stali R35 lub St3S, z napawaną warstwą brązu aluminiumowego lub cynowego metodą MIG w osłonie czystego argonu.



Rys. 2.14. Wymiary tulei z brązu występującej w koparce Menck 250: a) tuleje wykonane w całości z brązu, b) tuleje stalowe z warstwą napawaną brązem (miejsca zacernione)

Innym przykładem wykorzystania napawania brązem metodą MIG w ostatnich latach był projekt zastąpienia, w jednej z polskich hut, wkładu wahlowego łącznika przegubowego walcarki (duo „0”) (rys. 2.15) wykonanego w całości z brązu BA1032 wkładem wykonanym ze stali St3 z napawanymi brązem BA 1032 metodą MIG powierzchniami roboczymi. Podobne przedsięwzięcia realizowano również praktycznie w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia regenerując wkłady wykonane ze staliwa lub brązu BA1032 (rys. 2.16) przez napawanie łukiem krytym powierzchni roboczych brązem CuSn7P [5].



Rys. 2.15. Wkład wahliwy łącznika przegubowego walcarki



Rys. 2.16. Wkład wahliwy łącznika przegubowego zgniatacza z napawaną powierzchnią roboczą [5]

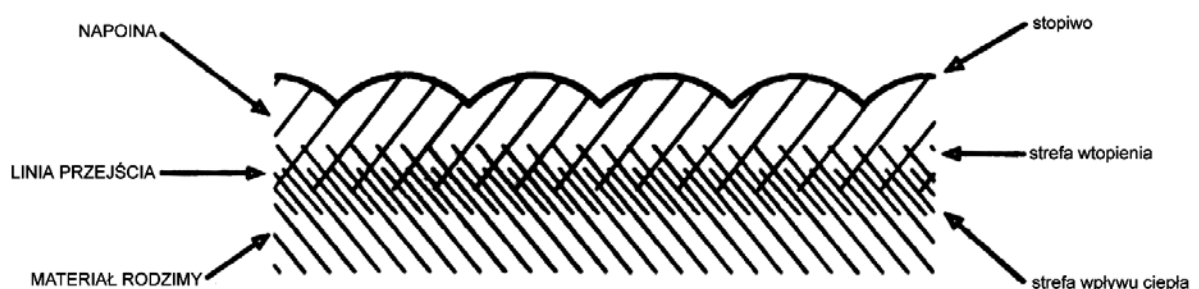
3. Proces i metody napawania brązem

3.1. Proces napawania

Napawanie jest procesem spawalniczym, w którym stopiwo układane jest na powierzchni materiału rodzimego (podstawowego) przy jednoczesnym podtopieniu podłoża, w celu nadania przedmiotowi wymaganych wymiarów albo wytworzenia na nim warstwy powierzchniowej o specjalnych właściwościach takich, jak odporność na zużycie (zwłaszcza ścierne), uderzenia, czy korozję. Napawanie wykorzystywane jest w naprawach, aby przywrócić częściom maszyn lub urządzeń przydatność do eksploatacji (napawanie regeneracyjne), bądź też może ono występować w procesie produkcyjnym nowych wyrobów (napawanie technologiczne) [9,69].

Cechą odróżniającą proces napawania od innych metod nanoszenia powłok metalicznych jest przetopienie materiału podłoża, na które nakłada się napoinę. Spełnienie tego warunku jest istotne dla uzyskania odpowiedniej głębokości wtopienia gwarantującej przyczepność napawanej warstwy z materiałem podłoża.

Właściwości strefy wtopienia, będącej warstwą przejściową pomiędzy napoiną a materiałem podłoża, mają zasadniczy wpływ na wynik napawania. Kluczowe znaczenie posiada głębokość wtopienia i stopień wymieszania materiału podłoża z napoiną, który zależy między innymi od składu chemicznego obu tych materiałów. Wielkość obszaru wtopienia wpływa również na przebieg nagrzewania graniczącej z nim bezpośrednio strefy materiału podłoża, pociągając za sobą powstanie nowych struktur i zmiany właściwości materiału rodzimego.



Rys. 3.1. Strefa napawana [65]

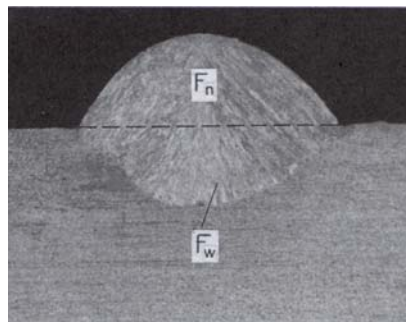
Strefę napawaną z wszystkimi jej elementami przedstawiono na rys. 3.1. W napoinie, a zwłaszcza w jej górnej części, występuje prawie czyste stopiwo użytego materiału dodatkowego, zaś dolna część stopiwa częściowo miesza się z materiałem podłoża tworząc, tak jak w przypadku spawania, strefę wtopienia.

Linia przejścia jest umowną, chociaż czasem bardzo wyraźną, granicą pomiędzy materiałem podłoża i stopiwem materiału dodatkowego.

Zmiana stężenia składników materiału rodzimego w napoinie zmniejsza się od 100% na linii przejścia do 0% poza strefą wtopienia, w miarę oddalania się od linii przejścia i materiału rodzimego. Przebieg tej zmiany zależy od wymiarów (grubości) napawanej warstwy. Sąsiadujący z napoiną obszar materiału rodzimego nagrany ciepłem dostarczonym w procesie napawania - strefa wpływu ciepła - posiada struktury uzależnione od temperatury, jaką uzyskały poszczególne warstwy. Struktury te zmieniają się w miarę oddalania się od linii przejścia aż do osiągnięcia nienaruszonej struktury materiału podłoża. Poniżej linii przejścia występuje właściwie tylko materiał rodzimy [65].

Technologie napawania, jak wspomniano o tym wcześniej, charakteryzuje stopień metalurgiczne napawanej powłoki (napoiny) z nadtopionym materiałem podłoża. Stopień wymieszania jest określany za pomocą współczynnika udziału metalu podłoża w napoinie. Udział metalu podłoża w napoinie U_p jest to stosunek powierzchni przekroju nadtopionego metalu podłoża F_w do sumy powierzchni przekroju nadlewu napoiny F_n i metalu podłoża F_w (rys. 3.2) [32,49].

$$U_p = \frac{F_w}{F_n + F_w} \cdot 100\% \quad (3.1)$$



Rys. 3.2. Podział napoiny na pole przekroju nadlewu napoiny F_n i pole przekroju nadtopionego metalu podłoża F_w [32]

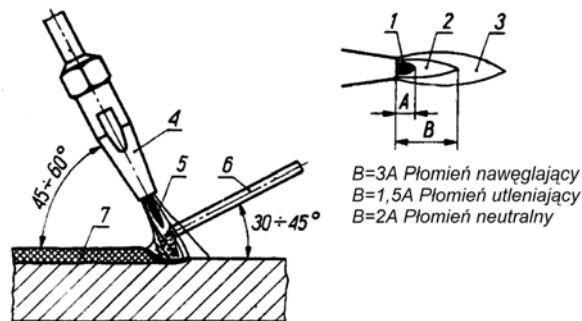
Następny wskaźnik charakteryzujący proces napawania, to wydajność napawania W_{nap} , określany jest jako masa warstwy napawanej w jednostce czasu; najczęściej podaje się go w kg/h. Proces napawania można również określać przez powierzchniową wydajność napawania W_{pow} , wyrażającą pole powierzchni napawanej w jednostce czasu [m^2/h] oraz innymi wskaźnikami, jak szerokość i grubość napawanej warstwy w jednym przejściu [49].

3.2. Stosowane metody napawania brązem

Napawanie brązem można przeprowadzać różnymi metodami. Poniżej przedstawiono metody, które stosuje się podczas napawania regeneracyjnego lub technologicznego.

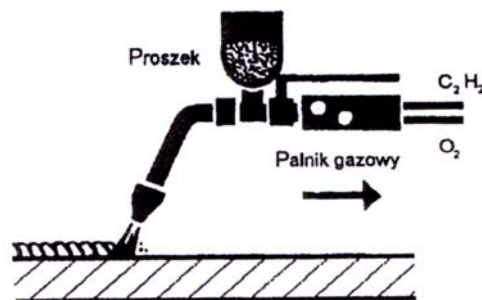
3.2.1. Napawanie gazowe

Napawanie gazowe jest to nakładanie na powierzchnię przedmiotu warstwy ciekłego metalu stopionego za pomocą płomienia gazowego - rys. 3.3.



Rys. 3.3. Schemat napawania gazowego i zalecane regulacje płomienia acetylenowo-tlenowego; 1 - jąderko, 2 - strefa redukcyjna, 3 - strefa utleniająca (kita), 4 - palnik gazowy, 5 - płomień gazowy, 6 - pręt, 7 – napoina [8]

Spoiwo można stosować w postaci drutu pełnego, proszkowego, odlanej pałeczki lub proszku metalicznego. Odmianą napawania gazowego, w której stosujemy ostatni z wymienionych materiałów dodatkowych jest napawanie gazowo-proszkowe przedstawione na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Schemat napawania gazowo-proszkowego [3]

Proszek metaliczny lub cermetalowy o ziarnistości w zakresie $0,03 \div 0,1$ mm zasysany jest z pojemnika z proszkiem przez strumień gazu palnego i wylatuje się wraz z nim w płomieniu gazowym na zewnątrz palnika. Wykazuje się również dysza.

palnika proszek ulega stopieniu ciepłem płomienia gazowego i jest rzucany energią kinetyczną gazów płomienia na nadtopione podłoże, gdzie stapiając się z metalem podłoża tworzy napoinę [1,2,4,8,31,32,45,49,58].

W napawaniu gazowym prawie wyłącznie jako gaz palny wykorzystuje się acetylen o temperaturze płomienia ok. 3100°C. Inne gazy palne (propan, propadien metyloacetylen, propan-butan, metan, gaz ziemny, gaz koksowniczy) ze względu na brak wyraźnie zarysowanych stref płomienia, brak możliwości regulacji płomienia od utleniającego do nawęglającego, niższą temperaturę płomienia i większe zużycie tlenu do spalania w stosunku do acetyleny stosuje się rzadko [8,32].

Napawanie gazowe pozwala na wykonanie napoin o wysokiej jakości, o gładkiej i równej powierzchni, minimalnym przetopieniu podłoża i jego udziału w powłoce. Możliwe jest napawanie zarówno małych jak i dużych powierzchni, płaskich oraz obrotowych, a także w miejscach trudno dostępnych. Najczęściej gazowo napawa się ręcznie, ale proces może być także prowadzony półautomatycznie i automatycznie [8,32,58].

Napawanie acetylenowo-tlenowe wymaga bardzo dokładnej regulacji płomienia, od której zależy rodzaj chemicznego oddziaływania płomienia. Natomiast jakość napoiny w dużej mierze wynika z precyzji prowadzenia palnika w czasie nadtopiania podłoża i stopiwa. W zależności od rodzaju napawanego materiału oraz metalu spoiwa często jest konieczne podgrzewanie wstępne, kontrola temperatury w czasie napawania oraz powolne chłodzenie po napawaniu lub nawet specjalna obróbka cieplna [8,44,49].

Metoda napawania gazowego umożliwia nanoszenie powłok o praktycznie dowolnym składzie chemicznym na podłoże stalowe, staliwne, żeliwne oraz z innych metali oraz stopów.

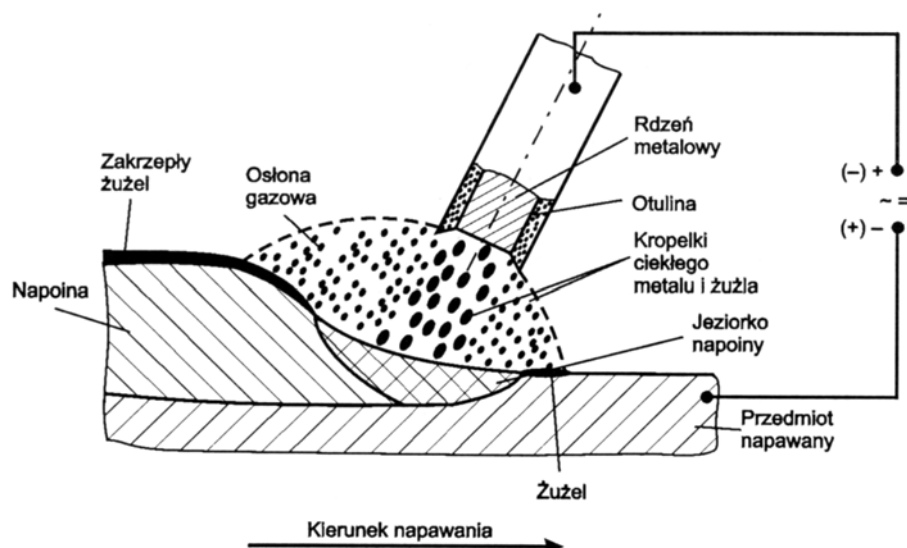
Zaletami napawania gazowego są niskie koszty wyposażenia stanowiska, możliwość napawania skomplikowanych kształtów, nawet o bardzo małej powierzchni, a proces napawania może być prowadzony w różnych pozycjach. Grubość powłok wykonanych w jednym przejściu wynosi od 0,02 do 3,5 mm, a udział materiału podłoża w powłoce 2÷10%, dzięki czemu napoiny już w pierwszej warstwie uzyskują wymagany skład chemiczny i własności eksploatacyjne.

Wadami gazowego napawania są: konieczność bardzo starannego przygotowania powierzchni przed napawaniem, często wymagane jest

podgrzewanie wstępne przedmiotu i obróbka cieplna po napawaniu, niebezpieczeństwo znacznych odkształceń i naprężeń spawalniczych oraz niekorzystnych zmian strukturalnych w napawanych przedmiotach oraz niska wydajność procesu $0,5 \div 5$ kg/h zależna od techniki i użytego sprzętu do napawania [1,2,4,8,31,32,45,49,58].

3.2.2. Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną

Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną polega na stapianiu ciepłem łuku elektrycznego materiału elektrody oraz materiału podłoża, w rezultacie czego powstaje powłoka metaliczna o wymaganych właściwościach (rys.3.5.) [8,32,45]. Cechą tego procesu jest możliwość nakładania materiału identycznego z podłożem lub o całkowicie odmiennym składzie chemicznym i właściwościach użytkowych [58].



Rys. 3.5. Napawanie łukowe elektrodą otuloną [32]

Wysoka temperatura łuku, dochodząca do 6000°C , nadtopia podłoże w takim stopniu, że udział materiału podłoża w napoinie jest dość duży i mieści się w granicach $10 \div 40\%$ w zależności od techniki i parametrów napawania. Z tego powodu dopiero trzecia warstwa powłoki uzyskuje wymagany skład chemiczny określony recepturą elektrody otulonej. W jednym przejściu możliwe jest ułożenie warstwy o grubości $1 \div 5$ mm, a wydajność procesu wynosi $1 \div 5$ kg/h. Napawać można prądem przemiennym lub prądem stałym biegunowością dodatnią lub ujemną. Elektrody otulone do napawania wykonuje się przeważnie jako średnio- lub grubootulone rutyłowe, zasadowe, z rdzeniem pełnym lub proszkowym. Elektrody

z rdzeniem pełnym mają średnice 2,5÷6 mm, natomiast elektrody z rdzeniem proszkowym 4÷11 mm. Wprowadzenie elektrod proszkowych rozszerza możliwości regulacji składu napoiny, a dodatkowo dzięki większej oporności elektrycznej rdzenia jest możliwy ponad 100% wzrost wydajności w porównaniu do napawania elektrodami otulonymi z rdzeniem pełnym i znaczne skrócenie czasu stapienia [8,32,45,58].

Ponieważ proces napawania prowadzony jest wyłącznie ręcznie, jakość napawanych warstw w dużej mierze zależy od zdolności manualnych spawacza [32,49].

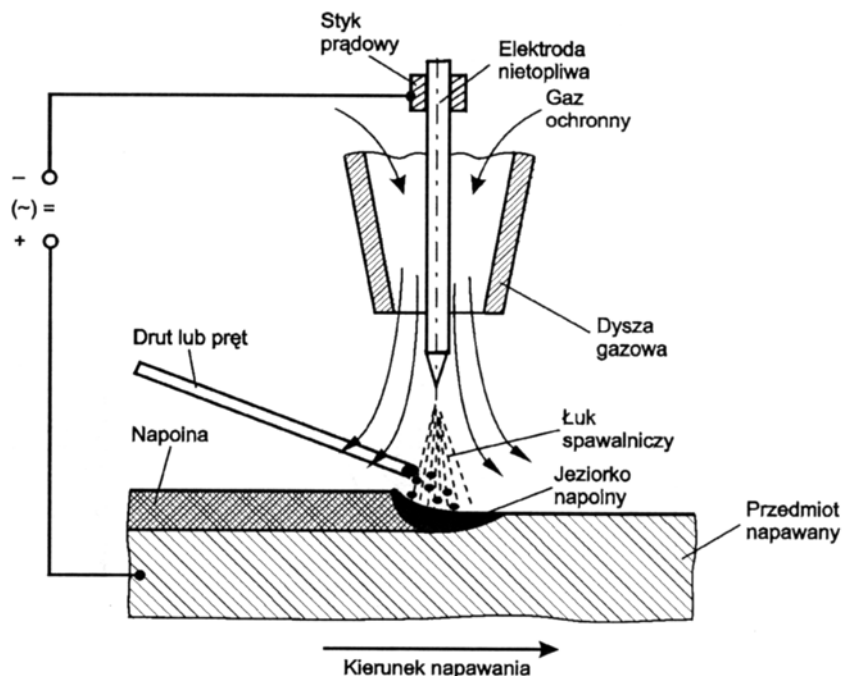
Zaletami ręcznego napawania elektrodami otulonymi są niskie koszty wyposażenia stanowiska, możliwość uzyskania warstw o różnych właściwościach, napawania w różnych pozycjach (również przymusowych) oraz w warunkach polowych. Napawać ręcznie elektrodami otulonymi można zarówno drobne jak i duże elementy, także o skomplikowanym kształcie i utrudnionym dostępie do napawanych miejsc.

Wadą metody jest przede wszystkim niska wydajność napawania, ponieważ proces prowadzony jest wyłącznie ręcznie, a tym samym występują czasy pomocnicze na wymianę elektrod i czyszczenie napoiny z żużla. Należy się także liczyć z możliwością powstania porów i pęcherzy [2,4,45,49].

3.2.3. Napawanie metodą TIG

Napawanie metodą TIG (zwane również napawaniem GTA) jest to napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej, polegające na wprowadzeniu materiału dodatkowego do obszaru łuku jarzącego się między nietopliwą elektrodą wolframową a napawanym podłożem, w osłonie gazu obojętnego. Materiał dodatkowy ulega stopieniu i tworzy napoinę na nadtopionej powierzchni przedmiotu (rys.3.6.). Materiał dodatkowy można podawać w postaci drutu, pręta pełnego lub proszkowego, albo taśmy, proszku stapianych bezpośrednio na napawanym podłożu [8,31,32,49]. Gazami ochronnymi w tym procesie są zasadniczo argon i hel, a niekiedy w celu podwyższenia temperatury łuku stosuje się dodatek wodoru lub azotu w ilości 5÷10% (dodatek wodoru jest jednak niedopuszczalny przy spawaniu aluminium, miedzi i ich stopów). Elektroda nietopliwa wykonana jest z wolframu, a dla zwiększenia trwałości, łatwości zajarzenia i stabilności jarzenia się łuku stosuje się dodatki toru, cyrkonu, lantanu,

ceru, czy itru. Napawanie metodą TIG prowadzi się zwykle prądem stałym z biegunowością ujemną na elektrodzie, jedynie napawanie aluminium, magnezu lub ich stopów wykonuje się z biegunowością dodatnią lub prądem przemiennym [31,32].



Rys. 3.6. Napawanie w osłonie gazów ochronnych elektrodą nietopliwą [32]

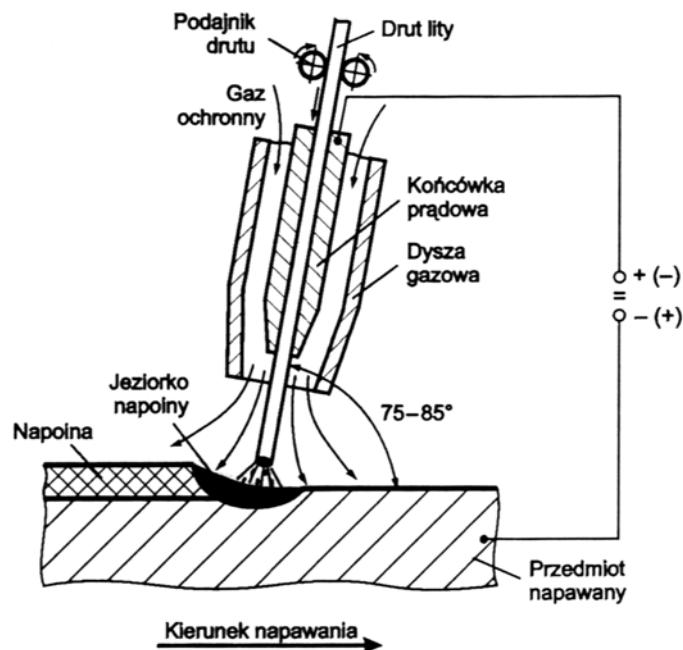
Stosowanie prądu stałego zapewnia dużą stabilność łuku, łatwość regulacji parametrów napawania i mały udział materiału rodzimego w napoinie, rzędu 5÷15% przy wydajności 0,5÷2 kg/h dla napawania ręcznego [31,32,49]. Zastosowanie techniki napawania gorącym drutem nagrzewanym oporowo ze spawalniczego źródła prądu powoduje zwiększenie wydajności napawania do 5÷8 kg/h przy równoczesnym zmniejszeniu przetopienia podłoża, a tym samym mniejszego jej udziału w napoinie. Dzięki doskonałej osłonie łuku gazem obojętnym metal napoiny ma bardzo wysoką jakość, a w jednym przejściu można ułożyć warstwę o grubości 1,5÷5,0 mm [31,32,45,49].

Metodą TIG napawa się zasadniczo w pozycji podolnej lub przy pochyleniu powierzchni napawanej pod kątem mniejszym niż 30°. Proces może być prowadzony ręcznie, półautomatycznie lub automatycznie. Możliwe jest napawanie przedmiotów wykonanych ze stali, żeliwa, staliwa, stopów miedzi i stopów aluminium. Napoiny układa się ze stali wysokostopowych, ołowiu, stopów niklu, kobaltu, miedzi, aluminium [8,45] oraz cermetali [31,32].

Zaletami napawania metodą TIG jest obojętny proces metalurgiczny, wąska strefa wpływu ciepła, mały stopień wymieszania, brak rozprysków i żużła. Wadami są natomiast: konieczność napawania w pomieszczeniach zamkniętych, oraz mała wydajność (szczególnie dla procesu wykonywanego ręcznie) [49].

3.2.4. Napawanie metodą MIG

Napawanie metodą MIG (zwane również napawaniem GMA) polega na tym, że jarzący się łuk pomiędzy elektrodą topliwą a napawanym przedmiotem w osłonie gazu obojętnego stapia materiały elektrody i podłoża, tworząc napoinę - rys. 3.7.



Rys. 3.7. Proces napawania metodą MIG/MAG drutem litym techniką w prawo [32]

Gazami ochronnymi w metodzie MIG osłaniającymi dokładnie łuk i jezioro spawalnicze przed dostępem gazów z atmosfery, są: argon, hel lub ich mieszanki. Do napawania stosuje się druty pełne o średnicy w granicach 0,5÷2,4 mm oraz druty z rdzeniem proszkowym o średnicy od 1,2 do 4,8 mm. Napawanie może być przeprowadzone półautomatycznie lub automatycznie [31,32].

Przy napawaniu prądem stałym z biegunowością dodatnią i natryskowym przenoszeniu metalu przez łuk uzyskuje się wydajność napawania w granicach 4 do 10 kg/h. Wadą tego rodzaju procesu jest wysoki udział metalu podłoża w napoinie, który wynosi 20÷40%.

Ograniczenie przetopienia metalu podłoża nawet poniżej 5% można uzyskać przy napawaniu cienkimi drutami o średnicy 0,5 do 1,2 mm tzw. łukiem

zwarciovym, tj. krótkim łukiem z grubokropelkowym przenoszeniem metalu przez łuk. Napawanie łukiem zwarciovym ogranicza naprężenia i odkształcenia spawalnicze, a także umożliwia prowadzenie procesu w pozycjach przymusowych, jednakże wydajność napawania nie jest zbyt duża i nie przekracza $2\div3,5$ kg/h [8,32,45,58]. Napawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów umożliwia uzyskanie warstw o grubości $0,5\div6$ mm w jednym przejściu [8,45], chociaż [32] podaje nawet zakres $0,5\div10$ mm.

Napawanie metodą MIG można prowadzić z licznymi modyfikacjami. Jedną z nich pozwalającą na jeszcze większe ograniczenie nagrzania podłoża, a tym samym odkształceń i naprężeń spawalniczych, jest napawanie elektrowibracyjne (wibrostrykowe). Specjalna konstrukcja głowicy powoduje wibrację drutu wzdłuż jego osi z częstotliwością $50\div100$ Hz przy amplitudzie równej w przybliżeniu średnicy drutu. Sposób ten jest często wykorzystywany przy napawaniu cienkich powłok o grubości $0,5\div3$ mm na obrotowe części maszyn [8,45,49,58]. Obecnie ten rodzaj napawania jest stosowany sporadycznie [44,49]. Podobny efekt jak dla napawania elektrowibracyjnego można osiągnąć przez zastosowanie napawania impulsowego. Poprzez odpowiednią regulację natężenia prądu i czasów impulsów można racjonalnie dozować ciepło i precyzyjnie przenosić metal przez łuk, dzięki czemu występuje mniejsze przetopienie podłoża i zmniejsza się udział podłoża w napoinie; łatwiejsze też jest napawanie w pozycjach przymusowych [32,58]. W przypadku napawania grubych powłok na dużych powierzchniach można zastosować dodatkowy drut wprowadzany w obszar łuku z ewentualnym podgrzewaniem oporowym (gorący drut); wydajność procesu wrasta wówczas nawet do $20\div30$ kg/h [8,32,49,58].

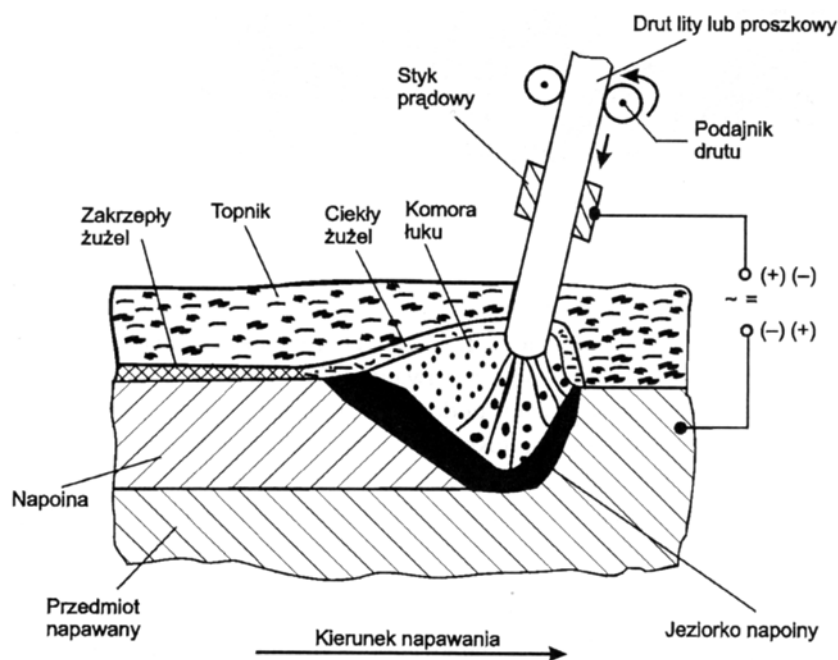
Napawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów umożliwia układanie powłok na części maszyn i urządzeń o praktycznie dowolnym kształcie i wielkości, wykonanych ze stali węglowych i stopowych, staliwa, żeliw stopowych, stopów niklu, tytanu, miedzi i aluminium. Napawać można warstwy ze stali niskostopowych, wysokostopowych chromowych, chromowo-niklowych, stopów niklu, kobaltu, miedzi i aluminium [8,32,45,58].

Zaletami tej metody napawania jest duża wydajność napawania w porównaniu z innymi metodami napawania, możliwość napawania we wszystkich pozycjach, brak żużla. Do wad metody należy zaliczyć: możliwość powstania porów

i pęcherzy gazowych oraz stosunkowo dużą ilość rozprysków, konieczność napawania na stanowiskach zabezpieczonych przed przeciągami i podmuchami powietrza [49].

3.2.5. Napawanie łukiem krytym

W procesie napawania łukiem krytym ciepło łuku elektrycznego jarzącego się między elektrodą topliwą a napawanym przedmiotem, pod ochronną warstwą topnika, stopia materiał elektrody i warstwę przypowierzchniową przedmiotu, które razem tworzą napoinę - rys. 3.8.



Rys. 3.8. Napawanie łukiem krytym [32]

Łukiem krytym napawa się zasadniczo automatycznie, jedynie w pozycji podolnej. Elektroda, odwijana z bębna automatu spawalniczego, jest podawana w sposób ciągły ze stałą prędkością w obszar napawania i może być wykonana w postaci drutu pełnego lub proszkowego, taśmy pełnej albo proszkowej.

Topnik ochrania łuk i jezioro spawalnicze, rafinuje ciekły metal napoiny, reguluje jej skład chemiczny, stabilizuje łuk, zmniejsza prędkość odprowadzania ciepła oraz wpływa na formowanie lica napoiny.

Dokładna osłona jeziora spawalniczego warstwą topnika pomaga w otrzymaniu napoiny o wysokiej jakości, gładkim i równym licu, a stosowanie dużych natężeń prądu pozwala osiągnąć jedne z najwyższych wydajności napawania, nawet powyżej 40kg/h. Jednocześnie duża energia liniowa napawania

łukiem krytym sprawia, że udział materiału podłoża w napoinie przekraczać może 30÷40% i często konieczne jest nakładanie minimum dwóch a nawet trzech warstw, aby zapewnić wymagany skład chemiczny napoiny [8,31,32,45,58].

Znaczne wartości energii liniowej przy napawaniu przedmiotów o zbyt małym przekroju i sztywności mogą spowodować ich deformacje. Dlatego też napawanie łukiem krytym stosowane jest wg [58] głównie do regeneracji dużych elementów o grubości powyżej 30 mm lub średnicy przedmiotów obrotowych powyżej 100 mm, a wg [8,32] można napawać przedmioty płaskie o grubości 10÷30 mm i obrotowe o średnicy 50÷60 mm.

Napawanie łukiem krytym może być przeprowadzane z wieloma modyfikacjami w stosunku do podstawowej z jedną elektrodą. Należy do nich między innymi wprawianie głowicy spawalniczej w ruch wahadłowy, poprzeczny do kierunku napawania. W ten sposób obniżyć można głębokość wtopienia w materiał podłoża, zużycie topnika, przy równoczesnym zwiększeniu wydajności procesu. Innymi metodami mającymi na celu zwiększenie wydajności napawania łukiem krytym jest napawanie z wypełniaczem, z dodatkowym drutem elektrodowym (zimnym lub gorącym) lub też napawanie wieloelektrodowe [8,31,32,45,58].

Typowa grubość warstwy uzyskanej w jednym przejściu wynosi 2÷8 mm [8,45,58], chociaż w tej samej publikacji [45] i w [32] można znaleźć informację o możliwości uzyskania warstw ponad 100 mm.

Napawanie łukiem krytym wykorzystuje się do nanoszenia warstw ze stali niskowęglowych, niskostopowych, wysokostopowych, stali specjalnych, stopów niklu, kobaltu, chromu, żeliw wysokochromowych oraz niektórych stopów miedzi i aluminium [8,32,49].

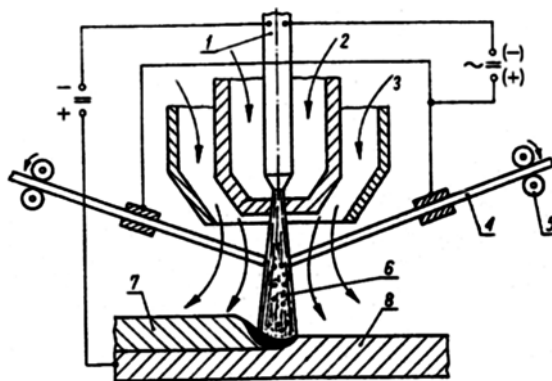
Zaletami napawania łukiem krytym są: duża wydajność napawania w porównaniu z innymi metodami napawania, duża czystość metalurgiczna napoiny, bezpieczne warunki pracy (niewidoczny łuk spawalniczy), możliwy wysoki stopień mechanizacji. Do wad procesu należy zaliczyć konieczność prowadzenia napawania w pozycji podolnej (najlepszej ze względu na dużą objętość jeziora spawalniczego oraz zsypywanie się topnika) ewentualnie naściennej (z zastosowaniem zabezpieczenia przed zsypywaniem się topnika), stosunkowo duży udział materiału rodzimego w napoinie, brak możliwości obserwowania formowania napoiny podczas napawania oraz drogie urządzenia i oprzyrządowania do napawania [4,49].

3.2.6. Napawanie plazmowe

Napawanie plazmowe polega na stapianiu w łuku plazmowym o bardzo wysokiej temperaturze, rzędu 15 000÷20 000 K, materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu, który wraz z nieznacznie nadtopionym materiałem podłoża tworzy napoinę [31,32,49].

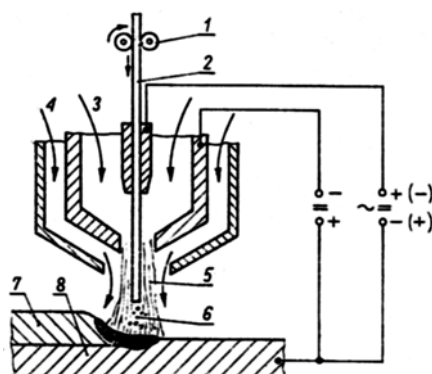
Gazami plazmotwórczymi są argon, hel lub ich mieszanki. Gazem ochronnym jest argon, mieszanki argonu z wodorem lub helu z wodorem. Napawanie może być wykonane ręcznie, półautomatycznie lub automatycznie w pozycji podolnej lub w pozycjach przymusowych [31,32].

Jeżeli jako materiały dodatkowe stosowane są druty lite i proszkowe, można spotkać się z odmianami napawania plazmowego z tzw. zimnym lub gorącym drutem (nagrzewanym oporowo) – rys. 3.9 oraz napawaniem plazmowym MIG – rys. 3.10.



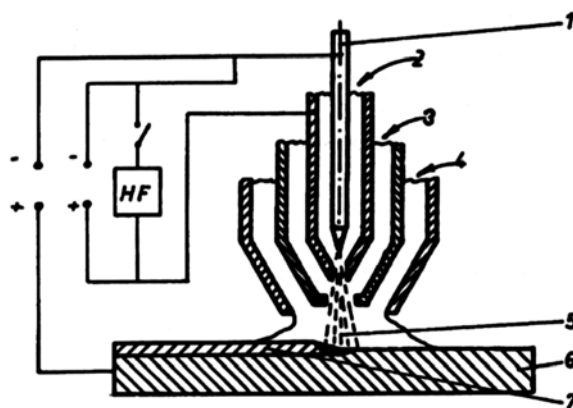
Rys. 3.9. Napawanie plazmowe gorącym drutem:

1 – elektroda wolframowa, 2 – gaz plazmowy, 3 – gaz ochronny, 4 – drut, 5 – podajnik, 6 – łuk plazmowy, 7 – napoina, 8 – podłoże [8]



Rys. 3.10. Schemat napawania plazmowego MIG:

1 – podajnik, 2 – drut, 3 – gaz plazmowy, 4 – gaz ochronny, 5 – łuk plazmowy, 6 – łuk MIG, 7 – napoina, 8 – podłoże [8]



Rys. 3.11. Schemat napawania plazmowego proszkowego:

1 – elektroda wolframowa, 2 – gaz plazmowy, 3 – gaz transportujący wraz z proszkiem, 4 – gaz ochronny, 5 – łuk plazmowy z przetopionym proszkiem, 6 - materiał podłoża, 7 – napoina [58]

Najpowszechniej stosowaną techniką napawania plazmowego jest napawanie plazmowe proszkowe (rys. 3.11), w którym stosuje się granulowane proszki metaliczne i ceramiczne. Polega ono na stapianiu w łuku plazmowym proszku o ziarnistości $0,06 \div 0,3$ mm i przenoszeniu go na nadtopione podłoże. Stopiony proszek po zakrzepnięciu tworzy napoinę o minimalnym udziale podłoża, nawet poniżej 5%. Sprawność stapiania proszku, w zależności od jego składu chemicznego, wynosi $90 \div 95\%$. Dzięki dużej stabilności łuku plazmowego możliwe jest napawanie w szerokim zakresie zmian natężenia prądu. Ze wzrostem natężenia prądu wzrasta wydajność napawania, ale również i przetopienie materiału podłoża, a tym samym wzrasta jego udział w napoinie. Gładkie i równe lico napoin umożliwia w niektórych przypadkach zrezygnowanie z obróbki mechanicznej [8,31,32,45,58].

Wydajność napawania w zależności od zastosowanej techniki napawania wynosi od 0,5 do 15 kg/h [8,45], a nawet wg [31,32] dla palników plazmowych o dużej mocy - 22 kg/h. Grubość powłok wykonanych w jednym przejściu zawiera się w zakresie od 0,25 do 7 mm. Mała ilość ciepła wprowadzona do napawanego przedmiotu umożliwia napawanie drobnych elementów, nawet o grubości rzędu $3 \div 5$ mm lub średnicy $20 \div 50$ mm [8,45].

Wykorzystując napawanie plazmowe można wykonać powłoki z dowolnych materiałów, między innymi ze stopów na osnowie kobaltu, niklu, żelaza, chromu, molibdenu, cyrkonu, miedzi i cyny, z udziałem metali trudno topliwych, a także

materiałów ceramicznych. Możliwe jest napawanie przedmiotów płaskich i obrotowych wykonanych ze stali węglowych, stopowych, odpornych na korozję, staliwa oraz z niektórych gatunków żeliw [8,31,32,45,58].

Do zalet napawania plazmowego należy zaliczyć dużą czystość metalurgiczną napoin, szeroki zakres grubości układanych warstw w jednym przejściu, małą głębokość wtopienia, niski udział materiału rodzimego, dużą gładkość napawanej warstwy (głębokość nierówności zazwyczaj nie przekracza 0,5 mm), a tym samym niewielkie naddatki na obróbkę mechaniczną [2,4,45].

Wadami procesu są bardzo wysokie koszty urządzenia do napawania i drogie materiały dodatkowe. Napawanie plazmowe proszkowe musi być prowadzone w pozycji podolnej. Ponadto autorzy [2,4,45] uważają, że ta odmiana napawania plazmowego charakteryzuje się małą wydajnością stapiania.

3.2.7. Zestawienie podstawowych parametrów technologicznych i użytkowych metod napawania

W tablicy 3.1 zestawiono charakterystyki omówionych wyżej metod napawania. Wartości użytkowych parametrów zawartych w tej tablicy mają jedynie charakter orientacyjny, gdyż informacje podane w [1,2,3,4,8,31,32,45,49,58] często znacznie różnią się między sobą i wynikają z uwzględnienia w tych źródłach możliwości wykorzystania dodatkowego specjalistycznego wyposażenia mającego wpływ na wymiary geometryczne napoiny i parametry wydajnościowe.

Tablica 3.1 Charakterystyki metod napawania [58]

Metoda napawania	Grubość napawanej warstwy [mm]	Wydajność procesu [kg/h]	Udział materiału podłoża w napoinie nałożonej w jednym przejściu [%]
Gazowe	0,05 – 3,5	0,5 – 5	2 – 10
Elektrodą otuloną	1 – 5	1 – 5	10 – 40
TIG	1,5 – 5	1 – 8	5 – 10
MIG	0,5 – 6	2 – 30	5 – 40
Łukiem krytym	2 – 8	2 – 40	10 – 40
Plazmowe	0,2 – 15	0,5 – 40	5 – 15

Najbardziej perspektywiczną metodą napawania brązem z przedstawionych powyżej wydaje się metoda MIG. Cechuje ją duża wydajność procesu napawania w stosunku do napawania ręcznego elektrodą otuloną, gazowego i TIG.

Zwiększenie wydajności dwu ostatnich metod wymaga wzrostu kosztów na dodatkowe wyposażenie. Napawanie łukiem krytym i plazmowe proszkowe można prowadzić jedynie w pozycji podolnej. Obie metody w porównaniu do napawania metodą MIG wymagają kosztownych urządzeń i oprzyrządowania (szczególnie napawanie plazmowe). Napawanie łukiem krytym ze względu na wprowadzanie dużych ilości ciepła i niebezpieczeństwo deformacji można wykonywać jedynie na przedmiotach o dużych przekrojach. Wydajność napawania plazmowego do napawania metodą MIG dla małego udziału podłoża w napoinie jest porównywalna. Zwiększenie wydajności napawania plazmowego można uzyskać przez wzrost natężenia prądu, wówczas jednak wzrasta przetopienie materiału podłoża i jego udział w napoinie [58]. Materiał dodatkowy w postaci proszku dla napawania plazmowego brązem ma również wyższą cenę w stosunku do drutu litego do napawania metodą MIG. Powyższe argumenty oraz uwzględnienie wad i zalet omówionych wcześniej metod przemawiają za wyborem napawania elektrodą topliwą w osłonie gazów jako najbardziej ekonomicznej i uniwersalnej metody napawania brązem.

3.3. Technologia przygotowania powierzchni przeznaczonych do napawania metodą MIG/MAG

Przygotowanie powierzchni jest operacją poprzedzającą napawanie regeneracyjne lub technologiczne. Napawane powierzchnie powinny być metalicznie czyste, pozbawione wad, w szczególności pęknięć, które mogą rozwinąć się w głąb napawanego materiału pod wpływem naprężeń spawalniczych [32] oraz późniejszych obciążeń eksploatacyjnych w trakcie użytkowania napawanego elementu. Napawanie powierzchni z nieusuniętymi pęknięciami powoduje jedynie ich zakrycie i w konsekwencji może być przyczyną poważnych awarii.

Operacje przygotowania powierzchni obejmują: obróbkę powierzchni, oczyszczenie oraz odtłuszczenie. Niekiedy zachodzi również potrzeba wcześniejszego wykonania operacji prostowania całego elementu lub jego fragmentu (np. czopa wału).

Obróbkę powierzchni przeprowadza się ze względu na znaczne różnice wymiarowe zużytej powierzchni oraz w celu usunięcia wad zewnętrznych [39].

Napawanie regeneracyjne służące do wyrównywania ubytków części powierzchni nośnej napawanego przedmiotu wymaga wykonania podcięcia mieszczącego napoinę. Głębsze podcięcia należy przewidzieć dla napawania MIG/MAG łukiem natryskowym ze względu na większy stopień wymieszania metalu podłoża z napoiną i konieczność ułożenia co najmniej 2 lub 3 warstw napoin. Napawanie łukiem zwarciovym lub pulsującym powoduje mniejsze wymieszanie metalu podłoża z napawaną warstwą, stąd też możliwe jest uzyskanie odpowiedniego składu chemicznego już w pierwszej warstwie, a tym samym wykonanie podcięcia o mniejszej głębokości [32].

Określenie grubości napawanej warstwy powinno uwzględnić także naddatek na obróbkę po napawaniu; warstwa napawana o zbyt małej grubości podczas obróbki wykańczającej może mieć niskie własności wytrzymałościowe i jest skłonna do pęknięcia przy obciążeniach gnących. Poza tym należy zwrócić uwagę na dopuszczalne zmniejszenie średnicy lub przekroju z zachowaniem niezbędnego zapasu trwałości elementu [39]. Minimalną grubość napawanych przedmiotów [32] uzależnia od techniki i energii liniowej napawania MIG/MAG i zaleca napawanie warstw na elementy o grubości co najmniej 6÷10 mm.

Jeżeli na powierzchni występuje siatka pęknięć, to należy przez obróbkę skrawaniem usunąć warstwę na pełną głębokość tych pęknięć. Niewykonanie tego zabiegu i napawanie popękanej powierzchni może być przyczyną, jak wspomniano to wcześniej, pogłębiania pęknięć spowodowanych naprężeniami spawalniczymi. Napawanie popękanej powierzchni [39] dopuszcza tylko wówczas, gdy istnieje gwarancja uzyskania wtopienia pierwszej warstwy na głębokość pęknięcia.

Usunięcie farb i innych zanieczyszczeń stałych w trakcie napawania regeneracyjnego poprzez obróbkę mechaniczną można zastąpić oczyszczaniem do metalicznego połysku za pomocą śrutowania, piaskownia oraz płomienia acetylenowo-tlenowego. Zanieczyszczenia tłuste usuwa się gorącą wodą lub stałym roztworem sody z zastosowaniem urządzeń myjących. Miejscowe dokładne odtłuszczenie przeprowadza się używając ropy naftowej lub nafty oraz innych rozpuszczalników. Wytarcie powierzchni szmatami może być mało skuteczne, zwłaszcza gdy smar i inne zanieczyszczenia tłuszczowe pozostają w zagłębieniach lub narożach. Takie zanieczyszczenia usuwa się przy użyciu palników gazowych. Pyły i rozpryski spawalnicze usuwa się przy użyciu szczotki stalowej, papieru

ściernego i czyściwa. W miejscach z wąskim dostępem pyły i rozpryski usuwa się sprężonym powietrzem lub przez piaskowanie.

Podczas napawania może zachodzić potrzeba ochrony sąsiednich powierzchni przed odpryskami, względnie nawet przed położeniem zbędnego ściegu. W tym celu stosuje się znakowanie powierzchni chronionych, nakładanie ochron oraz wypełnianie otworów odpowiednimi wkładkami. Wkładki powinny wystawać na taką wysokość, aby umożliwić proces napawania, a jednocześnie zapewnić możliwość ich usunięcia po zakończeniu napawania. Wkładki grafitowe można wykonać z mieszaniny sproszkowanego grafitu i szkła wodnego. Wypełnione ubytki masą grafitową należy następnie wygrzać w temperaturze $100\div 200^{\circ}\text{C}$ w ciągu $2\div 4$ godzin.

Przed odpryskami powierzchnie zabezpiecza się przez powlekanie szkłem wodnym przy użyciu pędzla i następne osuszenie pokrytych powierzchni. Zamiast szkła wodnego można stosować inne środki niepalne, jak np.: mleczko wapienne lub roztwór wodny kredy, które stosuje się bezpośrednio przed napawaniem [39].

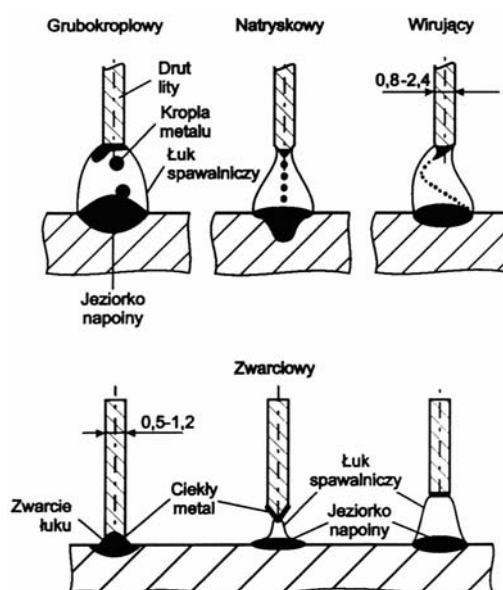
Obecnie przed odpryskami można zabezpieczyć powierzchnie przez zastosowanie różnego rodzaju preparatów silikonowych w postaci past lub aerozoli; preparaty te nakłada się na ochraniane powierzchnie przed rozpoczęciem napawania.

4. Technologiczne parametry napawania brązem elektrodą topliwą w osłonie gazów mające wpływ na jakość, geometrię i wydajność procesu napawania

Optymalne parametry napawania metodą MIG/MAG są ustalane w podobny sposób jak dla spawania tą metodą [32,43].

Omówienie doboru technologicznych parametrów napawania w tym rozdziale dotyczy jedynie drutów litych, ze względu niewykorzystywanie drutów proszkowych przeznaczonych do napawania brązem w części badawczej pracy.

Proces napawania prowadzi się zazwyczaj z biegunowością dodatnią na elektrodzie. Zastosowanie takiej biegunowości oraz małych natężeń prądu i wysokiego napięcia (wykluczającego zwarcia) powoduje, że w osłonie w osłonie gazów obojętnych drut lity stapia się grubokroplowo bez rozprysku – rys 4.1. Odrywanie się kropli od końca drutu jest utrudnione i przenoszone są one przez łuk nieosiowo [32,49].



Rys. 4.1. Sposoby przenoszenia metalu w łuku przy napawaniu metodą MIG/MAG drutem litym oraz kształty napoin [32]

Przy zwiększeniu natężenia prądu powyżej wartości krytycznej, w osłonach gazów obojętnych (lub z dodatkiem co najwyżej 20÷30% CO₂ lub ok. 2÷5% O₂), charakter przenoszenia metalu w łuku zmienia się z grubokroplowego na drobnokroplowy, natryskowy rys. 4.1, tabl. 4.1. Udział materiału podłoża w napoinie

przy natryskowym przenoszeniu metalu w łuku jest duży i wynosi 20-40%, przy wydajności od 4 do ponad 20 kg/h [32].

Tablica 4.1 Minimalne wartości natężenia prądu krytycznego między grubokropelkowym a natryskowym przenoszeniem metalu w łuku przy napawaniu brązem krzemowym drutem litym [32]

Rodzaj materiału drutu litego	Średnica drutu [mm]	Rodzaj gazu ochronnego	Minimalne natężenie prądu krytycznego [A]
Brązy krzemowe	0,9	100% Ar	165
	1,1		205
	1,6		270

Zwarciove przenoszenie metalu w łuku MIG/MAG stosowane jest tylko przy napawaniu półautomatycznym prądem stałym z biegunowością dodatnią drutami litymi o średnicy 0,5÷1,2 mm. Ten sposób przenoszenia metalu w łuku występuje przy natężeniach prądu napawania poniżej krytycznego i znacznie niższym napięciu łuku niż przy kropłowym przenoszeniu metalu. Metal jest przenoszony z elektrody topliwej do jeziora napoiny tylko w czasie, gdy stopiony koniec drutu jest zwarty z powierzchnią jeziora napoiny. Nie występuje swobodne przenoszenie kropelek metalu przez łuk, jak ma to miejsce przy grubokropłowym czy natryskowym przenoszeniu metalu w łuku. Elektroda zwiera się z ciekłym jeziorkiem napoiny ze stałą częstotliwością od 20 do ponad 200 zwarć na sekundę, rys. 4.1. Napawanie cienkimi drutami o średnicy 0,5÷1,2 łukiem zwarciovym (krótkim łukiem z grubokropłowym przenoszeniem metalu przez łuk) zapewnia minimalny udział metalu podłoża w napoinie, nawet poniżej 5%, możliwość napawania w pozycjach przymusowych oraz małe naprężenia i odkształcenia spawalnicze. Wydajność napawania jest jednakże niewiele większa niż przy napawaniu łukowym ręcznym elektrodami otulonymi i nie przekracza 2÷3,5 kg/h, a jednocześnie powstaje znacznie większy rozprysk metalu niż w przypadku łuku natryskowego [32,58].

Mechanizm przenoszenia metalu w łuku zależy od parametrów prądowych napawania, rodzaju osłony gazowej, składu chemicznego i średnicy drutu elektrodowego oraz długości wolnego wylotu elektrody [32,49]. W trakcie natryskowego przenoszenia metalu w łuku kropelki ciekłego metalu drutu są

skierowane zawsze osiowo (wzdłuż osi drutu), niezależnie od jego położenia, aż do osiągnięcia przez prąd napawania drugiego prądu krytycznego. Przy tym natężeniu prądu koniec drutu jest wyginany przez siły elektromagnetyczne łuku i kropelki metalu są przenoszone w kierunku jeziora napoiny ruchem wirowym po torze spiralnym, zapewniając wysokie wydajności napawania i płaskie, równe lico ściegu napoiny o dużej szerokości, rys. 4.1 [32].

Podstawowymi nastawialnymi parametrami napawania elektrodą topliwą w osłonie gazowej są:

- prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} [m/min, mm/s]),
- napięcie łuku U_n [V],
- prędkość napawania v_n [m/min, mm/s],
- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego Q [l/min],
- rodzaj i średnica drutu elektrodowego $\varnothing$ [mm],
- długość wolnego wylotu elektrody H [mm],
- biegunowość i rodzaj prądu,
- kąt pochylenia elektrody względem przedmiotu napawanego α [°],
- technika układania ściegów (np. podziałka napawania, parametry ruchu wahadłowego elektrody - częstotliwość, amplituda, kształt toru),
- indukcyjność obwodu spawalniczego [32,49,70].

4.1 Prędkość podawania drutu elektrodowego

Zmiana prędkości podawania drutu elektrodowego wpływa na wartość natężenia prądu. Zwiększenie prędkości podawania drutu przy stałych pozostałych parametrach napawania powoduje zwiększenie natężenia prądu napawania. Prędkość stapiania jest równa prędkości podawania drutu elektrodowego [32,70]. Nadmierne obniżenie prędkości podawania drutu elektrodowego powoduje zakłócenie procesu napawania i nieciągłość napoiny [16,70].

Zwiększenie natężenia prądu przy napawaniu MIG/MAG drutem litym powoduje większą wydajność napawania, równocześnie wzrasta znacznie wielkość jeziora napoiny i głębokość przetopienia metalu podłoża i wymieszanie stopionego materiału podłoża ze stopiwem [32,70]. Ścieg napoiny z płaskiego o małym przekroju staje się coraz bardziej wypukły, o grzybkowatym kształcie, pojawiają się nacieki lica napoiny, a przejście lica napoiny do napawanego materiału jest bardzo

ostre, co powoduje konieczność stosowania dużej zakładki ściegów. W efekcie udział metalu podłoża w napoinie z 30÷35% może nawet wzrosnąć do ponad 40%. Odpowiednia osłona tak dużego jeziorka napoiny przed dostępem powietrza wymaga zastosowania dodatkowej osłony gazowej wleczonej, szczególnie w przypadku napawania stopami na osnowie niklu, miedzi czy kobaltu. Duże gęstości prądu, ok. 600÷700 A/mm², oraz zwiększony wolny wylot drutu powoduje zwiększenie wydajności napawania, nawet do 20 kg/h. Powyżej wartości krytycznej natężenia prądu, dla danej średnicy drutu, zmniejsza się wielkość kropeł, zwiększa częstotliwość ich przejścia i poprawia stabilność łuku. Przekroczenie drugiej wartości krytycznej natężenia prądu powoduje, że drobne krople przemieszczają się po torze spiralnym i znacznie poprawia się wydajność napawania - rys. 4.1. Głębokość przetopienia podłoża jest duża, a napawanie możliwe tylko w pozycji podolnej lub nabocznej [32]. Podwyższenie natężenia ponad ustalone granice wywołuje także przegrzanie napawanego elementu i odkształcenia termiczne. Zmniejszenie udziału materiału podłoża w napoinie można osiągnąć wobec tego przez napawanie prądem o stosunkowo niskim natężeniu [70].

4.2. Napięcie łuku

Napięcie łuku zależy od rodzaju stosowanej osłony gazowej. Wzrost napięcia łuku powoduje zwiększenie jego długości [49]. Dobór napięcia powinien uwzględniać rodzaju i średnicy drutu, pozycję napawania, długość wolnego wylotu elektrody oraz skład gazu ochronnego, tabl. 4.3 [32]. Według autora pracy [32] wzrost napięcia łuku przy napawaniu MIG/MAG drutem litym powoduje wyraźne zwiększenie szerokości ściegu napoiny i nieznaczne głębokości przetopienia metalu podłoża, maleje natomiast wysokość napoiny, czego efektem jest wzrost udziału metalu podłoża w napoinie. Natomiast według [70] napięcie w małym stopniu wpływa na zwiększenie głębokości wtopienia lub zmniejszenie odkształceń termicznych. Obniżenie napięcia dla poprawy warunków termicznych napawania, tj. zmniejszenia ilości wydzielonego ciepła, ograniczone jest warunkiem zapewnieniem pełnej stabilności łuku i na ogół sterowanie zjawiskami cieplnymi dokonywane jest przy pomocy zmian natężenia prądu.

Nadmierne napięcie łuku prowadzi do rozprysku, porowatości i podtopień lica napoiny, natomiast zbyt niskie powoduje, że pojawiają się nacieki lica napoiny [32,49]. Przy napawaniu MIG/MAG w pozycji podolnej zaleca się wyższe

napięcie łuku niż w pozycjach przymusowych. Mniejsze napięcie łuku jest wymagane przy napawaniu łukiem zwarciovym [32].

Napięcie może być różne przy pozostałych niezmiennych technologicznych parametrach napawania dla różnych spawalniczych źródeł prądu, gdyż zależy ono także od charakterystyki prądowo-napięciowej źródła prądu [49].

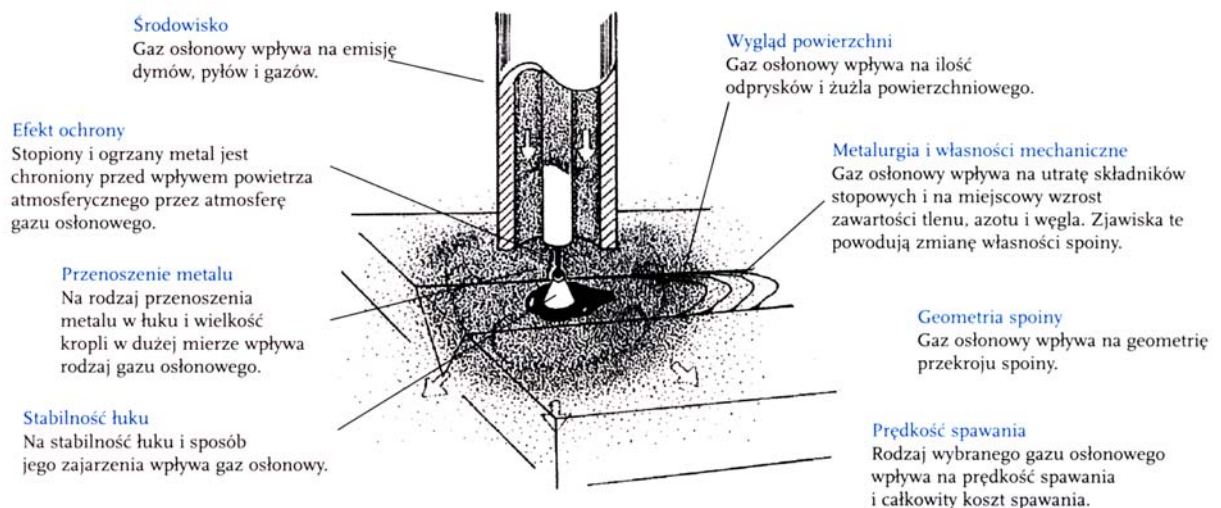
4.3. Prędkość napawania

Prędkość napawania zależy od natężenia prądu i napięcia łuku. Jej wartość dobiera się z uwzględnieniem wydajności i jakości formowania ściegów [32,49,70]. Nawet niewielka zmiana prędkości napawania automatycznego MIG/MAG wymaga korekty natężenia prądu lub napięcia łuku [32]. Zwiększenie prędkości napawania sprawia, że napoina jest węższa i maleje głębokość przetopienia podłoża, a dalszy wzrost prędkości powoduje pojawienie się znacznych nierówności lica napoiny i podtopień [32,49]. Zbyt duża prędkość napawania może być przyczyną zakłócenia przebiegu procesu napawania i nieciągłości napoiny [16]. Najwyższe prędkości napawania, bez podtopień wg [32], można uzyskać przez zwiększenie wolnego wylotu drutu i pochylenie palnika w kierunku napawania. Zmniejszanie prędkości napawania powoduje, że wzrasta głębokość przetopienia podłoża, szerokość i wysokość napoiny [32,49]. Nadmierne obniżenie prędkości napawania może być także źródłem przegrzania napawanego elementu. Z tego też powodu dobór prędkości napawania powinien uwzględniać podziałkę napawania [70].

