

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Wydział Inżynierii Materiałowej
KATEDRA METALURGII I RECYKLINGU

Rozprawa doktorska

**Wpływ parametrów technologicznych spawania laserowego
i hybrydowego stali odpornych na korozję na wielkość
emisji pyłu, jego skład chemiczny i morfologię**

**Influence of Technological Parameters of Laser and Hybrid
Welding of Corrosion-Resistant Steels on Emission Rate
of Fume, its Chemical Composition and Morphology**

mgr inż. Joanna Wyciślik–Sośnierz

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Adamiec

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Urbańczyk

Opiekun pomocniczy: dr inż. Jolanta Matusiak

Katowice, 2025

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	3
2. Analiza stanu zagadnienia	7
2.1. Charakterystyka stali odpornych na korozję	7
2.2. Spawanie stali austenitycznych	19
2.2.1. Technologia spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej.....	20
2.2.2. Technologia spawania laserowego.....	25
2.2.3. Technologia spawania hybrydowego.....	29
2.3. Metalurgia procesów spawania stali austenitycznych.....	36
2.4. Charakterystyka pyłu powstającego w procesach spawania stali austenitycznych.....	46
2.4.1. Skład chemiczny i morfologia pyłu	49
2.4.2. Wpływ pyłu na środowisko i organizm człowieka	56
2.4.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania na emisję pyłu, jego skład chemiczny i morfologię	60
2.5. Podsumowanie	65
3. Teza, cel i zakres pracy	70
3.1. Materiały do badań.....	73
3.2. Metodyka badań	74
4. Próby technologiczne procesu spawania.....	77
4.1. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG	80
4.1.1. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG stali 1.4301	80
4.1.2. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG stali 1.4828	82
4.2. Próby technologiczne przetapiania laserowego.....	83
4.2.1. Próby technologiczne przetapiania laserowego stali 1.4301	84
4.2.2. Próby technologiczne przetapiania laserowego stali 1.4828.....	87
4.3. Próby technologiczne napawania hybrydowego	90
4.3.1. Próby technologiczne napawania hybrydowego stali 1.4301	90
4.3.2. Próby technologiczne napawania hybrydowego stali 1.4828	92
4.4. Podsumowanie prób technologicznych procesu spawania.....	94
5. Określenie wielkości emisji zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania	97
5.1. Stanowisko doświadczalne do badania emisji zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania	97
5.2. Metodyka oceny emisji pyłu powstającego podczas spawania.....	98
5.3. Wyniki badania emisji pyłu całkowitego wydzielającego się podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego	99
5.3.1. Wpływ gatunku materiału podstawowego na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego	102
5.3.2. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na wielkość emisji pyłu całkowitego	104
5.3.3. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na wielkość emisji pyłu całkowitego	106
5.3.4. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na wielkość emisji pyłu całkowitego	114

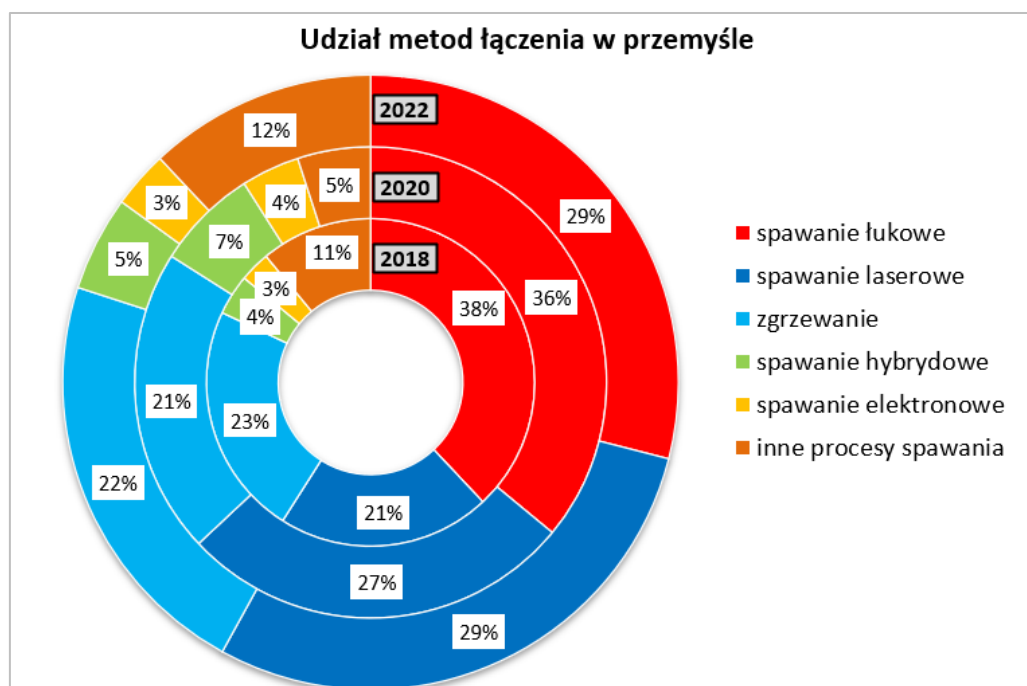
6. Charakterystyka zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania.....	121
6.1. Analiza składu chemicznego pyłu.....	121
6.1.1. Wyniki analizy składu chemicznego pyłu spawalniczego	121
6.1.2. Wpływ gatunku materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego	123
6.1.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na skład chemiczny pyłu.....	125
6.1.4. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na skład chemiczny pyłu.....	129
6.1.5. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na skład chemiczny pyłu	140
6.1.6. Podsumowanie analizy składu chemicznego	145
6.1.7. Oznaczenie składu chemicznego pyłu w warunkach przemysłowych.....	152
6.2. Jakościowa i ilościowa analiza fazowa pyłu	154
6.2.1. Wyniki identyfikacji fazowej i ilościowej analizy fazowej pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego.....	154
6.2.2. Wpływ gatunku materiału podstawowego na skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego	161
6.2.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na skład fazowy pyłu	163
6.2.4. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na skład fazowy pyłu	169
6.2.5. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na skład fazowy pyłu	178
6.3. Ocena morfologii pyłu spawalniczego	188
6.3.1. Ocena morfologii pyłu przy wykorzystaniu mikroskopii optycznej	188
6.3.2. Rozkład wielkości cząstek	192
6.3.3. Ocena budowy cząstek w połączeniu z analizą ich składu chemicznego	195
7. Analiza wyników badań.....	202
7.1. Wpływ parametrów technologicznych procesu (energii liniowej spawania) na wielkość emisji, skład chemiczny i fazowy oraz morfologię pyłu	207
7.2. Wpływ materiału rodzimego na wielkość emisji, skład chemiczny, fazowy i morfologię pyłu	219
7.3. Wpływ procesów spawania laserowego, hybrydowego i łukowego w aspekcie oddziaływania zanieczyszczeń pyłowych na środowisko pracy i organizm człowieka	222
8. Wytyczne i zalecenia w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.	226
9. Wnioski	236
10. Literatura	240
STRESZCZENIE.....	251
ABSTRACT	252

1. Wprowadzenie

Stale odporne na korozję to grupa stali obejmująca stale nierdzewne, żaroodporne i żarowytrzymałe [1]. Ze względu na mikrostrukturę stale te dzielą się na stale ferrytyczne, martenzytyczne i umacniane wydzieleniowo, austenityczne oraz ferrytyczno-austenityczne [1]. Zawierają one w swoim składzie co najmniej 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla oraz inne pierwiastki stopowe między innymi nikiel, molibden, niob, tytan i azot [1]. Obecność tych pierwiastków zapewnia odporność na działanie czynników atmosferycznych oraz agresywnych związków chemicznych. Stale odporne na korozję o strukturze austenitycznej zwane dalej stalami austenitycznymi należą do grupy 8. według raportu technicznego ISO 15608 i zawierają w swoim składzie poniżej 35% niklu [2]. Oprócz wysokiej odporności na korozję, charakteryzują się one również dobrymi właściwościami mechanicznymi [3]. Dzięki tym zaletom znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m.in. w branży energetycznej, chemicznej, petrochemicznej, motoryzacyjnej oraz spożywczej [4]. Najczęściej stosowanymi w przemyśle stalami tego typu są stale X5CrNi18-10 (1.4301) i X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) należące do grupy stali nierdzewnych austenitycznych oraz X15CrNiSi20-12 (1.4828) należąca do grupy stali żaroodpornych austenitycznych.

Głównymi technikami łączenia tych materiałów są technologie spawalnicze. Podstawową metodą spawania stali austenitycznych jest spawanie łukowe w osłonie gazów obojętnych – MIG (Metal Inert Gas) oraz TIG (Tungsten Inert Gas). Zwiększające się wymagania obejmujące poprawę wydajności i jakości złączy spawanych oraz potrzeba zwiększenia efektywności procesu spawania spowodowały wzrost zastosowania w przemyśle technik laserowych (rys. 1.1).

Oprócz spawania laserowego, kolejnym procesem wykorzystującym wiązkę laserową jest spawanie hybrydowe (HLAW – *hybrid laser arc welding*). Proces ten polega na jednoczesnym zastosowaniu dwóch źródeł ciepła (wiązki promieniowania laserowego i łuku elektrycznego).



Rys. 1.1. Udział różnych technologii łączenia w przemyśle w latach 2018-2022 [5]

Ocena procesu produkcyjnego obejmuje: analizę cyklu technologicznego, sporządzenie bilansu strumieni surowców z uwzględnieniem materiałów pomocniczych, dobór aparatury i urządzeń oraz wykonanie analizy wytwarzanych odpadów i emitowanych zanieczyszczeń. Istotnym elementem jest identyfikacja źródeł powstawania odpadów i/lub emisji zanieczyszczeń [6]. Każda działalność wpływa na środowisko przyrodnicze. Dlatego też wykorzystuje się strategię czystszej produkcji (*CP - cleaner production*), czyli takiej, w której negatywne oddziaływanie na środowisko jest ograniczone do minimum. Jej cele osiągnąć są m.in. przez modyfikację technologii [6]. Czystsza produkcja to sposób zarządzania produkcją, który pozwala na wszystkich jej etapach na zapobieganie i ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko. Przyczynia się to do osiągnięcia wyższego poziomu ekologicznego produkcji, rozumianego jako przeciwdziałanie zmianom klimatycznym oraz ochronę zdrowia pracowników, co stanowi jedną z głównych składowych określających zrównoważony rozwój (*sustainability development*) [7].

Spawanie i procesy pokrewne należą do grupy procesów wytwórczych oddziałujących niekorzystnie na środowisko. Jest to związane z emisją do środowiska naturalnego jak i środowiska pracy dymu spawalniczego, który powoduje wystąpienie u pracowników szeregu negatywnych skutków zdrowotnych. W wyniku działania wysokiej temperatury podczas spawania wydzielane są do środowiska pracy zanieczyszczenia pyłowe i gazowe, które zawierają liczne substancje niebezpieczne dla zdrowia zaklasyfikowane zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC - International Agency

for Research on Cancer) do jednej z 3 grup [8]:

- grupa 1: substancje rakotwórcze dla człowieka,
- grupa 2A: substancje prawdopodobnie rakotwórcze dla człowieka,
- grupa 2B: substancje możliwie rakotwórcze dla człowieka,
- grupa 3: substancje prawdopodobnie nierakotwórcze dla człowieka.

Zanieczyszczenia gazowe tworzone są głównie przez tlenki azotu, tlenek węgla i ozon [9]. Skład chemiczny pyłu spawalniczego zależy od zastosowanych materiałów: podstawowego i dodatkowego, metody łączenia oraz parametrów technologicznych (rys. 1.2) [10].



Rys. 1.2. Czynniki wpływające na skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania i procesów pokrewnych [10]

Cząstki pyłu spawalniczego mają kształt zbliżony do kulistego i występują w postaci bardzo drobnych cząstek pojedynczych, łańcuchów i aglomeratów, a ich wchłanianie do organizmu uzależnione jest od postaci, w jakiej dana substancja występuje [11]. Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na toksyczność pyłu jest wielkość cząstek. Badania wykazały, że średnica cząstek pyłu spawalniczego zawiera się w zakresie od 0,005 do 20 μm , z czego jedynie 10-30% (zależnie od procesu spawania) ma średnicę powyżej 1 μm [12, 13]. Oznacza to, że ponad 70% cząstek pyłu powstającego przy spawaniu należy do frakcji najbardziej niebezpiecznej dla zdrowia człowieka. Cząstki pyłu o średnicy mniejszej niż 1 μm , wnikały do pęcherzyków płucnych i przenikają do krwioobiegu, stając się przyczyną wielu chorób między innymi płuc i serca [12].

Szczególne zagrożenie zdrowia spawaczy związane jest z procesami spawania stali austenitycznych, ponieważ ich podstawowymi składnikami stopowymi są chrom i nikiel. Związki tych pierwiastków występujące w pyłe spawalniczym zaliczane są do substancji o udowodnionym lub prawdopodobnym działaniu rakotwórczym [14].

Stosowanie w przemyśle technologii spawania i procesów pokrewnych związane jest z potrzebą określenia warunków bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia pracowników. Rosnąca, zarówno wśród pracodawców, jak i pracowników, świadomość zagrożeń występujących podczas procesów spawania, jak również zwiększające się wymagania stawiane służbom BHP i ochrony środowiska, wiążą się z koniecznością badań mających na celu ocenę czynników wpływających na wielkość i rodzaj powstających zanieczyszczeń.

Doskonalenie technologii spawalniczych związane jest nie tylko z poprawą wydajności procesu ale również z ograniczeniem emisji zanieczyszczeń pyłowych. Prowadzone badania są ukierunkowane na poszukiwanie możliwości ograniczenia zagrożeń zdrowia towarzyszących spawaniu poprzez dobór właściwych warunków materiałowo-technologicznych procesu. Emisja jakościowa i ilościowa pyłu spawalniczego jest efektem zastosowanego procesu, warunków technologicznych oraz składu chemicznego materiału podstawowego i dodatkowego [10]. Parametry procesu wpływają w znacznym stopniu na ilość emitowanych zanieczyszczeń, a ich modyfikacja umożliwia poprawę procesu w aspekcie ograniczenia wielkości emisji pyłu spawalniczego, w tym udziału pierwiastków i związków kancerogennych.

Dominującą technologią łączenia stosowaną w przemyśle jest spawanie łukowe, dlatego też dotychczasowe badania emisji zanieczyszczeń obejmowały głównie te procesy. Jednak wraz z rozwojem technologii i urządzeń oraz wzrostem możliwości zastosowania technik laserowych w przemyśle pojawiła się potrzeba rozszerzenia zakresu badań w tym obszarze technologicznym [5].

W literaturze specjalistycznej brak jest obecnie publikacji i szczegółowych danych na temat wpływu parametrów technologicznych spawania laserowego i hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych. Z uwagi na zwiększające się zastosowanie tych technologii w różnych gałęziach przemysłu istnieje konieczność przeprowadzenia badań ukierunkowanych na określenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesów spawania laserowego i hybrydowego wybranych gatunków stali odpornych na korozję a wielkością emisji pyłu całkowitego, jego składem chemicznym i morfologią. Wyniki badań naukowych pozwolą projektantom i technologom na wybór procesu charakteryzującego się najmniej szkodliwym wpływem na środowisko oraz zdrowie pracowników.

2. Analiza stanu zagadnienia

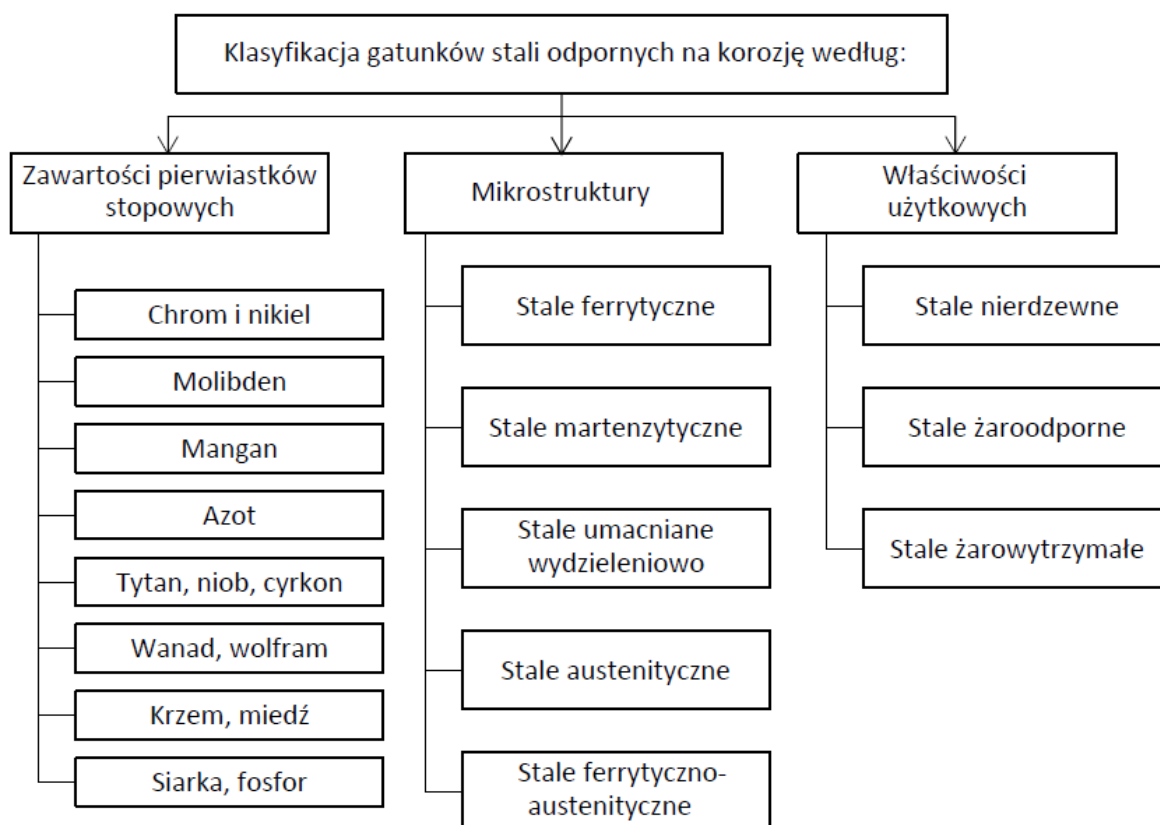
2.1. Charakterystyka stali odpornych na korozję

Zgodnie z definicją zawartą w normie PN-EN 10088 stale odporne na korozję obejmują gatunki zawierające co najmniej 10,5% chromu i do 1,2% węgla. Można również dokonać dalszego podziału biorąc pod uwagę zawartość niklu, tj. stale o zawartości niklu poniżej 2,5% i o zawartości niklu równej lub większej niż 2,5%.

Stale odporne na korozję można także podzielić według trzech kryteriów:

1. głównych pierwiastków stopowych,
2. mikrostruktury,
3. własności użytkowych.

Klasyfikacja gatunków stali odpornych na korozję przedstawiona została na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Klasyfikacja gatunków stali odpornych na korozję [1]

Wpływ pierwiastków stopowych na własności stali

Chrom i nikiel to główne pierwiastki stopowe występujące w stalach odpornych na korozję. Stale te mogą zawierać również molibden, mangan, azot, tytan niob cyrkon, wanad, wolfram, krzem, miedź siarkę i fosfor [1, 15, 19]. Obecność tych pierwiastków ma na celu otrzymanie wymaganej mikrostruktury i poprawę własności mechanicznych.

Chrom jest podstawowym składnikiem stopowym tych stali. Pierwiastkiem stabilizującym ferryt o większym niż żelazo powinowactwie do węgla i azotu [1]. Zawartość chromu powyżej 12% przyczynia się do zwiększenia hartowności i zapewnia stali odporność na działanie kwasów i agresywnych związków chemicznych. Obecność chromu skutkuje zwiększeniem wytrzymałości i twardości stali w podwyższonych temperaturach oraz zwiększeniem odporności stali na ścieranie [15-17]. Kontakt chromu z tlenem powoduje wytworzenie się na powierzchni materiału bardzo cienkiej warstwy pasywnej (tlenku chromu) zabezpieczającej przed czynnikami korozyjnymi. Warstwa ta jest szczelna i ściśle przylega do powierzchni stali. Jest ona nierozpuszczalna w większości substancji chemicznych i ma zdolność odnawiania się (tzw. repasywacja) w środowiskach utleniających [18, 19].

Nikiel jest również składnikiem stali odpornych na korozję. Jest pierwiastkiem austenitotwórczym, który stabilizuje tą strukturę [1, 15]. Obecność niklu wpływa na żaroodporność i żarowytrzymałość oraz własności magnetyczne, elektryczne i cieplne. Wzrost udziału tego pierwiastka zwiększa twardość i wytrzymałość stali [15, 17]. Poprawia jej udarność i ciągliwość przede wszystkim w niskich temperaturach. Stale o zawartości niklu od 7 do 20% (w połączeniu z chromem) są odporne na korozję, wysokie temperatury i związki chemiczne [15-19]. Stale o zawartości 20-30% niklu wykazują wzrost oporności elektrycznej wraz ze wzrostem temperatury. Nikiel obecny jest w austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych stalach nierdzewnych i żaroodpornych oraz austenitycznych żarowytrzymałych [1, 16].

Molibden jest pierwiastkiem ferrytotwórczym, który charakteryzuje się dużym powinowactwem do węgla [1]. Obecność molibdenu wpływa korzystnie na własności mechaniczne stali w podwyższonych temperaturach – zwiększa wytrzymałość na pełzanie, twardość i odporność na pękanie [15]. Molibden odpowiada również za odporność stali na działanie kwasów. Dlatego też stale austenityczne zawierające powyżej 2% Mo nazywano wcześniej stalami kwasoodpornymi [1]. Ze względu na swoje zalety molibden obecny jest w stalach narzędziowych, szybkotnących i specjalnych [16, 17].

Mangan, z uwagi na dostępność, niską cenę oraz łatwość wprowadzania go do stali w procesach metalurgicznych, to najczęściej spotykany pierwiastek stopowy [1, 16]. Dodatek manganu powoduje neutralizowanie siarki poprzez wiązanie jej w siarczki manganu, który jest usuwany z żużłem [15]. Obecność manganu w stali przyczynia się do zwiększenia jej twardości, wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności [15, 16]. Mangan jest pierwiastkiem zwiększającym hartowność stali. Stale o zawartości manganu 3-10% mają strukturę martenzytyczną, natomiast o zawartości 10-18% strukturę austenityczną [15-18].

Azot jest pierwiastkiem austenitotwórczym i wpływa na silne umocnienie stali. Dodatek azotu polepsza także odporność korozyjną stali [15-17].

Obecność tytanu w stalach odpornych na korozję zapobiega korozji międzykrystalicznej. Tytan wykazuje skłonność do tworzenia stabilnych węglików, dlatego już bardzo niewielka jego ilość zmniejsza zawartość węgla rozpuszczonego w austenicie [15, 16, 19]. Również niob stosowany jest w celu związania węgla tworząc węgiel niobu. Dodatek niobu przyczynia się do zwiększenia hartowności i poprawy własności mechanicznych stali [16, 19].

Wpływ wanadu i wolframu na własności stali jest podobny. Dodatek tych pierwiastków wpływa między innymi na poprawę wytrzymałości, sprężystości, twardości i udurowienia, dlatego stanowią składnik stali szybkotnących i narzędziowych [15-19].

Krzem oraz miedź wpływają na poprawę odporności korozyjnej stali, zwiększają jej hartowność [15, 16].

Dodatek siarki powoduje, że stal jest krucha i mało plastyczna, zmniejsza się jej udurowienie, spawalność oraz odporność na korozję. Dlatego też jej obecność jest niepożądana [15, 16].

Jak wskazuje nazwa tej grupy stali to właśnie odporność na korozję jest jej główną cechą użytkową. Poziom odporności korozyjnej uzależniony jest od trwałości warstwy pasywnej i stabilności mikrostruktury [19]. Zniszczenie tej warstwy i brak możliwości jej odbudowy skutkują pojawieniem się i szybkim rozwojem korozji lokalnej. Do najniebezpieczniejszych rodzajów korozji lokalnej zalicza się korozję międzykrystaliczną, naprężeniową i wżerową [19].

Podział stali ze względu na mikrostrukturę

Podział stali ze względu na mikrostrukturę obejmuje stale ferrytyczne, austenityczne, martenzytyczne, umacniane wydzieleniowo i ferrytyczno-austenityczne (duplex) [1].

Stale ferrytyczne

Stale te zawierają w swoim składzie od 10,5 do 30% chromu oraz domieszki molibdenu, krzemu, glinu, niklu, tytanu i niobu. Ich główną fazą jest ferryt o strukturze krystalicznej regularnej przestrzennie centrowanej [1, 19]. Stale te wyżarza się w temperaturach od 750 do 950°C [1]. Niska zawartość węgla skutkuje niższą wytrzymałością, która spada wraz ze wzrostem temperatury szybciej w porównaniu do stali austenitycznych. Charakteryzują się one dobrą plastycznością [19]. Stale ferrytyczne mogą być umacniane przez przeróbkę plastyczną na zimno, ale do niższego poziomu niż stal austenityczna [21-23]. Podobnie jak stal austenityczna, stal ferrytyczna nie może być utwardzona przez obróbkę cieplną. Stale tego typu charakteryzują się dobrą odpornością na korozję naprężeniową i wżerową [19, 21-23].

Stale ferrytyczne dzieli się na nisko- (10,5-13%), średnio- (16-18%) i wysokochromowe (25-30%). Do spawania stosowane są jedynie nisko- i średniochromowe, bowiem spawanie stali wysokochromowych wiąże się z ryzykiem pojawienia się korozji międzykrystalicznej i kruchości w strefie wpływu ciepła [1, 19].

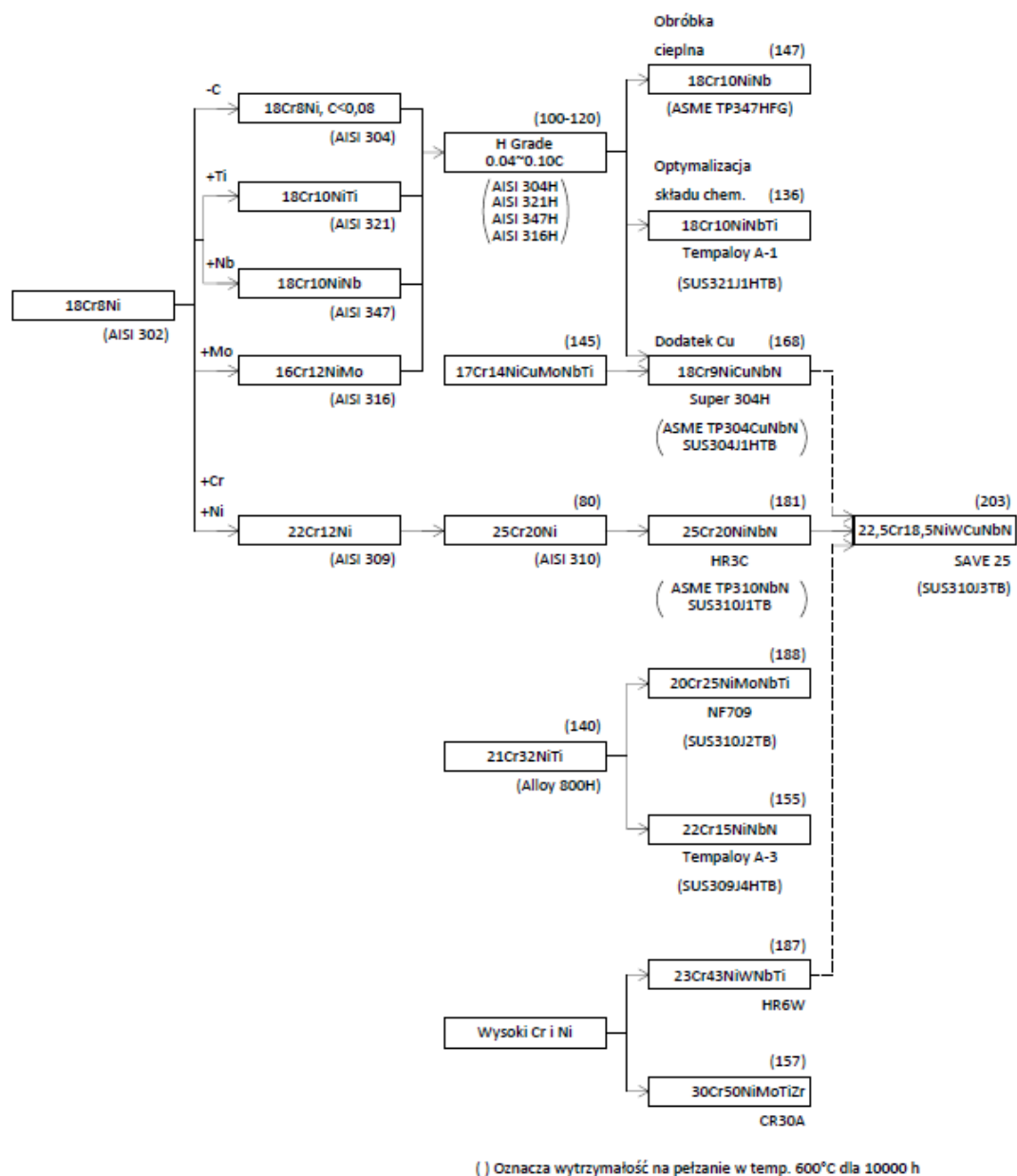
Stal ferrytyczna jest wykorzystywana między innymi w [24]:

- budownictwie do okładzin elewacyjnych i pokryć dachowych, w półzamkniętych środowiskach nieogrzewanych (np. konstrukcje dla kolei, trybuny, wiaty rowerowe) oraz w systemach nośnych okładzin/licówek elewacyjnych, słupkach ekranów przeciwwiatrowych i podparciach ścian murowanych oraz w konstrukcjach zespolonych, gdzie wymagana jest długa żywotność lub gdy warunki środowiska są umiarkowanie korozyjne,
- sektorze transportowym do elementów nośnych, takich jak rurowe ramy autobusowe, czy w towarowych wagonach kolejowych do przewozu węgla, gdzie ważna jest odporność na ścieranie na mokro.

Stale austenityczne

Stale austenityczne mają strukturę krystaliczną regularną ściennie centrowaną, która jest stabilna w szerokim zakresie temperatur [19]. Są to stale chromowe, których struktura austenityczna powstaje poprzez wprowadzenie odpowiedniej ilości pierwiastków stabilizujących tą fazę. Do pierwiastków austenitotwórczych zalicza się nikiel, mangan, węgiel, azot i miedź, natomiast do ferrytotwórczych chrom, molibden, krzem, niob, tytan, glin, wolfram i wanad [19]. Stale te wyżarza się w zakresie temperatur od 1000 do 1200°C. Nie utwardzają się podczas obróbki cieplnej, a przez zgniot bez wzrostu kruchości,

co powoduje, że mogą one być obrabiane plastycznie [19]. Najczęściej stosowane stale austenityczne zawierają 17-18% chromu i 8-11% niklu [20]. Oprócz odporności korozyjnej charakteryzują się one dobrą ciągliwością i spawalnością. Wytrzymałość na rozciąganie tych stali zawiera się w zakresie 520-760 MPa, a umowna granica plastyczności jest na poziomie 205-270 MPa. Stale te wykazują dużą plastyczność w temperaturze pokojowej i temperaturach obniżonych – wydłużenie wyznaczone w statycznej próbie rozciągania wynosi od 40 do 60% [19]. Ich odporność korozyjna zależy od zawartości chromu, niklu, molibdenu, azotu, tytanu, niobu, krzemu i miedzi [19, 20]. Na rysunku 2.2. przedstawiono rozwój stali austenitycznych stosowanych w przemyśle energetycznym.



Rys. 2.2. Rozwój stali austenitycznych dla przemysłu energetycznego [25]

Typowe zastosowanie stali austenitycznych obejmuje [24, 28]:

- przemysł chemiczny i petrochemiczny,
- przemysł farmaceutyczny,
- przemysł spożywczy,
- przemysł energetyczny,
- konstrukcje obiektów mostowych (bariery, poręcze, osłony kablowe i złącza dylatacyjne),
- konstrukcje przybrzeżne (falochrony, mola),
- budownictwo:
 - bariery bezpieczeństwa, poręcze, elementy małej architektury,
 - elementy konstrukcyjne i elementy złączne w budynkach z krytym basenem,
 - konstrukcje odporne na eksplozję i uderzenia, takie jak ściany, bramy i słupki ochronne – odbojowe,
 - ściany ognioodporne.

Stale ferrytyczno-austenityczne (duplex)

Struktura tych stali jest dwufazowa, składa się z ferrytu i austenitu (50% /50%). Opracowanie stali duplex pozwoliło na wyeliminowanie wad stali austenitycznych i ferrytycznych. Zostało to osiągnięte poprzez zwiększenie zawartości chromu i zmniejszenie ilości niklu w porównaniu do składu chemicznego stali austenitycznych [4, 19]. Obecnie produkowane stale duplex zawierają 22-27% chromu, 3-7% niklu, do 4,5% molibdenu, 0,08-0,35% azotu oraz domieszki wolframu i miedzi [19]. Stale te charakteryzują się wysoką odpornością korozyjną, wysoką granicą plastyczności pozwalającą na zmniejszenie grubości stosowanych elementów, co przekłada się na redukcję ciężaru konstrukcji [4, 19].

Stale duplex, ze względu na swoje właściwości, są stosowane m.in. w [24, 26-28]:

- przemyśle chemicznym i petrochemicznym,
- przemyśle farmaceutycznym,
- przemyśle stoczniowym,
- przemyśle energetycznym,
- górnictwie,
- instalacjach do odsalania wody morskiej.

Stale martenzytyczne

Stale martenzytyczne podobnie jak stale ferrytyczne mają strukturę krystaliczną regularną przestrzennie centrowaną [24]. Martenzyt tworzy się z austenitu podczas szybkiego chłodzenia i jest trwały do temperatury otoczenia [1]. Większość stali martenzytycznych zawiera od 11,5-14% chromu i 0,1-0,25% węgla oraz domieszki molibdenu, wanadu i wolframu [19]. Ze względu na wysoką zawartość węgla stale te mogą być utwardzone za pomocą obróbki cieplnej [24]. Martenzytyczne stale nierdzewne są powszechnie stosowane w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu, co zapewnia im dużą wytrzymałość, a także odporność na korozję [19, 24]. Są mniej ciągliwe i bardziej wrażliwe na pękanie niż gatunki ferrytyczne, austenityczne i stale duplex. Z uwagi na procesy wydzieleniowe w mikrostrukturze, skutkujące pogorszeniem się właściwości mechanicznych i korozyjnych, stale te nie są stosowane w temperaturze powyżej 650°C [19].

Znajdują one zastosowanie, tam gdzie wymagana jest wysoka twardość oraz odporność na zużycie i ścieranie [19, 24]:

- w przemyśle chemicznym, petrochemicznym do produkcji wymienników ciepła,
- do produkcji wykładzin ściernych, łopatek turbin parowych i zaworów,
- do wytwarzania sztuców, narzędzi chirurgicznych, noży przemysłowych.

Stale umacniane wydzieleniowo

Stale umacniane wydzieleniowo oznaczane są jako PH (*Precipitation Hardening*). Są to stale o niskiej zawartości węgla, których utwardzanie osiąga się przez kombinację przemiany martenzytycznej i utwardzania wydzieleniowego stosunkowo miękkiego martenzytu. Taka obróbka cieplna pozwala na osiągnięcie bardzo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (1500 MPa) przy zachowaniu dobrej ciągliwości [19]. Ich odporność na korozję jest generalnie lepsza niż gatunków martenzytycznych i podobna do austenitycznych, zawierających 18% chromu i 8% niklu [24].

Stale te są stosowane tam, gdzie jest wymagana wysoka wytrzymałość i umiarkowana odporność na korozję, między innymi, [19, 24]:

- w przemyśle lotniczym i kosmicznym,
- do wytwarzania prętów, wałów, śrub.

Z kolei podział stali odpornych na korozję ze względu na własności użytkowe obejmuje trzy kategorie: stale nierdzewne, stale żaroodporne i stale żarowytrzymałe [1].

Stale nierdzewne

Stale nierdzewne to stale o dobrej odporności na oddziaływanie lokalnego środowiska [1]. Środowiskiem może być atmosfera w temperaturze otoczenia (atmosfera: zamkniętego pomieszczenia, wiejska, miejska, przemysłowa, morska) lub roztwory chemiczne wywołujące warunki elektrochemiczne [1, 29]. Stale odporne na korozję, przeznaczone do pracy w wymienionych środowiskach, klasyfikuje się i nazywa stalami nierdzewnymi. Odporność korozyjną stali nierdzewnej zapewnia minimalna zawartość chromu 10,5% w wyniku samoistnego tworzenia na powierzchni stali warstwy pasywnej oraz dodatki innych pierwiastków stopowych w celu modyfikacji struktury krystalicznej i polepszenia właściwości, takich jak odporność korozyjna, wytrzymałość mechaniczna, podatność na kształtowanie i odporność na niskie oraz wysokie temperatury [29].

Grupy stali nierdzewnej oznaczono w PN-EN 10027-2 jako [30]:

- 1.40XX – stal nierdzewna o stężeniu Ni < 2,5% bez Mo, Nb i Ti,
- 1.41XX – stal nierdzewna o stężeniu Ni < 2,5% i Mo, ale bez Nb i Ti,
- 1.43XX – stal nierdzewna o stężeniu Ni $\geq$ 2,5%, ale bez Mo, Nb i Ti,
- 1.44XX – stal nierdzewna o stężeniu Ni $\geq$ 2,5% i Mo, ale bez Nb i Ti,
- 1.45XX – stal nierdzewna ze specjalnymi dodatkami stopowymi,
- 1.46XX – stal nierdzewna ze specjalnymi dodatkami stopowymi o podwyższonej odporności chemicznej i na wysoką temperaturę.

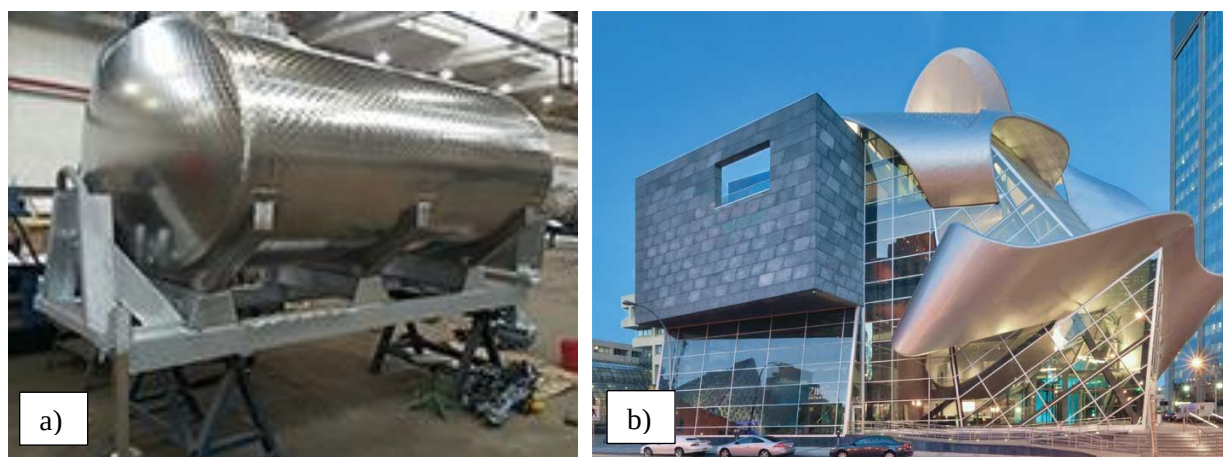
Do najpopularniejszych gatunków stali nierdzewnych zalicza się 1.4301 i 1.4571.

Gatunek 1.4301 (X5CrNi18-10) to nierdzewna stal austenityczna o dobrej odporności korozyjnej i ciągliwości. Gatunek ten jest odporny na działanie większości kwasów utleniających, środków spożywczych, roztworów do sterylizacji, większości organicznych substancji chemicznych i barwników oraz nieorganicznych substancji chemicznych [31].

Charakteryzuje się ona również dobrą spawalnością. Znajduje zastosowanie w [31, 32]:

- gospodarstwie domowym (tace, sztućce, przybory do gotowania i naczynia),
- produkcji zlewozmywaków, lodówek,
- wytwarzaniu urządzeń mleczarskich,
- przemyśle piwowarskim,
- przetwórstwie żywności,
- elementach systemów odciągowych,
- wytwarzaniu konstrukcji spawanych,
- przemyśle farbiarskim,
- budownictwie i konstrukcjach architektonicznych.

Przykładowe zastosowania stali w gatunku 1.4301 przedstawiono na rysunku 2.3.

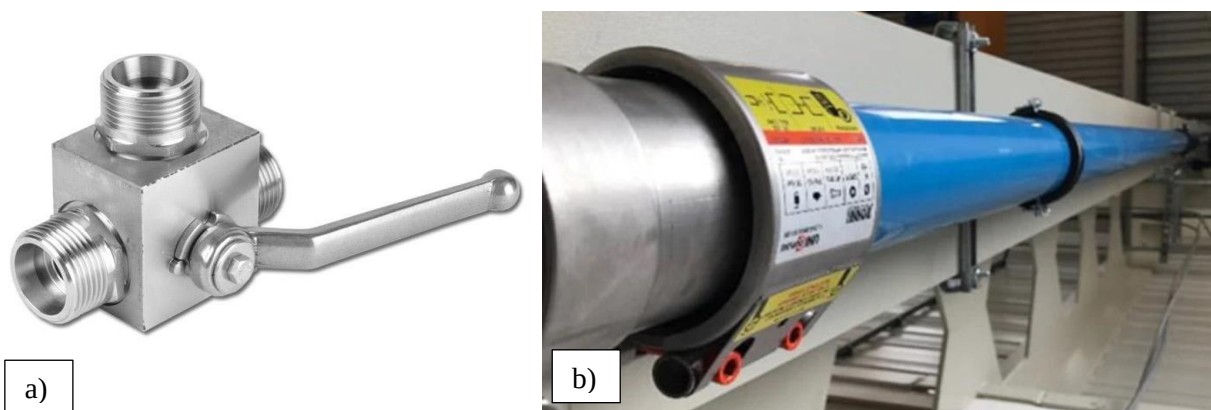


Rys. 2.3. Przykładowe zastosowania stali w gatunku 1.4301: a) cysterna na wodę pitną o pojemności 5000 l o przekroju eliptycznym [33] b) budynek Muzeum Sztuki w Edmonton, Kanada (ozdoba w kształcie wstążki wykonana ze stali 1.4301) [34]

Stal w gatunku 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) to stal nierdzewna austenityczna, chromowo-niklowo-molibdenowa stabilizowana tytanem. Gatunek ten charakteryzuje się dobrą odpornością korozyjną w środowisku wodnym (wody naturalne, miejskie i przemysłowe) przy niskich stężeniach kwasów chlorowych i solnych [35]. Z uwagi na obecność tytanu, który zapobiega wytrącaniu się węglików chromu w granicach ziaren, stal ta ma dobrą odporność na korozję międzykrystaliczną. Gatunek ten znajduje zastosowanie w [24, 35]:

- przemyśle chemicznym,
- przemyśle medycznym i farmaceutycznym,
- przemyśle rafineryjnym,
- przemyśle samochodowym,
- budowie maszyn,
- budowie aparatury i statków,
- przemyśle spożywczym,
- kriogenice.

Przykładowe zastosowanie tej stali przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Przykładowe zastosowania stali 1.4571: a) zawór kulowy wysokiego ciśnienia [36],
b) obejmy do łączenia i naprawy rur w instalacjach przemysłowych wody chłodzącej [37]

Stale żaroodporne

Stale żaroodporne to głównie stale ferrytyczne lub austenityczne o dobrej odporności na utlenianie i działanie gorących gazów oraz spalin w temperaturze powyżej 550°C. W atmosferach utleniających chrom, krzem i aluminium tworzą na powierzchni stali ochronną warstwę tlenków, która chroni materiał przed korozją w wysokiej temperaturze [1].

W celu określenia żaroodporności przeprowadza się praktyczną próbę polegającą na nagraniu próbki stali do danej temperatury przez 24 godziny, a następnie schładza się ją do temperatury 20°C. Czynność ta powtarzana jest pięciokrotnie, następnie usuwana jest zgorzelina z powierzchni i próbka jest ważona w celu ustalenia ubytku masy. Stal uznaje się za żaroodporną (do danej temperatury) gdy ubytek materiału nie przekracza 1 g przy zadanej temperaturze i 2 g przy temperaturze o 50°C wyższej [38].

Grupy stali żaroodpornych oznaczono w PN-EN 10027-2 jako [30]:

1.47XX – stal żaroodporna o stężeniu Ni < 2,5%

1.48XX – stal żaroodporna o stężeniu Ni ≥ 2,5%

Stal żaroodporna stosowana jest do produkcji elementów mających stały kontakt z wysokimi temperaturami, m.in.: do wytwarzania rurociągów oraz innych elementów instalacji, w których stosowane są procesy zachodzące w wysokich temperaturach [38].

Gatunek stali 1.4828 (X15CrNiSi20-12) zaliczany jest do grupy austenitycznych stali żaroodpornych znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle. Jego maksymalna temperatura eksploatacji wynosi 1000°C, charakteryzuje się dobrą spawalnością, bardzo dobrą

odpornością na korozję i utlenianie, może być stosowany także w środowisku bogatym w siarczany w temperaturze przekraczającej 850°C. Gatunek ten jest stosowany głównie w [39, 40]:

- produkcji pieców przemysłowych i elementów grzewczych,
- produkcji aparatury do wyżarzania,
- inżynierii lotniczej,
- przemyśle motoryzacyjnym (układy wydechowe).

Na rysunku 2.5 przedstawiono przykład zastosowania stali żaroodpornej w gatunku 1.4828 – instalacja gazowa w jednej z niemieckich elektrociepłowni [41].



Rys. 2.5. Instalacja gazowa w elektrociepłowni [41]

Stale żarowytrzymałe

Stale żarowytrzymałe to stale głównie martenzytyczne lub austenityczne o dobrej odporności na odkształcenie pod długotrwałym obciążeniem mechanicznym w temperaturze wyższej niż 500°C [1]. Stanowią odmianę stali nierdzewnych i żaroodpornych (o podwyższonym stężeniu węgla), odpornych na pełzanie w wysokiej temperaturze [38]. Żarowytrzymałość uzyskuje się dzięki dodatkowi molibdenu, wanadu, wolframu, tytanu, kobaltu, chromu i krzemu, których obecność powoduje zwiększenie energii wiązań atomów [42]. Stal żarowytrzymałą stosuje się głównie w energetyce do produkcji części maszyn i urządzeń, turbin, wałów wirnikowych, śrub oraz nakrętek [38].

Grupę stali żarowytrzymałych oznaczono w PN-EN 10027-2 jako 1.49XX [30].

Przykładem stali żarowytrzymałej są gatunki 1.4903 (X10CrMoVNb9-1) i 1.4901 (X10CrWMoVNb9-2) stosowane w przemyśle energetycznym, w budowie maszyn, kotłów i zbiorników ciśnieniowych [43]. Na rysunku 2.6 przedstawiono przykład zastosowania stali żarowytrzymałej w gatunku 1.4901.

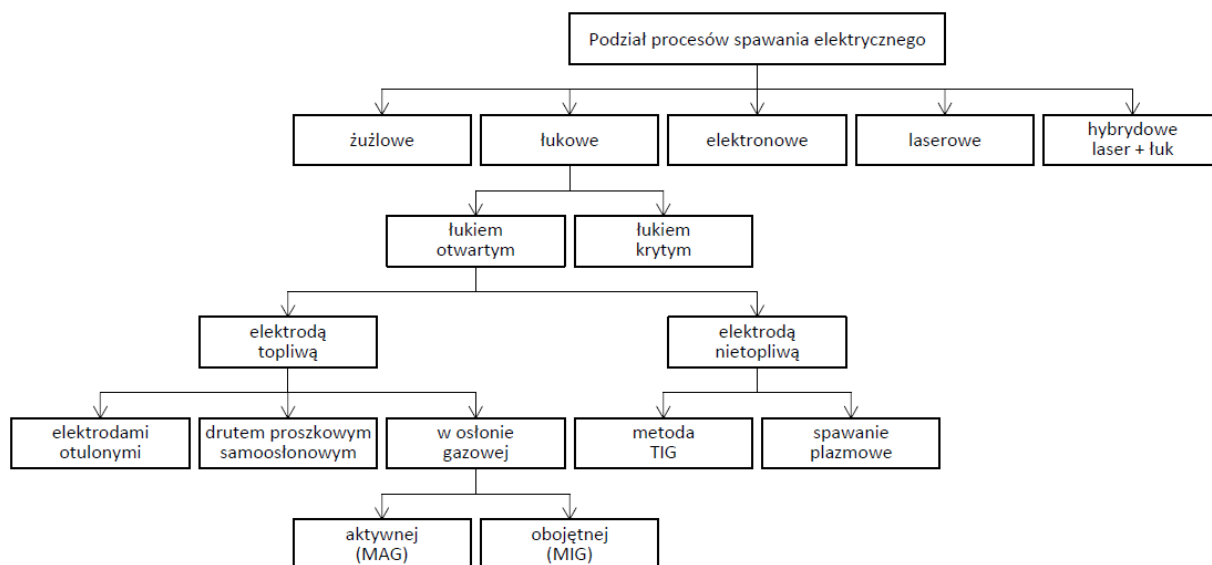


Rys. 2.6. Rurociąg wykonany ze stali 1.4901 [44]

W podsumowaniu należy stwierdzić, że grupa stali odpornych na korozję z uwagi na swoje właściwości antykorozyjne i mechaniczne znajduje zastosowanie, tam gdzie wymagane są dobre własności wytrzymałościowe, wysoka odporność na działanie mediów i agresywnych związków chemicznych oraz żaroodporność i żarowytrzymałość. Dlatego też stale te stosowane są w wielu gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, farmaceutycznym, spożywczym, motoryzacyjnym, stoczniowym, energetycznym i w budownictwie. Dominującą technologią łączenia elementów ze stali odpornych na korozję są procesy spawalnicze. Konstrukcje spawane charakteryzują się wysoką wytrzymałością i niezawodnością. Jednak spawanie tych materiałów wiąże się z emisją do środowiska pracy pyłu zawierającego w swoim składzie związki chromu(VI) i niklu, które mają udowodnione działanie kancerogenne [8]. Do prowadzenia analizy wpływu parametrów technologicznych procesu spawania na wielkość emisji pyłu, jego składu chemicznego i morfologii wybrano powszechnie stosowane stale nierdzewne i żaroodporne o strukturze austenitycznej zawierające w swoim składzie od 16 do 21% chromu i 8-13,5% niklu.

2.2. Spawanie stali austenitycznych

Spawanie jest procesem polegającym na łączeniu materiałów przez ich nagrzanie i stopienie w miejscu łączenia z dodaniem lub bez dodania spoiwa [45]. Procesy spawania można podzielić na spawanie gazowe, elektryczne i termitytowe. Do łączenia stali austenitycznych wykorzystuje się głównie procesy spawania elektrycznego (rys. 2.7).



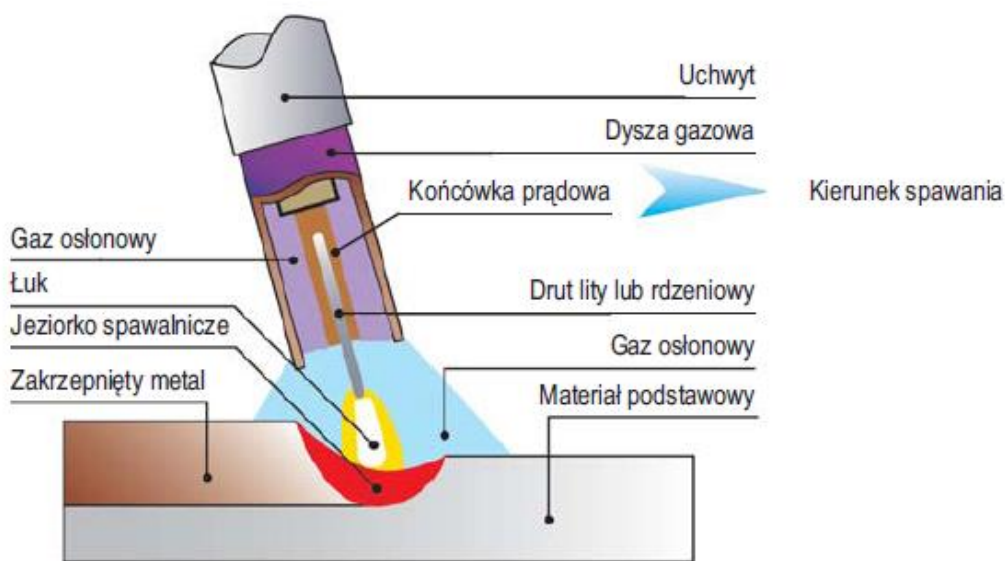
Rys. 2.7. Podział procesów spawania elektrycznego [46]

Do klasycznych metod spawania stali austenitycznych zalicza się spawanie elektrodami otulonymi, spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej (MIG/MAG), spawanie drutami proszkowymi, spawanie metodą TIG i spawanie łukiem krytym, natomiast obecnie coraz szerzej stosowane do spawania tych stali są: spawanie laserowe, hybrydowe (laser + łuk), plazmowe oraz spawanie elektronowe.

W przemyśle najczęściej stosuje spawanie metodą MIG/MAG, natomiast spośród nowoczesnych metod - spawanie laserowe i hybrydowe. Szczegółowy opis tych technologii przedstawiony został w podrozdziałach 2.2.1-2.2.3.

2.2.1. Technologia spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej

Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej – GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) należy do najczęściej stosowanych metod łączenia konstrukcji stalowych. Proces ten oznaczany jest także jako spawanie MIG/MAG - MIG (*Metal Inert Gas*), który dotyczy spawania w obojętnych osłonach gazowych takich jak argon i hel, oraz MAG (*Metal Active Gas*), do którego z kolei stosowane są aktywne chemicznie gazy osłonowe, takie jak: CO_2 , O_2 stosowane najczęściej jako mieszaniny z helem lub argonem, zawierające domieszki H_2 , N_2 , NO [47]. Źródłem energii cieplnej, potrzebnej do stopienia spawanego elementu i materiału elektrody topliwiej (drutu), jest ciepło łuku elektrycznego jarzącego się pomiędzy elektrodą a spawanym materiałem, w osłonie gazu aktywnego lub obojętnego (rys. 2.8) [47]. Nawinięty na szpulę drut elektrodowy jest podawany w sposób ciągły, za pomocą podajnika drutu do obszaru spawania. Do drutu spawalniczego doprowadzane jest napięcie za pomocą przewodu prądowego wychodzącego ze źródła prądu i następnie przekazywane za pomocą miedzianej końcówki prądowej [48]. Pomiędzy końcówką drutu elektrodowego a materiałem spawanym zajarza się łuk elektryczny. Roztopiony metal drutu elektrodowego łączy się ze stopionym materiałem rodzimym tworząc jeziorko spawalnicze. Metal jeziorka spawalniczego, w miarę przemieszczania się łuku w kierunku spawania, krzepnie i tworzy spoinę trwale łączącą brzegi elementu spawanego [47]. Przez uchwyt spawalniczy i jego dyszę gazową doprowadzany jest gaz osłonowy, który chroni roztopiony metal przed oddziaływaniem czynników atmosferycznych oraz chłodzi uchwyt [48].



Rys. 2.8. Schemat procesu spawania metodą MIG/MAG [48]

Z uwagi na fakt, że elektroda topлива stosowana w procesach spawania MIG/MAG może występować w postaci drutu litego lub proszkowego procesy te zostały skategoryzowane zgodnie z normą PN-EN ISO 4063 Spawanie i procesy pokrewne – Nazwy i numery procesów. Oznaczenia procesów spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej przedstawiono w tablicy 2.1 [49]:

Tablica 2.1. Oznaczenia procesów spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazowej wg PN-EN ISO 4063 [49]

Numer referencyjny	Nazwa procesu w języku polskim	Nazwa procesu w języku angielskim
13	Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazu	Gas-shielded metal arc welding. Gas metal arc welding, USA
131	Spawanie łukowe drutem elektrodowym litym w osłonie gazu obojętnego. Spawanie MIG drutem elektrodowym litym	MIG welding with solid wire electrode. Gas metal arc welding using inert gas and solid wire electrode, USA
132	Spawanie MIG drutem elektrodowym proszkowym o rdzeniu topnikowym	MIG welding with flux cored electrode. Flux cored arc welding, USA
133	Spawanie MIG drutem elektrodowym proszkowym o rdzeniu metalicznym	MIG welding with metal cored electrode. Gas metal arc welding using inert gas and metal cored wire, USA
135	Spawanie łukowe drutem elektrodowym litym w osłonie gazu aktywnego Spawanie MAG drutem elektrodowym litym	MAG welding with solid wire electrode. Gas metal arc welding using active gas with solid wire electrode, USA
136	Spawanie MAG drutem elektrodowym proszkowym o rdzeniu topnikowym	MAG welding with flux cored electrode. Gas metal arc welding using active gas and flux cored electrode, USA
138	Spawanie MAG drutem elektrodowym proszkowym o rdzeniu metalicznym	MAG welding with metal cored electrode. Gas metal arc welding using active gas and metal cored electrode, USA

Do podstawowych parametrów spawania metodą MIG/MAG zalicza się [47, 50]:

- rodzaj i biegunowość prądu spawania,

W metodzie MIG/MAG stosuje się prąd stały o biegunowości dodatniej, co powoduje intensywne stapianie drutu spawalniczego [50]. Niektóre urządzenia spawalnicze umożliwiają spawanie prądem pulsującym lub prądem o podwójnej pulsacji.

- rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego [l/min],

Do spawania stali austenitycznych stosuje się mieszaniny argonu z dodatkiem 1-3% O₂ lub 2-4% CO₂, a także gazy obojętne (Ar, He). Natężenie przepływu gazu

osłonowego powinno być tak dobrane, aby zapewnić skuteczną osłonę łuku spawalniczego i jeziorka. W przypadku argonu i dwutlenku węgla oraz mieszanek sprawdzoną w praktyce zasadą jest ustalenie wydatku w ilości 1 l/min na każdy milimetr wewnętrznej średnicy dyszy gazowej (zwykle ok. 12 l/min) [47].

- rodzaj drutu elektrodowego i średnica drutu elektrodowego [mm],
Gatunek drutu dobiera się w zależności od gatunku spawanego materiału. Najczęściej stosuje się druty elektrodowe o średnicy 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm, a średnicę dobiera się w zależności od grubości spawanego materiału i pozycji spawania [47, 50].
- długość wolnego wylotu elektrody [mm],
Wylot drutu elektrodowego jest odległością od końca drutu elektrodowego do najbliższego punktu kontaktu elektrycznego końcówki prądowej. Wylot drutu zależy od rodzaju i średnicy drutu elektrodowego, natężenia prądu i pozostałych parametrów spawania. W przypadku spawania metodą MAG łukiem zwarciovym wynosi on najczęściej 6-15 mm, a łukiem natryskowym 18-25 mm [47, 50].
- natężenie prądu [A],
Natężenie prądu spawania decyduje o wydajności stapiania elektrody oraz kształcie i głębokości wtopienia. Wartość natężenia prądu, przy danej średnicy drutu elektrodowego, dobierana jest w zależności od grubości materiału spawanego. W obecnie stosowanych urządzeniach spawalniczych wartość natężenia prądu jest najczęściej sprzężona z regulacją prędkości podawania drutu – wzrost prędkości podawania drutu skutkuje wzrostem natężenia prądu [47].
- napięcie łuku [V],
Napięcie łuku zależy od natężenia prądu spawania, składu gazu osłonowego, rodzaju i średnicy drutu elektrodowego, rodzaju spawanego materiału i jego grubości, rodzaju spoiny i pozycji spawania. Wzrost napięcia łuku powoduje zwiększenie szerokości ściegu spoiny i zmniejszenie głębokości wtopienia [47].
- prędkość spawania [mm/min],
Prędkość spawania to szybkość przemieszczania końca drutu z jarzącym się łukiem [50]. Prędkość jest parametrem wynikowym dla danego natężenia prądu i napięcia łuku, przy zachowaniu właściwego kształtu spoiny [50].
- prędkość podawania drutu elektrodowego [m/min],
Prędkość podawania drutu wpływa na przebieg jego stapiania, ilość ciekłego metalu, głębokość wtopienia i wynikową wartość natężenia prądu. Prędkość podawania drutu

uzależniona jest od natężenia prądu spawania i napięcia łuku [50].

- pochylenie drutu elektrodowego ($^{\circ}$).

Kąt pochylenia uchwytu drutu elektrodowego zależy m.in. od rodzaju złącza oraz pozycji spawania. Pochylenie decyduje o głębokości wtopienia oraz szerokości i kształcie lica spoiny [50]. Pochylenie w kierunku zgodnym z kierunkiem spawania powoduje zwiększenie głębokości wtopienia i zmniejszenie szerokości spoiny. Z kolei pochylenie w kierunku przeciwnym do kierunku spawania powoduje zmniejszenie głębokości wtopienia i zwiększenie szerokości spoiny.

Wady i zalety metody MIG/MAG

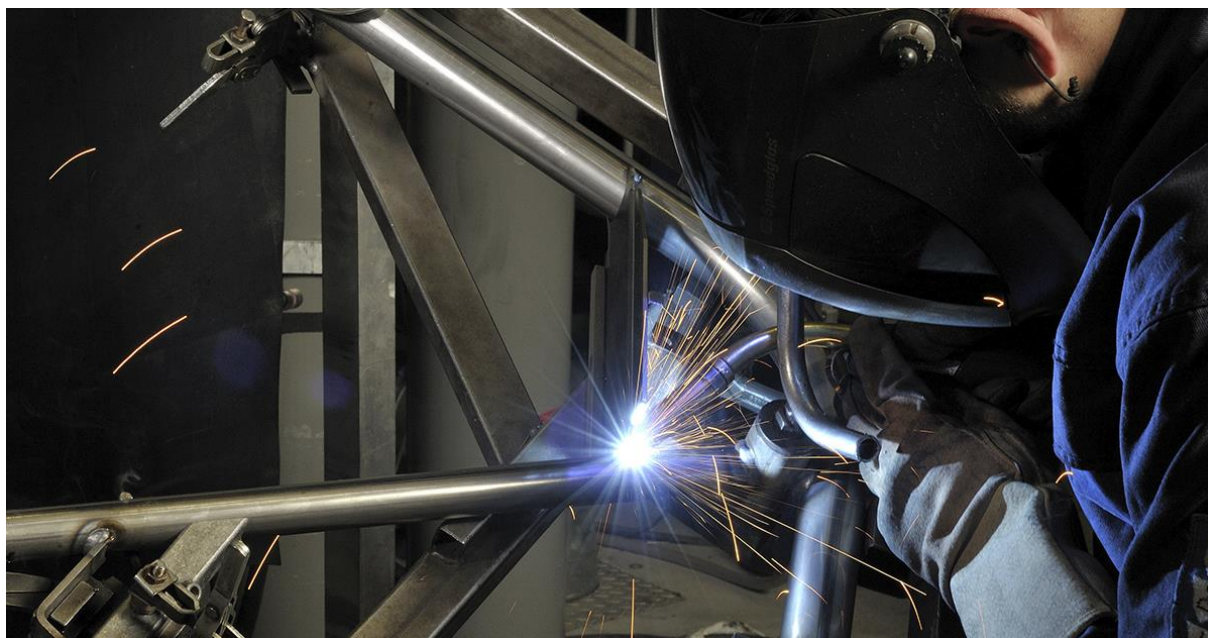
Do zalet metody MIG/MAG zalicza się [47, 51]:

- wysoką wydajność procesu,
- możliwość spawania szerokiego asortymentu materiałów,
- możliwość mechanizacji i robotyzacji procesu,
- łatwość operowania drutem spawalniczym,
- możliwość obserwacji jeziora i łuku spawalniczego,
- możliwość spawania we wszystkich pozycjach,
- możliwość stosowania wysokich prędkości spawania,
- możliwość osiągnięcia dobrego wtopienia przy niewielkim nagraniu elementu spawanego,
- występowanie niewielkiej ilości żużla, niewielki nakład pracy potrzebny do jego usunięcia,
- niewielkie odkształcenia spawanych elementów.

Natomiast do wad należy zaliczyć [47, 51]:

- uzależnienie jakości złącza od manualnych zdolności spawacza,
- możliwość zakłócenia osłony gazowej przez podmuchy powietrza.
- niewielki zasięg urządzenia (przewód + uchwyt spawalniczy)
- konieczność odpowiedniego przygotowania brzegów elementów spawanych (sucha powierzchnia, oczyszczona z metalicznego połysku, usunięta farba oraz tłuszcze).
- skłonność do przyklejeń w złączach spawanych,
- konieczność ochrony pracowników przed działaniem promieniowania optycznego,
- narażenie na dym spawalniczy.

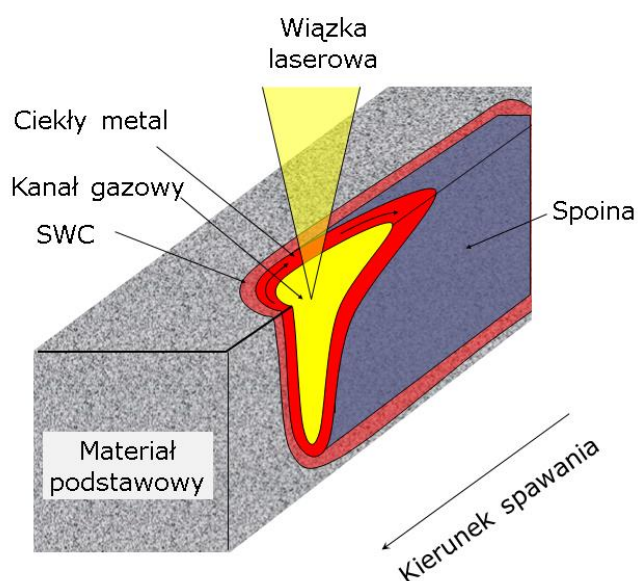
Spawanie metodą MIG/MAG należy do najczęściej stosowanych obecnie metod spawania. Proces ten może być prowadzony w sposób ręczny, półautomatyczny lub zautomatyzowany (na stanowiskach zrobotyzowanych), we wszystkich pozycjach spawalniczych. Typowy zakres grubości spoin czołowych to około 1,5–20 mm, spoin pachwinowych 3–12 mm [47]. Metoda MIG/MAG stosowana jest do łączenia m.in.: stali niestopowych i niskostopowych, stali odpornych na korozję, stali specjalnych oraz aluminium, magnezu, miedzi, niklu, tytanu i ich stopów. Spawanie metodą MIG/MAG stosuje się w produkcji seryjnej – do produkcji rur, zbiorników ciśnieniowych, konstrukcji stalowych, statków i okrętów, produkcji samochodów i taboru kolejowego (rys. 2.9), a także w warsztatach naprawczych [52].



Rys. 2.9. Spawanie konstrukcji ze stali odpornych na korozję metodą MIG [52]

2.2.2. Technologia spawania laserowego

Proces spawania laserowego polega na przetapianiu obszaru styku łączonych elementów ciepłem otrzymanym w wyniku doprowadzenia do obszaru spawanego skoncentrowanej wiązki promieniowania laserowego [53]. W punkcie zogniskowania wiązki następuje intensywne, miejscowe nagrzanie, stopienie i częściowe odparowanie materiału. Promieniowanie laserowe jest koherentne i monochromatyczne, możliwe jest więc uzyskanie bardzo dużej koncentracji energii w precyzyjnie zlokalizowanym obszarze [53, 69]. Spoina powstaje w wyniku stopienia spawanych elementów (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Schemat procesu spawania laserowego [54]

Po przekroczeniu określonej progowej wartości intensywności promieniowania zmienia się sposób oddziaływania wiązki promieniowania na materiał, inny jest mechanizm tworzenia się spoiny. Ta graniczna wartość gęstości mocy stanowi granicę między dwoma technikami prowadzenia procesu spawania – techniką z jeziorciem i techniką z oczkiem [53].

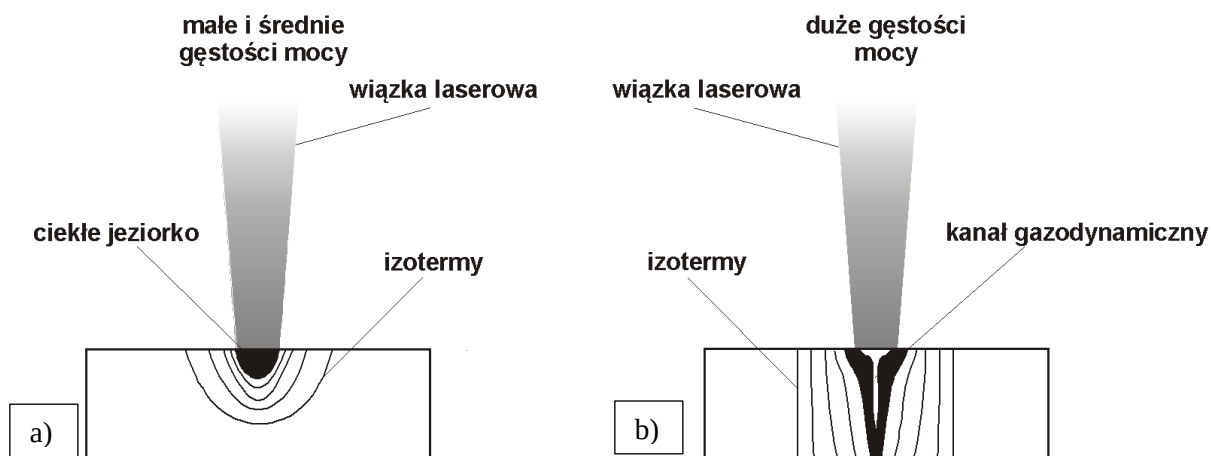
Proces spawania laserowego techniką z jeziorciem

Proces spawania techniką z jeziorciem prowadzony jest z gęstością mocy promieniowania do ok. 10^4 - 10^5 W/cm² [53]. Uzyskany poziom gęstości mocy jest wystarczający do wytworzenia jeziorca spawalniczego, ale absorpcja energii wiązki występuje tylko w cienkiej, powierzchniowej warstwie materiału (rys. 2.11 a). Nagrzewanie dalszych warstw następuje już w wyniku przewodnictwa cieplnego materiału. Czynniki

wpływającymi na głębokość przetopienia są właściwości ciepłno-fizyczne spawanego materiału, zdolność absorpcji promieniowania o określonej długości fali i stan powierzchni materiału [53].

Proces spawania laserowego techniką z oczkiem (techniką głębokiego wtopienia)

Technika ta charakteryzuje się tym, że po przekroczeniu gęstości mocy promieniowania ok. 10^6 W/cm^2 materiał spawany nie tylko topi się, ale zaczyna też intensywnie parować [53]. Ciśnienie strumienia par metalu osiąga na tyle dużą wartość, że w jeziorce spawalniczym zaczyna się tworzyć zagłębienie – kapilara (oczko). W procesie spawania kapilara przesuwa się wzdłuż styku spawanych elementów. Metal topi się na froncie po obejściu kapilary i krzepnie w jej tylnej części [53]. W przypadku spawania laserowego techniką z oczkiem ciepło przekazywane jest do materiału spawanego na całej głębokości kapilary, a nie od powierzchni jak to ma miejsce podczas spawania techniką z jeziorkiem (rys. 2.11 b).



Rys. 2.11. Proces spawania laserowego: a) technika z jeziorkiem, b) technika z oczkiem [54]

Do parametrów spawania laserowego zalicza się [53, 55, 56]:

- moc wiązki laserowej [kW],

Moc wiązki laserowej wpływa na głębokość wtopienia. Przekroczenie określonej wielkości mocy dla danego rodzaju spawanego materiału i grubości powoduje początkowo tworzenie się pęcherzy w spoinie a następnie wklęsnięć i nierówności lica, aż do wycieku metalu z oczka [55].

- prędkość spawania [m/min],

Wzrost prędkości spawania, przy stałej mocy wiązki sprawia, że zmniejsza się głębokość wtopienia i spoina staje się węższa. Przy nadmiernej prędkości spawania metal stapia się i krzepnie zbyt szybko, nie zdąża rozpuścić się i połączyć ze sobą. Zbyt mała prędkość spawania skutkuje zwiększeniem się szerokości spoiny, wzrasta SWC, a równocześnie może pojawić się porowatość, podobnie jak przy nadmiernej mocy wiązki lasera [55].

- średnica wiązki laserowej [mm],

W celu otrzymania dużej gęstości mocy wymaganej w procesie spawania laserowego średnica wiązki laserowej musi być zogniskowana za pomocą specjalnych układów optycznych. Średnice te mieszczą się w granicach od 0,04-2,0 mm [55].

- rodzaj i natężenie przepływu gazu ochronnego [l/min].

Gaz osłonowy jest odpowiedzialny za osłonę ciekłego metalu (kapilary i jeziora) przed szkodliwym oddziaływaniem powietrza. Do spawania laserowego stali austenitycznych stosuje się jako gaz osłonowy: argon, hel, lub azot oraz mieszaniny tych gazów [68].

Zalety i wady spawania laserowego

Do zalet spawania laserowego zalicza się [53, 57, 58]:

- możliwość uzyskania dużych głębokości wtopienia,
- możliwość osiągnięcia dużych prędkości spawania,
- niską energię liniową,
- minimalne odkształcenia (brak konieczności ukosowania blach),
- wąską strefę wpływu ciepła (SWC),
- łatwość automatyzacji,
- spawanie z wysoką precyzją,
- brak konieczności stosowania spoiwa,
- estetykę uzyskanych złączy.

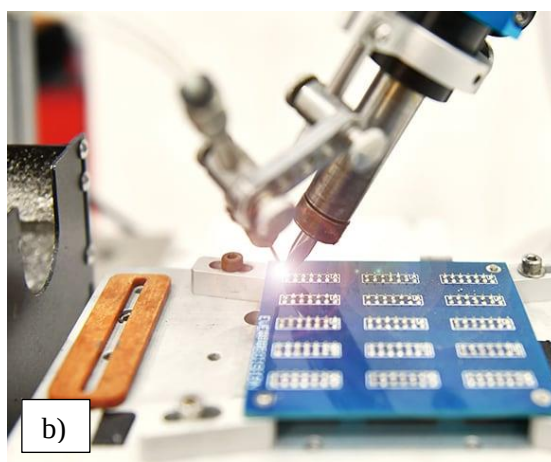
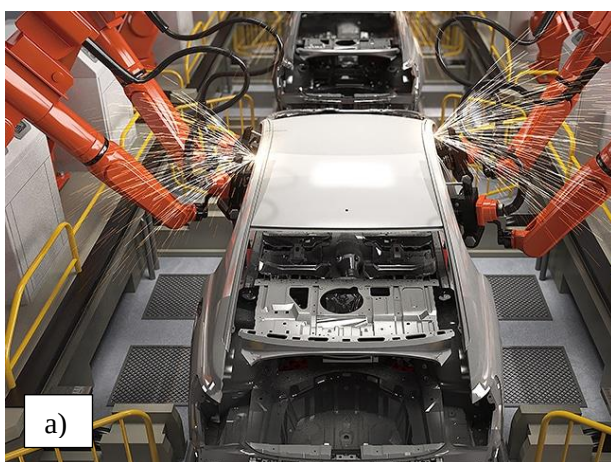
Do ograniczeń procesu spawania laserowego należą [53, 56, 58]:

- koszty związane z budową i wyposażeniem stanowiska,
- możliwość pojawienia się w spoinie struktur hartowniczych, porowatości, pęknięć krystalicznych,
- konieczność dokładnego przygotowania elementów przed spawaniem,
- konieczność zapewnienia ochrony przed promieniowaniem laserowym.

Spawanie laserowe stosuje się w produkcji wielkoseryjnej, zautomatyzowanej lub zrobotyzowanej. Proces ten stosowany jest do spawania bardzo dużej gamy materiałów takich jak stale konstrukcyjne, stale odporne na korozję, wysokowytrzymałe stale niskostopowe, stale węglowe, metale trudnotopliwe, metale aktywne chemicznie, aluminium, tytan, nikiel i magnez [55].

Procesy spawania laserowego znajdują zastosowanie w [55, 58] (rys. 2.12):

- przemyśle motoryzacyjnym,
- kolejnictwie,
- przemyśle stoczniowym,
- lotnictwie,
- branży AGD,
- przemyśle petrochemicznym,
- budownictwie,
- systemach klimatyzacji i wentylacji,
- telekomunikacji,
- elektronice,
- budowie maszyn,
- technice medycznej.



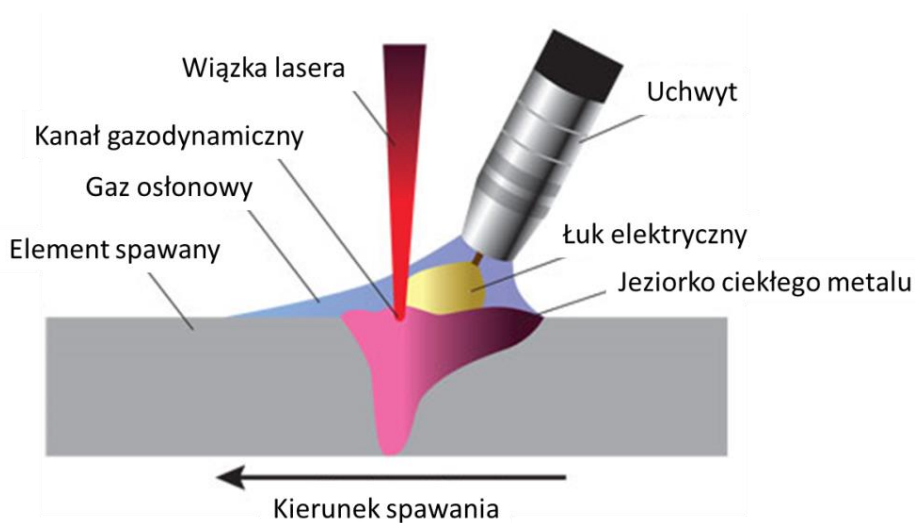
Rys. 2.12. Przykłady zastosowania spawania laserowego, a) w przemyśle motoryzacyjnym – spawanie karoserii, b) w elektronice – spawanie systemów złączy stykowych [59]

2.2.3. Technologia spawania hybrydowego

Spawanie hybrydowe (HLAW Hybrid Laser Arc Welding - laser+łuk elektryczny) polega na połączeniu dwóch źródeł ciepła – wiązki promienia laserowego oraz klasycznego spawalniczego źródła ciepła w postaci łuku elektrycznego w jednym procesie [60].

Systemy spawania hybrydowego bazują na różnych kombinacjach laserów i metod łukowych. Do najczęściej stosowanych zalicza się lasery na ciele stałym i gazowe, natomiast do metod łukowych: metoda MIG/MAG (*metal inert gas/ metal active gas*), metoda TIG (*tungsten inert gas*) i metoda PAW (*plasma arc welding*). Każda z kombinacji obu źródeł ciepła ma swoją specyfikę i wymaga precyzyjnego doboru parametrów i warunków technologicznych spawania [61]. Najczęściej stosowana do spawania stali austenitycznych jest kombinacja laser Nd:YAG + MIG/MAG [61].

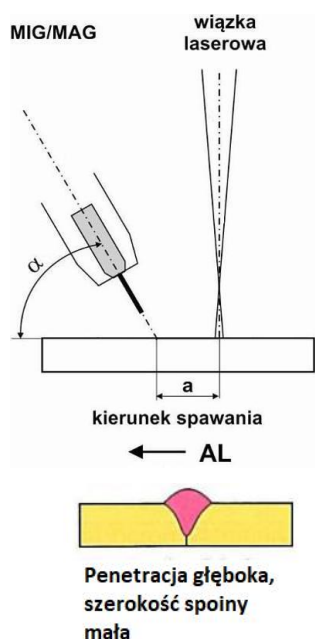
Podczas spawania hybrydowego górne krawędzie blach są topione ciepłem dostarczonym przez łuk, natomiast oddziaływanie wiązki pozwala na topienie materiału w znacznie głębszych obszarach (rys. 2.13) [60].



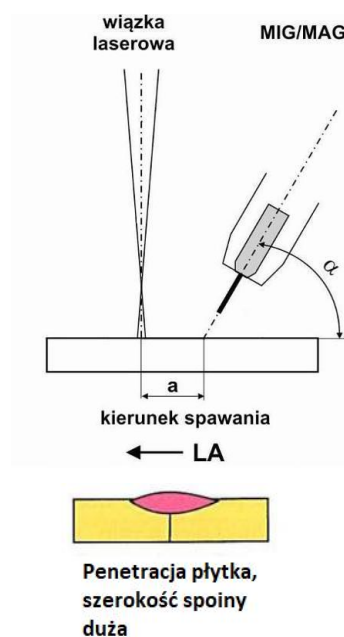
Rys. 2.13. Schemat procesu spawania hybrydowego laser + łuk elektryczny [71]

Spawanie hybrydowe może być prowadzone w dwóch konfiguracjach: A-L i L-A. W konfiguracji A-L (*Arc Leading*), uchwyt źródła łukowego jest przed wiązką laserową (tzw. spawanie łukiem wleczonym), natomiast w konfiguracji L-A (*Laser Leading*) uchwyt źródła łukowego jest za wiązką laserową (tzw. spawanie łukiem atakującym). Wybór konfiguracji procesu spawania hybrydowego wpływa na kształt i geometrię uzyskanej spoiny (rys. 2.14) [60].

a) Spawanie łukiem wleczonym



b) Spawanie łukiem atakującym



Rys. 2.14. Wpływ konfiguracji laserowego spawania hybrydowego na kształt i geometrię uzyskanej spoiny [60]: a) konfiguracja A-L, spawanie łukiem „wleczonym” (Arc Leading), b) konfiguracja L-A, spawanie łukiem atakującym (Laser Leading), α – kąt pochylenia uchwytu MAG, a – odległość koniec drutu elektrodowego – wiązka lasera

Podczas spawania metodą HLAW w konfiguracji A-L, górny obszar złącza przetapiany jest zarówno przez źródło łukowe jak i wiązkę laserową, co powoduje formowanie wypukłego lica spoiny, podczas gdy obszar grani jest przetapiany głównie przez energię wiązki laserowej, jest on zatem stosunkowo wąski. Szerokość lica spoiny w konfiguracji A-L zależy od parametrów procesu HLAW tj. mocy wiązki laserowej, natężenia prądu spawania oraz prędkości spawania [60].

Podczas spawania złączy doczołowych w konfiguracji L-A uzyskane lico spoiny jest szersze, a uzyskana głębokość wtopienia jest w mniejszym stopniu uzależniona od natężenia prądu zastosowanej metody łukowej, decyduje o niej moc wiązki laserowej i prędkość spawania [60].

Metoda spawania hybrydowego wymaga doboru większej liczby parametrów procesu niż metody konwencjonalne. Konieczny jest dobór parametrów łuku spawalniczego oraz parametrów wiązki lasera. Niezbędne jest również precyzyjne przestrzenne usytuowanie obu tych źródeł względem siebie i w stosunku do każdego typu złącza i pozycji spawania.

Do podstawowych parametrów procesu spawania hybrydowego zalicza się [60-64]:

- moc wiązki laserowej,
Decyduje o głębokości wtopienia. Wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej zwiększa się głębokość wtopienia [61, 64].
- prędkość spawania,
Prędkość spawania decyduje o kształcie i geometrii uzyskanej spoiny - wzrost prędkości spawania powoduje zmniejszenie głębokości wtopienia i szerokości spoiny. Zbyt wysoka prędkość spawania powoduje niewłaściwe połączenie lub brak przetopu, z kolei zbyt niska prędkość skutkuje powstaniem dużego jeziora spawalniczego. Jednym z czynników wpływających na stabilność procesu jest stosunek prędkości spawania do prędkości podawania drutu [61, 64].
- prędkość podawania drutu,
Właściwy dobór prędkości podawania drutu wpływa na prawidłowość prowadzenia procesu. Zbyt wysoka prędkość może powodować dostarczenie zbyt dużej ilości materiału w jednostce czasu. Podczas spawania hybrydowego MIG/MAG wzrost prędkości podawania drutu powoduje wzrost natężenia prądu spawania [61, 64].
- pozycjonowanie wiązki laserowej i drutu elektrodowego,
Wiązka laserowa skierowana jest prostopadle do kierunku spawania co pozwala na uzyskanie możliwie największej głębokości wtopienia. Kąt pochylenia drutu elektrodowego ustawiany jest w taki sposób aby gaz osłonowy wychodzący z dyszy skutecznie ochraniał jezioro spawalnicze. Kąt pochylenia drutu elektrodowego do powierzchni materiału wynosi od 45° do 65° , co powoduje zmniejszenie długości łuku [60, 61, 64].
- odległość między laserem a drutem elektrodowym,
Drut elektrodowy musi znajdować się w bliskiej odległości od wiązki lasera tak, aby tworzyły wspólne jezioro ciekłego metalu. Odległość ta zależy od rodzaju spawanego materiału, parametrów spawania laserowego i łukowego [61, 64].
- położenie ogniska,
Maksymalna głębokość wtopienia osiągnięta jest gdy położenie ogniska wiązki laserowej znajduje się na powierzchni elementu spawanego [60, 64].
- skład gazu osłonowego,
Gaz osłonowy stosowany jest w celu ochrony jeziora spawalniczego przed działaniem zanieczyszczeń i powietrza atmosferycznego. Do spawania hybrydowego

stali austenitycznych stosuje się głównie gazy obojętne jak hel czy argon, ale także ich mieszaniny z tlenem lub dwutlenkiem węgla [60, 63, 64].

- natężenie prądu spawania i napięcie łuku,

Natężenie prądu spawania wpływa na wydajność stapiania drutu elektrodowego. W źródle łukowym natężenie prądu spawania sprzężone jest z prędkością podawania drutu. Napięcie łuku wpływa na długość łuku i uzależnione jest od średnicy drutu i natężenia prądu spawania [61, 64].

- odstęp pomiędzy łączonymi elementami,

Proces spawania metodą HLAW można prowadzić przy zestawieniu blach zarówno z odstępem jak i bez odstępów. Odstęp między łączonymi blachami nie powinien jednak przekraczać 1 mm [60].

- konfiguracja złącza.

Precyzyjny dobór parametrów procesu i odpowiednie przestrzenne pozycjonowanie wiązki lasera i uchwytu spawalniczego MAG w stosunku do płaszczyzny styku blach pozwala wykonywać metodą HLAW złącza różnych typów, jakie spotykane są we współczesnych konstrukcjach, np.: złącza doczołowe, teowe, zakładkowe, węzły kilku blach. Spawanie może się odbywać zarówno w pozycji podolnej (PA,) pozycji nabocznej (PB) i naściennej (PC). Możliwe jest łączenie elementów za pomocą spoin obwodowych - spawania orbitalne rur [60].

Zalety i wady spawania hybrydowego

Do zalet spawania hybrydowego zaliczyć można [60, 63, 64]:

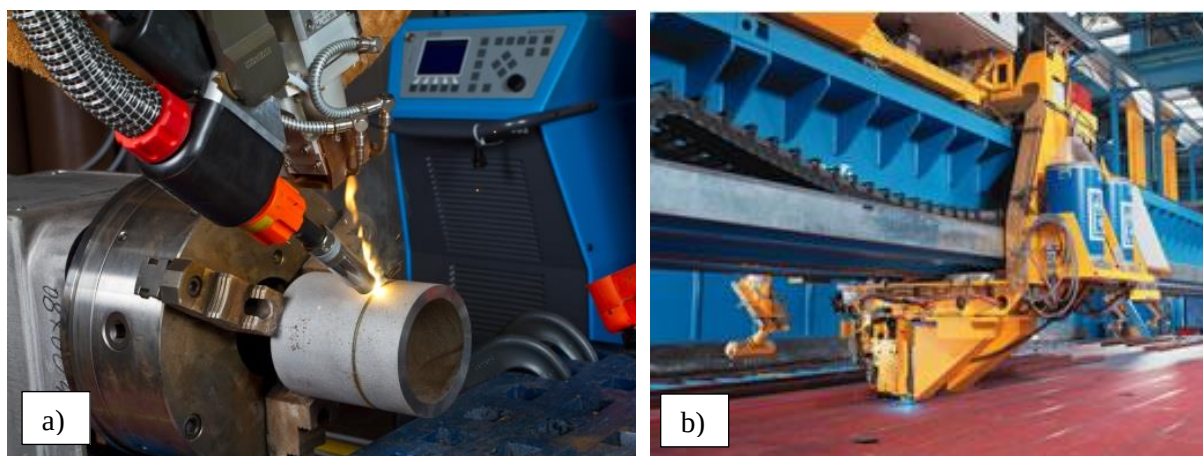
- stabilizacja procesu dzięki wzajemnemu oddziaływaniu obu procesów,
- zwiększona tolerancja przygotowania złącza w porównaniu do spawania laserowego - możliwość spawania materiałów zestawionych z odstępem,
- możliwość uzyskania dużych głębokości przetopienia,
- niska energia liniowa spawania,
- niewielka strefa wpływu ciepła,
- możliwość wzrostu wydajności spawania poprzez zwiększenie prędkości spawania lub grubości spawanych elementów,
- brak konieczności ukosowania blach przed spawaniem,
- możliwość regulacji składu chemicznego spoiny,
- możliwość zastąpienia wielościęgowych spoin, jednościęgową spoiną o bardziej korzystnym kształcie.

Do ograniczeń stosowania technologii spawania hybrydowego należą [60, 63, 64]:

- znaczne koszty inwestycyjne - z uwagi, że jest to proces całkowicie zautomatyzowany,
- konieczność precyzyjnego doboru i ustawienia wszystkich parametrów procesu,
- brak możliwości zastosowania gdy odstęp między łączonymi materiałami przekracza 1 mm,
- konieczność ochrony pracowników przed działaniem promieniowania optycznego i laserowego,
- emisja dymu spawalniczego.

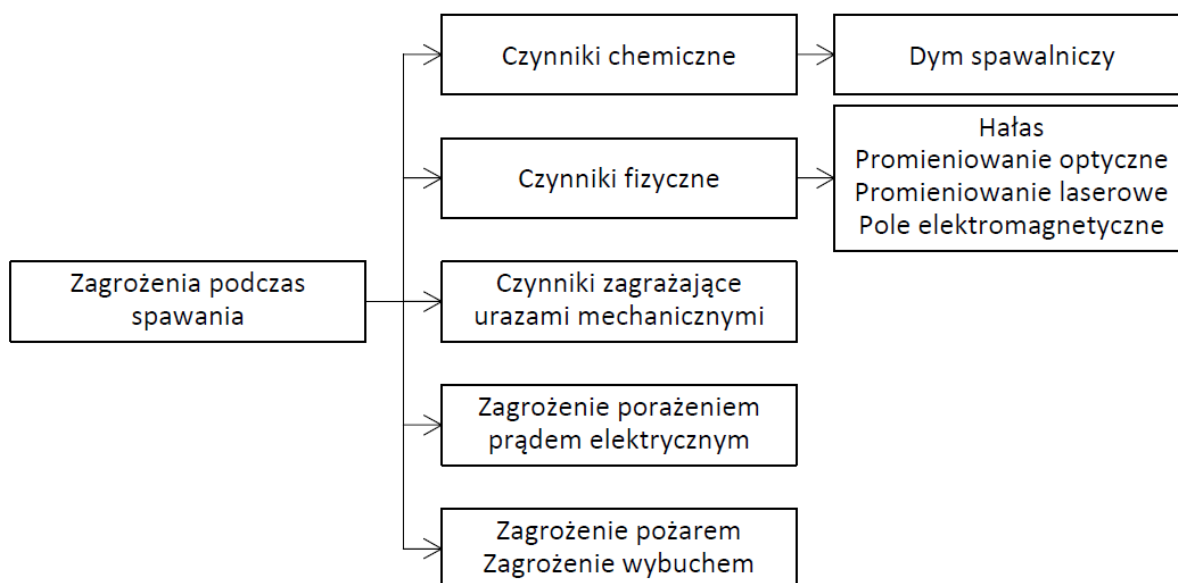
Proces spawania hybrydowego może być stosowany do łączenia stali niestopowych, stali odpornych na korozję, aluminium, magnezu, niklu, tytanu oraz ich stopów. Metodą HLAW spawać można element zarówno cienko- jak i grubościennie [65, 66]. Z uwagi na liczne zalety procesy spawania hybrydowego stosowane są w wielu gałęziach przemysłu (rys. 2.15), m.in. w [65, 66]:

- przemyśle motoryzacyjnym,
- kolejnictwie,
- przemyśle stoczniowym,
- produkcji rur,
- produkcji wielkogabarytowych konstrukcji,
- przemyśle lotniczym,
- przemyśle ciężkim,
- energetyce.



Rys. 2.15. Przykłady zastosowania procesu spawania hybrydowego (HLAW) w przemyśle:
 a) spawanie rur stalowych dla przemysłu energetycznego, General Electric, Boston, USA [67], b) spawanie paneli poszycia statku oraz elementów usztywniających, Stocznia Meyer, Papenburg, Niemcy [70]

W podsumowaniu należy stwierdzić, że procesy spawania odgrywają kluczową rolę w wielu gałęziach przemysłu. Wiążą się one jednakże z narażeniem pracowników na oddziaływanie szkodliwych dla zdrowia czynników fizycznych i chemicznych (rys. 2.16). Do czynników fizycznych należy zaliczyć promieniowanie optyczne, którego źródłem jest łuk spawalniczy, pola elektromagnetyczne wytwarzane przez urządzenia spawalnicze oraz nadmierny hałas [72-74]. Stosowanie procesów spawania laserowego i hybrydowego wiąże się koniecznością ochrony przed promieniowaniem laserowym, którego źródłem jest wiązka laserowa. Lasery są to generatory promieniowania elektromagnetycznego, najczęściej o długościach fali w zakresie promieniowania optycznego od 100 nm do 1 mm, w których wykorzystywane jest zjawisko emisji wymuszonej promieniowania [75]. Promieniowanie laserowe (Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) nie występuje w sposób naturalny w środowisku i znacząco różni się własnościami fizycznymi od promieniowania optycznego emitowanego przez konwencjonalne źródła [75]. Jego charakterystycznymi cechami są: wysoka gęstość mocy, spójność, równoległość, monochromatyczność i intensywność [75].



Rys. 2.16. Zagrożenia występujące podczas procesu spawania [74]

Dominującym zagrożeniem jest emisja dymu spawalniczego. Dym spawalniczy jest mieszaniną cząstek stałych – pyłu spawalniczego oraz gazów stanowiących fazę rozpraszającą. W celu ochrony pracowników stosuje się odpowiednio dobrane systemy wentylacji ogólnej i miejscowej, umożliwiające skuteczne wychwytywanie powstających zanieczyszczeń [72].

Wielkość emisji dymu spawalniczego zależy od metody spawania, gatunku materiału podstawowego i materiałów dodatkowych oraz parametrów technologicznych procesu spawania [72, 73]. Poznanie wpływu tych czynników pozwala na modyfikację procesu spawania w aspekcie ograniczenia emisji powstających zanieczyszczeń.

Źródłem powstawania dymu spawalniczego są procesy metalurgiczne zachodzące w łuku spawalniczym i jeziorce ciekłego metalu oraz reakcje chemiczne zachodzące wokół łuku spawalniczego. Na skutek działania wysokiej temperatury zachodzą procesy topienia materiałów, ich częściowego odparowania i utleniania par metalu. W atmosferze o niższej temperaturze następuje proces kondensacji i wytworzenie cząstek stałych [73, 74].

2.3. Metalurgia procesów spawania stali austenitycznych

Procesy metalurgiczne zachodzące podczas spawania można podzielić na trzy grupy [76-80]:

- 1) zjawiska fizyczne i reakcje chemiczne występujące w łuku elektrycznym na powierzchni kontaktu kropli roztopionego metalu i gazowej atmosfery łuku,
- 2) reakcje chemiczne zachodzące w jeziorce ciekłego metalu oraz pomiędzy jeziorkiem a atmosferą ochronną,
- 3) zjawiska zachodzące w strefie wpływu ciepła.

W łuku elektrycznym zachodzą następujące zjawiska [76]:

- dysocjacja cząstek oraz związków chemicznych,
- parowanie metalu,
- utlenianie metalu i zawartych w nim składników,
- przechodzenie składników z gazowej atmosfery łuku do kropli,
- wzajemne oddziaływanie kropli metalu i gazu.

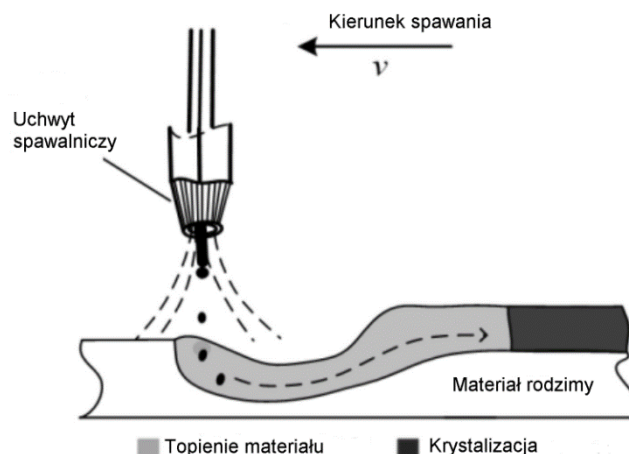
Do zjawisk zachodzących w jeziorce spawalniczym zalicza się [76]:

- pochłanianie gazu oraz jego wydzielanie
- odtlenianie i odazotowanie kąpieli,
- przechodzenie różnych pierwiastków i ich związków pomiędzy jeziorkiem a żużlem,
- tworzenie się wtrąceń niemetalicznych oraz porów i pęcherzy,
- krystalizacja spoiny.

W strefie wpływu ciepła zachodzą przemiany fazowe związane z cyklem cieplnym spawania [76].

Jeziorko spawalnicze powstaje w wyniku wymieszania nadtopionego brzegu materiału rodzimego oraz materiału dodatkowego. Metal jeziorka spawalniczego, w miarę przemieszczania się łuku w kierunku spawania, krzepnie i tworzy spoinę trwale łączącą brzegi elementu spawanego [47] (rys. 2.17).

Procesem metalurgicznym zachodzącym w jeziorce spawalniczym jest absorpcja gazu z atmosfery łuku i następująca później reakcja gazu z ciekłym metalem i gazami w nim zawartymi [76, 77]. Większość metali stosowanych w procesach spawania wykazuje wzrastającą reaktywność wraz ze wzrostem temperatury. W reakcjach gaz-metal biorą udział gazy znajdujące się w powietrzu (tlen, azot) oraz wodór pochodzący z dysocjacji wody lub węglowodorów [76].



Rys. 2.17. Proces topienia i krystalizacji materiału spoiny [81]

W czasie spawania zachodzą jednocześnie dwa procesy: doprowadzenie ciepła do jeziora spawalniczego oraz odprowadzenie ciepła w kierunku materiału rodzimego [76].

Rozkład temperatury w procesach spajania odgrywa kluczową rolę bowiem ma wpływ na wiele czynników, które decydują o jakości otrzymanego złącza spawanego [77].

W modelach analitycznych przyjmuje się, że proces przepływu ciepła w dowolnym punkcie analizowanego ciała i w określonym momencie czasu spełnia poniższe równanie różniczkowe [76, 77]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła; c_p – ciepło właściwe; ρ – gęstość; T – temperatura; t – czas; x, y, z – współrzędne analizowanego punktu

Analityczne rozwiązanie rozkładu temperatury dla przemieszczającego się punkowego źródła ciepła przedstawione przez D. Rosenthala opisano za pomocą równania (2.2) [82].

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k r} e^{\frac{-v(r-x)}{2\alpha}} \quad (2.2)$$

gdzie: T – temperatura; r – odległość od źródła ciepła; q – ciepło wprowadzone przez źródło; k – przewodność cieplna; α – dyfuzyjność cieplna.

Wyniki doświadczalnych pomiarów pola temperatury przy spawaniu potwierdziły zgodność rozwiązania dla danej wielkości spoiny. Równanie to nie daje jednak informacji o kształcie jeziora ciekłego metalu.

Z kolei Eagar i Tsai przedstawili model źródła o niejednorodnym rozkładzie dla ruchomego źródła ciepła poruszającego się po półnieskończonej płycie (2.3) [82]. Podobnie jak w modelu Rosenthala przyjęto założenie braku konwekcji i radiacji na brzegu modelu

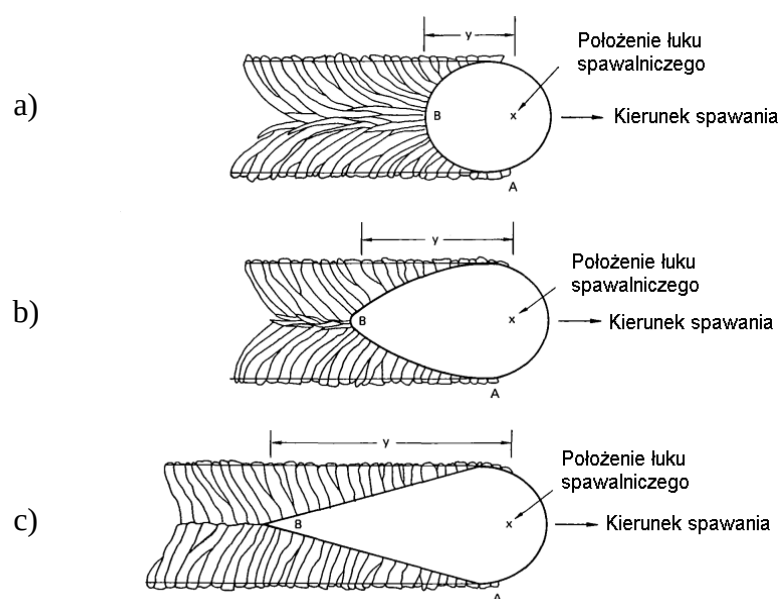
oraz stałe właściwości cieplne i quasi-stacjonarny półnieskończony ośrodek. W odróżnieniu od równania Rosenthala było zastosowanie Gaussowskiego rozkładu źródła ciepła. Równanie to stanowiło jedno z pierwszych przybliżeń umożliwiających ocenę geometrii jeziora ciekłego metalu na bazie fundamentów wymiany ciepła [82].

$$q(r) = \frac{UIk}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-(r^2)}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

gdzie: q – powierzchniowy strumień cieplny w odległości r ; U – napięcie; I – natężenie prądu; k – współczynnik sprawności, σ – promieniowa odległość od źródła.