4.4. Skład chemiczny gazu osłonowego

Rodzaj gazu osłonowego w metodzie MIG/MAG wpływa według [10,14,22,32,40,42,49,55] na (rys.4.3):

- efekt ochronny elektrody topliwej i obszaru napawania przed dostępem atmosfery,
- przenoszenie metalu w łuku i wielkość kropli,
- geometrię spoiny (napoiny),
- energię liniową (napięcie łuku),
- prędkość napawania,
- stabilność łuku i łatwość jego zajarzania,
- wygląd powierzchni (ilość odprysków i żużła powierzchniowego),
- procesy metalurgiczne,
- środowisko – poprzez emisję dymów, pyłów i gazów.

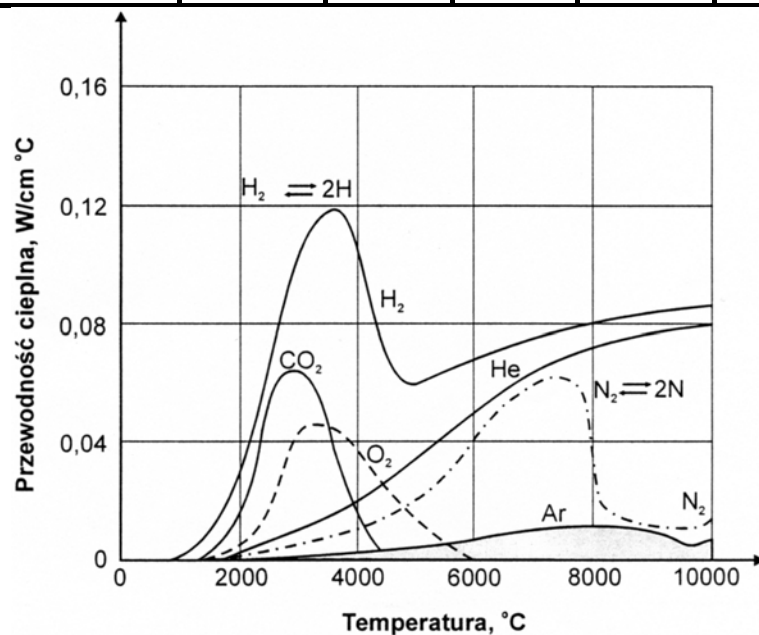


Rys. 4.3. Wpływ gazu osłonowego na proces spawania (napawania) metodą MIG/MAG [14]

Gazami ochronnymi stosowanymi w metodzie MIG są argon, hel lub ich mieszaniny. W metodzie MAG wykorzystuje się gazy aktywne lub ich mieszaniny z gazami obojętnymi. Podstawowymi właściwościami fizycznymi gazów ochronnych, decydującymi o wpływie na proces napawania, są: energia (potencjał) jonizacji, ciężar właściwy (tabl. 4.2) i przewodnictwo cieplne – rys 4.4 [10,32,49].

Tablica 4.2 Własności fizyczne gazów ochronnych, stosowanych do napawania MIG/MAG [10,32]

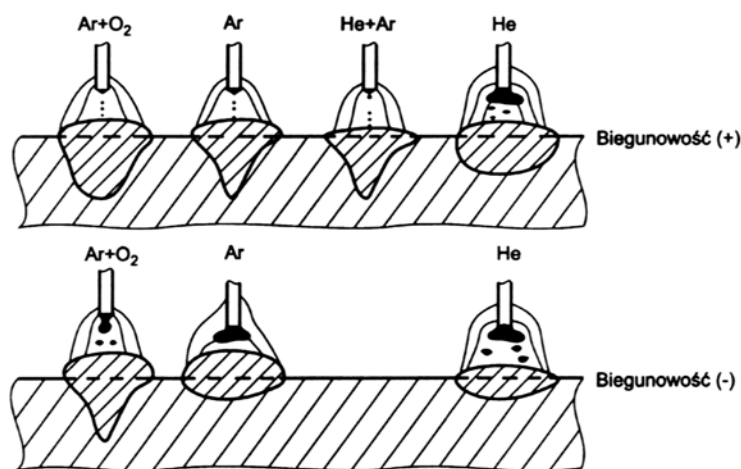
Podstawowe własności fizyczne gazów	Ar	He	CO ₂	O ₂	H ₂	N ₂
Gęstość w warunkach normalnych [kg/m ³]	1,78	0,178	1,98	1,43	0,09	1,29
Energia jonizacji [eV]	15,8	24,6	14,4	13,6	13,6	14,6
Energia dysocjacji [eV]	-	-	4,3	5,08	4,8	9,76
Ciepło właściwe c_p w warunkach normalnych [kJ/(kg·K)]	0,506	5,196	0,926	0,918	14,195	1,043
Temperatura wrzenia [°C]	-185,37	-268,9	-78,5	-182,97	-252,77	-195,8



Rys. 4.4. Przewodność cieplna składników gazów ochronnych [15,64]

Potencjał jonizacji gazu ochronnego wpływa na łatwość zajarzenia, utrzymania stabilnego łuku oraz wartość napięcia łuku. Zajarzenie łuku jest znacznie łatwiejsze i łuk jarzy się stabilniej w osłonie argonu niż w osłonie mieszanki argon + hel lub czystego helu. Stosowanie osłony argonowej wywołuje mniejsze zmiany napięcia łuku przy dużych zmianach długości łuku. Osłona helowa powoduje, że nawet niewielkie zmiany długości łuku wywołują znaczne zmiany napięcia łuku i w efekcie ilości wprowadzanego ciepła do napawanego przedmiotu. Wzrost napięcia łuku powoduje wzrost energii liniowej.

Przewodnictwo cieplne gazu ochronnego przesądza o kształcie ściegu napoiny. Wysoki współczynnik przewodnictwa cieplnego helu sprawia, że słup łuku jest szeroki. Ciepło wprowadzane jest na większym obszarze powodując powstanie, napoiny szerokiej, dość płytkiej, z gładkim, płaskim licem. Argon charakteryzuje się bardzo małym przewodnictwem cieplnym, tym samym łuk w osłonie argonu ma gorący i wąski rdzeń oraz znacznie chłodniejszą strefę zewnętrzną. Napoina wykonana w osłonie czystego argonu ma wąskie i głębokie wtopienie o kształcie palcowym lub kielichowym oraz posiada węższe lico niż w osłonie helu, rys. 4.5 [6,10,22,32,35,55].



Rys. 4.5. Wpływ rodzaju osłony gazowej i biegunowości prądu spawania metodą MIG/MAG na sposób przenoszenia metalu w łuku i kształt ściegu spoiny [30]

Według [32] zawartość helu do 25% w osłonie mieszanki argonowo-helowej w stosunku do czystego argonu sprawia, że napoina jest szersza i bardziej płaska, a głębokość przetopienia metalu podłoża mniejsza.

Gęstość gazu wpływa w znaczący sposób na skuteczność osłony gazowej. Gazy cięższe od powietrza takie jak argon czy dwutlenek węgla wymagają mniejszego przepływu gazu osłonowego w stosunku do gazów lżejszych, jak np. hel, dla zapewnienia właściwej osłony dla roztopionego metalu. Gęstość gazu ochronnego ma istotne znaczenie nie tylko ze względu na osłonę łuk spawalniczego, ale również po opuszczeniu przez gaz obszaru łuku, gdzie rozprzestrzeniający się gaz osłania nagrzewany metal przed łukiem i stygnącą spoinę za łukiem [10]. Wpływ gęstości gazu na dobór wydatku gazu osłonowego omówiono w punkcie 5.5.

Używane do napawania metodą MIG/MAG różne gazy osłonowe oraz ich zastosowania przedstawiono w tablicy 4.3.

Tablica 4.3 Gazy i mieszanki gazowe zalecane do napawania MIG/MAG drutami litymi i drutami proszkowymi z różnych metali i stopów [32]

Gaz ochronny	Działanie chemiczne	Rodzaj metalu napoiny
Ar	obojętny	Napawanie drutami litymi i drutami proszkowymi ze stopów niklu, kobaltu, miedzi i aluminium
He		Napawanie drutami litymi ze stopów aluminium, miedzi i magnezu; zapewniona duża energia liniowa napawania
Ar + 20-80% He		Napawanie drutami litymi i drutami proszkowymi ze stopów niklu, kobaltu, miedzi i aluminium
N ₂	redukujący	Napawanie drutami litymi ze stopów miedzi z dużą energią liniową
Ar + 20-25% N ₂		Napawanie drutami litymi ze stopów miedzi; duża energia liniowa łuku; lepsze jarzenie się łuku niż w osłonie 100% N ₂
Ar + 1-2% O ₂	słabo utleniający	Napawanie drutami litymi ze stali stopowych i stali wysokostopowych odpornych na korozję oraz drutami proszkowymi z rdzeniem metalicznym ze stopów kobaltu, niklu i żelaza
Ar + 3-5% O ₂	utleniający	
CO ₂	utleniający	Napawanie drutami proszkowymi topnikowym i niektórymi gatunkami drutów proszkowych z rdzeniem metalicznym zapewniającym stopiwo ze stali niskostopowych i wysokostopowych
Ar + 20-50% CO ₂		Napawanie drutami litymi i drutami proszkowymi topnikowym oraz niektórymi gatunkami drutów proszkowych z rdzeniem metalicznym zapewniającym stopiwo ze stali niskostopowych i wysokostopowych

Własności stopiwa (stopionego materiału dodatkowego) zależą od składu chemicznego stopiwa jaki materiał dodatkowy posiadał przed stopieniem oraz od warunków metalurgicznych i cieplnych w jakich przebiegał proces stapiania. Natomiast na własności napoiny ma także wpływ stopień wymieszania stopiwa z materiałem podłoża. Na skład chemiczny, strukturę, właściwości mechaniczne i korozyjne stopiwa oraz napoiny wpływa między innymi rodzaj zastosowanego gazu osłonowego. Rodzaj osłony gazowej (utleniająca, redukująca, nawęglająca) i stopień jej aktywności chemicznej może w pewnym stopniu zamienić te właściwości.

Jedynie osłony całkowicie obojętne chemicznie, argon oraz hel nie oddziałują na skład i strukturę topionego metalu, a także nie rozpuszczają się w nim. Aktywne gazy osłonowe wpływają na właściwości stopiwa przez zmianę zawartych w nich pierwiastków. W przypadku stali niestopowych i niskostopowych

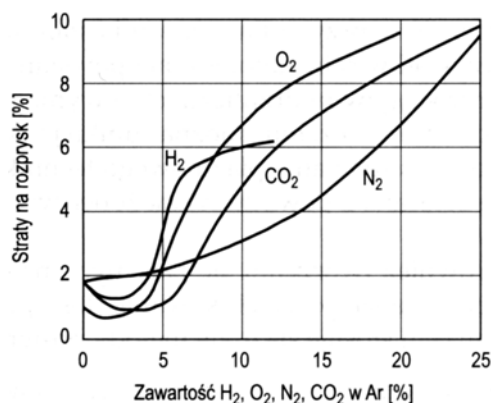
główne zagadnienie dotyczy utleniania (wypalania) przede wszystkim Mn, Ni, Si, i C tlenem będącym składnikiem mieszanki osłonowej (O_2) i zawartym w CO_2 . Może również wystąpić wzrost zawartości węgla, jeżeli zastosowano mieszanę bogatą w CO_2 . Procesy wypalania i nawęglania zmieniają głównie własności mechaniczne stopiwa [10].

Podobnie w przypadku brązów obecność tlenu w gazie osłonowym powoduje łatwe utlenianie składników metalu [47]; wpływ tego zjawiska został szerzej omówiony w punkcie 6.1.

Przez zastosowanie mieszanki osłonowej całkowicie obojętnej chemicznie efekty zmiany własności mechanicznych stopiwa są mniej wyraźne i zauważane w sposób pośredni. W tym przypadku gaz osłonowy wpływa na głębokość wtopienia i szybkość krzepnięcia, która oddziałuje na mikrostrukturę napoiu [10].

Według [32] przez zmieszanie w odpowiednich proporcjach helu lub argonu z gazami aktywnymi chemicznie uzyskuje się zmianę charakteru przenoszenia metalu w łuku, pojawia się możliwość oddziaływania na procesy metalurgiczne w jeziorce napoiu. Dodatek CO_2 lub O_2 do osłony argonu zwiększa wyraźnie natężenie prądu krytycznego przy napawaniu MAG drutami litymi, lecz jednocześnie wzrasta wydajność napawania, poprawia się stabilność jarzenia łuku, maleje rozprysk i obniżają się koszty napawania. Utleniająca atmosfera łuku powoduje występowanie na powierzchni napoiu większej ilości tlenku i zmniejszenie pracy wyjścia elektronów z powierzchni jeziora napoiu, w których występują. Zapewnia to stabilne jarzenie się łuku i znacznie mniejszy rozprysk metalu. Również wyeliminowane są podtopienia lica napoiu, wynikające z błędzenia łuku po powierzchni jeziora napoiu. Metal jest przenoszony w łuku w sposób natryskowy i możliwe jest wyraźne zwiększenie prędkości napawania. Emisja elektronów z tlenków zmierza do ich rozerwania następuje zjawisko czyszczenia katodowego, co jest korzystne przy napawaniu stopów aluminium.

Jednakże stosując dodatki gazów aktywnych w mieszankach osłonowych na bazie argonu należy zwrócić uwagę na ich zawartość w gazie osłonowym - rys. 4.6. Wielkość rozprysku zależy od ilości składnika aktywnego w argonie. Zwiększenie udziału procentowego H_2 , O_2 , CO_2 , N_2 (dodatek helu do argonu nie powoduje wzrostu rozprysku) w gazie osłonowym podnosi poziom rozprysku. Tylko dla 1÷3% O_2 i ok. 3% CO_2 można zaobserwować jego zmniejszenie w stosunku do czystego argonu [10].



Rys. 4.6. Wpływ udziału H_2 , O_2 , CO_2 , N_2 w mieszance na bazie argonu na rozprysk [10]

Zalecane napięcia łuku dla napawania brązem z zastosowaniem różnych gazów osłonowych przedstawiono w tablicy 4.4.

Tablica 4.4 Zalecane napięcia łuku przy napawaniu elektrodą topliwą w osłonie gazu drutem brązowym litym przy natryskowym oraz zwarciovym przenoszeniu metalu w łuku [32]

Metal stopiwa drut	Natryskowe przenoszenie metalu w łuku; drut $\varnothing$ 1,6 mm				Zwarciovie przenoszenie metalu w łuku; drut $\varnothing$ 0,9 mm
	Ar	He	He+ 25%Ar	Ar+ 1-5%O ₂	Ar
Brązy	28	28-32	28-30	23-28	23

Opis wpływu mieszanek argonu z dodatkami O_2 i CO_2 z wykorzystaniem drutu brązowego krzemowego na właściwości uzyskiwanych połączeń można znaleźć w dość licznych pozycjach literaturowych [7,12,26,27,53,54,56,57]. Praktyczne wykorzystanie tych materiałów dodatkowych ograniczone jest najczęściej obecnie do lutowania MAG cienkościennych stalowych blach ocynkowanych, blach stalowych niestopowych i stopowych bez pokryć oraz blach stalowych z elementami miedzianymi.

Mieszanki aktywne chemicznie zmniejszają napięcie powierzchniowe ciekłego metalu w jeziorze spawalniczym oraz znacząco poprawiają rozpląwalność spoiwa i zwilżalność materiału łączonego. Dodatek tlenu lub dwutlenku węgla zwiększa jak wspomniano wcześniej stabilność jarzenia łuku i poprawia wygląd lutowania, niemniej jednak powoduje obniżenie właściwości plastycznych połączenia. Wynika to prawdopodobnie z tworzenia na granicy ziarn tlenków miedzi

(Cu_2O), które osłabiają mikrostrukturę oraz mogą być przyczyną kruchości i pęknięć np. podczas przeróbki plastycznej na zimno lub zaistnienia naprężeń w złączach [7,12].

Oprócz gazów celowo dodanych do mieszanek gazowych na bazie argonu lub helu, należy zwrócić również szczególną uwagę na zanieczyszczenia gazowe występujące w gazach obojętnych, które mogą wpłynąć na jakość uzyskiwanych napoin [10,36,43].

Zawartość wilgoci w argonie zależy głównie od przygotowania butli do napełnienia, powoduje utlenianie i rozprysk metalu przy napawaniu oraz sprzyja powstawaniu porów [36].

Zanieczyszczenie argonu azotem ponad dopuszczalną wartość powoduje niestabilny przebieg napawania. Powierzchnia napoiny jest nierówna i zabrudzona. Azot w łuku elektrycznym reaguje z niektórymi pierwiastkami, np. Fe, Al, Mn, Si, tworząc niekorzystne związki. Utworzone w czasie napawania azotki glinu tworzą ścisłą i trwałą błonkę na powierzchni elementów, która utrudnia uzyskanie dobrej jakości przetopu. Azot w argonie prowadzi też do zwiększenia strat metalu na rozprysk (rys. 4.6) [10,36,43].

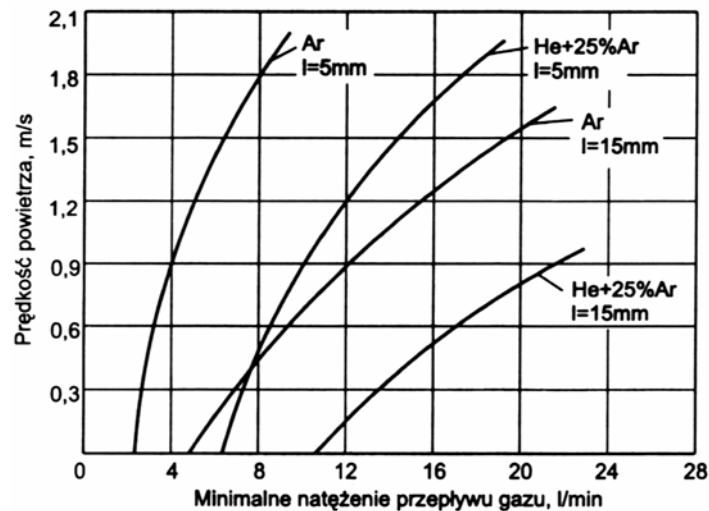
Wodór nie tworzy z żelazem związków chemicznych, ale rozpuszczając się intensywnie w ciekłym żelazie może powodować tworzenie się pęcherzy i pęknięć [43].

Obecnie do napawania brązem najlepsze wydają się być gazy obojętne ze względu na brak oddziaływania na skład oraz strukturę topionego metalu i nie rozpuszczanie się w nim. Należy jednak zwrócić uwagę na większe zużycie gazu dla helu i mieszanek argonowo-helowych oraz trudniejsze zajarzanie łuku i mniej stabilny jego charakter. Argon z dodatkami tlenu i dwutlenku węgla nie jest obojętny chemicznie na stopiony metal i w przypadku brązów jak wspomniano wcześniej może być przyczyną kruchości i pęknięć.

Niektóre pozycje literatury [70] proponują do napawania brązem oprócz czystego argonu również mieszaniny argonu z azotem, którego zaletą jest niższa cena mieszanki niż czystego argonu, jednakże wadą takiej mieszanki nie jest całkowita obojętność względem stopionego materiału i niedogodności w procesie napawania, które omówiono powyżej.

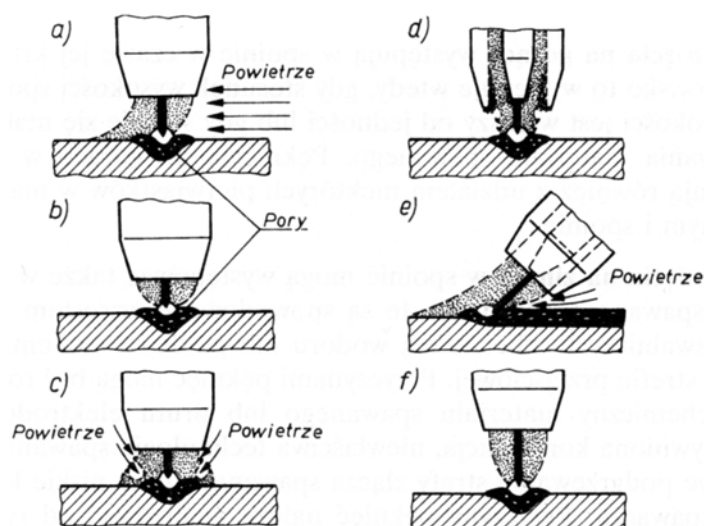
4.5. Natężenie przepływu gazu osłonowego

Natężenie przepływu gazu ochronnego musi zapewniać dokładną osłonę obszaru napawania tzn. łuku, jeziora spawalniczego i strefy do niego przylegającej, nawet przy poprzecznym przepływie powietrza wywołanym przeciągami lub wiatrem (rys. 4.4 i 4.5a) [32,49]. Praktyczną regułą jest ustalanie natężenia przepływu wg kryterium 1,0 litra gazu ochronnego na minutę na każdy milimetr średnicy dyszy gazowej [10,32].



Rys. 4.4. Wpływ prędkości powietrza przepływającego poprzecznie do osłony łuku i długości wolnego wylotu drutu l , na wymagane minimalne natężenie przepływu gazu ochronnego przy spawaniu MIG uchwytem spawalniczym o średnicy dyszy gazowej 16 mm [30]

Zużycie gazu osłaniającego w procesie napawania z oczywistych względów ekonomicznych należy minimalizować [70]. Wpływ na ilość wydatkowanego gazu ma długość wolnego wylotu elektrody (rys.4.4) i jego wzrost przy niezmienniej wartości przepływu gazu pogarsza osłonę gazową - rys. 4.5f [70]. Wypływ gazu z dyszy powinien być laminarny i skutecznie wypierać powietrze z okolic łuku i jeziora napoiny. Zbyt mały wydatek gazu nie zapewnia prawidłowej osłony procesu napawania – rys. 4.5b, natomiast zbyt duży wydatek gazu powoduje zaburzenia i zawirowania gazu z dyszy i w konsekwencji zasysanie powietrza do osłony - rys. 4.5c [10,25]. W trakcie napawania należy również okresowo oczyszczać dyszę gazową z rozprysków, które także niekorzystnie wpływają na prowadzone prace spawalnicze i powstawanie wad – rys 4.5d.



Rys. 4.5. Występowanie wad w napoinie na skutek złej ochrony gazowej: a) poprzeczny przepływ powietrza zdmuchuje osłonę gazową, b) za mała ilość gazu osłonowego, c) za duża ilość gazu osłonowego – następują zawirowania i dostaje się powietrze, d) zmniejszony przekrój dyszy przez rozpryski metalu, co powoduje zawirowania i dostawanie się powietrza, e) nadmierne pochylenie uchwyty w stosunku do powierzchni spawanego elementu, co powoduje zasysanie powietrza, f) za duża odległość dyszy gazowej uchwyty spawalniczego od materiału podstawowego [25]

Ustalenie wartości natężenia przepływu gazu ochronnego musi uwzględniać również gęstość gazu osłonowego (rys. 4.4). Argon jest około 10 razy cięższy od helu i 1,5 raza cięższy od powietrza. Aby właściwie ochronić obszar napawania przed dostępem powietrza, hel i jego mieszanki z argonem wymagają zatem proporcjonalnie większego wydatku niż w przypadku stosowania czystego argonu. Zaproponowane przez [13,40] wartości przepływu gazu zapewniające odpowiednią osłonę gazową wynoszą:

- dla mieszanek zawierających 30% He i 70% Ar – 18 l/min,
- dla mieszanek zawierających 50% He i 50% Ar – 28 l/min,
- dla mieszanek zawierających 70% He i 30% Ar – 35 l/min,
- dla 100% He – 40 l/min.

Gęstość zastosowanego gazu wpływa na zużycie gazu także w zależności od pozycji napawania. Stosowanie gazów lżejszych od powietrza wymaga stosowania większego przepływu w pozycji podolnej, natomiast nie jest to konieczne w przypadku pozycji pionowej w trakcie napawania w górę. Zwiększenie

natężenia prądu napawania wymaga podwyższenia natężenia przepływu gazu ochronnego ze względu na wzrost prężności par topionych metali, dysocjacji gazów, większą ilość oparów i dynamikę procesów w łuku. Stosowanie pochłaniacza dymów w uchwycie spawalniczym wymaga zwiększenia wydatku gazu o około 10÷15 %. Kąt między dyszą gazową a napawanym materiałem mniejszy niż 45° powoduje niedostateczną osłonę. Należy go wówczas odpowiednio skorygować, a nie zwiększać zużycia gazu, ponieważ regulacja wydatkiem gazu powoduje turbulencje gazu i jest nieskuteczna - rys. 4.5e [10,55].

4.6. Rodzaj drutu

Polska Norma (PN-70/M-69413) przewiduje jako spoiwa brązowe dwa rodzaje drutów SB7 i SBK31, ich skład chemiczny podany jest w tablicy 4.5.

Tablica 4.5 Skład chemiczny drutów brązowych SB-7 i SBK-31

Cecha spoiwa	Skład chemiczny, %								
	składniki stopowe					dopuszczalne zanieczyszczenia max			
	Cu	Sn	Si	Mn	P	Pb	Fe	P	ogółem
SB7	reszta	6,0-7,0	-	-	0,1-0,4	0,1	0,1	-	0,3
SBK31	reszta	-	2,8-3,5	1,0-1,5	-	0,03	0,3	0,05	1,1

Zawartość niklu w spoiwie SBK31 nie zalicza się do zanieczyszczeń.

Drut SB7 [70] zaleca używać, jeśli napoina będzie powierzchnią pracującą, a SBK31, gdy będzie tylko warstwą uzupełniającą.

Napoiny z drutu SBK31 mają dobre własności wytrzymałościowe oraz są odporne na korozję i działanie kwasów. Brązy te mają również dobre własności spawalnicze ze względu na zawartość krzemu, który działa jako odtleniacz. Druty elektrodowe SB7 dają napoinę bardziej plastyczną i o mniejszej twardości niż druty SBK31. Napoiny są bardziej odporne na korozję i działanie kwasów oraz mają lepsze własności spawalnicze [70].

Należy zwracać szczególną uwagę na czystość drutów elektrodowych nawiniętych na specjalne szpule. Nawet bardzo cienka powłoka brudu może mieć zasadniczy wpływ na jakość napoiny [70]. Druty powinny być czyste, gładkie, bez korozji, brudu i smarów. Są dopuszczalne ślady ciągnięcia, ale bez zanieczyszczeń grafitem i siarką. Każda szpula powinna być nawinięta z jednego odcinka drutu o regularnych i niesplątanych zwojach. Druty w czasie magazynowania i transportu powinny być chronione przed uszkodzeniami mechanicznymi, zabrudzeniem,

zamoczeniem i utlenieniem. Druty powinny być składowane w magazynach czystych i suchych, bez pyłów i oparów substancji chemicznych, które mogą wchodzić w reakcję z drutem elektrodowym [25].

Obecnie oprócz przewidzianych Polską Normą drutów można na rynku znaleźć wiele innych rodzajów drutów brązowych (także proszkowych [21,29]) oferowanych przez przedstawicieli firm zagranicznych, które mogą być wykorzystane do napawania powierzchni brązem.

4.7. Średnica drutu

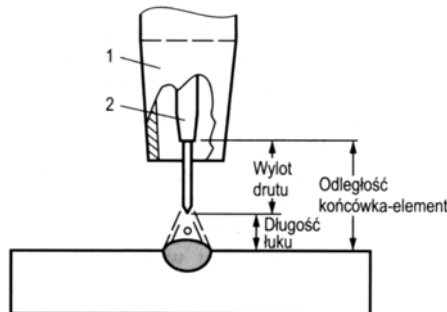
Średnica drutu elektrodowego decyduje o gęstości prądu, a tym samym o głębokości wtopienia i sposobie przenoszenia metalu w łuku spawalniczym, rys 4.1 [32,49].

Utrzymywanie tego samego natężenia prądu (przez zmniejszenie prędkości podawania drutu elektrodowego) przy większej średnicy drutu elektrodowego powoduje zmniejszenie wymieszania materiału dodatkowego z metalem podłoża [55]. W pracy [49] zjawisko to wyjaśniono tym, że wzrost średnicy drutu powoduje zwiększenie rozmiaru kropeł, zmniejszenie koncentracji strumienia gazów i par metalu. W wyniku tego zmniejsza się jednostkowe oddziaływanie siłowe łuku i intensywność strumienia cieplnego, a tym samym zmniejsza się głębokość i pole przekroju wtopienia.

Druty lite o małej średnicy 0,5-1,2 mm wykorzystuje się do napawania zrobotyzowanego oraz napawania małych elementów i w pozycjach przymusowych. Większe średnice drutów od 1,2 do nawet 4,0 mm zaleca się do napawania półautomatycznego lub zmechanizowanego i automatycznego przedmiotów o dużych powierzchniach w pozycji podolnej, łukiem natryskowym lub wirującym [32].

4.8. Długość wolnego końca elektrody

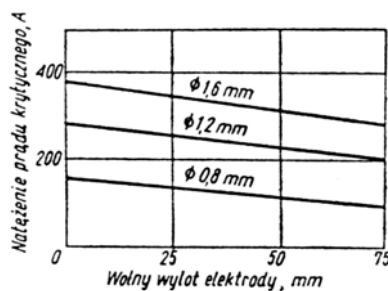
Wolny wylot elektrody jest to odległość od końca drutu elektrodowego do najbliższego punktu kontaktu elektrycznego końcówki prądowej – rys. 4.9 [49].



Rys. 4.9. Wolny wylot drutu elektrodowego i odległość końcówka prądowa-element spawany; 1 – dysza gazowa, 2 – końcówka prądowa [49]

Wielkość wolnego wylotu elektrody ma wpływ na intensywność podgrzewania oporowego drutu między stykiem prądowym a stapiającym się końcem drutu elektrodowego. Wzrost długości wolnego wylotu elektrody, przy tym samym natężeniu prądu, zwiększa wydajność napawania MIG/MAG, maleje zaś głębokość przetopienia metalu podłoża i jego udział w napoinie [32,49].

Wzrost długości wolnego wylotu elektrody przesunął zakres krytyczny prądu w kierunku mniejszych wartości, natomiast ze wzrostem średnicy drutu zakres krytyczny występuje przy coraz wyższych natężeniach prądu - rys. 4.10 [43].



Rys. 4.10. Wpływ długości wolnego wylotu elektrody i średnicy elektrody na położenie zakresu krytycznego prądu [43]

Przy zbyt dużym wolnym wylocie elektrody, ale jeszcze w zakresie przenoszenia zwarcowego metalu, występują zakłócenia stabilności jarzenia łuku elektrycznego, tzw. strzelanie łuku, czemu towarzyszy nadmierna ilość rozprysków [43,49]. Należy wówczas według [32] zwiększyć odpowiednio napięcie

obwodu napawania i prędkość podawania drutu (natężenie prądu) w celu kompensacji strat energii łuku.

Wpływ długości wolnego wylotu elektrody na osłonę gazową omówiono wcześniej w punkcie 4.5.

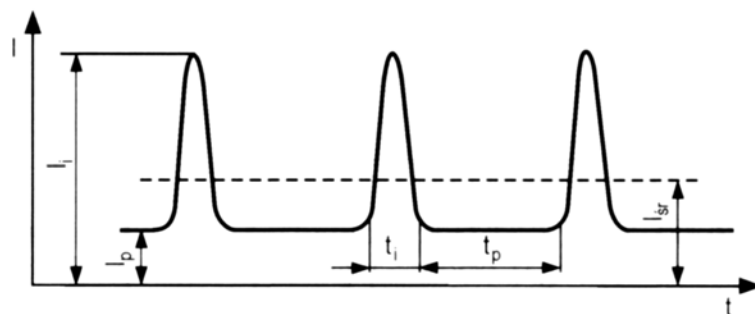
Długość wolnego wylotu drutu litego przy napawaniu łukiem zwarciovym powinna być utrzymywana w granicach 6-15 mm, a przy napawaniu łukiem natryskowym 18-25 mm, w zależności od rodzaju materiału drutu [49]. Większe wartości wolnego wylotu elektrody w pracy [32] zaleca się tylko do napawania automatycznego MIG/MAG.

Czasami w niektórych sytuacjach np. w instrukcjach technologicznych spawania WPS, według normy PN-EN 288-2 + A1:1997, dotyczących zmechanizowanego spawania MIG/MAG podawana jest odległość końcówki prądowej od powierzchni spawanego elementu – rys. 4.9 [49].

4.9. Biegunowość i rodzaj prądu

Proces napawania MIG/MAG najczęściej prowadzi się prądem stałym o biegunowości dodatniej na elektrodzie bez względu na rodzaj drutu. Natomiast zmiana biegunowości na ujemną w większości przypadków drutów elektrodowych wiąże się ze zmniejszeniem stabilności jarzenia łuku i zwiększeniem rozprysku. Tylko dla pewnych gatunków drutów proszkowych zaleca się stosowanie biegunowości ujemnej na elektrodzie, a dzięki składnikom rdzenia topnikowego stabilizującym łuk, rozprysk metalu w łuku jest wówczas minimalny [32,49].

Napawanie MIG/MAG prądem stałym pulsującym pozwala na zmniejszenie natężenia prądu krytycznego w stosunku do napawania stabilnym prądem stałym z biegunowością dodatnią. Zapewnia to mniejsze głębokości przetopienia podłoża i mniejszy udział metalu podłoża w napoinie, pozwala również na łatwiejsze napawanie w pozycjach przymusowych. Za pomocą odpowiedniej regulacji parametrów impulsowania prądu jest możliwa dokładna regulacja przenoszenia metalu w łuku. Na prąd podstawowy I_p jarzącego się w sposób ciągły łuku z biegunowością dodatnią nakładane są krótkotrwałe impulsy prądu I_i , które zwiększają prędkość topienia końca elektrody oraz formowania i odrywania kropli metalu, rys. 4.11.



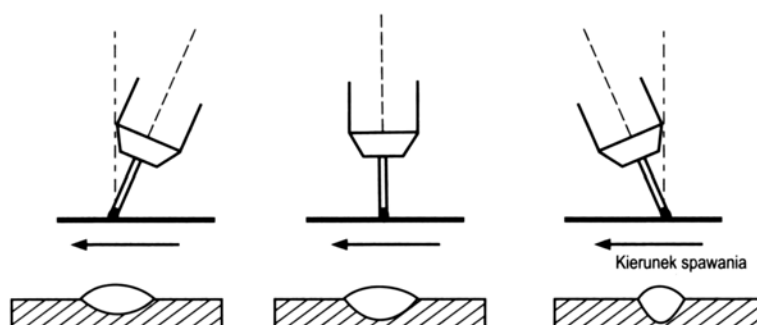
Rys. 4.11. Przebieg zmian natężenia prądu stałego pulsującego; I_p – natężenie prądu podstawowego, I_i – natężenie prądu impulsu, t_i – czas trwania impulsu, t_p – czas trwania przerwy między impulsami, I_{sr} – średnie natężenie prądu [49]

Przenoszenie metalu elektrody w łuku można dokładnie regulować przez odpowiednią zmianę podstawowych parametrów impulsowania prądu tak, że przy każdym impulsie prądu z końca drutu odrywa się jedna kropla metalu o określonych wymiarach [32,49]. W zależności od rodzaju metalu drutu i pozycji napawania [32] zaleca częstotliwość impulsów prądu $30 \div 100$ Hz .

Pewne gatunki drutów proszkowych topnikowych, zawierające w rdzeniu topnikowym pierwiastki stabilizujące łuk, umożliwiają również napawanie prądem przemiennym, zapewniającym wyeliminowanie zjawiska ugięcia łuku [32].

4.10. Kąty nachylenia elektrody

Pochylenie głowicy spawalniczej lub palnika względem powierzchni napawanego przedmiotu (podobnie pochylenie przedmiotu) wpływa na kształt wtopienia – rys.4.12.



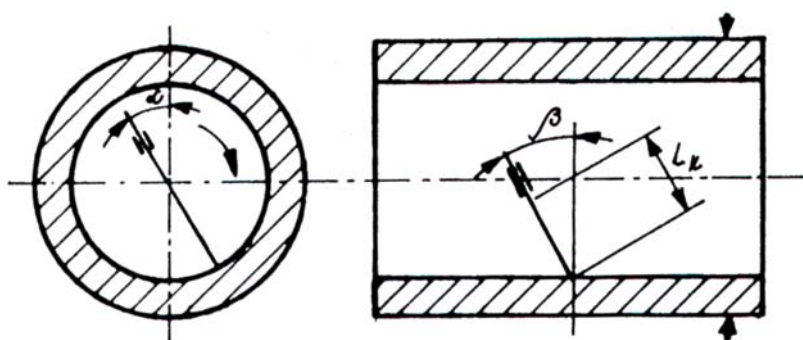
Rys. 4.12. Wpływ pochylenia palnika na kształt wtopienia [49]

Pochylenie uchwyty spawalniczego w kierunku napawania zwiększa głębokość wtopienia, natomiast pochylenie w kierunku przeciwnym zmniejsza tę głębokość wraz z jednoczesnym zwiększeniem wysokości nadlewu napoi [49].

Autor pracy [70] uważa, że kąty nachylenia elektrody α i β wpływają na stabilizację łuku. Wartość optymalnych kątów jest związana ze średnicą elektrody; im większa jej średnica tym mniejszy winien być kąt α oraz większy kąt β - (rys. 4.13).

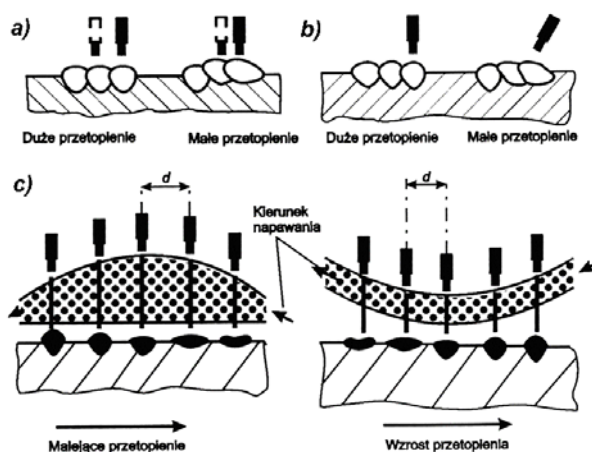
Optymalne kąty nachylenia elektrody w procesie napawania brązem wynoszą:

- przy napawaniu drutem $\varnothing 1,6$: $\alpha=10^\circ$ i $\beta=5^\circ$,
- przy napawaniu drutem $\varnothing 2,0$: $\alpha=5^\circ$ i $\beta=10^\circ$ [70].



Rys. 4.13. Schemat ustawienia końcówki elektrody [70]

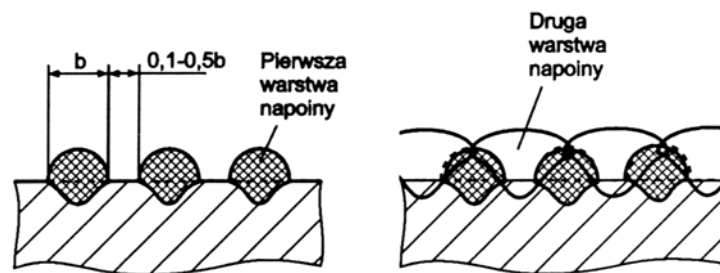
Autor pracy [32] twierdzi, że pochylenie głowicy spawalniczej lub palnika względem powierzchni napawanego przedmiotu (podobnie pochylenie przedmiotu) zapewnia takie same efekty, jak przy napawaniu łukiem krytym (rys. 4.14).



Rys. 4.14. Wpływ podziałki między ściegami (a), pochylenia bocznego elektrody (b) i ustawienia elektrody względem przedmiotów o powierzchni cylindrycznej na kształt ściegów napoiny i udział metalu podłoża w napoinie (c) [32]

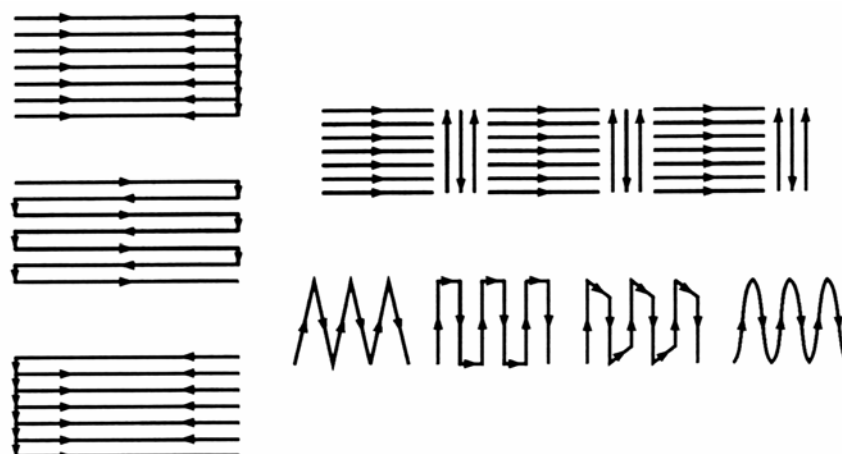
4.11. Techniki układania ściegów

Zmniejszenie udziału podłoża w napoinie, obniżenia naprężeń spawalniczych i uzyskanie dużej wydajności napawania MIG/MAG jest możliwe przez zastosowanie techniki napawania wielowarstwowego z pierwszą warstwą ułożoną prostymi ściegami kotwiczącymi, z odstępem między nimi równym 10-50% szerokości ściegu, rys. 4.15. Ściegi kotwiczące pierwszej warstwy są układane z odstępem, a ściegi drugiej warstwy i następnych bez odstępów z zakładką 10-30% szerokości ściegu b .

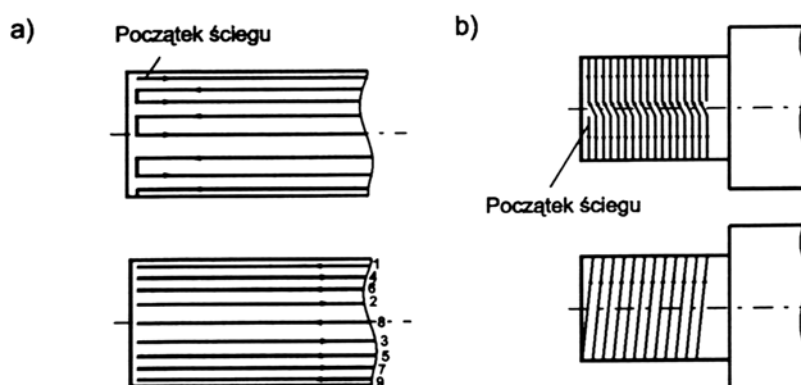


Rys. 4.15. Zalecany układ ściegów przy napawaniu wielowarstwowym MIG/MAG powierzchni obrotowych i płaskich w celu zmniejszenia: udziału metalu podłoża w napoinie, naprężeń i odkształceń spawalniczych w napawanych przedmiotach [32]

Przedmioty o powierzchniach obrotowych zaleca się napawać układając ściegi po torze spiralnym w przypadku krótkich czopów, natomiast długie wałki i powierzchnie płaskie ściegami równoległymi, rys. 4.16-17. Pierwsze ściegi kotwiczące zaleca się napawać drutem o małej średnicy, ok. 0,8-1,2 mm, łukiem natryskowym pulsującym, aby zapewnić wysokiej jakości połączenie napoiny z metalem podłoża, przy stosunkowo małym jego udziale w napoinie. Pierwsza warstwa napoiny jest układana z odstępem między ściegami, dlatego też należy zastosować małe natężenie prądu, jednak na tyle duże, by nie wystąpił brak przetopu. Napawanie drugiej i następnych warstw napoiny z zakładką poszczególnych ściegów, ok. 10÷50% szerokości ściegu, można przeprowadzić stosując drut o większej średnicy 2,0÷2,4 mm i odpowiednio większe natężenie prądu, zależne od odstępów między ściegami. Im mniejszy jest odstęp między ściegami kotwiczącymi pierwszej warstwy, tym większe może być natężenie prądu i wydajność napawania, bez nadmiernej głębokości przetopienia podłoża [32].



Rys. 4.16. Zalecane techniki układania ściegów przy napawaniu GMA przedmiotów o płaskich powierzchniach [32]



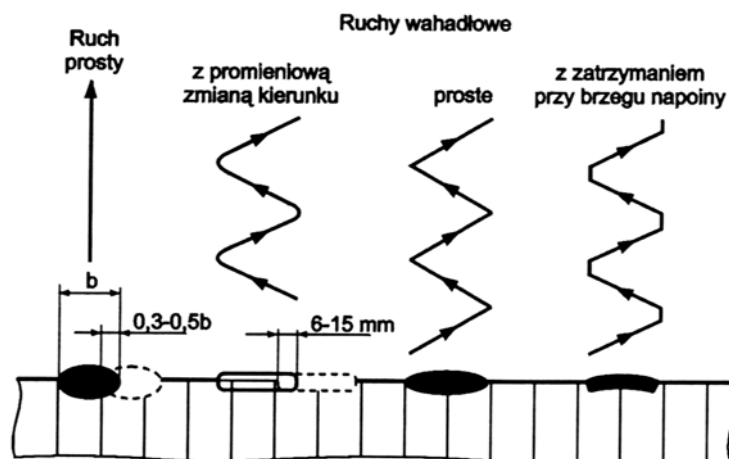
Rys. 4.17. Zalecane techniki układania ściegów przy napawaniu GMA przedmiotów o powierzchniach obrotowych: a) długich wałków, b) krótkich czopów [32,45]

Kolejnym rozwiązaniem zapewniającym zmniejszenie udziału metalu podłoża w napoinie jest napawanie pierwszego ściegu przy mniejszym natężeniu i napięciu łuku, następnie układanie kolejnych ściegów przy optymalnych parametrach napawania z zakładką 30-50% szerokości ściegu oraz odchyleniem palnika od pionu pod kątem $30\div 50^\circ$ i skierowaniem łuku na ścieg poprzedni, rys. 4.14a - b.

Kolejność układania ściegów napoiny powinna być tak ustalona, aby rozkład naprężeń i odkształceń był symetryczny, a ich wielkości możliwie najmniejsze [32,45].

Wprowadzenie ruchu wahadłowego palnika zapewnia wzrost wydajności napawania i zmniejszenie głębokości przetopienia podłoża. Napawanie automatyczne MIG/MAG przedmiotów o dużych powierzchniach zaleca się

przeprowadzać z wahadłowym ruchem głowicy spawalniczej, a tor ruchu powinien być dobrany tak, aby uzyskać płaskie i równe lico napoiny, bez podtopień, z równomiernym wtopieniem w podłoże. Zakładka ściegów przy napawaniu szerokimi ściegami z ruchem wahadłowym głowicy powinna wynosić ok. $6 \div 15$ mm w zależności od grubości i szerokości ściegu. Dla zapewnienia płaskiej i równej powierzchni napoiny zakładka między ściegami prostymi powinna mieścić się w zakresie $30 \div 50\%$ szerokości ściegu – rys. 4.18 [32].

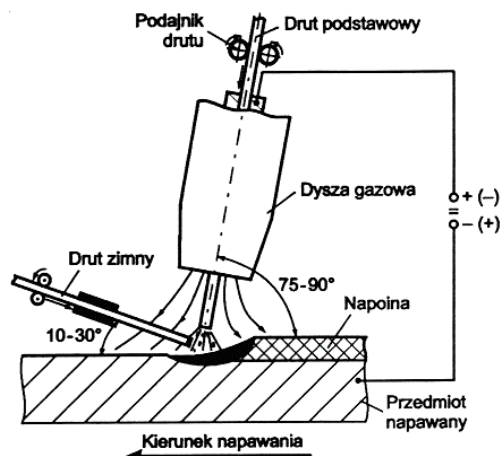


Rys. 4.18. Zalecane wartości podziałki i tory ruchu wahadłowego głowicy spawalniczej przy napawaniu automatycznym MIG/MAG oraz ich wpływ na kształt ściegu napoiny [32]

Zakładka ściegów (podziałka napawania) według [70] wpływa zdecydowanie na grubość napawanej warstwy, jakość połączenia napoiny z materiałem rodzimym elementu oraz gładkość powierzchni napoiny. Wartość podziałki napawania celem uzyskania najkorzystniejszej wartości wtopienia może być dobierana w wąskich granicach. Zbyt mała podziałka powoduje częściowe nakładanie się napawanych warstw oraz podtapianie poprzedniego ściegu, przez co nie można uzyskać gładkiej powierzchni napawanej. Materiał rodzimy jest przy tym częściowo izolowany od roztopionego metalu drutu elektrodowego, przez co zmniejsza się udział metalu podłoża w napoinie. Zwiększenie grubości napawanej warstwy tą metodą jest jednak w każdym przypadku osiągnięte kosztem gładkości napoiny.

Zwiększenie wydajności automatycznego napawania MIG/MAG stosowane głównie do grubych powłok na dużych powierzchniach, można osiągnąć przez zastosowanie dodatkowego drutu wprowadzanego w obszar łuku (rys. 4.19)

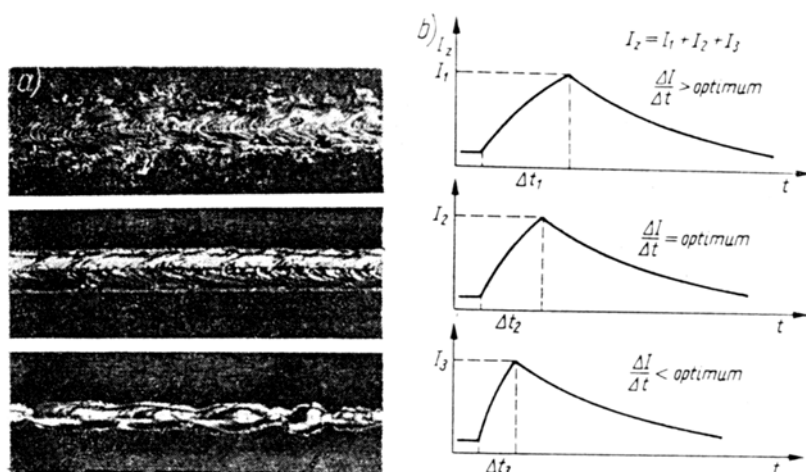
z ewentualnym podgrzewaniem oporowym (gorący drut); wydajność procesu wrasta wówczas nawet do 20÷30 kg/h [8,32,49,58].



Rys. 4.19. Proces napawania automatycznego MIG/MAG zimnym drutem [32]

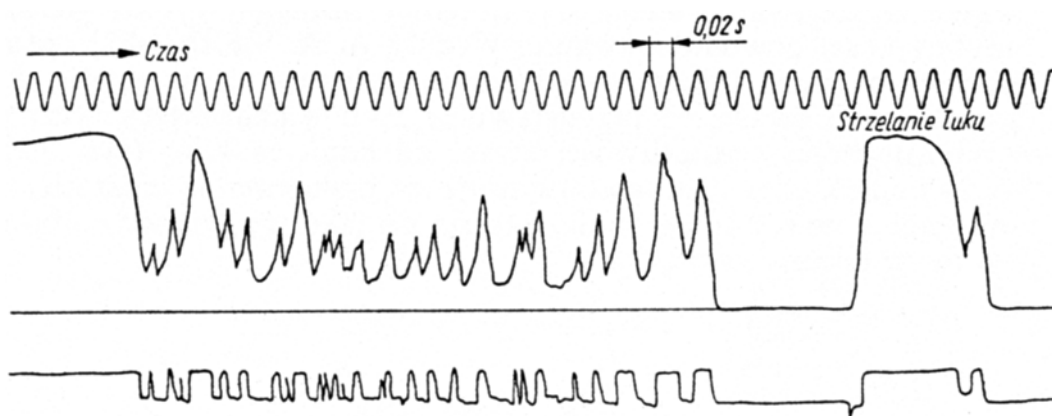
4.12. Indukcyjność obwodu spawalniczego

W trakcie zmechanizowanego napawania w osłonie gazów istotne znaczenie dla poprawnego przebiegu procesu ma dynamiczna charakterystyka źródła prądu, a szczególnie prędkość narastania prądu zwarcia. Decyduje ona między innymi o ilości rozprysków i wygładzie lica (rys. 4.21). Prędkością narastania prądu zwarcia można sterować przez zmianę indukcyjności obwodu spawania lub/albo w pewnym zakresie przez zmianę nachylenia charakterystyki spawalniczego źródła prądu (jeżeli jego konstrukcja na to pozwala). Optymalna wartość indukcyjności zależy od takich czynników, jak materiał i średnica drutu elektrodowego, natężenie prądu spawania, napięcie łuku oraz rodzaju gazu osłonowego [43,49].



Rys. 4.21. Zależność wyglądu lica napoiny (a) od szybkości narastania prądu zwarcia (b) [43]

Stabilność procesu przy zwarciovym przenoszeniu metalu w łuku zależy od wartości prądu zwarcia oraz od szybkości i charakteru jego narastania i opadania. Jeżeli szybkość ta jest nadmierna, następuje wzrost ilości rozprysków, gdy jest zbyt mała, to powstające siły elektromagnetyczne są niewystarczające do odcięcia szyjki pomiędzy kroplą a końcem elektrody. Kropla zanurza się wtedy w jeziorku, gdzie odrywana jest w sposób wybuchowy, powodując rozpryski oraz zaburzenia w odrywaniu kolejnych kropli (rys. 4.22).



Rys. 4.22. Przebieg prądu i napięcia przedstawiający niestabilne jarzenie się łuku zwarciovego przy spawaniu MAG spowodowane źle dobraną indukcyjnością [43]

Właściwy dobór indukcyjności ma szczególne znaczenie przy zwarciovym przenoszeniu metalu w łuku, zapewnia ona nie tylko stabilne jarzenie się łuk, ale także prawidłowy kształt ściegu i małą ilość rozprysków. Optymalny dobór indukcyjności cechuje stabilny łuk, wydający charakterystyczny jednakowy dźwięk, jeziorko spawalnicze utrzymuje stałe wymiary, łuk spawalniczy równomiernie omiata łączone brzegi, a transport metalu jest równomierny, tzn. nie zauważa się wybuchów oraz dużego rozprysku. Zbyt małą indukcyjność charakteryzuje „strzelanie łuku”, duży, ale równomierny rozprysk. Zbyt dużą indukcyjność można poznać po grubszych kroplach metalu i pojedynczych wybuchach połączonych z grubymi nieregularnymi rozpryskami [43].

5. Napawanie brązu na podłoże stalowe

Napawanie brązem wykorzystywane jest przy napawaniu elementów wykonanych ze stali jak i powierzchni wykonanych z brązu lub innych stopów miedzi.

W trakcie układania warstw z brązu na podłożu stalowym można rozróżnić dwa przypadki. W pierwszym przypadku najwcześniej наносzona warstwa brązu napawana jest bezpośrednio na podłoże stalowe. Drugi przypadek występuje w czasie napawania wielowarstwowego, kiedy układanie drugiej i kolejnej warstwy odbywa się na wykonaną wcześniej napoinę z brązu, a nie bezpośrednio na stal.

Proces napawania brązem powinien być zawsze poprzedzony przygotowaniem powierzchni do napawania omówionym w rozdziale 3.3. Często zachodzi również potrzeba podgrzania elementu do odpowiedniej temperatury i jej kontrola w trakcie układania napoin. Po napawaniu konieczne być może odpowiednie chłodzenie czy nawet specjalna obróbka cieplna.

Zalecenia technologiczne odnośnie temperatur wstępnego podgrzania oraz zachowania odpowiednich temperatur w trakcie procesu napawania przedstawione są w tablicy 5.1.

Pozycje literaturowe [39,70] wskazują na konieczność wstępnego podgrzania powierzchni napawanej do temperatury $100\div 300^{\circ}\text{C}$ przy łukowym napawaniu stali. Temperaturę podgrzania uzależniają one od wielkości przedmiotu napawanego i gatunku materiału dodatkowego.

Zastosowanie podgrzewania wstępnego, kontrolę temperatury w czasie napawania oraz powolne studzenie czy też zastosowanie specjalnej obróbki cieplnej [32] uzasadnia zapobieganiem powstawaniu pęknięć w napoinie i materiale podłoża, jak również zmniejszeniem odkształceń spawalniczych i udziału metalu podłoża w napoinie.

Wstępne podgrzanie umożliwia także usunięcie wilgoci z powierzchni napawanej, która może być powodem powstawania porowatości napoin [11,59].

Napawane warstwy brązu powinny cechować się brakiem pęknięć, porów i pęcherzy gazowych. Spełnienie tych warunków w przypadku napawania brązem wymaga dostarczenia dużych ilości ciepła przez napawanie z dużymi energiami liniowymi lub też zastosowanie wstępnego podgrzania. Zastosowanie dużych energii liniowych (dużych natężeń prądu) w napawaniu łukowym powoduje

Tablica 5.1 Temperatury wstępnego podgrzania, międzyścigowe i obróbka po napawaniu stopami miedzi różnych materiałów podstawowych [8,11]

Materiał podstawowy	Materiał dodatkowy	Temperatura wstępnego podgrzania przy metodzie napawania [°C]			Temperatura międzyścigowa przy metodzie napawania [°C]			Obróbka po napawaniu
		elektrodą otuloną	TIG, gazowej	MIG	elektrodą otuloną	TIG, gazowej	MIG	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Brąz alumiiniowy poniżej 9% Al ^a	CuAl A-1	proces nie stosowany	nie podgrzewać ^b	nie podgrzewać	proces nie stosowany	max. 65 ^b	max. 65	chłodzenie w powietrzu
Brąz alumiiniowy 9-13% Al ^a	CuAl A-2, B, C Brąz Ni-Al Brąz Mn-Ni-Al.	150	nie podgrzewać ^b	nie podgrzewać	max 200	max 200 ^b	max 200	chłodzenie w powietrzu
Brąz alumiiniowy powyżej 13% Al ^a	CuAl D, E	min. 600	min. 600 ^b	proces nie stosowany	min. 600	min. 600 ^b	proces nie stosowany	szybkie chłodzenie od 600°C za pomocą wentylatora lub ciągu kominowego
Brąz krzemowy	CuSi, -A CuAl A-2	nie podgrzewać	nie podgrzewać	nie podgrzewać	max. 65	max. 65	max. 65	chłodzenie w powietrzu
Brąz cynowy	CuSn A, C, D	200	nie podgrzewać	nie podgrzewać	200	200	200	szybkie chłodzenie od 200°C za pomocą wentylatora lub ciągu kominowego
Brąz manganowy	CuZn B, C	proces nie stosowany	nie podgrzewać	proces nie stosowany	proces nie stosowany	260	proces nie stosowany	chłodzenie w powietrzu
	CuAl A-2	260	nie podgrzewać ^b	nie podgrzewać	260	260	260	chłodzenie w powietrzu
Stale węglowe do 0,4% C	CuAl A-1	proces nie stosowany	nie podgrzewać	nie podgrzewać	proces nie stosowany	max. 65 ^b	max. 65	chłodzenie w powietrzu
	CuAl A-2, B, C	nie podgrzewać	nie podgrzewać ^b	nie podgrzewać	nie wymagana	max. 315 ^b	max. 315	chłodzenie w powietrzu
	CuAl D, E	nie podgrzewać	nie podgrzewać ^b	proces nie stosowany	max. 315	max. 315 ^b	proces nie stosowany	chłodzenie w powietrzu
	CuSn A, C, D, E	nie podgrzewać	nie podgrzewać	nie podgrzewać	nie wymagana	max. 315	max. 315	chłodzenie w powietrzu
	CuZn B, C, D, E	proces nie stosowany	nie wymagana ^c	proces nie stosowany	proces nie stosowany	max. 315	proces nie stosowany	chłodzenie w powietrzu
Stale węglowe powyżej 0,4% C	CuAl A-2, B, C	min. 200	min. 200 ^b	min. 200	200÷315	200÷315 ^b	200÷315	wolne chłodzenie z temperatury międzyścigowej w azbestie
Stale stopowe i żeliwa	CuAl D, E ^d	min. 200	min. 200 ^b	proces nie stosowany	200÷315	200÷315 ^b	proces nie stosowany	wolne chłodzenie z temperatury międzyścigowej w azbestie

^a równowartość aluminium, ^b tylko możliwość stosowania metody TIG, ^c tylko możliwość stosowania napawania gazowego, ^d warstwa buforowa CuAl A-2

powstanie dużego, wolno stygnącego jeziora, umożliwiającego wydzielenie pęcherzyków gazu, jednakże następuje wówczas duże przetopienie. W tych warunkach pierwsza warstwa brązu napawana na podłożu stalowe, cechuje się znacznym stopniem wymieszania, następuje utwardzenie brązu wtrąceniami stali i utratą jego własności [11,20,59].