Wymiary jeziora spawalniczego związane są ściśle z parametrami procesu spawania, głównie mocą źródła ciepła i prędkością spawania [76].

Przy niskiej prędkości spawania kształt jeziora jest eliptyczny, z kolei przy dużej wydłużony i ostro zakończony w osi spoiny (rys. 2.18) [76, 83].



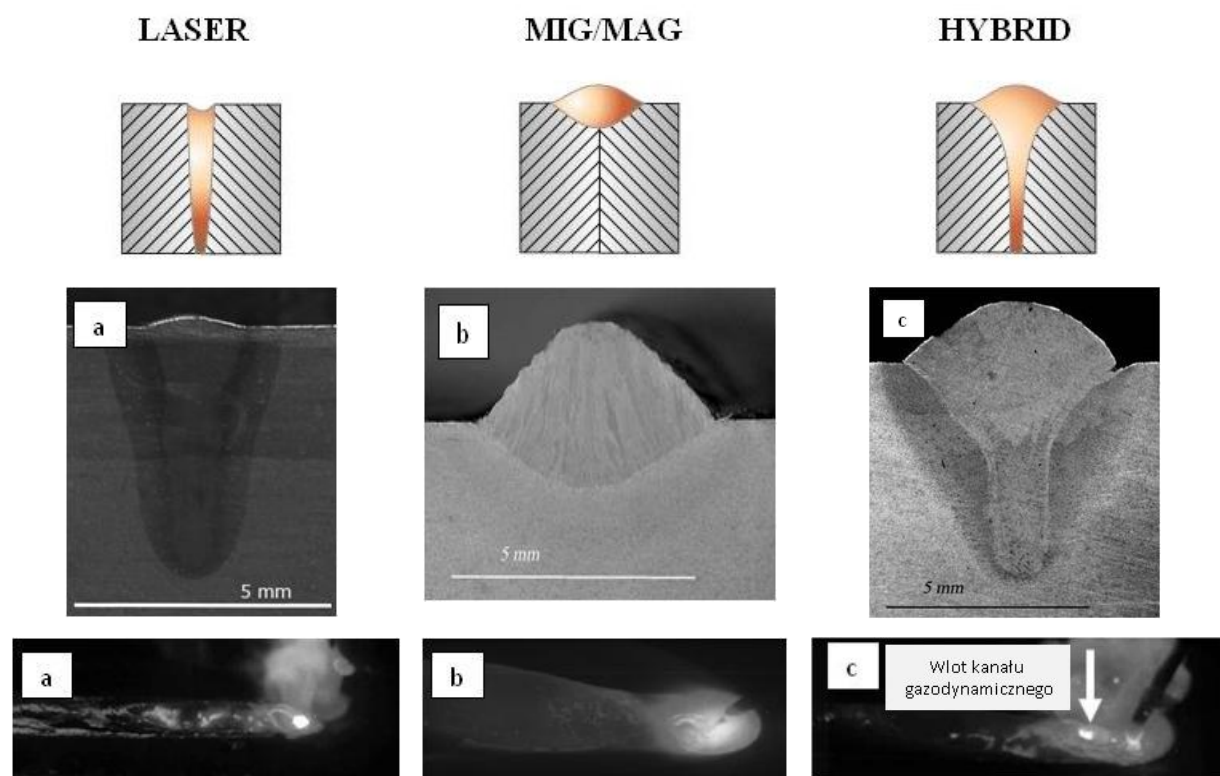
Rys. 2.18. Wpływ prędkości spawania na kształt jeziora spawalniczego a) niska prędkość spawania, b) średnia prędkość spawania, c) duża prędkość spawania [83]

Kształt jeziora uzależniony jest także od zastosowanego procesu spawania. Przekrój poprzeczny spoin wykonanych metodą hybrydową ma najczęściej charakterystyczny kształt "grzybka" (rys. 2.19 c). W spoinach pochodzących ze spawania hybrydowego można wyróżnić dwie strefy stopienia – górną strefa (pochodząca od oddziaływania łuku elektrycznego) i dolną (pochodząca od oddziaływania wiązki laserowej) [61]. Szerokość lica jest większa niż w typowej spoinie laserowej, natomiast dolna część spoiny i grań przyjmuje

kształt podobny do spoiny wykonanej wyłącznie wiązką laserową. Taki kształt spoiny powoduje zwykle mniejsze deformacje konstrukcji w porównaniu do spoin wykonywanych metodą MIG/MAG [60].

Wyniki prowadzonych badań [84, 85] wykazały, że wielkość kanału gazodynamicznego podczas spawania hybrydowego jest większa niż podczas spawania laserowym. Natomiast przy porównaniu spawania łukowego i hybrydowego stwierdzono, że głębokość wtopienia w spawaniu hybrydowym jest większa niż przy spawaniu MIG/MAG [84]. Również długość jeziora spawalniczego jest większa przy spawaniu hybrydowym, natomiast szerokość jeziora jest zbliżona, bowiem zależy od źródła łukowego.

Szerokość jeziora i głębokość wtopienia maleją wraz ze wzrostem prędkości spawania, natomiast szerokość i długość jeziora oraz głębokość wtopienia wzrastają wraz ze wzrostem prędkości podawania drutu, co przekłada się także na większą emisję pyłu spawalniczego [84].



Rys. 2.19. Przekrój poprzeczny spoin oraz kształt jeziora ciekłego metalu zarejestrowany na pomocą kamery do szybkiego filmowania wykonanych podczas spawania laserowego (a), łukowego MIG/MAG (b) i hybrydowego (HLAW) (c) [61, 84]

Przybliżony czas, w którym jeziorko pozostaje w stanie płynnym oblicza się z następującego wzoru (4) [76]:

$$t = \frac{a}{V_s} \quad (2.4)$$

gdzie: a – długość jeziorka [mm]; V_s – prędkość spawania [mm/s]

Po jego upływie następuje proces krystalizacji metalu spoiny. Do podstawowych cech tego procesu zalicza się [76]:

- obecność w jeziorku znacznego gradientu temperatur, duże przegrzanie metalu w środkowych częściach jeziorka,
- występowanie pola temperatur przesuwającego się razem ze spawalniczym źródłem ciepła,
- ograniczona liczba ośrodków krystalizacji w postaci ziaren materiału rodzimego na granicy wtopienia,
- mała objętość jeziorka oraz nietrwałość istnienia metalu w stanie stopionym (krystalizacja metalu zachodzi z dużymi średnimi szybkościami wzrostu kryształów),
- znaczny ruch metalu w jeziorku spawalniczym,
- niejednorodność składu ciekłego metalu w różnych odcinkach jeziorka spawalniczego w związku z różnym składem materiału rodzimego i stopiwa.

Proces krystalizacji zależy od bilansu cieplnego w różnych obszarach jeziorka, czyli od różnicy ilości ciepła doprowadzonego i odprowadzonego (rys. 2.20). W lewo od punktu B (B') występuje proces topienia brzegów materiału spawanego, a w prawo od punktu B (B') do punktu C proces krystalizacji (rys. 2.20a). Od punktu A do B (B') ilość ciepła doprowadzonego do jeziorka jest większa niż ilości ciepła odprowadzonego do stałego metalu, a z kolei od punktu B (B') do C ilość odprowadzonego ciepła jest większa niż doprowadzonego (rys. 2.20b). Kierunek odprowadzania ciepła oraz kierunek wzrostu dendrytów są prostopadłe do linii wtopienia, a więc przemieszczanie się jeziorka spawalniczego powoduje zmianę kierunku wzrostu dendrytów [76]. Krystalizacja spoin przebiega bardzo szybko. W pierwszej kolejności krzepną kryształy zawierające składniki wysokotopliwe, a pozostający roztwór ciekły wzbogaca się w składniki o niższej temperaturze topnienia.

Przebieg krystalizacji spoin uzależniony jest od stosunku równoważników chromu i niklu (R_{Cr}/R_{Ni}) obliczonego według wzoru (5) [76]:

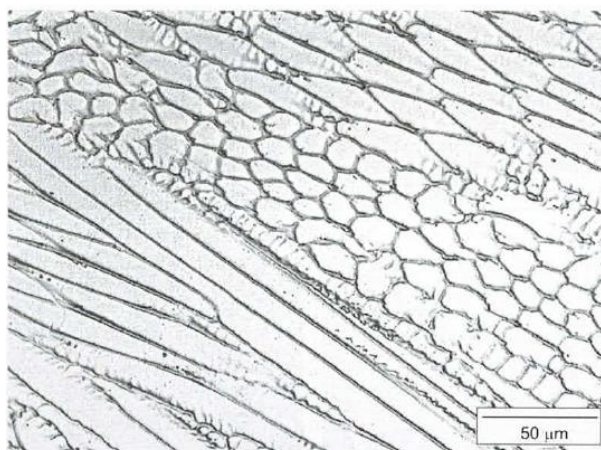
$$\frac{R_{Cr}}{R_{Ni}} = \frac{Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb}{Ni + 30 C + 0,5 Mn} \quad (2.5)$$

gdzie: R_{Cr} – równoważnik chromu; R_{Ni} – równoważnik niklu; $Cr, Mo, Si, Nb, Ni, C, Mn$ – udział masowy pierwiastków w spoinie

W sytuacji gdy $R_{Cr}/R_{Ni} \leq 1,48$ (obszary 1 i 2 z rys. 2.21) krystalizacja ma charakter austenityczny lub austenityczno-ferrytyczny, z kolei gdy $1,48 \leq R_{Cr}/R_{Ni} \leq 1,95$ (obszary 3,4,5 z rys. 2.21) krystalizacja ma charakter austenityczno-ferrytyczny lub ferrytyczno-austenityczny. Natomiast gdy $R_{Cr}/R_{Ni} \geq 1,95$ (obszar 6 z rys. 2.21) krystalizacja ma charakter ferrytyczny [76].

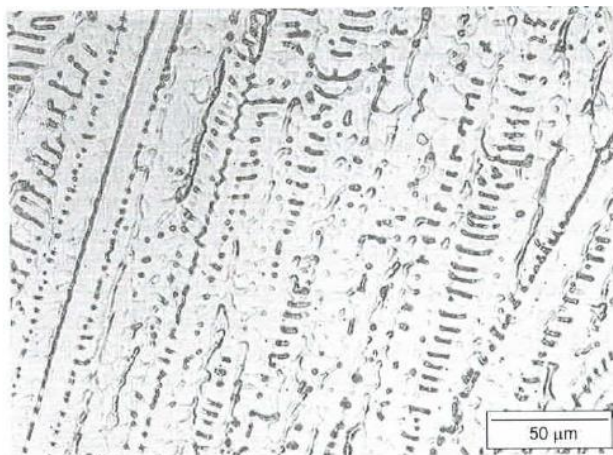
Biorąc pod uwagę gatunki stali obszary można podzielić w następujący sposób: stale z obszarów 1,2,3 zalicza się do stali austenitycznych, z obszarów 4 i 5 do stali duplex natomiast z obszaru 6 do stali ferrytycznej [76]. Stale odporne na korozję o strukturze austenitycznej mają zwykle austenityczną osnowę ze zmieniającą się zawartością ferrytu δ [76]. Podczas spawania stali austenitycznych w procesie krystalizacji spoina ma strukturę austenityczną (A) lub austenityczno-ferrytyczną (AF).

Typ A oznacza sposób, w którym spoina krystalizuje się jako w pełni austenityczna, jej struktura pozostaje niezmienną podczas chłodzenia do temperatury pokojowej (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Mikrostruktura spoiny powstała w wyniku krystalizacji typu A [19]

Krystalizacja typu AF ma miejsce gdy w wyniku przemiany eutektycznej powstaje niewielka ilość ferrytu δ w końcowym etapie krystalizacji. Struktura spoiny w temperaturze pokojowej składa się z dendrytycznych obszarów austenitu z małą ilością ferrytu rozłożonego wzdłuż subziaren austenitu (rys. 2.23).

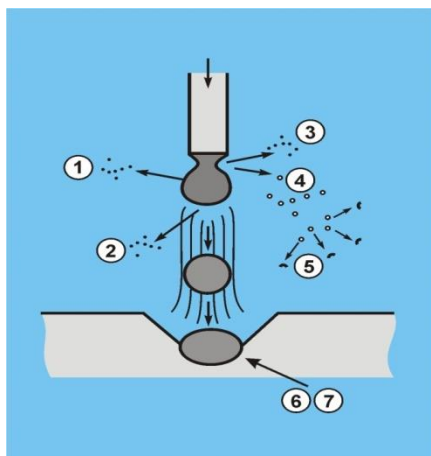


Rys. 2.23. Mikrostruktura spoiny powstała w wyniku krystalizacji typu AF [19]

Procesy metalurgiczne zachodzące w łuku oraz w jezioru spawalniczym mają również istotne znaczenie dla tworzenia się pyłu spawalniczego. Zalicza się do nich [72-74]:

- parowanie ciekłego metalu w strefie przyelektrodowej,
- parowanie ciekłego metalu z obszaru plamki elektrodowej (katodowej lub anodowej),
- wybuchowe parowanie metalu w obszarze odrywania się kropli metalu (przewężenie podczas oddzielania się kropli – szyjka),
- powstawanie bardzo drobnych, „rozpylonych” cząstek ciekłego metalu wyrzucanych przez eksplozję kropli,
- powstawanie rozprysku,
- parowanie ciekłego metalu z jeziora spawalniczego i ze ściegu spoiny.

Mechanizm powstawania pyłu spawalniczego przedstawiono na rys. 2.24.

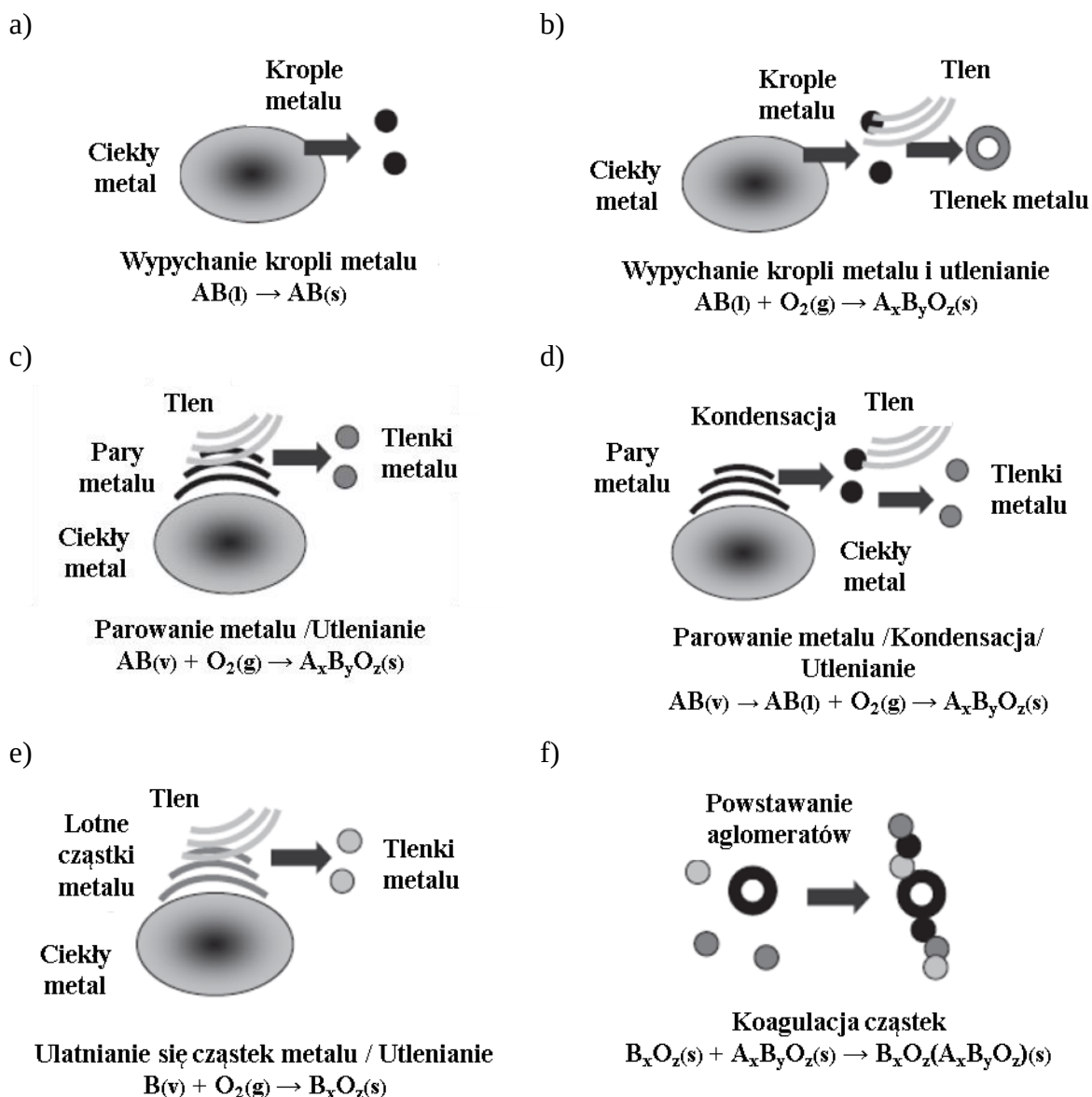


Rys. 2.24. Mechanizmy tworzenia się pyłu spawalniczego [72-74], gdzie:

1. Parowanie końca elektrody lub kropli
2. Parowanie plamki katodowej lub anodowej
3. Wybuchowe parowanie przewężenia podczas oddzielania kropli
4. Ekstremalnie małe krople metalu
5. Powstawanie rozprysku
6. 7. Parowanie jeziora spawalniczego i metalu spoiny

Z danych literaturowych wynika, że ponad 90% cząstek pyłu powstaje w wyniku parowania ciekłego metalu w obszarze łuku i jeziora spawalniczego [86]. Pył powstaje w wyniku parowania, kondensacji i utleniania par metalu [87]. Ciekły metal występuje w formie ekstremalnie małych kropli, par metalu w postaci pierwiastków i tlenków oraz w postaci lotnych związków i pierwiastków [86, 87].

Na rysunku 2.25 przedstawiono mechanizmy powstawania pyłu spawalniczego.



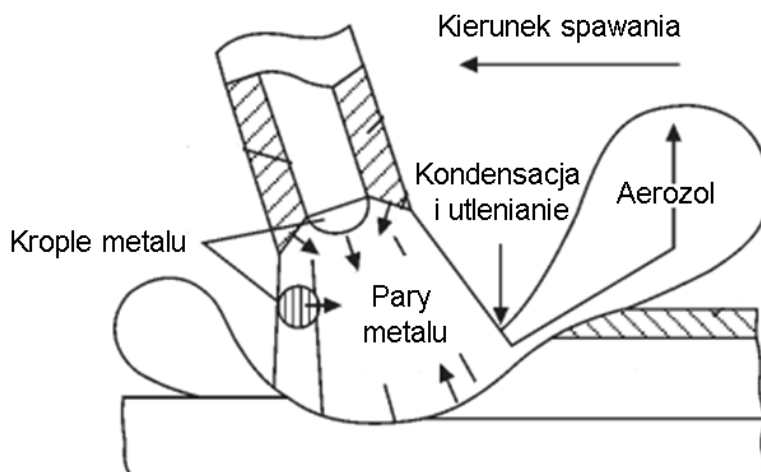
Rys. 2.25. Procesy i reakcje chemiczne opisujące tworzenie się pyłu spawalniczego [86]

Rozprysk drobnych kropli pojawia się podczas gwałtownego nagrzewania ciekłego metalu, co powoduje ich wypychanie (rys. 2.25 a). Następnie w kontakcie z tlenem zachodzi reakcja utleniania (rys. 2.25 b).

Podczas nagrzewania dochodzi również do tworzenia się par metalu, które podczas reakcji z tlenem prowadzą do powstania tlenków metali (rys. 2.25 c i d). W niektórych przypadkach dochodzi do parowania lotnych cząstek metalu, które w kontakcie z tlenem ulegają utlenianiu. Dotyczy to pierwiastków mających niską temperaturę parowania (rys. 2.25 e). Natomiast, w wyniku koagulacji dochodzi do połączenia się pojedynczych cząstek w większe aglomeraty tworzące fazę ciągłą (rys. 2.25 f).

2.4. Charakterystyka pyłu powstającego w procesach spawania stali austenitycznych

Podczas spawania i procesów pokrewnych do środowiska pracy wydzielany jest dym spawalniczy (aerozol dwufazowy kondensacyjny), który jest mieszaniną cząstek stałych - pyłu oraz gazów [88]. Cząstki stałe tworzą się na skutek kondensacji i utleniania par metalu. Mechanizm tworzenia się dymu przedstawiony został na rysunku 2.26.



Rys. 2.26. Mechanizm tworzenia się dymu spawalniczego [95]

Zgodnie z definicjami zawartymi w normie PN-ISO 4225 (Jakość powietrza – Zagadnienia ogólne – Terminologia) aerazol określa się jako zawiesinę cząstek stałych, ciekłych lub stałych i ciekłych w fazie gazowej o pomijalnej prędkości opadania. Natomiast pył definiuje się jako zbiór cząstek stałych o różnej wielkości i różnego pochodzenia, pozostających przez pewien czas w zawieszeniu w gazie [89]. Przyjmuje się, że są to cząstki o wymiarach poniżej 300 μm [90]. Wielkość cząstek stałych określa się podając ich średnicę równoważną, określoną jako [89, 90]:

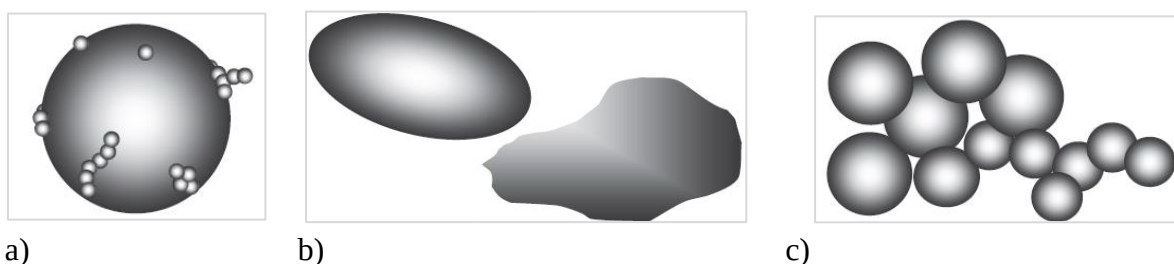
- średnicę zastępczą ziarna pyłu - jest to średnica kuli o gęstości równej gęstości badanego pyłu, której prędkość opadania w nieruchomym powietrzu jest równa prędkości opadania badanego ziarna pyłu, lub,
- średnicę aerodynamiczną cząstki pyłu - jest to średnica kuli o gęstości 1g/cm^3 i takiej samej prędkości opadania w nieruchomym powietrzu jak badana cząstka, lub,
- średnicę projekcyjną - jest to średnica koła, którego powierzchnia jest powierzchnią rzutu cząstki na płaszczyznę obserwacji.

W badaniach aerozoli najczęściej stosowaną średnicą równoważną jest średnica aerodynamiczna. Cząstki aerozolu atmosferycznego, z definicji, mają średnicę aerodynamiczną pomiędzy 10^{-3} a 10^2 μm [91]. Przedział ten określa całość fazy rozproszonej aerozolu atmosferycznego (TSP z ang. Total Suspended Particulate).

Podział pyłów ze względu na rozmiar cząstek określa się następująco [92, 94]:

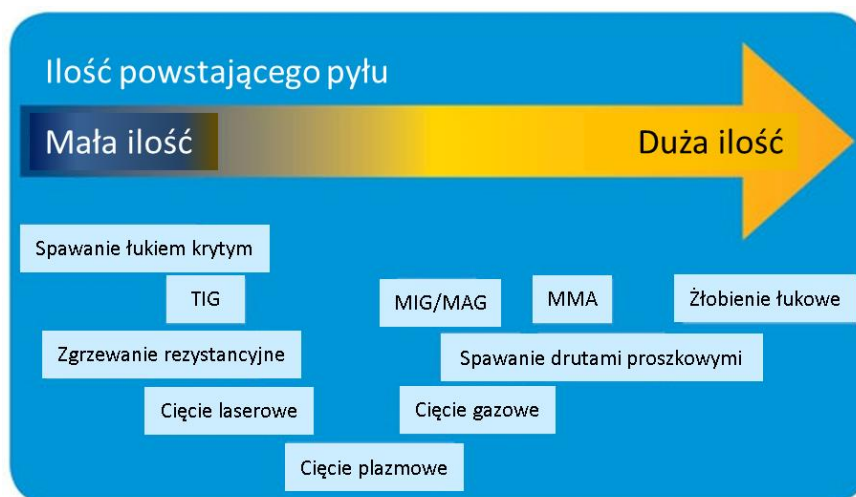
- pył PM 10 (PM z ang. *Particulate Matter*) – frakcja pyłu zawieszonego o średnicy aerodynamicznej cząstek poniżej 10 μm ;
- pył PM 2,5-10 – frakcja pyłu zawieszonego o średnicy aerodynamicznej cząstek pomiędzy 2,5 μm i 10 μm ;
- pył drobny PM 2,5 – frakcja pyłu zawieszonego o średnicy aerodynamicznej cząstek poniżej 2,5 μm ;
- pył ultradrobny PM 0,1 – frakcja pyłu zawieszonego o średnicach zastępczych cząstek poniżej 0,1 μm .

Cząstki stałe powstające w procesie spawania przyjmują najczęściej kształt zbliżony do kulistego i należą do frakcji ultradrobnej i drobnej. Występują w pojedynczych postaci cząstek oraz łańcuchów i aglomeratów (rys. 2.27) [92]. Rozmiar cząstek pyłu spawalniczego zawiera się w granicach od 0,005 do 20 μm [93].



Rys. 2.27. Kształt cząstek pyłu spawalniczego: a) pojedyncze cząstki o kształcie kulistym, b) pojedyncze cząstki o nieregularnym kształcie, c) łańcuchy/ aglomeraty cząstek o kształcie kulistym [92, 95]

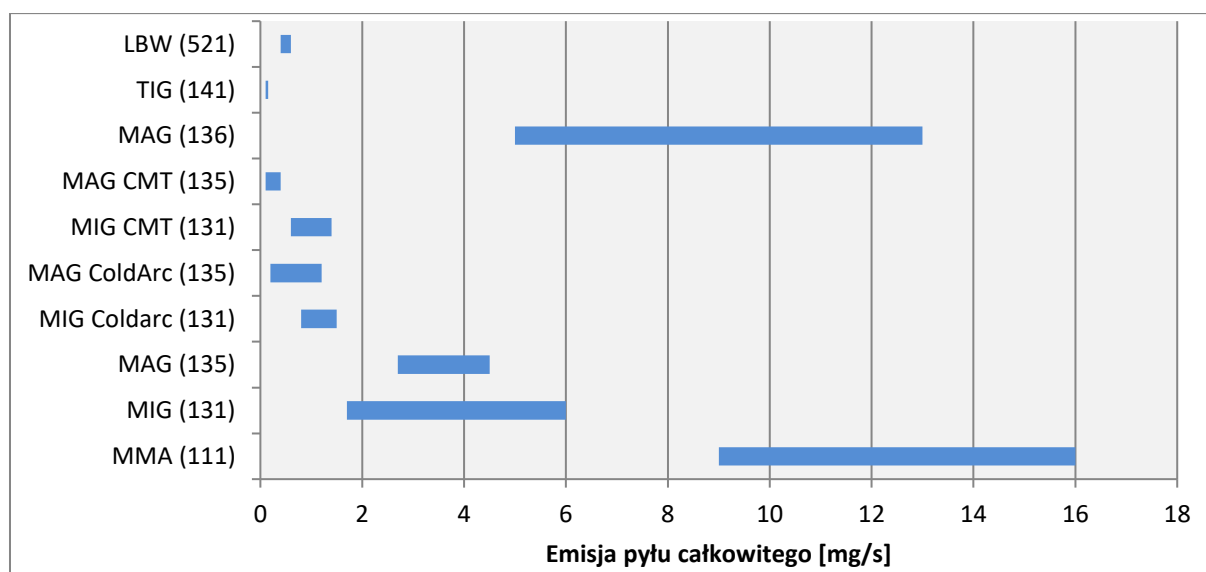
Ilość powstającego pyłu jest zależna od metody spawania, materiału podstawowego, dodatkowego oraz składu chemicznego gazu osłonowego, jak również od parametrów technologicznych procesu. Na rysunku 2.28 przedstawiono podział procesów spawania i cięcia w odniesieniu do ilości powstającego pyłu.



Rys. 2.28. Porównanie procesów spawania i cięcia w odniesieniu do ilości powstającego pyłu [96]

Wyniki badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych wykazały, że procesy spawania łukiem krytym i spawanie metodą TIG charakteryzują się niewielką emisją powstającego pyłu, z kolei spawanie elektrodami otulonymi i drutami proszkowymi wiąże się ze znaczącą emisją powstających zanieczyszczeń [96].

Na rysunku 2.29 przedstawiono wyniki badań emisji pyłu całkowitego wydzielającego się podczas spawania różnymi metodami stali nierdzewnej o strukturze austenitycznej w gatunku 1.4301. Przedstawione wyniki pochodzą z badań prowadzonych w Centrum Spawalnictwa Ł-GIT oraz z danych literaturowych [97-100]. Podane zakresy wielkości emisji pyłu odnoszą się do całego analizowanego przedziału parametrów.



Rys. 2.29. Porównanie wielkości emisji pyłu całkowitego podczas spawania stali nierdzewnej 1.4301 metodą MMA, MIG, MAG, TIG i LBW [97-100]

Uzyskane wyniki potwierdziły, że najmniejsza emisja pyłu wystąpiła podczas spawania metodą TIG (0,1-0,15 mg/s), natomiast największą emisją charakteryzowały się procesy ręcznego spawania elektrodą otuloną – MMA (9-16 mg/s) oraz spawanie MAG drutem proszkowym (5-13 mg/s). Użycie drutu litego w miejsce proszkowego podczas spawania metodą MAG skutkowało 3-krotnym zmniejszeniem wielkości emisji pyłu. Zastosowanie niskoenergetycznych wariantów spawania MIG/MAG tj. metody ColdArc i CMT (Cold Metal Transfer) pozwoliło na blisko 5-krotną redukcję emisji w porównaniu do standardowego procesu MIG/MAG. Dostępne dane literaturowe dotyczące spawania laserowego pokazują, że ta technologia charakteryzuje się stosunkowo niską emisją pyłu. Jest ona 8-krotnie mniejsza w porównaniu do spawania łukowego metodą MIG/MAG. Analiza literaturowa wykazała, że brak jest szczegółowych danych dotyczących wskaźników emisji zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania laserowego i hybrydowego dla szerokiego zakresu parametrów i stosowanych materiałów.

2.4.1. Skład chemiczny i morfologia pyłu

Skład chemiczny powstającego pyłu zależy głównie od składu chemicznego spawanego materiału oraz zastosowanych materiałów dodatkowych. Podczas spawania stali niestopowej głównymi składnikami pyłu są żelazo, mangan oraz krzem, jednak w przypadku spawania elektrodami otulonymi lub drutami proszkowymi w pyłe oznaczono również sód, wapń, potas, fluor, tytan, glin, miedź i molibden [12, 88]. W przypadku spawania stali odpornych na korozję dodatkowo oprócz wymienionych pierwiastków w pyłe obecny jest chrom i nikiel. Pierwiastki te decydują o odporności korozyjnej stali jednak z uwagi na ich działanie kancerogenne stwarzają istotne zagrożenie dla zdrowia pracowników. W tablicy 2.2. przedstawiono skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania stali austenitycznej w gat. 1.4301.

Tablica 2.2. Skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania stali nierdzewnej austenitycznej w gatunku 1.4301 [97, 98, 101, 102]

Skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania stali nierdzewnej austenitycznej 1.4301 [%]									
Pierwiastek	MMA (111)	MAG (136)	MIG (131)	MAG (135)	MIG CMT (131)	MAG CMT (135)	MIG ColdArc (131)	MAG ColdArc (135)	TIG (141)
Fe	9-23	13,5-15	37	37-39	55-57,1	56-57	45,4- 49,3	46,2- 48,5	35-39
Mn	3-12	5,2-10,2	12,1	10,9- 12,2	3-3,7	3-3,7	6,1-7	6,1-8	10-12
Si	0,2-4,2	3,4-5,1	5	4,6-5	0,9-1,1	1,1- 1,5	2,1-2,5	2-2,9	5
Ca	1,7-12,5	-	-	-	-	-	-	-	-
F	0-23	0-13	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0-1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	0-0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	0-0,1	-	-	-	-	-	-	-
Mo	0-0,5	0-0,9	-	-	-	-	-	-	-
Cr	3,3-11,5	6,5-9,5	12,2- 13,5	11,2- 13,7	14,7-15,5	14,4- 15,1	11,9- 12,3	11,7- 12,1	11,1- 13,8
Cr(VI)	3,97	-*	0,3	-*	0,007- 0,02	0,01- 0,08	0,04- 0,06	0,03- 0,05	0,2
Ni	0-3,5	0,9-2,1	5-5,9	4,8-5,2	7,6-8	7,1-8	5,6-6,4	5,7-6,6	4,3-5

*- nie oznaczono zawartości Cr(VI)

Zagrożenia w środowisku pracy związane z emisją substancji niebezpiecznych, toksycznych, kancerogennych i reprotoksycznych zależą nie tylko od ich zawartości procentowej w pyłe, ale również od ilości powstającego pyłu całkowitego. O toksyczności pyłu decyduje wartościowość danego pierwiastka [103].

Żelazo, które jest głównym składnikiem pyłu pochodzącego ze spawania stali, występuje jako związek spinelowy o wzorze sumarycznym Fe_3O_4 lub jako związek spinelowy bazujący na połączeniu żelaza z innymi pierwiastkami o wzorze ogólnym $Fe_{3-x}(Cr, Ni, Mn, Ti)_xO_4$ [104].

Nikiel występuje głównie w postaci związków spinelowych - Fe_2NiO_4 , $(Ni, Cr, Fe)_3O_4$ lub Cr_2NiO_4 oraz w niewielkich ilościach w postaci tlenku - NiO [104].

Chrom występuje w pyłe spawalniczym na dwóch stopniach utleniania Cr^{3+} i Cr^{6+} , co decyduje o ich toksycznym działaniu. Cr^{3+} występuje w postaci tlenku spinelowego jako $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3\text{O}_4$ lub FeCr_2O_4 . Cr^{6+} jest stabilizowany przez niektóre pierwiastki alkaliczne jak sód czy potas i występuje w postaci chromianów. Tworzą się więc one głównie podczas spawania elektrodą otuloną lub podczas spawania drutami proszkowymi, a ich zawartość wynosi od 1 do 5%. Podczas spawania stali odpornych na korozję drutem litym również chrom sześciowartościowy jest obecny, jednak w mniejszej ilości - ok. 1%. Występuje on wtedy w postaci chromianów niklu (NiCrO_4) lub manganu (MnCrO_4) [104].

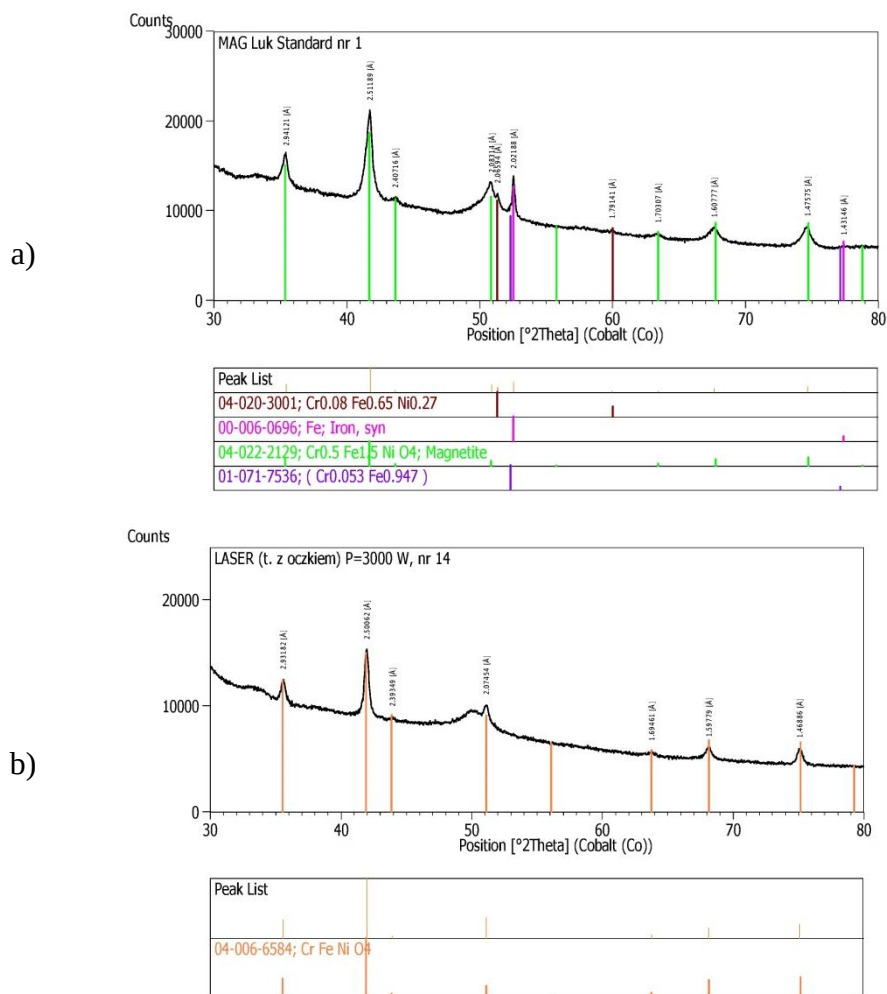
Mangan jest łatwo rozpuszczalny w tlenku żelaza(II), żelaza(III) i dlatego występuje głównie w postaci $\text{Fe}_{3-x}\text{Mn}_x\text{O}_4$, natomiast rzadziej w formie tlenkowej - MnO , Mn_2O_3 , MnO_2 lub Mn_3O_4 . Krzem występuje w pyłe w postaci tlenkowej (SiO_2 – krzemionka) lub krzemianów pierwiastków alkalicznych [104].

W tablicy 2.3 przedstawiono główne składniki pyłu powstającego podczas spawania stali odpornych na korozję.

Tablica 2.3. Skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania stali odpornych na korozję [104]

Metoda spawania	Główne składniki pyłu	Inne związki mogące wystąpić w pyłe
MMA (111)	FeCr_2O_4 , Fe_2NiO_4 , $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3\text{O}_4$, Na_2CrO_4 , K_2CrO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{K}_3\text{Na}(\text{CrO}_4)_2$, $\text{K}_3\text{Na}(\text{Cr}_2\text{O}_7)_2$	NaF , CaF_2 , KCaF_3 , krzemionka/ krzemiany
MAG (135)	FeCr_2O_4 , Fe_2NiO_4 , $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3\text{O}_4$	-
MAG (136)	FeCr_2O_4 , Fe_2NiO_4 , $\text{Fe}_{3-x}\text{Mn}_x\text{O}_4$, $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3\text{O}_4$	NaF , CaF_2 , KCaF_3 , Na_2CrO_4 , K_2CrO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{K}_3\text{Na}(\text{CrO}_4)_2$, $\text{K}_3\text{Na}(\text{Cr}_2\text{O}_7)_2$, krzemionka/ krzemiany
MAG (138)	FeCr_2O_4 , Fe_2NiO_4 , $\text{Fe}_{3-x}\text{Mn}_x\text{O}_4$, $(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_3\text{O}_4$	Związki $\text{Cr}(\text{VI})$

W celu określenia jakościowego i ilościowego składu fazowego pyłu wykonuje się analizę XRD (z ang. *X-Ray Diffraction*)– dyfrakcja rentgenowska. Jest to metoda oparta na rozpraszaniu promieniowania rentgenowskiego na badanym materiale, gdzie elektrony emitują spójne promieniowanie o takiej samej energii, co promieniowanie padające [105]. Dyfraktogramy pyłu pochodzącego ze spawania łukowego i laserowego elementu kolektora z obudową turbiny wykonanego ze stali żaroodpornej 1.4848 przedstawiono na rysunku 2.30 [106, 107].



Rys. 2.30. Dyfraktogram rentgenowski próbki pyłu pochodzącego ze spawania stali 1.4848
a) MAG (I=90 A, U=18 V, V_{dr}=4,4 m/min, V_{sp}=400 mm/min), b) laserowego
(technika z oczkiem P=3000 W, V_{sp} =1,5 m/min) [107]

W pyłe wydzielającym się podczas spawania łukowego stali w gat. 1.4848 drutem litym w gat. 24 13 LSi metodą MAG oraz jej niskoenergetycznymi wariantami - ColdArc, CMT i ColdArc Puls w osłonie 97,5% Ar + 2,5% CO₂ stwierdzono obecność następujących związków: tlenek żelaza(III) niklu(II) (Cr_{0,5}Fe_{1,5}NiO₄ gdzie w miejsce Fe podstawia się chrom Cr(III)), faza międzymetaliczna (Cr_{0,08}Fe_{0,65}Ni_{0,27}), tlenek żelaza(II) żelaza(III) (Fe₃O₄ – FeO/Fe₂O₃), żelazo z odrobiną chromu (Cr_{0,054}Fe_{0,946}), żelazo (α -Fe) (tablica 2.4) [108].

Tablica 2.4. Identyfikacja fazowa i ilościowa analiza fazowa pyłu powstającego podczas spawania łukowego stali 1.4848 [108]

Metoda spawania	Materiał podstawowy/ Materiał dodatkowy/ Gaz osłonowy	Parametry technologiczne procesu		Składniki fazowe [% mas.]				
		I [A]	U [V]	Cr _{0.5} Fe _{1.5} NiO ₄	Cr _{0.08} Fe _{0.65} Ni _{0.27}	Cr _{0.054} Fe _{0.946}	α -Fe	Fe ₃ O ₄
MAG	Odlew staliwo gat. 1.4848/ 24 13 LSi/ 1,0 mm/ 97,5% Ar + 2,5% CO ₂	90	18,0	87,7 ± 0,4	1,0 ± 0,3	5,4 ± 0,4	5,9 ± 0,2	
		110	19,0	78,7 ± 0,4	1,2 ± 0,2	4,6 ± 0,4	6,0 ± 0,2	9,5 ± 0,1
		120	20,0	76,0 ± 1,1	3,6 ± 0,2		8,8 ± 0,4	11,6 ± 2,6
ColdArc		90	17,0	18,6 ± 0,7			1,2 ± 0,2	80,2 ± 0,7
		120	20,5	54,4 ± 2,9			8,4 ± 0,8	37,2 ± 3,1
		137	22,0	71,0 ± 2,7	1,0 ± 0,4		5,2 ± 0,4	22,8 ± 2,8
CMT		80	11,6	47,8 ± 4,7			16,4 ± 1,9	35,8 ± 5,2
		125	13,5	56,2 ± 1,2	1,3 ± 0,3		7,7 ± 0,5	34,8 ± 1,2
		143	14,0	77,6 ± 3,4	2,4 ± 0,2		6,9 ± 0,5	13,1 ± 3,7
ColdArc Puls		90	20,5	58,5 ± 1,3	1,2 ± 0,2		4,6 ± 0,2	35,7 ± 1,4
		120	24,0	86,0 ± 0,9	2,5 ± 0,2		6,3 ± 0,2	5,2 ± 0,9
		140	24,5	91,6 ± 0,4	2,2 ± 0,3		6,2 ± 0,3	

W pyłe wydzielającym się podczas spawania laserowego elementów kolektora z obudową turbiny ze stali w gat. 1.4848 oznaczono tlenek żelaza(III) niklu(II) (Fe₂NiO₄ - Fe₂O₃/NiO), spinel - tlenek żelaza, chromu i niklu (CrFeNiO₄) oraz tlenek żelaza(II) chromu(III) (Cr_{1,33}Fe_{1,33}O₄) (tablica 2.5) [108].

Tablica 2.5. Identyfikacja fazowa i ilościowa analiza fazowa pyłu powstającego podczas spawania laserowego stali 1.4848 [108]

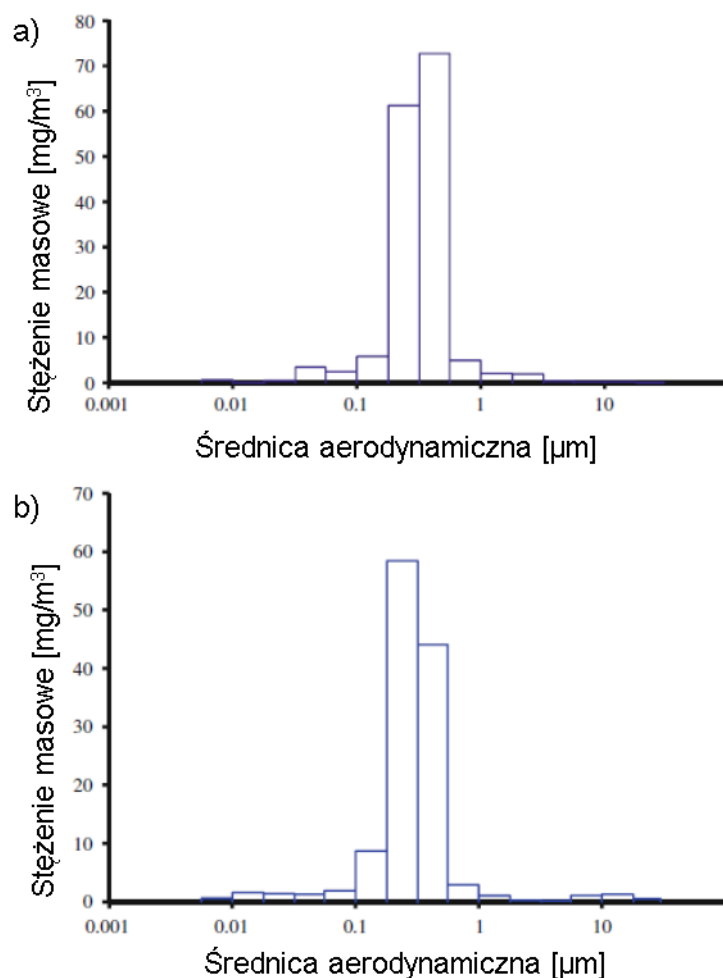
Technika spawania	Materiał podstawowy	Moc wiązki laserowej [W]	Składniki fazowe [% mas.]		
			CrFeNiO ₄	Cr _{1.33} Fe _{1.33} O ₄	Fe ₂ NiO ₄
Z jeziorkiem	Odlew staliwo gat. 1.4848	2500		79,5 ± 3,6	20,5 ± 3,6
		3000		76,9 ± 3,7	23,1 ± 3,7
		3500		100,0	
Z oczkiem		2500	100,0		
		3000	100,0		
		3500		100,0	

Kolejnym kryterium wpływającym na toksyczność powstającego podczas spawania pyłu jest jego budowa i rozmiar, bowiem wielkość cząstek decyduje o głębokości ich wnikania do organizmu człowieka [92].

Analiza morfologii pyłu wykazała, że średnica aerodynamiczna większości pojedynczych cząstek pyłu zawiera się w zakresie od 10 nm do 10 µm, które łączą się w dłuższe łańcuchy, w wyniku zwiększonej ruchliwości spowodowanej wysoką temperaturą [104, 109]. Średnia wielkość średnicy aerodynamicznej cząstki pyłu spawalniczego wynosi od 0,01 do 1 µm [110].

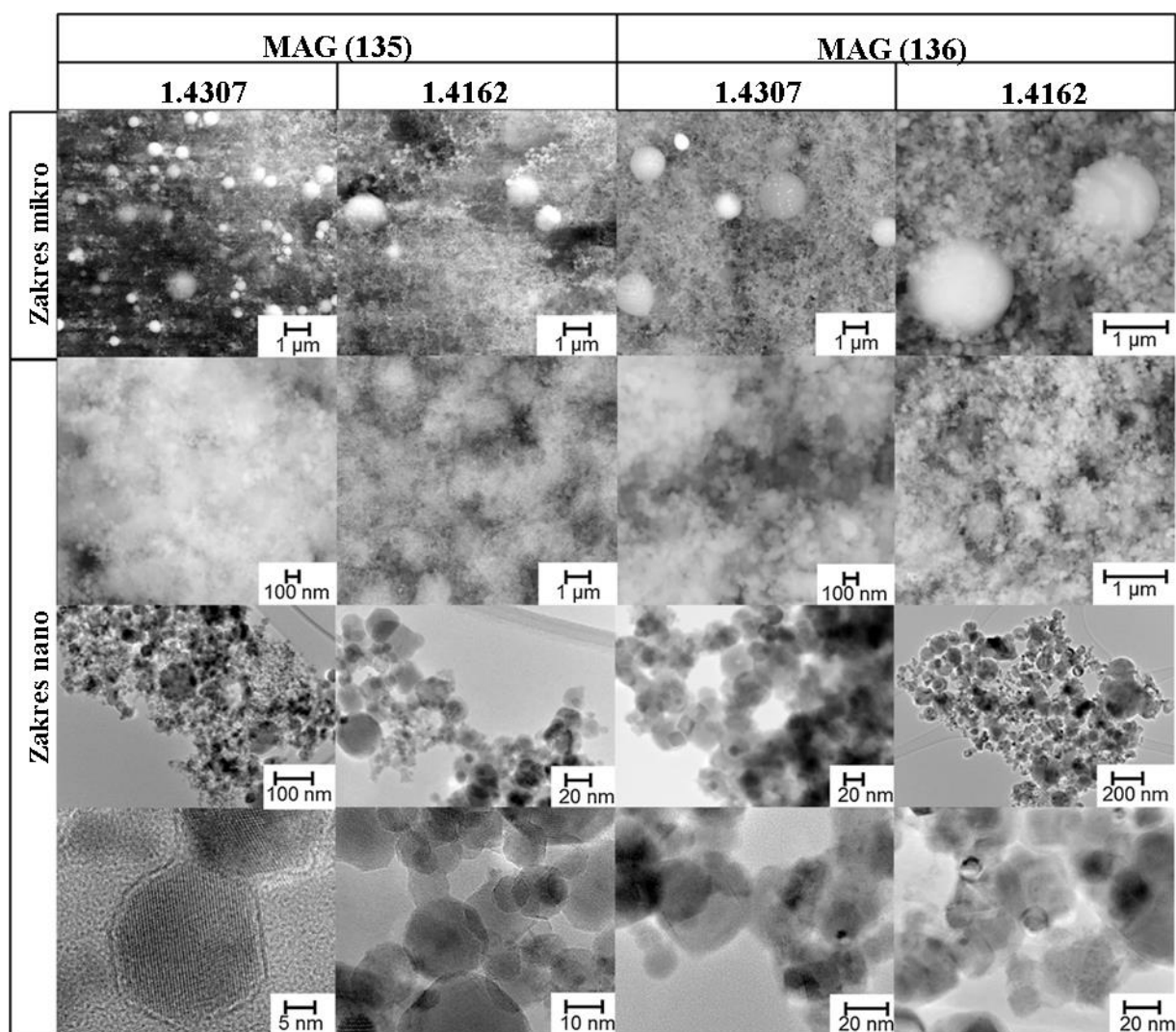
Wyniki badań prowadzonych przez naukowców z Uniwersytetu z Aachen wykazały, że podczas spawania stali austenitycznej 1.4301 metodą MMA 24% cząstek pyłu miało rozmiar poniżej 100 nm, a 10% poniżej 50 nm. Z kolei podczas spawania tej stali metodą MAG stwierdzono, że 54% cząstek pyłu miało rozmiar poniżej 100 nm, a 16% poniżej 50 nm [111].

Zespół badaczy pod kierunkiem J. M. Antoniniego scharakteryzował pył powstający podczas spawania MAG stali A36 drutem litym ze stali niestopowej w gatunku ER70S-6 oraz ze stali nierdzewnej w gat. 308LSi [112]. Większość powstałych cząstek pyłu składała się z drobnych ziaren o średnicach zastępczych w zakresie 0,1-1,0 µm. Wielkość średnicy aerodynamicznej odpowiadającej medianie rozkładu masowego według obliczeń wyniosła 0,3 µm dla pyłu pochodzącego ze spawania stali drutem ze stali niestopowej i 0,25 µm dla pyłu ze spawania drutem ze stali nierdzewnej. Rozkład wielkości cząstek pyłu opisany jako stężenie masowe vs wielkość średnicy aerodynamicznej przedstawiono na rysunku 2.31.



Rys. 2.31. Rozkład wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania stali A36 metodą MAG drutem litym a) ze stali niestopowej, b) ze stali nierdzewnej [112]

Specjaliści z Królewskiego Instytutu Technologicznego w Sztokholmie wykonali analizę wielkości pyłu powstającego podczas spawania metodą MAG drutem litym i proszkowym stali nierdzewnej austenitycznej 1.4307 i stali duplex 1.4162 z podziałem na frakcje w skali *nano* (10-170 nm) i *mikro* (0,6-2,5 μm) oraz oznaczenie składu chemicznego pyłu [113]. Uzyskane rezultaty wykazały, że pomimo podziału na frakcje bezpośrednio w badanym powietrzu, każda z nich przeważanie składała się z cząstek w skali *nano*, które następnie tworzyły większe aglomeraty. Analiza wyników wykazała, że większość cząstek miała kształt zbliżony do kulistego, chociaż zauważono, również cząstki o nieregularnym kształcie (rys. 2.32). Najmniejsza zebrana cząstka pyłu miała wymiar 6 nm. Analiza składu chemicznego potwierdziła obecność w pyłe żelaza, manganu, krzemu, chromu i niklu, które wystąpiły w formie tlenkowej.



Rys. 2.32. Zdjęcia cząstek pyłu pochodzącego ze spawaniu stali 1.4307 i 1.4162 metodą MAG drutem litym (135) i proszkowym (136) wykonane za pomocą analiz SEM i TEM. Zakres *nano* obejmował przedział 10-170 nm, natomiast *mikro* 0,64-1 μm dla procesu 135 i 1,6-2,5 μm dla procesu 136 [113]

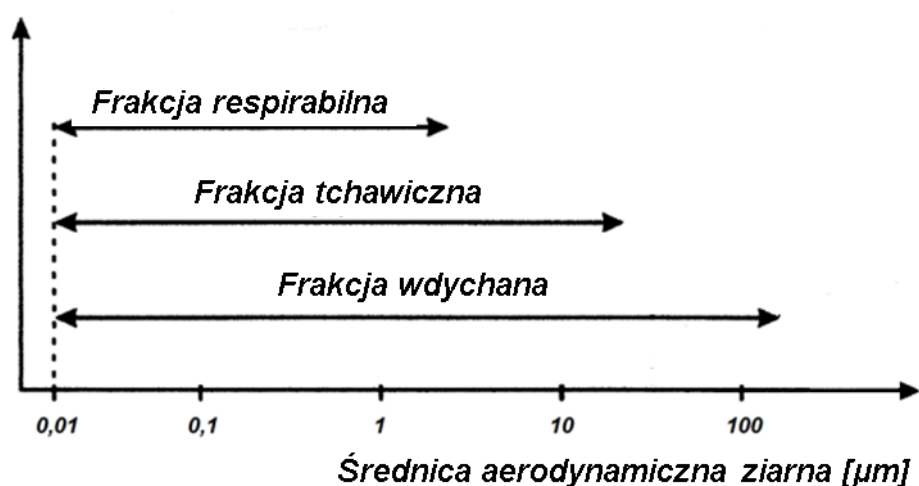
2.4.2. Wpływ pyłu na środowisko i organizm człowieka

Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (*IARC – International Agency for Research on Cancer*) jest instytucją zajmującą się klasyfikowaniem zagrożeń pod kątem ich rakotwórczości u ludzi do jednej z trzech grup. Grupa 1 obejmuje czynniki o udowodnionym działaniu rakotwórczym u ludzi, grupa 2A czynniki o prawdopodobnym działaniu rakotwórczym, grupa 2B o możliwym działaniu rakotwórczym, natomiast do grupy 3 zalicza się czynniki, które nie są rakotwórcze dla ludzi. Obecnie do grupy 1 zalicza się 121 czynników, do grupy 2A - 93 czynniki, do grupy 2B – 320, natomiast do grupy 3 – 501 [8].

W 1989 r. pył spawalniczy z uwagi na brak wystarczających dowodów został zaklasyfikowany do grupy 2B jako substancja o możliwym działaniu rakotwórczym. Jednak rozwój technik analitycznych i wyniki badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie potwierdziły działanie kancerogenne pyłu, dlatego też zmieniła się jego klasyfikacja i od 2018 r. zaliczany jest on do grupy 1 – do czynników mających udowodnione działanie rakotwórcze u ludzi [8, 114]. Dlatego też istotne jest prowadzenie badań mających na celu ocenę środowiskową procesów spawania jak również analizę czynników wpływających na ilość powstających zanieczyszczeń pyłowych, ich skład chemiczny oraz budowę.

Oddziaływanie pyłu na organizm człowieka uzależnione jest od jego stężenia, składu chemicznego oraz rozmiarów cząstek. Zgodnie z normą PN-ISO 7708 (Jakość powietrza - Definicje frakcji pyłu stosowane przy pobieraniu próbek do oceny zagrożenia zdrowia), w celu oceny narażenia na pyły na stanowiskach są analizowane frakcje pyłów o określonych średnicach aerodynamicznych cząstek zawieszonych w powietrzu (rys. 2.33) [92]:

- *frakcja wdychana* – udział masowy wszystkich cząstek zawieszonych, wdychanych przez nos i usta,
- *frakcja tchawiczna* – udział masowy cząstek frakcji wdychanych wnikaających poza krtani,
- *frakcja respirabilna (pęcherzykowa)* – udział masowy cząstek frakcji wdychanych docierających (wnikaających) aż do bezrzęskowych dróg oddechowych.



Rys. 2.33. Podział pyłu na frakcje: wdychaną, tchawiczną i respirabilną [115]

Generalnie frakcja wdychana to cząstki o wymiarach poniżej 100µm. W górnym odcinku dróg oddechowych (nos, jama ustna, gardło, krtań) zatrzymywane są cząstki o wymiarach powyżej 30µm a następnie wydalone ze śluzem. Do środkowego odcinka dróg oddechowych (tchawica, oskrzela, oskrzeliki) przedostaje się frakcja tchawiczna, której wymiar nie przekracza 20µm. Do obszaru wymiany gazowej (pęcherzyki płucne) dostają się cząstki o wymiarze poniżej 7µm. To one stanowią pył respirabilny (średnia średnica aerodynamiczna dla frakcji respirabilnej wynosi 3,5 µm), który zalega dość długo powodując zmiany chorobowe [116, 118]. Wyniki badań pokazują, że cząstki pyłu o średnicy aerodynamicznej poniżej 0,5 µm wnikają do pęcherzyków płucnych a ich usunięcie przez system śluzowo-rzęskowy jest niemożliwe [109]. Na zmiany chorobowe wpływ ma skład chemiczny pyłu (tablica 2.6).

Tablica 2.6. Wpływ składników pyłu na zdrowie człowieka [119-121]

Związki:	Wpływ na zdrowie człowieka
Żelaza	Drażniący na układ oddechowy Przyczyna powstawania pylicy
Manganu	Układ nerwowy, oddechowy
Krzemu	Drażniący na układ oddechowy Przyczyna powstawania pylicy
Chromu	Cr ³⁺ Drażniący na układ oddechowy Cr ⁶⁺ Udowodnione działanie rakotwórcze i mutagenne
Niklu	Udowodnione działanie rakotwórcze

Długotrwałe narażenie na wysokie stężenie pyłu spawalniczego powstającego podczas spawania stali odpornych na korozję może prowadzić do rozwoju chorób pochodzenia zawodowego, do których zalicza się: pylicę płuc, astmę, nowotwory układu oddechowego, przewlekłą obturacyjną chorobę płuc (POCHP), krzemicę płuc, przewlekłe zapalenia oskrzeli, przewlekłe nieżyty błon śluzowych nosa, krtani i tchawicy [119-121]. Stąd też wynika inne kryterium podziału pyłów, w którym klasyfikacja opiera się na ich oddziaływaniu na organizm ludzki. Pyły w zależności od działania na organizm ludzki można podzielić na [92, 115]:

- pylicotwórcze (kalogenowe i niekalogenowe),
- drażniące,

- alergiczne,
- toksyczne,
- rakotwórcze.

Ocena narażenia zawodowego związanego z występowaniem zanieczyszczeń pyłowych w środowisku pracy obejmuje pomiary stężeń występujących w pyłach substancji, następnie obliczenie wskaźnika narażenia i ustalenie jego relacji do wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia [122]. Zgodnie z definicją zawartą w rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej Dz.U. 2018 poz. 1286 - Najwyższe Dopuszczalne Stężenie (NDS) jest to wartość średnia ważona stężenia, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, przez okres jego aktywności zawodowej nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń [123]. Wykaz wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS) dla substancji odnoszących się do emisji pyłu pochodzącego ze spawania stali odpornych na korozję przedstawiono w tablicy 2.7.

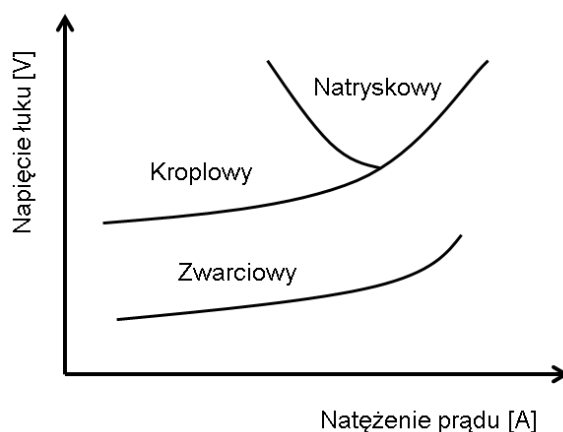
Tablica 2.7. Wartości NDS dla substancji odnoszących się do emisji pyłu pochodzącego ze spawania stali odpornych na korozję [123]

Lp.	Nazwa i numer CAS substancji chemicznej	NDS – Najwyższe Dopuszczalne Stężenie (w mg/m ³)
1.	Pyły niesklasyfikowane ze względu na toksyczność – frakcja wdychalna	10
2.	Krzemionka krystaliczna – frakcja respirabilna	0,1
3.	Chrom metaliczny [7440-47-3] Związki chromu (II) – w przeliczeniu na Cr (II) Związki chromu (III) – w przeliczeniu na Cr (III)	0,5
4.	Związki chromu (VI) – w przeliczeniu na Cr (VI)	0,005
5.	Mangan [7439-96-5] i jego związki nieorganiczne – w przeliczeniu na Mn – frakcja wdychalna – frakcja respirabilna	0,2 0,05
6.	Związki niklu – w przeliczeniu na Ni – frakcja wdychalna – frakcja respirabilna	0,05 0,01
7.	Tlenki żelaza – w przeliczeniu na Fe Tlenek żelaza(III) [1309-37-1] Tlenek żelaza(II) [1345-25-1] Tetratlenek triżelaza [1309-38-2; 1317-61-9] – frakcja wdychalna – frakcja respirabilna	5 2,5

2.4.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania na emisję pyłu, jego skład chemiczny i morfologię

Ilość, skład chemiczny i budowa powstającego podczas procesu spawania pyłu uzależniona jest, oprócz metody spawania i składu chemicznego stosowanych materiałów, również od parametrów technologicznych procesu [124]. Ich modyfikacja przyczynia się do redukcji ilości powstających zanieczyszczeń, zmniejszając tym samym ryzyko związane z narażaniem na szkodliwe składniki pyłu.

W przypadku procesów spawania metodą MIG/MAG sposób przenoszenia stopionego metalu elektrody do jeziora spawalniczego zależy m.in. od natężenia i napięcia łuku. Można wyróżnić trzy modele przenoszenia ciekłego metalu: zwarciovym, kropłowym i natryskowym (rys. 2.34) [125, 126]. Podczas spawania łukiem zwarciovym kontakt materiału dodatkowego (drutu elektrodowego) i elementu spawanego powoduje powstawanie zwarcia. W efekcie końcówka drutu podgrzewa się, a krople ciekłego metalu przenoszone są do jeziora spawalniczego. Spawanie łukiem kropłowym jest uznawane za metodę pośrednią pomiędzy łukiem zwarciovym a natryskowym. Z kolei spawanie łukiem natryskowym odbywa się przy dużej ilości wprowadzanego ciepła. Materiał dodatkowy przenosi się do jeziora spawalniczego w postaci natryskowej bez zwarcia, ponieważ wysokie napięcie łuku stapia kroplę, zanim wystąpi zwarcie [125].



Rys. 2.34. Sposób przenoszenia kropli [126]

Zespół naukowców pod kierunkiem I. Pires prowadził badania nad określeniem wpływu sposobu przenoszenia stopionego metalu elektrody na ilość powstającego pyłu [127]. Uzyskane wyniki wykazały, że wzrost natężenia prądu przyczynił się do zwiększenia ilości powstającego pyłu (tablica 2.8).

Tablica 2.8. Wpływ sposobu przenoszenia kropli metalu na ilość powstających zanieczyszczeń [127]

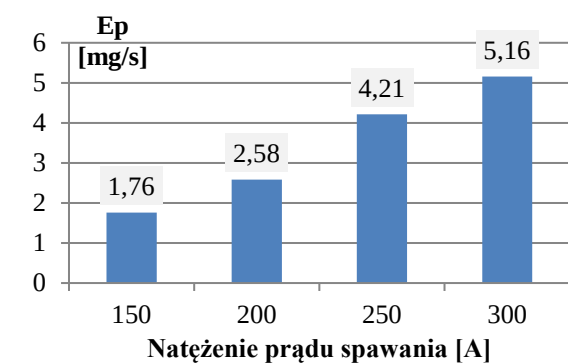
Wzrost natężenia prądu i napięcia łuku	Sposób przenoszenia kropli	Wzrost ilości powstającego pyłu	Przyczyna
	Zwarcioowy		Wysoka częstotliwość zwarć
	Kroplowy		Wzrost wielkości stopionych kropel oraz wzrost czasu ich oddziaływania, na wysoką temperaturę
	Natryskowy		Wzrost ilości przenoszonego materiału w jednostce czasu

Generalną zależność pomiędzy natężeniem prądu spawania a ilością powstającego pyłu (korelacja dodatnia) potwierdziły również wyniki badań prowadzonych w Centrum Spawalnictwa Łukasiewicz – Górnośląskiego Instytutu Technologicznego. Na rysunku 2.35 przedstawiono wpływ natężenia prądu spawania na wielkość emisji pyłu podczas spawania różnymi metodami stali austenitycznej 1.4301.

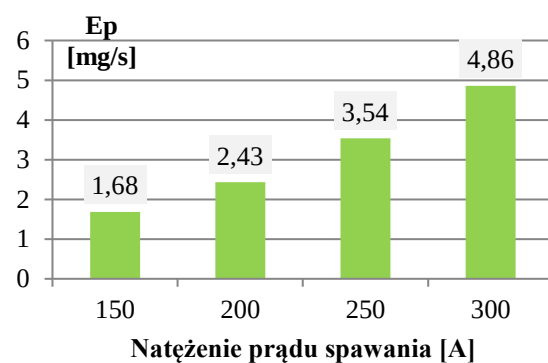
Podczas spawania metodą MIG prądem o natężeniu 300 A emisja pyłu wyniosła 5,16 mg/s. Obniżenie natężenia prądu spawania o 50 A wiązało się redukcją emisji pyłu o blisko 20%. Zmniejszenie natężenia prądu do 200 A spowodowało spadek emisji pyłu o połowę, z kolei przy prądzie spawania 150 A emisja pyłu wyniosła 1,76 mg/s i była blisko trzykrotnie mniejsza niż przy natężeniu prądu 300 A (rys. 2.35 a).

Emisja pyłu podczas spawania metodą MAG prądem o natężeniu 300 A wyniosła 4,86 mg/s i była dwukrotnie większa w porównaniu do emisji uzyskanej podczas spawania prądem o natężeniu 200 A. Dalsze obniżenie natężenia prądu spawania do 150 A skutkowało emisją pyłu na poziomie 1,68 mg/s. Była ona o 65% mniejsza niż przy natężeniu prądu spawania 300 A, o ponad 50% mniejsza niż przy prądzie 250 A i 30% mniejsza niż przy prądzie 200 A (rys. 2.35 b).

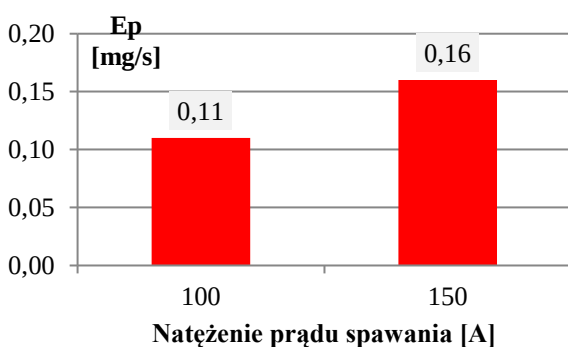
Wyniki badań potwierdziły uzyskane z danych literaturowych informacje, że spawanie metodą TIG charakteryzuje się z niskimi wskaźnikami emisji pyłu, jednak nawet w tym przypadku zmniejszenie natężenia prądu z 150 A do 100 A spowodowało ograniczenie emisji o ponad 30% (rys. 2.35 c).



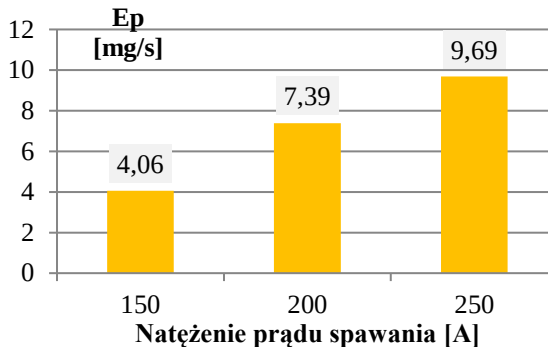
a) MIG (131) gaz osłonowy: 100%Ar;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm



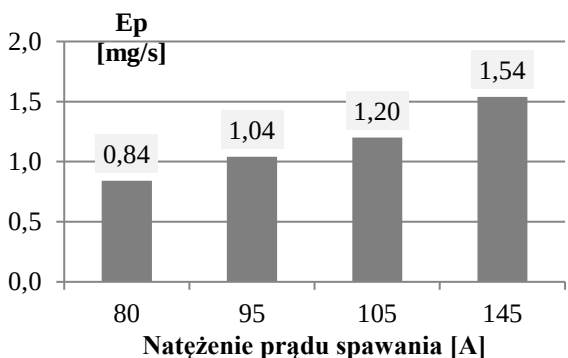
b) MAG (135) gaz osłonowy: 98%Ar+2%O₂;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm



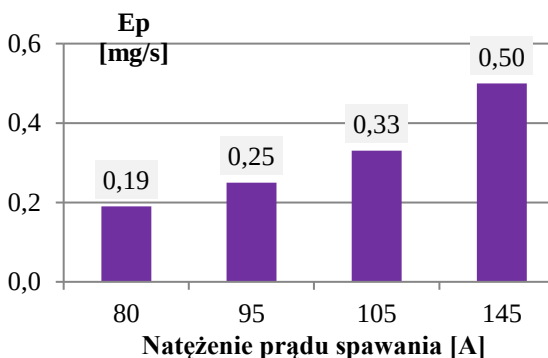
c) TIG (141) gaz osłonowy: 100%Ar;
materiał dodatkowy: W 308L-Si Ø 1,6 mm



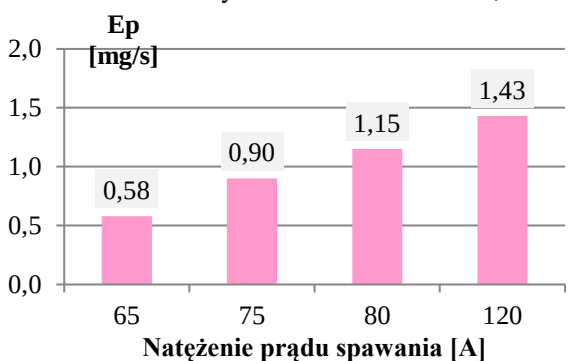
d) MAG (136) gaz osłonowy: 82%Ar+18%O₂;
materiał dodatkowy: E 308L Ø 1,2 mm



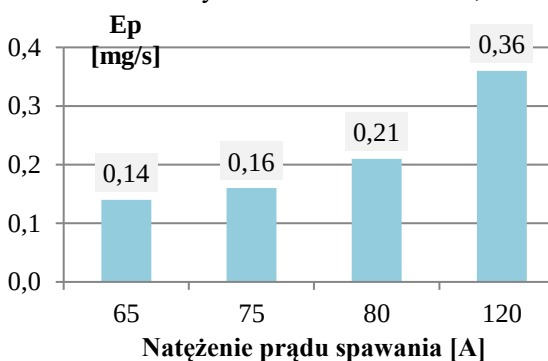
e) MIG ColdArc (131) gaz osłonowy: 100%Ar;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm



f) MAG ColdArc (135) gaz osłonowy: Ar+2%O₂;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm



g) MIG CMT (131) gaz osłonowy: 100%Ar;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm



h) MAG CMT (135) gaz osłonowy: Ar+2%O₂;
materiał dodatkowy: 308L-Si/MVR-Si Ø 1,2 mm

Rys. 2.35. Wpływ natężenia prądu spawania na wielkość emisji pyłu podczas spawania stali nierdzewnej austenitycznej 1.4301 [97, 98, 128]

Spawanie metodą MAG drutem proszkowym wiązało się z wysoką emisją zanieczyszczeń pyłowych. Spawanie prądem o natężeniu 250 A skutkowało emisją na poziomie 9,69 mg/s. Była ona o 30% większa niż przy spawaniu prądem o natężeniu 200 A i blisko 2,5 – krotnie większa niż gdy natężenie prądu wynosiło 150 A (rys. 2.35 d).

Zastosowanie niskoenergetycznych wariantów spawania MIG/MAG – ColdArc i CMT znacznie ograniczyło ilość powstających zanieczyszczeń pyłowych w porównaniu do standardowej metody MIG/MAG. Analizując uzyskane wyniki podczas spawania metodą MIG ColdArc wykazano, że emisja pyłu podczas spawania prądem o natężeniu 145 A wyniosła 1,54 mg/s. Zmniejszenie natężenia prądu o 40 A spowodowało redukcję emisji pyłu o ponad 20%. Spawanie prądem o natężeniu 95 A wiązało się ze zmniejszeniem emisji pyłu o blisko 1/3 w porównaniu do spawania prądem 145 A, natomiast gdy natężenie prądu spawania zmniejszono do 80 A emisja pyłu była blisko dwukrotnie mniejsza (rys. 2.35 e).

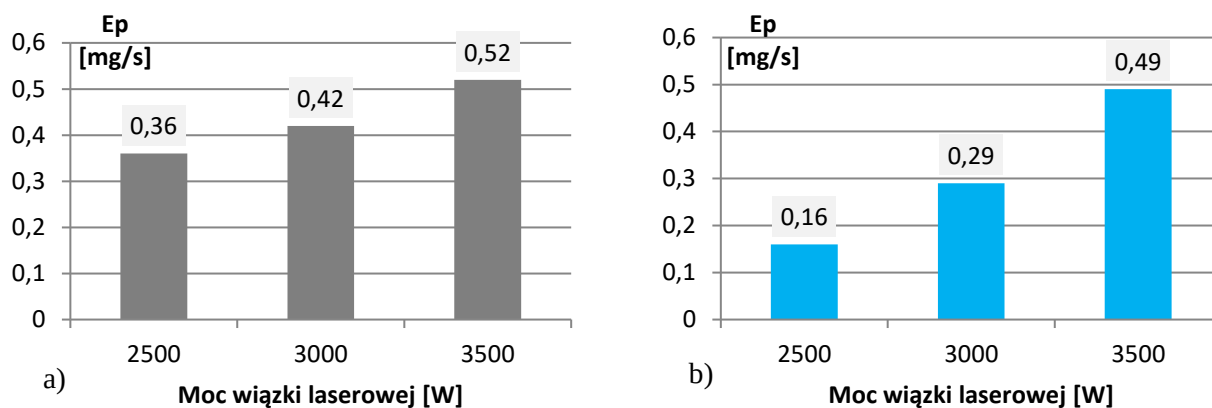
Spawanie metodą MAG ColdArc prądem o natężeniu 145 A skutkowało emisją pyłu na poziomie 0,50 mg/s. Obniżenie natężenia prądu do 105 A wiązało się ze zmniejszeniem emisji pyłu o ponad 1/3. Gdy spawano prądem o natężeniu 80A emisja pyłu wyniosła 0,19 mg/s i była ponad 2,5-krotnie mniejsza niż podczas spawania prądem o natężeniu 145 A oraz 40% mniejsza niż w przypadku spawania prądem o natężeniu 105 A (rys. 2.35 f).

Spawając metodą MIG CMT prądem o natężeniu 120 A emisja pyłu wyniosła 1,43 mg/s i była o blisko 25% większa w porównaniu do emisji uzyskanej dla spawania prądem o natężeniu 80 A. Natomiast przy 65 A emisja pyłu wyniosła 0,58 mg/s i była o blisko 60% mniejsza w porównaniu do wskaźnika dla spawania prądem 120 A, o 50% w porównaniu do emisji przy prądzie 80 A i 35% w odniesieniu do spawania prądem o natężeniu 75 A (rys. 2.35 g).

Spawanie metodą MAG CMT prądem o natężeniu 120 A charakteryzowało się emisją pyłu na poziomie 0,36 mg/s. Zmniejszenie natężenia prądu o 40 A spowodowało redukcję emisji pyłu o ponad 40%. Gdy spawano prądem o natężeniu 65 A i 75 A emisja pyłu była zbliżona i wyniosła odpowiednio 0,14 i 0,16 mg/s i była ponad dwukrotnie niższa niż podczas spawania prądem o natężeniu 120 A (rys. 2.35 h).

W przypadku spawania laserowego o ilości powstających zanieczyszczeń decydować będzie moc wiązki laserowej. Na rysunku 2.36 przedstawiono wskaźniki emisji pyłu podczas spawania laserowego elementów kolektora z obudową turbiny ze stali w gat. 1.4848.

Badania wykonane były zarówno dla techniki spawania z oczkiem, jak i z jeziorkiem. Uzyskane wyniki potwierdziły, że wraz ze wzrostem wartości mocy wiązki laserowej wzrasta również emisja pyłu - wystąpiła korelacja dodatnia.



Rys. 2.36. Wpływ mocy wiązki laserowej na wielkość emisji pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4848: a) techniką z oczkiem, b) techniką z jeziorkiem [108]

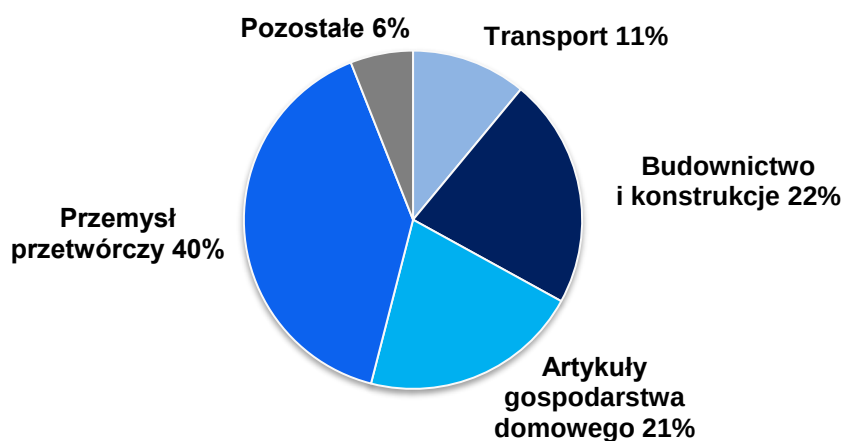
Analizując wielkość emisji pyłu całkowitego powstającego podczas spawania laserowego techniką z oczkiem stwierdzono, że dla wartości mocy wiązki laserowej 2500 W emisja wyniosła 0,36 mg/s, zwiększenie mocy do 3000 W wiązało się ze zwiększeniem wielkości emisji pyłu o ponad 15% (0,42 mg/s). Przy mocy wiązki laserowej 3500 W emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,52 mg/s, co daje wzrost o blisko 45% w stosunku do emisji przy 2500 W i blisko 25% w stosunku do emisji przy mocy wiązki laserowej wynoszącej 3000 W (rys. 2.36 a).

Z kolei podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem dla wartości mocy wiązki laserowej 2500 W emisja wyniosła 0,16 mg/s, zwiększenie mocy do 3000 W wiązało się ze zwiększeniem wielkości emisji pyłu o ponad 80% (0,29 mg/s). Przy mocy wiązki laserowej 3500 W emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,49 mg/s, co daje trzykrotny wzrost emisji w stosunku do mocy wiązki laserowej 2500 W i blisko 70% w stosunku do emisji przy mocy wiązki laserowej wynoszącej 3000 W (rys. 2.36 b).

Uzyskane wyniki podczas spawania łukowego i laserowego pokazują w jaki sposób modyfikacja procesów spawania prowadzi do zmniejszenia ilości powstających zanieczyszczeń pyłowych, a tym samym do poprawy warunków panujących na spawalniczym stanowisku pracy.

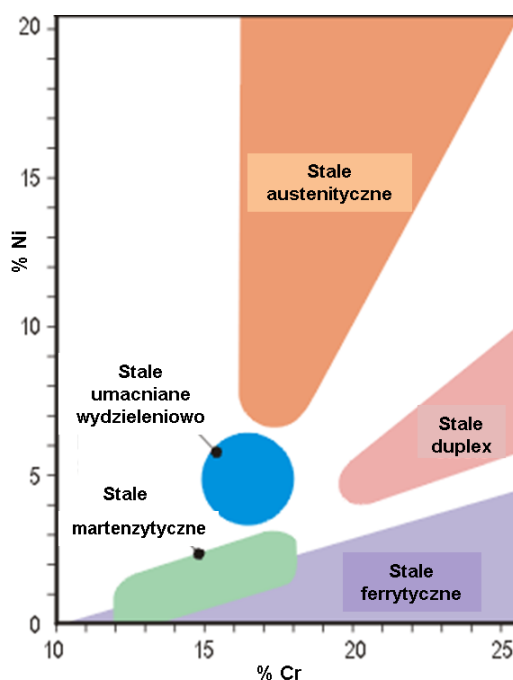
2.5. Podsumowanie

Stale odporne na korozję z uwagi na właściwości mechaniczne i odporność na korozję oraz podatność na obróbkę i spawalność znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, farmaceutycznym, spożywczym, motoryzacyjnym, stoczniowym, energetycznym i w budownictwie (rys. 2.37) [130].



Rys. 2.37. Zastosowanie stali odpornych na korozję w przemyśle [129]

Dobre właściwości wytrzymałościowe oraz wysoka odporność na działanie mediów i agresywnych związków chemicznych wynikają głównie z obecności w tych stalach chromu i niklu. Zawartość tych pierwiastków w stali decyduje o jej mikrostrukturze – wyróżnia się stale ferrytyczne, austenityczne, martenzytyczne, umacniane wydzieleniowo i ferrytyczno-austenityczne (duplex) [1] (rys. 2.38).



Rys. 2.38. Podział stali odpornych na korozję ze względu na mikrostrukturę [131, 132]

Główną metodą łączenia stali odpornych na korozję są procesy spawalnicze. Dobrą spawalnością charakteryzują się głównie stale austenityczne [19, 131]. Do klasycznych metod spawania tych stali zalicza się spawanie elektrodami otulonymi, spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej (MIG/MAG), spawanie drutami proszkowymi, spawanie metodą TIG i spawanie łukiem krytym, natomiast do nowoczesnych metod spawania tych stali zalicza się spawanie laserowe, hybrydowe (laser + łuk), plazmowe oraz spawanie elektronowe.

Podczas spawania i procesów pokrewnych do środowiska pracy wydzielany jest dym spawalniczy (aerozol dwufazowy kondensacyjny), który jest mieszaniną cząstek stałych - pyłu oraz gazów [88]. Cząstki stałe powstają w wyniku kondensacji i utleniania par metalu. Pył spawalniczy został zaklasyfikowany zgodnie z wymogami Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) do grupy czynników o udowodnionym działaniu kancerogennym [114].

Ocena ryzyka związanego z narażeniem na emisję pyłu spawalniczego zależy od ilości powstającego pyłu, jego składu chemicznego i morfologii. Łączna analiza tych czynników decyduje o toksyczności pyłu i jego wpływie na organizm człowieka.

Ilość powstających zanieczyszczeń uzależniona jest od metody spawania, rodzaju materiału podstawowego i materiałów dodatkowych oraz parametrów technologicznych procesu spawania [72, 73].

Na podstawie uzyskanych wyników badań prowadzonych w Sieci Badawczej Łukasiewicz-Górnośląskim Instytucie Technologicznym, w tablicy 2.9 przedstawiono wskaźniki emisji pyłu całkowitego powstającego podczas spawania stali austenitycznej w gatunku 1.4301 (X5CrNi18-10). W zestawieniu przedstawiono wartość średnią wielkości emisji pyłu dla całego analizowanego zestawu parametrów technologicznych, uwzględniono również wyniki badań rozpoznawczych prowadzonych dla spawania laserowego oraz hybrydowego (laser + MIG). Dodatkowo, dla analizowanych metod spawania, obliczono krotność zwiększania się emisji pyłu w odniesieniu do emisji dla metody TIG, która charakteryzowała się najmniejszym wskaźnikiem emisji.

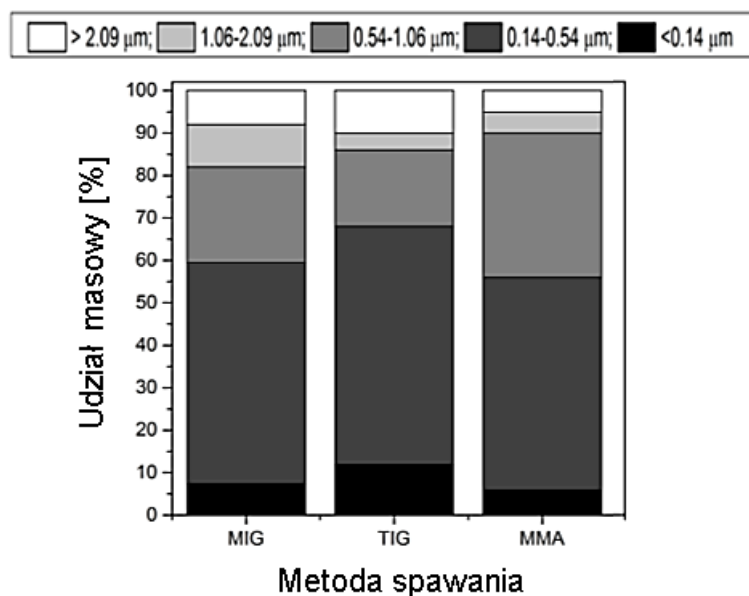
Tablica 2.9. Wskaźniki emisji pyłu całkowitego powstającego podczas spawania stali austenitycznej w gatunku 1.4301 [97-100, 133, 134]

Lp.	Metoda spawania	E_P – emisja czasowa pyłu [mg/s]	Krotność emisji przy założeniu E_P TIG =1
1.	MMA (111)	12,50	100
2.	MAG (136)	9,00	72
3.	MIG (131)	3,85	30,8
4.	MAG (135)	3,60	28,8
5.	HLAW	1,50	12
6.	MIG Coldarc (131)	1,15	9,2
7.	MIG CMT (131)	1,00	8
8.	MAG ColdArc (135)	0,70	5,6
9.	LBW (521)	0,70	5,6
10.	MAG CMT (135)	0,25	2
11.	TIG (141)	0,13	1

O składzie chemicznym pyłu decyduje rodzaj spawanego materiału oraz zastosowane materiały dodatkowe. Podczas spawania stali odpornych na korozję głównymi składnikami pyłu są związki żelaza, manganu, krzemu oraz chromu i niklu. Zawartość chromu i niklu decyduje o odporności korozyjnej stali, natomiast ich obecność w pyłe z uwagi na działanie rakotwórcze (związki chromu(VI) i niklu) stwarza istotne zagrożenie dla zdrowia pracowników. W przypadku spawania elektrodami otulonymi lub drutami proszkowymi w pyłe stwierdzono również obecność sodu, wapnia, potasu, fluoru, tytanu, glinu, miedzi i molibdenu [12, 88, 134]

Pył spawalniczy składa się z drobnych i ultradrobnych cząstek o średniej średnicy aerodynamicznej zawierającej się w zakresie od 0,01 do 1 μm [136]. Ilość drobnych cząstek zmniejsza się wraz ze upływem czasu przebywania w powietrzu, ponieważ cząsteczki w procesie koagulacji łączą się w łańcuchy lub aglomeraty zwiększając tym samym swój rozmiar i masę.

Rozmiar cząstek pyłu zależy od zastosowanego procesu spawania. W swoim artykule Brand wyznaczył medianę średnicy pyłu - dla spawania MMA wyniosła ona 150 nm, dla spawania MIG/MAG 100-150 nm oraz < 50 nm dla spawania metodą TIG [136, 137]. Rozkład uziarnienia cząstek pyłu powstającego podczas spawaniu metodami: MMA, MIG i TIG przedstawiono na rysunku 2.39.

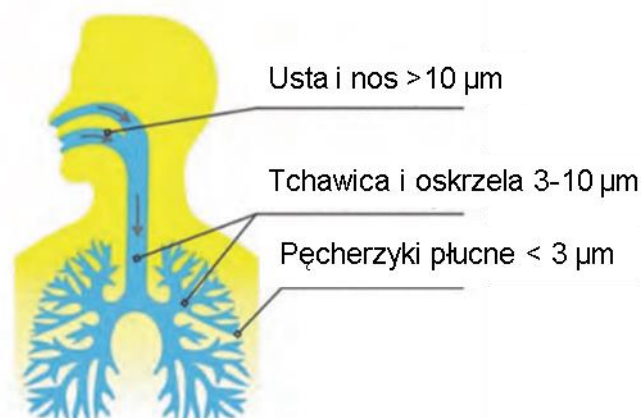


Rys. 2.39. Rozkład uziarnienia pyłu pochodzącego ze spawania metodami MMA, MIG i TIG [136]

Wielkość cząstek pyłu decyduje o głębokości ich wnikania do organizmu człowieka, istnieje tutaj zależność odwrotnie proporcjonalna – im mniejsze cząstki tym głębiej wnikają do organizmu, stąd wynika podział pyłu na frakcje o określonych średnicach aerodynamicznych (rys. 2.40) [92]:

- *frakcja wdychalna* – udział masowy wszystkich cząstek zawieszonych, wdychanych przez nos i usta,
- *frakcja tchawiczna* – udział masowy cząstek frakcji wdychanych wnikających poza krtani,
- *frakcja respirabilna (pęcherzykowa)* – udział masowy cząstek frakcji wdychanych docierających (wnikających) aż do bezzęskowych dróg oddechowych.

Za najbardziej niebezpieczną z punktu widzenia zdrowia pracowników uznaje się frakcję respirabilną. Pył docierając do pęcherzyków płucnych wnika do krwioobiegu, co stanowi przyczynę szeregu schorzeń ogólnych, takich jak: ograniczenie funkcjonowania płuc, astma, bronchit oraz liczne choroby płuc, serca i innych narządów [138].



Rys. 2.40. Miejsca zdeponowania cząstek pyłu w układzie oddechowym [138]

Możliwość ograniczenia zagrożeń zdrowia związanych z emisją pyłu spawalniczego wiąże się z określeniem czynników wpływających na ilość powstających zanieczyszczeń. Wielkość emisji pyłu spawalniczego jest wynikiem zastosowanego procesu, materiałów podstawowego i dodatkowego oraz parametrów technologicznych. Dostępne dane literaturowe oraz wyniki prowadzonych w Centrum Spawalnictwa Ł-GIT badań potwierdzają wpływ parametrów technologicznych procesu na ilość powstającego pyłu, co pozwala na stosunkowo łatwą modyfikację procesu przy zachowaniu prawidłowego przebiegu spawania.

Analiza stanu zagadnienia wykazała, że charakterystyka pyłu spawalniczego odnosi się w zdecydowanej większości do metod łukowych, które są najczęściej stosowanymi w przemyśle. Dane statystyczne z przemysłu wskazują, że coraz więcej przedsiębiorstw decyduje się na stosowanie technik laserowych. Techniki te, pomimo konieczności poniesienia wysokich nakładów finansowych, pozwalają na precyzyjne łączenie elementów oraz uzyskanie powtarzalnych złączy charakteryzujących się niewielkimi odkształceniami i wąską strefą wpływu ciepła. Istnieje zatem konieczność rozszerzenia zakresu badań, w tym obszarze technologicznym [5].

W literaturze brakuje szczegółowego zestawienia dotyczącego wskaźników emisji pyłu powstającego podczas spawania laserowego i hybrydowego, jak również brak jest informacji na temat wpływu parametrów technologicznych procesu spawania laserowego i hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych, na skład chemiczny pyłu i jego morfologię, dlatego podjęto próbę określenia tych zależności dla wybranych gatunków stali odpornych na korozję. Poznanie tych relacji pozwala na wskazanie kierunków zmniejszenia obciążenia środowiskowego związanego ze stosowaniem procesów spawania laserowego i hybrydowego w różnych gałęziach przemysłu.

3. Teza, cel i zakres pracy

Analiza stanu wiedzy oraz uzyskane wyniki badań własnych pozwoliły na sformułowanie następującej tezy pracy:

Energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego (laser + MIG) podczas spawania stali o strukturze austenitycznej decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii.

Dla potwierdzenia tezy pracy określono następujące cele:

Cel metodyczny:

- opracowanie metodyki oceny jakościowej i ilościowej pyłu powstającego podczas spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych.

Cel poznawczy:

- określenie wielkości emisji pyłu podczas spawania laserowego i hybrydowego wybranych gatunków stali austenitycznych oraz oznaczenie jego składu chemicznego i morfologii,
- wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych a wielkością emisji pyłu, jego składem chemicznym i morfologią.

Cel użytkowy:

- opracowanie zaleceń spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych przyjmując jako kryteria uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B oraz redukcję emisji pyłu,
- opracowanie wytycznych technologii spawania laserowego i hybrydowego stali austenitycznych w aspekcie ochrony środowiska i zdrowia pracowników.

Założone cele zostały osiągnięte poprzez realizację czteroetapowego planu badawczego (rys. 3.1). W pierwszym etapie na podstawie analizy stanu wiedzy sformułowano tezę oraz cel i zakres pracy badawczej.

Następnie, w kolejnym etapie, dobrano materiały do badań z grupy stali odpornych na korozję oraz wykonano próby technologiczne spawania łukowego, laserowego

i hybrydowego. Próby te miały na celu dobór parametrów technologicznych zapewniających uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B według norm:

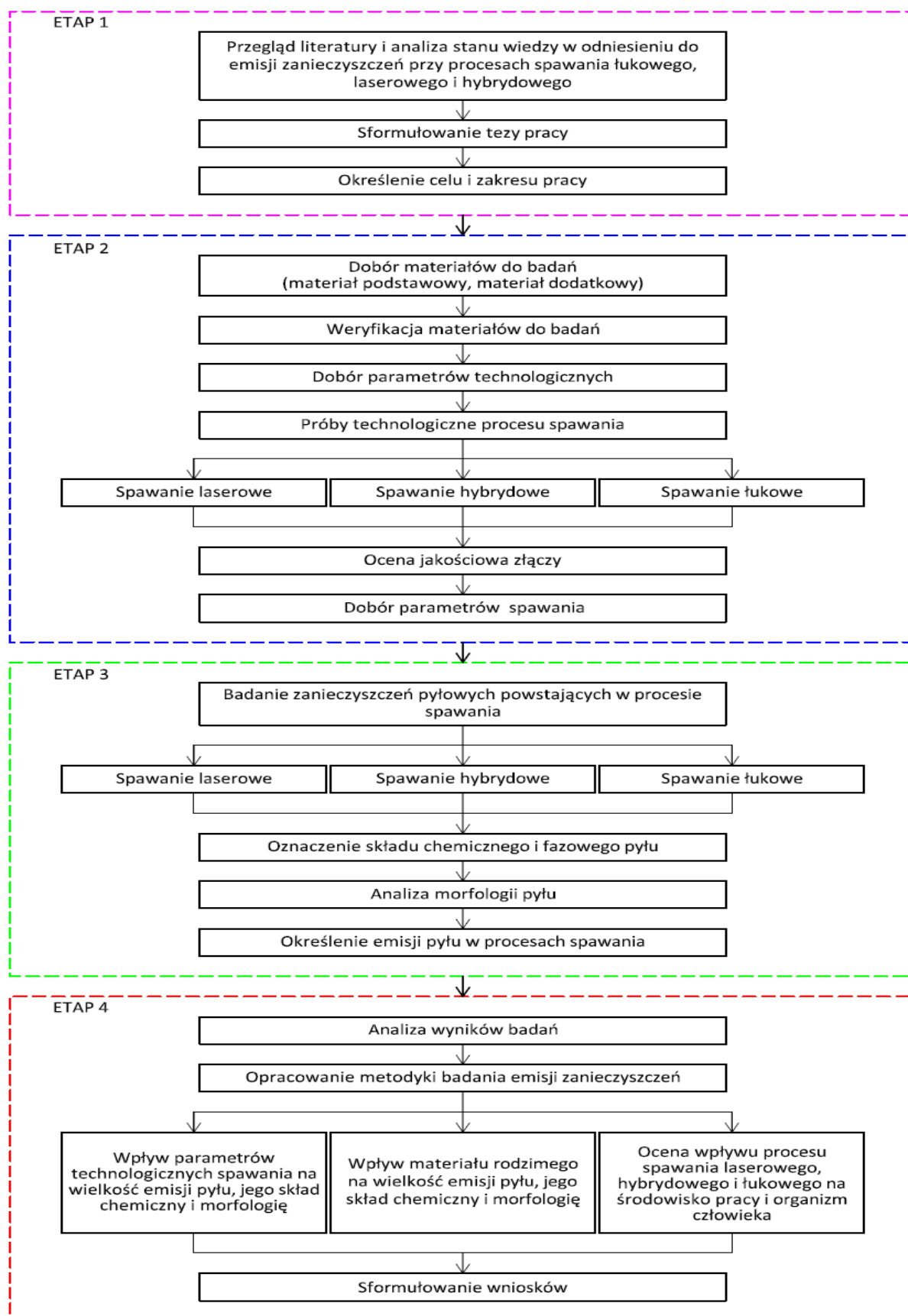
- dla spawania łukowego PN-EN ISO 5817: Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) - Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych,
- dla spawania laserowego PN-EN ISO 13919 - 1: Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego - Wymagania i zalecenia do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych - Część 1: Stal, nikiel, tytan i ich stopy,
- dla spawania hybrydowego PN-EN ISO 12932: Spawanie - Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu - Poziomy jakości dla niezgodności.

Normy te definiują wymagania i zalecenia do określania poziomów niezgodności spawalniczych dla złączy. W normach określono trzy poziomy jakości – B, C i D. Poziom jakości B odpowiada najwyższym wymaganiom stawianym połączeniom spawanym. Tego typu połączenia stosowane są w m.in. przemyśle chemicznym, petrochemicznym i energetycznym.

Trzeci etap obejmował przeprowadzenie i analizę wyników badań laboratoryjnych dla wybranych procesów spawania łukowego, laserowego i hybrydowego mających na celu:

- określenie wielkości emisji pyłu całkowitego,
- oznaczenie składu chemicznego i fazowego pyłu
- analizę morfologii pyłu.

W ostatnim etapie, na podstawie analizy uzyskanych wyników badań sformułowano wnioski, które potwierdziły przyjętą tezę rozprawy.



Rys. 3.1. Szczegółowy zakres pracy badawczej

3.1. Materiały do badań

Do badań jako materiał podstawowy wybrano blachy stalowe o grubości 20 mm, z grupy stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej:

- X5CrNi18-10 (1.4301) – stal nierdzewna;
- X15CrNiSi20-12 (1.4828) – stal żaroodporna.

Przed przystąpieniem do badań wykonano kontrolną analizę składu chemicznego materiału podstawowego i porównano z wymaganiami normy PN-EN 10088-1. Badania przeprowadzono na spektrometrze emisyjnym ze wzbudzeniem iskrowym Q4 TASMAN 170 firmy Bruker. Skład chemiczny wybranych gatunków stali odpornych na korozję przedstawiono w tablicy 3.1.

Tablica 3.1. Skład chemiczny materiałów podstawowych zastosowanych w badaniach [1]

Gatunek stali	Norma	Skład chemiczny [%]									
	Analiza kontrolna	C	Si	Mn	P _{max}	S	N	Cr	Mo	Ni	Ti
X5CrNi18-10	PN-EN 10088-1	≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	0,045	≤ 0,015	0,11	17,5 - 19,5	-	8,0 - 10,5	-
	LBS/ZR/1/2022	0,02	0,41	1,406	0,017	0,005	0,10	18,35	-	8,02	-
X15CrNiSi20-12	PN-EN 10088-1	≤ 0,20	1,5 - 2,5	≤ 2,0	0,045	≤ 0,015	-	19,0 - 21,0	-	11,0 - 13,0	-
	LBS/ZR/3/2022	0,06	1,60	1,50	0,021	0,003	-	19,50	-	11,00	-

Wyniki analizy składu chemicznego potwierdziły, że skład chemiczny materiałów podstawowych do badań jest zgodny z danymi producenta i spełnia wymogi normy PN-EN 10088-1.

Właściwości mechaniczne wybranych gatunków stali odpornych na korozję zgodnie z normą PN-EN 10088-4 przedstawiono w tablicy 3.2. W tablicy umieszczono również wyniki badań mechanicznych wykonanych na maszynie wytrzymałościowej do badań statycznych Criterion C45 firmy MTS.