Zastosowanie wstępnego podgrzania ogranicza prędkość chłodzenia oraz - co ma szczególnie znaczenie w przypadku napoin wielowarstwowych - zmniejsza naprężenia i ogranicza możliwość powstawania pęknięć [20,59].

Autorzy badań [20,59] dotyczących napawania brązem CuSn6 podłoża stalowego metodą MIG w osłonie czystego argonu, jako metodę ograniczenia wtopienia, zalecają prowadzenie procesu z zastosowaniem małej energii liniowej napawania E_n która jest zdefiniowana wzorem:

$$E_n = \frac{U_n \cdot I_n}{v_n} \cdot \eta \quad (5.1)$$

gdzie:

v_n – prędkość napawania, a pozostałe parametry omówione niżej.

W związku z tym, napięcie napawania U_n i prąd napawania I_n powinny być możliwie małe i tak dobrane, aby uzyskać łuk na granicy stabilności. Napięcie napawania można ustawić bezpośrednio na źródle spawalniczym. Natomiast prąd napawania I_n można zadać tylko w sposób pośredni przez ustawienie odpowiednio małej prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} , zapewniając niewielką głębokość wtopienia. Prędkość ta musi być jednak na tyle duża, aby zapewnić stabilność procesu. Dla metody MIG przyjęto wartość współczynnika sprawności łuku $\eta = 0,5$ [20,39,59,60,70]. Autorzy badań [19,20,59] proponują taki dobór technologicznych parametrów napawania, które zapewniają energię liniową napawania E_n do 2 kJ/cm. Jednocześnie zwracają uwagę, że zabezpieczenie przed utlenianiem wymaga zapewnienia dostatecznie szerokiej strefy ochronnej gazu osłonowego wokół jarzącego się łuku, krzepnącego metalu na granicy jeziora spawalniczego oraz strefy przylegającej do gorącego metalu.

W trakcie napawania wielowarstwowego wg [39,70] zmieniają się nieco warunki procesu. Z powiększaniem grubości warstwy wzrasta pojemność cieplna i naprężenia powstające w wyniku oddziaływania podłoża stalowego. Zazwyczaj wykonuje się nie więcej niż trzy warstwy napawane, przy czym grubość jednej

warstwy ogranicza się do 3-4 mm. Przy większej ilości warstw występują pęknięcia, których powstawaniu zapobiega się przez przekuwanie ściegów lub wolne studzenie. Na ogół mała plastyczność napoiny z brązu i występujące jednocześnie ze spadkiem temperatury skurcze, które są następstwem szybkiego studzenia, przyczyniają się do powstawania pęknięć bezpośrednio po ułożeniu ściegu. Zakres temperatur decydujących o pęknięciach jest różny dla różnych gatunków brązów. Ogólnym warunkiem jest nieprzekroczenie temperatury 300°C w bezpośrednim obszarze napawania. Zjawiska te zmuszają do wprowadzania coraz częstszych przerw w napawaniu, kontrolowaniu temperatury, napawaniu coraz krótszymi ściegami i przekuwaniu kolejnych ściegów po upływie coraz dłuższego czasu od chwili zakończenia napawanego ściegu. Jednocześnie nie należy dopuścić do przechłodzenia napawanej warstwy poniżej temperatury wstępnego podgrzewania, a jeżeli to nastąpi, przedmiot należy ponownie podgrzać. Ze wzrostem ilości nakładanych warstw rośnie trudność napawania ze względu na możliwość powstania pęknięć.

6. Ocena przydatności danego gatunku brązu jako materiału dodatkowego i stali jako materiału podłoża

6.1. Przydatność brązu jako materiału dodatkowego – spawalność brązów

Spośród wielu rodzajów brązów za spawalne można uznać tylko wybrane gatunki brązów do przeróbki plastycznej i odlewnicze. Brązy przerabiane plastycznie (p), jak i odlewnicze (o) można podzielić na 4 grupy uszeregowane poziomo i pionowo wg rosnącej skali trudności spawania [47]:

- CuSi3Mn1 (p),
- CuSn2 (p), CuSn4 (p), CuSn6 (p), CuSn8 (p), CuSn10 (o), CuSn10P (o),
- CuAl5 (p), CuAl9Fe3 (p i o), CuAl10Fe3Mn2 (p i o), CuAl10Fe4Ni4 (p),
- CuSi3Zn3Mn (o), CuSn4Zn3 (o), CuSn10Zn3 (o).

Pozostałe gatunki brązów są trudno spawalne, w szczególności wieloskładnikowe brązy zawierające ołów [6,47,48].

Rola poszczególnych pierwiastków występujących w wyżej wymienionych brązach jest następująca:

- Si w zakresie 0,01-0,4% nieznacznie zwiększa odporność na pęknięcia międzykrystaliczne oraz spełnia rolę średnio czynnego odtleniacza;
- Mn umiarkowanie odtlenia jeziorko spawalnicze i ogranicza skłonność stopu do pęknięcia;
- Sn w granicach 3 -16% obniża skłonność stopu do pęknięć międzykrystalicznych;
- P przy zawartości 0,9% czyli poniżej granicznej rozpuszczalności w Cu (1,75%) maksymalnie podwyższa skłonność stopów Cu do pęknięcia, natomiast dosyć aktywnie odtlenia jeziorko spawalnicze;
- Al w miarę wzrostu powyżej 1,5% zmniejsza skłonność stopów do pęknięcia (od 6% Al wzwyż stopy są mało wrażliwe na pęknięcie), aktywnie odtlenia jeziorko spawalnicze, lecz tworzy trudny do usunięcia, bardzo trwały chemicznie Al_2O_3 ;
- Fe skutecznie rozdrabnia ziarno w spoinie;
- Ni redukuje wrażliwość na gorące pęknięcia oraz porowatość spoin;
- Zn powoduje porowatość spoin;

- Pb do 2% znacząco podwyższa skłonność do pękania, powyżej 2% skłonność ta nieznacznie się obniża, ale przy 10% podwaja się w stosunku do 2% zawartości Pb w stopie [47].

Wybrane, powyższe gatunki brązów spawalnych można podzielić na trzy podstawowe grupy: brązy cynowe, krzemowe i aluminiowe [47,48].

Brązy cynowe, podobnie jak wszystkie stopy miedzi, cechuje względnie wysoka łatwość do wiązania tlenu. Nie występuje natomiast, tak jak wcześniej wspomniano, specyficzne dla miedzi zagrożenie „chorobą wodorową”. Tworzące się w trakcie procesu spawania tlenki miedzi i cyny mogą wiązać pierwiastki odtleniające znajdujące się w nadmiarze w spoiwie. Efektywnym odtleniaczem jest fosfor znajdujący się zarówno w materiale rodzimym (do 1,2%), jak i w spoiwie. Stosunkowo niska koncentracja cyny (max 11%) i odtleniające działanie fosforu wpływają korzystnie na ograniczenie ilości trudno topliwego SnO_2 (powyżej 1700°C) na powierzchni jeziora spawalniczego. Ograniczona jest również możliwość ulatniania się cyny ze względu na jej wysoką temperaturę parowania (2360°C) [47]. Wraz ze wzrostem zawartości cyny pogarsza się spawalność tej grupy brązów [48].

Pewne kłopoty związane ze stosowaniem stopów Cu-Sn sprawia ich zdolność do pochłaniania porotwórczego wodoru, który mimo względnie dużej różnicy temperatury w układzie likwidus-solidus, może wywoływać porowatość spoiny. Metodą zapobiegania temu zjawisku jest podgrzewanie wstępne i międzyoperacyjne łączonych materiałów. Korzystne może być także zastosowanie spoiw zawierających dodatek niklu [47]. Natomiast jednofazowa struktura stopów Cu-Sn (faza α) o dobrych właściwościach plastycznych zmniejsza skłonność tworzenia pęknięć [47,48].

Podobne własności spawalnicze mają wieloskładnikowe brązy cynowe, jednakże jeśli jednym z pierwiastków stopowych jest cynk, należy uwzględnić to, że w trakcie spawania ulegnie on prawie całkowitemu odparowaniu i utlenieniu. Tego typu stopy można spawać z dobrym skutkiem spoiwami Cu-Sn nie zawierającymi cynku [47].

Brązy cynowe o małej zawartości cyny zazwyczaj nie wymagają podgrzewania wstępnego. Przy wyższej zawartości cyny i większych grubościach spawanych elementów zalecane jest podgrzewanie wstępne przed spawaniem, jednakże temperatura wstępnego podgrzania nie powinna przekraczać 300°C [48].

W pracy [47] oceniano brązy cynowe jako dobrze spawalne elektrodami otulonymi oraz metodą TIG. Natomiast metodę MIG uznano za dającą gorsze efekty w stosunku do spawania metodą TIG i bardziej proponowano ją do napawania. Wreszcie, nie zalecano spawania gazowego jako dającego najmniej korzystne wyniki.

Brązy krzemowe cechuje mała przewodność cieplna, metal spoiny ma dobrą płynność, natomiast żużel jest gęstopłynny. Brązy te zawierają na ogół nie więcej niż 3% Si i mają strukturę jednofazową (α). Krzem powoduje wprawdzie dobre odtlenianie metalu spoiny w trakcie spawania, a ze wzrostem jego zawartości wzrastają własności wytrzymałościowe tych brązów. Z drugiej strony jednak pogarszają się ich własności spawalnicze, wzrasta bowiem kruchość, a zwłaszcza skłonność spoin do pęknięcia na gorąco [47,48]. Brązy te charakteryzuje wąski zakres temperaturowy kruchości na gorąco w pobliżu temperatury solidus, dlatego - aby uniknąć pęknięć - muszą być szybko chłodzone w tym krytycznym zakresie temperatur [48]. Inną proponowaną metodą ograniczenia skłonności spoin do pęknięcia może być również zastosowanie dużej prędkości spawania nie podgrzanych wstępnie materiałów [47].

Utrudnieniem w procesie spawania może być również błonka nietopliwych tlenków pojawiająca się na powierzchni płynnego jeziora. Błonka ta jest prawie czystą krzemionką (SiO_2) i wymaga zastosowania specjalnych topników dla związania jej na niskotopliwy żużel przy spawaniu gazowym oraz metodą TIG, lub zastosowania elektrod z otuliną o charakterze redukcyjno-tlenkowym. Spoiwa powinny zawierać pewien nadmiar krzemu i manganu jako pierwiastków odtleniających jezioro spawalnicze w stosunku do składu materiału rodzimego [47].

Podgrzewanie wstępne przed spawaniem brązów krzemowych nie jest wymagane, a temperatura międzysciegowa nie powinna przekraczać 90°C [48].

W literaturze [48] uznano brązy krzemowe za dobrze spawalne metodą gazową, natomiast [47] nie zaleca tej metody ze względu na większą skłonność do pęknięcia spoin w stosunku do metody TIG. Mniejszą tendencją do pęknięcia cechuje się metoda spawania elektrodami otulonymi z zastosowaniem niskokrzemowego stopiwa (max 1,5% Si). Najlepsze rezultaty daje metoda TIG, która zapewnia minimalne podgrzanie metalu. Metodę MIG można stosować do spawania spoin pachwinowych i spawania grubszych elementów [47].

Brązy aluminiowe, podobnie jak brązy cynowe, nie są zagrożone „chorobą wodorową”. Cały tlen zostaje bowiem związany z aluminium. W wyniku reakcji $4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$ tworzy się jednak bardzo odporny chemicznie, wysokotopliwy (2040°C) tlenek aluminium [47]. Brązy aluminiowe posiadające w składzie chemicznym do 7% aluminium Al charakteryzują się kruchością na gorąco i mają tendencję do pękania. Złącza spawane z takich brązów często pękają w strefie wpływu ciepła. Wzrost zawartości Al polepsza spawalność. Brązy o strukturze jednofazowej zawierające powyżej 8% Al oraz brązy o strukturze dwufazowej mają większą odporność na pękanie w trakcie spawania [47,48].

Brązy aluminiowe nie wymagają zazwyczaj podgrzewania wstępnego przed spawaniem, jednak dla brązów o zawartości poniżej 10% Al oraz zawierających nikiel Ni zaleca się podgrzewanie wstępne. Jednakże temperatura wstępnego podgrzania i międzyścięgowa nie powinna przekraczać 150°C . Złącza spawane należy chłodzić na powietrzu do temperatury otoczenia. Grubsze elementy wykonane z brązu aluminiowego o zawartości 10÷13% Al zaleca się podgrzewać wstępnie przed spawaniem do temperatury około 150°C , a temperatura międzyścięgowa nie powinna przekraczać 260°C , niezbędne jest także szybkie chłodzenie złączy na powietrzu [48].

Brązy aluminiowe, [47] zaleca niezależnie od metody spawania wyżarzać odprężająco: brązy dwuskładnikowe w temp. 300°C , a brązy wieloskładnikowe w temp. $400\text{--}500^\circ\text{C}$.

Spawanie gazowe brązów aluminiowych jest utrudnione ze względu na brak skutecznie działających topników. Topniki aktywnie rozpuszczające Al_2O_3 wykorzystywane przy spawaniu aluminium, nie spełniają dobrze tego zadania ze względu na dużą różnicę temperatury spawania Al (658°C) i stopów Cu-Al (powyżej 1000°C). Znaczne przekroczenie temperatury działania ($600\text{--}700^\circ\text{C}$) tych topników powoduje zanik ich zdolności rozpuszczania Al_2O_3 . Znacznie lepsze efekty można osiągnąć spawając elektrodami otulonymi lub metodą TIG albo MIG gdzie jezioro spawalnicze jest dużo lepiej chronione przed dostępem powietrza i możliwością utlenienia. Przy spawaniu elektrodą otuloną Al_2O_3 wiązany jest przez topiącą się otulinę. Zaś przy spawaniu prądem przemiennym w metodzie TIG czy też prądem stałym o biegunowości dodatniej w metodzie MIG wykorzystuje się zjawisko czyszczenia katodowego polegającego na rozbijaniu warstewki tlenków przez

ciężkie jony dodatnie poruszające się od dodatniej elektrody do spawanego elementu i rozpylaniu ich przez silną emisję elektronów z powierzchni tlenku pokrywającego spawany materiał [30,47].

6.2. Możliwość zastosowania określonego gatunku stali jako materiału podłoża

Jednym z czynników mających wpływ na napawalność stali i przydatności jako materiał podłoża jest jej spawalność metalurgiczna. Pozwala ona w pewnym stopniu ocenić przydatność stali do napawania z uwzględnieniem jej własności fizycznych i chemicznych (metalurgicznych), a więc związana jest z jej składem chemicznym, stopniem zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi, zawartością gazów, strukturą i stanem naprężeń wewnętrznych [44,65].

Spawalność stali ocenia się przede wszystkim na podstawie składu chemicznego, a zwłaszcza zawartości węgla oraz pierwiastków stopowych, wpływających na hartowność. Równoważnik węgla, na podstawie którego wylicza się maksymalną i minimalną twardość w strefie przyspoinowej, oblicza się ze wzorów empirycznych. Do obliczania równoważnika węgla stosowany jest wzór opracowany przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa [2,44,63]:

$$\%C_e = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (6.1)$$

Znając równoważnik węgla C_e , można określić minimalną i maksymalną twardość strefy przyspoinowej (dla określonych warunków spawania: grubość blachy 12,7 mm, elektroda o średnicy 5 mm, prędkość spawania $v_c = 100-150$ mm/min):

$$H_{min} = (1200 C_e - 260) [HV]; \quad (6.2) \quad H_{maks} = (1200 C_e - 200) [HV] \quad (6.3)$$

Przy innych warunkach spawania należy uwzględnić poprawki wynikające z intensywności chłodzenia (ostrości cieplnej).

Materiał uznaje się za dobrze spawalny, jeżeli wartość równoważnika węgla nie jest większa niż 0,45%, a maksymalna twardość w strefie przyspoinowej nie

przekracza 350 HV. Stanowi to empirycznie przyjęte kryterium możliwości poprawnego wykonania połączenia spawanego [44,63].

Elementy wykorzystywane w konstrukcjach maszyn i urządzeń wykonywane są głównie ze stali, w których zawartość węgla przekracza bezpieczną wartość 0,25% albo równoważnik węgla liczony według podanego wcześniej wzoru jest większy od 0,45. Napawane elementy narażone są wówczas na możliwość pęknięć w strefie wpływu ciepła [2].

Trudności w napawaniu części ze stali węglowych rosną razem ze wzrostem zawartości węgla powyżej 0,25%. W strefie wpływu ciepła występuje wzrost twardości wskutek powstawania struktur martenzytycznych i tym samym wzrost skłonności do występowania pęknięć zimnych, hartowniczych. Przed napawaniem przedmiotów, aby uniknąć pęknięć w tej strefie zaleca się podgrzewanie wstępne do temperatur:

- $0,25\% < C < 0,35\%$ - $100 \div 200^{\circ}\text{C}$,
- $0,35\% < C < 0,45\%$ - $200 \div 300^{\circ}\text{C}$,
- $0,45\% < C < 0,60\%$ - $300 \div 400^{\circ}\text{C}$.

Zakres górny temperatur wstępnego podgrzewania wykorzystywany jest dla napawania przedmiotów o grubościach powyżej 30 mm. W celu uniknięcia niebezpieczeństwa pęknięć segregacyjnych w pobliżu linii przetopienia zaleca się zachowanie stosunku $\text{Mn/S} > 60$ i ograniczenie zawartości siarki do 0,02% S [2].

Możliwość powstawania pęknięć w strefie wpływu ciepła w przypadku napawania stali i staliw niskostopowych określa wielkość równoważnika węgla C_e obliczonego za pomocą podanego wcześniej wzoru. Napawanie tych materiałów nie sprawia trudności przy grubościach $g \leq 30$ mm i równoważniku mniejszym od 0,45%. Pęknięcia mogą pojawić się przy napawaniu stali o równoważniku C_e większym od 0,45% i mają postać pęknięć zimnych spowodowanych powstaniem struktury martenzytycznej i obecnością wodoru. Podczas napawania części wykonanych z blach lub profili walcowanych występuje możliwość powstania pęknięć lamelarnych w strefie wpływu ciepła. Aby zapobiec pęknięciom w strefie wpływu ciepła elementy przed napawaniem powinny podgrzać się do temperatur podanych niżej:

- dla C_e w zakresie $0,45 \div 0,60$ – $100 \div 200^{\circ}\text{C}$,
- dla C_e powyżej 0,60 – $250 \div 350^{\circ}\text{C}$ [2].

Inne wartości temperatur wstępnego podgrzania przedmiotów przed napawaniem w zależności równoważnika węgla C_e oraz grubości elementu można wyznaczyć na podstawie [28] (tablica 6.1).

Tablica 6.1 Temperatura wstępnego podgrzania (w °C) w zależności od równoważnika węgla C_e i grubości materiału zasadniczego [28]

C_e [%]	Grubość [mm]					
	5	10	15	25	35	50
0,40	100	200	220	250	275	300
0,45	150	250	275	300	325	350
0,50	200	300	325	350	375	400
0,60	300	350	375	400	425	450
0,70	350	400	425	450	475	500
0,80	350	400	425	450	475	500
0,90	375	425	450	475	500	550

Pęknięcia zimne w strefie wpływu ciepła mogą wystąpić również przy napawaniu elementów ze stali i staliw niskostopowych do pracy w podwyższonych temperaturach [2]. Nieodpowiednie przeprowadzenie obróbki cieplnej po napawaniu w złączach może spowodować powstanie pęknięć wyżarzeniowych [2] oraz własności niekorzystnie zmienionych w porównaniu z własnościami materiału rodzimego [63]. Materiały te należą do grupy stali trudno spawalnych, które wymagają wstępnego podgrzewania. Temperaturę wstępnego podgrzania [2] proponuje ustalić korzystając z zależności Seferiana [63]:

$$T = 350\sqrt{C_e(1+0,005g)} - 0,25 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.4)$$

gdzie:

g – grubość blachy w [mm].

Podczas napawania stali niskostopowych konstrukcyjnych do ulepszania cieplnego można natknąć się na wiele trudności. Stale te zazwyczaj zalicza się do grupy stali bardzo trudno spawalnych, a podczas ich napawania w strefie wpływu ciepła wystąpić mogą pęknięcia zimne, hartownicze, a nawet poligonizacyjne. Napawanie przedmiotów z tych stali prawie zawsze wymaga stosowania wstępnego podgrzewania w zakresie temperatur 200-400°C i obróbki cieplnej po

napawaniu – odpuszczania. Aby zapobiec pęknięciom zimnym w strefie wpływu ciepła temperaturę wstępnego podgrzania T można ustalić korzystając z zależności [2,63]:

$$T = 1440 P_w - 393 [^{\circ}\text{C}] \quad (6.5)$$

gdzie:

$$P_w = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{4 \cdot 10^4} \quad (6.6)$$

przy czym: P_{CM} – parametr charakteryzujący kruchość związaną z przemianami fazowymi,

$$P_{CM} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo} + \text{V}}{15} + 5B [\%] \quad (6.7)$$

gdzie:

H – ilość wodoru dyfundującego [ml/100g stopiwa] określona metodą glicerynową lub $H = 0,67 H_{MIS} - 0,8$ (H_{MIS} – zawartość wodoru określona metodą rtęciową),

K – współczynnik usztywnienia [N/mm].

Współczynnik usztywnienia (intensywności naprężeń) K można wyliczyć z zależności:

$$K = K_o \cdot g \quad (6.8)$$

gdzie:

K_o – stała = 69,

g – grubość blachy, mm.

Stale austenityczne chromowo-niklowe wykorzystywane do napawania zalicza się do stali łatwo spawalnych, dla których nie pojawiają się problemy z pęknięciami w strefie wpływu ciepła. Poważne trudności występują w trakcie napawania elementów ze stali i staliw austenitycznych manganowych (Hadfielda). Materiały te są trudno spawalne ze względu na kruchość związaną z wydzieleniami węglików $(\text{FeMn})_3\text{C}$ na granicach austenitu i pęknięciami poligonizacyjnymi w strefie wpływu ciepła, które pojawiają się w zakresie temperatur 700-400°C. W trakcie napawania tej grupy materiałów należy wykonywać ściegi proste przy niskich wartościach energii liniowej spawania, zaś wartość temperatury międzyściegowej powinna być utrzymywana poniżej 100°C. Poprawę warunków napawania umożliwia zastosowanie warstw pośrednich o stopiwie austenitycznym typu 24-18 [2].

Wysokostopowych stali ferrytycznych z reguły nie napawa się, bowiem należą do grupy stali bardzo trudno spawalnych. Podobna uwaga dotyczy stali ledeburytycznych - szybkołnących, które napawa się wyjątkowo [2,48]. W strefie wpływu ciepła tych stali występują pęknięcia gorące i zimne w całym zakresie temperatur. Napawanie elementów ze stali szybkołnącej powinno odbywać się z wstępnym podgrzaniem w granicach temperatur względnej trwałości austenitu (400-600°C) [2].

Charakterystyki skłonności do pęknięcia w strefie wpływu ciepła omówionych wcześniej stali zestawione na podstawie [2] zaprezentowano w tablicy 6.2.

Dla określenia przydatności określonego gatunku stali jako materiału podłoża, oprócz informacji przedstawionych powyżej, można także wykorzystać pojęcie napawalności. Napawalność stali jest własnością materiału pozwalającą na nakładanie na elementach z niej wykonanych powłok metalicznych o określonych właściwościach, ściśle z nią połączonych, metodą napawania. Oceny możliwości napawania można dokonać na podstawie współczynnika napawalności N_c , wyznaczanego dla określonego skojarzenia: materiał podłoża – materiał dodatkowy, z uwzględnieniem parametru wiodącego procesu napawania, za który przyjęto energię liniową napawania [49,65,66].

Tablica 6.2 Charakterystyka skłonności napawanych przedmiotów do pęknięcia w strefie wpływu ciepła w procesie napawania [2]

Rodzaj stali w przypadku napawanego przedmiotu	Przykłady stali wg oznaczeń PN	Skłonność do pęknięcia strefy wpływu ciepła				Uwagi
		Pękanie gorące	Pękanie zimne	Pękanie wyżarzeniowe	Pękanie lamelarne	
stale niskowęglowe $C < 0,25\%$	St3S K18	1	1	1	2	Zaleca się $Mn/S > 60$
stale węglowe $C > 0,25\%$ stale szynowe	45 60 P45	1	2-3	1	2	Zaleca się $Mn/S > 60$
Stale niskostopowe $C < 0,25\%$, $Mn=0,5-2\%$, Cr do 2% Mo do 1%, Ni do 2%	18G2A 10H 14HNMBCu	1	2	1	2	Zaleca się $Mn/S > 60$
Stale niskostopowe do pracy w podwyższonych temperaturach $C < 0,2\%$, Cr < 3%, Mo < 1%, V < 1%	16M 15HM 10H2M	1	2	2	1	Podwójna obróbka cieplna $550^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ + $700^{\circ}\text{C}/2\text{h}$
Stale niskostopowe konstrukcyjne $C > 0,3\%$, Cr do 3%, Mn do 3%, Mo do 1% Ni do 3%, V do 1,5%	40HM 45H 34HNM	2	3	2	1	Wstępne podgrzewanie $200-400^{\circ}\text{C}$ + obróbka po spawaniu, np. odpuszczanie
Stale austenityczne chromowo-niklowe Cr = 13-30%, Ni = 8-20	H18N9T	1	1	1	1	Niskie energie liniowe, proste ściegi
Stale austenityczne manganowe Mn = 11-18%, $C > 0,7\%$, Ni do 3%	11G12	3	3	3	1	Niskie energie liniowe, proste ściegi, warstwa pośrednia, np. 24-18
Stale ledeburytyczne szybko tnące $C = 0,6-1,5\%$, Co do 15%, W do 18%, Mo 10%	SW18	3	3	3	3	Podgrzewanie wstępne w zakresie $400-600^{\circ}\text{C}$

Uwaga: 1 – mała skłonność do pęknięcia, 2 – pęknięcia mogą się pojawić, 3 – duża skłonność do pęknięcia

6.3. Podsumowanie analizy literaturowej i teza pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej jako materiał dodatkowy przeznaczony do badań wybrano brąz cynowy CuSn6, który charakteryzuje się odpornością na korozję i doskonale nadaje się na mniej obciążone powierzchnie nośne i łożyska ślizgowe. Jako materiał podstawowy wytypowano stal gatunku 45 wykorzystywaną do produkcji części maszyn, należącą do grupy stali o podwyższonej zawartości węgla i posiadającą równoważnik węgla wyższy niż stale konstrukcyjne ogólnego przeznaczenia i niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości, dla których do tej pory wykonywane były próby napawania brązu cynowego CuSn6 [16,19,20,59]. Najbardziej odpowiednim procesem napawania brązu wydaje się metoda MIG, którą cechuje wysoka wydajność oraz łatwość mechanizacji i automatyzacji, a także obecnie stosunkowo duża dostępność do urządzeń umożliwiających spawanie metodą MIG/MAG. Przez odpowiedni dobór parametrów metoda ta wpływa na geometrię ściegu i głębokość wtopienia, również istotnie na kształt przekroju poprzecznego ściegu oddziałują skład chemiczny gazu osłonowego. Ze względu na swój obojętny charakter jako gazy ochronne do powyższej metody napawania wybrano argon, hel i ich mieszaniny [32].

Teza pracy:

Możliwe jest, na podstawie zadanych parametrów procesu napawania metodą MIG, uzyskanie na podłożu stalowym o ograniczonej spawalności napoin z brązu cynowego o odpowiedniej geometrii i założonych własnościach użytkowych.

7. Cel i zakres badań własnych

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie takich parametrów technologicznych, aby uzyskana w procesie napawania napoina miała odpowiednią jakość. Jest to warunek decydujący o możliwości zastosowania warstwy napawanej z brązu.

Prawidłowo napawana warstwa z brązu powinna odpowiadać następującym kryteriom:

- lico napoiny powinno być gładkie i mieć metaliczne rudawo-złote zabarwienie, bez widocznej szarej warstwy tlenków,
- napoina powinna być ciągła, bez porów, pęknięć, wżerów na powierzchni napoiny, nadmiernej ilości pęcherzy gazowych i poszarpanych brzegów,
- głębokość wtopienia ułożonego ściegu musi być niewielka, aby uniknąć nadmiernego wymieszania brązu z podłożem, jednakże napoina powinna być trwale związana z podłożem.

Badania obejmowały wyznaczenie zakresów technologicznych parametrów napawania zapewniających uzyskanie metodą MIG napoin z brązu CuSn6 o odpowiedniej jakości nakładanych na podłoże ze stali gatunku 45 (o ograniczonej spawalności). W dalszej części pracy podjęto badania nad określeniem wpływu technologicznych parametrów napawania na geometrię napoin.

Określenie zakresów technologicznych parametrów napawania zapewniających uzyskanie napoin o odpowiedniej jakości zawierało wyznaczenie:

- prędkości podawania drutu elektrodowego,
- napięcia łuku spawalniczego,
- prędkości napawania,
- odległości rurki prądowej od napawanego materiału,
- rodzaju i przepływu gazu osłonowego,
- temperatury wstępnego podgrzania.

Z kolei badania własności użytkowych przeprowadzono w celu określenia przydatności warstw z brązu dla zastosowań praktycznych, jako powierzchnie węzłów tarcia i powierzchnie uszczelniające.

Określenie własności użytkowych próbek z napawaną warstwą z brązu na podłożu stalowym obejmowało:

- badania wizualne,
- badania twardości,
- badania metalograficzne,
- badania składu chemicznego,
- badania rentgenograficzne,
- próbę zginania,
- badania tribologiczne.

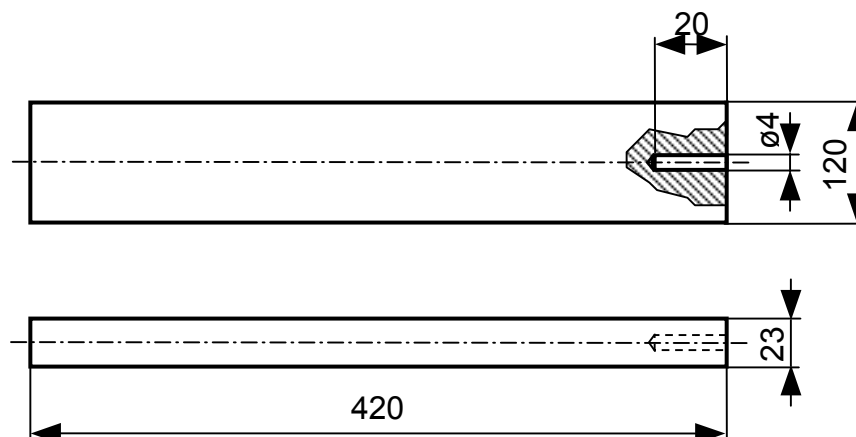
8. Materiały stosowane do badań

W badaniach napawania brązu na podłoże stalowe wykorzystano metodę MIG, stosując brązowy drut elektrodowy CuSn6 o średnicy 1,2 mm. Skład chemiczny drutu zawierał 6% Sn, 0,2% P i reszta Cu (wg danych producenta drutu na podstawie DIN 1733). Własności mechaniczne drutu przedstawiono w tablicy 8.1.

Tablica 8.1 Własności mechaniczne stopiwa uzyskanego z drutu elektrodowego CuSn6 wg danych producenta na podstawie DIN 1733

Nazwa wielkości	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Umowna granica plastyczności	$R_{p0.2}$	N/mm ²	140
Doraźna granica wytrzymałości	R_m	N/mm ²	300
Wydłużenie względne	A_5	%	20
Twardość Brinella	$HB\ 10/1000$	daN/mm ²	80

W badaniach geometrii i jakości warstw napawanych brązem jako materiał podłoża zastosowano stal gatunku 45, w postaci próbek o wymiarach pokazanych na rys. 8.1. Stal ta jest powszechnie wykorzystywana w produkcji części maszyn.



Rys. 8.1. Wymiary próbki i otworu przeznaczonego do mocowania termopary do pomiarów temperatury

Przeprowadzone badania składu chemicznego próbek stali potwierdziły ich zgodność z danymi zawartymi w normie PN -93/H84019 „Stal niestopowa do utwardzania powierzchniowego i ulepszania cieplnego. Gatunki.” Wyniki przedstawiono w tablicy 8.2.

Tablica 8.2 Skład chemiczny stali gatunku 45 wg PN -93/H84019 wraz z przebadanymi próbkami

		Symbole pierwiastków uwzględnione w normie PN -93/H84019										
		C	Mn	Si	P max	S max	Cr max	Mo max	Ni max	Cu max	Al max	As max
Skład chemiczny wg PN -93/H84019		0,42÷0,50	0,50÷0,8 0	0,10÷0,40	0,040	0,040	0,30	0,10	0,30	0,30	0,050	0,08
Nr próbki	1	0,43	0,59	0,15	0,010	0,012	0,02	0,006	0,02	0,02	0,006	0,002
	2	0,42	0,60	0,15	0,010	0,019	0,02	0,006	0,02	0,03	0,007	0,002

Równoważnik węgla C_e wyznaczony zgodnie ze wzorem 6.1 na podstawie badań składu chemicznego wynosił 0,54 %.

Badania własności wytrzymałościowych, takich jak: granica plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m i wydłużenie procentowe po rozerwaniu A_5 przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 10002-1+AC1 „Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia”. Badania przeprowadzono na próbkach dziesięciokrotnych o średnicy 15 mm. Porównanie uzyskanych wyników z danymi zawartymi w normie PN -93/H84019 przedstawiono w tablicy 8.3. Przeliczenie wydłużenia z A_{10} na A_5 dokonano zgodnie z zaleceniami normy PN-ISO 2566-1 „Stal. Przeliczanie wartości wydłużeń stali niestopowych i niskostopowych”.

Tablica 8.3 Porównanie wyników badań własności wytrzymałościowych próbek stali gatunku 45 z normą PN -93/H84019

Własności mechaniczne	Numer próbki					Wartości własności wytrzymałościowych na podstawie normy PN -93/H84019
	1	2	3	4	5	
R_m [MPa]	606	609	605	605	605	min 600
R_e [MPa]	358	361	360	361	363	min. 355
A_5 [%]	31,4	30,5	30,1	30,4	31,4	min. 16

Każda z przebadanych próbek spełniła wymagania podane w normie.

Do osłony gazowej ciekłego metalu stosowano podczas prób takie gazy jak czysty argon i hel należące do grupy I1 wg PN-EN 439:1999 „Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Gazy osłonowe do łukowego spawania i cięcia” oraz mieszaniny tych gazów w odpowiednich proporcjach.

9. Urządzenia, aparatura i stanowisko wykorzystane do badania procesu napawania brązu metodą MIG

Poniżej przedstawiono szczegółowe charakterystyki urządzeń, aparatury, i stanowiska, które zostały zastosowane w badaniach.

Spawalnicze źródło prądu

W badaniach wykorzystano półautomat spawalniczy OPTYMAG 501 firmy BESTER przedstawiony na rys.9.1. W skład półautomatu spawalniczego wchodziły następujące elementy:

- źródło prądu OPTYMAG 501,
- podajnik drutu elektrodowego PDE 5,
- przewód zespolony PZW 501 plus,
- uchwyt spawalniczy MB 36 KD firmy BINZEL.

Półautomat OPTYMAG 501 jest mikroprocesorowo sterowanym prostownikiem spawalniczym. Umożliwia spawanie metodami MMA, MIG/MAG w trybie standardowym oraz spawanie pulsacyjne metodą MIG/MAG z synergiczną regulacją parametrów, jak również z możliwością ręcznego doboru parametrów spawania. Spawalnicze źródło prądu pozwala na wykorzystanie programów nastawionych fabrycznie, jak również umożliwia ręczne zaprogramowanie dostępnych do regulacji parametrów spawania.

Dane techniczne półautomatu są następujące:

Prąd spawania: przy pracy PJ 60	500 [A]
przy pracy PJ 100	400 [A]
Prędkość podawania drutu elektrodowego	1 – 25 [m/min]
Zakres regulacji napięcia spawania	10 – 39 [V]
Znamionowe napięcie zasilania	400 [V], 50 [Hz];
Średnica podawanego drutu elektrodowego	0,8 – 1,6 [mm]



Rys. 9.1. Półautomat spawalniczy OPTYMAG 501 używany podczas badań napawania brązu na podłoże stalowe

Układ do regulacji składu chemicznego i natężenia przepływu mieszanek gazowych

Stanowisko dozowania i mieszania gazów w celu uzyskania osłon gazowych o ściśle określonym udziale objętościowym poszczególnych składników gazowych zestawiono z następujących elementów:

- mieszacza gazów typ MG – 2,
- rotametr RTU-10-300 o nominalnym zakresie pomiarowym od 0 do 25 l/min dla Ar i od 0 do 80 l/min dla He oraz skali niemianowanej - milimetrowej od 0 do 240 działek z dołączonymi przez producenta charakterystykami wskazań rotametr dla wymienionych gazów,
- rotametr RTU-06-300 o nominalnym zakresie pomiarowym od 0 do 12 l/min dla Ar i od 0 do 35 l/min dla He oraz skali niemianowanej - milimetrowej od 0 do 240 działek z dołączonymi przez producenta charakterystykami wskazań rotametr dla wymienionych gazów.

Widok stanowiska umożliwiającego regulację składu chemicznego i natężenia przepływu mieszanek gazowych przedstawiono na rys. 9.2.



Rys. 9.2. Widok ogólny stanowiska do regulacji składu chemicznego i natężenia przepływu mieszanek gazowych dwuskładnikowych

Układ monitorujący parametry spawania

Wielkości charakteryzujące proces spawania metodą MIG/MAG monitorowano przy użyciu komputerowego przyrządu pomiarowego do monitorowania procesu spawania (rys.9.3) zestawionego przez autora niniejszej pracy.



Rys. 9.3. Widok komputerowego przyrządu pomiarowego do monitorowania procesu spawania

Przyrząd oprócz pomiaru podstawowych parametrów, takich jak prąd i napięcie spawania umożliwia także rejestrację temperatury wstępnego podgrzania, temperatury międzyścigowej i czasu stygnięcia spawanego przedmiotu, jak również w sposób pośredni - przez pomiar zasilania silnika wózka - prędkości spawania.

Podstawowe dane techniczne komputerowego przyrządu do pomiaru parametrów procesu spawania łukowego są następujące:

- zakres pomiaru natężenia prądu spawania 0÷800 A, DC i AC
 - zakres pomiaru napięcia łuku spawalniczego 0÷140 V, DC i AC
 - zakres pomiaru temperatury przedmiotu -20÷1000°C
- spawanego
- maksymalny czas rejestracji ograniczony pojemnością dysku
twardego (nie mniej niż 240 godz.
dla dysku 60GB przy częstotliwości
próbkiowania 5 kHz)

Przyrząd do monitorowania parametrów procesu spawania wykorzystuje standardowy komputer z umieszczoną w nim kartą pomiarową połączoną z kasetą zawierającą terminal przyłączeniowy karty wraz z przetwornikami napięciowymi. Do kasety podłączony jest zewnętrzny przetwornik prądowy umieszczony na przewodzie łączącym przedmiot spawany z spawalniczym źródłem prądu. Przetworniki w trakcie pomiarów zaopatrywane są w energię z zasilacza umieszczonego w odrębnej obudowie.

Częstotliwość pomiaru i zapisu parametrów spawania na twardym dysku komputera może odbywać się w szerokim zakresie od 0,2 do 5000Hz. Zastosowane przetworniki napięciowe i przetwornik prądowy wykorzystują zjawisko Halla, zapewniając izolację galwaniczną elementów obwodu pomiarowego i komputera PC od obwodu spawania. Wykorzystanie przetworników gwarantuje nie tylko zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania, ale również w przypadku pojawienia się na wejściu przetworników napięć i prądów przekraczających zakres pomiarowy, przetworniki nasycają się i nie dopuszczają do zwiększenia się na ich wyjściu napięć poza zakresem dopuszczalnym dla elementów pomiarowych i komputera, zabezpieczając je tym samym przed uszkodzeniem. Przetwornik prądowy dzięki otwieranemu rdzeniowi może być w łatwy sposób umieszczony w dowolnym miejscu przewodu spawalniczego, bez rozłączania elektrycznego obwodu spawalniczego. Przetwornik prądowy umożliwia pomiar prądu spawania do 800 A. Przetwornik napięciowy służący do pomiaru napięcia łuku elektrycznego podłączany jest do spawalniczego źródła prądu za pomocą uchwytów tzw.

krokodylków. Maksymalna wartość napięcia łuku spawalniczego jaką można zmierzyć wynosi 140 V.

Prędkość spawania (jazdy wózka) mierzona była metodą pośrednią, tzn. przetwornik napięciowy podłączony był do zacisków silnika napędzającego wózek spawalniczy, a po przekalibrowaniu zmierzone napięcie odpowiadało określonej wartości prędkości spawania.

Pomiar temperatury odbywał się z zastosowaniem termopary podłączonej do multimetru APPA-305, który pełni funkcję wzmacniacza termoparowego i poprzez złącze RS232 bezpośrednio komunikuje się z komputerem PC za pomocą własnego oprogramowania, które umożliwia wizualizację pomiarów w postaci wykresu i tabeli oraz po zakończeniu pomiarów zapis do pliku zarejestrowanych wartości temperatury – rys.9.4. Ponieważ nie jest potrzebna wysoka częstotliwość pomiaru, jak np. przy pomiarach prądu spawania i napięcia łuku, istnieje możliwość jej ustawienia od 0,5s do 5min.



Rys. 9.4. Widok zestawu do pomiaru i rejestracji temperatury

Obsługa przyrządu obejmuje odpowiednią instalację przetworników w obwodzie spawalniczym, silnika wózka spawalniczego, umieszczenie termopary w spawanym elemencie i włączenie zasilacza przetworników.

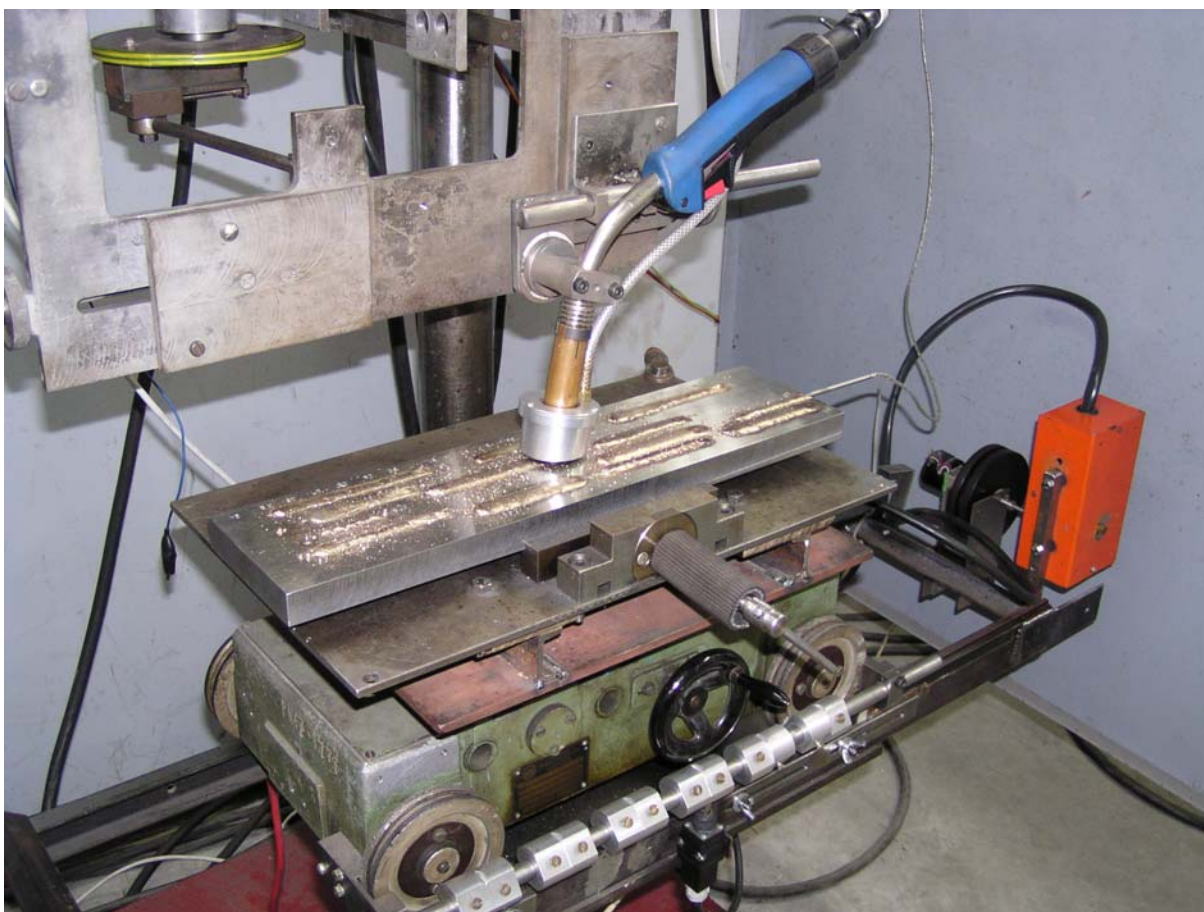
Wartości technologicznych parametrów spawania przekazywane są do komputera PC z zainstalowanym specjalistycznym oprogramowaniem pracującym w środowisku Windows. Przy pomocy oprogramowania odbywa się ustawianie

częstotliwości pomiarów i sposób przedstawiania danych - wskaźniki cyfrowe, analogowe, wykresy, tabele jak również rodzaj pliku, do jakiego są zapisywane mierzone wartości. Oprogramowanie umożliwia wizualizację wyników pomiarów w postaci wykresów i tabel, zarówno na ekranie monitora jak i wydruku z drukarki. Zapis wyników może odbywać się do plików odczytywalnych przez stosowane oprogramowanie, ale także w postaci pliku ASCII możliwego do odtworzenia przez inne programy zewnętrzne takie jak arkusze kalkulacyjne, bazy danych, programy statystyczne. Oprogramowanie pozwala oprócz zapisywania w czasie rzeczywistym mierzonych wartości, również ich późniejsze przeglądanie w postaci wykresów przebiegów i tabel oraz analizę statystyczną wyników [17].

Przed przystąpieniem do badań przyrząd do monitorowania procesu spawania został wykalibrowany niezależnie w Laboratorium Spajania Metali Katedry Wytrzymałości i Technologii Maszyn oraz w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach.

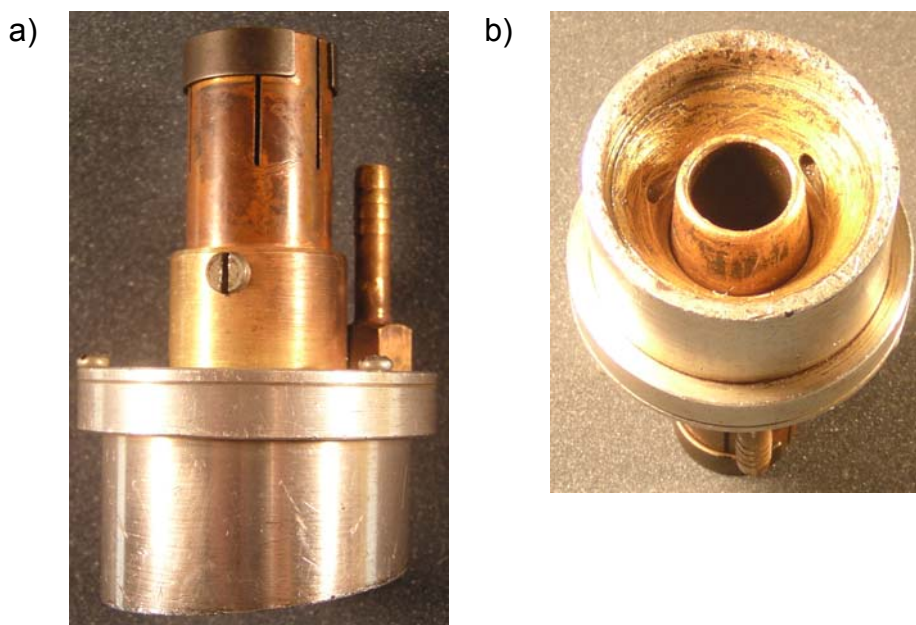
Stanowisko badawcze

W celu zapewnienia powtarzalności wartości nastaw parametrów, badania przeprowadzono na zmechanizowanym stanowisku badawczym (rys.9.5). W skład stanowiska wchodziły: wspomniany wcześniej półautomat spawalniczy OPTYMAG-501, uchwyt spawalniczy z dodatkową dyszą osłonową dla wytworzenia poszerzonej strefy ochronnej gazu osłonowego, torowisko, po którym poruszał się wózek z zamocowaną na nim próbką do napawania oraz komputerowy przyrząd do monitorowania procesu spawania. Uchwyt spawalniczy podczas napawania znajdował się nad napawanym materiałem i był nieruchomy. Wózek z zamocowaną blachą poruszał się po torach z zadaną prędkością napawania, którą regulowano bezstopniowym regulatorem napięcia. Termoparę do pomiaru temperatury próbki podczas napawania umieszczono w specjalnie wywierconym do tego celu otworze w blasze, na której były układane napoiны (por. rys 8.1).



Rys. 9.5. Widok ogólny zmechanizowanego stanowiska do napawania metodą MIG/MAG

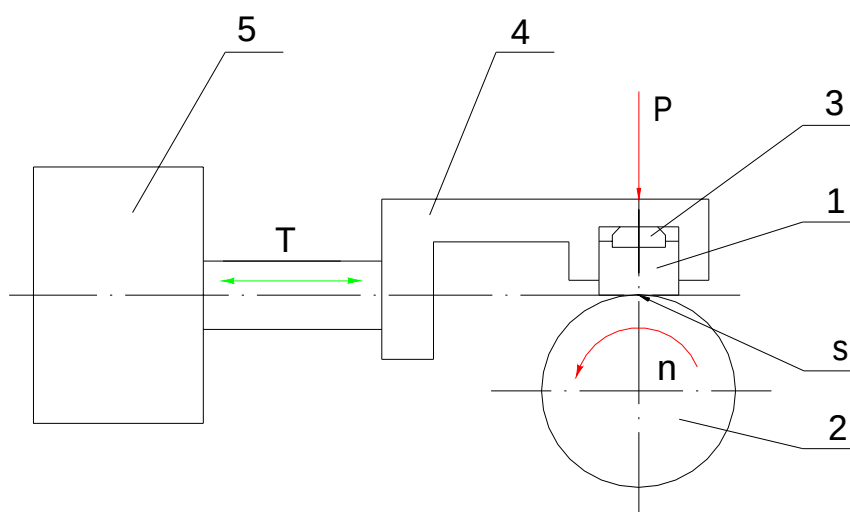
Właściwą osłonę gazową zabezpieczającą ciekłe jezioro spawalnicze oraz tworzącą się napoinę przed utlenianiem zapewniała specjalnie rozbudowana dysza gazowa pokazana na rys. 9.6. Średnica zewnętrzna dyszy gazowej wynosiła $\varnothing = 60$ mm. Gaz do wewnętrznej dyszy gazowej doprowadzany był tradycyjnie przez przewód uchwytu spawalniczego, a zewnętrzną dyszę gazową zasilano oddzielnym zewnętrznym przewodem gazowym połączonym z podajnikiem drutu elektrodowego.



Rys. 9.6. Widoki rozbudowanej dyszy gazowej z boku (a) i od spodu (b)

Stanowisko do badań tribologicznych

Badania tribologiczne przeprowadzono na tribotesterze T-05. Zasadę działania urządzenia testowego T-05 przedstawia rys. 9.7. Uchwyt próbki 4 z wkładką półkulistą 3 stanowi samonastawne zamocowanie klocka 1, które zapewnia dobre jego przyleganie do rolki 2, a tym samym równomierne rozłożenie nacisków w styku. Dwudźwigniowy układ obciążania pozwala na przyłożenie siły dociskającej P klocek do rolki z dokładnością 1%. Rolka obraca się z jednostajną prędkością obrotową n lub wykonuje ruch oscylacyjny z częstotliwością f (rys. 9.7).



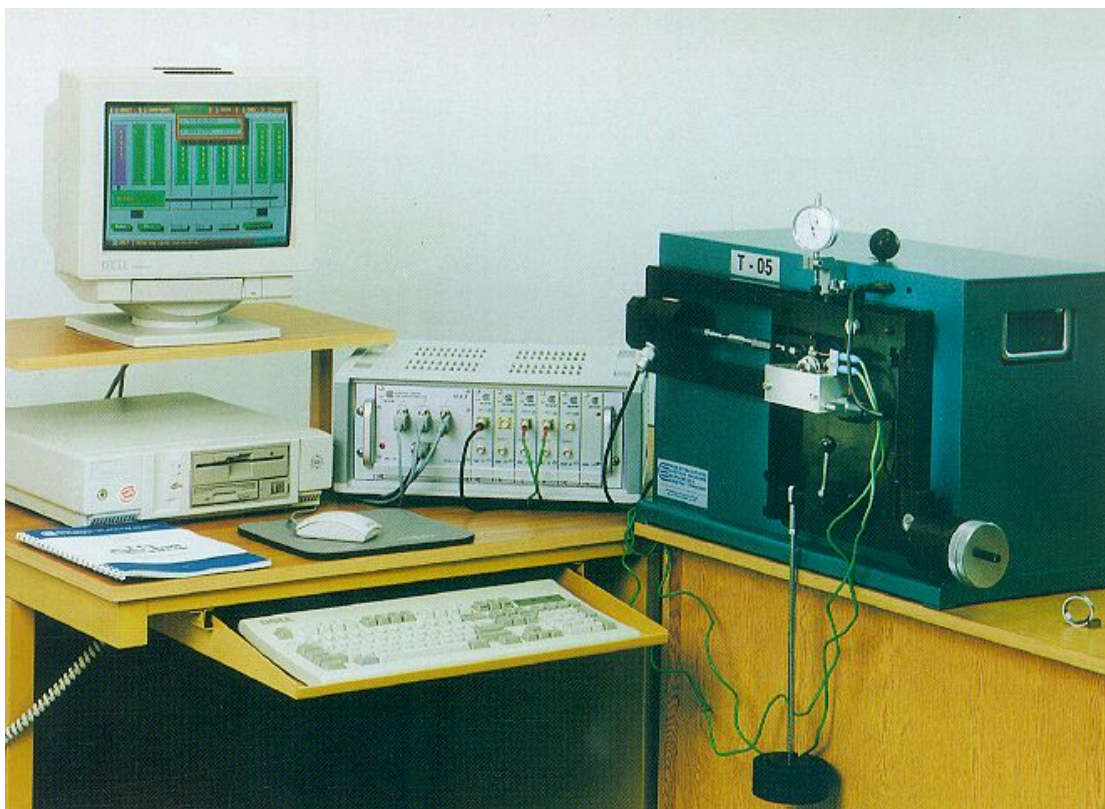
Rys. 9.7. Zasada działania testera T-05 [62]

1- próbka (klocek), 2- przeciwpróbka (rolka), 3- wkładka półkulista, 4- uchwyt próbki, 5- tensometryczny czujnik siły tarcia

Środek pola styku klocka i rolki - punkt s leży w osi geometrycznej pręta przenoszącego siłę tarcia T na czujnik siły 5. Powoduje to, że czujnik siły wskazuje bezpośrednio wartość siły tarcia. Urządzenie testowe składa się z maszyny badawczej i systemu pomiarowego (rys. 9.8).

Urządzenie testowe T-05 ze skojarzeniem rolka-klocek służy między innymi do oceny odporności na zużycie podczas tarcia metali [62].

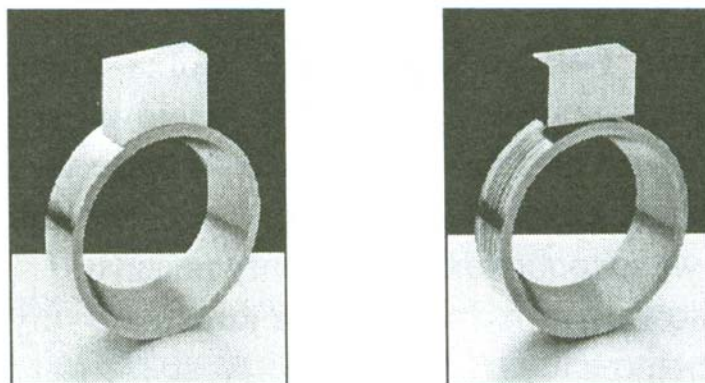
Tester T-05 pozwala na przeprowadzanie badań zgodnie z metodami określonymi w normach amerykańskich: ASTM D 2714, D 3704, D 2981 i G 77 [61].



Rys. 9.8. Widok ogólny stanowiska do badań tribologicznych [23]

Parametry charakteryzujące tribotester T-05 są następujące:

- rodzaj styku: skoncentrowany liniowy lub rozłożony, utworzony przez obracającą się rolkę i dociskany do niej klocek (rys.9.9),
 - o średnica rolki: 35 [mm]
 - o szerokość klocka: 6,35 [mm]
- rodzaj ruchu: ślizgowy o stałych prędkościach ślizgania odpowiadających 20-3000 [obr/min],
- prędkość poślizgu: 0,037 - 5,5 [m/s],
- obciążenie styku : 150 - 3150 [N] regulowane stopniowo co 150 [N],
- przełożenie dźwigniowego układu obciążającego: 30:1 (lub 10:1).



Rys. 9.9. Węzeł tarcia tribotestera T-05 ze stykiem rozłożonymi i stykiem skoncentrowanym [61]

Tribotester T – 05 umożliwia między innymi pomiar następujących wielkości:

- pomiar czasu,
- ciągły pomiar siły tarcia,
- ciągły pomiar liniowego zużycia węzła tarcia.

W badaniach ponadto stosowano następującą aparaturę badawczo - pomiarową:

- mikroskop metalograficzny Nikon Eclipse ME 600P z kamerą Panasonic GP-KR-222 i oprogramowaniem Aphelion 3.2,
- skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-5510LV z przystawką EDS - 500 DIGITAL PROCESSING firmy IXRF SYSTEMS, Inc.,
- twardościomierz uniwersalny Vickers-Brinell HPO-250,
- uniwersalna maszyna wytrzymałościowa ZDM 10/91,
- suwmiarka z głębokościomierzem MAUe o dokładności odczytu 0,05 mm,
- mikroskop warsztatowy MWD o wartości działki elementarnej 0,01 mm,
- aparat cyfrowy Camedia C-730 firmy OLYMPUS.