Tablica 3.2. Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych zastosowanych w badaniach [139]

Gatunek stali	Norma	Właściwości mechaniczne		
	Badania mechaniczne	Umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$ [MPa]; min.	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie przy zerwaniu A [%], min.
X5CrNi18-10 (1.4301)	PN-EN 10088-4	210	520-720	45
	ZR/ZB/1/2022	261	569	60
X15CrNiSi20-12 (1.4828)	PN-EN 10088-4	230	550-750	28
	ZR/ZB/2/2022	259	593	62

Na podstawie uzyskanych wyników badań mechanicznych, stwierdzono, że właściwości mechaniczne (R_e , R_m , A) badanych gatunków stali spełniają wymagania normy PN-EN 10088-4 dla tych stali.

Do spawania hybrydowego i łukowego jako spoiwo wykorzystano drut lity w gat. 308L-Si (klasyfikacja G 19 9 L Si wg PN-EN ISO 14343) o średnicy 1,2 mm (tablica 3.3).

Tablica 3.3. Skład chemiczny materiału dodatkowego zastosowanego w badaniach [140]

Gatunek materiału dodatkowego	Zawartość głównych składników [%]										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Nb
(19 9 L Si) 308LSi G 19 9 L Si	0,03	0,65-1,2	1,0-2,5	0,03	0,02	19,0-21,0	9,0-11,0	0,3	-	0,3	-

Jako gaz osłonowy w procesach spawania łukowego, laserowego i hybrydowego zastosowano argon, (I1 -100% Ar według PN-EN ISO 14175 [141]), zalecany przez producentów do spawania wybranych gatunków stali.

3.2. Metodyka badań

Próby technologiczne spawania łukowego, laserowego i hybrydowego (laser + MIG) przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku znajdującym się w Laboratorium Technologii Laserowych Łukasiewicz-Centrum Spawalnictwa Ł-GIT w Gliwicach.

Podczas badań wykonano próby przetapiania, które symulowały spawanie złączy doczołowych. Pozwoliło to na wyeliminowanie wpływu dokładności zestawienia blach w złączy doczołowym na uzyskany kształt wtopienia. Szczegółowy opis stanowiska oraz procesów spawania przedstawiono w rozdziale 4.

- **Badania wizualne**

Badania wizualne (VT - *Visual Testing*) wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 17637 (Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych z wykorzystaniem lupy, spoinomierza i suwmiarki) przez uprawniony personel przy natężeniu oświetlenia badanego elementu wynoszącego co najmniej 500 lx. Polegały one na kontroli wzrokowej i pomiarach elementów przygotowywanych do spawania, sprawdzeniu poprawności ich montażu oraz kontroli w trakcie wykonywania i po zakończonym procesie spawania.

- **Badania metalograficzne**

Badania metalograficzne przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639 (Badania niszczące spawanych złączy metali - Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych).

Badania metalograficzne makroskopowe

Próbki do badań pobrano ze złącza prostopadle do kierunku spawania, tak że obejmowały spoinę, strefę wpływu ciepła i część materiału podstawowego. Kolejnym etapem było szlifowanie papierem ściernym o odpowiedniej ziarnistości (od 80 do 800), następnie tak przygotowane zglądy metalograficzne, w celu ujawnienia struktury były trawione w odczynniku Adlera przez 10 s. Badania makroskopowe prowadzono przy powiększeniu do 50x w technice ciemnego pola na mikroskopie stereoskopowym.

Badania metalograficzne mikroskopowe

Próbki do badań szlifowano papierem ściernym o ziarnistości od 320 do 1000, następnie polerowano na szlifierko-polerce PowerPro 4000 firmy Buehler. Do polerowania użyto pasty diamentowej (3 μm) marki Struers. Po wypolerowaniu zgląd był trawiony elektrolitycznie (napięcie: 6 V) w roztworze bezwodnika kwasu chromowego przez 6 sekund.

Badania mikroskopowe wykonano przy użyciu mikroskopu świetlnego Nikon Eclipse MA200 w technice jasnego pola przy powiększeniu do 500x.

Przeprowadzone badania nieniszczące i niszczące uzyskanych złączy pozwoliły na dobór parametrów technologicznych spawania zapewniających uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B według norm: PN-EN ISO 5817 dla spawania łukowego, PN-EN ISO 13919 - 1 w odniesieniu do spawania laserowego i PN-EN ISO 12932 dla spawania hybrydowego. Dla wybranych parametrów technologicznych spawania przeprowadzono laboratoryjne badania wielkości emisji pyłu rozumianej jako ilość powstającego pyłu w czasie, składu chemicznego pyłu i jego morfologii.

Określenie wielkości emisji pyłu powstającego przy procesach spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

Zasadą badania jest pobieranie pyłu na filtry pomiarowe, w czasie spawania w hermetycznej komorze przy włączonym urządzeniu odciągowym. W badaniu zastosowano filtry typu PTM-B o średnicy 150 mm. Określenie wielkości emisji pyłu opiera się na metodzie grawimetrycznej tzn. metodzie wagowej. Oblicza się ją na podstawie różnicy mas filtrów przed i po procesie spawania w założonym czasie.

Metodyka badawcza dla procesów spawania opracowana została zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15011-1: Zdrowie i bezpieczeństwo przy spawaniu i procesach pokrewnych. Metoda laboratoryjna pobierania próbek pyłu i gazów powstających przy spawaniu łukowym. Określanie wielkości emisji i pobieranie próbek pyłu do analizy.

Jakościowa i ilościowa analiza fazowa pyłu spawalniczego

Oznaczenie składu fazowego pyłu osadzonego na filtrach pomiarowych wykonano na dyfraktometrze rentgenowskim Empyrean firmy PANalytical stosując filtrowane promieniowanie kobaltu w konfiguracji z detektorem Pixcel. Na podstawie dyfraktogramu czystego filtra wyeliminowano pierwiastki pochodzące z podłoża. Identyfikacja składu fazowego pyłu została wykonana zgodnie z akredytowaną procedurą M1-RTG pt.: "Identyfikacja fazowa" (wydanie siódme z dn. 13.07.2018 r.). Podstawą do identyfikacji składników fazowych są dane wzorcowe bazy International Centre for Diffraction Data PDF-4+ (2021). Analiza ilościowa została wykonana metodą Rietvelda zgodnie z akredytowaną procedurą M2-RTG pt.: „Ilościowa analiza fazowa” (wydanie siódme z dn. 13.07.2018 r.).

Skaningowa mikroskopia elektronowa SEM

Analiza morfologii pyłu przeprowadzona została przy powiększeniach powyżej 500x na elektronowych mikroskopach skaningowych (SEM – *Scanning Electron Microscopy*): Hitachi S-3400N oraz Jeol NeoScope 2. Badania prowadzono w technice rejestracji elektronów wtórnych (SE - *Secondary Electrons*) i elektronów wstecznie rozproszonych (BSE - *Back-Scattered Electrons*). Technika obserwacji w SE pozwala na rejestrację topografii powierzchni, natomiast obrazy BSE uwzględniają różnicę w składzie chemicznym. Wykonano również mikroanalizę składu chemicznego ujawnionych faz w złączu metodą spektroskopii promieniowania X z dyspersją energii (EDS - *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*). Badania wykonano przy napięciu 15kV na analizatorze System Six firmy Hitachi Thermo Noran współpracującym z mikroskopem HITACHI S-3400N.

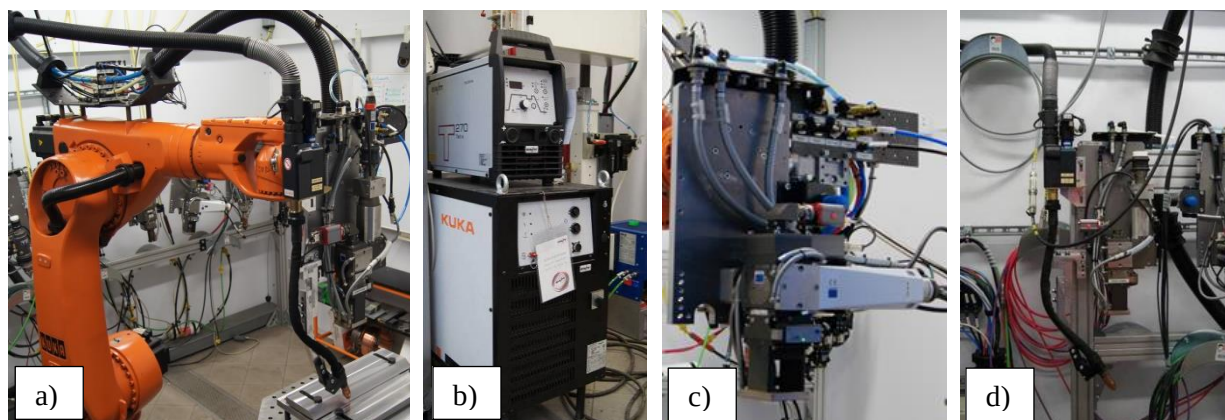
Szczegółowe metodyki badań laboratoryjnych zostały opisane w rozdziałach 4.1, 5.1 i 6.1.

4. Próby technologiczne procesu spawania

Próby technologiczne spawania łukowego, laserowego i hybrydowego miały na celu dobór parametrów technologicznych zapewniających uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B według norm: PN-EN ISO 5817 dla spawania łukowego, PN-EN ISO 13919 - 1 w odniesieniu do spawania laserowego i PN-EN ISO 12932 dla spawania hybrydowego [142-144]. Następnie dla wybranych zestawów parametrów technologicznych wykonane zostały badania wielkości emisji pyłu, jego składu chemicznego i morfologii.

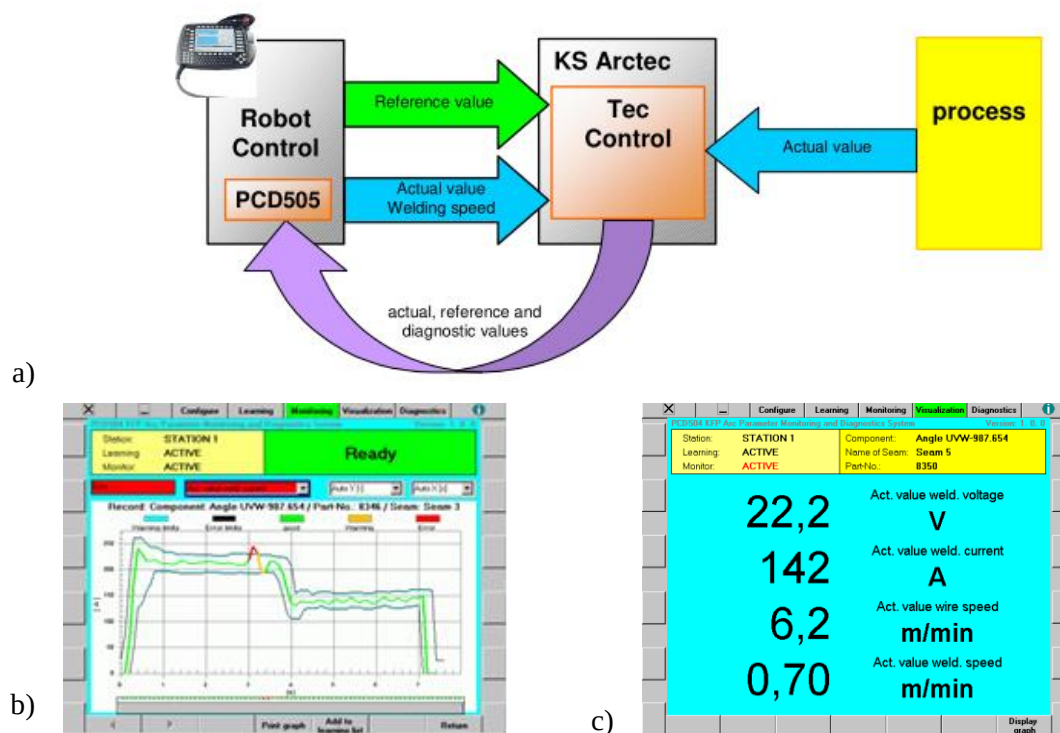
Wszystkie próby technologiczne spawania przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku znajdującym się w Centrum Spawalnictwa Ł-GIT (rys. 4.1), wyposażonym w:

- robot przemysłowy KUKA KR30HA 6-cio osiowy o powtarzalności pozycjonowania min. 0,15 mm,
- laser dyskowy firmy Trumpf - TruDisk 12002, wyposażony w system światłowodów o średnicy 300 μm , umożliwiających połączenie rezonatora z głowicą spawalniczą,
- głowicę do spawania hybrydowego firmy KUKA, z możliwością transmisji promienia o mocy 12 kW,
- łukowe urządzenie do spawania metodą MIG/MAG - źródło prądu firmy EWM Hightec Welding GmbH typu PHOENIX 452 RC PULS KUKA, o maksymalnym natężeniu prądu spawania 450 A,
- stół uchylny-obrotowy z możliwością pozycjonowania elementów spawanych.



Rys. 4.1. Zrobotyzowane stanowisko TruLaser Robot 5120 do spajania laserowego z laserem dyskowym TruDisk 12002: a) widok ogólny, b) źródło prądu do spawania łukowego MIG/MAG, c) głowica CFO do spawania laserowego, d) głowica D70 do spawania hybrydowego

Stanowisko do spajania laserowego wyposażone jest w system kontroli, rejestracji parametrów PCD505 (Parameter Control and Documentation System) firmy KUKA. System ten pozwala dokonywać rejestracji parametrów źródła łukowego. Schemat systemu monitorowania i rejestracji parametrów procesu spawania łukowego PCD 505 pokazano na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Schemat systemu monitorowania parametrów spawania łukowego PCD505 (Parameter Control and Documentation System, firmy KUKA) (a), przykładowy graficzny zapis parametrów procesu spawania łukowego (b), rzeczywisty odczyt parametrów procesu spawania łukowego (c) [60]

Do opisu parametrów i warunków technologicznych procesu użyto następujących skrótów i oznaczeń:

- moc wiązki lasera - P [W];
- prędkość spawania - V_{sp} [m/min];
- prędkość podawania drutu - V_{dr} [m/min];
- natężenie prądu spawania - I [A];
- napięcie łuku - U [V];
- korekta napięcia łuku (nastawa źródła łukowego) - kor. U [V];
- odstęp w styku łączonych blach – g [mm];
- odległość od miejsca ogniskowania wiązki lasera do końca drutu - a [mm];
- położenie ogniska względem powierzchni spawanych blach - f [mm],
- ilość wprowadzonego ciepła – Q [kJ/mm].

Ilość wprowadzonego ciepła dla spawania łukowego, laserowego i hybrydowego określono zgodnie z normą PN-EN ISO 15614 (Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania) następującymi wzorami (4.1), (4.2) i (4.3):

- dla spawania łukowego metodą MIG:

$$Q = 0,8 \cdot \frac{U \cdot I}{V_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (4.1) [145]$$

- dla spawania laserowego:

$$Q = \frac{P}{V_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (4.2) [146]$$

- dla spawania hybrydowego (laser + MIG):

$$Q = \frac{(P + U \cdot I)}{V_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

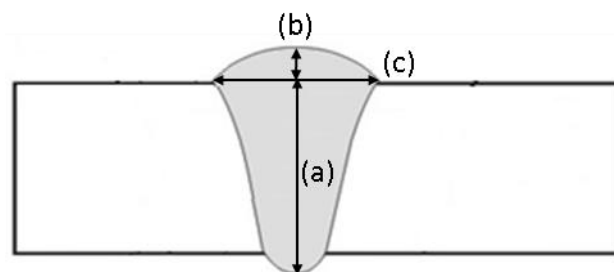
[147]

gdzie: Q – ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]; P – moc lasera [W]; U – napięcie łuku [V]; I – natężenie prądu spawania [A]; V_{sp} – prędkość spawania [mm/s].

Ilość wprowadzonego ciepła na jednostkę długości określana jest w literaturze jako energia liniowa [148].

Niezgodności spawalnicze ujawnione w przeprowadzonych badaniach wizualnych i metalograficznych zostały zaklasyfikowane do jednej z sześciu grup głównych zgodnie z normą PN-EN ISO 6520-1 [149].

Pomiary geometryczne spoin (głębokość wtopienia, wysokość nadlewu i szerokość spoiny) wykonano przy użyciu oprogramowania Inkscape [150]. Na rysunku 4.3 przedstawiono miejsca wykonania pomiarów geometrycznych spoiny.



Rys. 4.3. Miejsca wykonania pomiarów geometrycznych za pomocą oprogramowania Inkscape: a) głębokość wtopienia; b) wysokość nadlewu; c) szerokość spoiny

4.1. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG

Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG blach ze stali 1.4301 i 1.4828 prowadzono w osłonie argonu o natężeniu przepływu 16 l/min. Jako materiał dodatkowy zastosowano drut lity w gat. 308 LSi o średnicy 1,2 mm. Szczegółowe parametry technologiczne podano w podrozdziałach 4.1.1 i 4.1.2.

4.1.1. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG stali 1.4301

Proces napawania łukowego stali 1.4301 przeprowadzono prądem o natężeniu w zakresie 200-300 A, napięcie łuku zawierało się w przedziale od 25 do 30 V, prędkość spawania wynosiła 0,8-1,5 m/min, natomiast prędkość podawania drutu była w zakresie 6,5-10,5 m/min. Zestawienie parametrów napawania przedstawiono w tabelicy 4.1. W tabelicy zawarto również wyniki pomiarów geometrycznych napoin oraz obliczoną ilość wprowadzonego ciepła Q . Na rysunku 4.4 przedstawiono wyniki badań wizualnych i metalograficznych makroskopowych dla wybranych złączy.

Tablica 4.1. Parametry technologiczne oraz wyniki badań wizualnych napoin powstających podczas spawania łukowego metodą MIG stali 1.4301

Stal 1.4301									
Nr złącza	I [A]	U [V]	V_{dr} [m/min]	V_{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 5817
Ł1	200	25	6,5	1,0	0,24	0,7	1,8	6,5	B
Ł2	250	28	8,5	0,8	0,42	2,5	2,1	9,4	C
Ł3	250	28	8,5	1,0	0,34	2,3	1,9	8,3	B
Ł4	250	28	8,5	1,5	0,22	1,8	1,6	6,0	B
Ł5	300	30	10,5	1,0	0,43	3,0	2,2	8,5	B

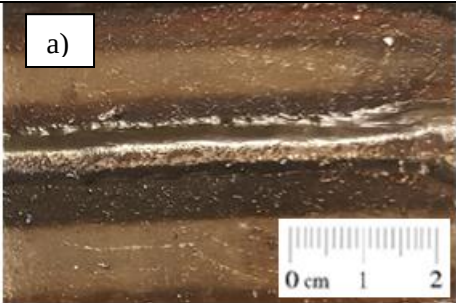
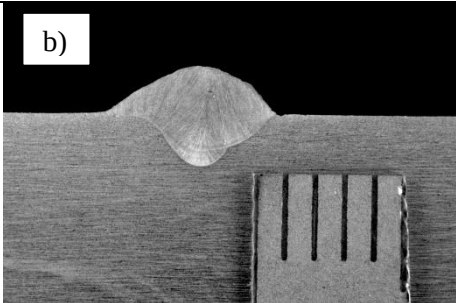
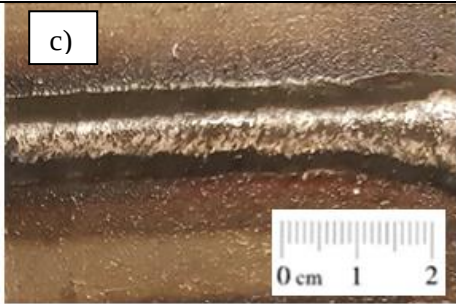
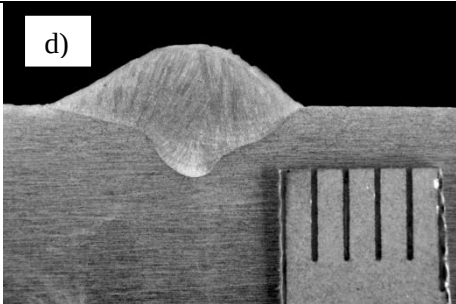
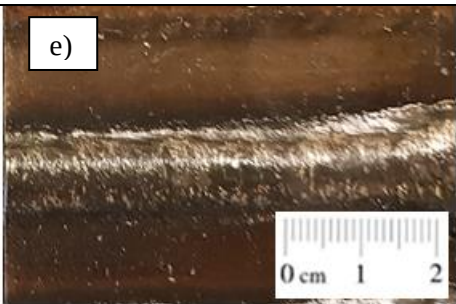
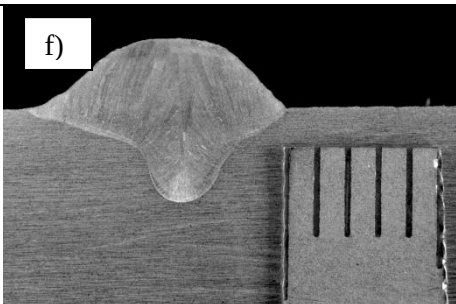
Podczas badań wizualnych napoin stwierdzono, że uzyskane złącza charakteryzują się równomiernym gładkim licem (rys. 4.4 a, c, e). Na powierzchni napawanych blach ujawniono niezgodność spawalniczą nr 602 wg normy PN-EN ISO 6520-1 - rozprysk (cząstki stopiwa rozpryskiwane podczas spawania i przyklejające się do powierzchni materiału podstawowego lub skrzepniętego metalu spoiny) (rys. 4.4 a).

Badania metalograficzne makroskopowe złączy nr Ł1 - Ł5 nie ujawniły niezgodności spawalniczych (rys. 4.4 b, d, f).

Głębokość wtopienia uzyskanych napoin wyniosła od 0,7 do 3 mm. Największą głębokość wtopienia uzyskano dla napoiny wykonanej parametrami spawania: natężenie prądu spawania 300 A, napięcie łuku 30 V (tablica 4.1 – złącze nr Ł5), natomiast najmniejszą głębokością wtopienia charakteryzuje się napoina wykonana prądem spawania 200 A,

napięcie łuku wyniosło 25 V (tablica 4.1 – złącze nr Ł1). Głębokość wtopienia złączy przedstawionych na rys. 4.4 wyniosła 1,8 mm dla złącza nr Ł4 (250 A/ 28 V/ $V_{sp} = 0,8$ m/min); 2,3 mm dla złącza nr Ł3 (250 A/ 28 V/ $V_{sp} = 1,0$ m/min) i 3,0 mm dla złącza nr Ł5 (300 A/ 30 V/ $V_{sp} = 1,0$ m/min) (rys. 4.4 b, d, f).

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 5817 uzyskane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B (złącza nr Ł1, Ł3, Ł4 i Ł5 zgodnie z tablicą 4.1) i C (złącza nr Ł2 wg tablicy 4.1).

Stal 1.4301 – Napawanie łukowe			
Nr złącza wg tablicy 4.1	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
Ł4	0,22		
Ł3	0,34		
Ł5	0,43		

Rys. 4.4. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie napawania łukowego dla stali 1.4301 a-b) złącze nr Ł4, c-d) złącze nr Ł3), e-f) złącze nr Ł5

4.1.2. Próby technologiczne napawania łukowego metodą MIG stali 1.4828

Próby technologiczne napawania łukowego stali 1.4828 przeprowadzono prądem o natężeniu w zakresie 200-300 A, napięcie łuku było w przedziale od 25 do 30 V, prędkość spawania wyniosła 0,8-1,5 m/min, a prędkość podawania drutu 6,5-10,5 m/min. W tablicy 4.2 podano wykaz parametrów technologicznych napawania jak również wyniki pomiarów geometrycznych napoin oraz obliczoną ilość wprowadzonego ciepła Q . Wyniki badań wizualnych i metalograficznych makroskopowych dla wybranych złączy przedstawiono na rysunku 4.5.

Tablica 4.2. Parametry technologiczne oraz wyniki badań wizualnych napoin powstających podczas spawania łukowego metodą MIG stali 1.4828

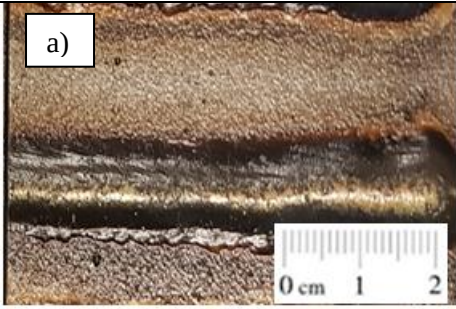
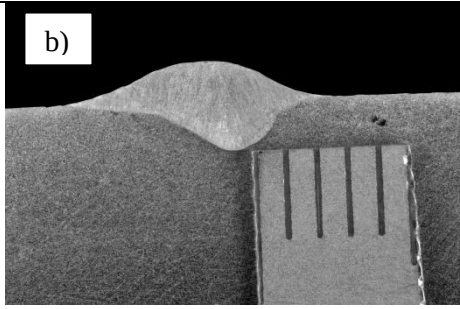
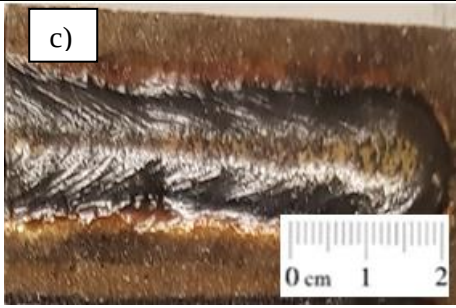
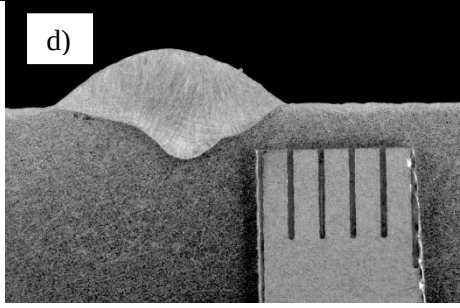
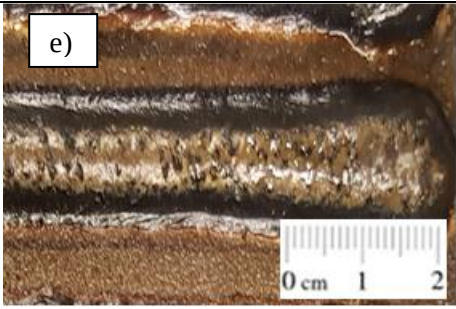
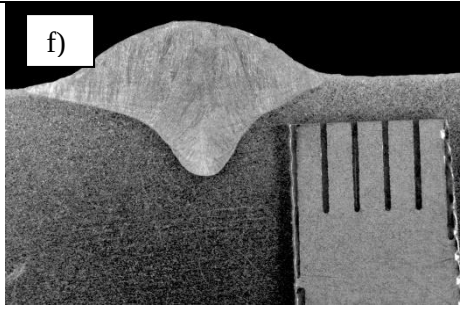
Stal 1.4828									
Nr złącza	I [A]	U [V]	V_{dr} [m/min]	V_{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 5817
Ł6	200	25	6,5	1,0	0,24	0,4	1,8	8,2	B
Ł7	250	28	8,5	0,8	0,42	2,2	2,0	11,8	B
Ł8	250	28	8,5	1,0	0,34	1,7	1,8	7,8	B
Ł9	250	28	8,5	1,5	0,22	1,6	1,3	9,0	B
Ł10	300	30	10,5	1,0	0,43	3,0	2,0	10,4	B

Uzyskane złącza cechują się prawidłowym, gładkim licem (rys. 4.5 a, c, e). Na powierzchni napawanych blach zaobserwowano rozpryski.

Badania metalograficzne makroskopowe wykonanych złączy (nr Ł6-Ł10) nie ujawniły niezgodności spawalniczych (rys. 4.5 b, d, f).

Największą głębokość wtopienia – 3,0 mm ujawniono dla napoiny wykonanej następującymi parametrami: natężenie prądu spawania 300 A, napięcie łuku 30 V (tablica 4.2 – złącze nr Ł10), natomiast najmniejszą głębokością wtopienia – 0,4 mm charakteryzuje się napoina wykonana podczas spawania prądem o natężeniu 200 A i napięciu łuku 25 V (tablica 4.2 – złącze nr Ł6). Głębokość wtopienia złączy przedstawionych na rys. 4.5 wyniosła 1,6 mm dla złącza nr Ł9 (250 A/ 28 V/ $V_{sp} = 1,5$ m/min); 1,7 mm dla złącza nr Ł8 (250 A/ 28 V/ $V_{sp} = 1,0$ m/min) i 3,0 mm dla złącza nr Ł10 (300 A/ 30 V/ $V_{sp} = 1,0$ m/min) (rys. 4.5 b, d, f).

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 5817 wszystkie uzyskane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B.

Stal 1.4828 – Napawanie łukowe			
Nr złącza wg tablicy 4.2	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
Ł9	0,22		
Ł8	0,34		
Ł10	0,43		

Rys. 4.5. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie napawania łukowego dla stali 1.4828 a-b) złącze nr Ł9, c-d) złącze nr Ł8, e-f) złącze nr Ł10

4.2. Próby technologiczne przetapiania laserowego

Próby technologiczne przetapiania laserowego blach ze stali 1.4301 i 1.4828 przeprowadzono dwiema technikami spawania – z oczkiem i z jeziorkiem w osłonie argonu [53]. Techniki te różnią się sposobem oddziaływania wiązki promieniowania na materiał. W przypadku techniki topienia z jeziorkiem (*heat conduction welding*) uzyskany poziom gęstości mocy promieniowania jest wystarczający do wytworzenia jeziorka spawalniczego, ale absorpcja energii wiązki występuje tylko w cienkiej, powierzchniowej warstwie materiału. Nagrzewanie dalszych warstw następuje w wyniku przewodzenia ciepła materiału. Technika topienia z oczkiem (technika głębokiego wtopienia – *deep penetration welding*) charakteryzuje się wyższą gęstością mocy promieniowania (ok. 10^6 W/cm²), co powoduje, że

materiał spawany nie tylko topi się, ale zaczyna też intensywnie parować. Ciśnienie strumienia par metalu osiąga na tyle dużą wartość, że w jeziorku spawalniczym zaczyna się tworzyć zagłębienie – kapilara (tzw. oczko). Ciepło przekazywane jest do materiału spawanego na całej głębokości kapilary, a nie tylko od powierzchni jak to ma miejsce przy zastosowaniu techniki z jeziorkiem [53].

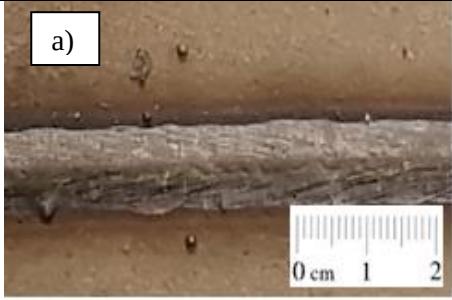
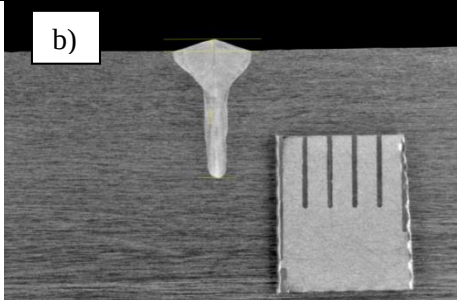
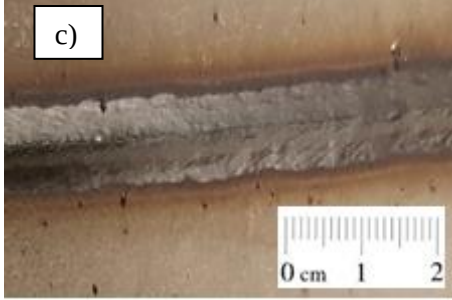
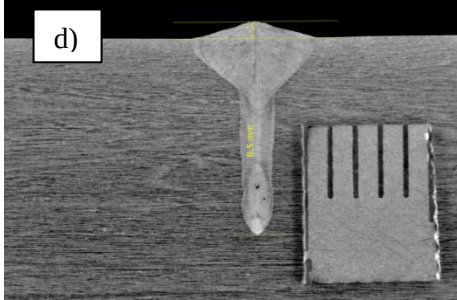
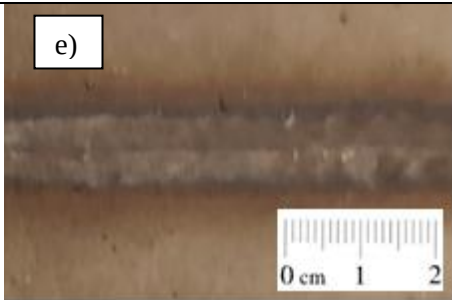
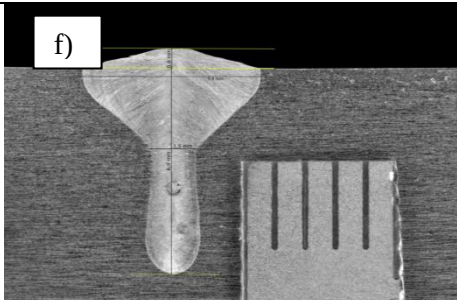
W przypadku techniki z oczkiem średnica ogniska wiązki laserowej w miejscu spawania wynosiła 0,6 mm, natomiast w technice z jeziorkiem 1,7 mm.

4.2.1. Próby technologiczne przetapiania laserowego stali 1.4301

Do przetopienia stali 1.4301 zastosowano wiązkę laserową o mocy w zakresie 2500-6500 W, prędkość przetapiania wynosiła 0,5-1,5 m/min. Zestawienie parametrów przetapiania przedstawiono w tablicy 4.3. W tablicy tej zawarte zostały również wyniki pomiarów geometrycznych napoin oraz obliczona ilość wprowadzonego ciepła Q . Na rysunkach 4.6 i 4.7 przedstawiono wyniki badań wizualnych i metalograficznych makroskopowych dla wybranych złączy.

Tablica 4.3. Parametry technologiczne oraz wyniki pomiarów geometrycznych napoin dla stali 1.4301

Stal 1.4301							
Spawanie laserowe – technika z oczkiem							
Nr złącza	P [W]	V_{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 13919 - 1
L1	2500	0,5	0,30	4,0	0,4	3,9	C
L2	2500	1,0	0,15	3,8	0,4	3,2	C
L3	4500	0,5	0,54	6,9	0,6	5,9	B
L4	4500	1,0	0,27	5,9	0,4	4,3	B
L5	4500	1,5	0,18	5,1	0,5	3,1	B
L6	6500	0,5	0,78	11,3	1,2	6,1	C
L7	6500	1,0	0,39	8,5	0,7	5,1	B
L8	6500	1,5	0,26	7,6	0,7	3,7	B
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem							
Nr złącza	P [W]	V_{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 13919 - 1
L9	2500	0,5	0,30	3,1	0,6	2,5	B
L10	2500	1,0	0,15	2,5	0,1	2,0	B
L11	4500	0,5	0,54	5,4	0,2	6,8	B
L12	4500	1,0	0,27	4,7	0,2	4,4	B
L13	4500	1,5	0,18	3,8	0,5	2,3	B

Stal 1.4301 – Przetapianie laserowe techniką z oczkiem			
Nr złącza wg tablicy 4.3	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
L5	0,18		
L7	0,39		
L3	0,54		

Rys. 4.6. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie przetapiania laserowego techniką z oczkiem dla stali 1.4301 a-b) złącze nr L5, c-d) złącze nr L7, e-f) złącze nr L3

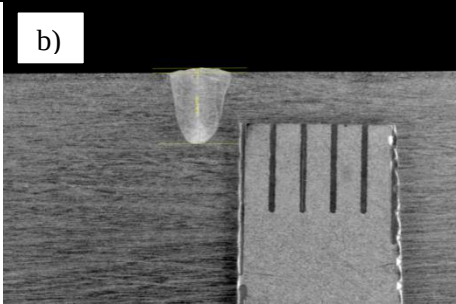
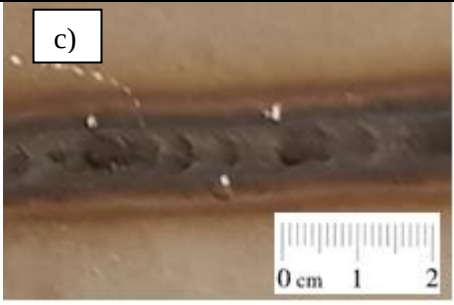
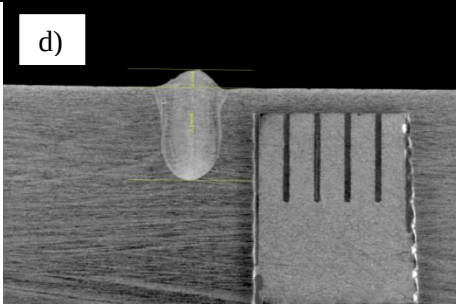
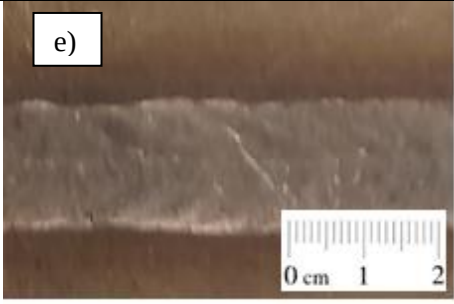
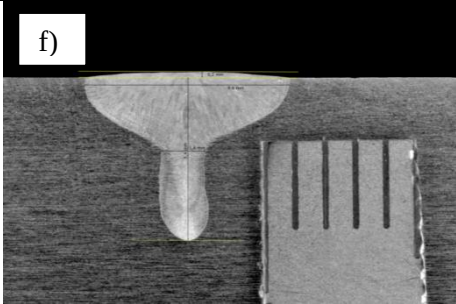
Przeprowadzone badania wizualne przetopień wykonanych techniką z oczkiem wykazały, że uzyskane złącza charakteryzowały się równomiernym gładkim licem (rys. 4.6 a, c, e). Podobnie jak w przypadku napawania łukowego stali 1.4301 na powierzchni napawanych blach ujawniono rozpryski.

Badania metalograficzne makroskopowe złącza nr L5 nie ujawniły niezgodności spawalniczych (rys. 4.6 b), natomiast w złączach L3 i L7 obserwowano występowanie w dolnej części spoiny pęcherzy gazowych (niezgodność spawalnicza nr 200 wg normy PN-EN ISO 6520-1) (rys. 4.6 d, f). Powstanie tej niezgodności wynika ze zbyt szybkiego zamknięcia kanału gazodynamicznego i nieodgazowania jeziora ciekłego metalu.

Głębokość wtopienia uzyskanych przetopień wyniosła od 3,8 do 11,3 mm. Głębokość wtopienia 11,3 mm uzyskano dla napoiny wykonanej mocą wiązki laserowej 6500 W;

z prędkością przetapiania 0,5 m/min (tablica 4.3 – złącze nr L6), natomiast najmniejszą głębokością wtopienia charakteryzuje się napoina wykonana wiązką laserową o mocy 2500 W z prędkością przetapiania 1,0 m/min (tablica 4.3 – złącze nr L2). Głębokość wtopienia złączy przedstawionych na rys. 4.7 wyniosła 5,1 mm dla złącza nr L5 (moc wiązki laserowej 4500 W, prędkość 1,5 m/min); 8,5 mm dla złącza nr L7 (6500 W; 1,0 m/min) i 6,9 mm dla złącza nr L3 (4500 W; 0,5 m/min) (rys. 4.6 b, d, f).

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 13919 -1 uzyskane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B (złącza nr L3, L4, L5, L7, L8 zgodnie z tablicą 4.3) i C (złącza nr L1, L2, L6 wg tablicy 4.3).

Stal 1.4301 – Przetapianie laserowe techniką z jeziorkiem			
Nr złącza wg tablicy 4.3	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
L10	0,15		
L9	0,30		
L11	0,54		

Rys. 4.7. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie przetapiania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4301 a-b) złącze nr L10, c-d) złącze nr L9, e-f) złącze nr L11

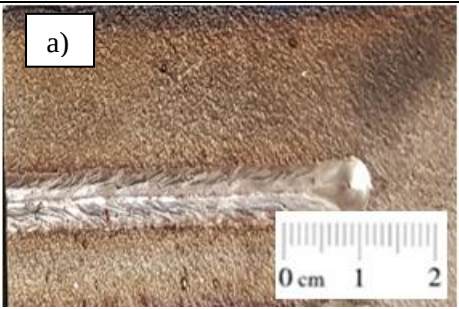
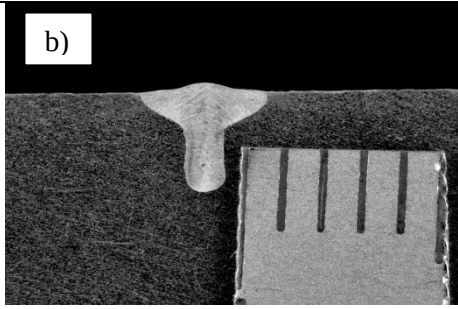
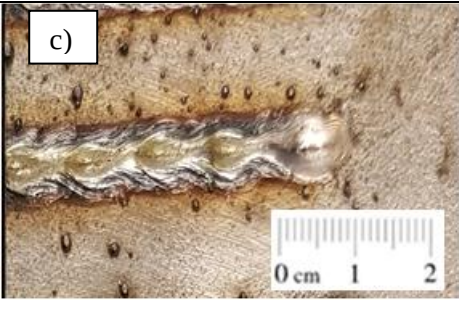
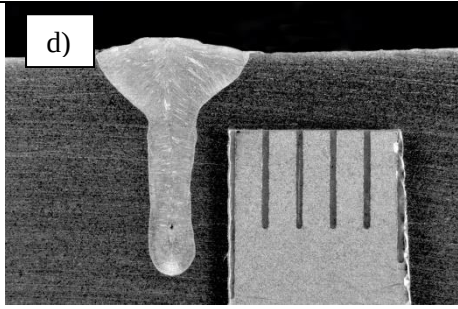
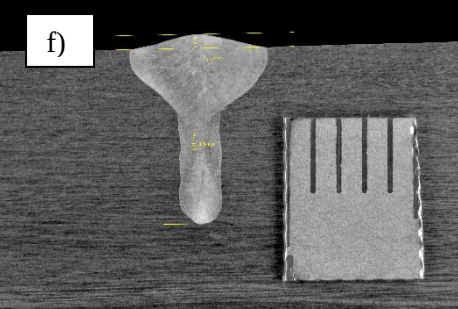
Podczas badań wizualnych stwierdzono, że wszystkie złącza wykonane techniką z jeziorkiem charakteryzowały się równomiernym gładkim licem (rys. 4.7 a, c, e). Na powierzchni napawanych blach ujawniono rozpryski. Badania makroskopowe nie ujawniły występowania niezgodności spawalniczych (rys. 4.7 b, d, f). Wyniki pomiarów geometrycznych wykazały, że największą głębokością wtopienia (5,4 mm), charakteryzowała się napoina wykonana wiązką o mocy 4500 W, przy prędkości 0,5 m/min (tablica 4.3 – złącze nr L11), a najmniejszą głębokość (2,5 mm) uzyskano podczas przetapiania wiązką o mocy 2500 W i prędkości 1,0 m/min (tablica 4.3 – złącze nr L10). Wszystkie wykonane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 13919-1.

4.2.2. Próby technologiczne przetapiania laserowego stali 1.4828

Próby technologiczne przetapiania stali 1.4828 wykonano z użyciem wiązki laserowej o mocy w zakresie 2500-6500 W, prędkość przetapiania wynosiła 0,5-1,5 m/min. W tablicy 4.4 zestawiono parametry technologiczne procesu przetapiania oraz przedstawiono wyniki pomiarów geometrycznych napoin i obliczoną ilość wprowadzonego ciepła Q . Na rysunkach 4.8 i 4.9 pokazano wyniki badań wizualnych i metalograficznych makroskopowych dla wybranych złączy.

Tablica 4.4. Parametry technologiczne oraz wyniki pomiarów geometrycznych napoin dla stali 1.4828

Stal 1.4828							
Spawanie laserowe – technika z oczkiem							
Nr złącza	P [W]	Vsp [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 13919 - 1
L15	2500	0,5	0,30	4,0	0,2	5,1	C
L16	2500	1,0	0,15	3,5	0,3	3,1	C
L17	4500	0,5	0,54	6,7	0,5	5,0	B
L18	4500	1,0	0,27	5,6	0,6	4,0	B
L19	4500	1,5	0,18	4,7	0,3	4,1	B
L20	6500	1,5	0,26	6,5	0,5	4,5	B
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem							
Nr złącza	P [W]	Vsp [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 13919 - 1
L21	2500	0,5	0,30	0,7	0,1	5,0	B
L22	2500	1,0	0,15	1,2	0,1	3,0	B
L23	4500	0,5	0,54	2,4	0,1	4,2	B
L24	4500	1,0	0,27	1,5	0,1	3,3	B
L25	4500	1,5	0,18	1,1	0,1	3,1	B

Stal 1.4828 – Przetapianie laserowe techniką z oczkiem			
Nr złącza wg tablicy 4.4	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
L16	0,15		
L20	0,26		
L17	0,54		

Rys. 4.8. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie przetapiania laserowego techniką z oczkiem dla stali 1.4828 a-b) złącze nr L16, c-d) złącze nr L20, e-f) złącze nr L17

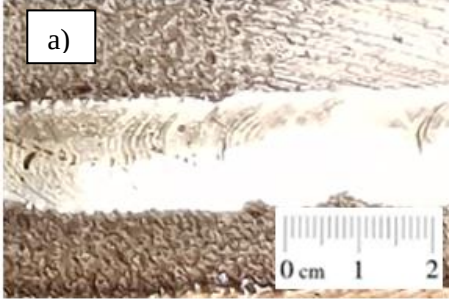
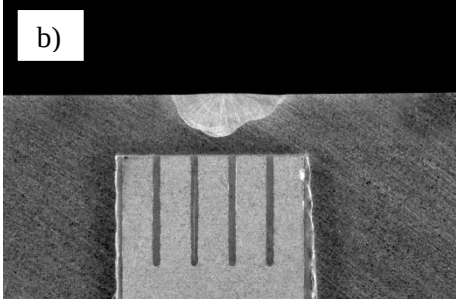
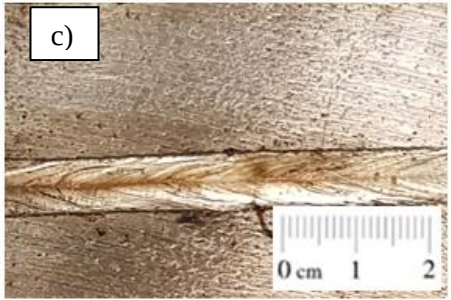
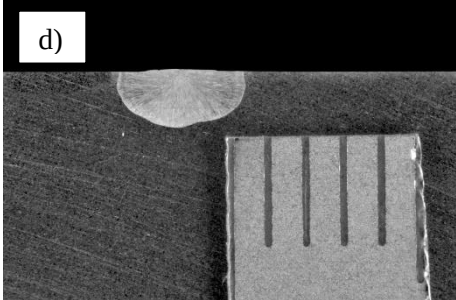
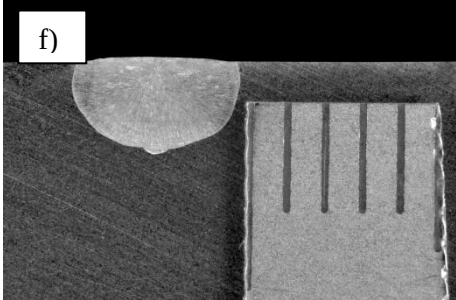
W efekcie przeprowadzonych badań wizualnych przetopień wykonanych techniką z oczkiem zaobserwowano rozpryski na powierzchni przetapianych blach. W przeprowadzonych próbach przetapiania uzyskano złącza o prawidłowym, gładkim licu (rys. 4.8 a, c, e).

Badania metalograficzne makroskopowe złączy nr L17, L18, L19 i L20 nie ujawniły wewnętrznych niezgodności spawalniczych (rys. 4.8 b, d, f), natomiast w złączu L15 i L16 zaobserwowano pęcherze gazowe.

Głębokość wtopienia uzyskanych przetopień wyniosła od 3,5 do 6,7 mm. Największą głębokość wtopienia uzyskano dla napoiny wykonanej mocą wiązki laserowej 4500 W; z prędkością przetapiania 0,5 m/min (tablica 4.4 – złącze nr L17), natomiast najmniejszą

głębokością wtopienia charakteryzuje się napoina wykonana wiązką laserową o mocy 2500 W i prędkości przetapiania 1,0 m/min (tablica 4.4 – złącze nr L16). Głębokość wtopienia złączy przedstawionych na rys. 4.8 wyniosła 3,5 mm dla złącza nr L16; 6,5 mm dla złącza nr L20 (6500 W; 1,5 m/min) i 6,7 mm dla złącza nr L17 (2500 W; 0,5 m/min) (rys. 4.8 b, d, f).

Uzyskane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B (złącza nr L17, L18, L19, L20 zgodnie z tablicą 4.4) i C (złącze nr L15, L16 wg tablicy 4.4) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 13919-1.

Stal 1.4828 – Przetapianie laserowe techniką z jeziorkiem			
Nr złącza wg tablicy 4.4	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
L22	0,15		
L24	0,27		
L23	0,54		

Rys. 4.9. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie przetapiania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4828 a-b) złącze nr L22, c-d) złącze nr L24, e-f) złącze nr L23

Podczas badań wizualnych zaobserwowano, że wszystkie złącza wykonane techniką z jeziorkiem charakteryzowały się równomiernym gładkim licem (rys. 4.9 a, c, e). Na powierzchni napawanych blach ujawniono rozpryski. Badania makroskopowe nie wykazały występowania niezgodności spawalniczych (rys. 4.9 b, d, f). Wyniki pomiarów geometrycznych wykazały, że największą głębokością wtopienia – 2,4 mm, charakteryzowała się napoina wykonana wiązką o mocy 4500 W i prędkości 0,5 m/min (tablica 4.4 – złącze nr L23), a najmniejszą głębokość – 0,7 mm uzyskano podczas przetapiania wiązką o mocy 2500 W i prędkości 0,5 m/min (tablica 4.4 – złącze nr L21). Wszystkie wykonane złącza spełniają wymagania poziomu jakości B zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 13919-1.

4.3. Próby technologiczne napawania hybrydowego

Próby technologiczne napawania hybrydowego blach ze stali 1.4301 i 1.4828 wykonano w konfiguracji A-L (łuk-laser), gdzie uchwyt źródła łukowego znajduje się przed wiązką laserową, jest to tzw. spawanie łukiem wleczonym [60]. Jako materiał dodatkowy zastosowano drut lity w gat. 308 LSi o średnicy 1,2 mm. Proces napawania hybrydowego prowadzony był w osłonie argonu. Średnica ogniska wiązki laserowej w miejscu spawania wyniosła 0,6 mm. Oś wiązki laserowej była ustawiona prostopadle do powierzchni napawanych blach, natomiast uchwyt MIG był ustawiony pod kątem 65° w stosunku do powierzchni blach. Kąt pomiędzy osią wiązki i uchwytem MIG wynosił 25°.

4.3.1. Próby technologiczne napawania hybrydowego stali 1.4301

Próby technologiczne napawania hybrydowego stali 1.4301 przeprowadzono wiązką laserową o mocy w zakresie 2500-6500 W, z prędkością spawania 0,8-1,5 m/min i prędkością podawania drutu 6,5-10,5 m/min.

Zestawienie parametrów pokazano w tablicy 4.5, gdzie przedstawiono również wyniki pomiarów geometrycznych uzyskanych napoin oraz obliczoną ilość wprowadzonego ciepła Q . Na rysunku 4.10 pokazano widok od strony lica i makrostruktury wybranych napoin.