Literatura *

- [1] Adamiec P., Dziubiński J.: Problemy przy napawaniu i eksploatacji regenerowanych elementów maszyn transportowych. Wyd. Szumacher, Kielce 1997.
- [2] Adamiec P., Dziubiński J.: Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [3] Adamiec P., Dziubiński J., Filipczyk J.: Technologia napraw pojazdów samochodowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] Adamiec P., Dziubiński J.: Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [5] Biegus M.: Regeneracja części zamiennych maszyn i urządzeń hutniczych. Praca dyplomowa AGH, Kraków 1957 (maszynopis).
- [6] Cary H.B., Helzer S.C.: Modern Welding Technology. Sixth edition. Pearson Prentice Hall, New Jersey 2005.
- [7] Czupryński A.: Wpływ osłony gazowej na jakość i własności technologiczne złączy blach stalowych ocynkowanych lutowanych metodą MIG/MAG. Spajanie metali i tworzyw w praktyce, nr 3/2005.
- [8] Dziubiński J., Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne. WNT, Warszawa 1985.
- [9] Dziubiński J., Adamiec P.: Regeneracja i natryskiwanie wczoraj i dzisiaj. Przegląd Spawalnictwa, nr 5/1998.
- [10] Ferenc K. Ferenc J.: Spawalnicze gazy osłonowe i palne. WNT, Warszawa 2005.
- [11] Garriott E.: Surfacing with bronze. Welding Journal, nr 4/1967.
- [12] Gawrysiuk W., Pfeifer T., Winiowski A.: Charakterystyka lutowania łukowego MIG/MAG. Przegląd Spawalnictwa, nr 2-3/2005.
- [13] Gazy ochronne dla spawalnictwa. Materiały firmowe Linde Gaz Polska, 1998.
- [14] Gazy osłonowe Linde. Materiały firmowe Linde Gaz Polska, 2005.
- [15] Geipl H.: Gazy stosowane przy spawaniu i formowaniu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, nr 5/1993.
- [16] Góral T.: Możliwość napawania brązu CuSn6 na podłoże stalowe przy zastosowaniu półautomatu spawalniczego TYROS-630. Praca dyplomowa AGH, Kraków 1999 (maszynopis).

* Wykaz literatury nie obejmuje norm cytowanych w pracy

- [17] Góral T.: Komputerowy przyrząd do monitorowania procesu spawania - sprawozdanie z badań własnych. Katedra Wytrzymałości i Technologii Maszyn Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Kraków 2002 (maszynopis).
- [18] Górecka R.: Teoria i technika eksperymentu. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998.
- [19] Haduch J.: Wpływ napawania na jakość warstw z brązu CuSn6. Przegląd Spawalnictwa, nr 1-2/1996.
- [20] Haduch J., Góral T.: Badania możliwości technologicznych napawania brązu CuSn6 na stal 15G2ANb przy pomocy półautomatu spawalniczego TYROS-630. Przegląd Spawalnictwa, nr 2-3/2001.
- [21] Herman P.: Bronzové trubičkové dráty MECUFIL[®] pro MIG pájení. Zváranie, nr 9-10/2002.
- [22] Hilton D., Norrish J.: Gazy osłonowe do spawania łukowego. Prace badawczo-rozwojowe firmy BOC Gazy, 1998.
- [23] Internet: www.itee.radom.pl, www.elkrem.com.pl.
- [24] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. WNT, Warszawa 1999.
- [25] Jarmoszuk S.: Spawanie metodą MAG. Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1996.
- [26] Joseph A., Webb C., Haramia M., Yapp D.: Variable polarity improves weld brazing of galvanized sheet. Welding Journal, nr 10/2001.
- [27] Kalinowski J., Nowak M.: Lutospawanie metodą MIG/MAG elementów ocynkowanych. Przegląd Spawalnictwa, nr 10-11/2000.
- [28] Katalog materiałów spawalniczych Welding Alloys, 2001.
- [29] Katalog spawalniczych drutów rdzeniowych Welding Alloys Group, 2005.
- [30] Klimpel A.: Spawanie zgrzewanie i cięcie metali. Technologie. WNT, Warszawa 1999.
- [31] Klimpel A.: Technologia napawania i natryskiwania cieplnego. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [32] Klimpel A.: Napawanie i natryskiwanie cieplne. Technologie. WNT, Warszawa 2000.

- [33] Klimpel A., Czupryński A., Rzeźnikiewicz A.: Wpływ kierunku i kąta pochylenia palnika GMA na jakość i własności technologiczne napoin wykonanych drutem cermetalowym. Przegląd Spawalnictwa, nr 4-5/2005.
- [34] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. WNT, Warszawa 2006.
- [35] Kou S: Welding Metallurgy. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2003.
- [36] Kowarsch A., Zaczek Z.: Spawanie konstrukcji okrętowych w osłonie gazów. Wyd. Morskie, Gdańsk 1984.
- [37] Krawczyk S. Góral T.: Badania tribologicznych właściwości mono- i dwuwarstwowych napoin z brązu CuSn6. 7th International Symposium INSYCONT '06 „Energy and Environmental Aspects of Tribology”, Kraków 2006.
- [38] Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [39] Madej E., Wrotkowski J.: Regeneracja części spawaniem i napawaniem. WNT, Warszawa 1973.
- [40] Menzel M.: Wpływ poszczególnych składników mieszanek gazów technicznych na proces spawania i właściwości złączy spawanych. Przegląd Spawalnictwa, nr 5/2002.
- [41] Mertes A.: Bronze: the other surfacing material. Welding Journal, nr 9/1995.
- [42] Messler R.W., Jr: Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, Inc., New York 1999.
- [43] Pierożek B., Lassociński J.: Spawanie łukowe stali w osłonach gazowych. WNT, Warszawa 1987.
- [44] Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali. Wyd. Śląsk, Katowice 1996.
- [45] Plewniak J., Służalec A.: Regeneracja metodami spawalniczymi. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1992.
- [46] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [47] Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo t.2; praca zbiorowa. WNT, Warszawa 1983.
- [48] Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo t.1; praca zbiorowa pod redakcją J. Pilarczyka. WNT, Warszawa 2003.
- [49] Poradnik Inżyniera Spawalnictwo t.2; praca zbiorowa pod redakcją J. Pilarczyka. WNT, Warszawa 2005.
- [50] Poradnik Mechanika t.1; praca zbiorowa. WNT, Warszawa 1984.

- [51] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie. WNT, Warszawa 1979.
- [52] Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo. WNT, Warszawa 1999.
- [53] Rohde H. i inni: ESAB pulsed gas-shielded metal arc brazing of surface-coated sheets. Svetsaren 3/2000.
- [54] Rohde H. i inni: Lutowanie blach ocynkowanych w osłonie gazów ochronnych przy użyciu łuku pulsującego. Przegląd Spawalnictwa, nr 10-11/2000.
- [55] Sacks R.J., Bohnart E.R.: Welding: principles and practices. Third edition, McGraw-Hill, New York 2005.
- [56] Schwarz B.: Lutowanie blach ocynkowanych w osłonie gazów ochronnych przy użyciu łuku pulsującego. Przegląd Spawalnictwa, nr 12/2000.
- [57] Sejš P.: Prispěvek k hodnotení vlastností a struktury MIG/MAG spajkových spojů tenkých pozinkovaných ocelových plechů. Zvaranie, Svarovani, nr 1-2/2003.
- [58] Skorupa A., Bał M., Haduch J.: Techniki spawalnicze w budowie i eksploatacji maszyn. Wyd. AGH, Kraków 1996.
- [59] Skorupa A., Haduch J., Góralski T.: Metody poprawy jakości napojów z brązu CuSn6 nanoszonych na podłoże stalowe. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, nr 5/2001.
- [60] Skorupa A., Haduch J., Góralski T.: Selected aspects of bronze pad welding on the steel background using MIG method. International Conference "Advanced Metallic Materials and Their Joining", Bratysława 2004.
- [61] Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
- [62] T-05 Tester typu rolka-kłosek, Instrukcja obsługi, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu.
- [63] Tasak E.: Spawalność stali. Fotobit, Kraków 2002.
- [64] Węgrzyn J.: Fizyka i metalurgia spawania. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1990.
- [65] Wojciechowski W.: Ocena napawalności stali stopowych. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1997.
- [66] Wojciechowski W.: Koncepcja współczynnika napawalności stali narzędziowych na podstawie teoretyczno-doświadczalnej oceny ich przydatności

do napawania. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Mechanika, Nr 84. Kraków 2001.

[67] Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane; praca zbiorowa pod redakcją J. Barzykowskiego. WNT, Warszawa 2004.

[68] Wykresy i dokumentacja do rotametrów wyprodukowanych przez Zakłady Automatyki „ROTAMETR”, 2003.

[69] Żaboliński Z.: Zwiększenie trwałości części maszyn budowlanych przez napawanie. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa 1987.

[70] Żaboliński Z.: Regeneracja części maszyn budowlanych przez napawanie brązem. Instytut Mechanizacji Budownictwa, Warszawa 1982.

10. Przebieg i wyniki badań

Badania nad doбором technologicznych parametrów napawania przeprowadzono na zmechanizowanym stanowisku badawczym (rys. 9.5). W trakcie badań mierzono i rejestrowano w sposób ciągły; natężenie prądu napawania I_n , napięcie łuku U_n , prędkość napawania v_n oraz temperaturę napawanej próbki T .

W celu ograniczenia liczby prób badania napawania brązu na podłoże stalowe zrealizowano w kilku etapach. W każdym z nich ocenę jakości napawanych ściegów przeprowadzono w oparciu o oględziny zewnętrzne, przyjmując kryteria podane w punkcie 7. W badaniach wstępnych dokonano serii prób, których celem było wyłonienie korzystnych zakresów technologicznych parametrów napawania przy układaniu pojedynczych ściegów napoin spełniających przedstawione wcześniej warunki jakościowe.

10.1. Wyznaczenie korzystnych zakresów technologicznych parametrów napawania

Badania wstępne przeprowadzono przy stałych parametrach technologicznych, takich jak: wylot drutu elektrodowego, indukcyjność spawalniczego źródła prądu, natężenie przepływu gazu osłonowego. Gazem osłonowym zastosowanym w tych badaniach wstępnych ze względu na koszty był czysty argon. Pozostałe parametry technologiczne, takie jak: prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} , napięcie łuku U_n , prędkość napawania v_n , traktowano jako zmienne, które podczas badań należy określić.

Technologiczne parametry napawania w tej serii ustalono opierając się na wskazówkach z literatury [25,31,32,70] i wcześniejszych rezultatach badań własnych [16,20,59], z których wynikało, że w celu ograniczenia porowatości napoin należy prowadzić proces technologiczny z zastosowaniem niewielkiego podgrzania wstępnego oraz małej energii liniowej napawania. Ograniczenie głębokości wtopienia wymaga, aby proces napawania przeprowadzić z zastosowaniem małej energii liniowej napawania E_n , zdefiniowanej wzorem 5.1. W związku z tym napięcie napawania U_n i prąd napawania I_n powinny być możliwie małe, ale tak dobrane, aby uzyskać stabilny łuk. Na źródle spawalniczym nastawia się wymagane napięcie łuku, natomiast prąd napawania zadaje się przez ustawienie odpowiednio małej

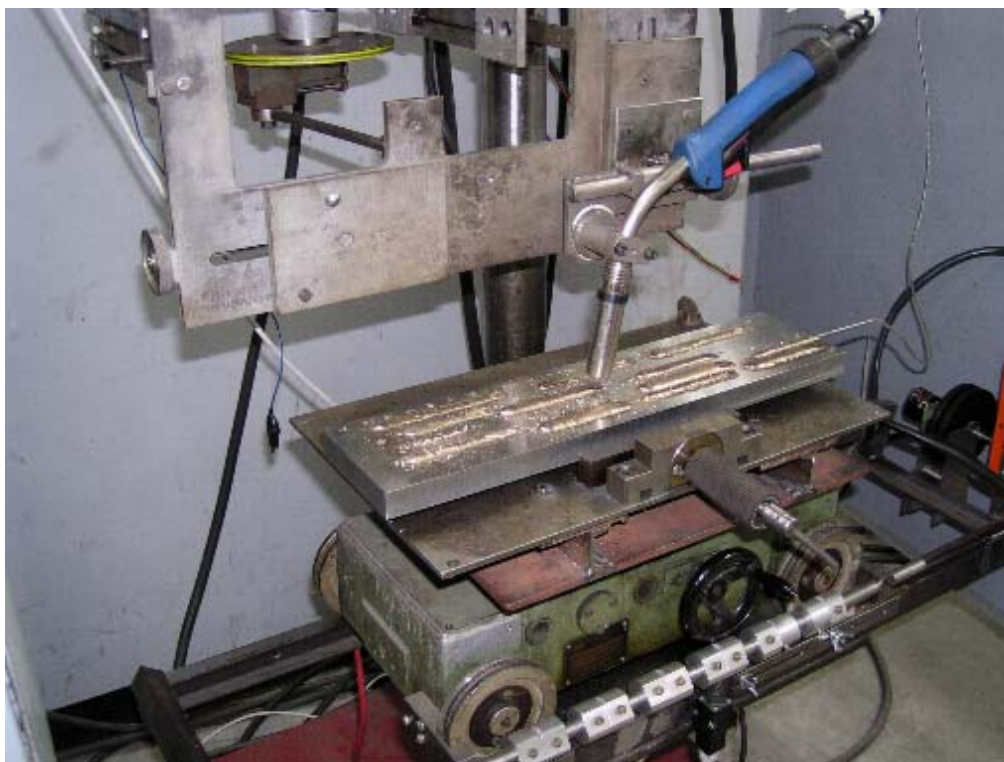
prędkości podawania drutu elektrodowego. Prędkość napawania v_n , powinna jednak być tak ustalona, aby zapewnić stabilność prowadzenia procesu napawania jak i niewielką głębokość wtopienia. Wartość współczynnika sprawności łuku η , dla stosowanej metody MIG przyjęto tak jak w badaniach [20,59,60] równą 0,5.

Technologiczne parametry napawania zastosowane we wstępnym etapie badań przedstawiono w tablicy 10.1.

Tablica 10.1. Zestawienie technologicznych parametrów napawania zastosowanych w wstępnym etapie badań

Parametr napawania	Symbol	Wartość
Prędkość podawania drutu elektrodowego	v_{el}	2,2 ÷ 7,4 [m/min]
Napięcie łuku	U_n	15 ÷ 25 [V]
Prędkość napawania	v_n	3 ÷ 12 [mm/s]
Odległość rurki prądowej od napawanego elementu	H	15 [mm]
Indukcyjność spawalniczego źródła prądu	L	5 wg danych producenta
Rodzaj gazu osłonowego	Ar	argon 100%
Przepływ gazu osłonowego	Q	15 [dm³/min]

Układanie napoin w wprowadzającym etapie badań przeprowadzono bez podgrzewania wstępnego oraz wykorzystując standardową dyszę gazu osłonowego uchwytu spawalniczego (rys.10.1), ale nie uzyskano zadowalających rezultatów, co ilustruje rys. 10.2. Stosując używaną już we wcześniejszych badaniach [16,20,59] dodatkową szerszą dyszę ochronną gazu osłonowego (por. rys.9.5), otrzymano lepsze rezultaty, ale mimo to pojawiały się problemy z zajarzaniem łuku i nie uzyskano prawidłowej napoiny spełniającej kryteria jakościowe; szczególnie na jej początku i końcu widoczne były ślady utlenienia (rys.10.3).



Rys.10.1. Stanowisko do zmechanizowanego napawania brązu ze standardową dyszą gazową uchwyty spawalniczego



Rys. 10.2. Napoiny uzyskane z zastosowaniem standardowej dyszy gazowej uchwyty spawalniczego



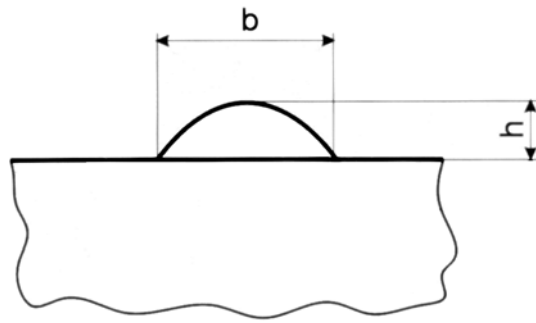
Rys. 10.3. Napoiny uzyskane z zastosowaniem dodatkowej szerszej dyszy gazowej uchwytu spawalniczego

Zastosowanie dodatkowego elektrozaworu, który włączany był niezależnie od włączania półautomatu spawalniczego, podobnie jak w metodzie TIG, spowodowało, że gaz osłonowy zaczynał płynąć wcześniej przed zajarzeniem łuku. Gaz osłonowy podawany w ten sposób, umożliwiał rozpoczęcie procesu napawania już w ochronnej atmosferze, zabezpieczającej łuk przed dostępem powietrza. Proces napawania kończyło wyłączenie podawania drutu elektrodowego, ale przepływ gazu osłonowego trwał aż do wystygnięcia jeziora spawalniczego i końcowej części napoiny. W wyniku tak zastosowanej osłony gazowej otrzymano nieutlenione napoiny pokazane na rys. 10.4.

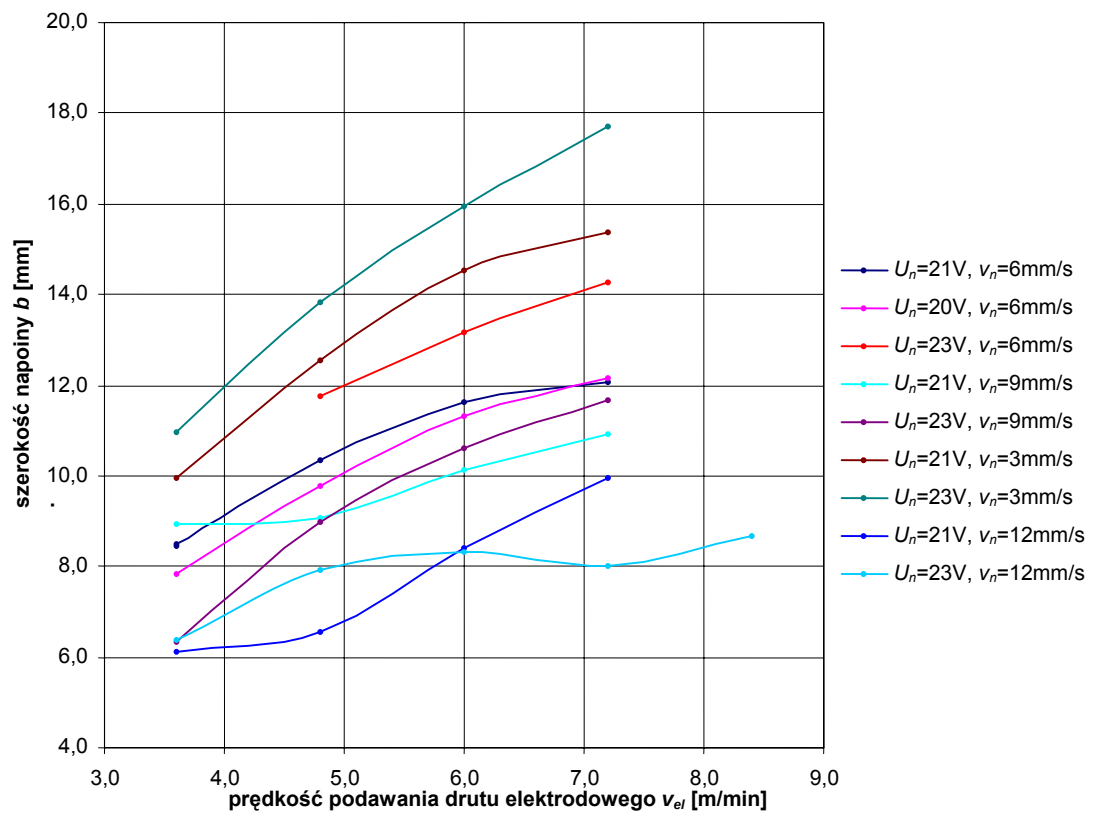


Rys. 10.4. Napoiny uzyskane z zastosowaniem dodatkowej szerszej dyszy gazowej uchwytu spawalniczego i niezależnym podawaniem gazu osłonowego

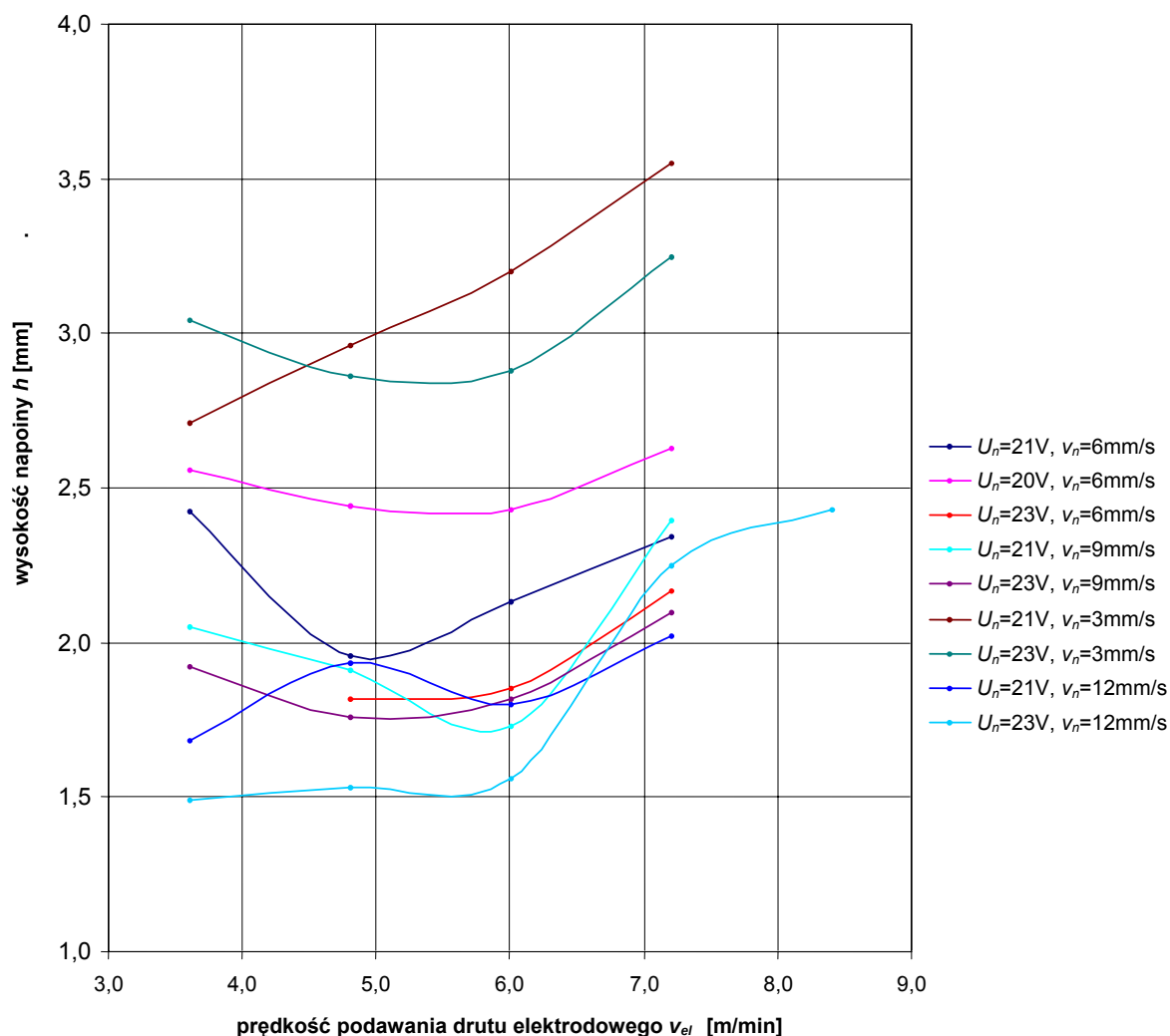
Przeprowadzone próby już z uzyskaniem odpowiednich, nieutlenionych napoin, po 10 pomiarach szerokości i wysokości każdej z napoin (rys. 10.5) suwmiarką z głębokościomierzem o dokładności odczytu 0,05 mm, pozwoliły na opracowanie wykresów zależności szerokości b (rys. 10.6) i wysokości h (rys. 10.7) napoiny od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} przy zadanych napięciach łuku spawalniczego U_n i prędkościach napawania v_n .



Rys. 10.5. Wymiary mierzone w celu określenia geometrii napoiny



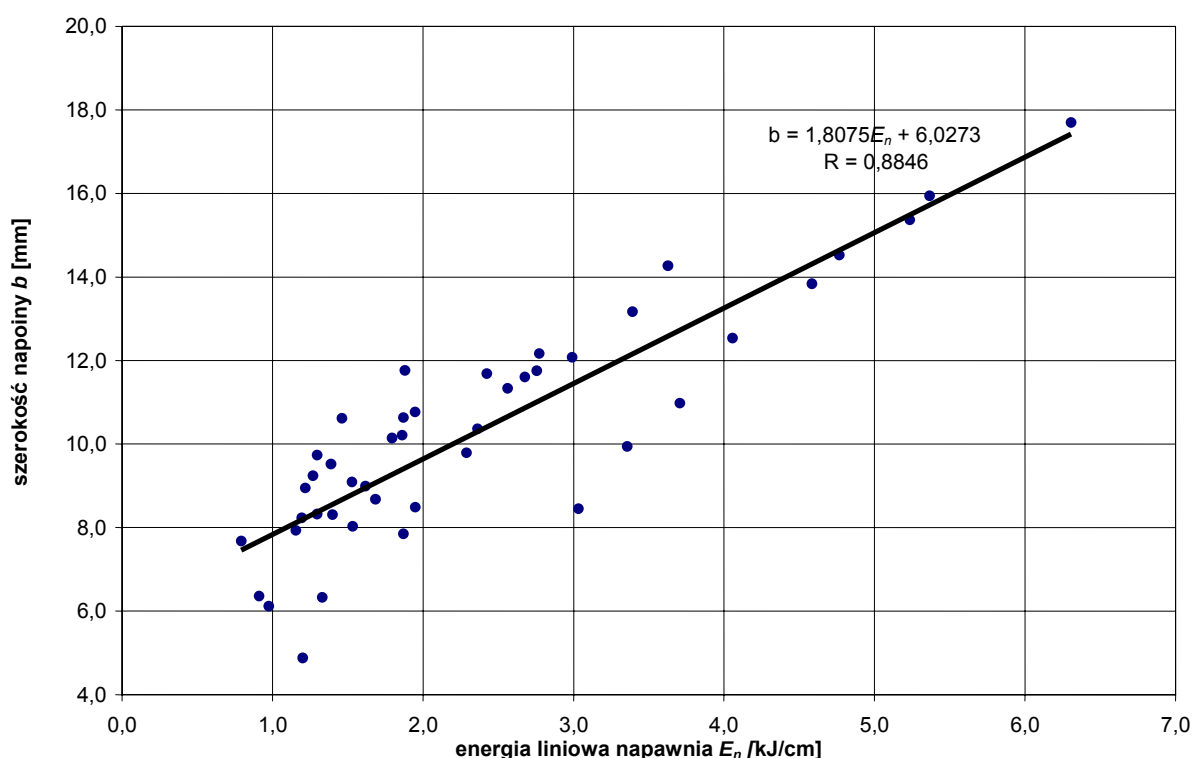
Rys. 10.6. Wykres zależności szerokości napoiny b od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el}



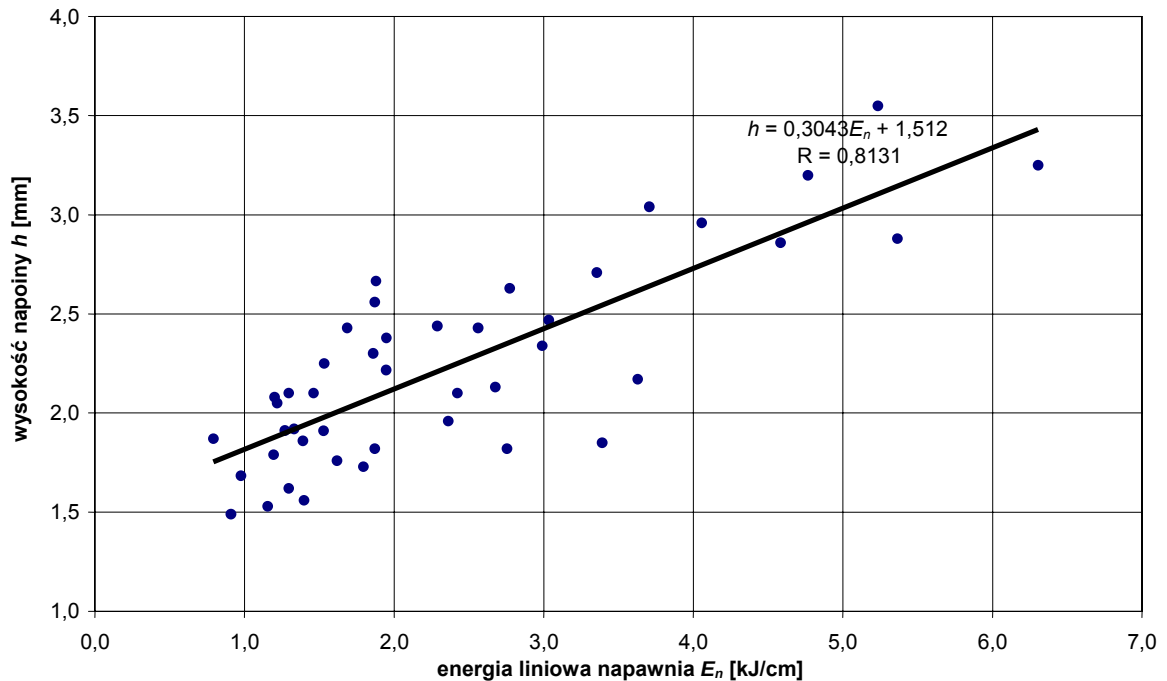
Rys. 10.7. Wykres zależności wysokości napoiny h od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el}

Z wykresów można wywnioskować, że ze wzrostem prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} i napięcia łuku spawalniczego U_n , a obniżaniem prędkości napawania v_n , rośnie szerokość napoiny b . Zmiana prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} i napięcia łuku spawalniczego U_n wpływa stosunkowo nieznacznie na zmianę wysokości napoiny h do ok. 0,5 mm. Jedynie bardziej wyraźna zależność wysokości napoiny h od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} jest widoczna przy najniższym napięciu 21 V i prędkości napawania 3 mm/s. Również obniżenie prędkości napawania do 3 mm/s wywołuje znaczny wzrost wysokości h w stosunku do pozostałych prędkości napawania. Zmiany prędkości napawania w zakresie 6÷12 mm/s nie powodują większych

zmian wysokości napoiny. Na podstawie sporządzonych wykresów zależności szerokości napoiny b (rys. 10.8) i wysokości napoiny h (rys. 10.9) od energii liniowej napawania E_n można zauważyć tendencję, że ze wzrostem energii liniowej napawania E_n wzrasta szerokość b i wysokość h napoin. Jednakże można także zaobserwować, że szerokości napoiny (rys. 10.8) dla tej samej lub niewiele różniącej się energii liniowej napawania E_n mogą różnić się nawet o 4 mm. Natomiast wysokości napoiny (rys. 10.9) dla tej samej lub zbliżonej energii liniowej napawania E_n różnią się o 1 mm. Można wnioskować więc, że znajomość wartości energii liniowej napawania E_n nie jest wystarczająca do precyzyjnego określenia wymiarów geometrycznych napoiny. Bardziej dokładne oszacowanie geometrii układanych ściegów wymaga jednak uwzględnienia tych technologicznych parametrów napawania, które nastawiamy bezpośrednio, tzn.; prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} , napięcia łuku spawalniczego U_n , i prędkości napawania v_n , a nie parametru wynikowego zależnego od nastawienia kilku parametrów jednocześnie, jakim jest energia liniowa napawania E_n .

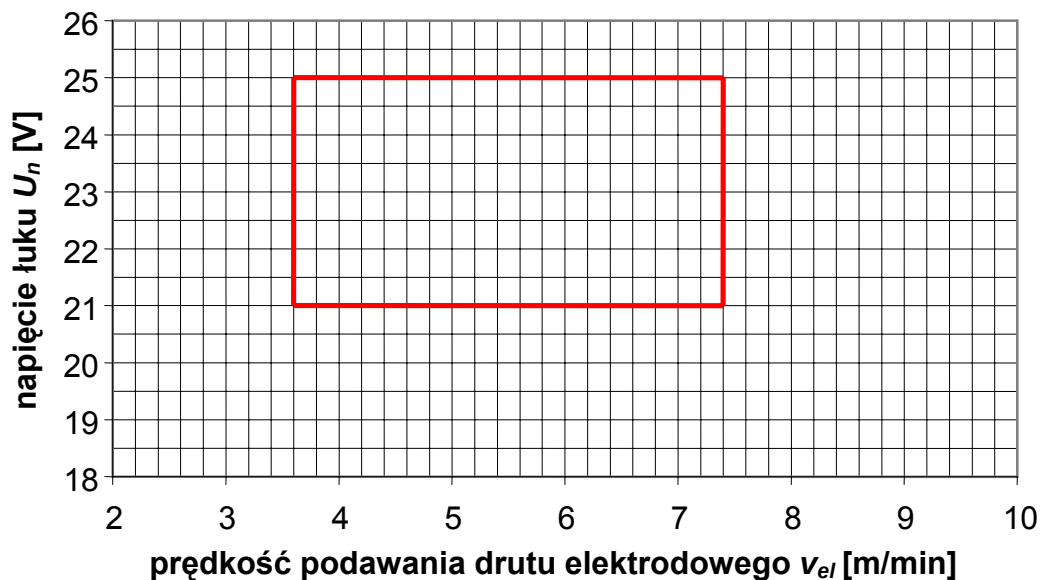


Rys. 10.8. Wykres zależności szerokości napoiny b od energii liniowej napawania E_n



Rys. 10.9. Wykres zależności wysokości napoiny h od energii liniowej napawnia E_n

Wyznaczony dla poszczególnych prędkości napawania tj. 3; 6; 9 mm/s wspólny obszar korzystnych parametrów pokazany został na rys. 10.10. Prędkość napawania $v_n = 12$ mm/s pominięto z tej przyczyny, że nie udało się uzyskać dla tej prędkości napoin spełniających wspomniane wcześniej kryteria jakościowe.



Rys. 10.10. Obszar napięcia łuku U_n i prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} pozwalający uzyskać napoiny spełniające kryteria jakościowe dla prędkości napawania $v_n = 3 \div 9$ mm/s

Jak widać z rys. 10.10 zakres prędkości podawania drutu elektrodowego mieścił się w granicach $3,6 \div 7,4$ m/min, napięcie łuku $21 \div 25$ V, a prędkość napawania $3 \div 9$ mm/s. Wartości pozostałych technologicznych parametrów napawania wynosiły, jak podano wyżej: wylot drutu elektrodowego 18 mm, indukcyjność spawalniczego źródła prądu 5 w jednostkach bezwymiarowych, natężenie przepływu gazu osłonowego - argonu $16 \text{ dm}^3/\text{min}$. Wytypowane wartości technologicznych parametrów napawania stanowiły bazę wyjściową dla przeprowadzenia badań w następnych etapach.

W trakcie badań ustalono także, że aby otrzymać napoiny bez porów konieczne jest wstępne podgrzanie napawanego elementu do temperatury co najmniej 60°C lub napawanie z energiami liniowymi większymi od $2,5 \text{ KJ/cm}$. Jednocześnie uzyskanie nieutlenionych powierzchni napoin wymaga utrzymywania temperatury materiału podłoża do 200°C .

Na podstawie wyników badań wstępnych przeprowadzono dalsze doświadczenia metodą planowania eksperymentu, których celem było wyznaczenie zależności matematycznych pomiędzy technologicznymi parametrami napawania metodą MIG a wymiarami geometrycznymi napoiny i głębokością wtopienia.

10.2. Planowanie eksperymentu

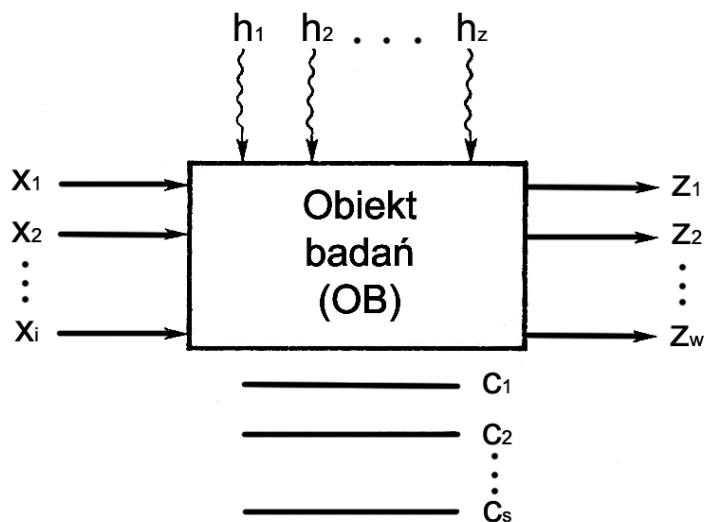
Obecnie często spotykamy się z obiektami badań nieopisanymi matematycznie, co uniemożliwia ich analizę, optymalizację lub sterowanie. Istnieją zatem potrzeby tworzenia modeli matematycznych rozważanego obiektu. Tendencje do automatyzacji procesów, ich złożona struktura, ograniczony czas na podjęcie decyzji i ograniczone nakłady na badania powodują, że najczęściej rezygnuje się z dokładnego opisu obiektu za pomocą modeli deterministycznych, opartych na znajomości zachodzących w nich zjawisk. Poszukuje się natomiast modeli przybliżonych – statystycznych, opisujących dany obiekt z zadowalającą, narzuconą z góry dokładnością. Również wykorzystywanie automatycznego projektowania przy użyciu programów komputerowych związane jest z koniecznością budowy adekwatnych modeli matematycznych [38].

Powyższe argumenty, a zwłaszcza redukcja kosztów badań i czasu ich trwania oraz duża liczba niezależnych wielkości wejściowych przesądziły o realizacji dalszych badań metodą planowania eksperymentu [18,34,38,46,67].

10.2.1. Podstawy planowania eksperymentu

W latach trzydziestych ubiegłego wieku R.A. Fisher zajął się problemem planowania doświadczeń w połączeniu z analizą wariancji. Prekursorstwo koncepcji Fishera polegało na tym, że jako pierwszy sformułował problem eksperymentu. Wcześniej badacze najpierw wykonywali pomiary, a potem analizowali otrzymane wyniki. Jeżeli doświadczenia zaplanowano niewłaściwie, to nawet najlepsza analiza niewiele mogła pomóc. Koncepcja Fishera polegała na założeniu, że na początku określa się cel i metodę analizy wyników pomiarów, a dopiero potem ustala się odpowiedni plan doświadczenia i realizuje pomiary. Plan doświadczenia musi równocześnie uwzględniać postulat, aby liczba pomiarów wymaganych wg tego planu była możliwie mała [18].

Plan doświadczenia to ustalony na podstawie przyjętych zasad, wynikających z teorii doświadczeń, zbiór układów wielkości wejściowych, dla których wyznacza się, za pomocą właściwych obiektowi badań (rys.10.11) metod i środków pomiarowych, odpowiadające im zbiory wartości wielkości wyjściowych. Plan doświadczenia stanowi więc n układów wartości wielkości wejściowych, którym odpowiada n wyników pomiarów, z których każdy obejmuje pojedyncze pomiary o pewnej liczbie powtórzeń, na podstawie których wyznacza się właściwe miary statystyczne wielkości wyjściowej [46].



Rys. 10.11. Wielkości charakteryzujące obiekt badań (OB): x – wielkości wejściowe, z – wielkości wyjściowe, c – wielkości stałe, h – wielkości zakłócające [46]

Plany doświadczenia przyjęte w pracy, posłużyły do matematycznego opisu zależności, których poznanie pozwoliło na wyznaczenie wymiarów geometrycznych napoyny i głębokości wtopienia od technologicznych parametrów napawania.

Należy podkreślić fakt, że w przypadku niniejszej pracy zastosowanie planowania eksperymentu było niezbędne. Wpłynęła na to przede wszystkim duża liczba wielkości wejściowych (3 lub 4 w zależności od liczby branych pod uwagę technologicznych parametrów napawania) oraz koszty materiałów przeznaczonych na wykonanie próbek. Natomiast dzięki obróbce wyników pomiarów uzyskano przede wszystkim rzetelny (5 pomiarów dla każdej wykonanej napoiny) matematyczny opis wielkości wyjściowych.

10.2.2. Klasyfikacja planów doświadczenia

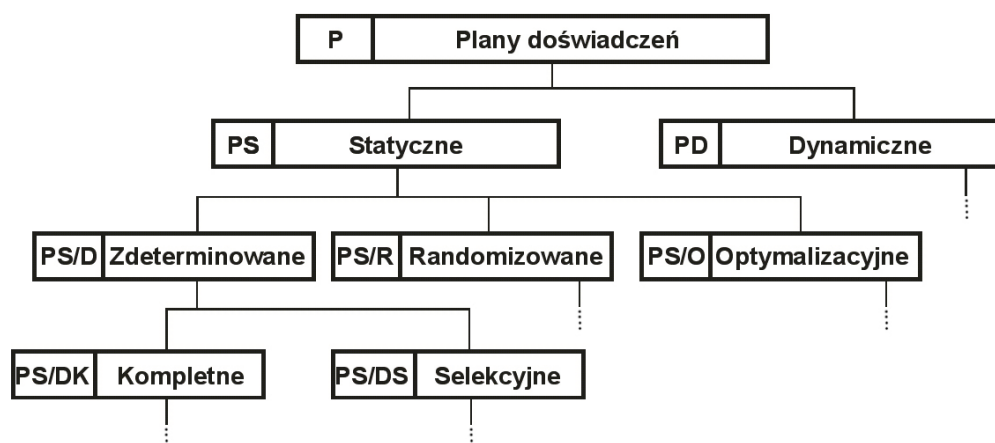
Decyzja o wyborze jednego spośród wielu planów doświadczeń determinuje możliwość przeprowadzenia planowania eksperymentu. Jej bardzo duże znaczenie wynika nie tylko z punktu widzenia możliwości badawczych wykonującego eksperyment, ale wpływa także na późniejszą ocenę wyników pomiarów wielkości wyjściowej, a szczególnie ma wpływ na możliwość znalezienia funkcji adekwatnej, która możliwie najdokładniej „opisuje” wartość wyjściową.

Oprócz spełnienia powyższego kryterium, odpowiedni plan eksperymentu ułatwia techniczno-organizacyjne przygotowanie badań. Dysponując odpowiednim programem, planuje się badania przygotowując materiał doświadczalny (np. do napawania metodą MIG odpowiednie ilości drutu i gazów osłonowych jako materiały dodatkowe i blachy na materiał podłoża) oraz warunki pomiarów (np. zapewnienie technicznej możliwości prawidłowego funkcjonowania obiektu badań w przyjętych układach wielkości wejściowych) [46].

Z uwagi na dużą ilość dostępnych obecnie planów doświadczeń (rys. 10.12), już na początku pojawia się problem z wyborem najodpowiedniejszego z nich dla określonego obiektu badań. Według [18] właściwie dobrany plan doświadczenia stanowi gwarancję uzyskania oczekiwanej informacji, określonej jako cel badań, i to przy ograniczonych do niezbędnego minimum nakładach finansowych i czasie badań.

Plany zdeterminowane (rys. 10.12) stanowią podstawową grupę planów stosowanych aktualnie w badaniach doświadczalnych, a ich podstawową cechą jest to, że tworzące je układy wartości wielkości wejściowych zostały ustalone na podstawie pewnych logicznych przyczyn [18,46]. W tej grupie wyróżnia się plany:

- kompletne PS/DK,
- selekcyjne PS/DS.



Rys. 10.12. Podstawowe grupy planów doświadczeń [46]

Podstawową cechą planów kompletnych PS/DK jest to, że liczba układów wartości wielkości wejściowych jest największą liczbą, jaka może być utworzona przy ustalonym zakresie zmienności i przyjętej dyskretyzacji tych wartości. Liczba ta jest zwykle bardzo duża, np. dla dziesięciu wielkości ($i = 10$) oraz dziesięciu wartości każdej z nich ($n_{max} = 10$) wynosi $n = 10^{10}$; dlatego też rozwój współczesnej teorii doświadczeń zmierza zdecydowanie do opracowania takich planów, które zachowując zdolność do utworzenia funkcji obiektu badań, odznaczają się ograniczeniem do „rozsądnych” granic liczb układów wartości wielkości wejściowych, a tym samym ilości pomiarów wymaganych do realizacji planu.

Postulat ten spełnia szczególnie liczna grupa planów selekcyjnych. Podstawową cechą programów statycznych zdeterminowanych selekcyjnych PS/DS jest to, że liczba tworzących je układów wartości wielkości wejściowych została znacznie zmniejszona w stosunku do liczby układów planu kompletnego, przy zachowaniu możliwości określenia funkcji obiektu badań. Z tego względu w niniejszych badaniach zastosowano te właśnie plany.

Plan selekcyjny utworzony jest w wyniku wyboru pewnych układów z planu kompletnego, przy zastosowaniu ewentualnych modyfikacji układów. Zarówno wybór jak i modyfikacja przeprowadzane są na podstawie różnych zasad i kryteriów. Stąd różnorodność planów selekcyjnych. Oznacza to, że jeśli ustalona liczba wielkości wejściowych i oraz liczba ich wartości n_k prowadzi do jednoznacznego ustalenia liczby układów planu kompletnego PS/DK, to w tych samych warunkach można stosować różne plany selekcyjne PS/DS

charakteryzujące się różnymi układami. Wybór właściwego w danych warunkach planu to podstawowy cel metodyki badań doświadczalnych [46].

10.2.3. Kryteria wyboru planu doświadczenia

Wybór planu doświadczenia stanowi, jak już wcześniej wspomniano jedną z najważniejszych decyzji, którą podejmuje się zaraz na początku badań doświadczalnych. Na decyzję tę mają wpływ co najmniej trzy podstawowe kryteria:

- informacja o obiekcie badań, a zwłaszcza o rodzaju obiektu i jego własnościach,
- jakościowy model matematyczny obiektu badań, związany bezpośrednio ze stanem znajomości właściwych temu modelowi podstaw teoretycznych,
- cel badań doświadczalnych, a zwłaszcza, czy są to badania poznawcze, użyteczne lub badania łączące obydwa cele razem.

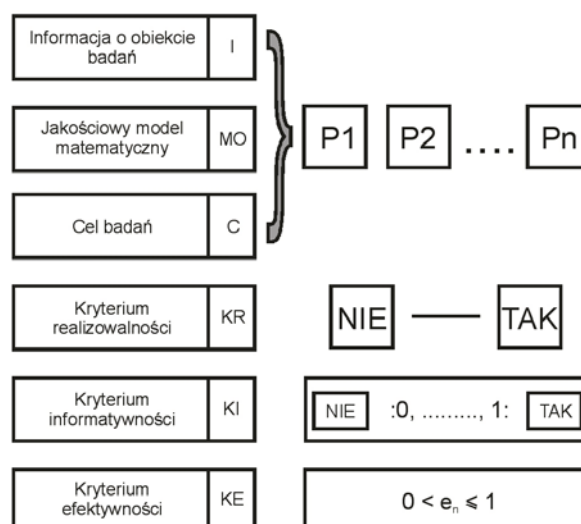
Przesłanki powyższe są jednak zbyt ogólne, aby mogły stanowić podstawę do wyboru konkretnego planu. Niezbędne jest bardziej dokładne określenie kryteriów wyboru planu. Każde badanie to przypadek szczególny, dlatego też tworzy się często własne kryteria lub kieruje się intuicją. Bardzo pomocne zwłaszcza dla mniej doświadczonego badacza jest wskazanie ogólnych kryteriów wyboru planu doświadczenia.

Proponuje się przyjmować trzy kryteria wyboru planu (rys. 10.13):

- kryterium realizowalności (KR),
- kryterium informatywności (KI),
- kryterium efektywności (KE).

Kryterium realizowalności (KR) to sprawdzenie, czy plan doświadczenia jest możliwy do zrealizowania w odniesieniu do rzeczywistego obiektu badań przy zastosowaniu określonych metod i środków pomiarowych. Szczególnie kryterium realizowalności oznacza, że:

- obiekt badań funkcjonuje prawidłowo w przyjętych układach (skojarzeniach) wartości wielkości wejściowych,
- wielkości wejściowe i wielkości stałe obiektu badań są mierzalne z dopuszczalną niedokładnością, a ponadto wielkości wejściowe są sterowalne, tzn. wartości ich mogą być ustalone z niedokładnością mniejszą od zakresu zmian narzucanych przez plan doświadczenia.



Rys.10.13. Zasady wyboru planu doświadczenia; $P1 \div Pn$ – liczba planów doświadczenia, e_n – współczynnik efektywności (stosunek wymaganej liczby pomiarów dowolnego planu do liczby pomiarów wymaganych do realizacji planu kompletnego) [46]

Spełnienie kryterium realizowalności jest niezbędne, aby plan mógł być uwzględniany w dalszej analizie. Rezultat oceny planu na podstawie kryterium realizowalności, przy uwzględnieniu wszelkich ewentualnych poprawek i modyfikacji obiektu badań, stanowi alternatywę TAK-NIE. Plany uzyskujące kwalifikację NIE zostają wyłączone z dalszej analizy, natomiast plany z oceną TAK, podlegają sprawdzeniu z zastosowaniem następnego kryterium - informatywności.

Informatywność badań doświadczalnych określana jest ilością informacji, którą uzyskuje się na podstawie analizy wyników badań, przy czym kryterium informatywności (KI) to sprawdzenie, czy plan przyjęty do realizacji doświadczenia zapewnia uzyskanie informacji niezbędnej do spełnienia celu badań. Ponieważ różne są cele badań doświadczalnych, zatem różne mogą być sposoby oceny planów na podstawie kryterium informatywności.

Podstawowym, a zarazem najbardziej ogólnym kryterium informatywności jest sprawdzenie, czy plan doświadczenia umożliwia utworzenie modelu matematycznego obiektu badań. Odpowiedź może stanowić w tym przypadku alternatywę TAK-NIE, a wybór odpowiedzi jest decyzją arbitralną. Pozostaje kwestia ostatecznego wyboru, który przeprowadza się z wykorzystaniem kryterium efektywności planu.

Kryterium efektywności (KE) to sprawdzenie, czy plan doświadczenia, możliwy do realizacji i zapewniający informatywność odpowiadającą celowi badań, jest jednocześnie planem minimalizującym nakłady wymagane do jego realizacji. Jeżeli porównywane plany uznaje się za równoważne ze względu na ich informatywność (spełniające cel badań — ocena TAK), a nakłady wyrazi się w postaci środków finansowych, nie uwzględniając czasu przeprowadzania badań, to ocena jest stosunkowo prosta – wybiera się plan wymagający najmniejszych środków finansowych do jego realizacji. Wygodnie jest przy tym założyć, że nakłady są proporcjonalne do liczby pomiarów, wymaganych do wykonania planu doświadczenia i wybrać plan wymagający najmniejszej liczby pomiarów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy kryteriów wyboru planu doświadczenia stwierdzono, że planami, które spełniają wszystkie wymagania stawiane przez te kryteria są plany z „rodziny” planów poliselekcyjnych (wieloczynnikowych), które należą do podstawowego nurtu rozwoju współczesnej teorii doświadczeń. Również przeprowadzone własne próby napawania drutem stalowym (zastosowanym w celu oszczędnościowym) z wykorzystaniem kilku planów przy pozostałych parametrach identycznych jak dla drutu z brązu, wykazały, że najodpowiedniejszym planem do badań wpływu technologicznych parametrów napawania brązu na podłoże stalowe jest plan typu Boxa-Benkena (PS/DS.-P:(Bo-Be)_i) – dla trzech lub czterech wartości wejściowych [46].

10.3. Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoiny i głębokość wtopienia w osłonie czystego argonu

Korzystając z wyników badań wstępnych i wyznaczonych zakresów technologicznych parametrów napawania, przeprowadzono eksperymenty mające określić wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię i głębokość wtopienia w osłonie czystego argonu, wykorzystując do tego celu plan Boxa-Benkena.

W planie eksperymentu uwzględniono następujące wielkości:

- wejściowe (por. rys. 10.10):

- prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} ($3,6 \div 7,4$ m/min),
- napięcie napawania U_n ($21 \div 25$ V),
- prędkość napawania v_n ($3 \div 9$ mm/s),

- stałe:

- odległość rurki prądowej od napawanego elementu H (18 mm),
- indukcyjność L spawalniczego źródła prądu (5),
- temperatura wstępnego podgrzania (międzyściegowa) T_o ($60 \div 200^\circ\text{C}$),
- rodzaj gazu osłonowego – argon (100 %),
- przepływ gazu osłonowego Q ($16 \text{ dm}^3/\text{min}$),

- wyjściowe:

- szerokość napoiny b [mm],
- wysokość napoiny h [mm],
- głębokość wtopienia g [mm].

W planie eksperymentu wprowadzono relacje kodowe czynników. Wartości graniczne x_{kmax} i x_{kmin} każdego z badanych czynników zastąpiono symbolem „1” oraz „-1” (wartości normowane). Dysponując zakresem wartości czynników badanych (rzeczywistych) $x_{i min} \div x_{i max}$ według poniższego wzoru, ustala się centrum programu oznaczone symbolem „0”:

$$x_{k0} = \frac{x_{kmax} + x_{kmin}}{2} \quad (10.1)$$

W celu określenia funkcji aproksymującej i przeprowadzenia weryfikacji istotności dla normowanych wielkości wejściowych posłużono się programem komputerowym CADEX ESDET 2.0 [18], który dla każdej funkcji aproksymującej dołącza odpowiednie relacje normowania. Przyjęty zakres wielkości wejściowych dla planu Boxa-Benkena podano w tab. 10.2. Plan Boxa-Benkena wraz z wartościami rzeczywistymi i unormowanymi zestawiono w tab. 10.3.

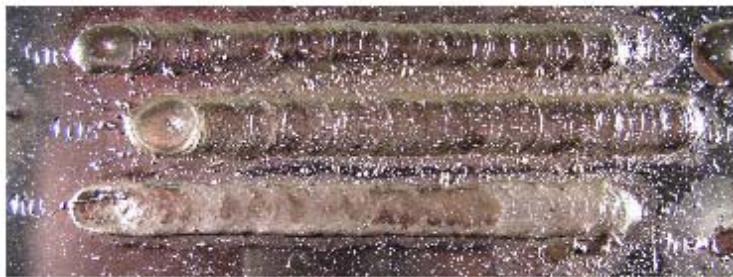
Tablica 10.2. Zakres parametrów wejściowych przyjętych do planu Boxa-Benkena w pierwszym etapie badań

Zmienne wejściowe przyjęte do planu eksperymentu	Oznaczenie zmiennej	Wartość minimalna (-1)	Wartość średnia (0)	Wartość maksymalna (+1)
prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} [m/min]	$X1$	3,6	5,5	7,4
napięcie napawania U_n [V]	$X2$	21	23	25
prędkość napawania v_n [mm/s]	$X3$	3	6	9

Tablica 10.3. Plan Boxa-Benkena dla wartości rzeczywistych i unormowanych w pierwszym etapie badań

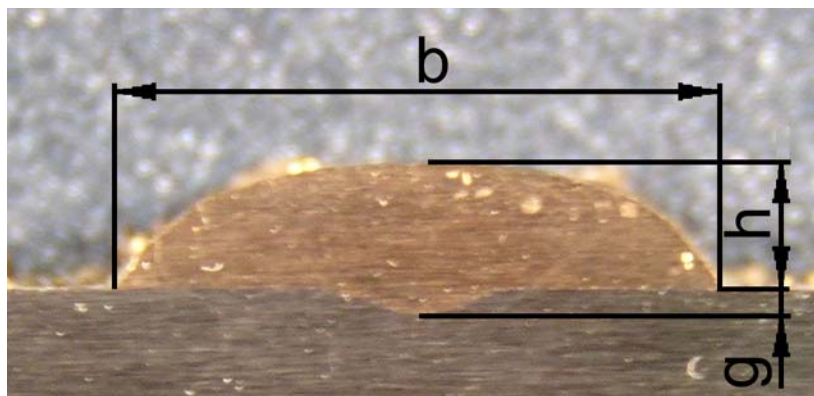
Układ planu	Technologiczne parametry napawania			Relacje normowania dla planu Boxa-Benkena		
	v_{el} [m/min]	U_n [V]	v_n [mm/s]	$X1$	$X2$	$X3$
1	7,4	25	6	+1	+1	0
2	3,6	25	6	-1	+1	0
3	7,4	21	6	+1	-1	0
4	3,6	21	6	-1	-1	0
5	7,4	23	9	+1	0	+1
6	3,6	23	9	-1	0	+1
7	7,4	23	3	+1	0	-1
8	3,6	23	3	-1	0	-1
9	5,5	25	9	0	+1	+1
10	5,5	21	9	0	-1	+1
11	5,5	25	3	0	+1	-1
12	5,5	21	3	0	-1	-1
13	5,5	23	6	0	0	0
14	5,5	23	6	0	0	0
15	5,5	23	6	0	0	0

Długość wykonywanych ściegów w tym etapie badań wynosiła 100 mm (rys. 10.14).



Rys. 10.14. Przykładowe napoiny uzyskane w pierwszym etapie badań

Wyniki w postaci średniej z pięciu pomiarów na długości ściegu zaprezentowano w tablicy 10.4. Pomiaru szerokości i wysokości ściegu dokonano suwmiarką z głębokościomierzem o dokładności odczytu 0,05 mm. Głębokość wtopienia po poprzecznym przecięciu próbek i przeszlifowaniu powierzchni czołowych zmierzono mikroskopem warsztatowym MWD o wartości działki elementarnej 0,01 mm (rys. 10.15).



Rys. 10.15. Wymiary mierzone w celu określenia geometrii napoiny i głębokości wtopienia

Tablica 10.4. Wyniki pomiarów wymiarów geometrycznych i głębokości wtopienia pojedynczego ściegu dla poszczególnych układów planu eksperymentu w pierwszym etapie badań

Układ planu	Technologiczne parametry napawania			Wymiary geometryczne i głębokość wtopienia pojedynczych ściegów		
	v_{el} [m/min]	U_n [V]	v_n [mm/s]	b [mm]	h [mm]	g [mm]
1	7,4	25	6	11,90	2,72	3,16
2	3,6	25	6	8,13	1,73	0,66
3	7,4	21	6	11,45	2,20	2,09
4	3,6	21	6	7,49	2,08	0,31
5	7,4	23	9	8,32	2,41	1,89
6	3,6	23	9	6,63	1,72	0,13
7	7,4	23	3	17,63	3,18	1,42
8	3,6	23	3	11,00	2,80	0,44
9	5,5	25	9	9,94	1,38	1,57
10	5,5	21	9	8,95	1,55	0,92
11	5,5	25	3	17,27	2,40	0,71
12	5,5	21	3	13,75	2,92	0,53
13	5,5	23	6	11,19	1,76	1,52
14	5,5	23	6	10,55	2,09	1,97
15	5,5	23	6	10,95	1,74	1,48

Otrzymane w rezultacie przeprowadzonych prób wyniki badań poddano analizie matematycznej przy pomocy programu komputerowego CADEX ESDET 2.0. Wyznaczanymi zależnościami były funkcje szerokości, wysokości i głębokości wtopienia od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} , napięcia napawania U_n i prędkości napawania v_n :

- $b = F_1(v_{el}, U_n, v_n)$,
- $h = F_2(v_{el}, U_n, v_n)$,
- $g = F_3(v_{el}, U_n, v_n)$.

Po wprowadzeniu wyników pomiarów wielkości wyjściowych (tab.10.4) do programu komputerowego przeprowadzono aproksymację funkcji i obiektu badań

za pomocą wielomianów algebraicznych ze składnikami liniowymi, kwadratowymi oraz interakcją o postaci ogólnej:

$$z = b_0 + b_1x + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{i-1}x_{i-1}x_i \quad (10.2)$$

gdzie:

b_i - współczynniki funkcji aproksymującej

Wpływ poszczególnych parametrów wejściowych został określony przez współczynniki wielomianów dla wielkości normowanych z przedziału $(-1, +1)$. Za pomocą programu komputerowego wyznaczono odpowiednie relacje normowania. Funkcje uproszczone utworzono przez wyeliminowanie współczynników nieistotnych za pomocą testu Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Postać równań matematycznych opisujących wielkości wyjściowe w funkcji technologicznych parametrów procesu napawania dla wartości rzeczywistych przedstawiono poniżej:

- szerokość napoiny b [mm]:

$$\begin{aligned} b = & 10,8966667 + 2,00625(0,53v_{ef}-2,89) + 0,7(0,5U_n-11,5) - 3,22625(0,33v_n-2) \\ & - 1,36833333(0,53v_{ef}-2,89)^2 - 0,0475(0,53v_{ef}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & - 1,235(0,53v_{ef}-2,89)(0,33v_n-2) + 0,214166667(0,5U_n-11,5)^2 \\ & - 0,6325(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) + 1,36666667(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

- szerokość napoiny b [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$\begin{aligned} b = & 11,0284615 + 2,00625(0,53v_{ef}-2,89) + 0,7(0,5U_n-11,5) - 3,22625(0,33v_n-2) \\ & - 1,38480769(0,53v_{ef}-2,89)^2 - 1,235(0,53v_{ef}-2,89)(0,33v_n-2) + 1,35019231(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

- wysokość napoiny h [mm]:

$$\begin{aligned} h = & 1,86333333 + 0,2725(0,53v_{ef}-2,89) - 0,065(0,5U_n-11,5) - 0,53(0,33v_n-2) \\ & + 0,392083333(0,53v_{ef}-2,89)^2 + 0,2175(0,53v_{ef}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & + 0,0775(0,53v_{ef}-2,89)(0,33v_n-2) - 0,0729166667(0,5U_n-11,5)^2 \\ & + 0,0875(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) + 0,272083333(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

- wysokość napoiny h [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$h=2,17866667-0,53(0,33v_n-2)$$

- głębokość wtopienia g [mm]:

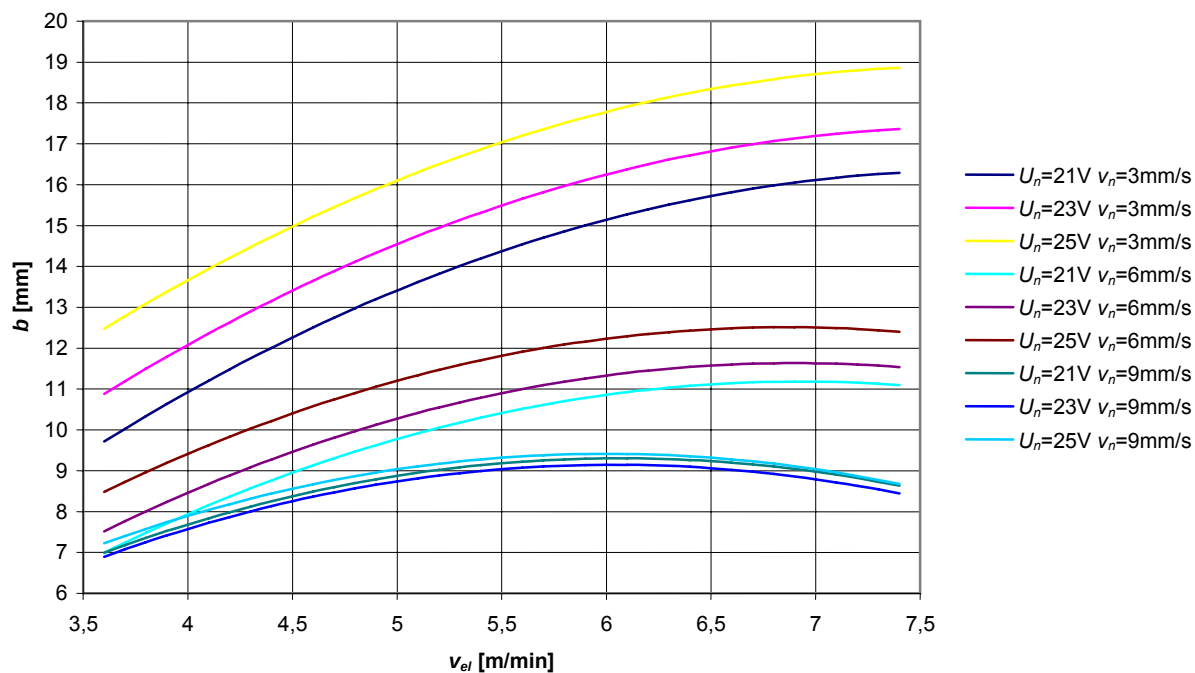
$$\begin{aligned} g= & 1,65666667+0,8775(0,53v_{el}-2,89)+0,28125(0,5U_n-11,5)+0,17625(0,33v_n-2) \\ & -0,0320833333(0,53v_{el}-2,89)^2+0,18(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & +0,195(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2)-0,0695833333(0,5U_n-11,5)^2 \\ & +0,1175(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2)-0,654583333(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

- głębokość wtopienia g [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

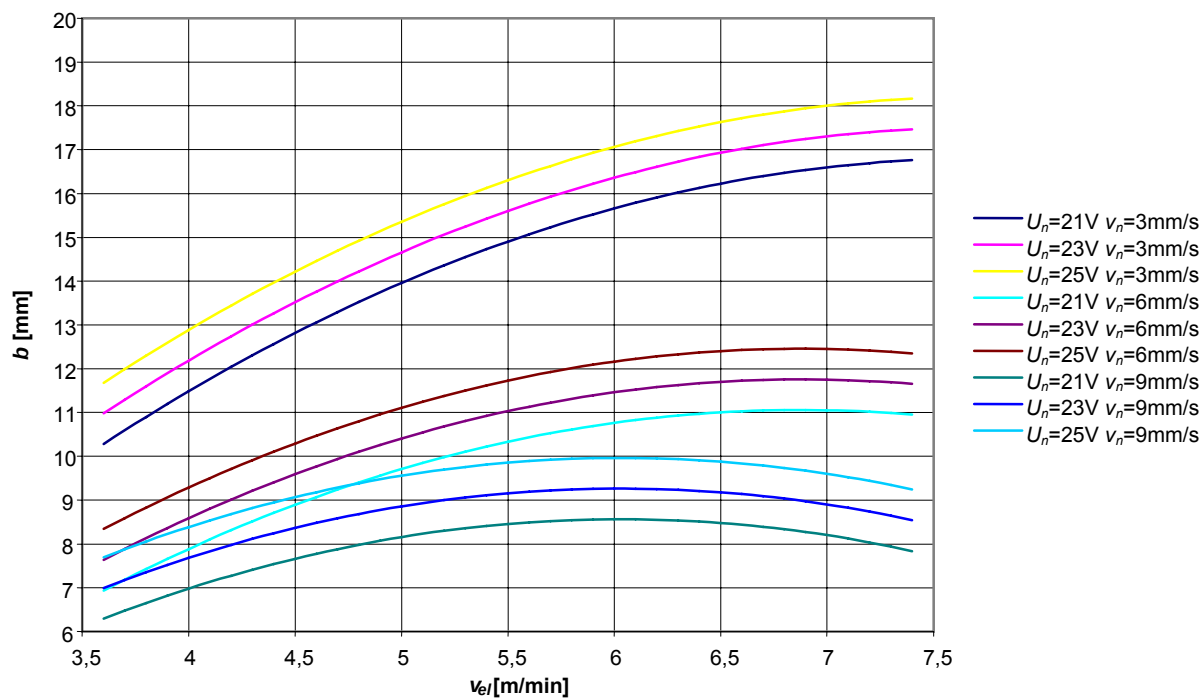
$$g=1,59857143+0,8775(0,53v_{el}-2,89)-0,647321429(0,33v_n-2)^2$$

Równania te z pewnym przybliżeniem pozwalają na obliczenie wielkości wyjściowych w zależności od czynników wejściowych w całym badanym zakresie technologicznych parametrów napawania.

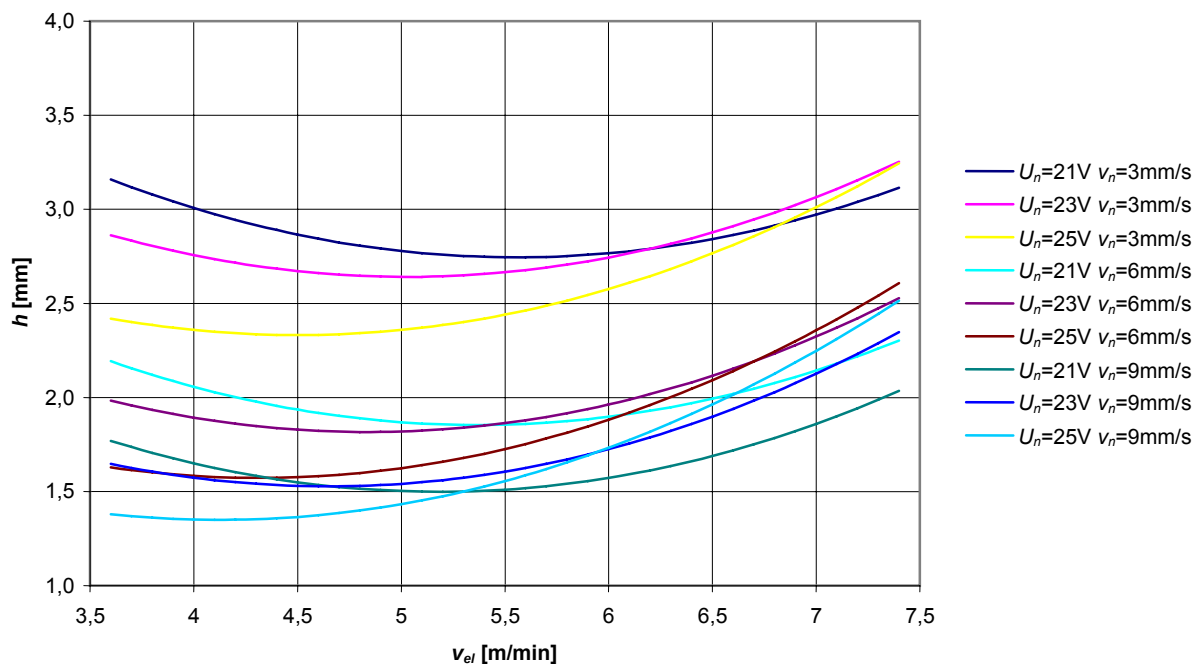
Wykresy wyżej wyznaczonych funkcji pokazano na kolejnych rysunkach 10.16-10.21.



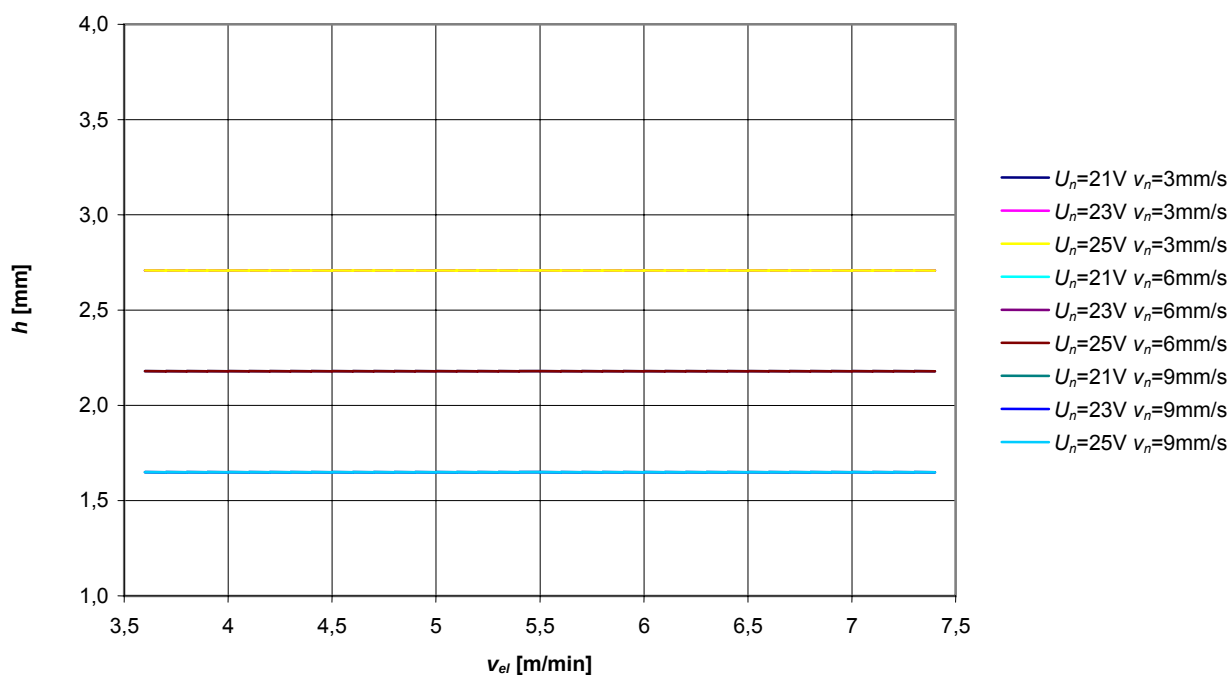
Rys. 10.16. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na szerokość napoin b w osłonie czystego argonu



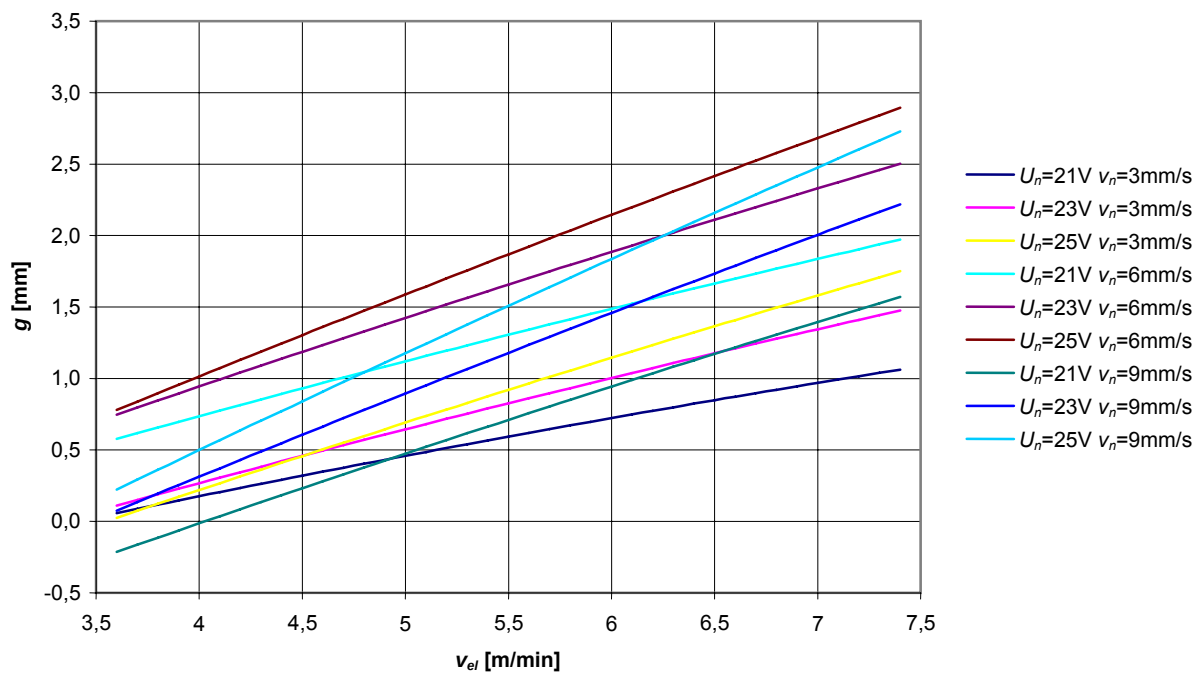
Rys. 10.17. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na szerokość napoin b w osłonie czystego argonu dla funkcji uproszczonej



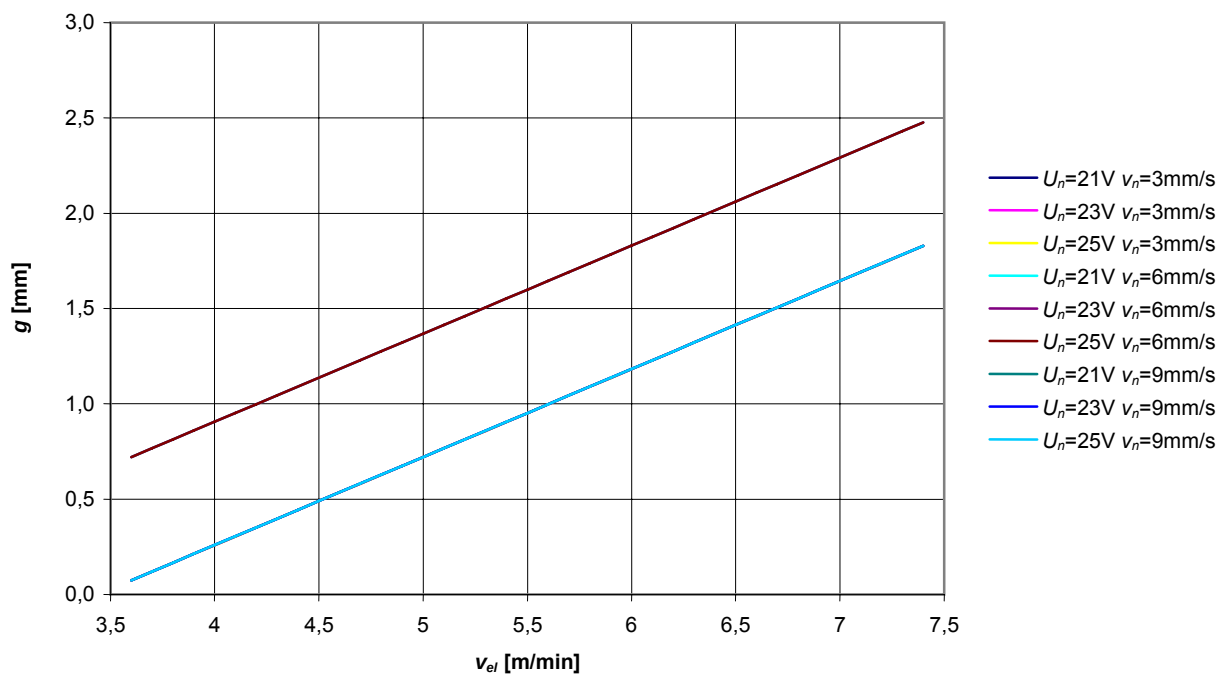
Rys. 10.18. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na wysokość napoin h w osłonie czystego argonu



Rys. 10.19. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na wysokość napoin h w osłonie czystego argonu dla funkcji uproszczonej



Rys. 10.20. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na głębokość wtopienia g w osłonie czystego argonu



Rys. 10.21. Wpływ prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} na głębokość wtopienia g w osłonie czystego argonu dla funkcji uproszczonej

Analizując otrzymane zależności funkcyjne i wykresy można wywnioskować, że:

- 1) Dla funkcji uwzględniającej wszystkie współczynniki szerokość napoiny b mieści się w zakresie $6,9 \div 18,9$ mm. Jej szerokość rośnie znacząco ze wzrostem prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} (rys.10.16). Jedynie dla prędkości podawania drutu elektrodowego powyżej 6 m/min i prędkości napawania 9 mm/s można zaobserwować nieznaczne zmniejszenie szerokości napoiny. Może to być spowodowane tym, że w trakcie napawania przy dużych prędkościach napawania i podawania drutu elektrodowego, napoina nie zdąży się rozpląnąć, ulegając wcześniej zastygnięciu. Zmniejszenie prędkości napawania v_n przy niezmiennych pozostałych technologicznych parametrach napawania znacznie zwiększa szerokość napoiny. Zwiększenie napięcia daje szerszą napoinę przy mniejszych prędkościach napawania (3 i 6 mm/s), zaś przy prędkości 9 mm/s jest to zmiana minimalna. Dla funkcji uproszczonej dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ (rys.10.17) przebieg zmian szerokości jest podobny jak w powyższym opisie. Jedynie można zauważyć silniejszy wpływ napięcia na szerokość dla wyższych prędkości napawania.
- 2) Wysokość napoin h wynosi od 1,4 do 3,3 mm dla funkcji ze wszystkimi współczynnikami (rys.10.18). Zmiana prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} rzadko wywołuje zmiany wysokości napoiny większe niż 0,5 mm. Zwiększenie prędkości podawania drutu elektrodowego w lewej części wykresu powoduje zmniejszenie wysokości napoiny, by w jego dalszej części wywołać jej wzrost. Tylko dla wyższych napięć (25 V) można zaobserwować, że zwiększanie prędkości podawania drutu elektrodowego wywołuje najpierw niewielki spadek wysokości, a później następuje znaczący jej wzrost. Napięcie ma podobnie jak prędkość podawania drutu elektrodowego wpływ na wysokość napoiny do ok. 0,5 mm. Dla funkcji uwzględniającej wszystkie współczynniki większy wpływ na wysokość napoiny h ma jedynie prędkość napawania v_n , a dla funkcji uproszczonej jest jedynym parametrem wpływającym na nią (rys.10.19).
- 3) Głębokość wtopienia g wynosi do 2,9 mm (rys.10.20). Znaczenie fizyczne mają jedynie linie znajdujące się w części dodatniej wykresu. Wartość ujemna może być natomiast informacją o możliwości przyklejenia i braku

przetopu. Wzrost prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} znacząco wpływa na zwiększenie głębokości wtopienia g , zarówno dla funkcji ze wszystkimi współczynnikami jak i dla funkcji uproszczonej (rys.10.21). Zmiany napięcia U_n w niewielkim stopniu oddziałują na głębokość wtopienia g dla obu funkcji. Największe wtopienie można osiągnąć dla prędkości 6 mm/s przy tych samych wartościach napięcia i prędkości podawania drutu, szczególnie widoczne jest to dla większych prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} . Prędkości napawania 3 i 9 mm/s niewiele różnią się wpływem na głębokość wtopienia, zwłaszcza dla mniejszych prędkości podawania drutu elektrodowego. Dla funkcji uproszczonej obie prędkości napawania (3 i 9 mm/s) mają takie same oddziaływanie na głębokość wtopienia. W przypadku większej prędkości napawania krótszy jest czas oddziaływania łuku na materiał podłoża i tym samym mniejszy jest przetop. Dla niższej prędkości napawania mniejszą głębokość wtopienia tłumaczy się w pracy [33] odmiennym mechanizmem formowania ściegu napoiny w stosunku do napoin wykonywanych przy wyższych prędkościach napawania. W napoinie o dużej objętości (mniejsza prędkość napawania) jeziorko ciekłego metalu krzepnie z bardzo małą prędkością, powodując podpływanie ciekłego metalu pod łuk elektryczny. Dużej objętości jeziorko ciekłego metalu tłumi siłę dynamiczną łuku elektrycznego oraz oddziaływanie łuku na napawane podłoże, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie udziału podłoża i głębokości wtopienia.

10.4. Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoiny, głębokość wtopienia i parametry wydajnościowe w osłonie mieszanek argonowo-helowych

W drugim etapie badań, mającym za cel wyznaczenie wpływu mieszanek argonowo-helowych na geometrię napoin, głębokość wtopienia i parametry wydajnościowe zastosowano, podobnie jak w etapie pierwszym, metodę planowania eksperymentu z zastosowaniem planu Boxa-Benkena.

Parametrami wejściowymi do planu eksperymentu były:

- prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} ($3,6 \div 7,4$ m/min),
- napięcie łuku U_n ($21 \div 25$ V),
- prędkość napawania, v_n ($3 \div 9$ mm/s),
- zawartość procentowa helu w mieszance argonowo-helowej gazu osłonowego, He ($0 - 100\%$).

Parametrami stałymi były: wylot drutu elektrodowego H , wynoszący 18 mm, indukcyjność L spawalniczego źródła prądu równa 5. Temperatura wstępnego podgrzania (międzyściegowa) T_o była utrzymywana w zakresie od 60 do 200°C. Przepływ gazu osłonowego Q , ustalono dla czystego argonu (podobnie jak w poprzednim etapie) na 16 dm³/min. Dla mieszanki 50 % Ar i 50 % He przepływ określono na 28 dm³/min, a dla czystego helu wynosił 40 dm³/min. Wartości przepływu dla mieszanki argon+hel i dla czystego helu wyznaczono na podstawie [13,22,68].

Parametrami wyjściowymi dla planu eksperymentu, które podczas badań należało wyznaczyć były:

- szerokość napoiny b [mm],
- wysokość napoiny h [mm],
- głębokość wtopienia g [mm],
- udział metalu podłoża w napoinie U_p [%],
- pola powierzchni przekroju nadlewu napoiny F_n [mm²]
- wydajność powierzchniowa P [mm²/s],
- wydajność objętościowa W [mm³/s].

Realizacja dalszych badań przebiegała identycznie jak w punkcie 10.4, w trakcie wyznaczania wpływu technologicznych parametrów napawania na geometrię napoiny i głębokości wtopienia w osłonie czystego argonu. Przyjęty zakres wielkości wejściowych dla planu Boxa-Benkena w drugim etapie badań podano w tab. 10.5. Plan Boxa-Benkena wraz z wartościami rzeczywistymi i unormowanymi zestawiono w tab. 10.6.

Tablica 10.5. Zakres parametrów wejściowych przyjętych do planu Boxa-Benkena w drugim etapie badań

Zmienne wejściowe przyjęte do planu eksperymentu	Oznaczenie zmiennej	Wartość minimalna (-1)	Wartość średnia (0)	Wartość maksymalna (+1)
prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} [m/min]	$X1$	3,6	5,5	7,4
napięcie napawania U_n [V]	$X2$	21	23	25
prędkość napawania v_n [mm/s]	$X3$	3	6	9
zawartość procentowa helu w mieszance argonowo-helowej gazu osłonowego He [%]	$X4$	0	50	100

Tablica 10.6. Plan Boxa-Benkena dla wartości rzeczywistych i unormowanych w drugim etapie badań

Układ planu	Technologiczne parametry napawania				Relacje normowania dla planu Boxa-Benkena			
	v_{el} [m/min]	U_n [V]	v_n [mm/s]	He [%]	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$
1	7,4	25	6	50	+1	+1	0	0
2	3,6	25	6	50	-1	+1	0	0
3	7,4	21	6	50	+1	-1	0	0
4	3,6	21	6	50	-1	-1	0	0
5	5,5	23	9	100	0	0	+1	+1
6	5,5	23	3	100	0	0	-1	+1
7	5,5	23	9	0	0	0	+1	-1
8	5,5	23	3	0	0	0	-1	-1
9	7,4	23	6	100	+1	0	0	+1
10	3,6	23	6	100	-1	0	0	+1
11	7,4	23	6	0	+1	0	0	-1
12	3,6	23	6	0	-1	0	0	-1
13	5,5	25	9	50	0	+1	+1	0
14	5,5	21	9	50	0	-1	+1	0
15	5,5	25	3	50	0	+1	-1	0
16	5,5	21	3	50	0	-1	-1	0
17	7,4	23	9	50	+1	0	+1	0
18	3,6	23	9	50	-1	0	+1	0
19	7,4	23	3	50	+1	0	-1	0
20	3,6	23	3	50	-1	0	-1	0
21	5,5	25	6	100	0	+1	0	+1
22	5,5	21	6	100	0	-1	0	+1
23	5,5	25	6	0	0	+1	0	-1
24	5,5	21	6	0	0	-1	0	-1
25	5,5	23	6	50	0	0	0	0
26	5,5	23	6	50	0	0	0	0
27	5,5	23	6	50	0	0	0	0

Długość wykonywanych ściegów w tym etapie badań wynosiła 100 mm. Pomiaru szerokości i wysokości ściegu dokonano suwmiarką z głębokościomierzem o dokładności odczytu 0,05 mm. Głębokość wtopienia po poprzecznym przecięciu próbek i przeszlifowaniu powierzchni czołowych zmierzono mikroskopem warsztatowym MWD o wartości działki elementarnej 0,01 mm (por. rys.10.15).

Pole powierzchni poprzecznych przekrojów napoin wyznaczono przez wykonanie zdjęć przekrojów wykonanych próbek aparatem cyfrowym. Zrobione zdjęcia wprowadzono do komputera i za pomocą programu CorelDraw wykreślono obwiednie przekrojów napoin, które posłużyły do obliczenia pola powierzchni w programie AutoCAD.

Wyniki w postaci średniej z pięciu pomiarów na długości ściegu zaprezentowano w tablicy 10.7.

Tablica 10.7. Wyniki pomiarów wymiarów geometrycznych, głębokości wtopienia i parametrów wydajnościowych pojedynczego ściegu dla poszczególnych układów planu eksperymentu w drugim etapie badań

Układ planu	Technologiczne parametry napawania				Wyniki związane z geometrią ściegu							Parametry wydajnościowe	
	v_{el} [m/min]	U_n [V]	v_n [mm/s]	He [%]	b [mm]	h [mm]	g [mm]	F_n+F_w [mm ²]	F_w [mm ²]	F_n [mm ²]	U_p [%]	P [mm ² /s]	W [mm ³ /s]
1	7,4	25	6	50	11,55	2,66	3,31	34,18	15,18	19	44,42	69,30	114,00
2	3,6	25	6	50	9,85	1,66	0,44	13,43	1,66	11,77	12,39	59,10	70,61
3	7,4	21	6	50	11,37	2,17	2,08	28,55	7,29	21,26	25,54	68,22	127,55
4	3,6	21	6	50	7,99	1,84	0,31	14,99	1,52	13,47	10,13	47,94	80,82
5	5,5	23	9	100	8,57	1,85	1,40	14,14	4,44	9,7	31,4	77,13	87,33
6	5,5	23	3	100	13,06	2,99	0,61	37,58	4,83	32,74	12,86	39,18	98,23
7	5,5	23	9	0	10,22	1,54	0,90	12,78	2,22	10,56	17,34	91,98	95,04
8	5,5	23	3	0	15,02	3,23	0,66	33,92	1,86	32,07	5,48	45,06	96,20
9	7,4	23	6	100	13,05	3,50	2,70	31,74	11,77	19,98	37,07	78,30	119,86
10	3,6	23	6	100	9,39	1,73	0,67	15,46	3,57	11,89	23,11	56,34	71,35
11	7,4	23	6	0	10,50	2,71	3,25	36,4	14,17	22,23	38,92	63,00	133,40
12	3,6	23	6	0	7,72	1,96	0,30	11,71	0,98	10,73	8,37	46,32	64,39
13	5,5	25	9	50	8,97	1,48	1,62	18,76	5,95	12,81	31,73	80,73	115,26
14	5,5	21	9	50	8,49	1,54	0,94	13,55	2,59	10,96	19,15	76,41	98,60
15	5,5	25	3	50	14,41	2,69	0,83	36,13	4,57	31,55	12,66	43,23	94,66
16	5,5	21	3	50	12,16	2,91	0,66	31,86	1,44	30,41	4,53	36,48	91,24
17	7,4	23	9	50	8,32	2,41	1,89	20,1	4,86	15,25	24,16	74,88	137,21
18	3,6	23	9	50	7,59	1,38	0,36	9,56	1,33	8,22	13,96	68,31	74,02
19	7,4	23	3	50	17,10	3,23	1,16	47,02	6,84	40,18	14,55	51,30	120,54
20	3,6	23	3	50	11,33	2,45	0,49	23,5	1,79	21,71	7,61	33,99	65,14
21	5,5	25	6	100	10,00	2,05	2,53	27,11	9,97	17,14	36,76	60,00	102,87
22	5,5	21	6	100	9,82	1,89	0,97	18,59	2,35	16,24	12,62	58,92	97,47
23	5,5	25	6	0	13,36	1,71	0,87	20,13	2,17	17,96	10,78	80,16	107,77
24	5,5	21	6	0	11,37	1,78	0,68	17,87	2,08	15,8	11,62	68,22	94,77
25	5,5	23	6	50	10,99	1,93	1,74	26,15	9,43	16,71	36,08	65,94	100,29
26	5,5	23	6	50	10,55	1,84	2,03	22,29	9,11	13,17	40,88	63,30	79,05
27	5,5	23	6	50	10,26	2,05	2,04	24,7	9,07	15,63	36,72	61,56	93,78

Przykładowe napoiny z drugiego etapu przedstawiono na rys. 10.22.



Rys. 10.22. Widok ogólny przykładowych ściegów i przeciętej próbki wykonanych w drugim etapie badań.

Otrzymane w rezultacie przeprowadzonych prób wyniki badań poddano analizie matematycznej przy pomocy programu komputerowego CADEX 2.0. Wyznaczanymi zależnościami były funkcje szerokości b , wysokości h , głębokości wtopienia g , udziału metalu podłoża w napoinie U_p , pola powierzchni przekroju nadlewu napoiny F_n , wydajności powierzchniowej P oraz wydajności objętościowej W od prędkości podawania drutu elektrodowego v_{el} , napięcia napawania U_n , prędkości napawania v_n , i zawartości procentowej helu w mieszanke argonowo-helowej gazu osłonowego He :

- $b = F_1(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $h = F_2(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $g = F_3(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $U_p = F_4(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $F_n = F_5(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $P = F_6(v_{el}, U_n, v_n, He)$,
- $W = F_7(v_{el}, U_n, v_n, He)$.

Po wprowadzeniu wyników pomiarów wielkości wyjściowych do programu komputerowego (tab.10.7), aproksymację funkcji i obiektu badań za pomocą wielomianów algebraicznych (wzór 10.2) przeprowadzono zgodnie z punktem 10.3. Postać równań matematycznych opisujących wielkości wyjściowe w funkcji technologicznych parametrów procesu napawania dla wartości rzeczywistych przedstawiono poniżej:

-dla szerokości napoiny b [mm]:

$$\begin{aligned} b = & 10,6 + 1,50166667(0,53v_{el}-2,89) + 0,578333333(0,5U_n-11,5) - 2,57666667(0,33v_n-2) \\ & - 0,358333333(0,02He-1) - 0,46375(0,53v_{el}-2,89)^2 - 0,42(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & - 1,26(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) + 0,22(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) - 0,01625(0,5U_n-11,5)^2 \\ & - 0,4425(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) - 0,4525(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) \\ & + 0,72125(0,33v_n-2)^2 + 0,0775(0,33v_n-2)(0,02He-1) + 0,32625(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

-dla szerokości napoiny b [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$\begin{aligned} b = & 10,518 + 1,50166667(0,53v_{el}-2,89) + 0,578333333(0,5U_n-11,5) \\ & - 2,57666667(0,33v_n-2) - 1,26(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) + 0,752(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

-dla wysokości napoiny h [mm]:

$$\begin{aligned} h = & 1,94 + 0,471666667(0,53v_{el}-2,89) + 0,01(0,5U_n-11,5) - 0,608333333(0,33v_n-2) \\ & + 0,09(0,02He-1) + 0,269166667(0,53v_{el}-2,89)^2 + 0,1675(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & + 0,0625(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) + 0,255(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) \\ & - 0,145833333(0,5U_n-11,5)^2 + 0,04(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) \\ & + 0,0575(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) + 0,269166667(0,33v_n-2)^2 \\ & + 0,1375(0,33v_n-2)(0,02He-1) + 0,174166667(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

-dla wysokości napoiny h [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$\begin{aligned} h = & 1,95888889 + 0,471666667(0,53v_{el}-2,89) - 0,608333333(0,33v_n-2) \\ & + 0,262083333(0,53v_{el}-2,89)^2 + 0,255(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) \\ & + 0,262083333(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

-dla głębokości wtopienia g [mm]:

$$\begin{aligned} g = & 1,93666667 + 0,985(0,53v_{el}-2,89) + 0,33(0,5U_n-11,5) + 0,225(0,33v_n-2) \\ & + 0,185(0,02He-1) - 0,0829166667(0,53v_{el}-2,89)^2 + 0,275(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) \\ & + 0,215(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) - 0,23(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) \\ & - 0,2979166667(0,5U_n-11,5)^2 + 0,1275(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) \\ & + 0,3425(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) - 0,7629166667(0,33v_n-2)^2 \\ & + 0,1375(0,33v_n-2)(0,02He-1) - 0,2604166667(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

-dla głębokości wtopienia g [mm] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$\begin{aligned} g = & 1,59466667 + 0,985(0,53v_{el}-2,89) + 0,33(0,5U_n-11,5) + 0,225(0,33v_n-2) \\ & - 0,6346666667(0,33v_n-2)^2 \end{aligned}$$

-dla udziału metalu podłoża w napoinie U_p [%]:

$$\begin{aligned} U_p = & 37,89333333 + 9,09083333(0,53v_{el}-2,89) + 5,429166667(0,5U_n-11,5) \\ & + 6,67083333(0,33v_n-2) + 5,109166667(0,02He-1) - 5,882916667(0,53v_{el}-2,89)^2 \\ & + 4,155(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) + 0,815(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) \\ & - 4,1475(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) - 9,370416667(0,5U_n-11,5)^2 \\ & + 1,1125(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) + 6,245(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) \\ & - 13,98291667(0,33v_n-2)^2 + 1,67(0,33v_n-2)(0,02He-1) - 7,620416667(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

-dla udziału metalu podłoża w napoinie U_p [%] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$\begin{aligned} U_p = & 37,89333333 + 9,09083333(0,53v_{el}-2,89) + 5,429166667(0,5U_n-11,5) \\ & + 6,67083333(0,33v_n-2) + 5,109166667(0,02He-1) - 5,882916667(0,53v_{el}-2,89)^2 \\ & - 9,370416667(0,5U_n-11,5)^2 + 6,245(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) - 13,98291667(0,33v_n-2)^2 \\ & - 7,620416667(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

- dla pola powierzchni przekroju nadlewu napoiny F_n [mm²]:

$$\begin{aligned} F_n = & 15,17 + 5,009166667(0,53v_{el}-2,89) + 0,1741666667(0,5U_n-11,5) \\ & - 10,09666667(0,33v_n-2) - 0,1383333333(0,02He-1) + 0,475(0,53v_{el}-2,89)^2 \\ & - 0,14(0,53v_{el}-2,89)(0,5U_n-11,5) - 2,86(0,53v_{el}-2,89)(0,33v_n-2) \\ & - 0,8525(0,53v_{el}-2,89)(0,02He-1) + 0,81(0,5U_n-11,5)^2 + 0,1775(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) \\ & - 0,315(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) + 5,53375(0,33v_n-2)^2 - 0,3825(0,33v_n-2)(0,02He-1) \\ & + 0,64375(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

- dla pola powierzchni przekroju nadlewu napoiny F_n [mm²] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$F_n = 16,1986667 + 5,00916667(0,53v_{ef}-2,89) - 10,0966667(0,33v_n-2) + 5,148(0,33v_n-2)^2$$

- dla wydajności powierzchniowej P [mm²/s]:

$$\begin{aligned} P = & 63,6 + 7,75(0,53v_{ef}-2,89) + 3,0275(0,5U_n-11,5) + 18,35(0,33v_n-2) - 2,0725(0,02He-1) \\ & - 3,6125(0,53v_{ef}-2,89)^2 - 2,52(0,53v_{ef}-2,89)(0,5U_n-11,5) - 2,685(0,53v_{ef}-2,89)(0,33v_n-2) \\ & + 1,32(0,53v_{ef}-2,89)(0,02He-1) + 0,35125(0,5U_n-11,5)^2 - 0,6075(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) \\ & - 2,715(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) - 3,4025(0,33v_n-2)^2 - 2,2425(0,33v_n-2)(0,02He-1) \\ & + 2,33875(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

- dla wydajności powierzchniowej P [mm²/s] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

$$P = 61,6777778 + 7,75(0,53v_{ef}-2,89) + 3,0275(0,5U_n-11,5) + 18,35(0,33v_n-2)$$

- dla wydajności objętościowej W [mm³/s]:

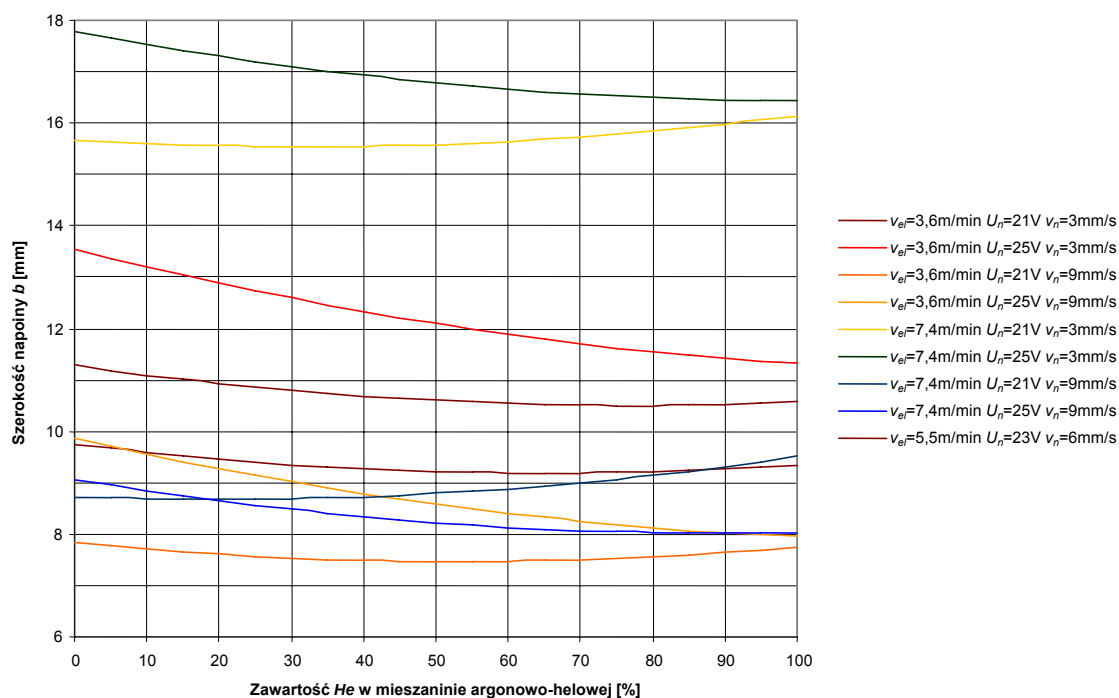
$$\begin{aligned} W = & 91,04 + 27,1858333(0,53v_{ef}-2,89) + 1,22666667(0,5U_n-11,5) \\ & + 3,45416667(0,33v_n-2) - 1,205(0,02He-1) + 3,5775(0,53v_{ef}-2,89)^2 \\ & - 0,835(0,53v_{ef}-2,89)(0,5U_n-11,5) + 1,9475(0,53v_{ef}-2,89)(0,33v_n-2) \\ & - 5,125(0,53v_{ef}-2,89)(0,02He-1) + 5,66875(0,5U_n-11,5)^2 + 3,31(0,5U_n-11,5)(0,33v_n-2) \\ & - 1,9(0,5U_n-11,5)(0,02He-1) + 2,9(0,33v_n-2)^2 - 2,435(0,33v_n-2)(0,02He-1) \\ & + 2,30125(0,02He-1)^2 \end{aligned}$$

- dla wydajności objętościowej W [mm³/s] - funkcja uproszczona (dla poziomu istotności $\alpha=0,05$):

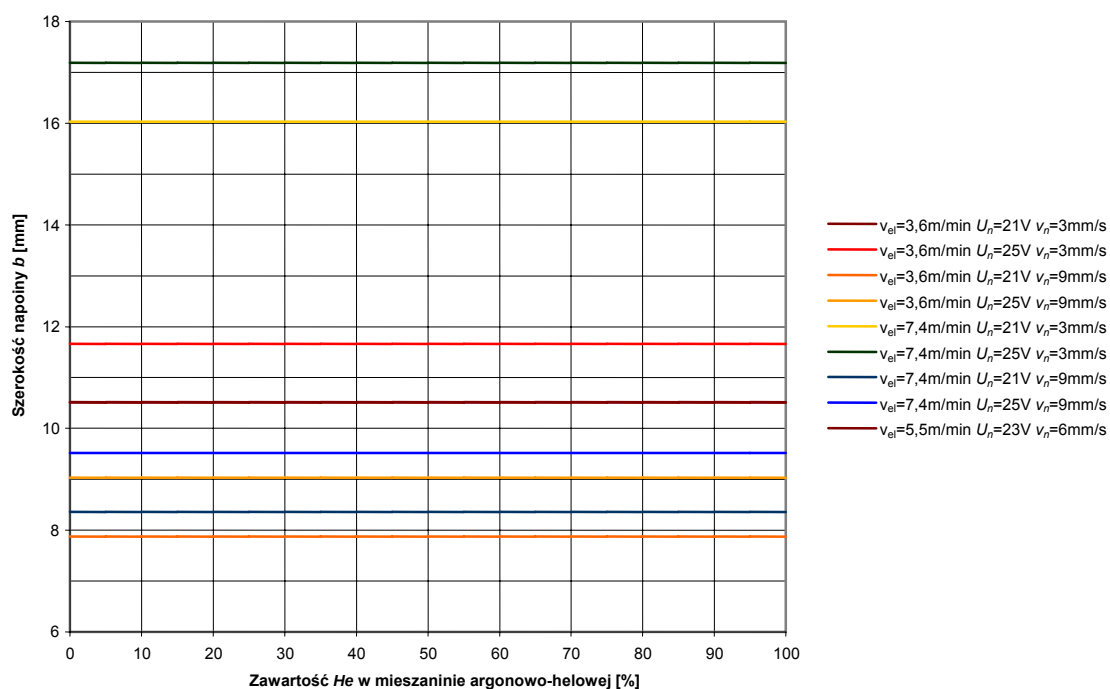
$$W = 97,4611111 + 27,1858333(0,53v_{ef}-2,89)$$

Równania te z pewnym przybliżeniem pozwalają na obliczenie wielkości wyjściowych w zależności od czynników wejściowych w całym badanym zakresie technologicznych parametrów napawania.

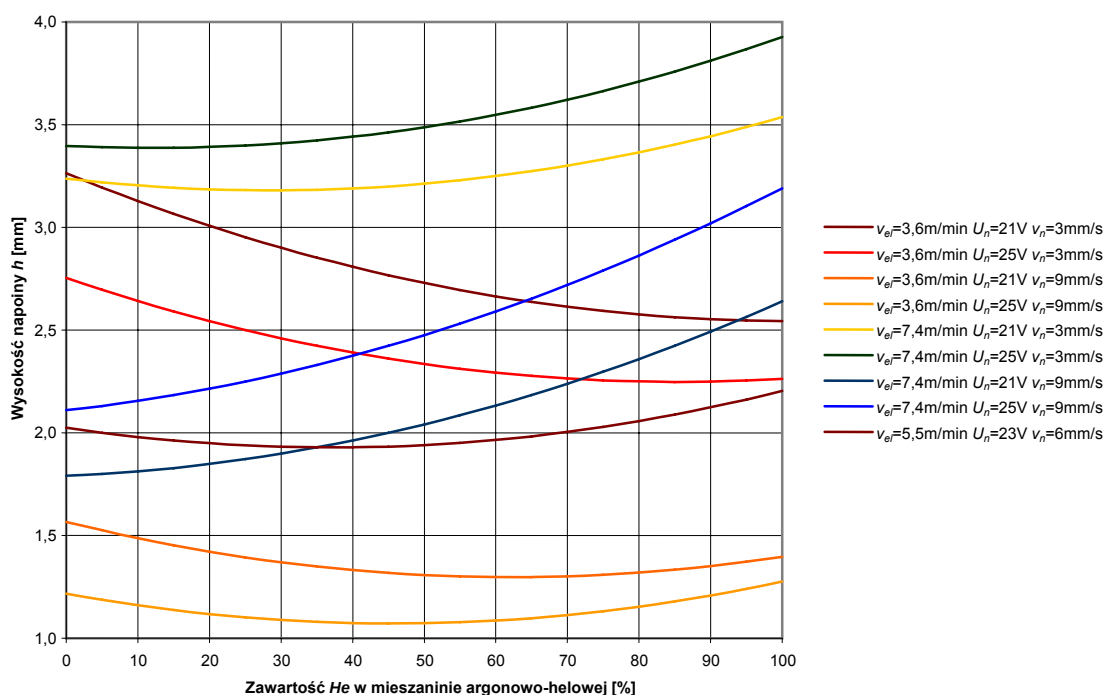
Wpływ technologicznych parametrów napawania i składu chemicznego gazu osłonowego ukazano również na kolejnych rysunkach 10.23÷10.36.



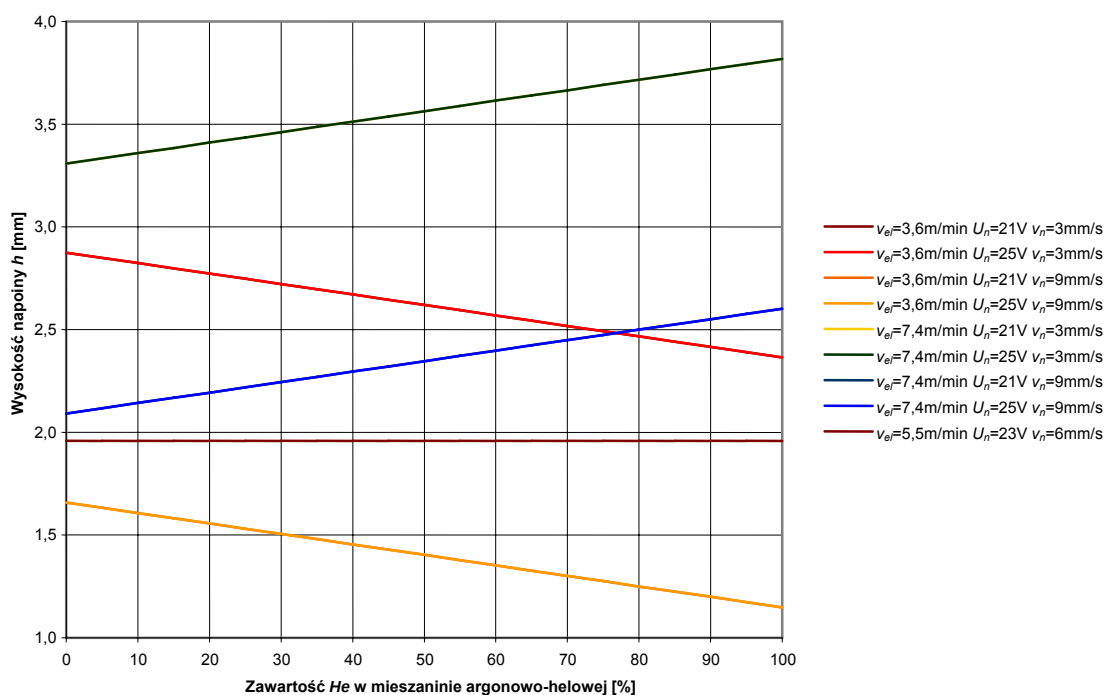
Rys. 10.23. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na szerokość napoin



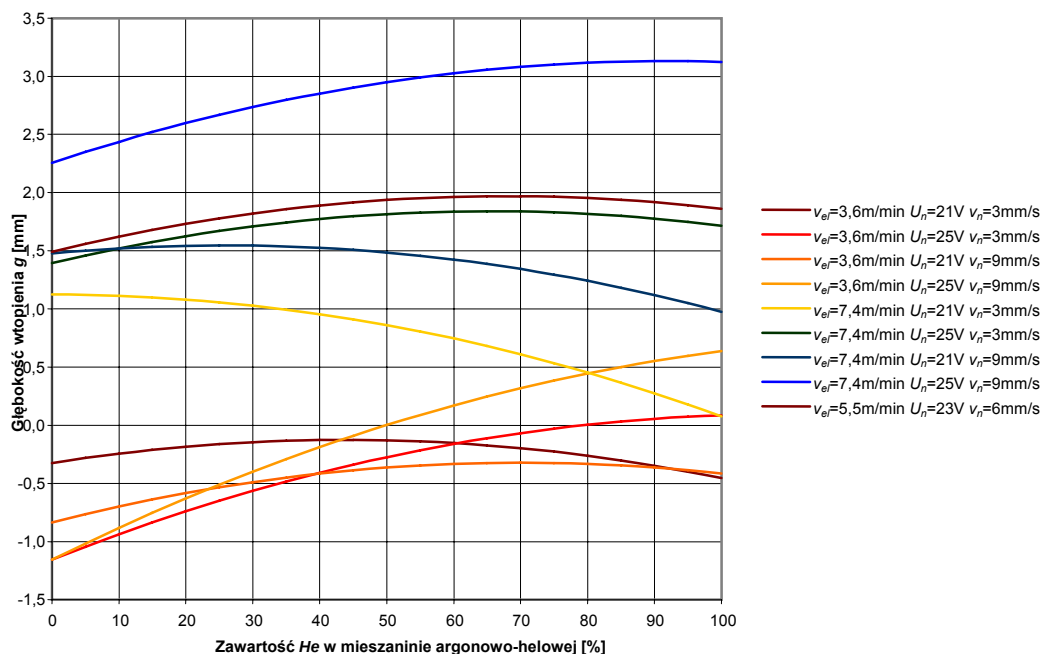
Rys. 10.24. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na szerokość napoin dla funkcji uproszczonej



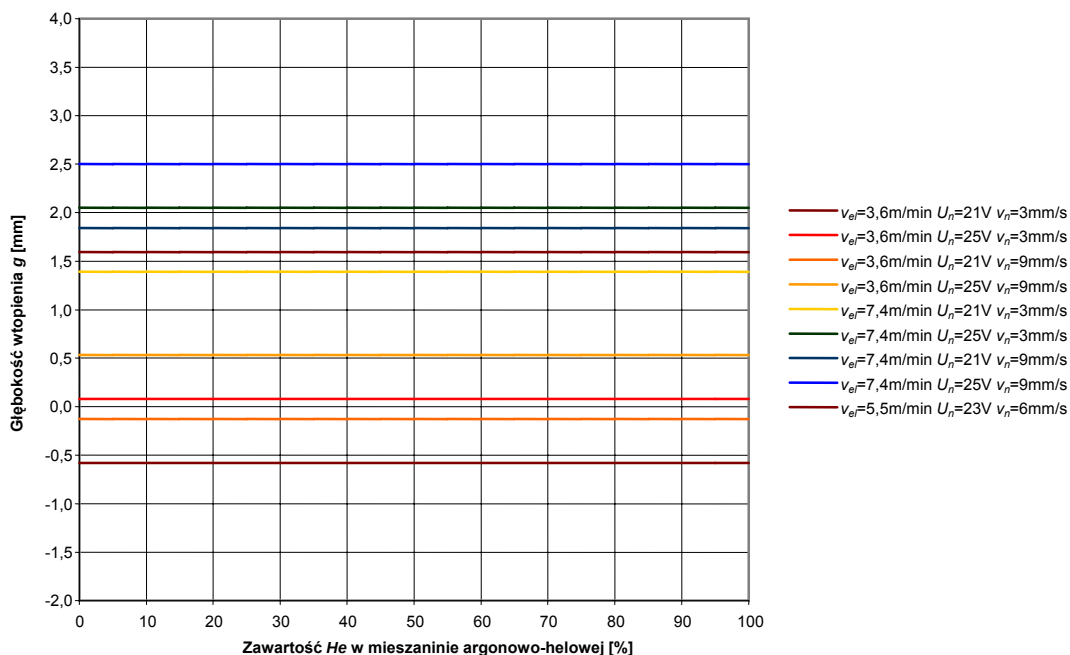
Rys. 10.25. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wysokość napoin



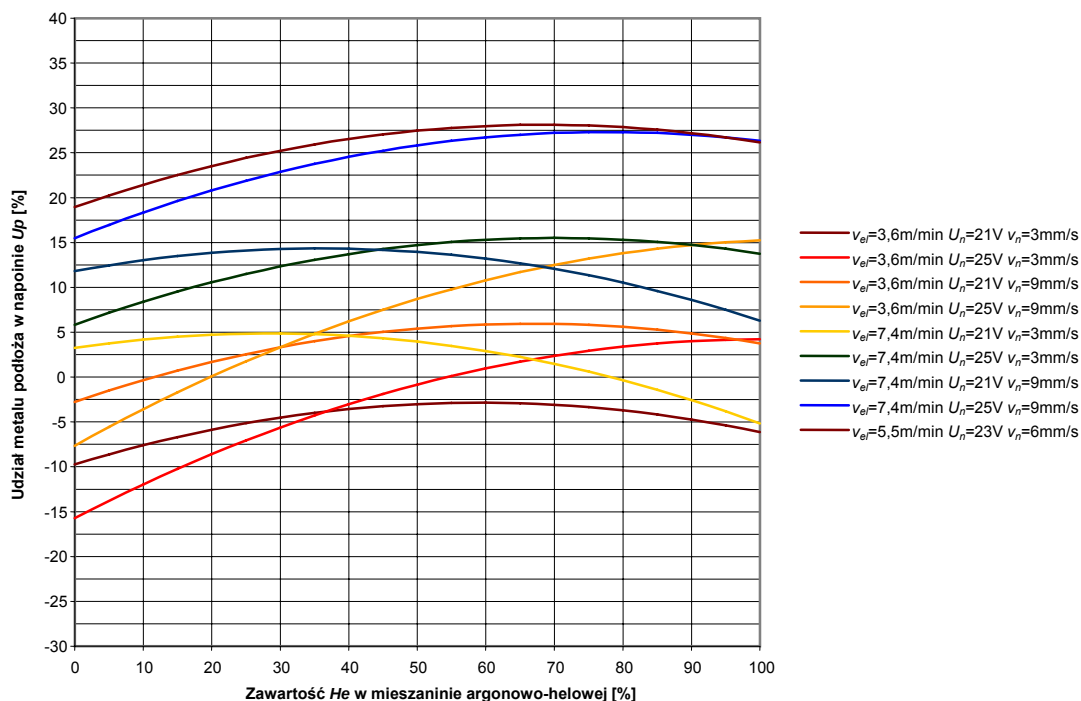
Rys. 10.26. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wysokość napoin dla funkcji uproszczonej



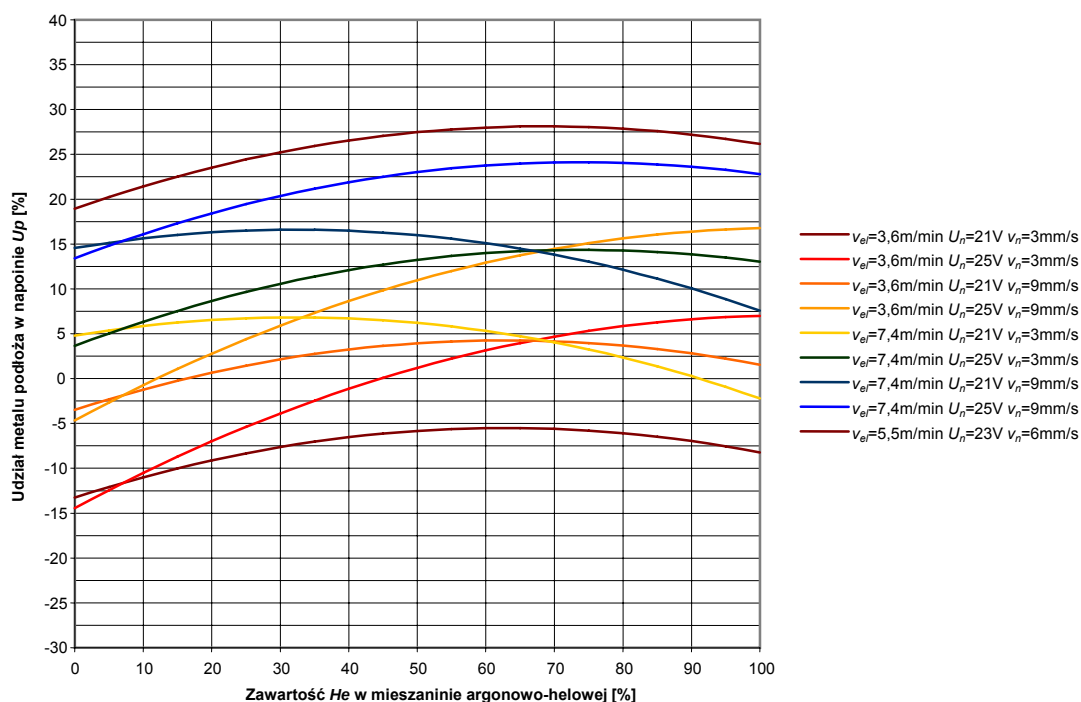
Rys. 10.27. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na głębokość wtopienia