Tablica 4.5. Parametry technologiczne oraz wyniki pomiarów geometrycznych napoin powstających podczas napawania hybrydowego stali 1.4301

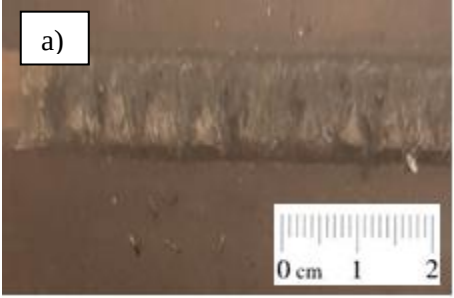
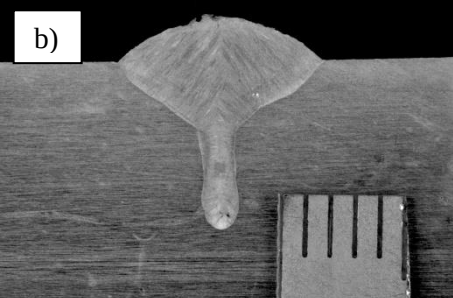
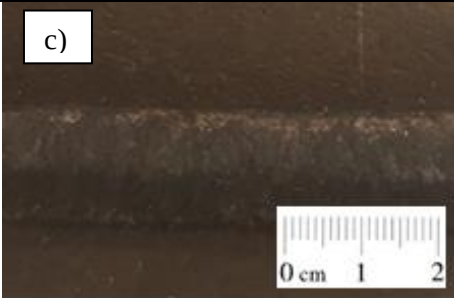
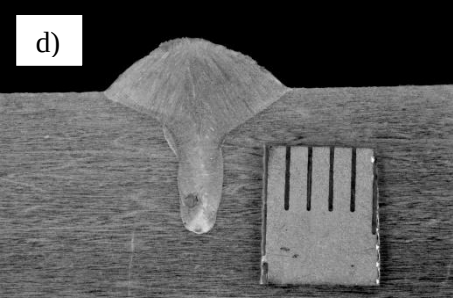
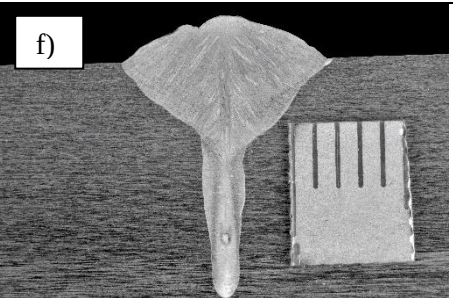
Stal 1.4301										
Nr złącza	P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 12932
H1	2500	250	28	8,5	0,8	0,71	6,3	2,4	8,4	C
H2	2500	250	28	8,5	1,0	0,57	6,1	2,2	8,2	B
H3	2500	250	28	8,5	1,5	0,38	5,5	1,7	7,9	C
H4	4500	250	28	8,5	0,8	0,86	9,4	2,3	8,0	B
H5	4500	250	28	8,5	1,0	0,69	8,0	2,0	7,0	B
H6	4500	250	28	8,5	1,5	0,46	7,6	1,6	7,0	B
H7	6500	250	28	8,5	0,8	1,01	11,2	2,2	11,0	B
H8	6500	250	28	8,5	1,0	0,81	10,7	2,0	9,0	B
H9	6500	250	28	8,5	1,5	0,54	10,2	1,6	8,0	B
H10	4500	200	25	6,5	1,0	0,57	6,4	1,9	8,0	B
H11	4500	300	30	10,5	1,0	0,81	9,6	2,7	8,0	B

Podobnie jak w przypadku napawania łukowego i przetapiania laserowego uzyskane napoiny cechowały się równomiernym gładkim licem, a na powierzchni spawanych blach zaobserwowano rozpryski (rys. 4.10 a, c, e).

Następnie przeprowadzono badania makroskopowe, które ujawniły w dolnej części napoiny pęcherze gazowe powstałe analogicznie jak w przypadku przetapiania laserowego w wyniku zbyt szybkiego zamknięcia kanału gazodynamicznego i nieodgazowania jeziora ciekłego metalu (rys. 4.10 b, d, f). Głębokość wtopienia podczas napawania hybrydowego stali 1.4301 wyniosła od 5,5 do 11,2 mm (tablica 4.5).

Wyniki pomiarów geometrycznych wykazały, że największą głębokość wtopienia uzyskano dla napoiny wykonanej przy następujących parametrach napawania: moc wiązki laserowej 6500 W; prędkość napawania 0,8 m/min; prędkość podawania drutu 8,5 m/min (tablica 4.5 – złącze nr H7). Najmniejszą głębokością wtopienia charakteryzowała się napoina wykonana wiązką laserową o mocy 2500 W, przy prędkości napawania 1,5 m/min i prędkości podawania drutu 8,5 m/min (tablica 4.5 – złącze nr H3).

Złącza nr H2, H4-H11 spełniają wymagania poziomu jakości B, a złącza nr H1 i H3 poziomu C zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 12932.

Stal 1.4301 – Napawanie hybrydowe			
Nr złącza wg tablicy 4.5	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
H6	0,46		
H11	0,81		
H7	1,01		

Rys. 4.10. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie napawania hybrydowego stali 1.4301 a-b) złącze nr H6, c-d) złącze nr H11, e-f) złącze nr H7

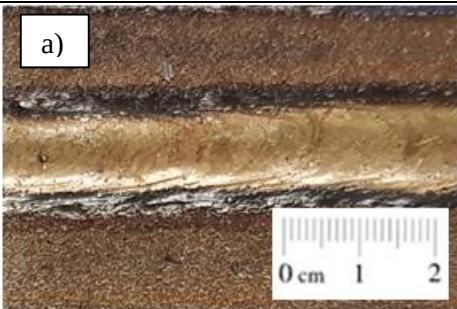
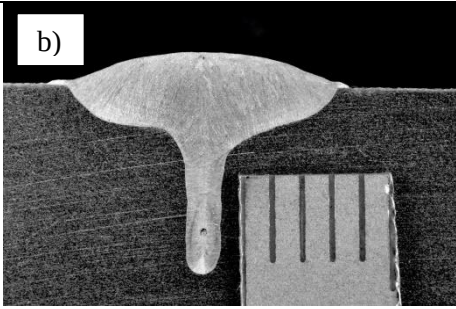
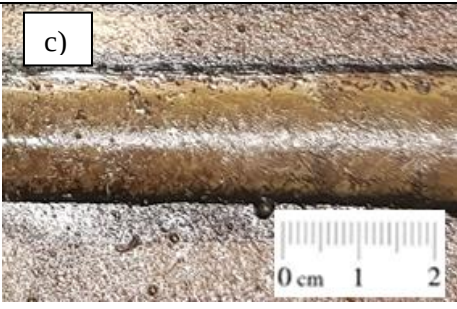
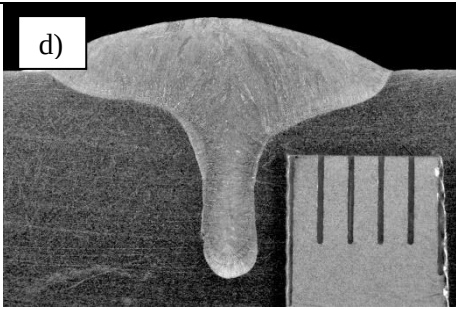
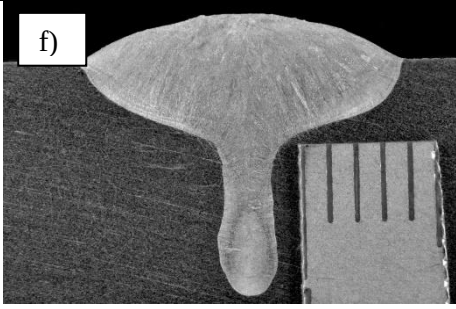
4.3.2. Próby technologiczne napawania hybrydowego stali 1.4828

Podczas napawania hybrydowego stali 1.4828 zastosowano wiązkę laserową w zakresie mocy 2500-6500 W, przy prędkości spawania 0,8-1,5 m/min i prędkości podawania drutu 6,5-10,5 m/min.

Wykaz parametrów technologicznych oraz wyniki pomiarów geometrycznych uzyskanych napoin oraz obliczoną ilość wprowadzonego ciepła Q przedstawiono w tablicy 4.6. Widok od strony lica i makrostruktury wybranych napoin pokazano na rysunku 4.11.

Tablica 4.6. Parametry technologiczne oraz wyniki pomiarów geometrycznych napoin powstających podczas napawania hybrydowego stali 1.4828

Stal 1.4828										
Nr złącza	P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	Głębokość wtopienia [mm]	Wysokość nadlewu [mm]	Szerokość spoiny [mm]	Ocena wg normy PN-EN ISO 12932
H12	2500	250	28	8,5	1,0	0,57	4,0	1,5	10,0	B
H13	4500	250	28	8,5	0,8	0,86	6,9	1,8	11,8	C
H14	4500	250	28	8,5	1,0	0,69	6,7	1,7	10,7	B
H15	4500	250	28	8,5	1,5	0,46	6,3	1,1	9,2	B
H16	6500	250	28	8,5	0,8	1,01	8,6	1,7	12,0	B
H17	6500	250	28	8,5	1,0	0,81	8,2	1,5	11,0	B
H18	6500	250	28	8,5	1,5	0,54	7,7	1,1	9,2	B
H19	4500	200	25	6,5	1,0	0,57	6,3	1,5	8,2	B
H20	4500	300	30	10,5	1,0	0,81	6,9	1,7	12,2	B

Stal 1.4828 – Napawanie hybrydowe			
Nr złącza wg tablicy 4.6	Q [kJ/mm]	Widok od strony lica	Makrostruktura
H15	0,46		
H20	0,81		
H16	1,01		

Rys. 4.11. Widok złącza od strony lica i makrostruktura po procesie napawania hybrydowego stali 1.4828 a-b) złącze nr H15, c-d) złącze nr H20, e-f) złącze nr H16

Przeprowadzone badania wizualne wykazały, że uzyskane napoiny charakteryzowały się równomiernym gładkim licem. Na powierzchni spawanych blach obserwowano rozpryski (rys. 4.11 a, c, e). Badania makroskopowe złącza H13 wg tablicy 4.6 ujawniły w dolnej części napoiny pęcherze gazowe. Głębokość wtopienia podczas napawania hybrydowego stali 1.4828 wyniosła od 4,0 (tablica 4.6 – złącze nr H12) do 8,6 mm (tablica 4.6 złącze nr H16).

Głębokość wtopienia przedstawionych na rys. 4.11 napoin wyniosła 6,3 mm dla złącza H15 (4500 W/ 8,5 m/min, 1,5 m/min), 6,9 mm dla złącza H20 (4500 W/ 10,5 m/min/ 1,0 m/min) i 8,6 mm dla złącza H16 (6500 W/ 8,5 m/min/ 0,8 m/min).

Złącza nr H12 i H15-H20 spełniają wymagania poziomu jakości B, a złącze nr H13 poziomu C zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 12932.

4.4. Podsumowanie prób technologicznych procesu spawania

W podsumowaniu wyników przeprowadzonych prób technologicznych należy stwierdzić, że wykonane napoiny spełniły wymagania jakości dla poziomów B i C według norm: PN-EN ISO 5817 dla spawania łukowego, PN-EN ISO 13919- 1 w odniesieniu do spawania laserowego i PN-EN ISO 12932 dla spawania hybrydowego.

Do głównych ujawnionych niezgodności spawalniczych należy zaliczyć pęcherze gazowe (tj. niezgodności spawalnicze nr 200 wg normy PN-EN ISO 6520-1). Do powstawania pęcherzy przyczyniają się gazy rozpuszczone w ciekłym metalu, które wydzielają się podczas krystalizacji. Jeżeli szybkość krystalizacji jest zbyt duża to gazy nie zdążą wypłynąć i zostają uwięzione w spoinie w postaci pęcherzy (np. rys. 4.13).

Zgodnie z wymaganiami norm dotyczących poziomów jakości [139-141], napoina spełnia wymagania poziomu jakości B, jeśli maksymalny wymiar sumy powierzchni rzutów niezgodności spawalniczych jest mniejszy lub równy 1%. Kryterium to spełnione jest dla zestawów parametrów technologicznych pokazanych w tablicach 4.7 i 4.8.

Tablica 4.7. Zestawienie parametrów technologicznych spawania stali 1.4301, przy których spełnione zostały wymagania poziomu jakości B

Stal 1.4301						
Spawanie łukowe						
Nr złącza	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	
Ł1	200	25	6,5	1,0	0,24	
Ł3	250	28	8,5	1,0	0,34	
Ł4	250	28	8,5	1,5	0,22	
Ł5	300	30	10,5	1,0	0,43	
Spawanie laserowe – technika z oczkiem						
Nr złącza	P [W]	V _{sp} [m/min]		Q [kJ/mm]		
L3	4500	0,5		0,54		
L4	4500	1,0		0,27		
L5	4500	1,5		0,18		
L7	6500	1,0		0,39		
L8	6500	1,5		0,26		
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem						
Nr złącza	P [W]	V _{sp} [m/min]		Q [kJ/mm]		
L9	2500	0,5		0,30		
L10	2500	1,0		0,15		
L11	4500	0,5		0,54		
L12	4500	1,0		0,27		
L13	4500	1,5		0,18		
Spawanie hybrydowe						
Nr złącza	P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]
H2	2500	250	28	8,5	1,0	0,57
H4	4500	250	28	8,5	0,8	0,86
H5	4500	250	28	8,5	1,0	0,69
H6	4500	250	28	8,5	1,5	0,46
H7	6500	250	28	8,5	0,8	1,01
H8	6500	250	28	8,5	1,0	0,81
H9	6500	250	28	8,5	1,5	0,54
H10	4500	200	25	6,5	1,0	0,57
H11	4500	300	30	10,5	1,0	0,81

Tablica 4.8. Zestawienie parametrów technologicznych spawania stali 1.4828, przy których spełnione zostały wymagania poziomu jakości B

Stal 1.4828						
Spawanie łukowe						
Nr złącza	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]	
Ł6	200	25	6,5	1,0	0,24	
Ł7	250	28	8,5	0,8	0,42	
Ł8	250	28	8,5	1,0	0,34	
Ł9	250	28	8,5	1,5	0,22	
Ł10	300	30	10,5	1,0	0,43	
Spawanie laserowe – technika z oczkiem						
Nr złącza	P [W]	V _{sp} [m/min]		Q [kJ/mm]		
L17	4500	0,5		0,54		
L18	4500	1,0		0,27		
L19	4500	1,5		0,18		
L20	6500	1,5		0,26		
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem						
Nr złącza	P [W]	V _{sp} [m/min]		Q [kJ/mm]		
L21	2500	0,5		0,30		
L22	2500	1,0		0,15		
L23	4500	0,5		0,54		
L24	4500	1,0		0,27		
L25	4500	1,5		0,18		
Spawanie hybrydowe						
Nr złącza	P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Q [kJ/mm]
H12	2500	250	28	8,5	1,0	0,57
H14	4500	250	28	8,5	1,0	0,69
H15	4500	250	28	8,5	1,5	0,46
H16	6500	250	28	8,5	0,8	1,01
H17	6500	250	28	8,5	1,0	0,81
H18	6500	250	28	8,5	1,5	0,54
H19	4500	200	25	6,5	1,0	0,57
H20	4500	300	30	10,5	1,0	0,81

Wyznaczone w próbach technologicznych zestawy parametrów przedstawione w tablicach 4.7 i 4.8 zostały wykorzystane do wykonania dalszych badań mających na celu ocenę wpływu parametrów technologicznych spawania łukowego, laserowego i hybrydowego na wielkość emisji pyłu, jego skład chemiczny i morfologię, a w kolejnym etapie do opracowania wytycznych w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.

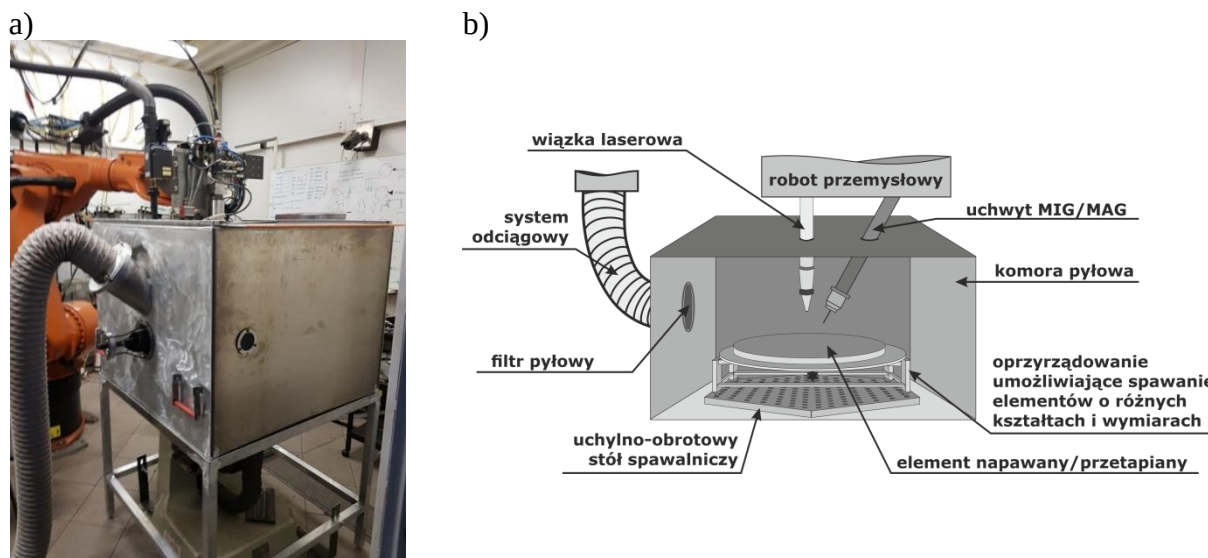
5. Określenie wielkości emisji zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania

5.1. Stanowisko doświadczalne do badania emisji zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania

Stanowisko doświadczalne do badania emisji pyłu podczas spawania laserowego i hybrydowego zostało zaprojektowane i wykonane w Centrum Spawalnictwa [151]. Stanowisko to składa się z czterech zasadniczych podzespołów:

- *komory pyłowej*, w której prowadzony jest proces spawania. Konstrukcja komory pozwala na zabezpieczenie przed wypływem zanieczyszczeń na zewnątrz. W części bocznej komory pyłowej znajduje się króciec odciągowy, na którym umieszczany jest filtr pyłowy. Położenie komory jest stałe, obraca się jedynie element spawany, który umieszczony jest na obrotowym stole spawalniczym.
- *zrobotyzowanego stanowiska do spajania laserowego* – składającego się z lasera przemysłowego na ciele stałym TruDisk 12002 o maksymalnej mocy wiązki laserowej 12 kW oraz robota przemysłowego KUKA KR30HA.
- *zespołu wyciągowego*, składającego się z wentylatora i giętkiego przewodu ssącego. Wydajność przepływu powietrza zapewnia pełne wychwycenie zanieczyszczeń, nieosiadanie pyłu na ściankach komory i jednocześnie nie wpływa na przebieg procesu spawania.
- *stołu uchylno-obrotowego DKP-400*, który dodatkowo wyposażony jest w oprzyrządowanie umożliwiające spawanie elementów o różnych wymiarach.

Stanowisko do badania emisji zanieczyszczeń przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Stanowisko doświadczalne do badania emisji zanieczyszczeń podczas spawania laserowego i hybrydowego; a) widok ogólny, b) schemat stanowiska

5.2. Metodyka oceny emisji pyłu powstającego podczas spawania

Metodyka oceny emisji zanieczyszczeń powstających podczas spawania łukowego została opracowana zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15011 [152]. W oparciu o nią stworzono metodykę do określania emisji pyłu podczas spawania laserowego i hybrydowego, w której wykorzystano komorę pyłową (rys. 5.1 b). Na króćcu odciągowym komory umieszczono filtr typu PTM-B o średnicy 150 mm, który przed założeniem zważono z dokładnością do 0,1 mg. Następnie włączono urządzenie odciągowe i rozpoczęto proces spawania. Zgodnie z procedurą po procesie spawania urządzenie odciągowe pozostało włączone przez 10 minut. Po zakończeniu badania filtr ponownie zważono. Ilość powstającego pyłu określa się metodą grawimetryczną (wagową) na podstawie różnicy mas filtrów przed i po badaniu. Masę wydzielonego w procesie pyłu obliczono wg wzoru (5.1):

$$m_p = m_2 - m_1 \quad [\text{mg}] \quad (5.1)$$

gdzie: m_p - masa pyłu, [mg], m_1 - masa czystego filtru, [mg], m_2 - masa filtru po badaniu, [mg]

Na podstawie badań własnych i wymagań normy PN-EN ISO 15011 określono czas spawania na 60 s, co zapewnia, niezależnie od wielkości parametrów technologicznych procesu, uzyskanie na filtrze pomiarowym niezbędnej ilości pyłu do oznaczenia badanej próbki, tzn. 10 mg.

Wielkość emisji pyłu całkowitego obliczono wg wzoru (5.2):

$$E_p = \frac{m_p}{t} \quad [\text{mg/s}] \quad (5.2)$$

gdzie: E_p – emisja pyłu całkowitego [mg/s], m_p – masa zatrzymanego pyłu, [mg],
 t – czas trwania procesu, [s]

Średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, wartość maksymalną i minimalną, współczynnik zmienności rozumiany jako iloraz odchylenia standardowego i średniej arytmetycznej wyznaczono z trzech pomiarów dla każdego zestawu parametrów spawania. Przyjęto przedział ufności na poziomie 0,05 [153, 154].

5.3. Wyniki badania emisji pyłu całkowitego wydzielającego się podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

W badaniach określono wielkość emisji pyłu całkowitego wydzielającego się podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej w gatunku 1.4301 i 1.4828 w zależności od parametrów technologicznych procesu. W celu wykonania szczegółowej analizy, w tablicach 5.1-5.3 zestawiono wyniki emisji pyłu dla zestawów parametrów technologicznych spełniających poziom jakości B i C wg norm odnoszących się do spawania łukowego, hybrydowego i laserowego [142-144].

Tablica 5.1. Emisja czasowa pyłu całkowitego podczas spawania łukowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828

Parametry technologiczne				E _p [mg/s]	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	Przedział ufności
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]						
1.4301									
250	28	8,5	0,8	2,34	2,23	2,43	0,10	4,36	2,22-2,45
250	28	8,5	1,0	2,27	2,22	2,29	0,04	1,72	2,22-2,31
250	28	8,5	1,5	1,86	1,82	1,91	0,05	2,74	1,80-1,91
200	25	6,5	1,0	1,03	1,02	1,04	0,01	1,26	1,02-1,04
300	30	10,5	1,0	2,60	2,54	2,64	0,05	1,96	2,54-2,65
1.4828									
250	28	8,5	0,8	1,92	1,90	1,94	0,02	0,83	1,91-1,93
250	28	8,5	1,0	1,85	1,81	1,91	0,05	2,81	1,81-1,90
250	28	8,5	1,5	1,58	1,57	1,59	0,01	0,63	1,57-1,59
200	25	6,5	1,0	0,90	0,88	0,94	0,04	3,89	0,87-0,93
300	30	10,5	1,0	2,45	2,33	2,54	0,11	4,45	2,35-2,55

gdzie: I – natężenie prądu [A]; U – napięcie łuku [V]; V_{dr} – prędkość podawania drutu [m/min];
 V_{sp} – prędkość spawania [m/min]; E_p – emisja czasowa pyłu [mg/s]

Tablica 5.2. Emisja czasowa pyłu całkowitego podczas spawania laserowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828

1.4301								
Technika spawania	Parametry technologiczne		E_p [mg/s]	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	Przedział ufności
	P [W]	V_{sp} [m/min]						
Z oczkiem	2500	0,5	0,58	0,57	0,60	0,02	2,62	0,57-0,60
	2500	1,0	0,37	0,35	0,38	0,02	4,17	0,35-0,38
	4500	0,5	0,71	0,69	0,74	0,03	3,53	0,68-0,74
	4500	1,0	0,46	0,44	0,47	0,02	3,34	0,44-0,47
	4500	1,5	0,42	0,41	0,43	0,01	2,77	0,40-0,43
	6500	0,5	0,74	0,71	0,76	0,03	3,42	0,71-0,77
	6500	1,0	0,48	0,46	0,49	0,02	3,23	0,46-0,49
	6500	1,5	0,44	0,43	0,44	0,01	1,33	0,43-0,44
Z jeziorkiem	2500	0,5	0,45	0,44	0,46	0,01	2,22	0,44-0,46
	2500	1,0	0,32	0,31	0,33	0,01	3,13	0,31-0,33
	4500	0,5	0,68	0,67	0,69	0,01	1,71	0,66-0,69
	4500	1,0	0,40	0,40	0,41	0,01	1,43	0,40-0,41
	4500	1,5	0,38	0,37	0,39	0,01	3,01	0,37-0,40

1.4828								
Technika spawania	Parametry technologiczne		E_p [mg/s]	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	Przedział ufności
	P [W]	V_{sp} [m/min]						
Z oczkiem	2500	0,5	0,59	0,58	0,61	0,01	2,36	0,58-0,61
	2500	1,0	0,47	0,46	0,48	0,01	2,31	0,46-0,48
	4500	0,5	0,72	0,71	0,73	0,01	1,54	0,71-0,73
	4500	1,0	0,55	0,54	0,55	0,01	1,37	0,54-0,55
	4500	1,5	0,47	0,45	0,49	0,02	4,59	0,45-0,49
	6500	0,5	0,75	0,72	0,77	0,03	3,35	0,72-0,77
	6500	1,0	0,60	0,57	0,63	0,03	4,98	0,57-0,63
	6500	1,5	0,49	0,48	0,50	0,01	1,89	0,48-0,50
Z jeziorkiem	2500	0,5	0,47	0,45	0,48	0,01	2,43	0,45-0,48
	2500	1,0	0,39	0,37	0,40	0,01	3,24	0,37-0,40
	4500	0,5	0,69	0,68	0,69	0,01	0,74	0,68-0,69
	4500	1,0	0,51	0,48	0,54	0,03	5,88	0,48-0,54
	4500	1,5	0,41	0,38	0,42	0,02	5,77	0,38-0,43

gdzie: P – moc wiązki laserowej [W]; V_{sp} – prędkość spawania [m/min];
 E_p – emisja czasowa pyłu [mg/s]

Tablica 5.3. Emisja czasowa pyłu całkowitego podczas spawania hybrydowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828

1.4301										
Parametry technologiczne					E _p [mg/s]	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	Przedział ufności
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]						
2500	250	28	8,5	0,8	1,34	1,32	1,36	0,02	1,55	1,32-1,37
2500	250	28	8,5	1,0	1,17	1,14	1,20	0,03	2,56	1,14-1,20
2500	250	28	8,5	1,5	0,79	0,78	0,81	0,02	1,93	0,78-0,81
4500	250	28	8,5	0,8	1,46	1,43	1,48	0,03	1,81	1,43-1,49
4500	250	28	8,5	1,0	1,25	1,22	1,27	0,03	2,02	1,22-1,28
4500	250	28	8,5	1,5	1,04	1,00	1,06	0,03	2,96	1,00-1,07
4500	200	25	6,5	1,0	1,01	0,96	1,04	0,04	4,32	0,96-1,06
4500	300	30	10,5	1,0	1,41	1,40	1,43	0,02	1,08	1,40-1,43
6500	250	28	8,5	0,8	1,51	1,43	1,56	0,07	4,64	1,43-1,59
6500	250	28	8,5	1,0	1,39	1,35	1,46	0,06	4,07	1,33-1,46
6500	250	28	8,5	1,5	1,15	1,10	1,17	0,04	3,52	1,10-1,19

1.4828										
Parametry technologiczne					E _p [mg/s]	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]	Przedział ufności
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]						
2500	250	28	8,5	0,8	1,21	1,20	1,23	0,01	1,10	1,20-1,23
2500	250	28	8,5	1,0	1,06	1,06	1,07	0,01	0,65	1,06-1,07
2500	250	28	8,5	1,5	0,67	0,67	0,68	0,01	0,76	0,67-0,68
4500	250	28	8,5	0,8	1,32	1,32	1,33	0,01	0,60	1,32-1,33
4500	250	28	8,5	1,0	1,12	1,10	1,14	0,02	1,49	1,10-1,14
4500	250	28	8,5	1,5	0,90	0,89	0,91	0,01	1,37	0,89-0,91
4500	200	25	6,5	1,0	0,88	0,87	0,89	0,01	1,37	0,87-0,87
4500	300	30	10,5	1,0	1,29	1,28	1,30	0,01	0,78	1,28-1,30
6500	250	28	8,5	0,8	1,40	1,40	1,41	0,01	0,48	1,39-1,41
6500	250	28	8,5	1,0	1,21	1,21	1,22	0,01	0,48	1,20-1,22
6500	250	28	8,5	1,5	1,04	1,03	1,05	0,01	1,16	1,03-1,05

gdzie: P – moc wiązki laserowej [W]; I – natężenie prądu [A]; U – napięcie łuku [V];
V_{dr} – prędkość podawania drutu [m/min]; V_{sp} – prędkość spawania [m/min];
E_p – emisja czasowa pyłu [mg/s]

Analiza uzyskanych wyników dla stali 1.4301 wykazała, że największa emisja wystąpiła podczas spawania łukowego (1,0 - 2,6 mg/s). Natomiast najmniejszą charakteryzowało się spawanie laserowe (0,37-0,75 mg/s dla techniki z oczkiem i 0,32 - 0,69 mg/s dla techniki z jeziorkiem). Podczas spawania hybrydowego wielkość emisji pyłu zawierała się w zakresie od 0,8 do 1,5 mg/s.

Podobną zależność obserwowano dla stali 1.4828. Również największa emisja wystąpiła podczas spawania łukowego (0,90-2,45 mg/s), następnie hybrydowego (0,60-1,40 mg/s). Najmniejszą emisją pyłu charakteryzowało się spawanie laserowe (0,40-0,75 mg/s).

5.3.1. Wpływ gatunku materiału podstawowego na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

Przykładowe wyniki badań emisji pyłu podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 pokazano na rysunku 5.2.

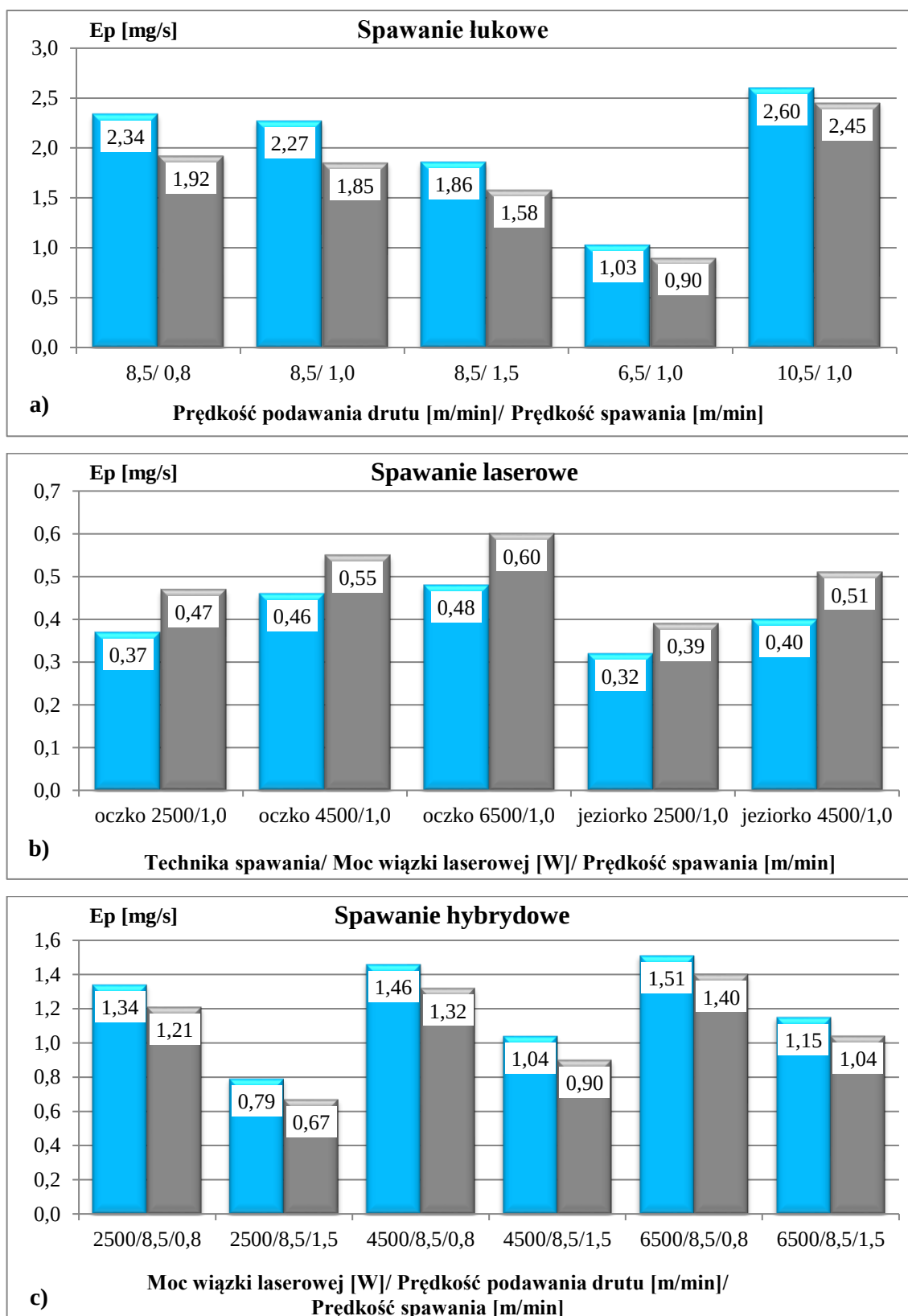
Analiza uzyskanych wyników potwierdziła wpływ gatunku materiału podstawowego na wielkość emisji czasowej zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego.

Podczas spawania łukowego i hybrydowego dla wszystkich analizowanych parametrów technologicznych większa emisja pyłu wystąpiła podczas spawania stali nierdzewnej w gatunku 1.4301 (rys. 5.2 a i c). Wzrost emisji pyłu podczas spawania łukowego tej stali wyniósł od 6% ($V_{dr}=10,5$ m/min; $V_{sp}=1,0$ m/min) do blisko 23% ($V_{dr}=8,5$ m/min; $V_{sp}=1,0$ m/min) w porównaniu do stali 1.4828 (tablica 5.1).

Podczas spawania hybrydowego różnice w emisji pyłu dla obu gatunków stali 1.4301 i 1.4828 zawierały się w przedziale od 7% ($P=6500$ W; $V_{dr}=8,5$ m/min; $V_{sp}=0,8$ m/min) do blisko 18% ($P=2500$ W; $V_{dr}=8,5$ m/min; $V_{sp}=1,5$ m/min) (tablica 5.3).

Podczas spawania laserowego większą emisję wykazano dla stali w gatunku 1.4828. Zależność ta wystąpiła dla obu analizowanych technik spawania laserowego: z oczkiem i z jeziorkiem (rys. 5.2 b). Podczas spawania stali 1.4828 emisja pyłu była większa o od 1,3% ($P=6500$ W; $V_{sp}=0,5$ m/min - technika spawania z oczkiem) do 27,5% ($P=4500$ W; $V_{sp}=1,0$ m/min - technika spawania z jeziorkiem) niż podczas spawania stali 1.4301. Różnice w wielkości emisji pyłu dla prędkości spawania 0,5 m/min nie przekraczały 2% (tablica 5.2).

Analiza wyników badań wykazała, że spawanie łukowe i hybrydowe stali 1.4301 charakteryzowało się większą emisją pyłu w porównaniu do spawania stali 1.4828, natomiast w przypadku spawania laserowego obiema technikami wyższa emisja pyłu wystąpiła dla stali 1.4828.



Rys. 5.2. Wpływ gatunku materiału podstawowego na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania: a) łukowego, b) laserowego, c) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

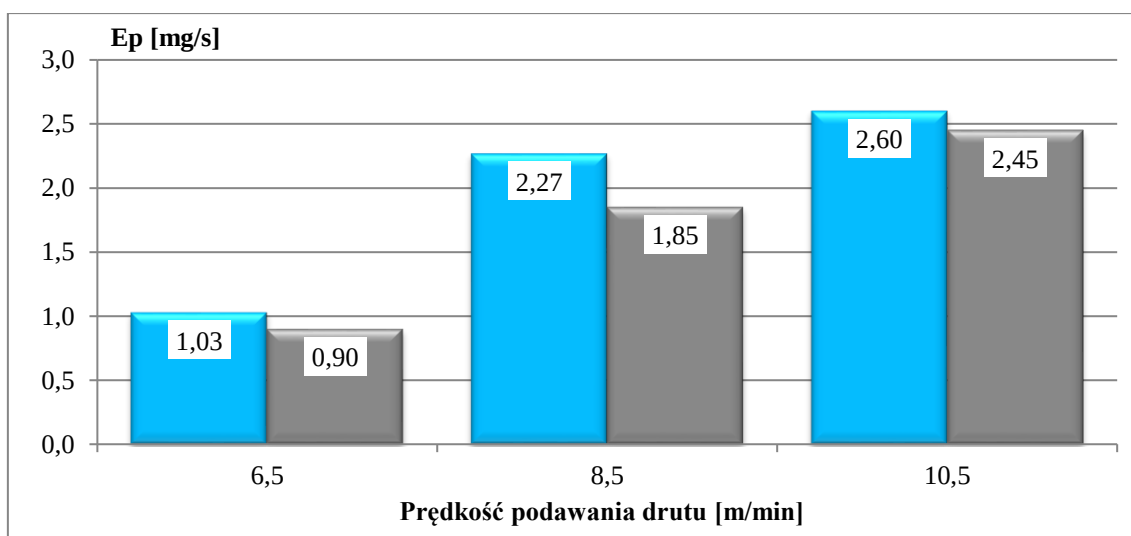
5.3.2. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na wielkość emisji pyłu całkowitego

Uzyskane wyniki umożliwiły określenie wpływu następujących parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych: ilości stopionego materiału dodatkowego charakteryzowanej przez prędkość podawania drutu – V_{dr} [m/min] oraz prędkości spawania – V_{sp} [m/min].

Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego

Badania emisji zanieczyszczeń pyłowych prowadzone były dla trzech prędkości podawania drutu: 6,5; 8,5 i 10,5 m/min. Parametry prądowe przy analizowanych prędkościach podawania drutu były następujące: dla $V_{dr}=6,5$ m/min, $I=200$ A, $U=25$ V; dla $V_{dr}=8,5$ m/min, $I=250$ A, $U=28$ V; dla $V_{dr}=10,5$ m/min, $I=300$ A, $U=30$ V;

Wpływ prędkości podawania drutu przy stałej prędkości spawania wynoszącej 1,0 m/min na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Wpływ prędkości podawania drutu na wielkość emisji pyłu całkowitego powstającego podczas spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że wzrost prędkości podawania drutu spowodował wzrost wielkości emisji pyłu całkowitego. Analizując wyniki emisji pyłu całkowitego podczas spawania stali w gatunku 1.4301 stwierdzono, że przy prędkości podawania drutu 6,5 m/min, emisja wyniosła 1,03 mg/s. Zwiększenie prędkości do 8,5 m/min wiązało się ze wzrostem emisji pyłu o ponad 120% (2,27 mg/s). Przy prędkości podawania

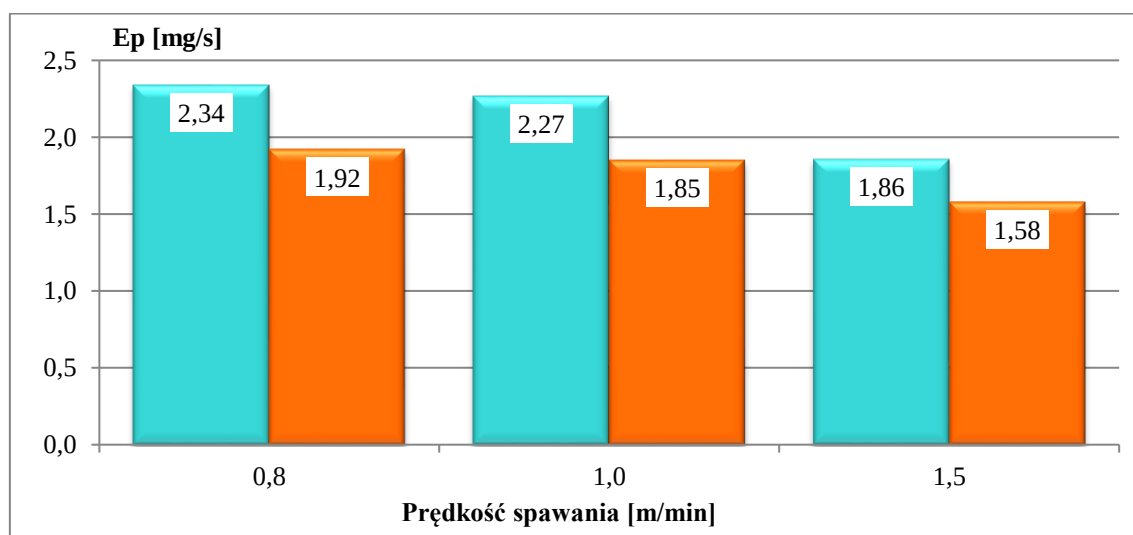
drutu 10,5 m/min emisja pyłu całkowitego wyniosła 2,60 mg/s, co daje wzrost emisji o ponad 1,5 raza w stosunku do emisji dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min i blisko 15% w porównaniu do emisji gdy prędkość podawania drutu wynosiła 8,5 m/min (rys. 5.3).

Podczas spawania stali w gatunku 1.4828 wykazano, że emisja wyniosła 0,90 mg/s (prędkość podawania drutu 6,5 m/min). Wzrost prędkości o 2 m/min wiązał się z ponad dwukrotnym zwiększeniem emisji pyłu (1,85 mg/s). Zwiększenie prędkości podawania drutu do 10,5 m/min powodowało emisję pyłu całkowitego na poziomie 2,45 mg/s, co skutkowało wzrostem emisji o ponad 1,7 raza w stosunku do emisji dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min i blisko 33% w stosunku do emisji przy prędkości podawania wynoszącej 8,5 m/min (rys. 5.3, tablica 5.1).

Uzyskane wyniki badań wykazały, że wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego powoduje wzrost emisji pyłu, co związane jest ze wzrostem ilości przenieszonego materiału w jednostce czasu.

Wpływ prędkości spawania łukowego

Ocenę wpływu prędkości spawania łukowego na wielkość emisji pyłu całkowitego przy stałej prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min ($I=250$ A, $U=28$ V); prowadzono dla trzech wartości: 0,8; 1,0 i 1,5 m/min. Wyniki w formie graficznej pokazano na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Wpływ prędkości spawania na wielkość emisji pyłu całkowitego powstającego podczas spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Wzrost prędkości spawania spowodował obniżenie emisji pyłu całkowitego (rys. 5.4). Podczas spawania stali w gatunku 1.4301 z prędkością 0,8 m/min, emisja wyniosła 2,34 mg/s, zwiększenie prędkości do 1,0 m/min wiązało się ze zmniejszeniem emisji pyłu o 3% (2,27 mg/s). Dla prędkości spawania 1,5 m/min emisja pyłu całkowitego wyniosła 1,86 mg/s, oznacza to spadek emisji o ponad 20% w stosunku do emisji przy prędkości spawania 0,8 m/min i 18% w porównaniu do emisji podczas spawania z prędkością 1,0 m/min (rys. 5.4).

Emisja pyłu podczas spawania stali w gatunku 1.4828 z prędkością 0,8 m/min wyniosła 1,92 mg/s, natomiast wzrost prędkości spawania o 0,2 m/min spowodował spadek emisji o blisko 4% (1,85 mg/s). Spawanie z prędkością 1,5 m/min wiązało się z uzyskaniem emisji pyłu całkowitego na poziomie 1,58 mg/s, co oznacza zmniejszenie o blisko 18% w stosunku do emisji przy prędkości spawania 0,8 m/min i blisko 15% w stosunku do emisji podczas spawania z prędkością 1,0 m/min (rys. 5.4).

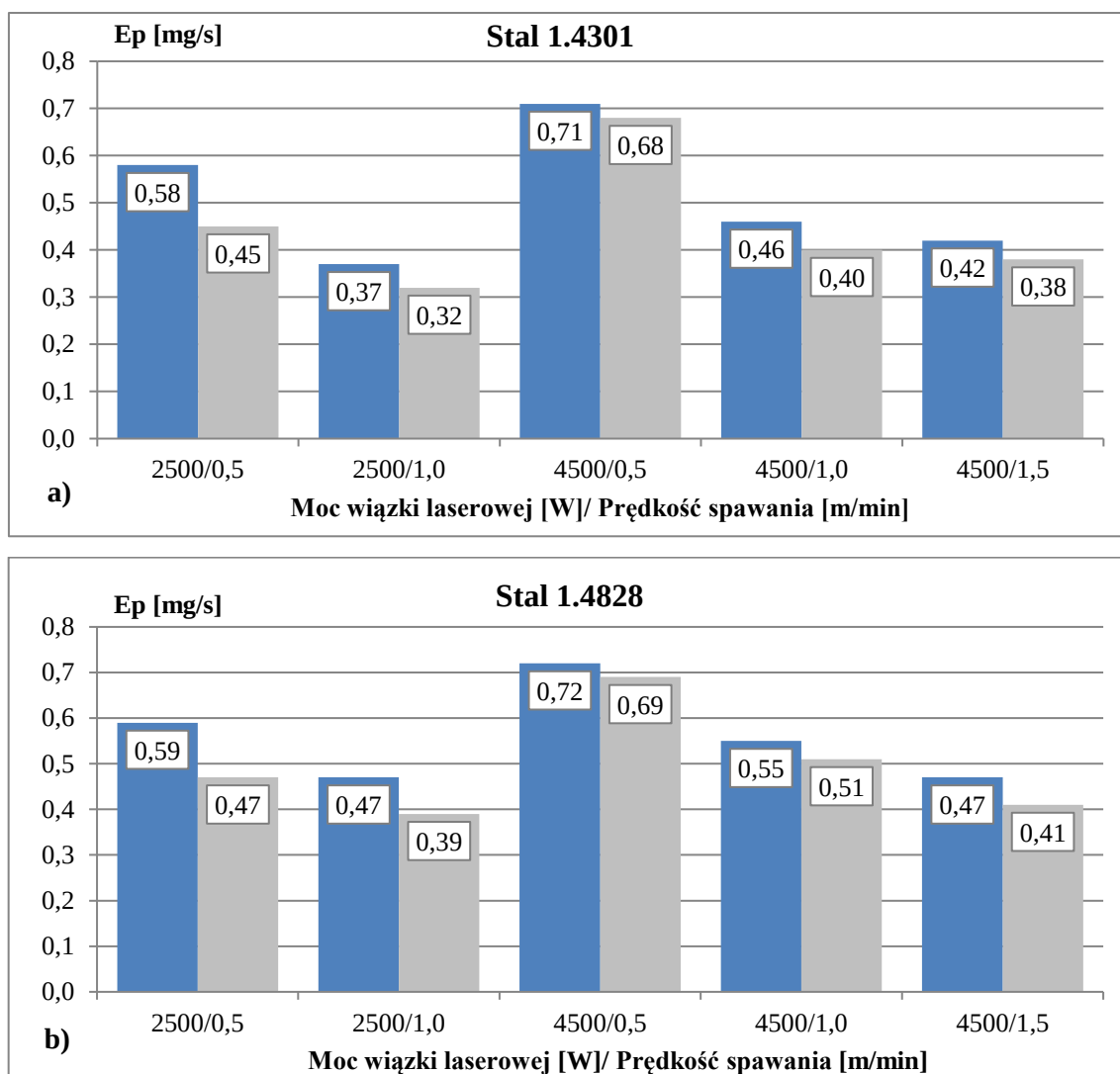
Analiza wyników badań wykazała, że podczas spawania łukowego stali w gatunku 1.4301 i 1.4828 wzrost prędkości spawania powoduje zmniejszenie wielkości emisji pyłu.

5.3.3. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na wielkość emisji pyłu całkowitego

Celem analizy wyników badania emisji pyłu całkowitego wydzielającego się podczas spawania laserowego było poznanie wpływu techniki spawania (z jeziorkiem lub z oczkiem) oraz parametrów technologicznych procesu na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych, w tym: mocy wiązki laserowej w zakresie od 2500 do 4500 W i prędkości spawania od 0,5 do 1,5 m/min.

Wpływ techniki spawania laserowego

Na rysunku 5.5 pokazano wpływ techniki spawania laserowego (spawanie techniką z oczkiem/ spawanie techniką z jeziorkiem) stali w gatunku 1.4301 i 1.4828 na wielkość emisji pyłu całkowitego.



Rys. 5.5. Wpływ techniki spawania laserowego (■ – technika z oczkiem, ■ – technika z jeziorkiem) na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania stali: a) 1.4301, b) 1.4828

Podczas spawania stali 1.4301 techniką z jeziorkiem wiązką laserową o mocy 2500 W z prędkością 0,5 m/min emisja wyniosła 0,45 mg/s, natomiast podczas spawania techniką z oczkiem nastąpił wzrost emisji o blisko 30% (0,58 mg/s). Dla spawania techniką z oczkiem z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 2500 W emisja była o ponad 15% większa (0,37 mg/s) w porównaniu do spawania techniką z jeziorkiem (0,32 mg/s) (tablica 5.2). Porównując wyniki dla mocy wiązki 4500 W i prędkości spawania 0,5 m/min emisja podczas spawania techniką z jeziorkiem była o 4% mniejsza niż w technice z oczkiem (0,71 mg/s). Z kolei podczas spawania wiązką laserową o mocy 4500 W z prędkością 1,0 m/min emisja podczas spawania techniką z jeziorkiem wyniosła 0,40 mg/s i była o 13% mniejsza niż w technice z oczkiem (0,46 mg/s). Dla mocy wiązki 4500 W i prędkości spawania 1,5 m/min emisja podczas spawania techniką z oczkiem była o ponad 10% większa niż w technice z jeziorkiem (rys. 5.5 a).

Spawanie stali 1.4828 techniką z jeziorkiem wiązką laserową o mocy 2500 W z prędkością 0,5 m/min powodowało emisję pyłu wynoszącą 0,47 mg/s, natomiast spawanie techniką z oczkiem - 0,59 mg/s (wzrost o ponad 25%). Podczas spawania techniką z oczkiem z prędkością 1,0 m/min wiązką lasera o mocy 2500 W emisja była o ponad 20% większa w porównaniu do techniki z jeziorkiem (tablica 5.2). Dla mocy wiązki 4500 W i prędkości spawania 0,5 m/min emisja podczas spawania techniką z oczkiem była o 4% większa niż w technice z jeziorkiem (0,69 mg/s). Emisja podczas spawania wiązką laserową o mocy 4500 W z prędkością 1,0 m/min techniką z jeziorkiem wyniosła 0,51 mg/s i była o 7% mniejsza niż w technice z oczkiem. Dla mocy wiązki 4500 W i prędkości spawania 1,5 m/min emisja podczas spawania techniką z oczkiem była o blisko 15% większa niż w technice z jeziorkiem (rys. 5.5 b).

Analiza wyników badań wpływu techniki spawania laserowego na wielkość emisji pyłu wykazała, że spawanie techniką z jeziorkiem charakteryzuje się mniejszą emisją pyłu w porównaniu do spawania techniką z oczkiem. Taką zależność obserwowano dla obu analizowanych gatunków stali odpornych na korozję.

Wpływ mocy wiązki laserowej

Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono wielkość emisji pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 dla dwóch wartości mocy wiązki laserowej (2500 i 4500 W) w technice z jeziorkiem i trzech wybranych wartości mocy wiązki laserowej (2500, 4500 i 6500 W) w technice z oczkiem. Badania prowadzone były dla dwóch wartości prędkości spawania laserowego techniką z jeziorkiem (0,5 i 1,0 m/min) i trzech wartości prędkości spawania laserowego techniką z oczkiem (0,5; 1,0 i 1,5 m/min).

Stal 1.4301

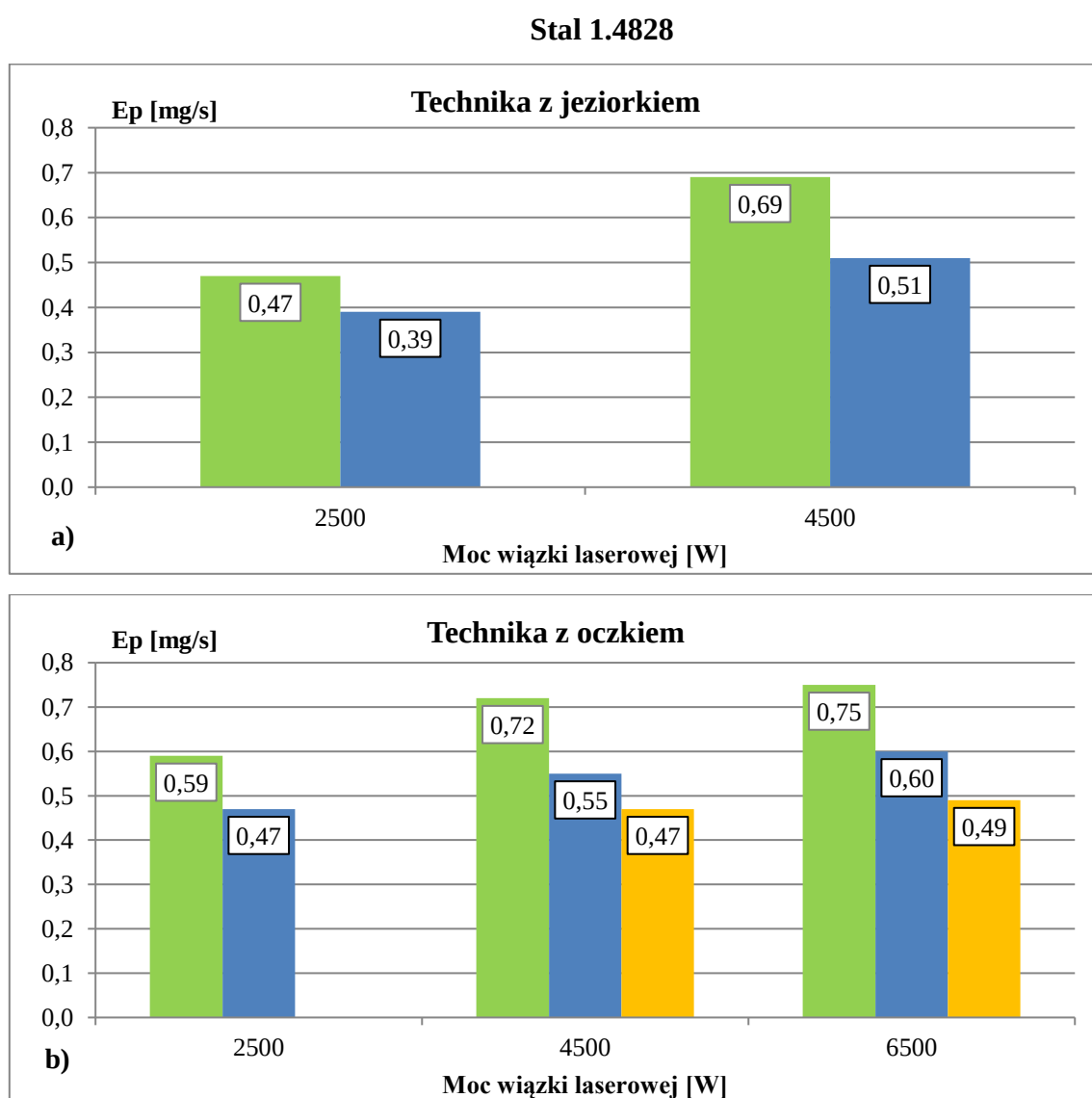


Rys. 5.6. Wpływ wartości mocy wiązki laserowej na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4301 techniką: a) z jeziorkiem, b) z oczkiem z prędkością 0,5 m/min (■), 1,0 m/min (■) i 1,5 m/min (■)

Podczas spawania stali 1.4301 techniką z jeziorkiem z prędkością 0,5 m/min wiązką o mocy 2500 W emisja pyłu wyniosła 0,45 mg/s, zwiększenie mocy do 4500 W wiązało się ze wzrostem emisji o ponad 50% (0,68 mg/s). Natomiast spawanie techniką z jeziorkiem z prędkością 1,0 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W powoduje emisję pyłu całkowitego na poziomie 0,32 mg/s, zwiększenie mocy do 4500 W wiązało się ze wzrostem emisji o 25% (0,40 mg/s) (rys. 5.6 a).

Emisja pyłu całkowitego podczas spawania stali 1.4301 techniką z oczkiem z prędkością spawania 0,5 m/min wiązką o mocy 2500 W wyniosła 0,58 mg/s, zwiększenie mocy lasera do 4500 W spowodowało wzrost emisji pyłu o ponad 22% (0,71 mg/s). Dla mocy wiązki laserowej 6500 W emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,74 mg/s, co daje wzrost

o blisko 28% w stosunku do emisji podczas spawania wiązką o mocy 2500 W i 4% w stosunku do emisji gdy moc wiązki laserowej wynosiła 4500 W. Wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 2500 W była na poziomie 0,37 mg/s, wzrost mocy do 4500 W powodował zwiększenie emisji pyłu o blisko 25% (0,46 mg/s). Podczas spawania wiązką o mocy laserowej 6500 W emisja (0,48 mg/s) była o blisko 30% większa w porównaniu do emisji dla mocy wiązki 2500 W i ponad 4% w stosunku do emisji gdy moc wiązki laserowej wyniosła 4500 W. Emisja pyłu całkowitego podczas spawania z prędkością 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W wyniosła 0,42 mg/s. Wzrost mocy do 6500 W powoduje blisko 5% wzrost emisji pyłu (0,44 mg/s) (rys. 5.6 b).



Rys. 5.7. Wpływ wartości mocy wiązki laserowej na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4828 techniką: a) z jeziorkiem, b) z oczkiem z prędkością 0,5 m/min (■), 1,0 m/min (■) i 1,5 m/min (■)

Spawanie stali 1.4828 techniką z jeziorkiem z prędkością 0,5 m/min wiązką o mocy 2500 W powodowało emisję pyłu na poziomie 0,47 mg/s, zwiększenie mocy do 4500 W wiązało się ze wzrostem emisji o ponad 50% (0,69 mg/s). Natomiast zwiększenie mocy wiązki laserowej z 2500 W do 4500 W podczas spawania techniką z jeziorkiem z prędkością 1,0 m/min powodowało wzrost emisji o 30% (rys. 5.7 a).

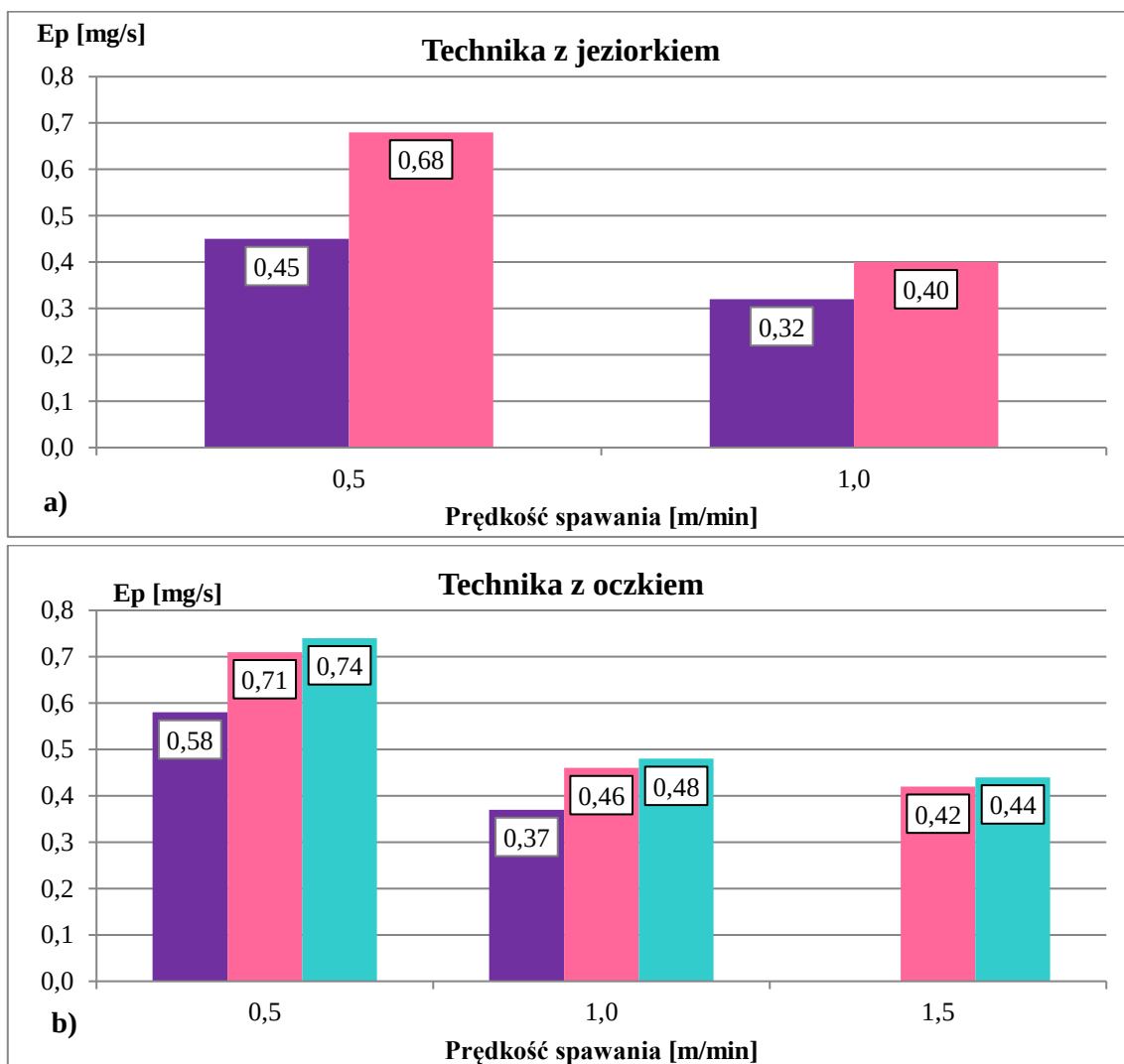
Emisja pyłu całkowitego podczas spawania stali 1.4828 techniką z oczkiem z prędkością spawania 0,5 m/min wiązką o mocy 2500 W wyniosła 0,59 mg/s i była mniejsza w porównaniu do emisji przy mocy wiązki 4500 W o 18% i o ponad 20% do emisji przy mocy wiązki 6500 W. Wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 2500 W wyniosła 0,47 mg/s, zwiększenie mocy do 4500 W skutkowało wzrostem emisji pyłu o 17% (0,55 mg/s). Spawanie wiązką o mocy laserowej 6500 W spowodowało wzrost emisji pyłu o ponad 27% w porównaniu do emisji dla mocy wiązki 2500 W i blisko 10% w stosunku do emisji gdy moc wiązki laserowej wyniosła 4500 W. Podczas spawania z prędkością 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W emisja pyłu wyniosła 0,47 mg/s i była o 4% mniejsza w porównaniu do spawania wiązką laserową o mocy 6500 W (rys. 5.7 b).

Wyniki badań wykazały, że wzrost mocy wiązki laserowej powoduje wzrost wielkości emisji pyłu podczas spawania laserowego, zarówno techniką z oczkiem, jak i z jeziorkiem. Zależność ta jest charakterystyczna dla analizowanych gatunków stali odpornych na korozję – 1.4301 i 1.4828 (tablica 5.2).

Wpływ prędkości spawania

Wpływ prędkości spawania na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunkach 5.8 i 5.9. Na wykresach przedstawiono dane dotyczące emisji zanieczyszczeń dla trzech prędkości spawania (0,5; 1,0 i 1,5 m/min). Badania prowadzone były dla dwóch wartości mocy wiązki laserowej (2500 i 4500 W) podczas spawania techniką z jeziorkiem i trzech wartości mocy wiązki laserowej (2500, 4500 i 6500 W) podczas spawania techniką z oczkiem.

Stal 1.4301



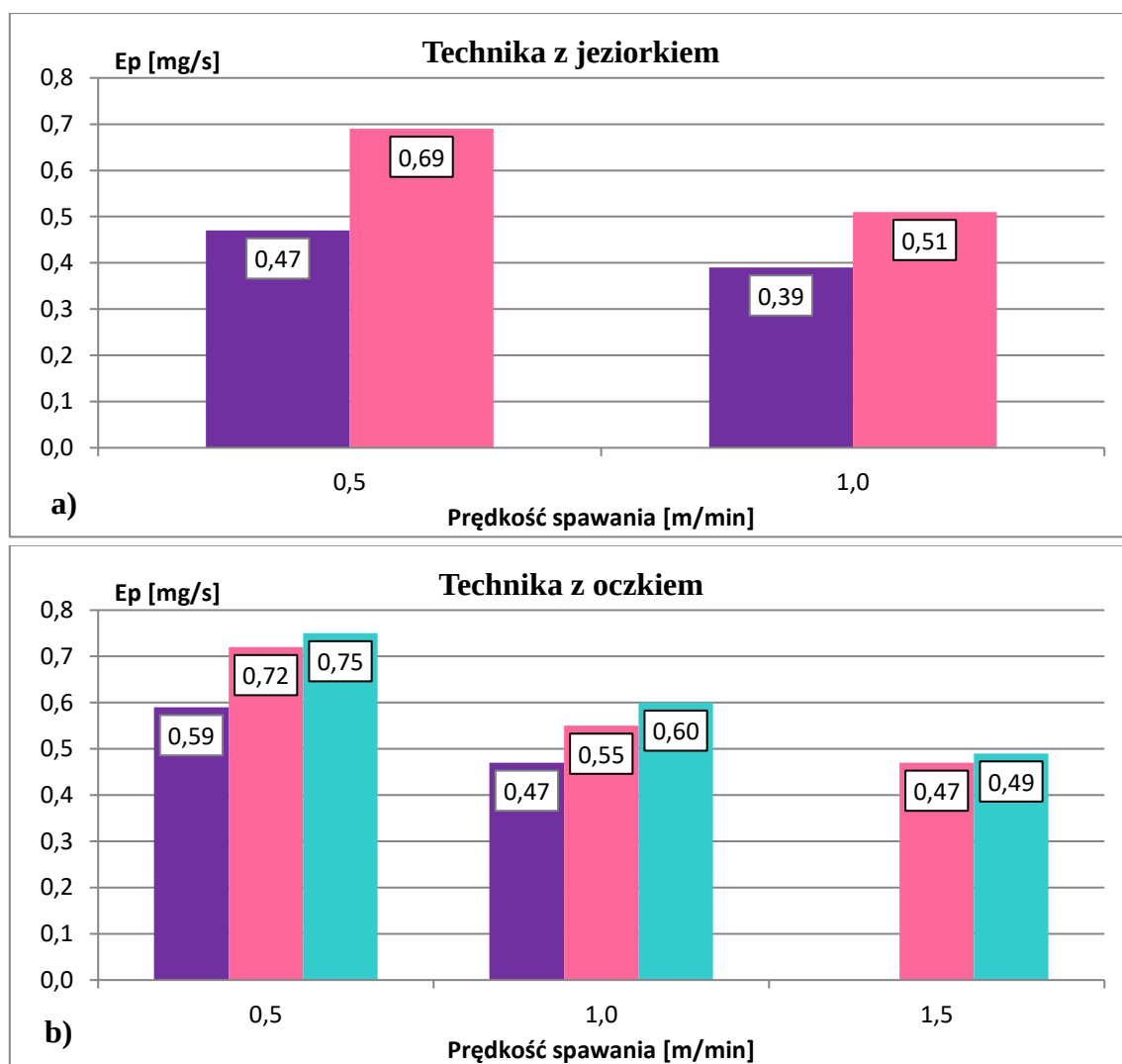
Rys. 5.8. Wpływ prędkości spawania na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4301 techniką: a) z jeziorkiem, b) z oczkiem wiązką o mocy 2500 W (■), 4500 W (■) i 6500 W (■)

Spawanie stali 1.4301 techniką z jeziorkiem z prędkością 0,5 m/min mocą wiązki laserowej 2500 W powodowało emisję pyłu na poziomie 0,45 mg/s, zwiększenie prędkości spawania do 1,0 m/min skutkowało blisko 30% spadkiem emisji (0,32 mg/s). Natomiast podczas spawania wiązką laserową o mocy 4500 W z prędkością 0,5 m/min emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,68 mg/s i była o 70% większa niż podczas spawania z prędkością 1,0 m/min (0,40 mg/s) (rys. 5.8 a).

Emisja pyłu całkowitego w przypadku spawania stali 1.4301 techniką z oczkiem z prędkością 1,0 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W była o ponad 35% mniejsza (0,37 mg/s) niż podczas spawania z prędkością 0,5 m/min (0,58 mg/s). Dla mocy wiązki

laserowej 4500 W i prędkości spawania 0,5 m/min emisja wyniosła 0,71 mg/s i była o 55% większa w porównaniu ze spawaniem z prędkością 1,0 m/min (0,46 mg/s). Spawanie z prędkością 1,5 m/min powodowało emisję wynoszącą 0,42 mg/s. Oznacza to spadek o ponad 40% w porównaniu do emisji przy prędkości 0,5 m/min i ponad 8% w stosunku do emisji, gdy spawano z prędkością wynoszącą 1,0 m/min. Emisja pyłu całkowitego dla mocy wiązki laserowej 6500 W i prędkości spawania 0,5 m/min wyniosła 0,74 mg/s, zwiększenie prędkości spawania do 1,0 m/min spowodowało 35% spadek emisji (0,48 mg/s). Podczas spawania z prędkością 1,5 m/min emisja wyniosła 0,44 mg/s i była o ponad 40% mniejsza w stosunku do emisji przy prędkości 0,5 m/min i ponad 8% w porównaniu do emisji dla spawania z prędkością 1,0 m/min (tablica 5.2; rys. 5.8 b).

Stal 1.4828



Rys. 5.9. Wpływ prędkości spawania na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4828 techniką: a) z jeziorkiem, b) z oczkiem wiązką o mocy 2500 W (■), 4500 W (■) i 6500 W (■)

Podczas spawania stali 1.4828 techniką z jeziorkiem z prędkością 0,5 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W emisja pyłu wyniosła 0,47 mg/s, wzrost prędkości spawania do 1,0 m/min spowodował spadek emisji o blisko 17%. Natomiast podczas spawania wiązką laserową o mocy 4500 W wzrost prędkości spawania z 0,5 m/min do 1,0 m/min powodował spadkiem emisji pyłu całkowitego o ponad 25% (rys. 5.9 a).

Również podczas spawania stali 1.4828 techniką z oczkiem z prędkością 0,5 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W emisja pyłu całkowitego była o ponad 25% większa niż podczas spawania z prędkością 1,0 m/min. Podczas spawania wiązką laserową o mocy 4500 W z prędkością 0,5 m/min emisja wyniosła 0,72 mg/s i była o 30% większa w porównaniu ze spawaniem z prędkością 1,0 m/min (0,55 mg/s) i o 53% w stosunku do emisji podczas spawania z prędkością 1,5 m/min (0,47 mg/s). Z kolei dla mocy wiązki laserowej 6500 W emisja podczas spawania z prędkością 0,5 m/min wyniosła 0,75 mg/s i była o 0,15 mg/s większa niż podczas spawania z prędkością 1,0 m/min. Wzrost prędkości spawania do 1,5 m/min skutkował spadkiem emisji o 35% w odniesieniu do prędkości 0,5 m/min i 25% w porównaniu do prędkości 1,0 m/min (rys. 5.9 b).

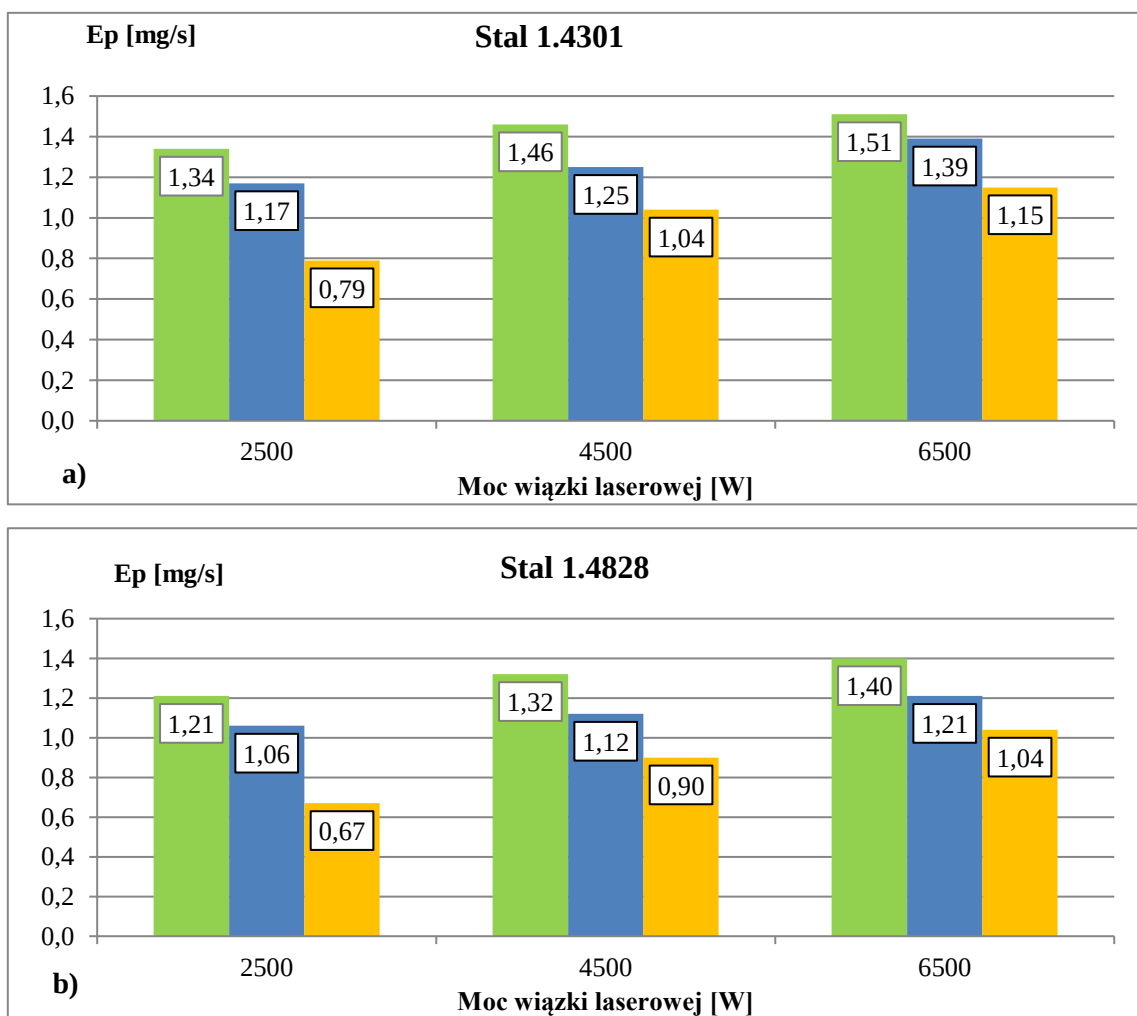
Wykazano, że wzrost prędkości spawania laserowego stali odpornych na korozję w gat. 1.4301 i 1.4828 powoduje zmniejszenie wielkości emisji pyłu podczas spawania zarówno techniką z oczkiem, jak i z jeziorkiem (rys. 5.8 i 5.9).

5.3.4. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na wielkość emisji pyłu całkowitego

Celem analizy była ocena wpływu parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych, a w szczególności: mocy wiązki laserowej, prędkości spawania oraz ilości stopionego materiału dodatkowego charakteryzowanej przez prędkość podawania drutu. Zakres badanych parametrów wynosił: moc wiązki laserowej od 2500 do 6500 W, prędkość spawania od 0,8 do 1,5 m/min, natomiast prędkość podawania drutu w przedziale od 6,5 do 10,5 m/min.

Wpływ wartości mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego

Na rysunku 5.10 zaprezentowano wyniki oceny wpływu mocy wiązki laserowej na wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania hybrydowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828 drutem litym w gat. 308 L Si o średnicy 1,2 mm w osłonie Ar. Badania prowadzono dla stałej prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min.



Rys. 5.10. Wpływ wartości mocy wiązki laserowej na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania hybrydowego stali: a) 1.4301, b) 1.4828 z prędkością 0,8 m/min (■), 1,0 m/min (■) i 1,5 m/min (■)

Emisja pyłu całkowitego podczas spawania stali 1.4301 wiązką laserową o mocy 2500 W z prędkością 0,8 m/min wyniosła 1,34 mg/s, zwiększenie mocy do 4500 W powodowało zwiększenie wielkości emisji pyłu o 9% (1,46 mg/s). Dla mocy wiązki laserowej 6500 W emisja pyłu całkowitego wyniosła 1,51 mg/s, co daje wzrost emisji o 13% w stosunku do emisji przy mocy wiązki 2500 W i niewielki, bo tylko 3,5% wzrost w porównaniu do emisji gdy moc wiązki laserowej wynosiła 4500 W (tablica 5.3).

W przypadku spawania z prędkością 1,0 m/min emisja wyniosła 1,17 mg/s (moc wiązki 2500 W), natomiast dla wiązki o mocy 4500 W nastąpił 7% wzrost emisji (1,25 mg/s). Zwiększenie mocy wiązki laserowej do 6500 W powoduje emisję na poziomie 1,39 mg/s, co oznaczało wzrost o 19% w porównaniu do emisji podczas spawania wiązką o mocy 2500 W i ponad 11% w stosunku do emisji podczas spawania wiązką o mocy 4500 W (rys. 5.10 a).

Emisja pyłu całkowitego podczas spawania z prędkością 1,5 m/min wiązką o mocy 2500 W była na poziomie 0,79 mg/s. Zwiększenie mocy do 4500 W spowodowało ponad 30% zwiększenie emisji (1,04 mg/s). Podczas spawania wiązką o mocy 6500 W emisja pyłu wyniosła 1,15 mg/s, co daje wzrost o ponad 45% w stosunku do emisji dla 2500 W i 10% w porównaniu do emisji gdy spawano wiązką o mocy 4500 W (rys. 5.10 a).

Podczas spawania stali 1.4828 wiązką laserową o mocy 2500 W z prędkością 0,8 m/min emisja pyłu wyniosła 1,21 mg/s, wzrost mocy do 4500 W spowodował zwiększenie wielkości emisji pyłu o 0,11 mg/s. Z kolei dla mocy wiązki laserowej 6500 W emisja pyłu całkowitego wyniosła 1,40 mg/s i była większa o blisko 0,2 mg/s niż podczas spawania wiązką o mocy 2500 W i 0,08 mg/s dla mocy wiązki 4500 W (rys. 5.10 b).

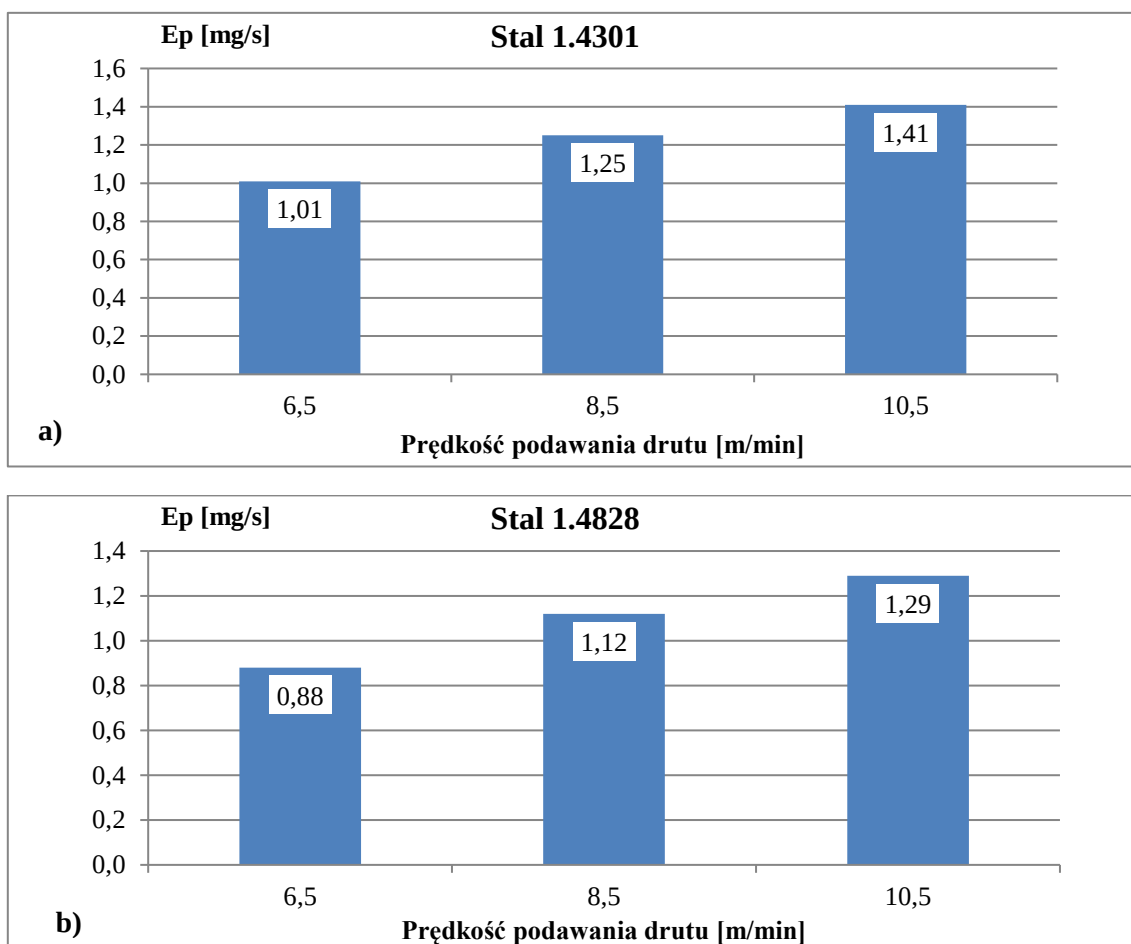
Spawanie wiązką o mocy 6500 W z prędkością 1,0 m/min powodowało emisję pyłu na poziomie 1,21 mg/s i była ona większa o blisko 15% niż podczas spawania wiązką o mocy 2500 W i 8% w porównaniu do spawania wiązką laserową o mocy 4500 W (rys. 5.10 b).

Spawanie z prędkością 1,5 m/min wiązką o mocy 2500 W charakteryzowało się emisją pyłu wynoszącą 0,67 mg/s. Wzrost mocy wiązki do 4500 W wiązał się z blisko 35% zwiększeniem emisji. Natomiast podczas spawania wiązką o mocy 6500 W emisja pyłu wyniosła 1,04 mg/s, czyli była większa o 0,37 mg/s w porównaniu do emisji dla 2500 W i o 0,14 mg/s w porównaniu do spawania wiązką o mocy 4500 W (rys. 5.10 b).

Analiza wyników badań wykazała, że podobnie jak w przypadku spawania laserowego, dla stałej wartości prędkości spawania wzrost mocy wiązki laserowej powoduje wzrost wielkości emisji pyłu całkowitego zarówno dla stali 1.4301, jak i 1.4828.

Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego

Na rysunku 5.11 przedstawiono dane dotyczące emisji zanieczyszczeń dla trzech badanych wartości prędkości podawania drutu (6,5; 8,5 i 10,5 m/min) odnoszącej się do ilości stopionego materiału dodatkowego, pozostałe parametry technologiczne były stałe i wynosiły: moc wiązki laserowej 4500 W, prędkość spawania 1,0 m/min.



Rys. 5.11. Wpływ prędkości podawania drutu na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania hybrydowego stali: a) 1.4301, b) 1.4828

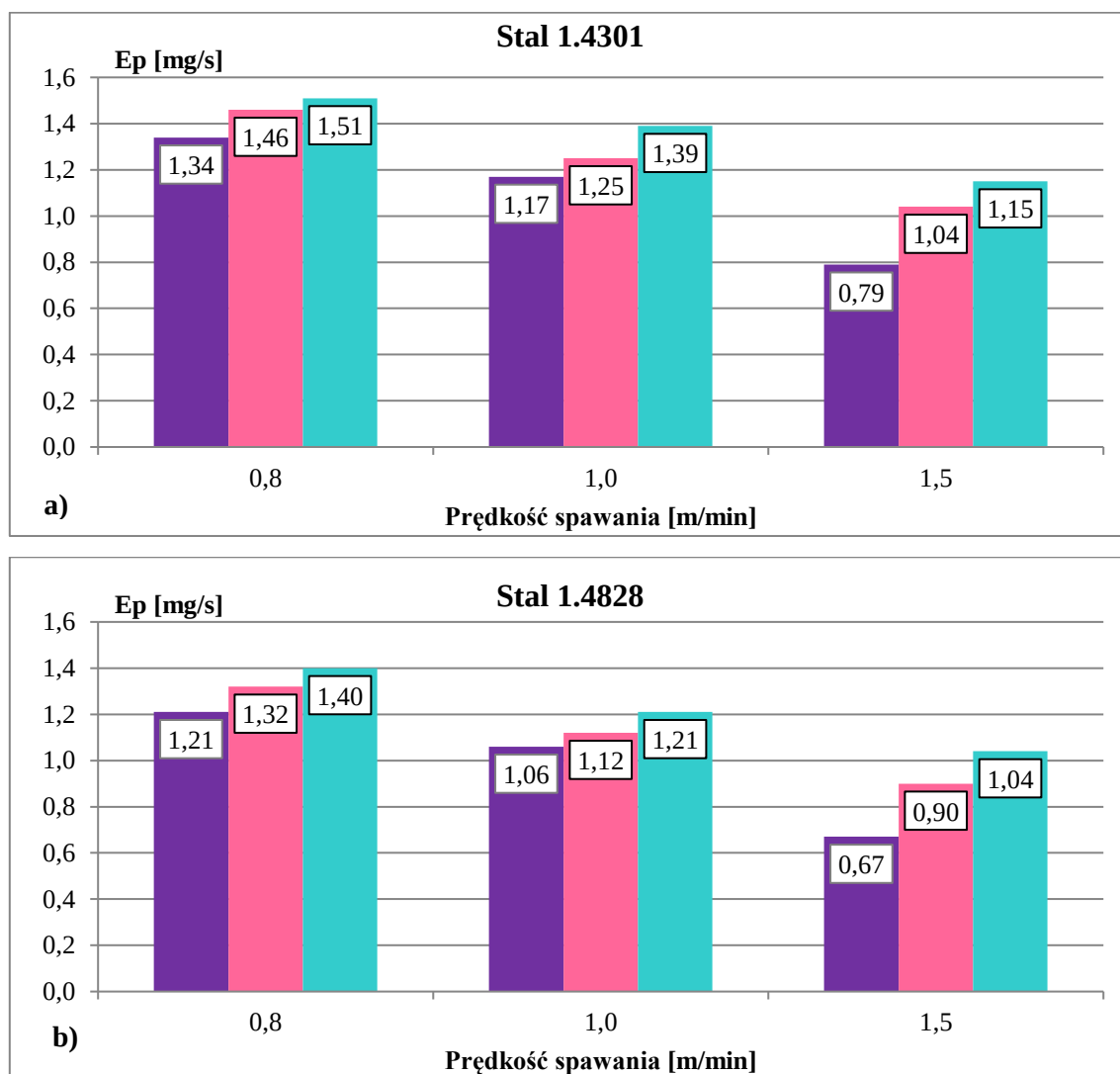
Dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min, podczas spawania stali 1.4301 emisja wyniosła 1,01 mg/s, zwiększenie prędkości do 8,5 m/min wiązało się z blisko 25% wzrostem emisji (1,25 mg/s). Wzrost prędkości podawania drutu do 10,5 m/min skutkował emisją pyłu całkowitego na poziomie 1,41 mg/s, co oznacza wzrost emisji o prawie 40% w stosunku do emisji przy prędkości podawania drutu 6,5 m/min i blisko 13% w porównaniu do emisji gdy prędkość podawania drutu wynosiła 8,5 m/min (rys. 5.11 a).

Spawanie stali 1.4828 z prędkością podawania drutu 6,5 m/min wiązało się emisją pyłu wynoszącą 0,88 mg/s, wzrost prędkości podawania drutu do 8,5 m/min spowodował wzrost emisji o 0,24 mg/s. Podczas spawania z prędkością podawania drutu do 10,5 m/min emisja pyłu całkowitego była większa o ponad 46% w porównaniu do emisji przy prędkości podawania drutu 6,5 m/min i 15% w stosunku do emisji gdy prędkość podawania drutu wynosiła 8,5 m/min (rys. 5.11 b).

Stwierdzono, że podobnie jak podczas spawania łukowego, wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego powoduje wzrost wielkości emisji pyłu całkowitego.

Wpływ prędkości spawania hybrydowego

Wpływ prędkości spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na wielkość emisji pyłu całkowitego pokazano na rysunku 5.12. Badania prowadzono dla trzech wartości mocy wiązki laserowej i prędkości spawania, natomiast prędkość podawania drutu była stała i wynosiła 8,5 m/min.



Rys. 5.12. Wpływ prędkości spawania na wielkość emisji czasowej pyłu podczas spawania hybrydowego stali: a) 1.4301, b) 1.4828 wiązką o mocy 2500 W (■), 4500 W (■) i 6500 W (■)

Wielkość emisji pyłu całkowitego podczas spawania stali 1.4301 z prędkością 0,8 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W wyniosła 1,34 mg/s, zwiększenie prędkości do 1,0 m/min wiązało się ze zmniejszeniem emisji pyłu o blisko 13% (1,17 mg/s). Dla prędkości spawania 1,5 m/min emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,79 mg/s i była mniejsza o 41% w porównaniu do emisji gdy spawano z prędkością 0,8 m/min i ponad 30% w porównaniu do emisji przy prędkości spawania 1,0 m/min (tablica 5.3).

Podczas spawania z prędkością 0,8 m/min wiązką laserową o mocy 4500 W emisja wyniosła 1,46 mg/s i była o 14% większa niż przy prędkości 1,0 m/min (1,25 mg/s). Zwiększenie prędkości spawania do 1,5 m/min powoduje emisję na poziomie 1,04 mg/s, co oznacza spadek o blisko 30% w porównaniu do emisji dla prędkości 0,8 m/min, a blisko 17% w stosunku do emisji przy prędkości 1,0 m/min.

Natomiast w przypadku spawania z prędkością 0,8 m/min wiązką o mocy 6500 W wielkość emisji wyniosła 1,51 mg/s, wzrost prędkości spawania o 0,2 m/min wiązał się z 8% zmniejszeniem emisji (1,39 mg/s). Podczas spawania z prędkością 1,5 m/min, emisję oznaczono na poziomie 1,15 mg/s, co daje blisko 25% spadek w stosunku do emisji przy prędkości 0,8 m/min, natomiast w porównaniu do emisji podczas spawania z prędkością wynoszącą 1,0 m/min był to spadek o ponad 17% (rys. 5.12 a).

Podczas spawania stali 1.4828 z prędkością 0,8 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W wielkość emisji pyłu całkowitego wyniosła 1,34 mg/s. Wzrost prędkości spawania o 0,2 m/min spowodował zmniejszenie emisji pyłu o 0,15 mg/s. Dla spawania z prędkością 1,5 m/min emisja pyłu całkowitego wyniosła 0,67 mg/s i była mniejsza o blisko 45% w porównaniu do emisji gdy spawano z prędkością 0,8 m/min i 12% w porównaniu do emisji przy prędkości spawania 1,0 m/min (tablica 5.3).

Dla spawania z prędkością 0,8 m/min wiązką laserową o mocy 4500 W emisja wyniosła 1,32 mg/s i była większa o 0,2 mg/s w porównaniu do emisji przy prędkości spawania 1,0 m/min i o 0,42 mg/s w stosunku do emisji podczas spawania z prędkością 0,8 m/min (rys. 5.12 b).

Z kolei spawanie z prędkością 0,8 m/min wiązką o mocy 6500 W powodowało emisję na poziomie 1,40 mg/s. Wartość ta była większa o 13% niż podczas spawania z prędkością 1,0 m/min i o 25% w porównaniu do emisji podczas spawania z prędkością 1,5 m/min (rys. 5.12 b).

Analiza wyników badań wykazała, że wzrost prędkości spawania hybrydowego we wszystkich przeprowadzonych próbach dla obu gatunków stali odpornych na korozję powoduje obniżenie wielkości emisji pyłu (rys. 5.12).

W podsumowaniu należy stwierdzić, że wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego i hybrydowego powoduje zwiększenie emisji pyłu całkowitego (rys. 5.3 i 5.11). Wzrost emisji pyłu spawalniczego spowodowany zwiększeniem prędkości podawania drutu związany jest z dostarczeniem większej ilości materiału dodatkowego w jednostce czasu, a jego parowanie w jezioru ciekłego metalu przekłada się na większą emisję powstających zanieczyszczeń pyłowych.

Wykazano, że wraz ze wzrostem wartości mocy wiązki laserowej wzrasta wielkość emisji pyłu całkowitego. Wzrost mocy wiązki laserowej powoduje zwiększenie głębokości wtopienia, co przekłada się na zwiększenie obszaru parowania ciekłego metalu i skutkuje większą emisją pyłu całkowitego. Zależność tą zaobserwowano zarówno podczas spawania laserowego, jak i hybrydowego (rys. 5.6, 5.7 i 5.10).

Natomiast wzrost prędkości spawania spowodował zmniejszenie emisji pyłu całkowitego. Spadek emisji pyłu spawalniczego wynikający ze zwiększenia prędkości spawania spowodowany jest dostarczeniem mniejszej ilości materiału dodatkowego na jednostkę powierzchni, co przekłada się na mniejszą głębokość wtopienia. Mniejsza powierzchnia parowania skutkuje mniejszą emisją powstających zanieczyszczeń. To powiązanie wykazano dla wszystkich trzech analizowanych metod spawania (rys. 5.4, 5.9, 5.12).

Zależności te obserwowano dla obydwu analizowanych gatunków stali odpornych na korozję – 1.4301 i 1.4828.

6. Charakterystyka zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie spawania

6.1. Analiza składu chemicznego pyłu

W celu wykonania analizy składu chemicznego pyłu wykorzystano próbki pyłu pobrane zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 5.2.

Badania składu chemicznego próbek pyłu wykonano na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej z systemem spektroskopii dyspersji energii (SEM-EDS *Skaning Electron Microscopy - Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*). Wykonano mikroanalizę składu chemicznego ujawnionych faz w pyłe metodą spektroskopii promieniowania X z dyspersją energii (EDS). Badania wykonano przy napięciu 15kV na analizatorze System Six firmy Hitachi Thermo Noran współpracującym z mikroskopem HITACHI S-3400N. Skład chemiczny próbek pyłu oznaczono w 3 punktach w celu oceny jednorodności próbek.

6.1.1. Wyniki analizy składu chemicznego pyłu spawalniczego

W tablicach 6.1 - 6.3 przedstawiono wyniki analizy składu chemicznego próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828 jako średnią arytmetyczną z 3 pomiarów.

Tablica 6.1. Skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie łukowe stali 1.4301								
Parametry technologiczne				Udział masowy [%]				
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
250	28	8,5	0,8	3,9	22,0	12,4	55,0	6,7
250	28	8,5	1,0	3,9	21,6	12,2	55,4	6,8
250	28	8,5	1,5	4,5	21,2	11,3	55,6	7,4
200	25	6,5	1,0	3,7	20,8	12,8	56,5	6,2
300	30	10,5	1,0	5,1	21,3	11,1	54,7	7,8
Spawanie łukowe stali 1.4828								
Parametry technologiczne				Udział masowy [%]				
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
250	28	8,5	0,8	5,0	22,3	9,2	55,7	7,8
250	28	8,5	1,0	5,8	21,6	7,8	56,4	8,4
250	28	8,5	1,5	5,9	20,9	6,7	58,1	8,5
200	25	6,5	1,0	5,7	20,2	8,3	59,8	6,0
300	30	10,5	1,0	6,1	22,0	7,5	55,8	8,6

Tablica 6.2. Skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie laserowe stali 1.4301						
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Udział masowy [%]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
4500	0,5	0,6	24,5	13,9	56,4	4,7
4500	1,0	0,3	21,5	12,0	61,1	5,1
4500	1,5	0,2	21,6	11,9	61,2	5,1
6500	1,0	0,3	23,8	14,5	56,6	4,9
6500	1,5	0,5	22,2	12,7	59,5	5,2
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Udział masowy [%]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	0,7	25,2	11,4	58,3	4,4
2500	1,0	0,3	24,0	12,6	59,0	4,2
4500	0,5	0,3	24,9	13,9	56,9	4,1
4500	1,0	0,1	24,3	13,7	58,3	3,7
4500	1,5	0,3	20,6	13,5	62,0	3,7
Spawanie laserowe stali 1.4828						
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Udział masowy [%]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	1,4	24,5	4,8	60,1	9,2
4500	0,5	1,5	24,6	3,9	61,9	8,1
4500	1,0	1,9	23,4	4,6	61,8	8,3
4500	1,5	1,6	23,6	5,3	61,4	8,2
6500	1,0	1,0	25,0	5,1	60,9	8,1
6500	1,5	2,1	24,3	6,5	59,5	7,7
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Udział masowy [%]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	0,5	25,2	4,7	61,9	7,6
2500	1,0	0,1	25,4	3,5	62,7	8,3
4500	0,5	0,9	26,8	4,8	59,7	7,8
4500	1,0	0,3	27,6	4,6	60,8	6,7
4500	1,5	0,5	27,7	4,1	61,2	6,6

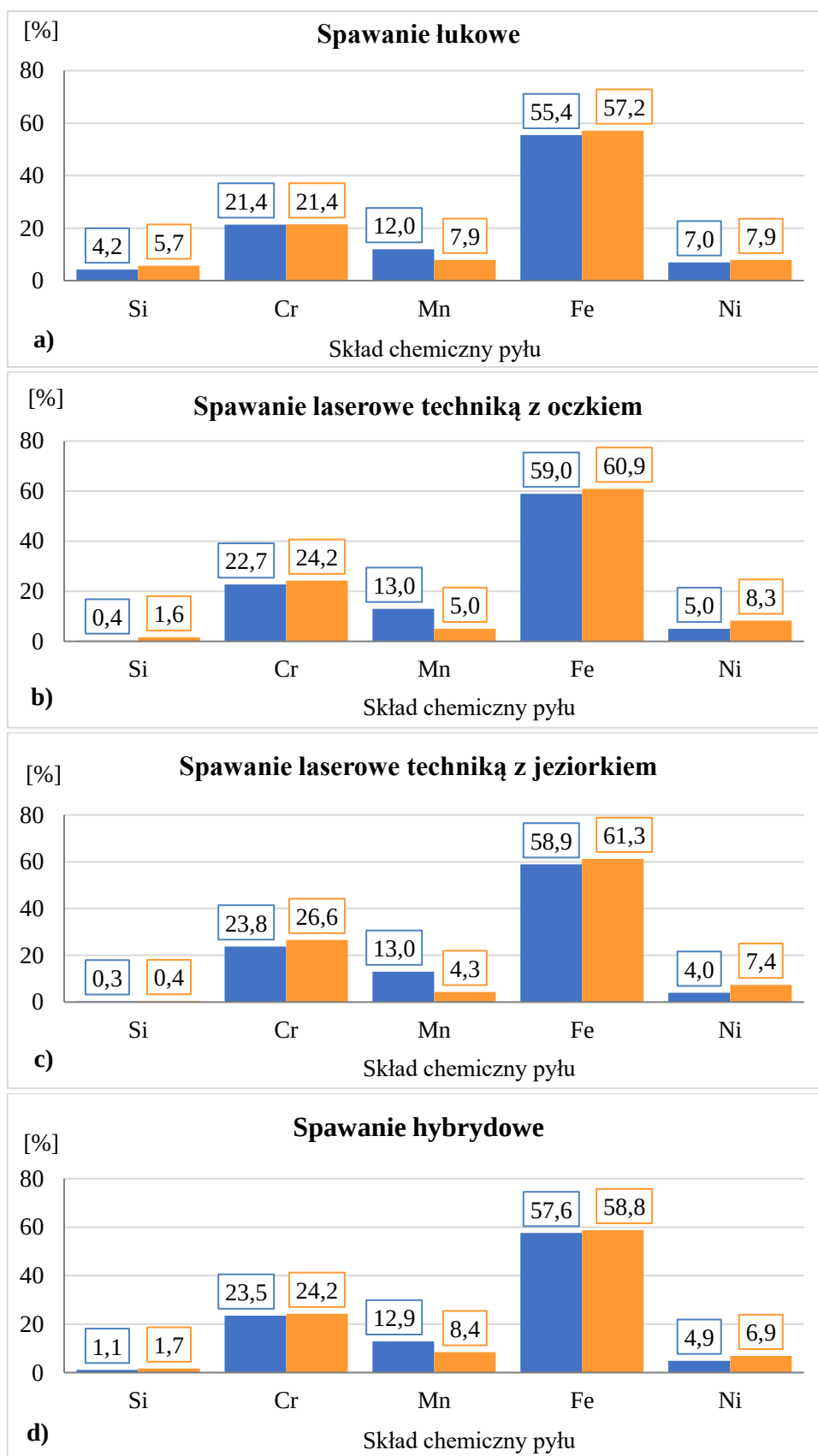
Tablica 6.3. Skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie hybrydowe stali 1.4301									
Parametry technologiczne					Udział masowy [%]				
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	250	28	8,5	1,0	1,0	23,4	12,8	57,7	5,1
4500	250	28	8,5	0,8	1,0	23,4	12,6	58,0	5,0
4500	250	28	8,5	1,0	1,1	23,9	13,4	57,3	4,3
4500	250	28	8,5	1,5	0,7	22,9	12,2	58,5	5,8
6500	250	28	8,5	0,8	1,1	23,6	12,7	58,1	4,5
6500	250	28	8,5	1,0	2,7	24,0	13,8	55,1	4,4
6500	250	28	8,5	1,5	0,8	23,9	12,6	57,9	4,8
4500	200	25	6,5	1,0	1,1	23,0	13,0	57,7	5,3
4500	300	30	10,5	1,0	0,7	23,8	12,9	57,9	4,7
Spawanie hybrydowe stali 1.4828									
Parametry technologiczne					Udział masowy [%]				
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	250	28	8,5	1,0	4,6	23,6	9,5	55,9	6,4
4500	250	28	8,5	0,8	1,2	23,9	8,0	60,4	6,6
4500	250	28	8,5	1,0	1,5	24,5	8,8	59,3	5,9
4500	250	28	8,5	1,5	1,7	22,9	8,4	59,9	7,1
6500	250	28	8,5	0,8	0,9	25,3	7,4	59,1	7,3
6500	250	28	8,5	1,0	1,2	26,2	7,5	57,2	7,9
6500	250	28	8,5	1,5	0,9	24,9	8,9	59,0	6,3
4500	200	25	6,5	1,0	1,5	23,2	8,8	59,3	7,1
4500	300	30	10,5	1,0	1,5	23,7	8,6	58,8	7,4

W analizowanych próbkach pyłu stwierdzano obecność żelaza, manganu, chromu, niklu i krzemu. Dominującym składnikiem pyłu było żelazo (55-63%), na drugim miejscu oznaczono chrom (20-28%), następnie mangan (3-14%) i nikiel (4-9%) oraz krzem (0,1-6%).