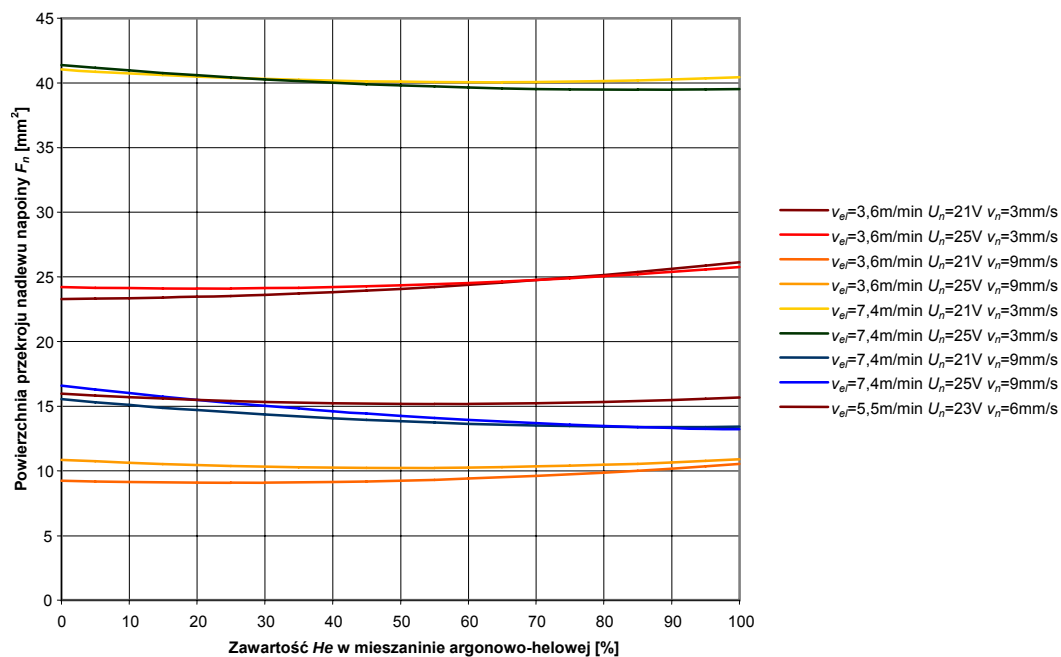
Rys. 10.28. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na głębokość wtopienia dla funkcji uproszczonej



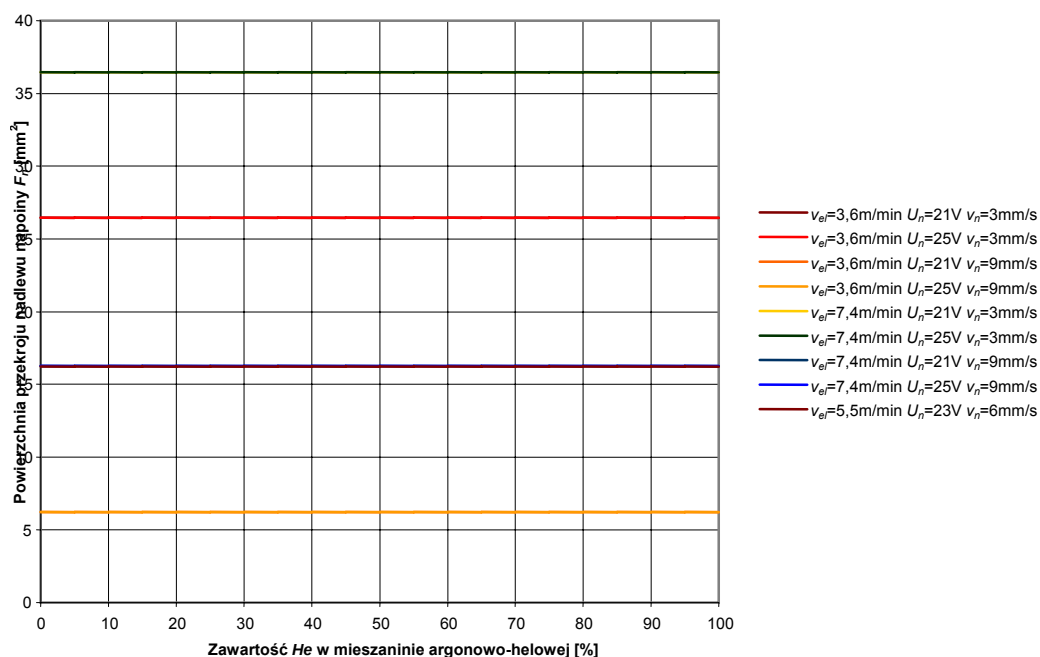
Rys. 10.29. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na udział metalu podłoża w napoinie



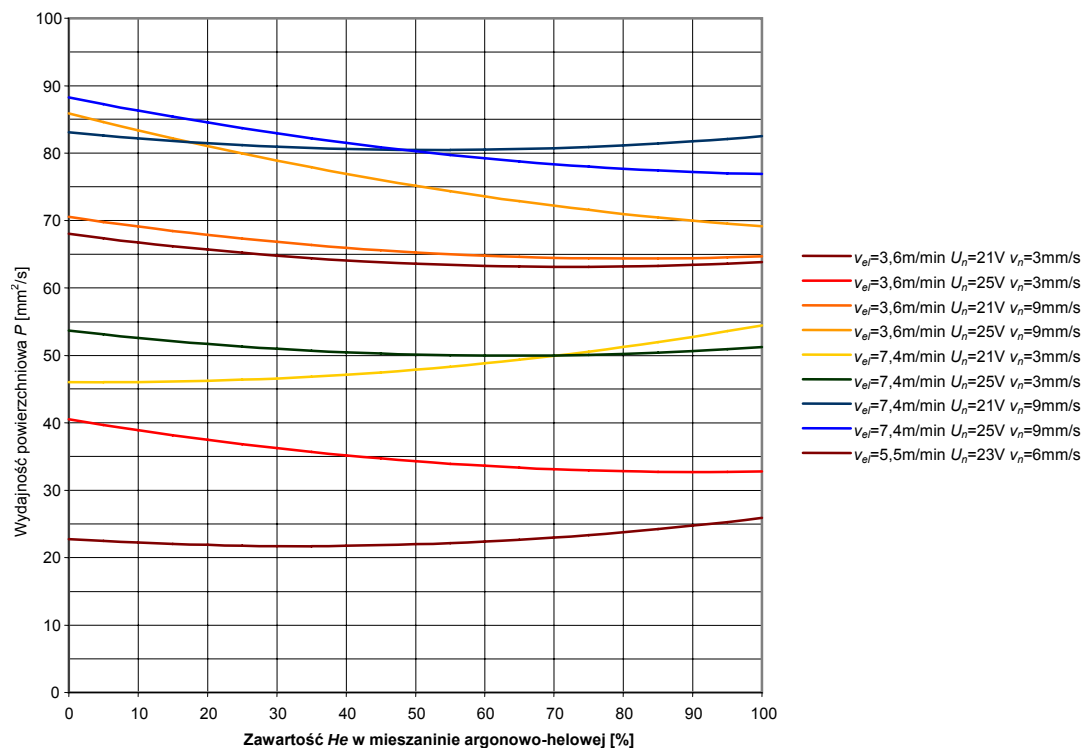
Rys. 10.30. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na udział metalu podłoża w napoinie dla funkcji uproszczonej



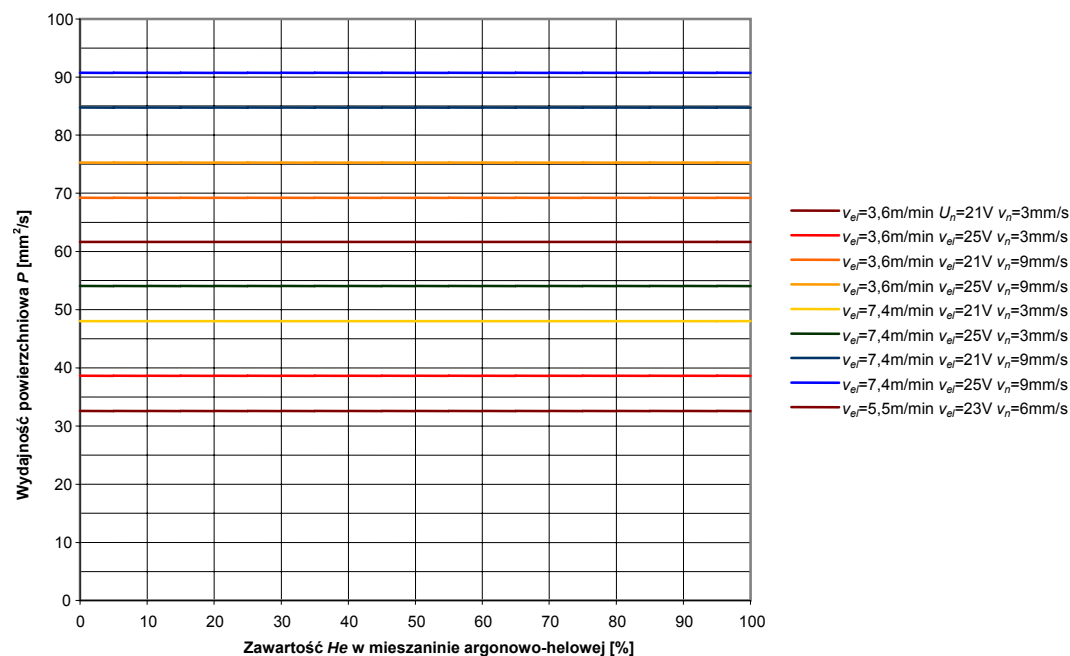
Rys. 10.31. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na pole powierzchni przekroju nadlewu napoiny



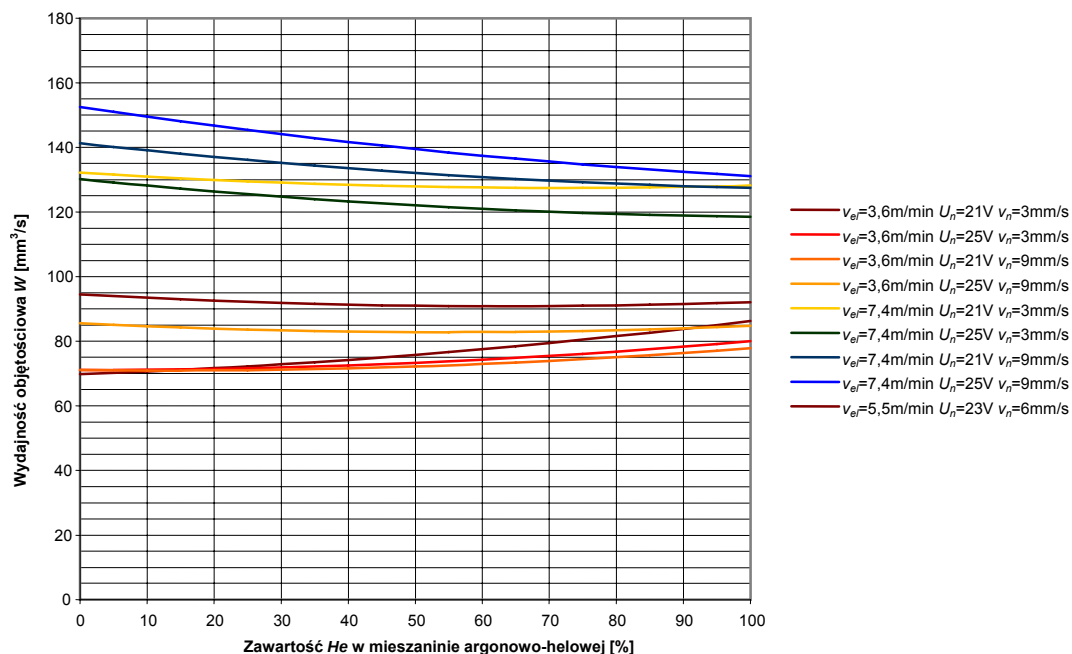
Rys. 10.32. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na pole powierzchni przekroju nadlewu napoiny dla funkcji uproszczonej



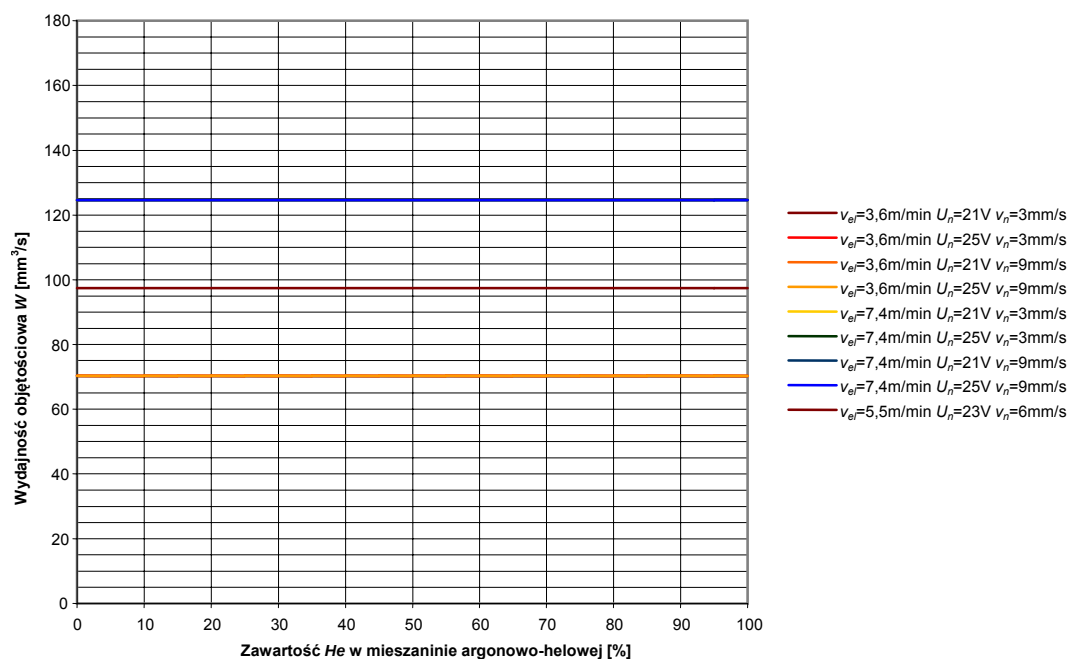
Rys. 10.33. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wydajność powierzchniową



Rys. 10.34. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wydajność powierzchniową dla funkcji uproszczonej



Rys. 10.35. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wydajność objętościową



Rys. 10.36. Wpływ zawartości He w mieszaninie argonowo-helowej gazu osłonowego na wydajność objętościową dla funkcji uproszczonej

Na podstawie zaprezentowanych wyżej wyników badań można stwierdzić, że:

- 1) Szerokość napoin zawiera się w zakresie $7,5 \div 17,7$ mm i dla napięcia 21 V skład chemiczny osłony gazowej w niewielkim stopniu wpływa na szerokość napoiny. Natomiast dla napięcia łuku 25 V wraz ze wzrostem zawartości helu w mieszance argonowo-helowej gazu osłonowego napoina zmniejsza swoją szerokość przy niezmiennych pozostałych technologicznych parametrach napawania (rys. 10.23). W przypadku funkcji uproszczonej dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ skład mieszanki argonowo-helowej nie wpływa na szerokość napoiny (rys. 10.24),
- 2) Wysokość napoin wynosi od 1,1 do 3,9 mm i wzrasta dla prędkości podawania drutu elektrodowego 7,4 m/min wraz ze wzrostem zawartości helu w mieszance argonowo-helowej gazu osłonowego. Natomiast wysokość napoiny dla prędkości napawania 3 mm/s i prędkości podawania drutu elektrodowego 3,6 m/min spada wraz ze wzrostem zawartości helu w gazie osłonowym (rys. 10.25). Dla funkcji uproszczonej (rys. 10.26) napawanie z prędkością podawania drutu elektrodowego 7,4 m/min powoduje wzrost wysokości napoiny razem ze wzrostem zawartości helu w gazie osłonowym. Prędkość podawania drutu elektrodowego 5,5 m/min nie powoduje zmian wysokości napoiny ze zmianą składu mieszanki argonowo-helowej. Natomiast dla prędkości podawania drutu elektrodowego 3,6 m/min wysokość napoiny zmniejsza się wraz ze zwiększaniem udziału procentowego helu w gazie osłonowym,
- 3) Głębokość wtopienia wynosi do 3,2 mm. Sens fizyczny mają jedynie linie prezentujące zależności technologiczne dla dodatniej części wykresów głębokości wtopienia. Ujemne wartości obliczeń głębokości wtopienia należy interpretować jako brak wtopienia lub możliwość wystąpienia przyklejeń (rys. 10.27). W całym zakresie prowadzonych badań jedynie krzywe prezentujące głębokość wtopienia dla prędkości podawania drutu elektrodowego 5,5 i 7,4 m/min są położone powyżej linii zerowej. Wzrost zawartości helu w mieszance gazu osłonowego powoduje dla prędkości podawania drutu elektrodowego 7,4 m/min przy niskim napięciu (21V) spadek głębokości wtopienia, a przy wyższym (25V) - wzrost głębokości

- wtopienia. W przypadku funkcji uproszczonej skład mieszanki argonowo-helowej nie wpływa na głębokość wtopienia (rys. 10.28),
- 4) Udział metalu podłoża w napoinie wynosi do 38% i ma podobny przebieg dla pełnych i uproszczonych zależności funkcyjnych (rys. 10.29 i 10.30). Podobnie jak dla głębokości wtopienia sens fizyczny mają jedynie linie prezentujące zależności technologiczne dla dodatniej części wykresów głębokości wtopienia. Udział metalu podłoża w napoinie dla napięcia 23 i 25V ma charakter rosnący wraz ze zwiększaniem zawartości procentowej helu w mieszance, ulegając nieco zmniejszeniu dla najwyższych udziałów helu w gazie osłonowym. Zwiększając zawartość helu w mieszance gazu osłonowego dla prędkości podawania drutu elektrodowego 7,4 m/min i niskiego napięcia 21V można najpierw zaobserwować wzrost, a następnie spadek udziału metalu podłoża w napoinie. Dla czystego helu udział metalu podłoża w napoinie jest mniejszy niż dla czystego argonu,
 - 5) Pole powierzchni przekroju nadlewu napoiny zawiera się w zakresie od 8 do 41 mm² i dla obu zależności funkcyjnych pełnej i uproszczonej nie zależy od składu mieszanki argonowo-helowej gazu osłonowego (rys. 10.31 i 10.32),
 - 6) Wydajność powierzchniowa wynosi od 23 do 88 mm²/s i skład mieszanki argonowo-helowej w praktyce nie wpływa na jej wielkość dla obu zależności funkcyjnych (rys. 10.33 i 10.34),
 - 7) Wydajność objętościowa mieści się w zakresie 70 ÷ 152 mm³/s i w niewielkim stopniu zależy od zawartości helu w gazie osłonowym z tendencją spadkową dla prędkości podawania drutu elektrodowego 7,4 m/min i niewielkim wzrostem dla wartości 3,6 m/min (rys. 10.35). W przypadku funkcji uproszczonej skład mieszanki nie wpływa na wydajność objętościową (rys. 10.36).

Stosując przygotowanie powierzchni przez obróbkę skrawaniem, oczyszczanie i odtłuszczanie oraz wstępne podgrzanie podłoża do temperatury 60 ÷ 100 °C, a także prowadząc napawanie w zakresie prędkości podawania drutu elektrodowego od 3,6 do 7,4 m/min, napięcia łuku 21 ÷ 25V i prędkości napawania

od 3 do 9 mm/s i zawartości helu w mieszance argonowo-helowej od 0 do 100 % można uzyskać ściegi napoin spełniające przedstawione wcześniej kryteria jakościowe. Pozostałe technologiczne parametry napawania powinny wynosić: wylot drutu elektrodowego 18 mm i przepływ gazu osłonowego ustalony w zakresie $16 \div 40 \text{ dm}^3/\text{min}$ w zależności od zawartości helu w gazie osłonowym.

10.5. Wpływ doboru podziałki ściegów na geometrię wykonanych warstw z brązu

Wcześniejsze badania dotyczyły jedynie pojedynczych ściegów oraz oddziaływania technologicznych parametrów napawania na geometrię, głębokość wtopienia czy też na parametry wydajnościowe procesu. Celem kolejnych badań było określenie wpływu układania ściegów w warstwach na własności tak napoin jak i materiału podłoża, na którym układane były warstwy z brązu.

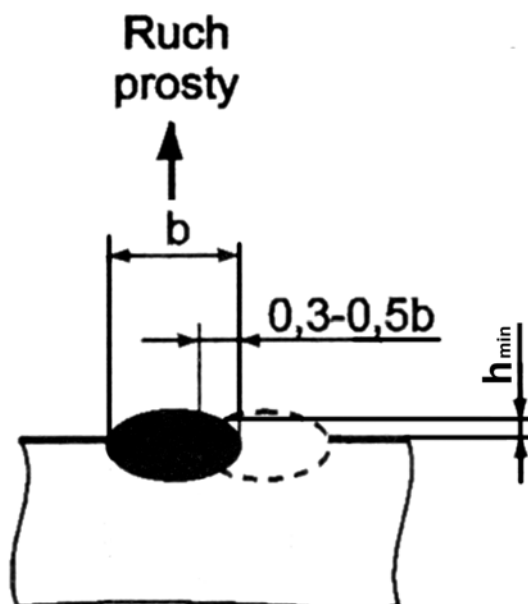
Dalszą część badań wykonano z technologicznymi parametrami napawania, które zapewniają wysoką wydajność napawania przy małym udziale materiału podłoża w napoinie ok. 5%. Parametry takie wybrano ze względu na efektywność wykorzystania brązu i jak najmniejszą jego zawartość w materiale podłoża. Wytypowane parametry napawania na podstawie wyników z poprzedniego etapu badań zaprezentowano w tablicy 10.8.

Tablica 10.8. Zestawienie technologicznych parametrów napawania zastosowanych do układania ściegów w warstwach

Nazwa technologicznego parametru napawania	Symbol	Wartość
Prędkość podawania drutu elektrodowego	v_{el}	5,5 [m/min]
Napięcie łuku	U_n	23 [V]
Prędkość napawania	v_n	3 [mm/s]
Odległość rurki prądowej od napawanego elementu	H	18 [mm]
Indukcyjność spawalniczego źródła prądu	L	5
Rodzaj gazu osłonowego	Ar	argon 100%
Przepływ gazu osłonowego	Q	16 [dm^3/min]
Temperatura wstępnego podgrzania (międzyściegowa)	T_o	60 ÷ 200°C]

Dobór podziałki napawania, czyli wartości zakładki ściegu nałożonego na wcześniejszy, wykonano w oparciu o dane z literatury [32] zalecające zakres $0,3 \div 0,5$ (rys.10.37a). Na rysunku 10.37b pokazano próbkę ze ściegami wykonanymi przy różnych podziałkach, od 0,25 do 0,6.

a)



b)



0,25 0,6 0,3 0,35

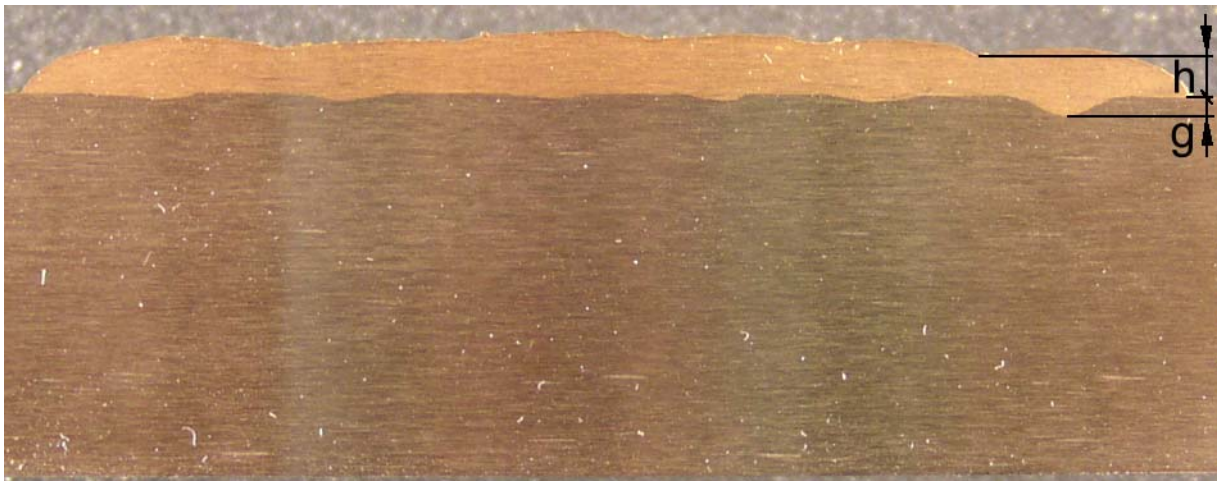
Rys. 10.37. Układanie ściegów o różnej podziałce: a) objaśnienie symboli, b) próbka

Wyniki pomiarów wysokości wrębów pomiędzy ściegami w stosunku do poziomu napawanej blachy h_{min} (rys.10.37) zmierzone mikroskopem warsztatowym MWD o wartości działki elementarnej 0.01 mm w dziesięciu przekrojach zamieszczono w tablicy 10.9 (w tablicy podano wartość najmniejszą z wszystkich pomiarów w dziesięciu przekrojach dla danej podziałki).

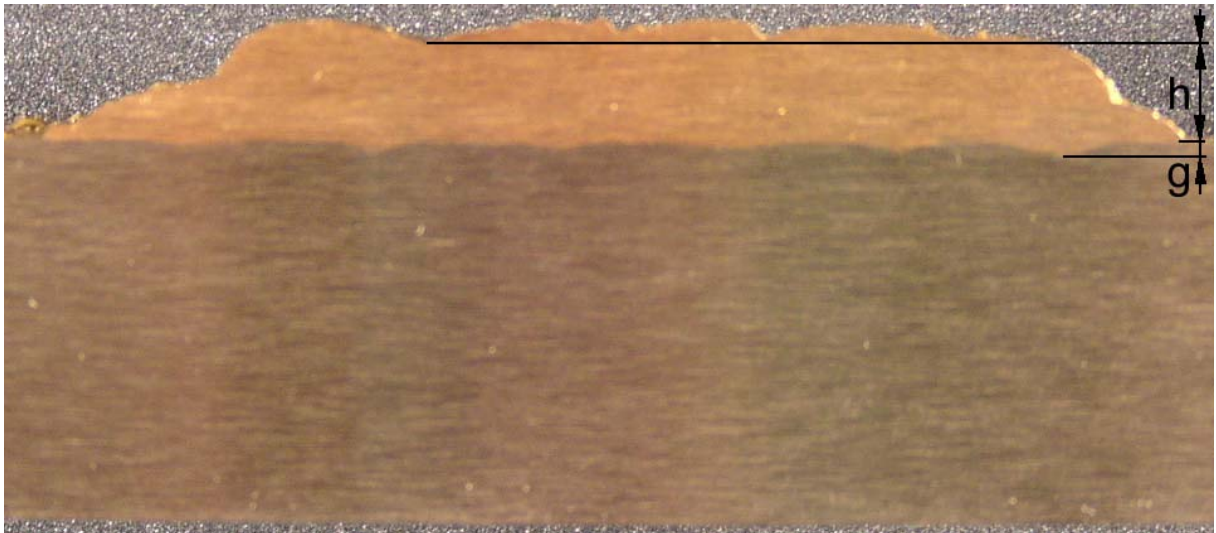
Tablica 10.9. Minimalne wysokości wrębów między ściegami w zależności od wielkości podziałki

Wartość podziałki b	0,25	0,3	0,35	0,6
Wysokość wrębu pomiędzy ściegami h_{min} [mm]	1,09	2,21	2,58	nadlew

Wyniki w tablicy 10.9 i rysunek 10.37 wskazują, że podziałki w zakresie 0,25÷0,35 są zbyt małe i pomiędzy ściegami jest dość duże wgłębienie. Natomiast dla podziałki 0,6 pojawił się nadlew, który również nie jest korzystny, gdyż przy obróbce mechanicznej w trakcie wyrównywania warstwy ułożonych ściegów zostanie zebrany, powodując straty brazu. Uwzględniając otrzymane wyniki, kolejne próbki jedno- (rys. 10.38) i dwuwarstwowe (rys. 10.39) wykonano z podziałką 0,5. Wyniki pomiarów wrębów pomiędzy ściegami h_{min} i głębokości wtopienia g (rys. 10.38 i 10.39) zmierzono mikroskopem warsztatowym MWD o wartości działki elementarnej 0,01 mm (w opisie dotyczącym wrębów pomiędzy ściegami h_{min} podawane są wartości najmniejsze, a wartości głębokości wtopienia g największe z pomiarów w pięciu przekrojach).



Rys. 10.38. Próbką z napoiną jednowarstwową



Rys. 10.39. Próbką z napoiną dwuwarstwową

Dla próbki jednowarstwowej najmniejsza wartość wysokości wrębu h_{min} wynosiła 2,17 mm. Wręb ten znajdował się obok pierwszej napoiny w warstwie (na rys. 10.38 pierwsza z prawej). Pozostałe wartości wysokości wrębu h_{min} mieściły się w zakresie $2,45 \div 3,04$ mm. Największa głębokość wtopienia g wynosiła 1,15 mm również dla pierwszej napoiny w warstwie. Pozostałe głębokości wtopienia należały do zakresu $0,34 \div 0,70$ mm. W próbce dwuwarstwowej wysokości wrębu wynosiły od 5,54 do 6,09 mm. Głębokość wtopienia g podobnie jak i dla próbki jednowarstwowej była największa dla pierwszej napoiny w warstwie najbliższej napawanej blasze (na rys. 10.39 pierwsza z prawej) i wynosi 0,87 mm. Głębokości wtopienia następnych napoin mieściły się w przedziale $0,43 \div 0,72$ mm. Po końcowej obróbce mechanicznej dla napoin jednowarstwowych grubość warstwy napawanej może sięgać wartości ok. 2 mm, a napoin dwuwarstwowych nawet 5 mm.

Największą głębokość wtopienia dla pierwszego ściegu napoiny w warstwie nakładanej na materiał podłoża można tłumaczyć bezpośrednim oddziaływaniem łuku na ten materiał. Dalsze ściegi mają mniejszą głębokość wtopienia ze względu na częściowe oddziaływanie łuku na napoinę wykonaną wcześniej. Głębsze przetopienie podłoża przez pierwszy ścieg jest też powodem wystąpienia mniejszej wysokości h_{min} dla wrębu znajdującego się w sąsiedztwie tego ściegu. Wyeliminowanie tego zjawiska jest możliwe przez wykonanie pierwszego ściegu z mniejszym natężeniem i napięciem łuku [32].

10.6. Badania twardości

Badania przeprowadzono w celu określenia twardości napoiny, materiału podłoża i linii przejścia pomiędzy napoiną a materiałem podstawowym. Badania obejmowały porównanie twardości pojedynczych ściegów układanych w ochronnej atmosferze argonu, helu i mieszanek argonowo-helowych z napoinami jedno i dwuwarstwowymi wykonywanymi w atmosferze czystego argonu.

Pomiarów twardości dokonano ze względu na niewielką powierzchnię boczną przekrojów napoin metodą Vickersa, zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 „Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Metoda badań”. W trakcie badań uwzględniono również informacje zawarte w następujących normach:

- PN-EN1043-1 „Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba twardości. Próba twardości złączy spawanych łukowo”,
- PN-EN1043-2 „Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba twardości. Próba mikrotwardości złączy spawanych łukowo”,
- PN-ISO 4384-1 „Łożyska ślizgowe – Pomiar twardości materiałów łożyskowych – Arkusz 1: Materiały wielowarstwowe”,
- PN-ISO 4384-2 „Łożyska ślizgowe – Pomiar twardości materiałów łożyskowych – Arkusz 2: Materiały monolityczne”.

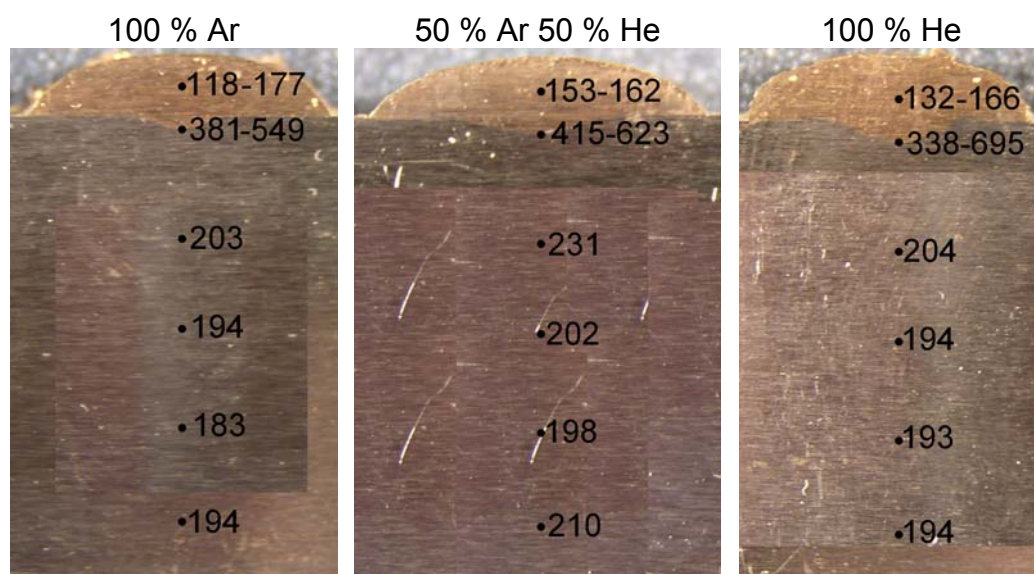
Pomiary twardości przeprowadzano w pięciu przekrojach ściegów czy warstw twardościomierzem uniwersalnym Vickers-Brinell HPO-250 z obciążeniem 49,03 N w jednostkach HV5 dla stali i linii przejścia (z czasem obciążania 10-15 s), zaś brązu w jednostkach HV5/30 (z czasem obciążania 30 s). Na podstawie normy PN-EN ISO 6507-1 niepewność pomiaru przyjęto w przybliżeniu $\pm 10\%$ zmierzonej wartości twardości.

Zestawienie przebadanych próbek wraz z technologicznymi parametrami wykonania ściegów i napoin przedstawiono w tablicy 10.10. Pozostałe technologiczne parametry napawania były takie same jak podano to w tablicy 10.8. i identyczne dla wszystkich próbek.

Tablica 10.10 Zestawienie próbek podanych badaniom twardości

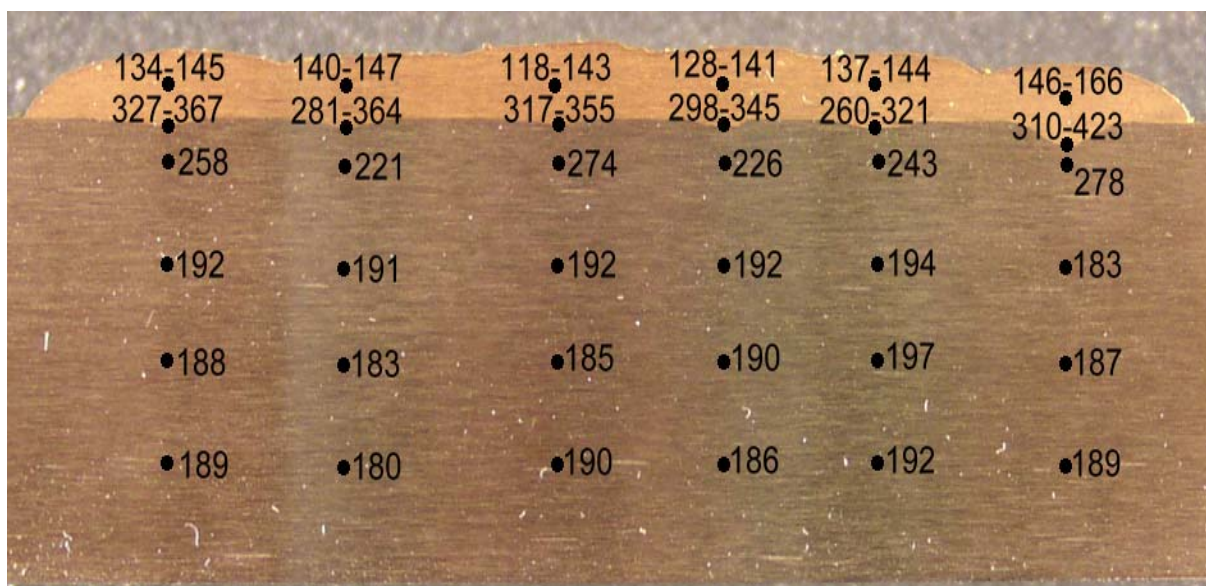
Nr próbki	Ilość warstw	Gaz osłonowy	Prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} [m/min]	Napięcie łuku U_n [V]	Prędkość napawania v_n [mm/s]
183	pojedynczy ścieg	50% Ar, 50% He	7,4	23	3
208	pojedynczy ścieg	100% He	5,5	23	3
220	pojedynczy ścieg	100% Ar	5,5	23	3
1	jedna	100% Ar	5,5	23	3
2	dwie	100% Ar	5,5	23	3

Pomiary twardości dla próbek z pojedynczymi ściegami przeprowadzano w ten sposób, że w każdym przekroju próbki dokonywano pięciu odcisków na powierzchni napoiny w jak największej odległości od materiału podłoża i pięć pomiarów twardości wzdłuż linii przejścia. Mierzac twardość materiału podłoża, wykonywano odciski co 5 mm od górnej krawędzi blachy. Na rys.10.40 przedstawiono wyniki pomiarów twardości dla pojedynczego ściegu w różnych osłonach gazowych. Dla materiału podłoża podano maksymalną wartość twardości, jaką zmierzono w jednym z pięciu przekrojów. W przypadku napoiny i linii przejścia wyniki zaprezentowano w postaci przedziału minimalnej i maksymalnej wartości znalezionej we wszystkich przekrojach.

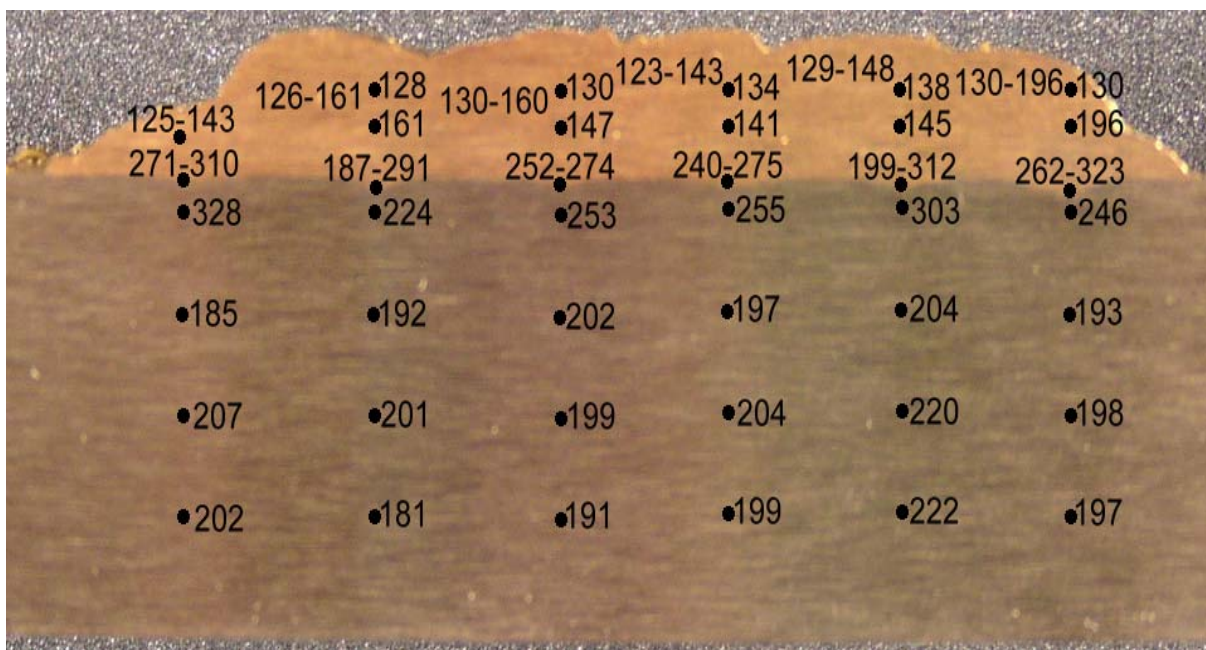


Rys.10.40. Twardość materiału podłoża, linii przejścia (podano w jednostkach HV5) i warstw z brązu (podano w jednostkach HV5/30) dla pojedynczych ściegów w różnych osłonach gazowych

Pomiary twardości próbek jedno (rys.10.41) i dwuwarstwowych (rys.10.42) nieco zmodyfikowano. Uwzględniając wyniki pomiarów pojedynczych ściegów, zmierzono również twardość strefy podspoinowej w odległości 2 mm od górnej krawędzi blachy, a następne odciski w materiale podłoża wykonywano co 5 mm dla obu próbek. Pomiarów twardości napoin jednowarstwowych z brązu dokonano, wykonując po pięć odcisków w strefie należącej do pojedynczego ściegu warstwy i wzdłuż linii przejścia w każdym z pięciu przekrojów. Pomiarów twardości napoin dwuwarstwowych ze względu na większą ich wysokość umożliwiły wykonanie dwóch odcisków co 2 mm od krawędzi blachy w dolnej i górnej warstwie; pozostałe trzy odciski wykonywano w górnej części drugiej warstwy napoiny oraz pięć odcisków wzdłuż linii przejścia w każdym z pięciu przekrojów. Dla materiału podłoża i strefy podspoinowej na rysunkach 10.41 i 10.42 podano maksymalną wartość twardości, jaką zmierzono w jednym z pięciu przekrojów. W przypadku napoiny i linii przejścia (rys. 10.41 i 10.42) wyniki zaprezentowano w postaci przedziału minimalnej i maksymalnej wartości znalezionej we wszystkich przekrojach. Oprócz tego dla napoiny dwuwarstwowej (rys. 10.42) podano wyniki pomiarów twardości w odległościach co 2 mm w strefach należących do dolnej i górnej warstwy napoiny.

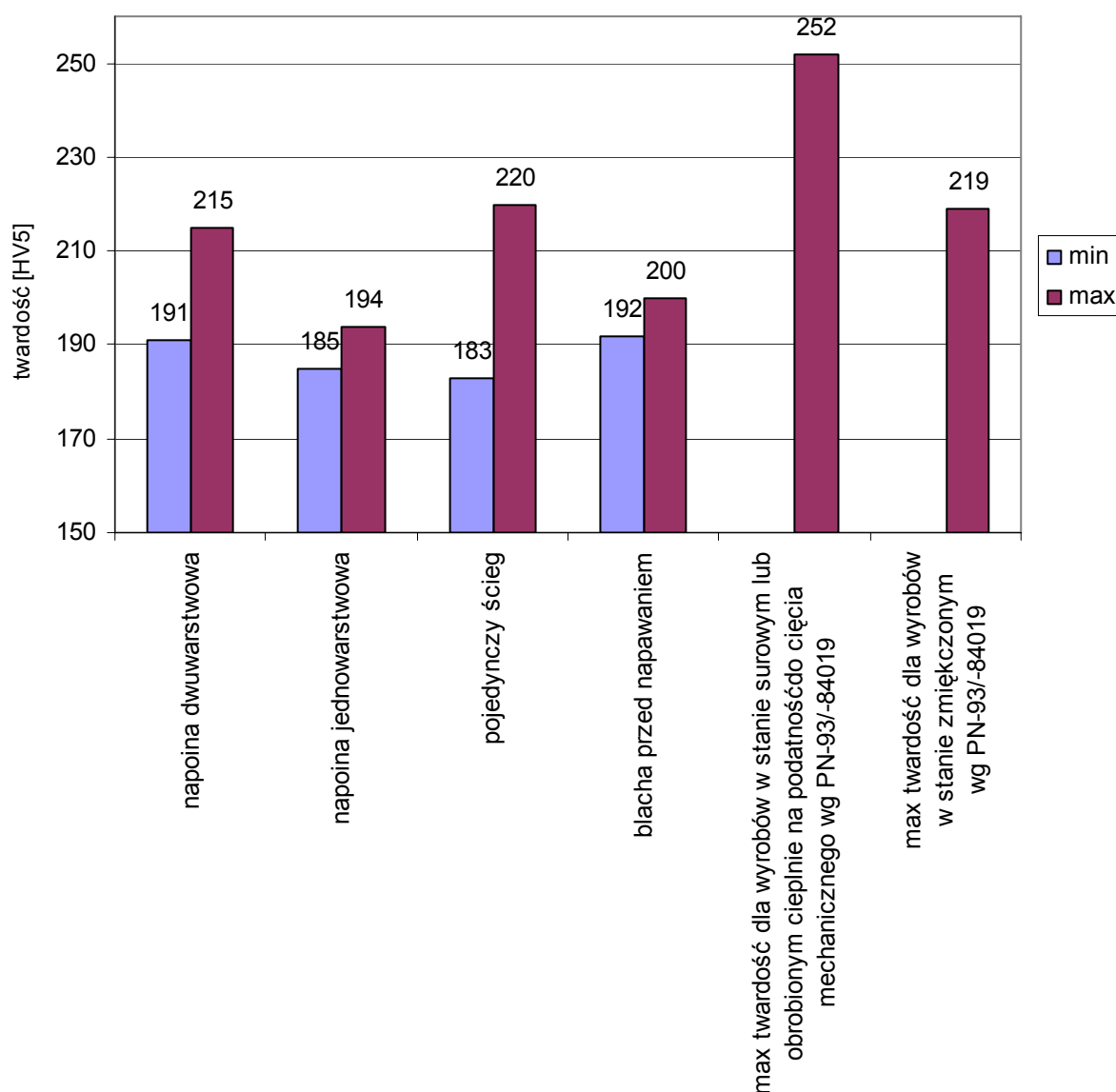


Rys.10.41. Twardość materiału podłoża, linii przejścia (podano w jednostkach HV5) i warstw z brązu (podano w jednostkach HV5/30) dla napoiny jednowarstwowej



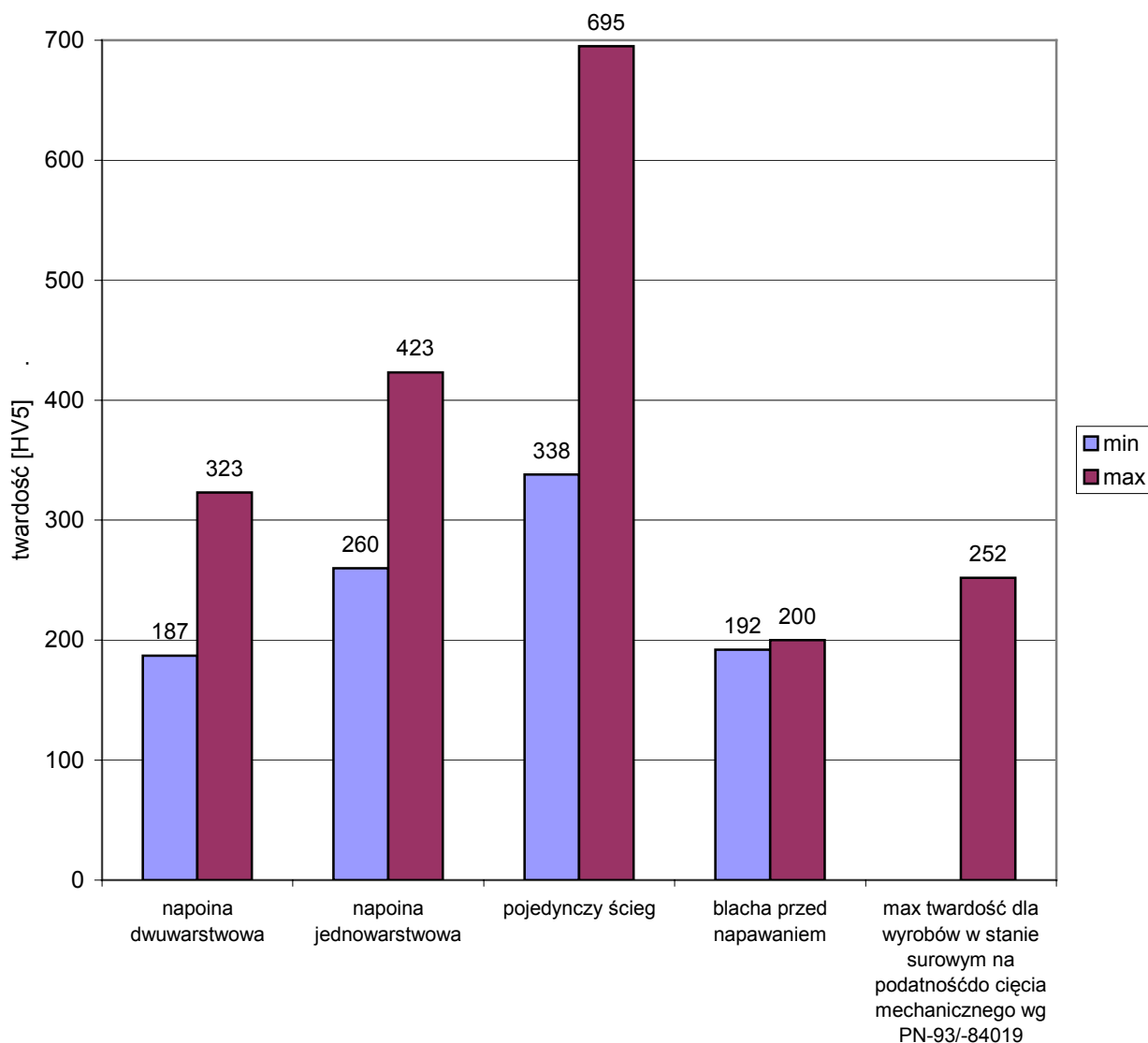
Rys.10.42. Twardość materiału podłoża, linii przejścia (podano w jednostkach HV5) i warstw z brązu (podano w jednostkach HV5/30) dla napoiny dwuwarstwowej

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono także wykresy porównujące twardości w poszczególnych częściach próbek. Na rys. 10.43 zaprezentowano porównanie twardości materiału podłoża próbek z danymi podanymi w normie PN-93/-84019 dotyczącymi twardości stali gatunku 45 dostarczanyymi w stanie surowym lub obrobionym cieplnie na podatność do cięcia mechanicznego i dla wyrobów w stanie zmiękczonego. Twardości linii przejścia znajdują się na rys.10.44, a strefy podspoinowej na rys.10.45. Rys. 10.46 przedstawia twardość warstw napoin z brązu. Na rysunku tym pominięto wyniki twardości dla skrajnych ściegów w dolnej warstwie dla napoiny dwuwarstwowej i pierwszego ściegu w napoinie jednowarstwowej ze względu na większe głębokości wtopienia i większe wymieszanie materiału podłoża z brązem. Ostatni ścieg w dolnej warstwie napoiny dwuwarstwowej pominięto z powodu innego sposobu pomiaru twardości ściegu niż w opisie powyżej.



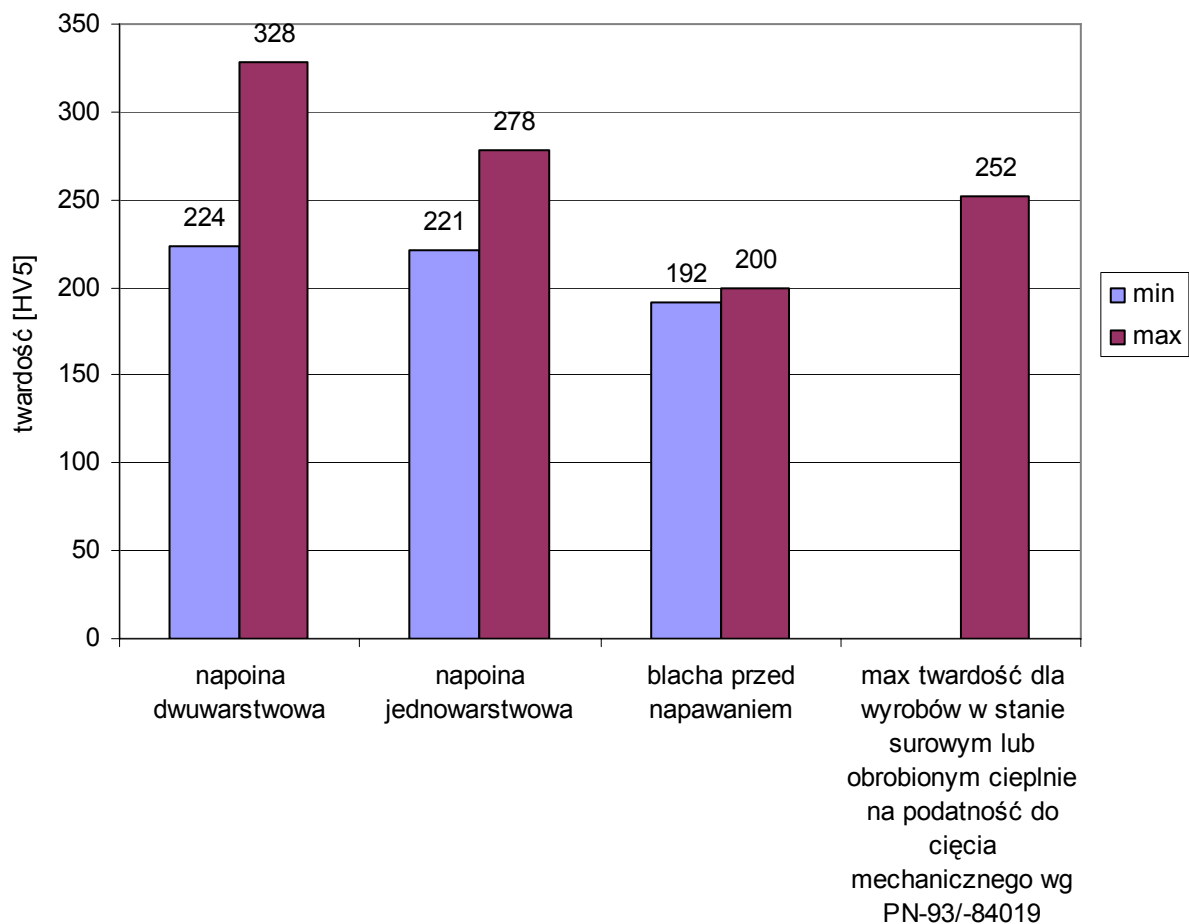
Rys.10.43. Twardość materiału podłoża

Wartości minimalne i maksymalne twardości podłoża (rys.10.43) zbliżone są do siebie i niższe (lub najwyżej równe) od twardości przewidzianej w normie dotyczącej stali gatunku 45 dla wyrobów dostarczanych w stanie surowym lub obrobionym cieplnie na podatność do cięcia mechanicznego oraz dla wyrobów w stanie zmiękczonego.



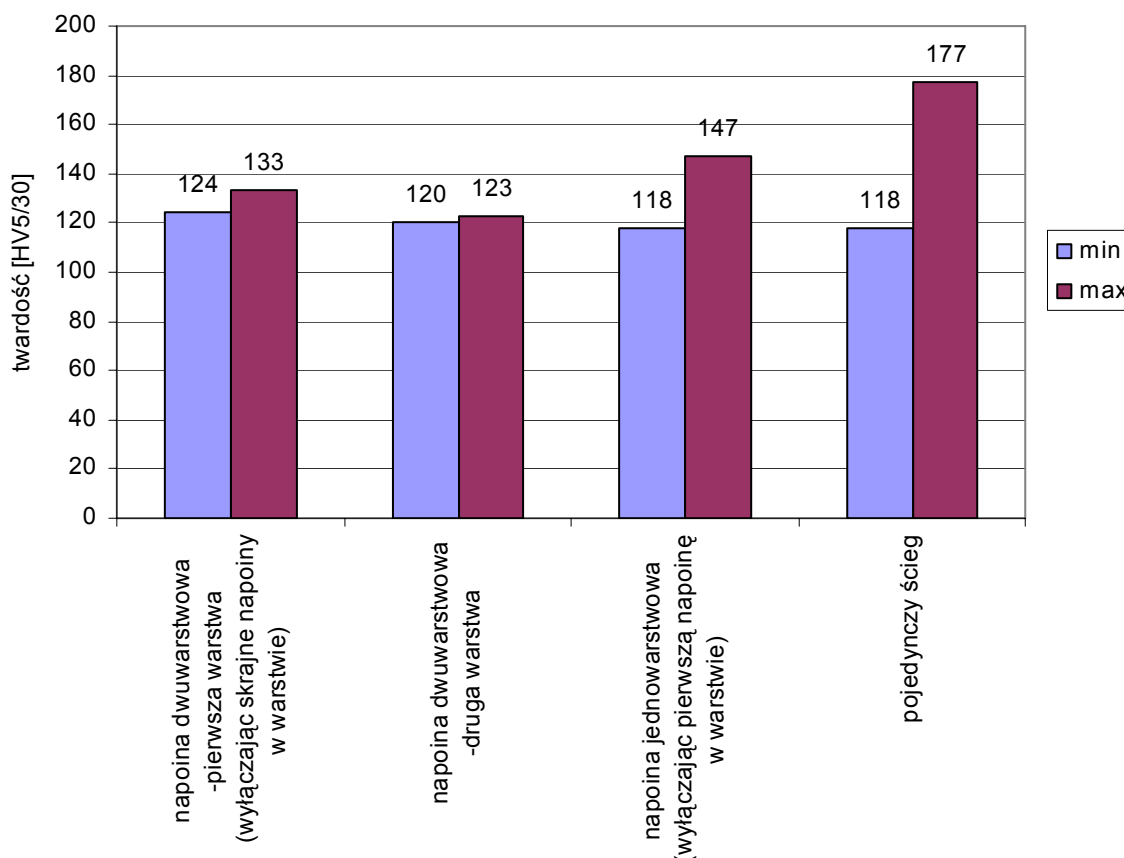
Rys.10.44. Twardość linii przejścia

Twardość linii przejścia (rys.10.44) jest wyraźnie największa dla pojedynczego ścięgu. Spowodowane jest to powstaniem twardych struktur pod ścięgiem. Mniejsze wartości linii przejścia występują dla napoiny jednowarstwowej. Najmniejsze twardości charakteryzują próbki z napoiną dwuwarstwową. W obu przypadkach następuje najprawdopodobniej częściowe odpuszczenie linii przejścia ciepłem pochodzącym od kolejnego układanego ścięgu w warstwie. Twardości linii przejścia próbek z napoinami jedno i dwuwarstwowymi są większe od maksymalnej twardości przewidzianej w normie dla wyrobów ze stali gatunku 45 w stanie surowym lub obrobionym cieplnie na podatność do cięcia mechanicznego, ale nie są na tyle duże, aby utrudnić obróbkę mechaniczną wyrobów ze stali 45 pokrytych brązem.



Rys.10.45. Twardość strefy podspoinowej (2 mm pod powierzchnią blachy)

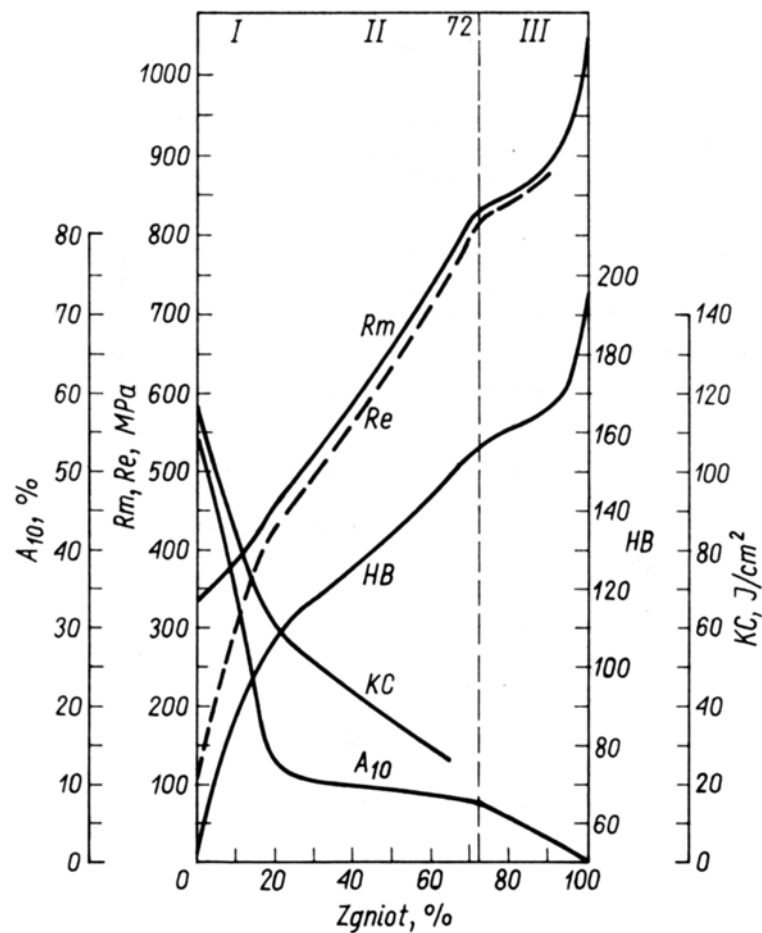
Twardość strefy podspoinowej (rys.10.45), podobnie jak twardość linii przejścia jest podwyższona w stosunku do wytycznych podanych w omawianej normie, ale tak jak dla linii przejścia nie powinna stanowić przeszkody w obróbce elementów ze stali 45 napawanych brązem.



Rys.10.46. Twardość warstw napoin z brązu

Wartości minimalne twardości warstw z brązu są dość zbliżone do siebie (rys. 10.46). Najmniejsze wartości maksymalne ma zgodnie z oczekiwaniami górna warstwa napoiny dwuwarstwowej, warstwa ta bowiem nie miała w trakcie jej nanoszenia bezpośredniego styku z materiałem podłoża. Większy rozrzut twardości i większe wartości twardości maksymalnych można zauważyć dla pierwszej warstwy napoiny dwuwarstwowej i napoiny jednowarstwowej, co może wynikać z kontaktu brązu z materiałem podłoża w trakcie napawania i jego wymieszaniem ze stalą. Największy rozrzut twardości oraz najwyższą jej wartość ma pojedynczy ścieg, co spowodowane jest najprawdopodobniej znacznym wymieszaniem materiału podłoża z napoiną. Na wartość twardości może mieć wpływ nie tylko sposób napawania, ale również przebieg wcześniejszej obróbki mechanicznej przed napawaniem. Jednoczesne frezowanie głowicą frezarską stali i brązu powoduje tępienie płytek głowicy w trakcie obróbki utwardzonej strefy podspoinowej i linii przejścia. Im bardziej stępione narzędzie tym większy zgniot. Również większemu zgniotowi sprzyjają małe prędkości skrawania i duży przekrój warstwy skrawanej. Frezowanie brązu stępionym narzędziem powodującym nagniatanie,

a nie skrawanie, może powodować wg [51] wzrost twardości brązu o 15-20%. Rys. 10.47 przedstawia wpływ stopnia zgniotu na własności mechaniczne brązu o małej zawartości cyny. Niewielki przyrost wartości zgniotu od 0 do 10% znacznie zwiększa twardość brązu, nawet o 40 jednostek HB [52].



Rys. 10.47. Wpływ stopnia zgniotu na własności mechaniczne brązu o zawartości 5% cyny [52]

10.7 Badania składu chemicznego i metalograficzne

Badania składu chemicznego i metalograficzne przeprowadzono dla wytypowanych próbek napoin z brązu na podłożu stalowym. Do badań wybrano po jednym przekroju pojedynczego ściegu, wykonanego w osłonie gazowej z czystego argonu lub helu i mieszaniny 50% Ar i 50% He. Przebadano także miejsca wycięte z próbek składających się z jednej i dwóch warstw z brązu dla ściegów ułożonych obok siebie pod osłoną czystego argonu. Zestawienie przebadanych próbek i technologicznych parametrów napawania przy jakich wykonano napoiny, z których wycięto próbki przeznaczone do badań przedstawiono w tablicy 10.11.

Tablica 10.11 Zestawienie próbek podanych badaniom metalograficznym i składu chemicznego

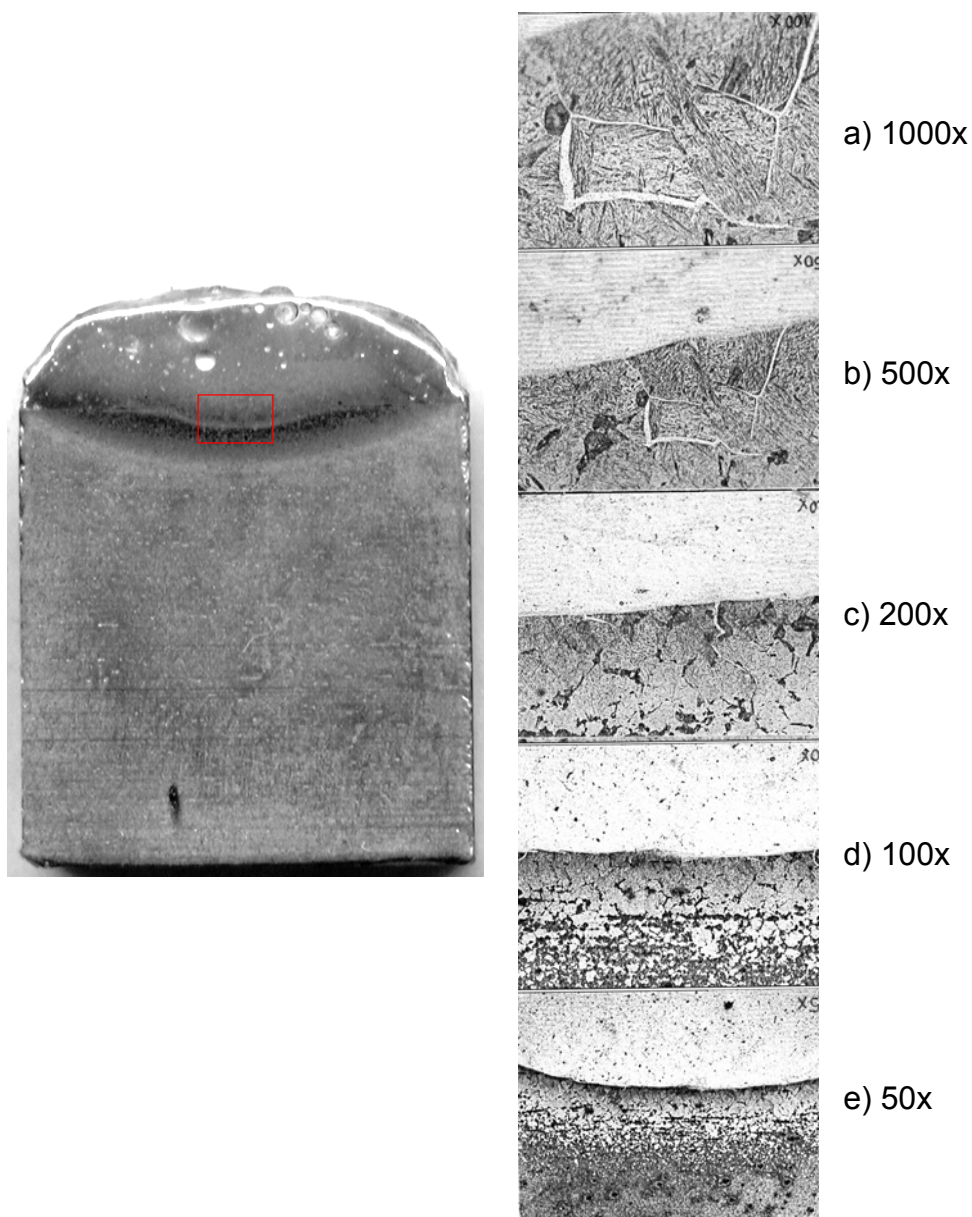
Nr próbki	Ilość warstw	Gaz osłonowy	Prędkość podawania drutu elektrodowego v_{el} [m/min]	Napięcie łuku U_n [V]	Prędkość napawania v_n [mm/s]
183	pojedynczy ścieg	50% Ar, 50% He	7,4	23	3
208	pojedynczy ścieg	100% He	5,5	23	3
220	pojedynczy ścieg	100% Ar	5,5	23	3
P114	jedna	100% Ar	5,5	23	3
X22	dwie	100% Ar	5,5	23	3

Wycięte próbki podano obróbce przez szlifowanie i polerowanie. Następnie przygotowane powierzchnie przez obróbkę skrawaniem wytrawiono w przypadku brązu odczynnikiem Mi17Cu wykonanym zgodnie z normą PN-75/H-04512 „Metale nieżelazne - Odczynniki do ujawniania mikrostruktury”, a stal 4% roztworem nitalu sporządzonym wg PN-CR 12361:2002 (U) „Badania niszczące spoin materiałów metalowych - Odczynniki do badań makroskopowych i mikroskopowych”.

10.7.1 Badania metalograficzne

Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym Nikon Eclipse ME 600P. Zdjęcia wykonano kamerą Panasonic GP-KR-222 z wykorzystaniem oprogramowania Aphelion 3.2, zapisując pliki w rozdzielczości 768x576 pikseli. Na rys. 10.48-10.53 przedstawiono makrofotografie zglądów

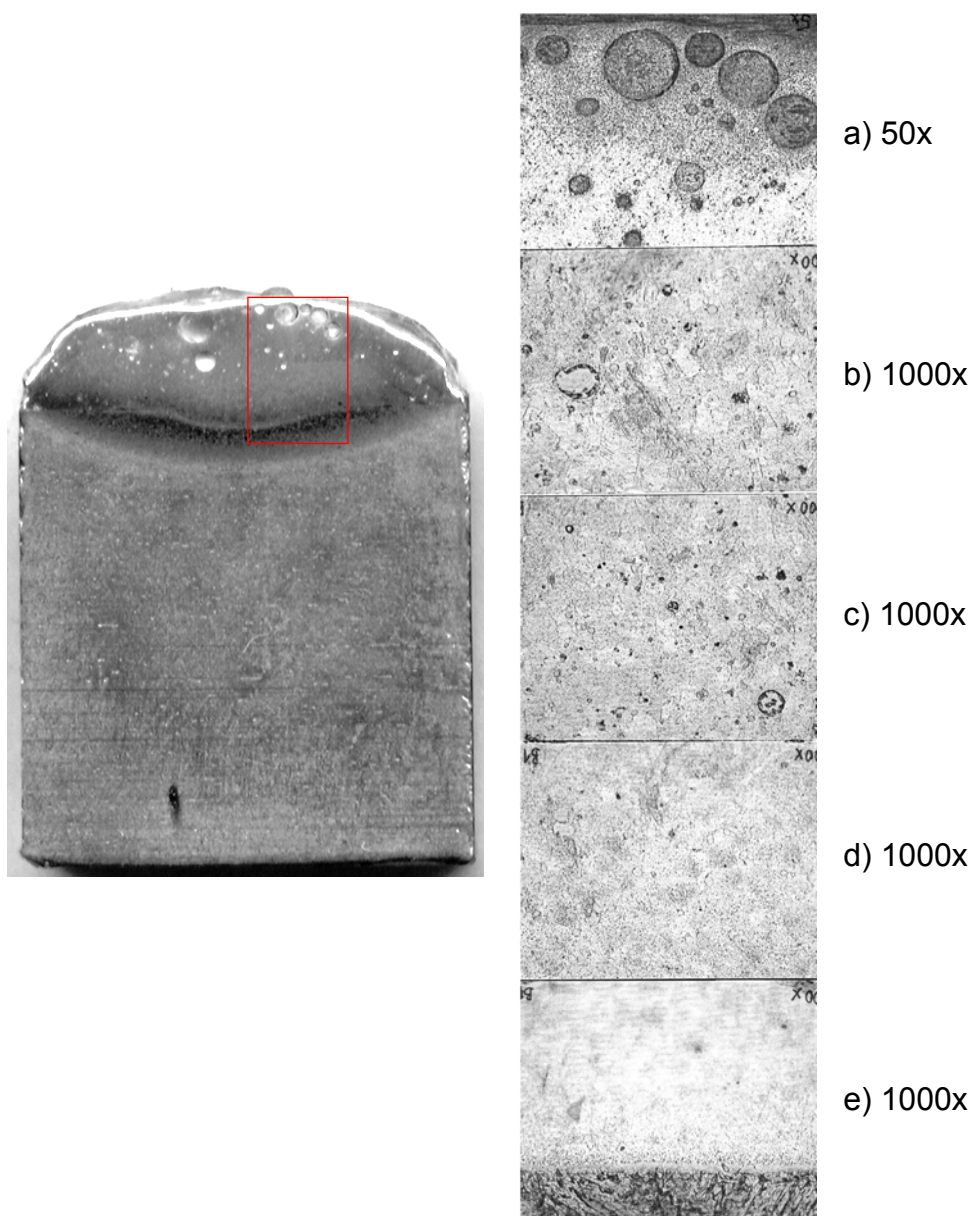
metalograficznych wraz wybranymi miejscami obserwowanymi pod mikroskopem, które na rysunkach zaznaczono prostokątami lub kwadratami.



Rys. 10.48. Zgląd próbki nr 208 wraz z obserwowaną linią przejścia (objaśnienia w tekście)

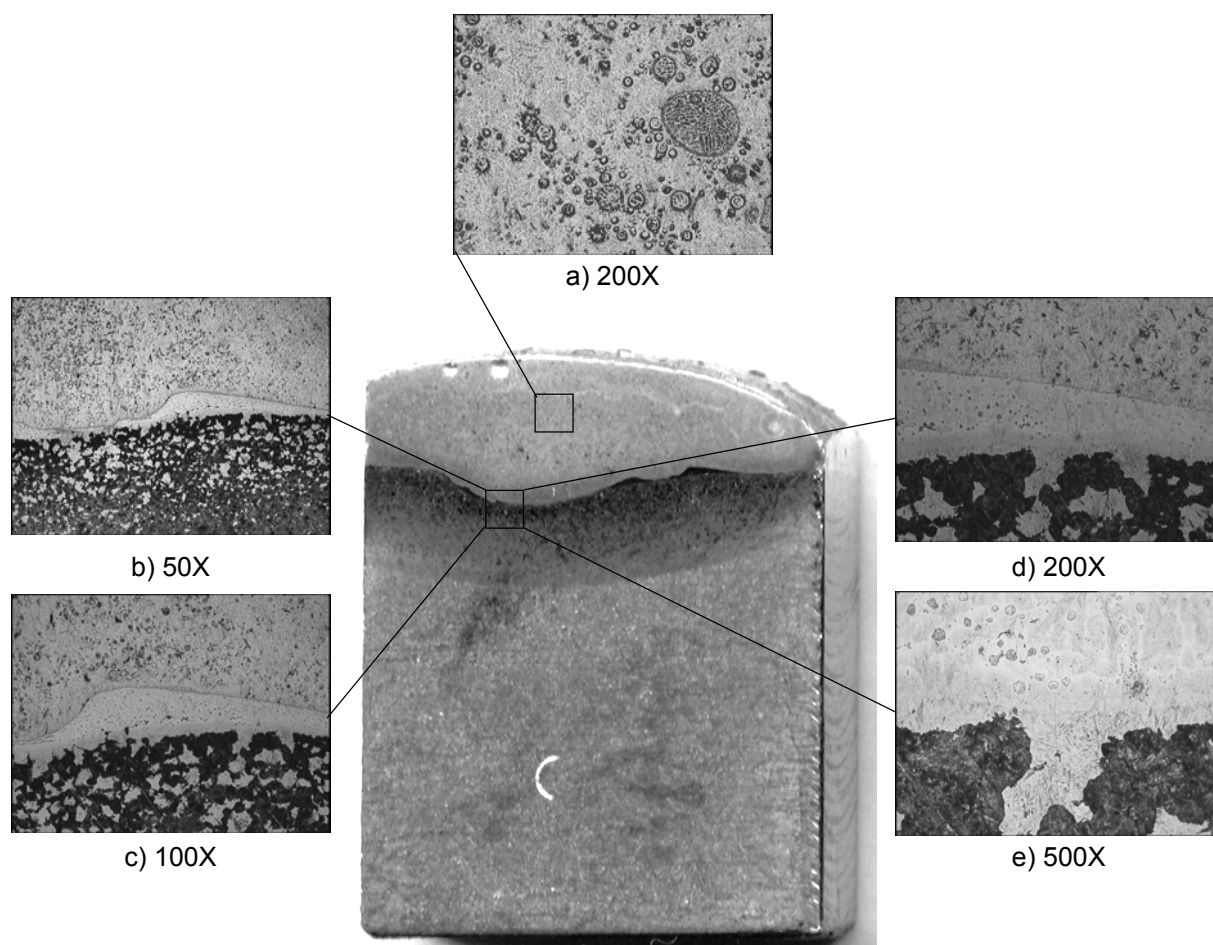
Na zglądzie próbki (rys.10.48) wyraźnie widoczne są pory o średnicy do 0,5 mm, szczególnie w górnej części napoiny, spowodowane niedostateczną osłoną helową. Na rys.10.48d i e widoczna jest strefa rozrostu ziarna do głębokości 0,45 mm. Na rys.10.48a,b i c można zaobserwować zastygły brąz uwięziony pomiędzy ziarnami stali. Stal na tych rysunkach ma strukturę martenzytyczną

z troostytem. W pęknięciu został uwięziony eutektoid $\alpha + \varepsilon$. Głębokość pęknięcia wypełnionego brązem widocznego na rys.10.48c wynosi 0,15 mm.



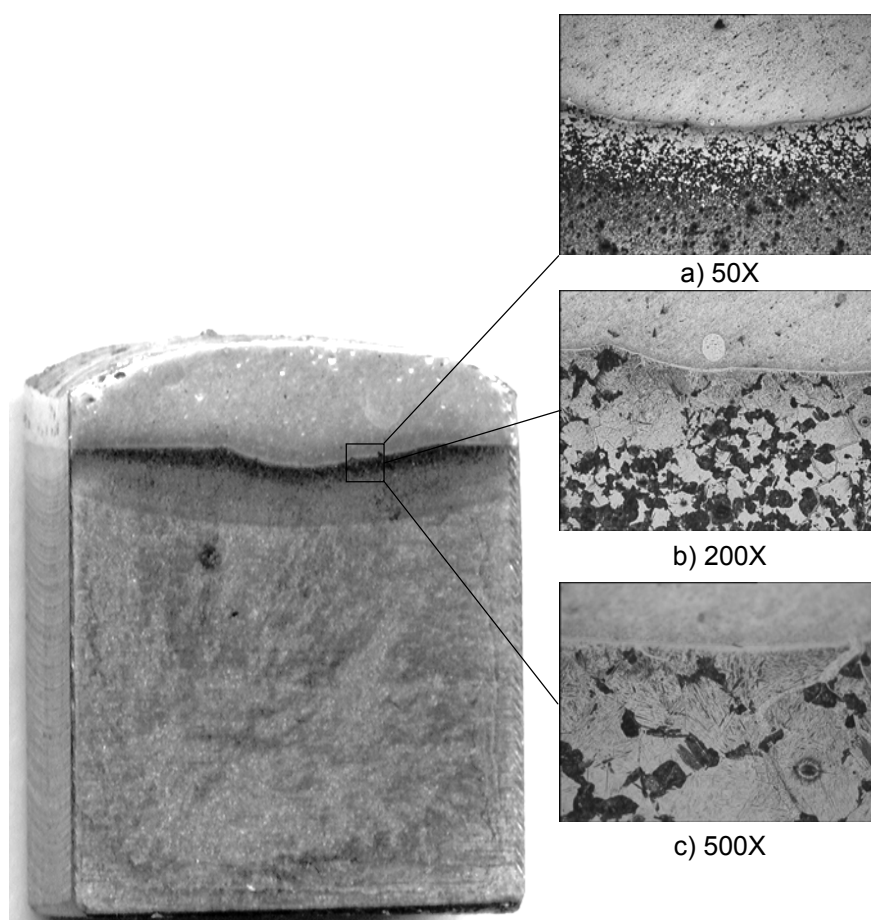
Rys. 10.49. Zgład próbki nr 208 wraz z obserwowanym przekrojem przez napoinę (objaśnienia w tekście)

Rys.10.49b-e przedstawiają strukturę brązu. Na makrofotografii zgładu próbki (rys.10.49) jak i na rys.10.49a widoczne są pory, natomiast na rys.10.49b i c można zaobserwować mikropory i wtrącenia niemetaliczne spowodowane zastosowaniem preparatu silikonowego służącego do zabezpieczania dyszy gazowej przed odpryskami.



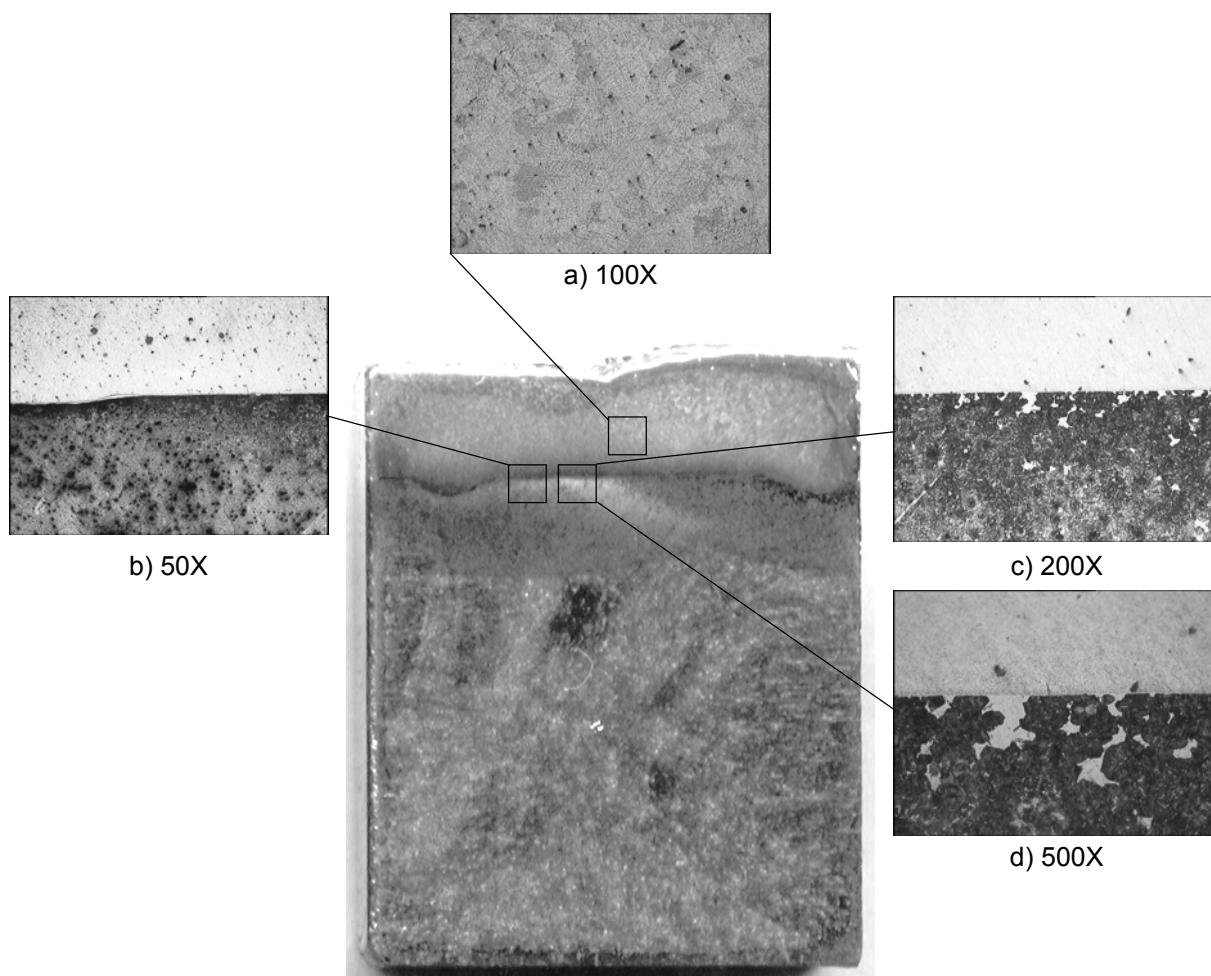
Rys. 10.50. Zgląd próbki nr 183 wraz z powiększeniami linii przejścia i fragmentu napoiny (objaśnienia w tekście)

Na zglądzie próbki (rys.10.50) bezpośrednio pod powierzchnią zewnętrzną widoczne są dwa duże pęcherze gazowe. Powiększenie fragmentu przekroju napoiny (rys.10.50a) pokazuje strukturę brązu z licznymi wtrąceniami niemetalicznymi, których obecność wyjaśniono w opisie rys.10.49. Rys.10.50b przedstawia strefę rozrostu ziarna do głębokości 0,55 mm. Rys.10.50b prezentuje połączenia brązu ze stalą, fragment tej strefy pokazuje przy większych powiększeniach rys.10.50c i d. Widoczny jest obszar wypełniony nowopowstałym stopem o charakterystyce eutektyki. Na fot.10.50e widoczne są w strefie stali przylegającej do warstwy połączenia wydzielania perlitu i bainitu.



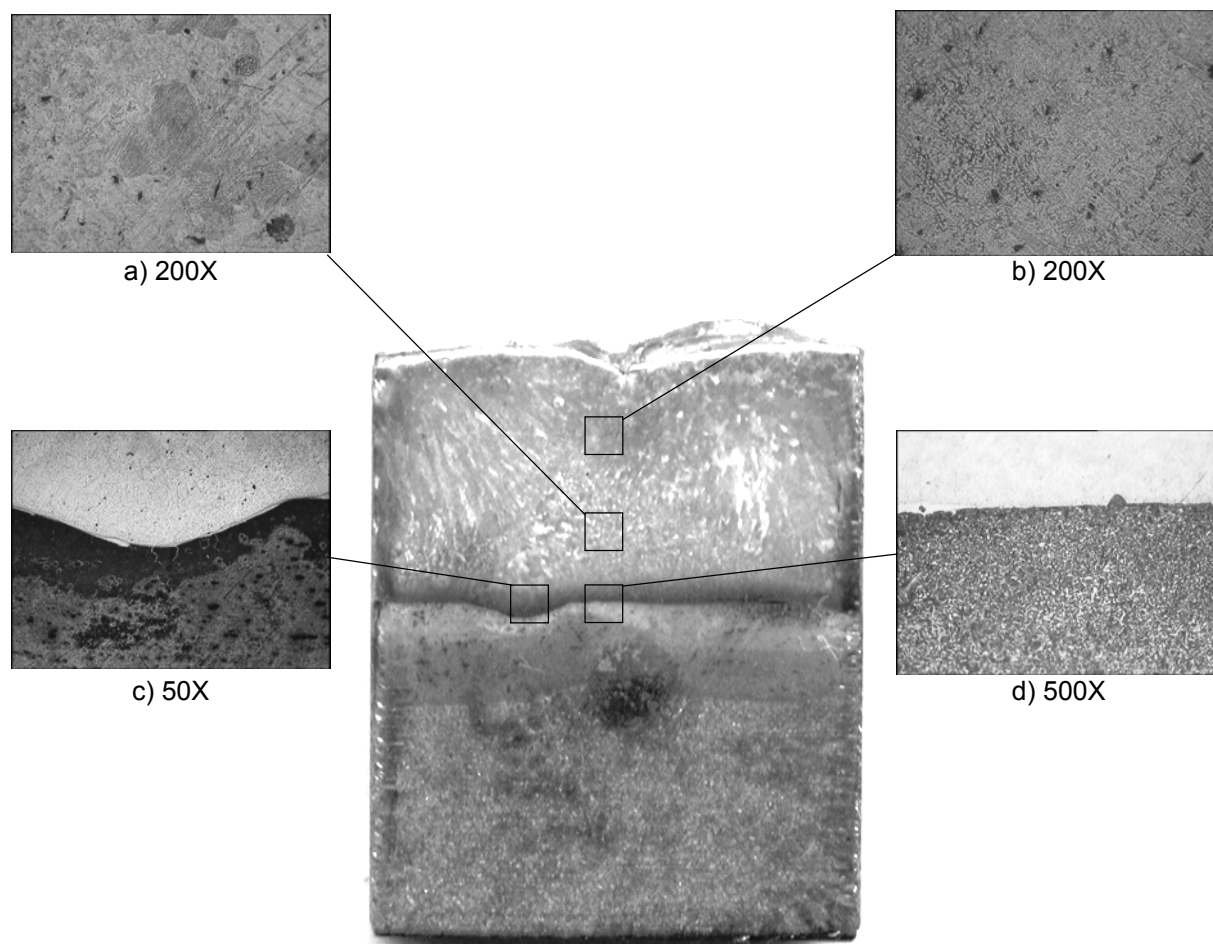
Rys. 10.51. Zgład próbki nr 220 wraz z powiększeniami linii przejścia (objaśnienia w tekście)

W górnej części ściegu (rys.10.51) widoczne są drobne pory. Na rys.10.51a można zaobserwować strefę rozrostu ziarna, której grubość wynosi 0,4-0,45 mm. Powiększenia linii przejścia (rys.10.51b i c) uwidaczniają strukturę bainitu i perlitu oraz pęknięcia wypełnione brązem, których końce znajdują się poza obrysem fotografii.



Rys. 10.52. Zgląd napoiny jednowarstwowej nr P114 wraz z powiększeniami linii przejścia i fragmentu napoiny (objaśnienia w tekście)

Na zglądzie napoiny jednowarstwowej (rys.10.52) widoczne są niewielkie i nieliczne pory. Rys.10.52a przedstawia strukturę brązu z widocznymi mikroporami. Na rys.10.52b-d można zaobserwować niewielką strefę rozrostu ziarna znajdującą się w sąsiedztwie linii przejścia.



Rys. 10.53. Zgład napoiny dwuwarstwowej nr X22 wraz z powiększeniami linii przejścia i fragmentami napoiny (objaśnienia w tekście)

Jako zgład napoiny dwuwarstwowej (rys.10.53) wybrano miejsce przejścia pomiędzy dwoma ściegami dla warstwy szczytowej. Na zgładzie makro widoczne są bardzo nieliczne pory w warstwie przypowierzchniowej. Na rys.10.53c można zaobserwować miejsca powstania nowego stopu na granicy stali i napoiny z brązu oraz pęknięcia wypełnione brązem o głębokości 0,1 mm. Dla powiększenia 500x widoczna jest strefa rozrostu ziarna na głębokość 0,08 mm. Rys.10.53a i b przedstawiają strukturę brązu wraz wtrąceniami niemetalicznymi i mikroporami.

Analizując wyniki badań metalograficznych można stwierdzić, że próbkami pozbawionymi pęknięć były próbki: jednowarstwowa i ścieg wykonany w osłonie gazowej składającej się z 50% Ar i 50% He. Pozostałe próbki posiadały niewielkie pęknięcia wypełnione brązem do głębokości 0,15 mm. Pojedyncze ściegi miały

strefy rozrostu ziarna o głębokościach niewiele różniących się od siebie i wynoszących od 0,45 mm dla ściegów wykonanych w atmosferach czystych gazów Ar oraz He, do 0,55 mm dla ściegu wykonanego w osłonie 50% Ar i 50% He. W strefach tych można zaobserwować struktury mające dużą twardość, takie jak martenzyt czy bainit. Niewielką strefę rozrostu ziarna lub jej brak posiadały napoiny warstwowe. Najmniejszą liczbę porów lub ich brak wykazywały również napoiny warstwowe. Pojedyncze ściegi były mocno porowate.

Na podstawie tych obserwacji można stwierdzić, że najlepsze wyniki do praktycznego wykorzystania przy wyżej ustalonych parametrach technologicznych można uzyskać dla napoin warstwowych nakładanych w osłonie czystego argonu. Charakteryzują się one niewielką strefą występowania struktur utwardzonych lub ich brakiem oraz niską porowatością. Należy zwrócić jedynie uwagę na powstające minimalne pęknięcia do głębokości 0,1 mm.

10.7.2 Badania składu chemicznego

Przeprowadzone badania składu chemicznego strefy połączenia brązu z stalą obejmowały analizę liniową i powierzchniową. Analizowano obecność podstawowych pierwiastków wchodzących w skład połączenia stali z brązem: żelaza, manganu, krzemu, miedzi i cyny. Badania składu chemicznego zrealizowano wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-5510LV z przystawką EDS - 500 DIGITAL PROCESSING firmy IXRF SYSTEMS, Inc.

Wyniki analizy liniowej przedstawiono w formie elektronicznych obrazów. Na makrofotografiach linię, wzdłuż której dokonywano analizy chemicznej oznaczono kolorem czerwonym. Poniżej makrofotografii zamieszczono graficzne zapisy zmian zawartości pierwiastków – rys. 10.54-10.58. Wyniki analizy powierzchniowej zamieszczono na rys 10.59. Na każdym rysunku próbka ustawiona była w ten sposób, że po lewej stronie znajdowała się część podłoża stalowego, a po prawej warstwa z brązu.

Analiza liniowa składu chemicznego dla krzemu i manganu nie wykazała zmian ich zawartości we wszystkich próbkach. Może być to spowodowane stosunkowo małą zawartością tych pierwiastków w stali i występowaniem ich w brązie co najwyżej w postaci zanieczyszczeń.

Na wykresach składu chemicznego próbki nr 183 wykonanej w osłonie 50% Ar i 50% He (rys.10.54) dla miedzi i cyny można zauważyć wyraźny skok pokrywający się z granicą stali i brązu na próbce. W przypadku żelaza zaobserwowane zapisy nie świadczą o obecności żelaza w brązie, ale są odzwierciedleniem występujących pęcherzy. Na mikrofotografii po stronie brązu widoczne są liczne mikropęcherze i pęcherze o maksymalnej średnicy 0,05 mm.

Rys.10.55 przedstawia próbkę nr 208 wykonaną w atmosferze czystego helu. Zawartości Fe, Cu i Sn pokrywają się z obszarami stalowego podłoża i napoiny z brązu. Na zdjęciu widoczne są liczne mikropęcherze i mała ilość pęcherzy o średnicy maksymalnej 0,05 mm.

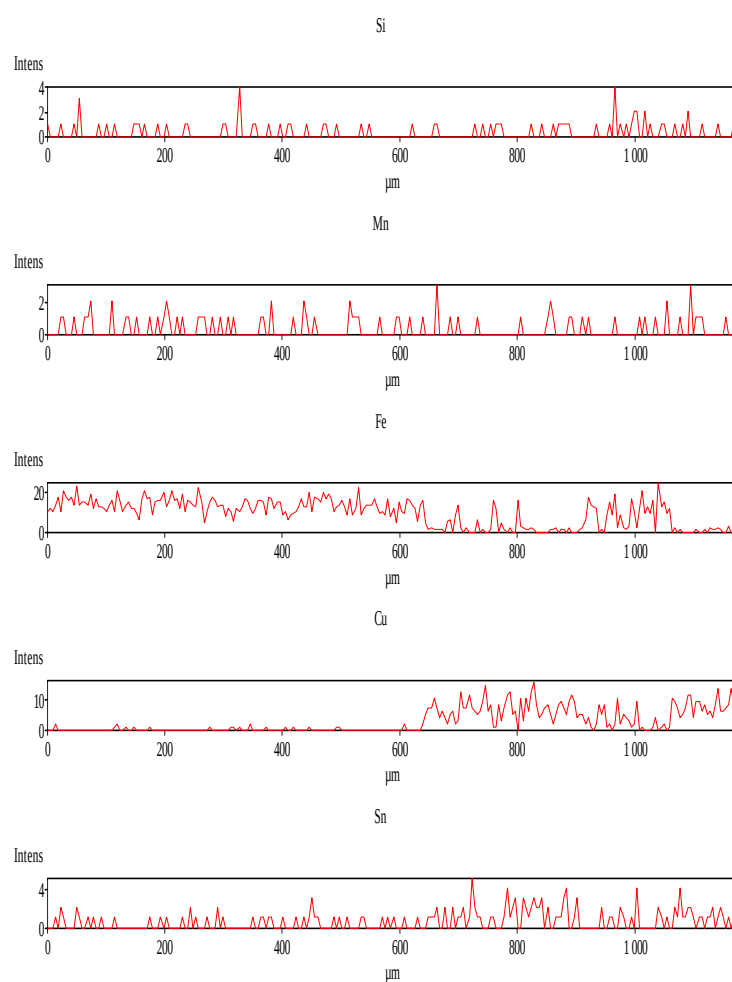
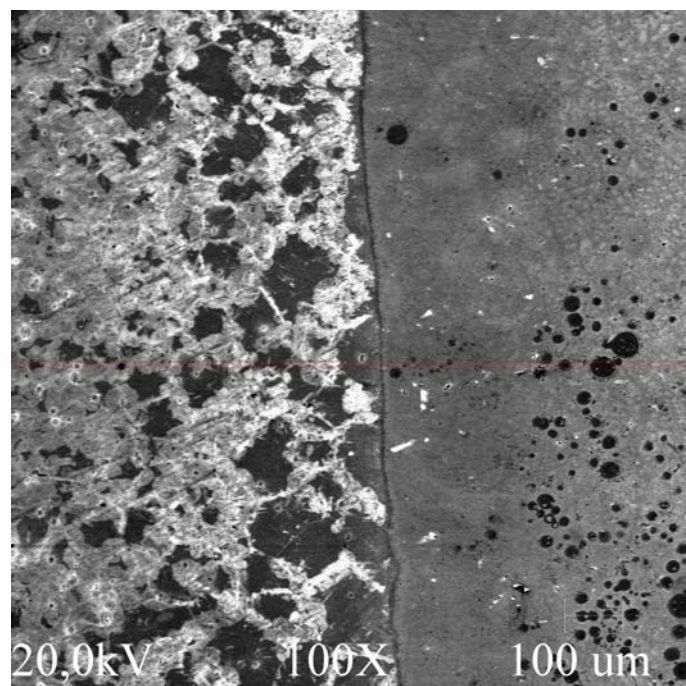
Dla próbki nr 220 (rys.10.56) wykonanej w atmosferze czystego argonu, przebieg składu chemicznego dla Fe, Cu i Sn jest zgodny z obszarami dla stali i brązu. Na fotografii można zaobserwować nieliczne mikropęcherze, z których największy ma średnicę 0,05 mm.

Dla napoin jedno- (próbka nr P114) i dwuwarstwowych (próbka nr X22) - rys.10.57-58 wykonanych w czystym argonie, zawartości Fe i Cu są zgodne z obszarami występowania stali i brązu. Natomiast w przypadku cyny dla tych dwóch próbek można zauważyć minimalne oddalenie (rzędu 100 – 150 μm) występowania jej od granicy brązu z stalą, związane jest to najprawdopodobniej z wielokrotnym lokalnym nagrzewaniem brązu podczas układania kolejnych ściegów napoiny.

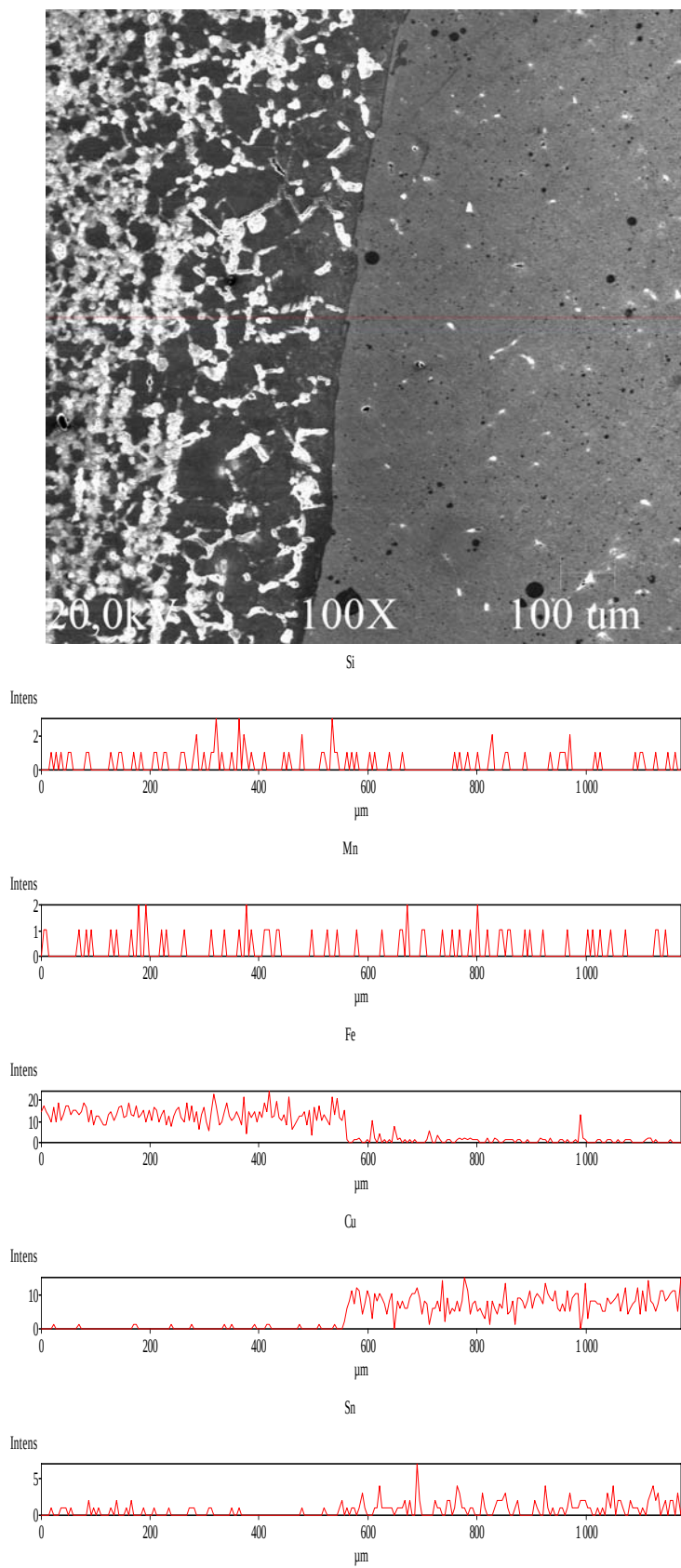
Dla napoiny jednowarstwowej (rys.10.57) na mikrofotografii widoczne są jedynie mikropęcherze, natomiast brak jest większych pęcherzy. Na granicy styku brązu z stalą widoczne są dwie szczeliny o szerokości maksymalnej 0,01 mm.

Dla napoiny dwuwarstwowej (rys.10.58) na fotografii widoczne są tylko mikropęcherze. Podobnie jak w napoinie jednowarstwowej znajduje tu się szczelina o szerokości do 0,02 mm.

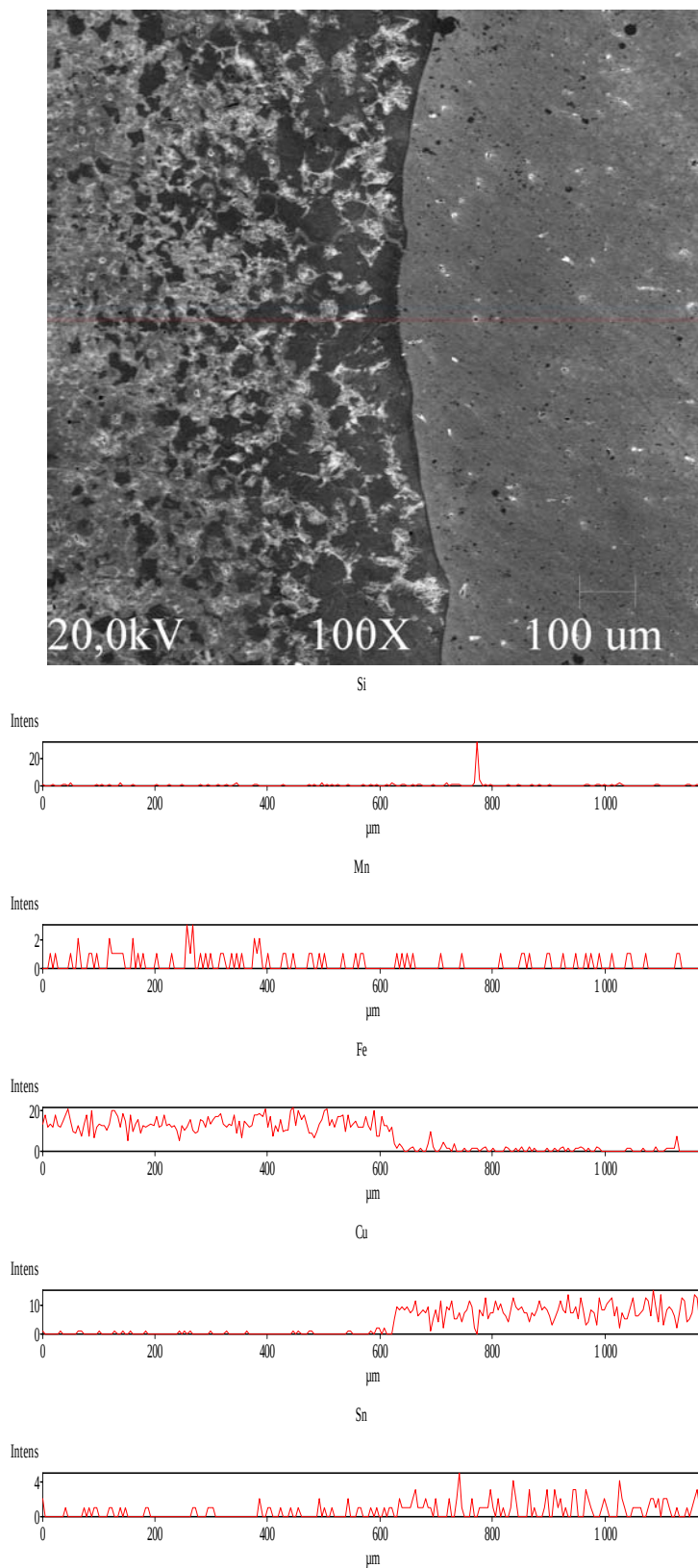
Na rys.10.59 przedstawione wyniki analizy powierzchniowej dla próbki nr 220 wykonanej w osłonie czystego argonu. Są one w pełni zgodne z rysunkami analizy liniowej.



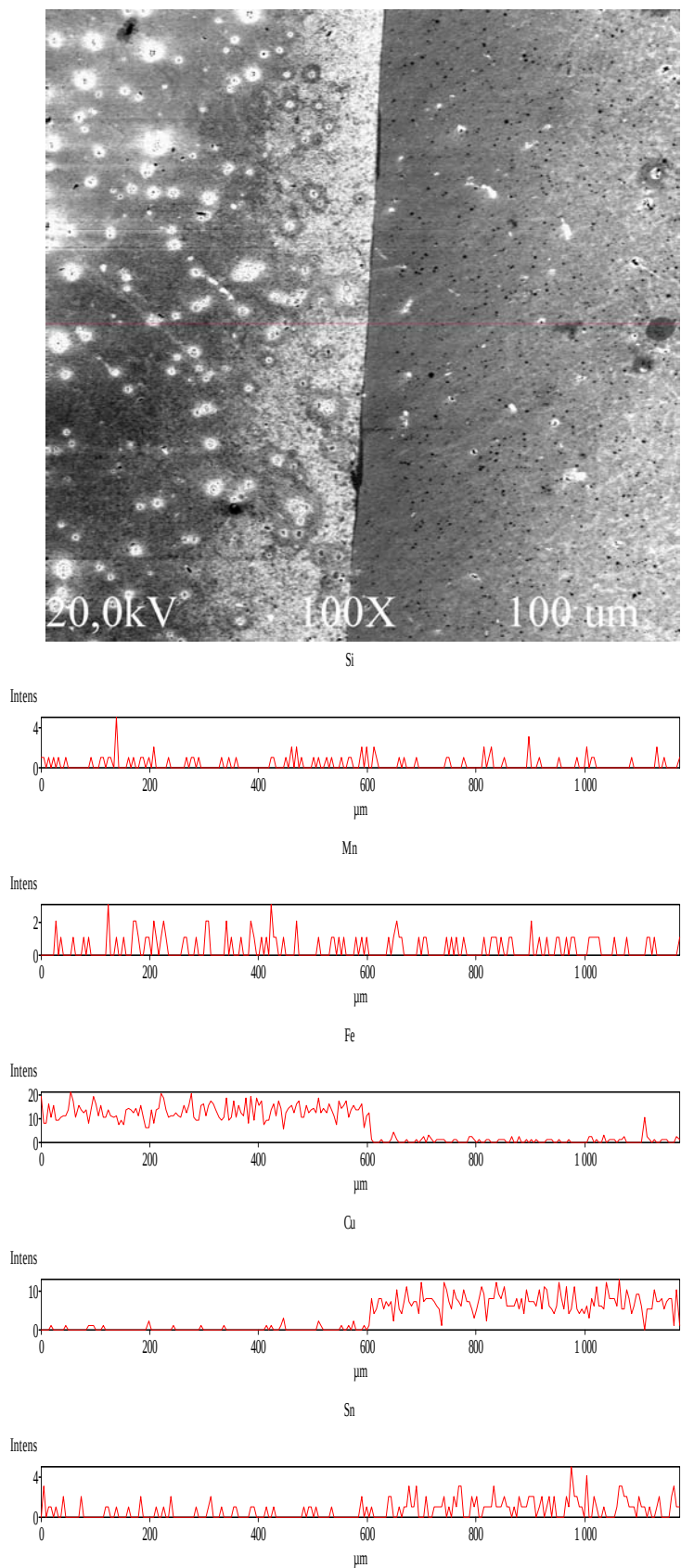
Rys. 10.54. Mikrofotografia linii przejścia próbki nr 183 wraz z wynikami analizy liniowej składu chemicznego



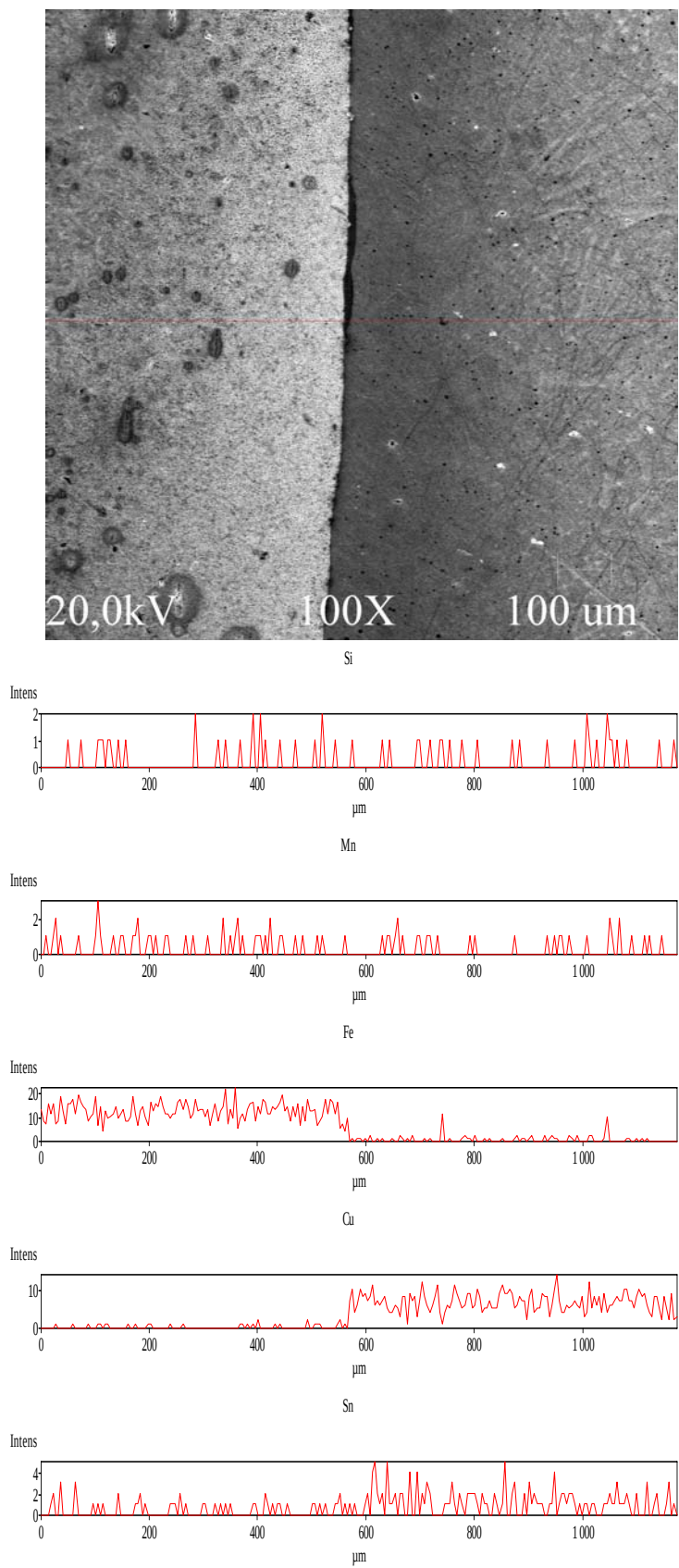
Rys. 10.55. Mikrofotografia linii przejścia próbki nr 208 wraz z wynikami analizy liniowej składu chemicznego



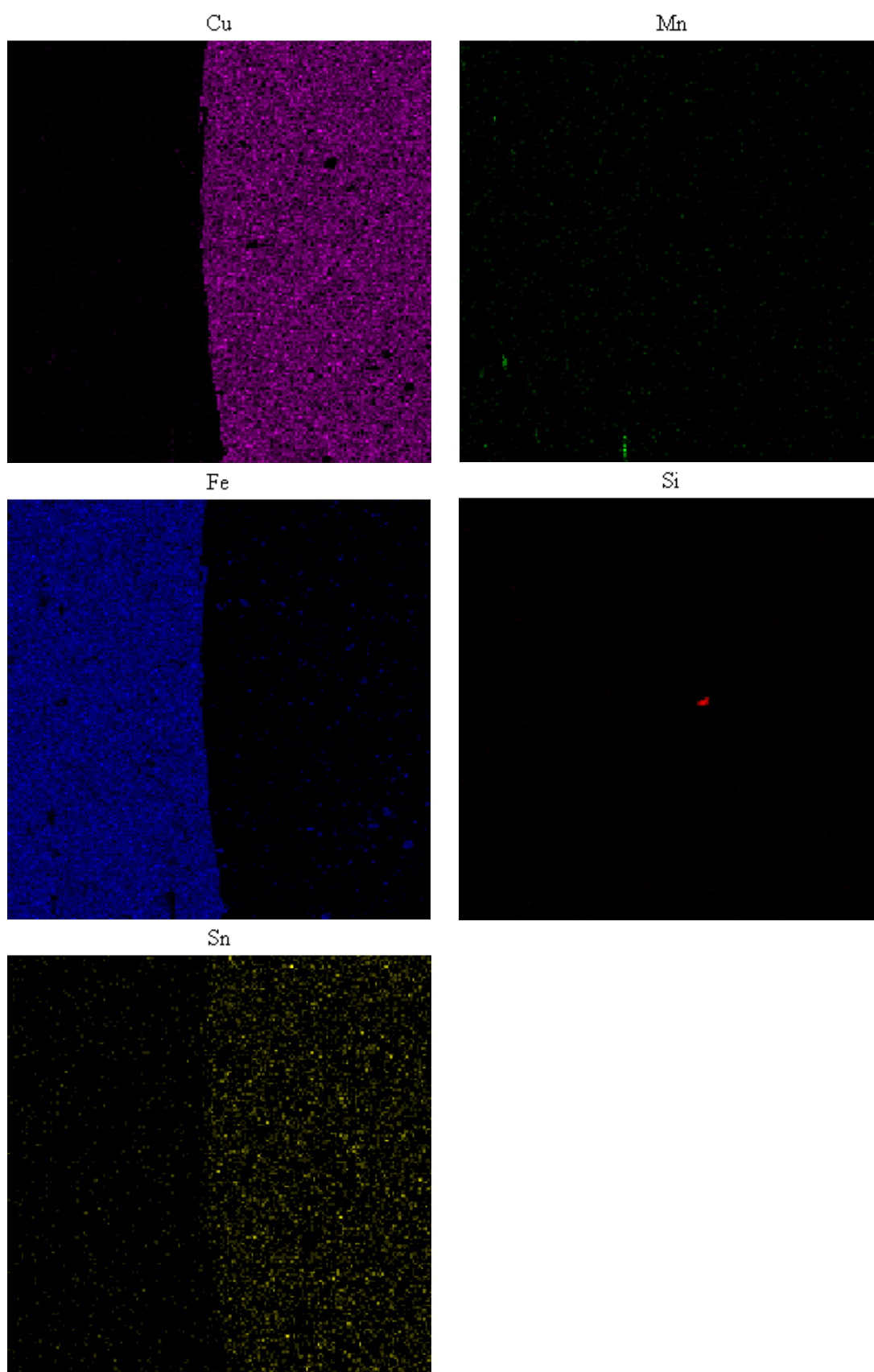
Rys. 10.56. Mikrofotografia linii przejścia próbki nr 220 wraz z wynikami analizy liniowej składu chemicznego



Rys. 10.57. Mikrofotografia linii przejścia próbki nr P114 wraz z wynikami analizy liniowej składu chemicznego



Rys. 10.58. Mikrofotografia linii przejścia próbki nr X22 wraz z wynikami analizy liniowej składu chemicznego



Rys. 10.59. Obrazy wyników analizy powierzchniowej składu chemicznego dla próbki nr 220

10.8. Badania rentgenograficzne

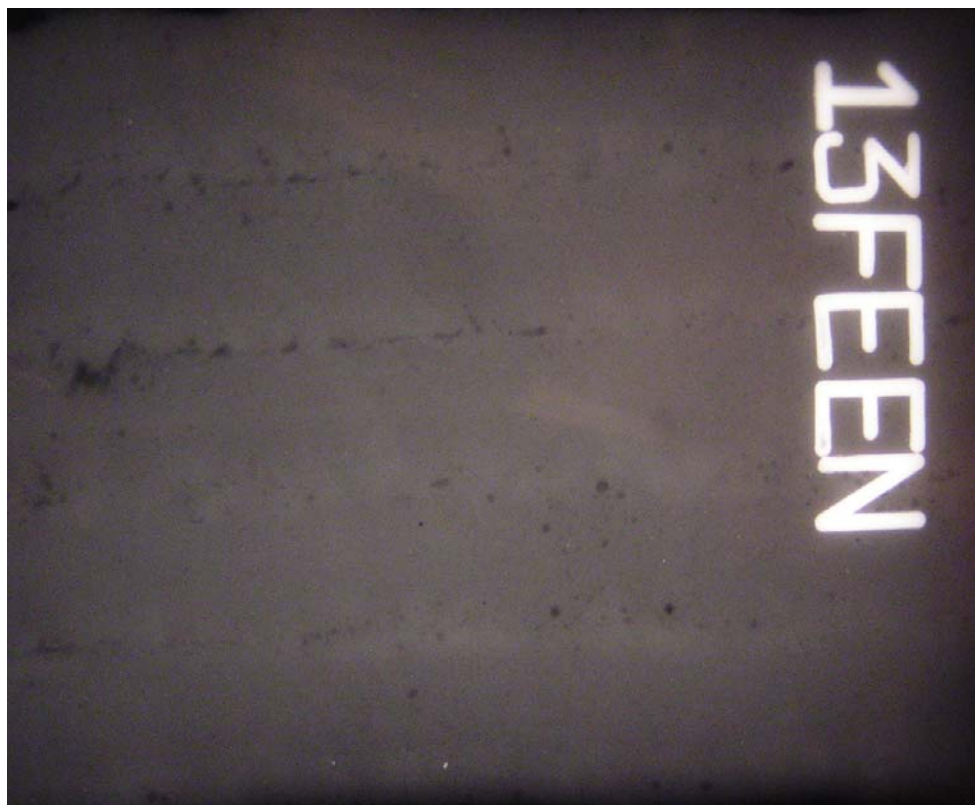
Badania przeprowadzono w celu wykrycia wad wewnętrznych w napoinach jedno i dwuwarstwowych. Prześwietlane napoiny jedno i dwuwarstwowe pochodziły z próbek wykonanych w trakcie określania wpływu doboru podziałki ściegów na geometrię wykonanych warstw z brązu. Dla polepszenia wykrywalności niezgodności spawalniczych w napawanych warstwach brązu zmniejszono grubość materiału podłoża do 5,5 mm. Grubość napoiny jednowarstwowej po wyrównaniu powierzchni przez obróbkę frezowaniem i szlifowaniem wynosiła 1,5 mm, zaś dwuwarstwowej 4,5 mm.

Badania rentgenograficzne zrealizowano zgodnie z normą PN-EN 1435 „Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania radiograficzne złączy spawanych”. Wskaźniki jakości obrazu W13 umieszczono od strony źródła promieniowania. Do prześwietlenia próbek użyto promieniowania X, wykorzystując do tego celu aparat Andrex 300kV. Uzyskana klasa jakości obrazu wg powyższej normy wynosiła B+.

Rys. 10.60 przedstawia obraz radiograficzny napoiny jednowarstwowej a rys.10.61 napoiny dwuwarstwowej.



Rys. 10.60. Obraz radiograficzny jednowarstwowej próbki napawanej brązem



Rys. 10.61. Obraz radiograficzny dwuwarstwowej próbki napawanej brązem

Na rys. 10.60 dla napoiny jednowarstwowej widoczne są gniazda pęcherzy o średnicy maksymalnej 1 mm i wyodrębnione wtrącenia żużla, znajdujące się na styku ściegów napoiny. Wykryte wtrącenia pochodzą najprawdopodobniej od wypalonego preparatu silikonowego (rys. 10.62), trudnego do usunięcia z zagłębień na brzegu napoin, a użytego do zabezpieczenia dyszy przed przyklejaniem się odprysków. Jego obecność potwierdziły również badania metalograficzne (rys. 10.48-10.49) i składu chemicznego (rys.10.59 dla krzemu).



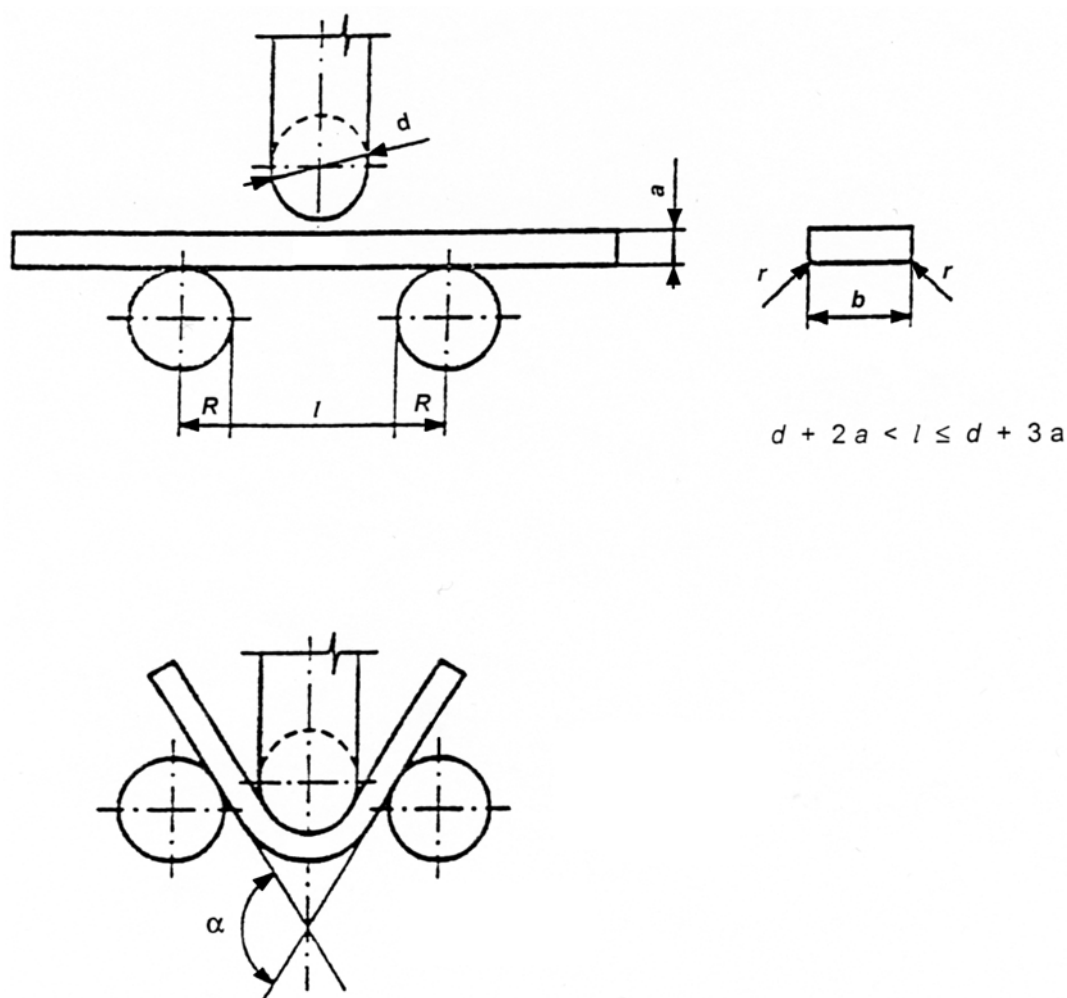
Rys. 10.62. Ślady wypalonego preparatu silikonowego wokół napoin z brązu

W napoinach dwuwarstwowych znajdują się pęcherze gazowe do średnicy 1 mm i łańcuchy pęcherzy będące na styku ściegów napoiny. Na wykonanych

rentgenogramach nie stwierdzono żadnych pęknięć, zarówno w napoinach jednolitych i dwuwarstwowych. Ujawnione wady nie ograniczają zastosowania warstw z brązu na powierzchnie ślizgowe czy też uszczelniające w armaturze niskociśnieniowej.

10.9. Próba zginania

Badania przeprowadzono w celu określenia stopnia związania napawanych warstw brązu z podłożem stalowym przy małym wtopieniu i nieznacznym udziale materiału podłoża w napoinie. Badania zrealizowano na próbkach wyciętych poprzecznie do kierunku układanych ściągów z elementów wykorzystywanych w badaniach rentgenograficznych. Próbę zginania wykonano w oparciu o normę PN-EN 910: 1999 „Spawalnictwo. Badania niszczące spawanych złączy metali. Próby zginania”. Próbę zginania zrealizowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 10.63.



Rys.10.63. Schemat próby zginania poprzecznego

Wymiary dotyczące próby zginania zestawiono w tab. 10.12.

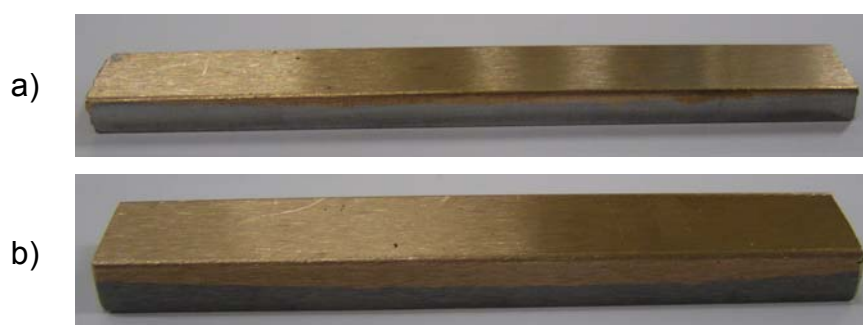
Tablica 10.12. Zestawienia wymiarów związanych z próbą zginania

Nazwa wymiaru (rys. 10.62)	Sym- bol	Wartość wymiaru		
		próbka porównaw- cza ze stali bez napoin	próbka z napoiną jedno- warstwową	próbka z napoiną dwu- warstwową
Grubość próbki	a	6 [mm]	6 [mm]	9 [mm]
Szerokość próbki	b	15 [mm]	15 [mm]	18 [mm]
Grubość napawanej warstwy	c	-	1,5 [mm]	4,5 [mm]
Długość całkowita próbki	L_t	115 [mm]		
Promień zaokrąglenia krawędzi próbki	r	1,2 [mm]		
Średnica trzpienia gnącego	d	30 [mm]		
Odległość między rolkami gnącymi	l	50 [mm]		
Promień rolek podporowych	R	15 [mm]		
Kąt zagięcia	α	[°]		

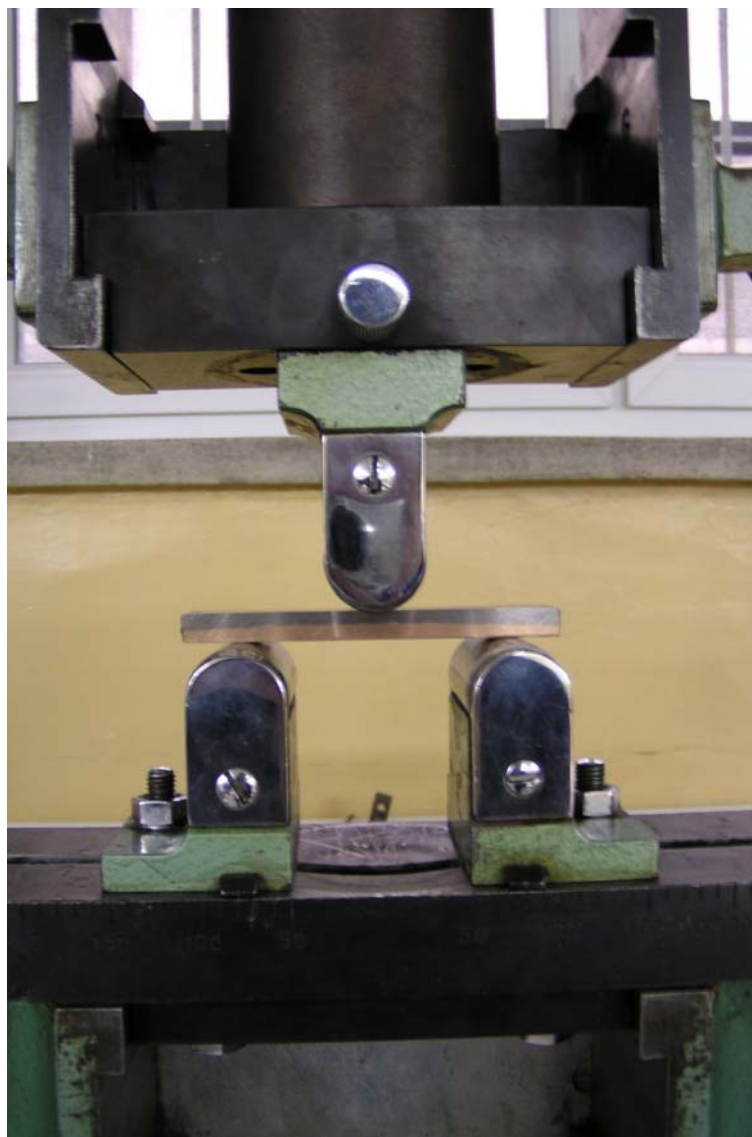
Próbie zginania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej ZDM 10/91 przedstawionej na rys. 10.64. Próbki (rys. 10.65) umieszczone w przyrządzie z rolkami posiadającymi regulację ich rozstawu, rozciągano od strony napawanych warstw z brązu (rys.10.66). Próbie zginania wykonywano do momentu pojawienia się pęknięcia w badanych próbkach. Do próby użyto po pięć próbek jedno- i dwuwarstwowych. W trakcie próby miejsce pod trzpieniem gnącym obserwowano przez szkło o pięciokrotnym powiększeniu. Kąt zagięcia mierzono kątomierzem z dokładnością odczytu 15' zgodnie z rys.10.63. Wymiary pęknięć mierzono mikroskopem warsztatowym MWD o wartości działki elementarnej 0,01 mm. Szerokość pęknięć mierzono w ich najszerszym miejscu, jakie udało się zlokalizować na długości pęknięcia. Oprócz próbek z napoinami wykonano także, dla porównania, próbę zginania dla próbki jednolitej bez napoin, wykonanej z stali gatunku 45. Wymiary tej próbki jak i wymiary dotyczące próby zginania były takie same jak dla próbek jednowarstwowych.



Rys. 10.64. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa wraz przyrządem do próby zginania



Rys. 10.65. Widok ogólny próbki jednowarstwowej (a) i dwuwarstwowej (b) do próby zginania



Rys. 10.66. Widok przyrządu do próby zginania wraz z próbką dwuwarstwową

Wyniki pomiarów prób zginania przedstawiono w tablicy 10.13.

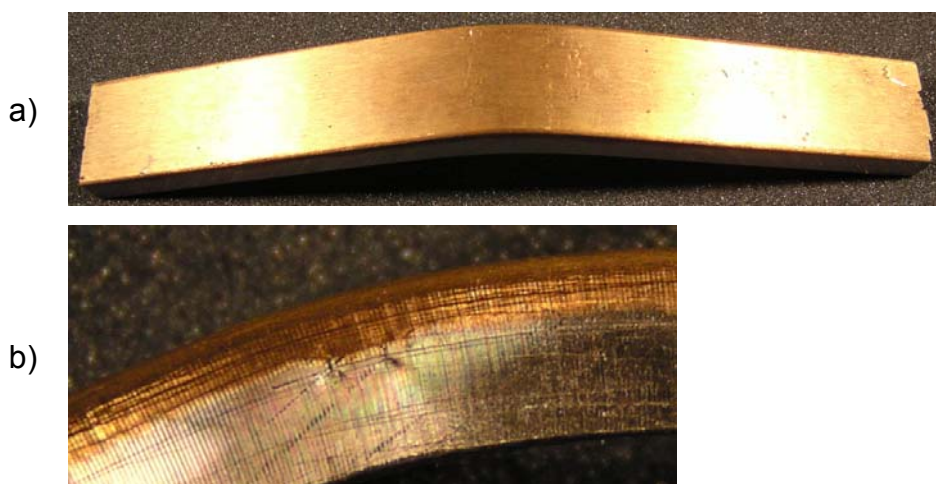
Tablica 10.13 Wyniki pomiarów próby zginania

Rodzaj próbki	Kąt zagięcia α [°]	Całkowita długość pęknięcia / [mm]	Szerokość pęknięcia s [mm]
jednowarstwowa	6°15'÷33°30'	0,36÷0,77	0,01÷0,06
dwuwarstwowa	5°15'÷16°30'	0,25÷0,48	0,01÷0,07
bez napoiny	151°	-	-

W trakcie badania próbek jednowarstwowych (rys. 10.67) pęknięcia ujawniły się wcześniej pod warstwą z brązu niż na grzbiecie próbki (rys 10.68). Podobnie było dla próbek dwuwarstwowych (rys. 10.69). Tylko dla jednej z próbek dwuwarstwowych najpierw nastąpiły pęknięcia na grzbiecie próbki o długości ok. 1 mm (rys. 10.70), a dopiero w trakcie dalszego zginania pojawiły się pęknięcia pod napoiną. Wszystkie pęknięcia znajdujące się pod napoinami mieściły się zazwyczaj w miejscach maksymalnego wtopienia ściągów tworzących napoinę. Pęknięcia przebiegały prawie we wszystkich próbkach na całej swej długości w stali, tylko nieliczne przedłużały się na obszar brązu. Pochodzenie pęknięć można tłumaczyć dalszą propagacją mikropęknięć zauważonych w trakcie badań metalograficznych.



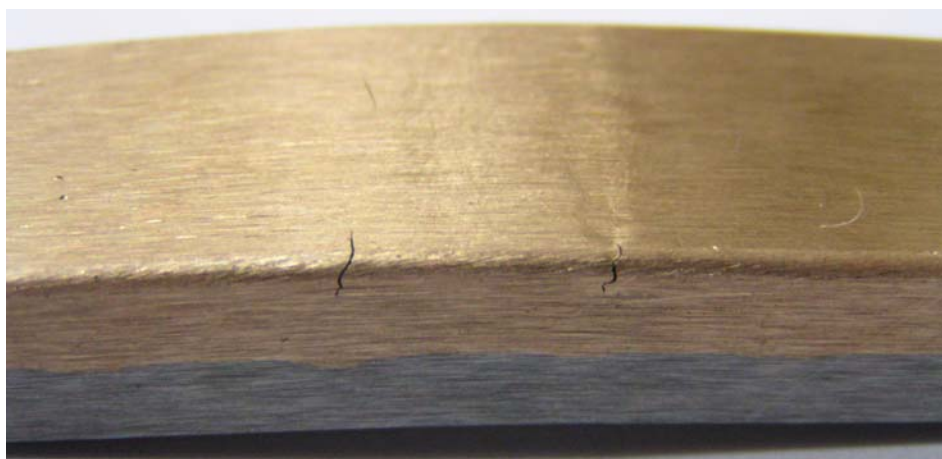
Rys. 10.67. Widok próbki jednowarstwowej i rolki dociskowej wraz z widocznymi pęknięciami między napoiną a materiałem podłoża



Rys. 10.68. Widoki próbki jednowarstwowej od grzbietu (a) i boku próbki (b)



Rys. 10.69. Widoki próbki dwuwarstwowej od grzbietu (a) i boku próbki (b)



Rys. 10.70. Próbką dwuwarstwową z pęknięciami grzbietowymi

Próbka porównawcza wykonana z stali bez napoin po próbie zginania nie posiadała żadnych wad i pęknięć, jedynie w miejscu najsilniej rozciągającym widoczne było lekkie zmatowienie powierzchni (rys. 10.71).



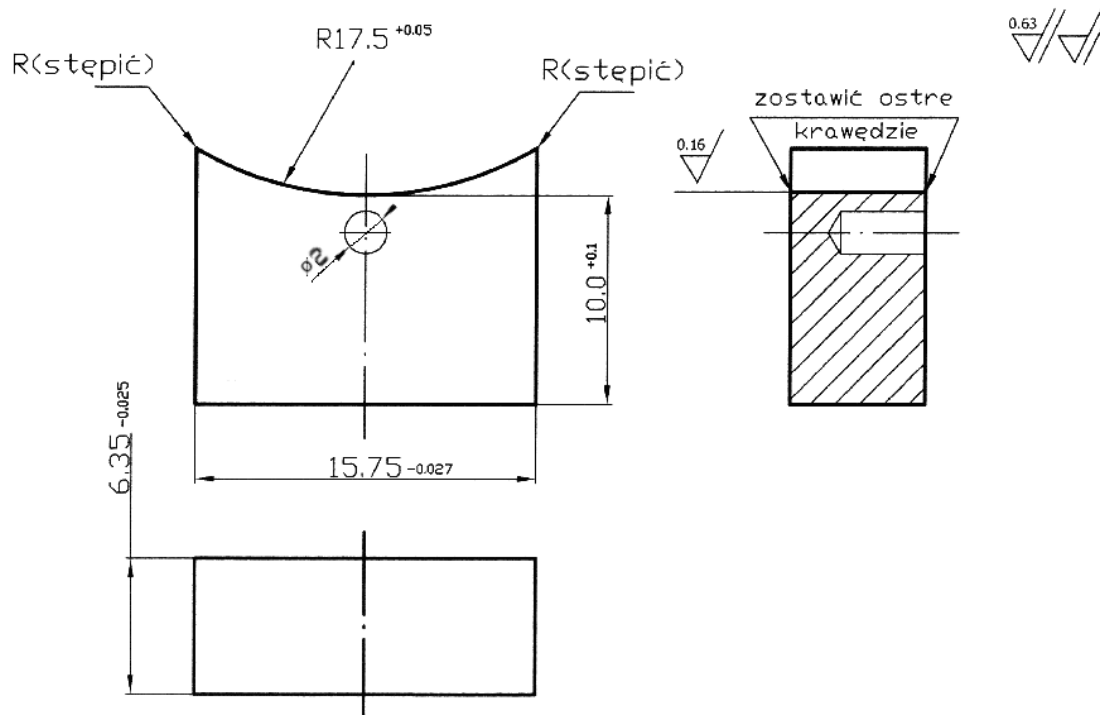
Rys. 10.71. Widok próbki porównawczej bez napoin

W żadnej z przebadanych próbek nie stwierdzono rozwarstwienia napoin z brązu z podłożem stalowym. Nałożone warstwy z brązu na stal mogą więc mieć, w razie potrzeby, praktyczne zastosowanie z uwzględnieniem kąta zginania maksymalnie do 5°.

10.10. Badania tribologiczne

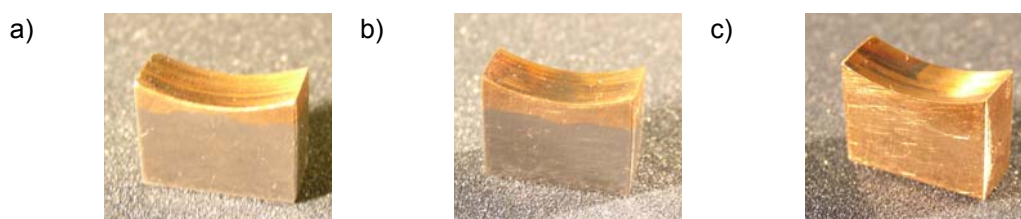
Przeprowadzone badania miały na celu określenie przydatności powłok napawanych brązem cynowym CuSn6 do zastosowania w skojarzeniach pracujących ślizgowo. Porównano nie tylko między sobą własności tribologiczne napoin wielowarstwowych z brązu CuSn6 nakładanych na podłoże stalowe metodą MIG, ale także z odlanym brązem cynowym CuSn6.

Badania przeprowadzono na mikroprocesorowym zestawie tribologicznym T-05 produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu (rys 9.6). Testy zostały przeprowadzone w styku ślizgowym w środowisku oleju mineralnego (Elf Sporti 15W40) oraz syntetycznego (Elf Synthese 5W50). Próbki do badań wycięto z nałożonych napoin z brązu CuSn6 na podłożu stalowym jedno- i dwuwarstwowych, pochodzących z wcześniejszych etapów badań. Następnie na drodze obróbki skrawaniem kształtowano je w specjalnym uchwycie zgodnie z wymogami instrukcji obsługi testera T-05 (rys. 10.72).

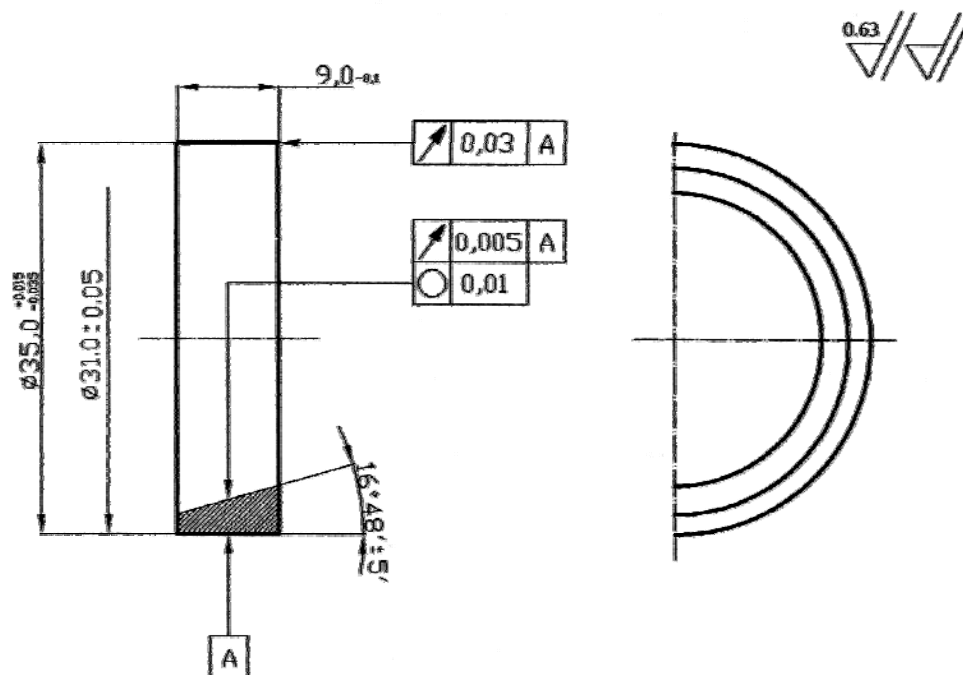


Rys. 10.72. Wymiary próbki (klocka) z wklęsłą powierzchnią tarcia [62]

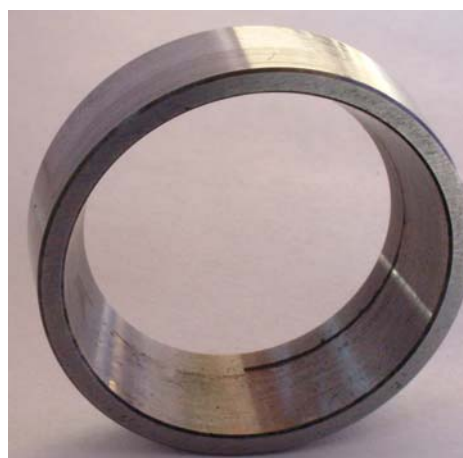
Przygotowano w ten sposób próbki w ilości 12 sztuk, po 6 z napoiny każdego rodzaju (rys. 10.73a-b). Posiadały one powierzchnie wklęsłą o polu 100 mm^2 przylegającą do rolki (rys. 10.74-10.75) ze stali hartowanej o twardości $58 \div 60 \text{ HRC}$. Dla porównania wykonano w ten sam sposób 6 szt. próbek z brązu odlanego CuSn6 (rys. 10.73c).



Rys. 10.73. Próbki z napawanymi warstwami z brązu jedno- (a), dwuwarstwowymi (b) oraz z brązu odlewanego (c)



Rys. 10.74. Wymiary przeciwpróbki (rolki) [62]



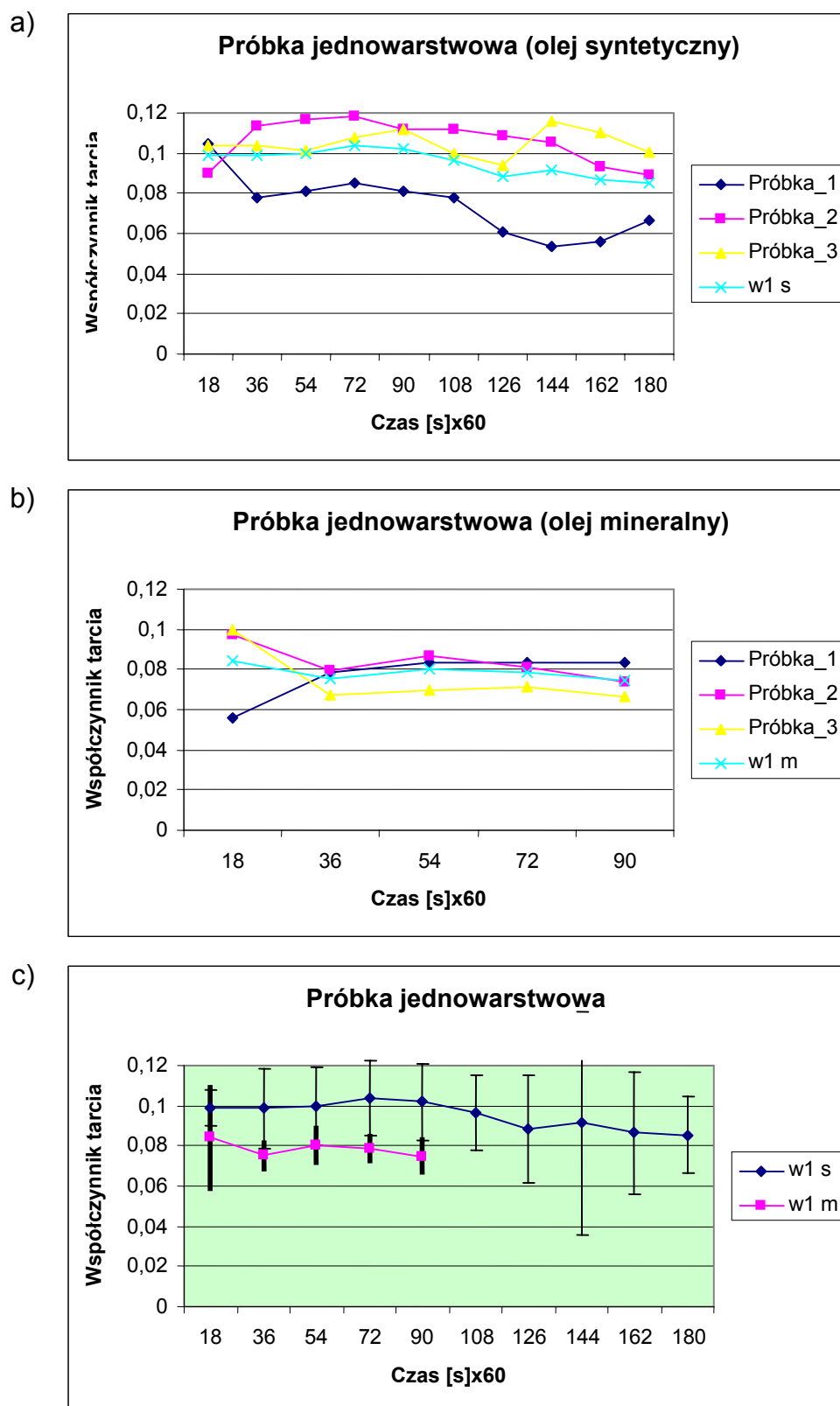
Rys. 10.75. Przeciwpróbka wykonana ze stali ŁH6

Badania polegały na przeprowadzeniu biegów tarcia pod stałym obciążeniem 3 MPa z prędkością 1,35 m/s. Czas trwania jednego biegu wynosił 1080 sek. Dla oleju syntetycznego biegów takich przeprowadzono 10, uznając, że po tym czasie, tj. 10800 sek., nastąpiło dotarcie współpracujących powierzchni. Przy badaniach pracy węzła tarcia w środowisku oleju mineralnego przeprowadzano 5 biegów tj. 5400 sek., co już wystarczało do ustabilizowania się średniej wartości współczynnika tarcia. Następnie po ostudzeniu węzła tarcia do temperatury 25°C dokonywano pomiaru sumarycznego zużycia liniowego, przy pomocy czujnika

zegarowego o wartości działki elementarnej $We=0,002$ mm. Podczas każdego biegu została rejestrowana siła tarcia, która posłużyła do wyznaczenia współczynnika tarcia. Dla każdej współpracującej pary trącej wykonano trzy pomiary równoległe, które umożliwiły określenie przedziałów ufności przy 95% prawdopodobieństwie zgodnie z procedurą [24].

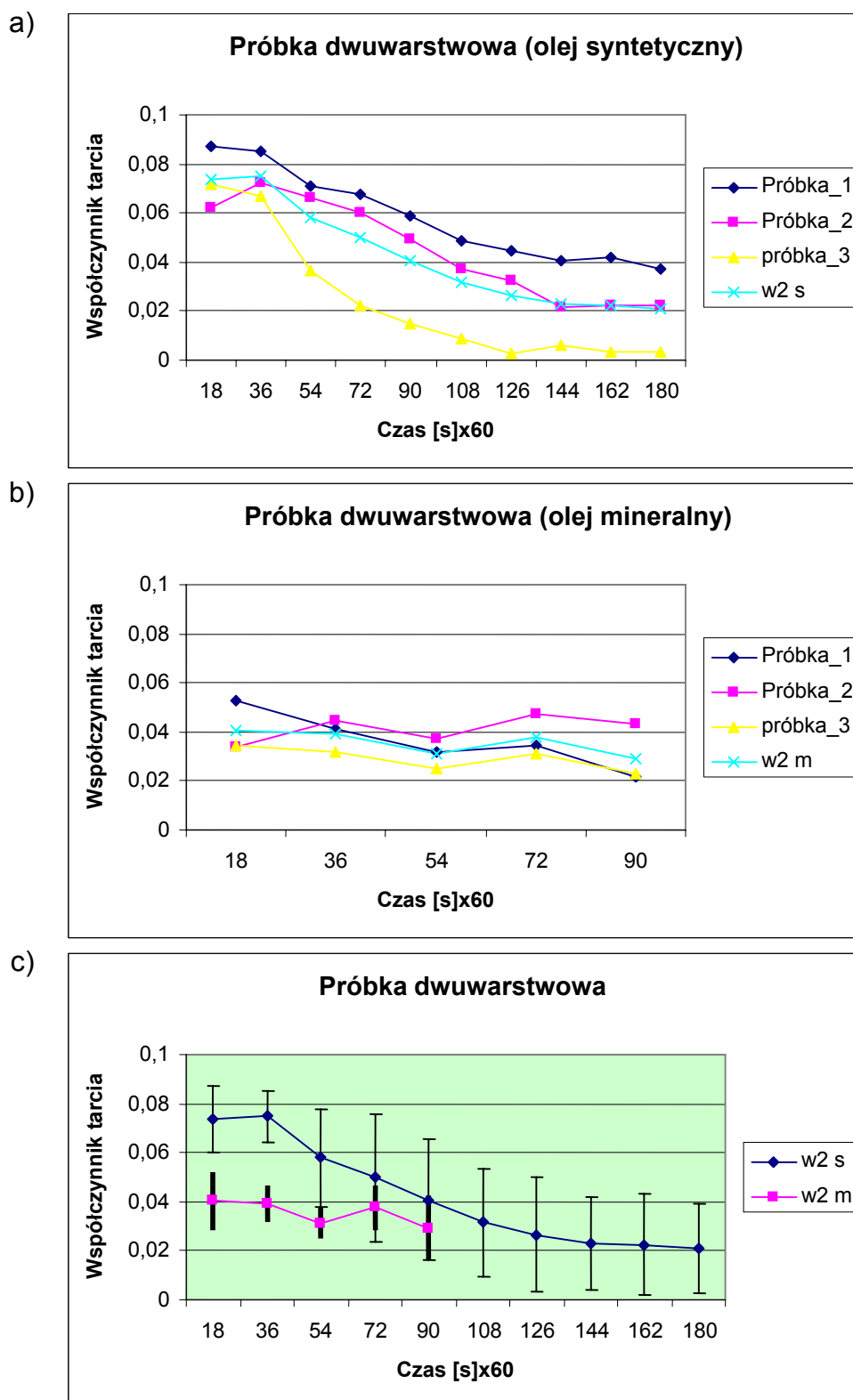
Wyniki wielogodzinnych badań węzłów tarcia zostały zarchiwizowane na twardym dysku zestawu komputerowego i posłużyły do wyznaczenia współczynników tarcia napoiny jednowarstwowej (rys. 10.76) i dwuwarstwowej (rys. 10.77), pracującej w środowisku oleju syntetycznego i mineralnego oraz próbki porównawczej z brązu o tym samym wyjściowym składzie chemicznym, jednak innej technologii półfabrykatu (odlewanego) (rys. 10.78). Można zauważyć, że próbki napawane pracujące w środowisku oleju syntetycznego mają większy rozrzut współczynnika tarcia od pracujących w środowisku oleju mineralnego. W próbkach jednowarstwowych obserwuje się wyższy współczynnik tarcia od próbek dwuwarstwowych, na co może mieć wpływ wyższa twardość napoin ułożonych bezpośrednio na podłożu stalowym. Po obróbce próbek najmniejsza odległość pomiędzy stalowym podłożem, a miejscem styku próbki z przeciwpróbką wynosi tylko ok. 0,5 mm i brąz w tym obszarze cechuje się występowaniem stali w brązie. Również dla próbek jednowarstwowych można stwierdzić nieco większy współczynnik tarcia dla oleju syntetycznego w stosunku do oleju mineralnego. Próbki dwuwarstwowe charakteryzują się podobnymi współczynnikami tarcia jak porównawcze z brązu odlewanego. Zaobserwowano również brak istotnego wpływu oleju mineralnego i syntetycznego na średnią wartość współczynników tarcia [37].

Zużycie próbek w funkcji czasu badań narasta prawie liniowo w miarę czasu trwania i nie obserwuje się istotnych różnic zarówno pomiędzy próbkami pracującymi w środowisku oleju syntetycznego i mineralnego jak i pomiędzy próbkami z napoinami warstwowymi oraz próbkami porównawczymi (rys. 10.79-10.81).



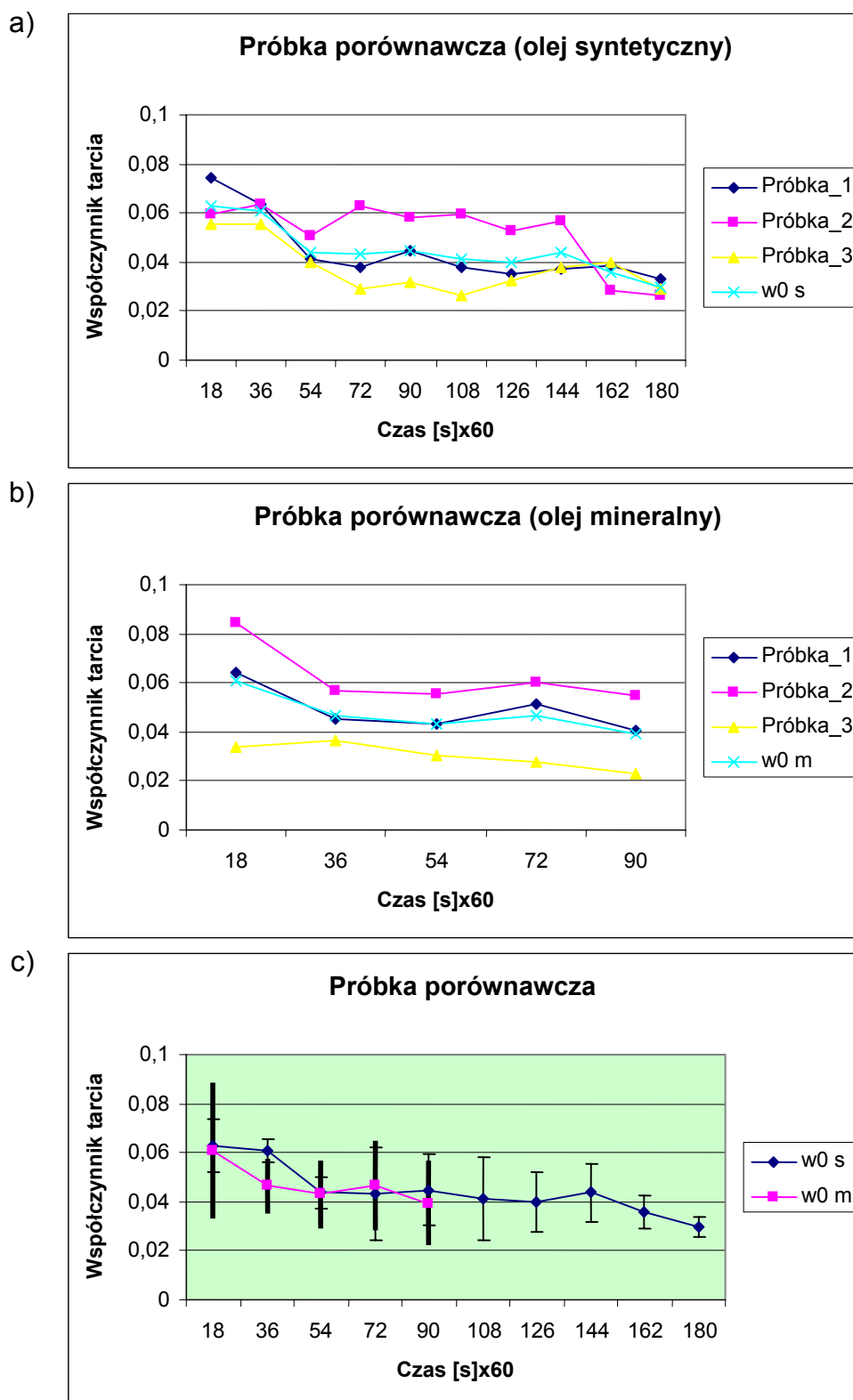
Rys. 10.76. Zależność współczynnika tarcia od czasu współpracy dla napiny jednowarstwowej w warunkach pracy z olejem mineralnym (a), syntetycznym (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- Próbka_1-3 – numer próbki
- w1 s – wartość średnia dla próbek jednowarstwowych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- w1 m – wartość średnia dla próbek jednowarstwowych badanych w środowisku oleju mineralnego



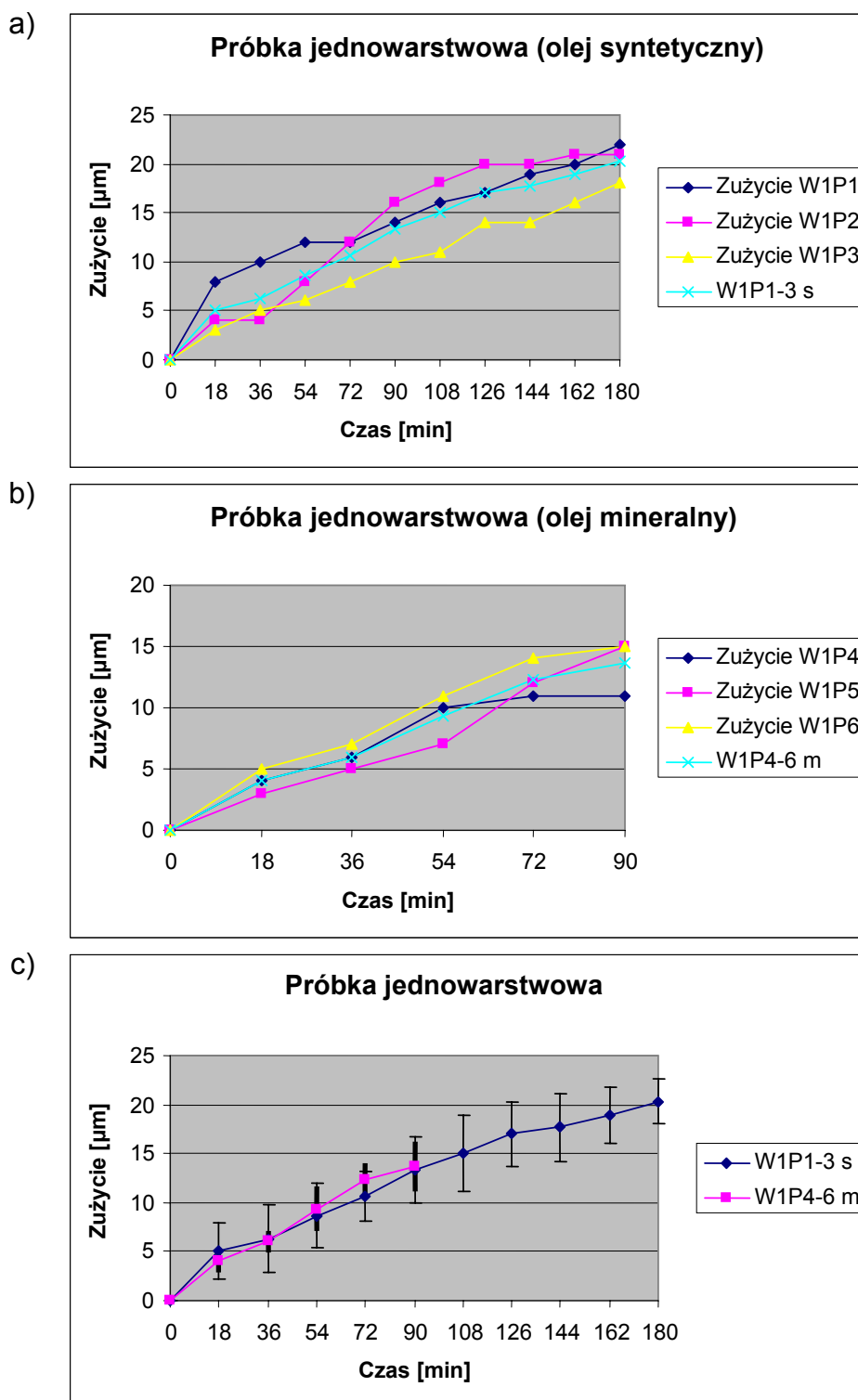
Rys. 10.77. Zależność współczynnika tarcia od czasu współpracy dla napoiu dwuwarstwowej w warunkach pracy z olejem mineralnym (a), syntetycznym (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- Próbka_1-3 – numer próbki
- w2 s – wartość średnia dla próbek dwuwarstwowych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- w2 m – wartość średnia dla próbek dwuwarstwowych badanych w środowisku oleju mineralnego



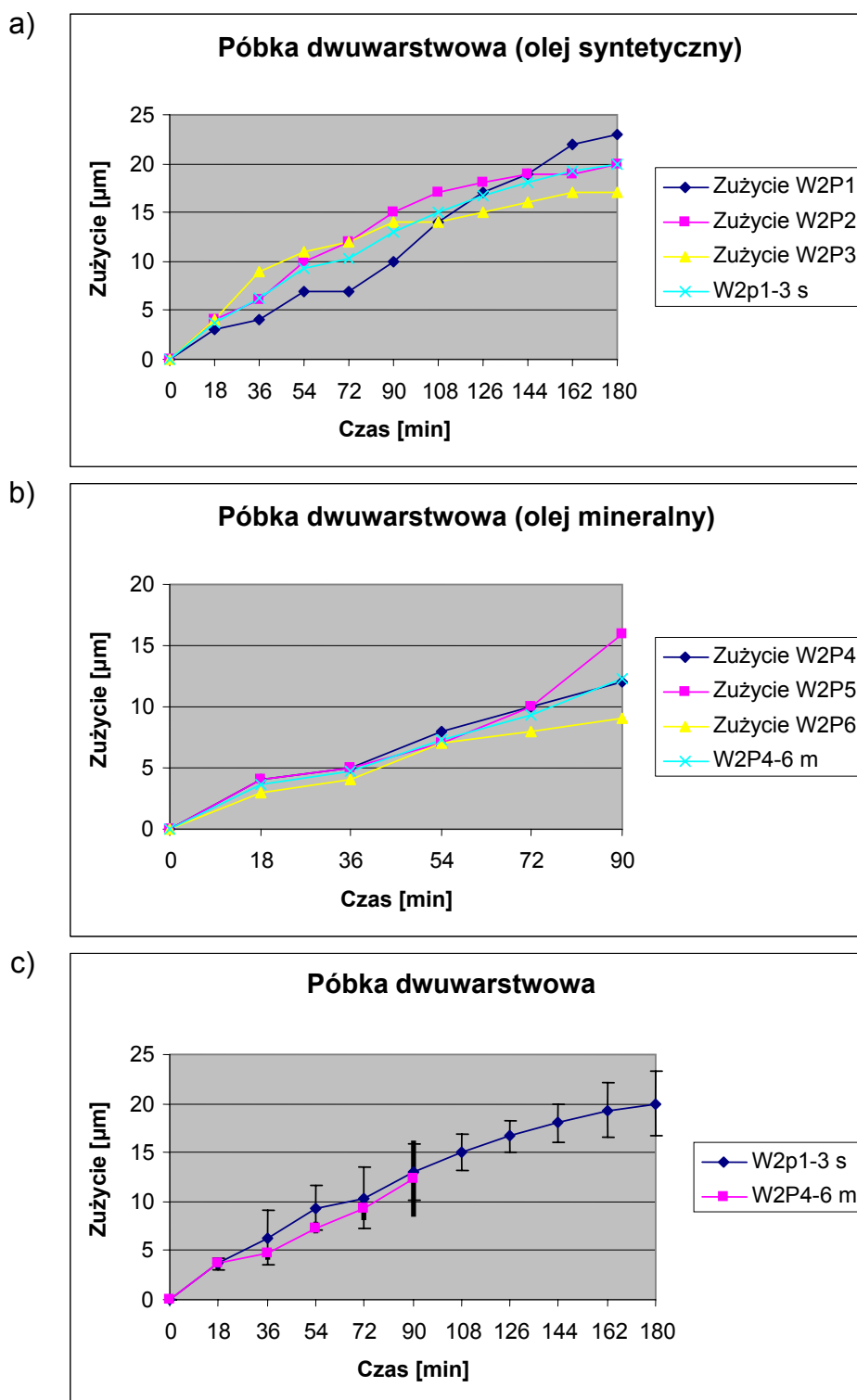
Rys. 10.78. Zależność współczynnika tarcia od czasu współpracy dla próbek porównawczych w warunkach pracy z olejem mineralnym (a), syntetycznym (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- Próbka_1-3 – numer próbki
- w0 s – wartość średnia dla próbek porównawczych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- w0 m – wartość średnia dla próbek porównawczych badanych w środowisku oleju mineralnego



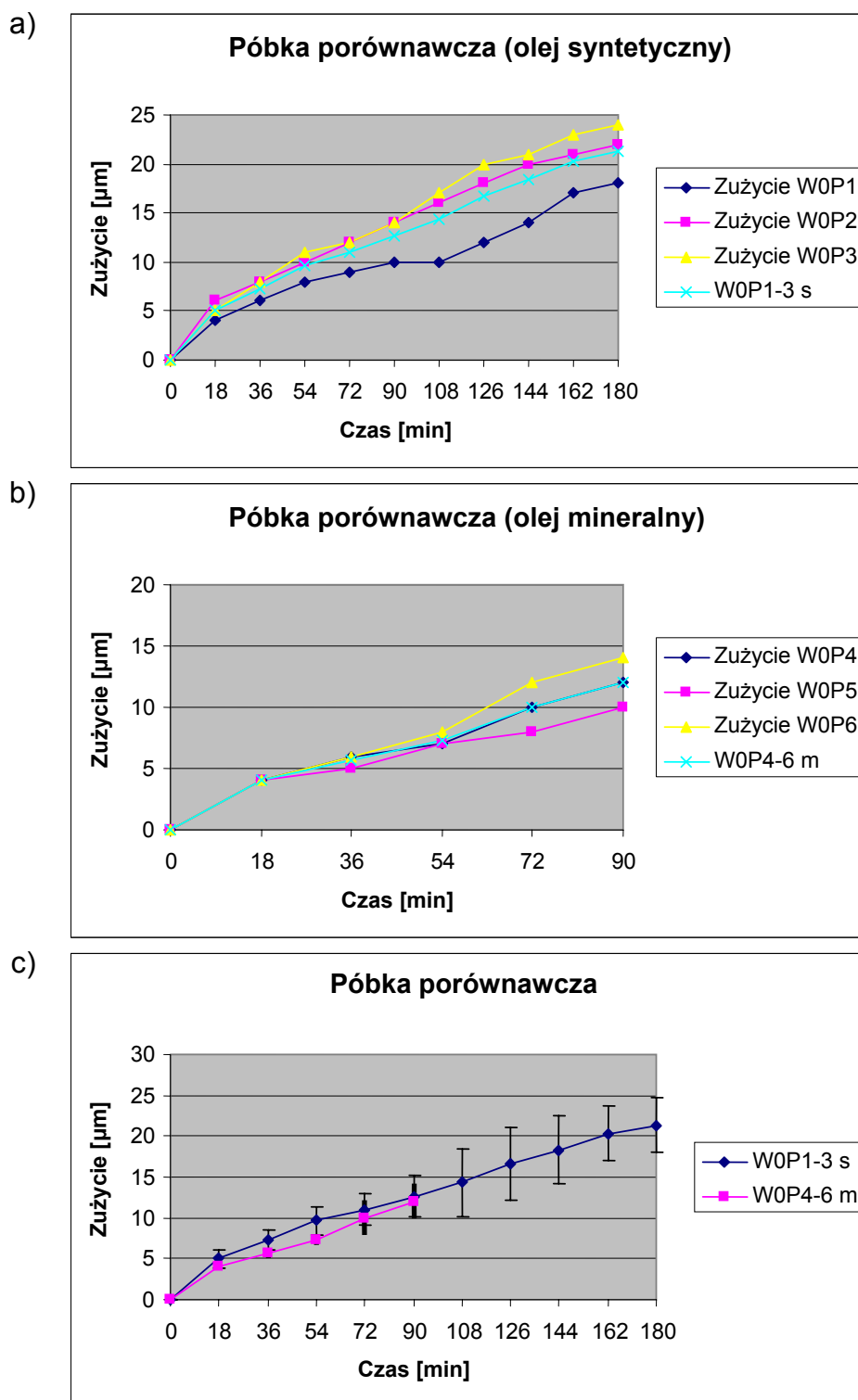
Rys. 10.79. Zużycie liniowe próbek z napoinami jednowarstwowymi pracującymi w środowisku oleju mineralnego (a), syntetycznego (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- W1P1-3 – numer próbki jednowarstwowej badanej w środowisku oleju syntetycznego
- W1P4-6 – numer próbki jednowarstwowej badanej w środowisku oleju mineralnego
- W1P1-3 s – wartość średnia dla próbek jednowarstwowych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- W1P4-6 m – wartość średnia dla próbek jednowarstwowych badanych w środowisku oleju mineralnego



Rys. 10.80. Zużycie liniowe próbek z napoinami dwuwarstwowymi pracującymi w środowisku oleju mineralnego (a), syntetycznego (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- W2P1-3 – numer próbki dwuwarstwowej badanej w środowisku oleju syntetycznego
- W2P4-6 – numer próbki dwuwarstwowej badanej w środowisku oleju mineralnego
- W2P1-3 s – wartość średnia dla próbek dwuwarstwowych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- W2P4-6 m – wartość średnia dla próbek dwuwarstwowych badanych w środowisku oleju mineralnego



Rys. 10.81. Zużycie liniowe próbek porównawczych pracujących w środowisku oleju mineralnego (a), syntetycznego (b) oraz porównanie wartości średnich dla obu rodzajów olejów (c), gdzie:

- W0P1-3 – numer próbki porównawczej badanej w środowisku oleju syntetycznego
- W0P4-6 – numer próbki porównawczej badanej w środowisku oleju mineralnego
- W0P1-3 s – wartość średnia dla próbek porównawczych badanych w środowisku oleju syntetycznego
- W0P4-6 m – wartość średnia dla próbek porównawczych badanych w środowisku oleju mineralnego

11. Wnioski

Analiza uzyskanych wyników badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zaproponowane metody badań i zastosowane stanowisko doświadczalne umożliwiają przeprowadzenie analizy wpływu doboru technologicznych parametrów napawania metodą MIG na jakość i geometrię napawanych warstw brązu cynowego na podłoże stalowe (o ograniczonej spawalności).
2. Stosując przygotowanie powierzchni przez obróbkę skrawaniem, oczyszczanie i odtłuszczenie oraz wstępne podgrzanie podłoża do temperatury $60 \div 100$ °C, a także prowadząc napawanie w zakresie prędkości podawania drutu elektrodowego od 3,6 do 7,4 m/min, napięcia łuku $21 \div 25$ V i prędkości napawania od 3 do 9 mm/s i zawartości helu w mieszance argonowo-helowej od 0 do 100 % można uzyskać napoiny spełniające założone kryteria jakościowe. Pozostałe technologiczne parametry napawania powinny wynosić: wylot drutu elektrodowego 18 mm i przepływ gazu osłonowego ustalony w zakresie $16 \div 40$ dm³/min w zależności od zawartości helu w gazie osłonowym.
3. Związki funkcyjne otrzymane w wyniku realizacji planu doświadczenia Boxa-Benkena umożliwiają prognozowanie wymiarów napoiny i parametrów wydajnościowych procesu w zależności od parametrów napawania.
4. Dla napawania w osłonie czystego argonu wzrost prędkości podawania drutu elektrodowego powoduje zwiększenie szerokości i głębokości wtopienia napoiny. Zwiększenie napięcia wpływa na wzrost szerokości napoiny, szczególnie dla mniejszych prędkości napawania, w niewielkim stopniu wpływając na wysokość napoiny i głębokość wtopienia. Obniżenie prędkości napawania znacznie oddziałuje na wzrost szerokości i wysokości napoiny, mniej wpływając na głębokość wtopienia. Osłona mieszanek argonowo-helowych i helu wpływa przede wszystkim na wysokość napoin i udział metalu podłoża w napoinie, wykazując niewielki wpływ lub jego brak na pozostałe wymiary geometryczne napoin i parametry wydajnościowe napawania.

5. Dobór odpowiednich parametrów napawania umożliwia zmniejszenie strat wynikających z nadmiernego wtopienia brązu w materiał podłoża stalowego i przez wymieszanie brązu ze stalą, utratę jego własności użytkowych.
6. Dobór odpowiedniej zakładki napawania tj. 0,5 szerokości ściegu, umożliwia zmniejszenie strat brązu wynikających z późniejszej obróbki skrawaniem dla wyrównania napawanej powierzchni. Dla napoin jednowarstwowych grubość warstwy napawanej po obróbce mechanicznej może sięgać wartości ok. 2 mm, napoin dwuwarstwowych nawet 5 mm.
7. Nałożenie tylko dwu warstw z brązu na podłożu stalowym z odpowiednimi parametrami zapewniającymi minimalne wtopienie umożliwia uzyskanie własności tribologicznych warstwy powierzchniowej takich samych jak dla brązu uzyskanego przez odlewanie.
8. Pomiary twardości wykazały znaczny jej wzrost w linii przejścia w przypadku pojedynczego ściegu układanego na podłożu stalowym o podwyższonej zawartości węgla. Układanie ściegów obok siebie w warstwach z odpowiednią kontrolą temperatury w trakcie napawania umożliwia uzyskanie tylko nieznacznie podwyższonej twardości w linii przejścia i strefie pod napoinami. Wyniki te potwierdziły badania metalograficzne, które wykazały, że najlepsze efekty daje napawanie warstwowe w osłonie czystego argonu, charakteryzujące się niewielką strefą występowania struktur utwardzonych oraz dające minimalne pęknięcia w stali wypełnione brązem.
9. Badania wykazały jednorodność składu chemicznego napoin.
10. Badania rentgenograficzne potwierdziły, że można uzyskać napoiny z niewielkimi wadami wewnętrznymi w postaci pęcherzy gazowych i wtrąceń żużlowych, ale bez pęknięć. Wady te nie pogarszają własności eksploatacyjnych napoin.
11. Próby zginania wykazały, że napoina z niewielką głębokością wtopienia i małym udziałem materiału podłoża w napoinie posiada odpowiednią przyczepność do materiału podstawowego.