6.1.2. Wpływ gatunku materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

Na rysunku 6.1 pokazano wpływ materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828. Na wykresach przedstawiono średnią wartość udziału masowego poszczególnych pierwiastków z całego analizowanego zakresu parametrów technologicznych procesów spawania.



Rys. 6.1. Wpływ gatunku materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu podczas spawania: a) łukowego, b) laserowego techniką z oczkiem, c) laserowego techniką z jeziorkiem, d) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Analiza uzyskanych wyników potwierdziła wpływ gatunku materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego.

Większą zawartość krzemu, chromu, żelaza i niklu stwierdzono w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4828 w stosunku do stali 1.4301 (rys. 6.1 a-d). Różnice w zawartości krzemu w pyłe wyniosły od 0,1% dla spawania laserowego techniką z jeziorkiem do 1,5% dla spawania łukowego (rys. 6.1 a-d). Pył ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4828 charakteryzował się większą ilością chromu – różnice wyniosły od 0,7% dla spawania hybrydowego do 2,8% dla spawania laserowego techniką z jeziorkiem (rys. 6.1 b-d). W pyłe pochodzącym ze spawania łukowego zawartość chromu dla obu gatunków stali była podobna (rys. 6.1 a). Zawartość żelaza w pyłe powstającym podczas spawania stali 1.4828 była większa w stosunku do pyłu pochodzącego ze stali 1.4301, a różnice wyniosły: 1,8% dla spawania łukowego; 1,9% dla spawania laserowego techniką z oczkiem; 2,4% dla spawania laserowego techniką z jeziorkiem i 1,2% dla spawania hybrydowego (rys. 6.1 a-d).

Dla stali 1.4828 stwierdzono większy udział masowy niklu: o 0,9% podczas spawania łukowego; o 3,3% podczas spawania laserowego techniką z oczkiem; o 3,4% podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem i o 2% podczas spawania hybrydowego w odniesieniu do stali 1.4301 (rys. 6.1 a-d).

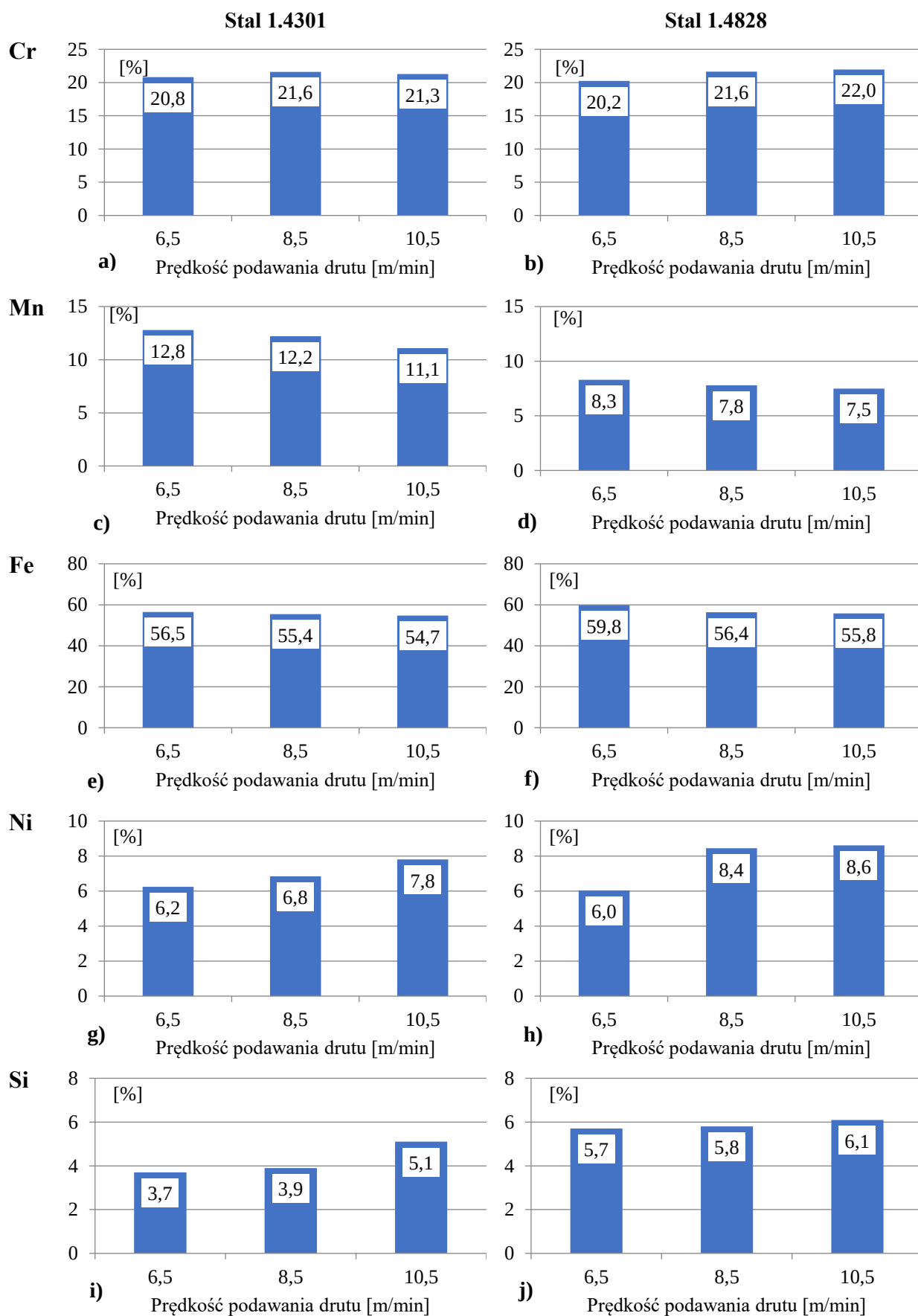
Spawanie stali 1.4301 charakteryzowało się z większą zawartością manganu w pyłe w porównaniu do stali 1.4828 - różnice wyniosły 4,1% podczas spawania łukowego; 8% podczas spawania laserowego techniką z oczkiem; 8,7% podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem i 4,5% podczas spawania hybrydowego (rys. 6.1 a-d).

6.1.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na skład chemiczny pyłu

Uzyskane wyniki umożliwiły określenie wpływu parametrów technologicznych procesu spawania łukowego, tj.: ilości stopionego materiału dodatkowego charakteryzowanej przez prędkość podawania drutu – V_{dr} [m/min] oraz prędkości spawania – V_{sp} [m/min] na skład chemiczny pyłu.

Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego

Skład chemiczny pyłu oznaczono dla trzech prędkości podawania drutu: 6,5; 8,5 i 10,5 m/min. Wpływ prędkości podawania drutu przy stałej prędkości spawania wynoszącej 1,0 m/min na skład chemiczny pyłu podczas spawania stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Wpływ prędkości podawania drutu na skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828

Podczas spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 wykazano, że wzrost prędkości podawania drutu powodował wzrost zawartości chromu w pyłe (rys. 6.2 a, b). Przykładowo, udział masowy Cr w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4828 wyniósł 20,2% dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min, 21,6% dla prędkości 8,5 m/min i 22% podczas spawania z prędkością podawania drutu 10,5 m/min (rys. 6.2 b). Zwiększenie prędkości podawania drutu podczas spawania stali 1.4301 o 4 m/min (z 6,5 do 10,5 m/min) powodowało wzrost zawartości Cr o 0,5% (rys. 6.2 a)

Z kolei analiza udziału masowego manganu i żelaza w pyłe wykazała, że wzrost prędkości podawania drutu powodował zmniejszenie ich zawartości (rys. 6.2 c, d, e, f). Przy zmianie prędkości podawania drutu z 6,5 na 10,5 m/min zawartość manganu zmniejszyła się 1,7% dla stali 1.4301 i 0,8% dla stali 1.4828 (rys. 6.2 c, d). Taka sama zmiana w prędkości podawania drutu wiązała się ze spadkiem zawartości żelaza o 1,8% dla stali 1.4301 i o 4% dla stali 1.4828 (rys. 6.2 e, f).

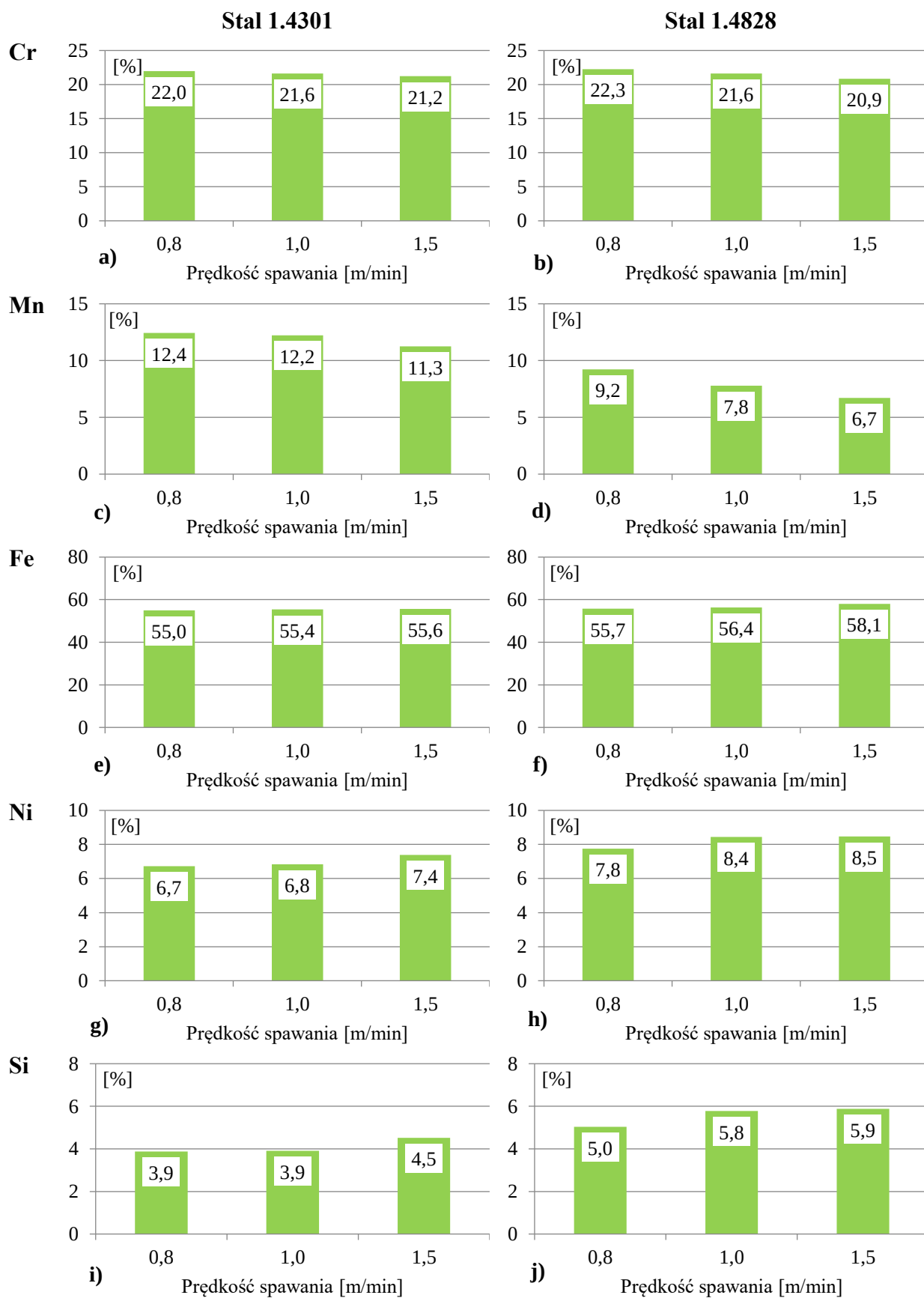
Wraz ze wzrostem prędkości podawania drutu zwiększyła się zawartość niklu i krzemu w analizowanych próbkach pyłu (rys. 6.2 g, h, i, j). Udział masowy Ni w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 wyniósł 6,2% dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min; 6,8% dla prędkości 8,5 m/min i 7,8% podczas spawania z prędkością podawania drutu 10,5 m/min, a dla stali 1.4828 odpowiednio: 6,0%; 8,4% i 8,6% (rys. 6.2 g, h).

Zawartość krzemu w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 wyniosła 3,7% dla prędkości podawania drutu 6,5 m/min i 5,1% dla prędkości podawania drutu wynoszącej 10,5 m/min (rys. 6.2 i). Wzrost prędkości podawania drutu z 6,5 do 10,5 m/min podczas spawania stali 1.4828 powodował zwiększenie udziału masowego Si z 5,7% do 6,1% (rys. 6.2 j).

Analiza wyników badań wykazała, że podczas spawania łukowego metodą MIG stali 1.4301 i 1.4828 wraz ze wzrostem prędkości podawania drutu zwiększa się udział masowy chromu, niklu i krzemu, natomiast zmniejsza się udział manganu i żelaza w pyłe.

Wpływ prędkości spawania łukowego

Ocenę wpływu prędkości spawania łukowego na skład chemiczny pyłu przy stałej prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min wykonano dla trzech wartości: 0,8; 1,0 i 1,5 m/min. Wyniki w formie graficznej pokazano na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Wpływ prędkości spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu

Stwierdzono, że wzrost prędkości spawania stali 1.4301 i 1.4828 powodował spadek zawartości chromu w pyłe (6.3 a, b). Zwiększenie prędkości spawania z 0,8 do 1,5 m/min spowodowało spadek udziału masowego Cr o 0,8% dla stali 1.4301 i o 1,4% dla stali 1.4828 (rys. 6.3 a, b).

Również analizując zawartość manganu w pyłe stwierdzono, że wzrost prędkości spawania wiązał się ze zmniejszeniem jego zawartości (rys. 6.3 c, d). Przy zmianie prędkości spawania z 0,8 na 1,5 m/min dla stali 1.4301 wykazano spadek zawartości Mn o 1,2%, a dla stali 1.4828 o 2,5% (rys. 6.3 c, d).

Wzrost prędkości spawania powodował wzrost zawartości żelaza w pyłe (rys. 6.3 e, f). Podczas spawania stali 1.4828 z prędkością 0,8 m/min udział masowy Fe wyniósł 55,7%, wzrost prędkości spawania o 0,2 m/min skutkował zawartością Fe na poziomie 56,4%. Zwiększenie prędkości spawania do 1,5 m/min powodowało zwiększenie udziału masowego Fe do 58,1% (rys. 6.3 f).

Podobną zależność jak w przypadku żelaza zaobserwowano dla niklu - wzrost prędkości spawania spowodował wzrost jego zawartości (rys. 6.3 g, h). Zwiększenie prędkości spawania z 0,8 na 1,5 m/min skutkowało wzrostem udziału masowego Ni o ok. 0,7% dla obu gatunków badanych stali (rys. 6.3 g, h).

Również w przypadku krzemu wzrost prędkości spawania powodował wzrost jego udziału masowego (rys. 6.3 i, j). Wzrost prędkości spawania z 0,8 na 1,5 m/min wiązał się ze zwiększeniem zawartości Si o 0,6% dla stali 1.4301 i o 0,9% dla stali 1.4828 (rys. 6.3 i, j).

Wykazano, że podczas spawania metodą MIG wraz ze wzrostem prędkości spawania zwiększa się udział masowy żelaza, niklu i krzemu, natomiast zmniejsza się udział chromu i manganu w pyłe.

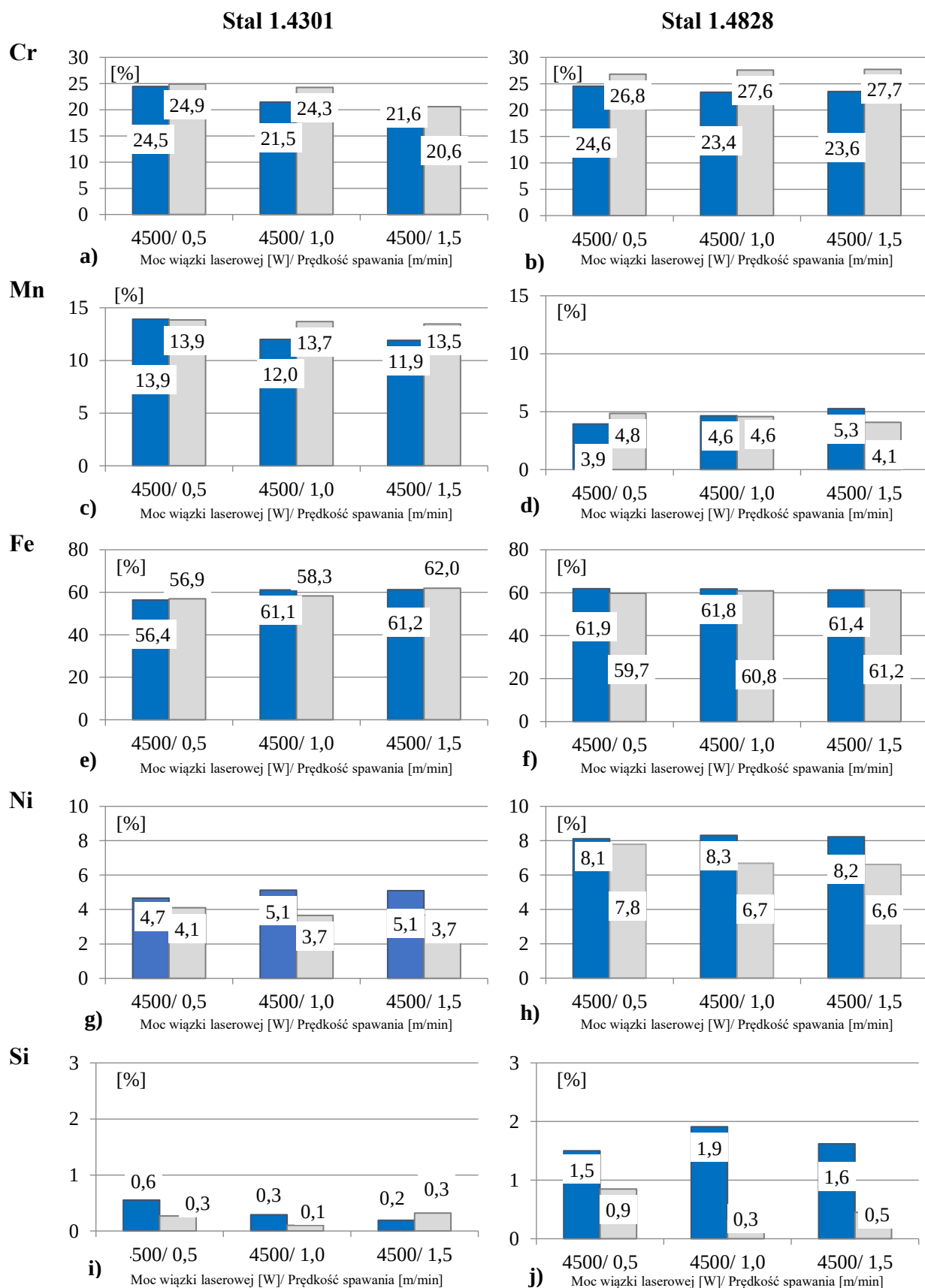
6.1.4. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na skład chemiczny pyłu

Uzyskane wyniki analizy składu chemicznego pyłu umożliwiły określenie wpływu techniki spawania laserowego (z jeziorkiem/ z oczkiem) oraz następujących parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na skład chemiczny pyłu, tj.:

- mocy wiązki laserowej [W],
- prędkości spawania [m/min].

Wpływ techniki spawania laserowego na skład chemiczny pyłu

Na rysunku 6.4 pokazano wpływ techniki spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu.



Rys. 6.4. Wpływ techniki spawania laserowego na skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 (■ – technika z oczkiem, ■ – technika z jeziorkiem)

Analiza uzyskanych wyników wykazała większą zawartość chromu w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4301 i 1.4828 dla techniki spawania z jeziorkiem w stosunku do spawania techniką z oczkiem (rys. 6.4 a, b). Różnice pomiędzy udziałami masowymi Cr dla analizowanych technik spawania wynosiły od 0,4 do 2,8% dla stali 1.4301 (rys. 6.4 a). W przypadku stali 1.4828 te różnice były większe i zawierały się w zakresie od 2,2 do 4,2% (rys. 6.4 b). Jedynie dla próbki pyłu pochodzącego ze spawania stali 1.4301 z prędkością 1,5 m/min zależność była odwrotna, jednak różnica nie przekraczała 1% (rys. 6.4 a).

Analiza udziału masowego manganu wykazała jego większą zawartość podczas spawania techniką z jeziorkiem stali 1.4301. Zawartość Mn podczas spawania z prędkością 1,0 m/min techniką z jeziorkiem wyniosła 13,7%, natomiast dla techniki z oczkiem 12% (rys. 6.4 c). Podczas spawania stali 1.4828 z prędkościami 1,0 i 1,5 m/min większą zawartość manganu obserwowano podczas spawania techniką z oczkiem (rys. 6.4 d)

Dla próbek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego stali 1.4301 z prędkościami 0,5 i 1,5 m/min większy udział masowy Fe oznaczono dla techniki spawania z jeziorkiem. Natomiast podczas spawania z prędkością 1,0 m/min większą zawartość żelaza stwierdzono dla techniki z oczkiem - 61,1%, w porównaniu do 58,3% dla techniki spawania z jeziorkiem (rys. 6.4 e). Spawanie stali 1.4828 techniką z oczkiem wiązało się z większą zawartością żelaza, jednak różnice nie przekraczały 2,5% (rys. 6.4 f).

Większą zawartość niklu w pyłe zanotowano dla spawania laserowego techniką z oczkiem. Zależność ta wystąpiła dla obu gatunków materiału podstawowego (rys. 6.4 g, h). Różnice w udziale masowym Ni między obiema technikami spawania nie przekroczyły 2%.

Analizując udział masowy krzemu w próbkach pyłu pochodzącego ze spawania stali 1.4301 i 1.4828 większą zawartość Si oznaczono dla spawania techniką z oczkiem (rys. 6.4 i, j). Jedynie podczas spawania stali 1.4301 z prędkością 1,5 m/min większą zawartość krzemu obserwowano dla techniki z jeziorkiem (rys. 6.4 i).

Analiza składu chemicznego pyłu spawalniczego wykazała większą zawartość chromu w pyłe emitowanym podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem, natomiast większa zawartość żelaza, niklu i krzemu wystąpiła dla techniki spawania laserowego z oczkiem.

Wpływ mocy wiązki laserowej na skład chemiczny pyłu

W technice spawania laserowego z oczkiem oznaczono skład chemiczny pyłu dla mocy wiązki laserowej wynoszącej 4500 i 6500 W, a w technice z jeziorkiem dla 2500 i 4500 W. Analiza prowadzona była dla dwóch prędkości spawania – 1,0 i 1,5 m/min w technice z oczkiem, natomiast w technice z jeziorkiem 0,5 i 1,0 m/min. Wpływ mocy wiązki laserowej na skład chemiczny pyłu przedstawiono na rysunkach 6.5 - 6.6.

W przypadku spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 techniką z oczkiem wykazano, że wzrost mocy wiązki laserowej powodował wzrost zawartości chromu w pyłe (6.5 a, b). Zależność ta wystąpiła dla obu analizowanych prędkości spawania – 1,0 i 1,5 m/min. Analizując wyniki uzyskane dla tych stali przy prędkości spawania 1,0 m/min wzrost mocy wiązki laserowej z 4500 W na 6500 W powodował wzrost zawartości chromu o 2,3% podczas spawania stali 1.4301 i o 1,6% podczas spawania stali 1.4828 (rys. 6.5 a, b).

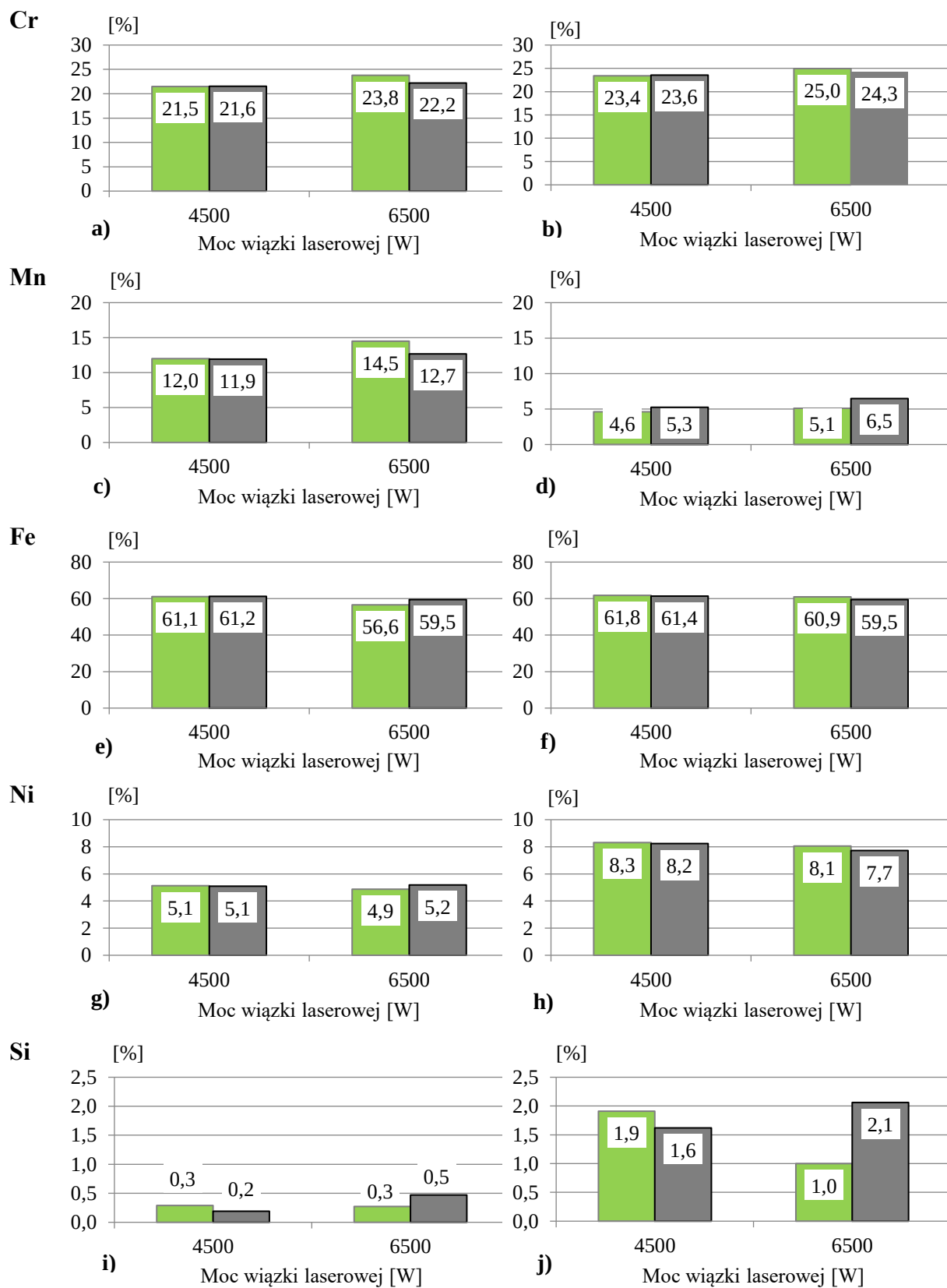
Podobną zależność zaobserwowano przy analizie udziału masowego manganu. Wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej zwiększyła się zawartość Mn w analizowanych próbkach pyłu. Podczas spawania z prędkością 1,5 m/min przy zwiększeniu mocy wiązki laserowej o 2000 W stwierdzono wzrost zawartości manganu o 0,7% podczas spawania stali 1.4301 i 1,2% podczas spawania stali 1.4828 (rys. 6.5 c, d).

Z kolei przy analizie udziału masowego Fe w pyłe obserwowano, że wzrost mocy wiązki laserowej powodował zmniejszenie jego zawartości. Przy prędkości spawania 1,5 m/min wzrost mocy wiązki laserowej z 4500 na 6500 W powodował spadek zawartości żelaza o blisko 2% dla obu gatunków stali (rys. 6.5 e, f).

Podobnie jak w przypadku żelaza, wzrost mocy wiązki laserowej powodował zmniejszenie udziału masowego niklu dla obu analizowanych materiałów (rys. 6.5 g, h). Jedynie podczas spawania stali 1.4301 z prędkością 1,5 m/min, wzrost mocy wiązki powodował zwiększenie zawartości niklu, jednak różnica wyniosła 0,1% (rys. 6.5 g).

Podczas analizy udziału masowego krzemu w pyłe nie stwierdzono jednoznacznej zależności. Podczas spawania obu gatunków stali z prędkością 1,0 m/min wzrost mocy wiązki powodował zmniejszenie zawartości Si, z kolei dla prędkości 1,5 m/min wzrost mocy wiązki laserowej wiązał się ze wzrostem jego zawartości w pyłe (rys. 6.5 i, j).

Spawanie laserowe techniką z oczkiem
Stal 1.4301 **Stal 1.4828**



Rys. 6.5. Wpływ mocy wiązki laserowej podczas spawania techniką z oczkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – Vsp=1,0 m/min, ■ – Vsp=1,5 m/min)

Podobnie jak podczas spawania techniką z oczkiem, wzrost mocy wiązki laserowej skutkował zwiększeniem zawartości chromu w pyłe podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 techniką z jeziorkiem (rys. 6.6 a, b). Jedynie przy spawaniu stali 1.4301 techniką z jeziorkiem z prędkością 0,5 m/min wzrost mocy wiązki laserowej z 2500 na 4500 W powodował spadek zawartości chromu o 0,3 % (rys. 6.6 a).

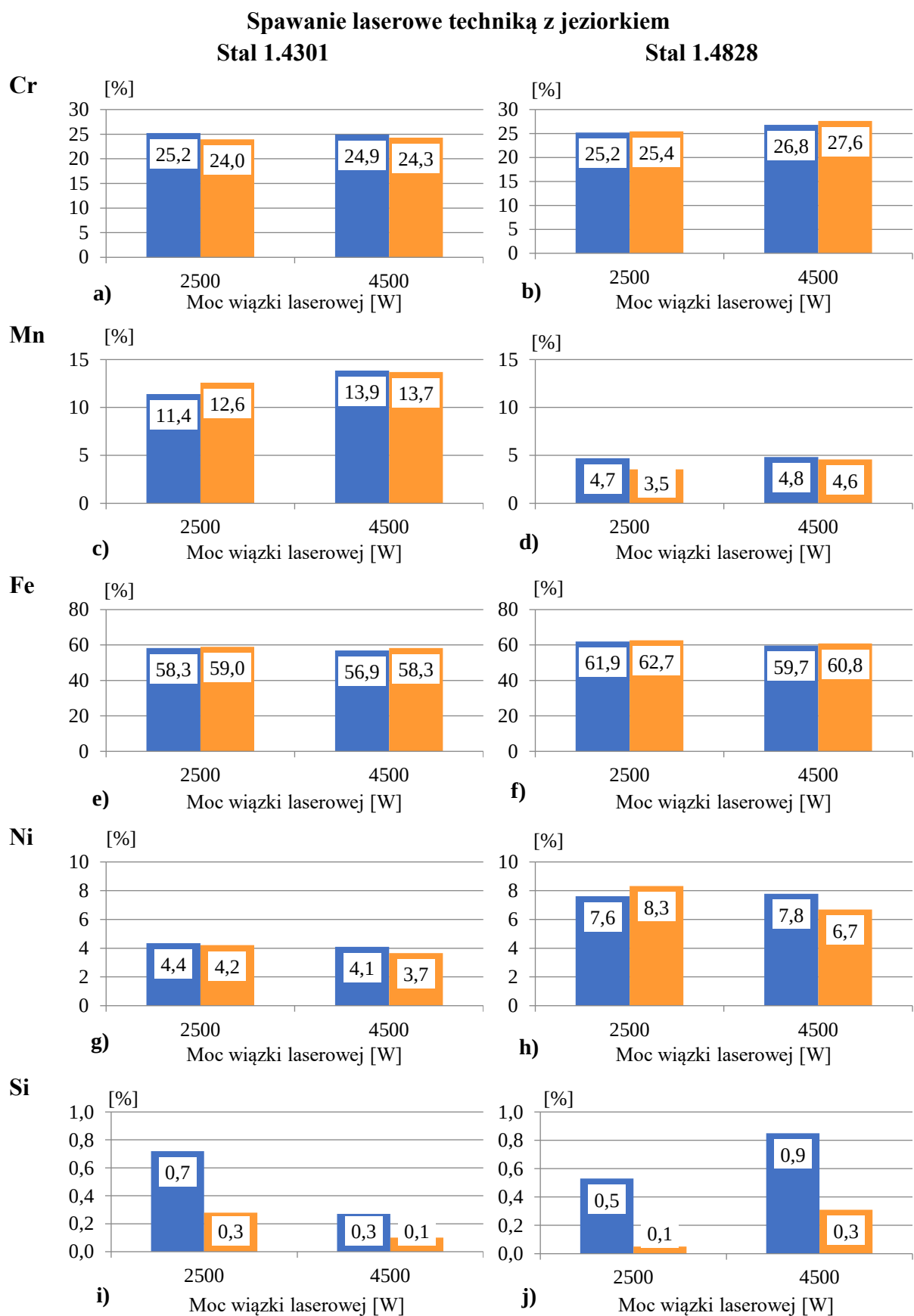
Również, jak w spawaniu techniką z oczkiem stwierdzono, że wraz ze wzrostem mocy wiązki zwiększała się zawartość manganu w analizowanych próbkach. Zależność ta wystąpiła dla obu prędkości spawania. Podczas spawania z prędkością 1,0 m/min przy zwiększeniu mocy wiązki laserowej udział Mn w pyłe wzrósł o ok. 1% dla obu gatunków materiału podstawowego (rys. 6.6 c, d).

Podczas spawania laserowego techniką z oczkiem wzrost mocy wiązki laserowej powodował zmniejszenie zawartości żelaza w pyłe (rys. 6.6 e, f). Dla spawania z prędkością 0,5 m/min zwiększenie mocy wiązki laserowej z 2500 na 4500 W powodowało obniżenie zawartości żelaza o 1,4 % dla stali 1.4301. Podczas spawania stali 1.4828 ta różnica była większa i wyniosła 2,2% (rys. 6.6 e, f).

Podobnie jak w przypadku żelaza, udział masowy niklu w pyłe spadał wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej dla obu gatunków analizowanych stali (rys. 6.6 g, h). Jedynie podczas spawania stali 1.4828 z prędkością 0,5 m/min wzrost mocy wiązki z 2500 na 4500 W spowodował wzrost zawartości Ni – różnica była niewielka bo 0,2 % (rys. 6.6 h).

Nie stwierdzono jednoznacznej zależności pomiędzy mocą wiązki laserowej a udziałem masowym krzemu w pyłe (rys. 6.6 i, j). Podczas spawania stali 1.4301 wzrost mocy wiązki laserowej powodował zmniejszenie zawartości Si, z kolei podczas spawania stali 1.4828 wzrost mocy wiązki wiązał się ze wzrostem jego zawartości w pyłe (rys. 6.6 i, j).

Analiza wyników badań wykazała, że dla spawania laserowego zarówno techniką z oczkiem, jak i z jeziorkiem, wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej zwiększa się udział masowy chromu i manganu, natomiast zmniejsza się udział żelaza i niklu.



Rys. 6.6. Wpływ mocy wiązki laserowej podczas spawania techniką z jeziorkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – Vsp=1,0 m/min, ■ – Vsp=1,5 m/min)

Wpływ prędkości spawania laserowego na skład chemiczny pyłu

Wpływ prędkości spawania laserowego na skład chemiczny pyłu przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 6.7-6.8. Dla mocy wiązki laserowej wynoszącej 4500 W dla obu technik spawania oznaczono skład chemiczny dla trzech prędkości spawania wynoszących 0,5, 1,0 i 1,5 m/min. Podczas spawania wiązką o mocy 6500 W techniką z oczkiem i 2500 W techniką z jeziorkiem analiza prowadzona była dla dwóch prędkości spawania – 1,0 i 1,5 m/min dla techniki z oczkiem oraz 0,5 i 1,0 m/min dla techniki z jeziorkiem.

Podczas spawania stali 1.4301 i 1.4828 techniką z oczkiem wykazano, że wzrost prędkości spawania powodował zmniejszenie zawartości chromu w pyłe (rys. 6.7 a, b). Podczas spawania stali 1.4301 z prędkościami 1,0 i 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W wyniki były bardzo zbliżone (różnica wyniosła 0,1%) i były mniejsze niż podczas spawania z prędkością 0,5 m/min. Analizując wyniki uzyskane dla spawania wiązką o mocy 6500 W wzrost prędkości spawania z 1,0 na 1,5 m/min powodował spadek zawartości chromu o 1,6 % (rys. 6.7 a). Podczas spawania stali 1.4828 spadek zawartości chromu wraz ze wzrostem prędkości spawania nie przekraczał 1% (rys. 6.7 b)

Analiza zawartości manganu w pyłe uzależniona była od spawanego materiału. Dla stali 1.4301 wykazano, że wzrost prędkości spawania powodował zmniejszenie się udziału masowego Mn. Podczas spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 4500 W stwierdzono obniżenie zawartości manganu o 1,9% w porównaniu do prędkości 0,5 m/min. Zwiększenie prędkości spawania do 1,5 m/min wiązało się ze zmniejszeniem zawartości Mn o 2% w stosunku do prędkości 0,5 m/min i 0,1% w porównaniu do prędkości 1,0 m/min (rys. 6.7 c). Dla stali 1.4828 zwiększenie prędkości spawania wiązało ze zwiększeniem zawartości manganu w pyłe (rys. 6.7 d).

Ocena zawartości żelaza w pyłe również wykazała wpływ materiału podstawowego. Wzrost prędkości spawania powodował wzrost udziału masowego Fe w pyłe podczas spawania stali 1.4301. Relację tą obserwowano dla obu poziomów mocy wiązki (rys. 6.7 e). Natomiast dla stali 1.4828 udział masowy Fe zmniejszał się wraz ze wzrostem prędkości spawania, jednak różnice w zawartości żelaza nie przekraczały 1,5% (rys. 6.7 f).

Uzyskane wyniki wskazują, że wzrost prędkości spawania powoduje wzrost udziału masowego niklu w pyłe (rys. 6.7 g, h). Jedynie podczas spawania stali 1.4828 wiązką o mocy 6500 W przy wyższej prędkości spawania udział masowy niklu był mniejszy (rys. 6.7 h). Dla spawania stali 1.4301 z prędkością 0,5 m/min wiązką o mocy 4500 W zawartość Ni wyniosła 4,7%. Podczas spawania z prędkościami 1,0 i 1,5 m/min udział masowy niklu był identyczny (5,1%) (rys. 6.7 g).

Analiza wyników wykazała, że wzrost prędkości spawania laserowego wiązał się ze zwiększeniem udziału masowego krzemu (rys. 6.7 i, j). Wyjątek stanowi spawanie stali 1.4301 wiązką o mocy 4500 W, gdzie zwiększenie prędkości spawania powodowało spadek zawartości Si w pyłe (rys. 6.7 i). Zawartość krzemu w analizowanych próbkach pyłu nie przekraczała jednak 2,1% (rys. 6.7 i, j).

Zawartość chromu w pyłe pochodzącym ze spawania laserowego techniką z jeziorkiem zależy od gatunku materiału podstawowego (rys. 6.8 a, b). Wzrost prędkości spawania powodował spadek udziału masowego Cr w pyłe podczas spawania stali 1.4301. Regułę tę obserwowano dla obu poziomów mocy wiązki (rys. 6.8 a). Natomiast dla stali 1.4828 udział masowy Cr zwiększał się wraz ze wzrostem prędkości spawania (rys. 6.8 b).

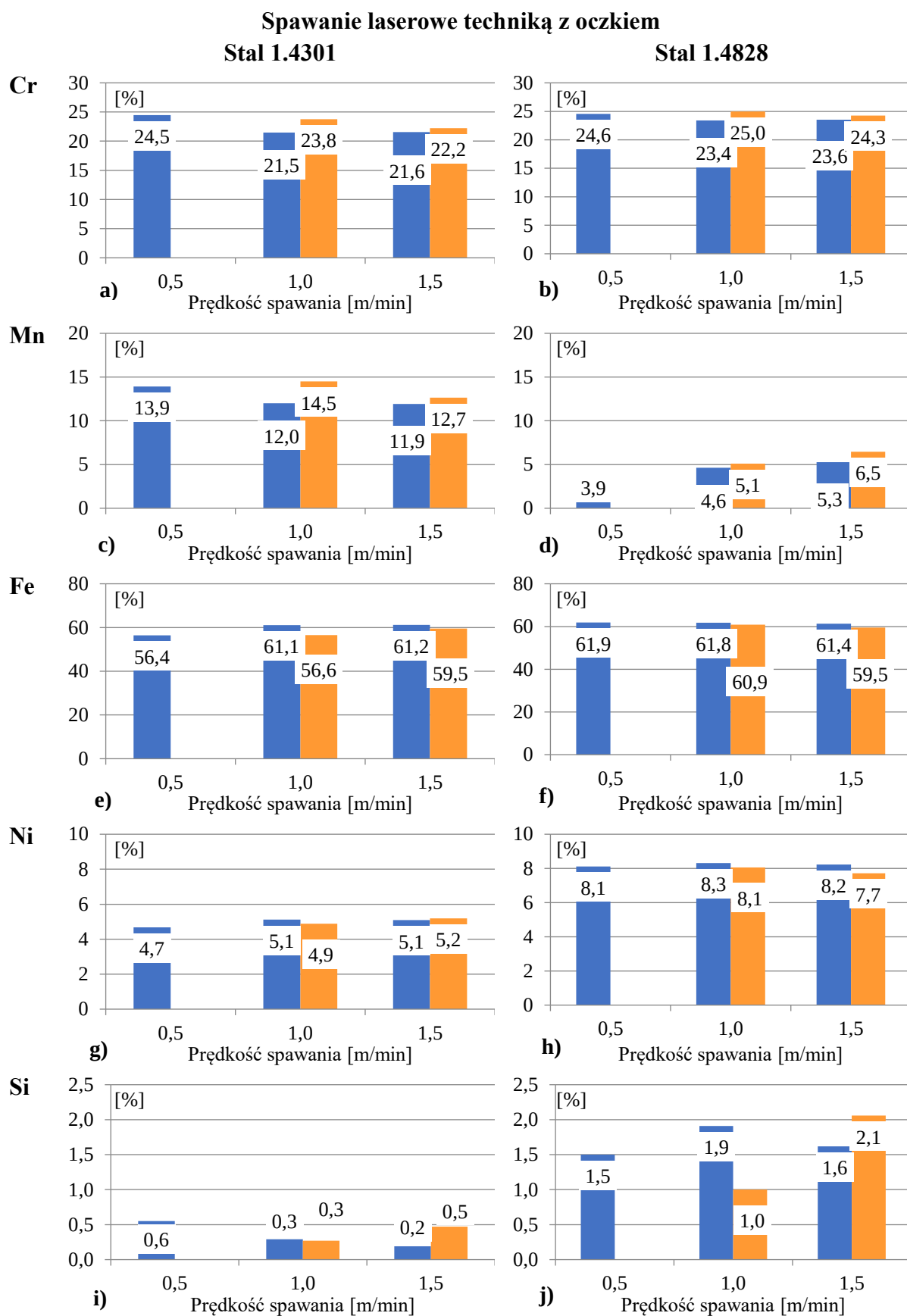
Wykazano, że wzrost prędkości spawania powodował spadek zawartości Mn w pyłe (rys. 6.8 c, d). Tylko dla mocy wiązki 2500 W wzrost prędkości spawania powoduje zwiększenie jego zawartości – z 11,4% przy prędkości 0,5 m/min do 12,6% dla spawania z prędkością 1,0 m/min (rys. 6.8 c).

Zwiększenie prędkości spawania powodowało wzrost zawartości żelaza w pyłe dla stali 1.4301 i 1.4828 (rys. 6.8 e, f). Wyniki uzyskane dla spawania stali 1.4301 wiązką o mocy 4500 W wykazały, że wzrost prędkości spawania z 1,0 na 1,5 m/min powodował zwiększenie udziału masowego Fe o 3,7% (rys. 6.8 e).

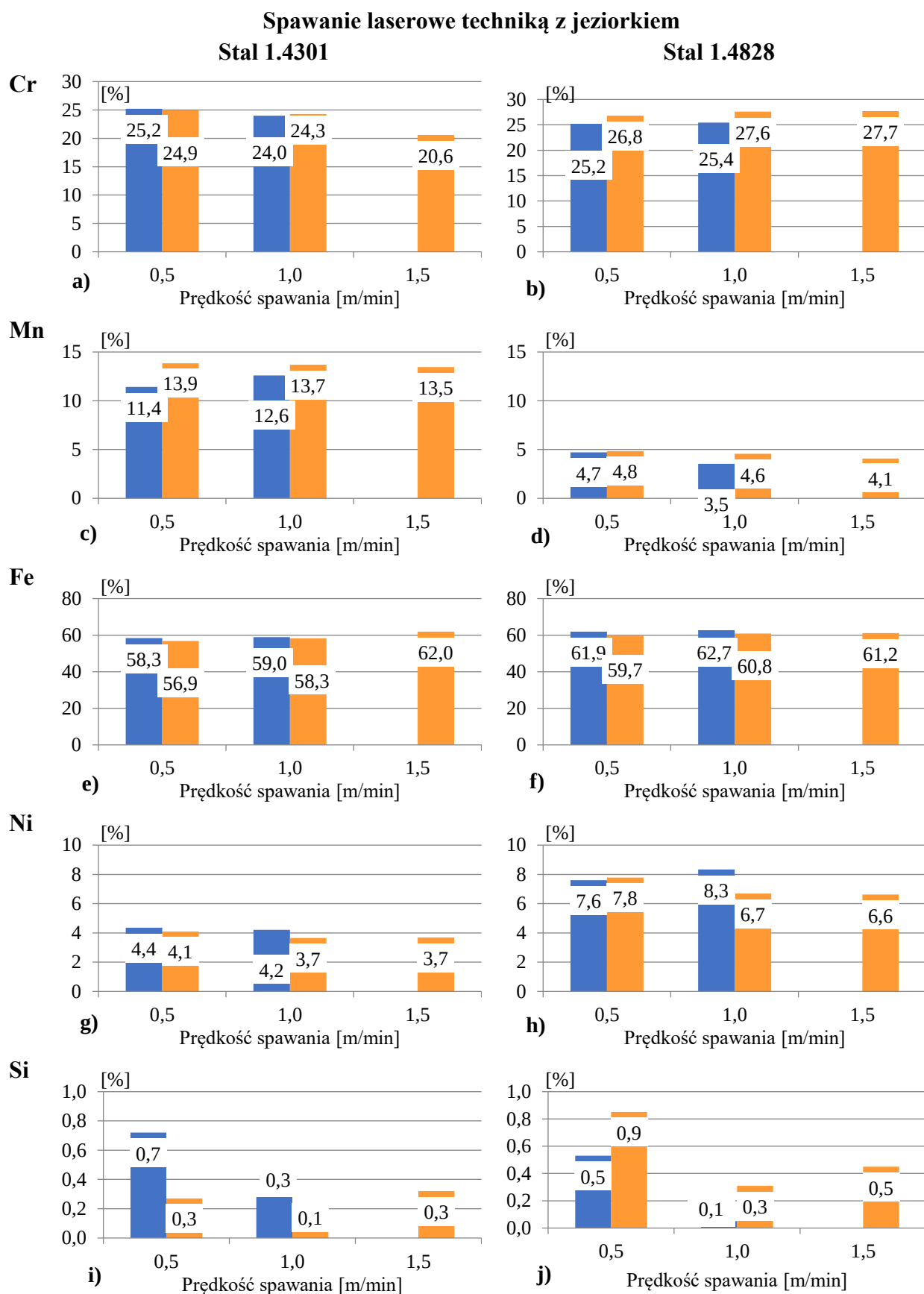
Natomiast wzrost prędkości spawania laserowego techniką z jeziorkiem powoduje spadek udziału masowego niklu w pyłe (rys. 6.8 g, h). Dla spawania stali 1.4301 wiązką o mocy 2500 W, zwiększenie prędkości z 0,5 do 1,0 m/min wiązało się ze zmniejszeniem zawartości Ni o 0,2% (rys. 6.8 g). Jedynie podczas spawania stali 1.4828 wiązką o mocy 2500 W przy wzroście prędkości spawania z 0,5 m/min na 1,0 m/min zawartość Ni wzrosła o 0,7% (rys. 6.8 h).

Podczas spawania wiązką o mocy 2500 W oraz 4500 W wzrost prędkości spawania z 0,5 na 1,0 m/min powodował zmniejszenie udziału masowego Si, natomiast spawanie wiązką o mocy 4500 W z prędkością 1,5 m/min wiązało się ze zwiększeniem zawartości Si w pyłe. Zależność ta wystąpiła dla badanych gatunków stali austenitycznej (rys. 6.8 i, j).

Wyniki badań wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości spawania laserowego techniką z oczkiem zwiększa się udział masowy niklu i krzemu, natomiast zmniejsza się udział chromu. Natomiast podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem wraz ze wzrostem prędkości spawania zwiększa się udział masowy żelaza, natomiast zmniejsza się udział manganu i niklu. Nie stwierdzono wpływu prędkości spawania techniką z jeziorkiem na zawartość chromu i krzemu.



Rys. 6.7. Wpływ prędkości spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – P=4500 W, ■ – P=6500 W)



Rys. 6.8. Wpływ prędkości spawania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – P=2500 W, ■ – P=4500 W)

6.1.5. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na skład chemiczny pyłu

Uzyskane wyniki umożliwiły ocenę wpływu parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego stali austenitycznych w gat. 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu: prędkości podawania drutu [m/min], mocy wiązki laserowej [W] i prędkości spawania [m/min].

Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego

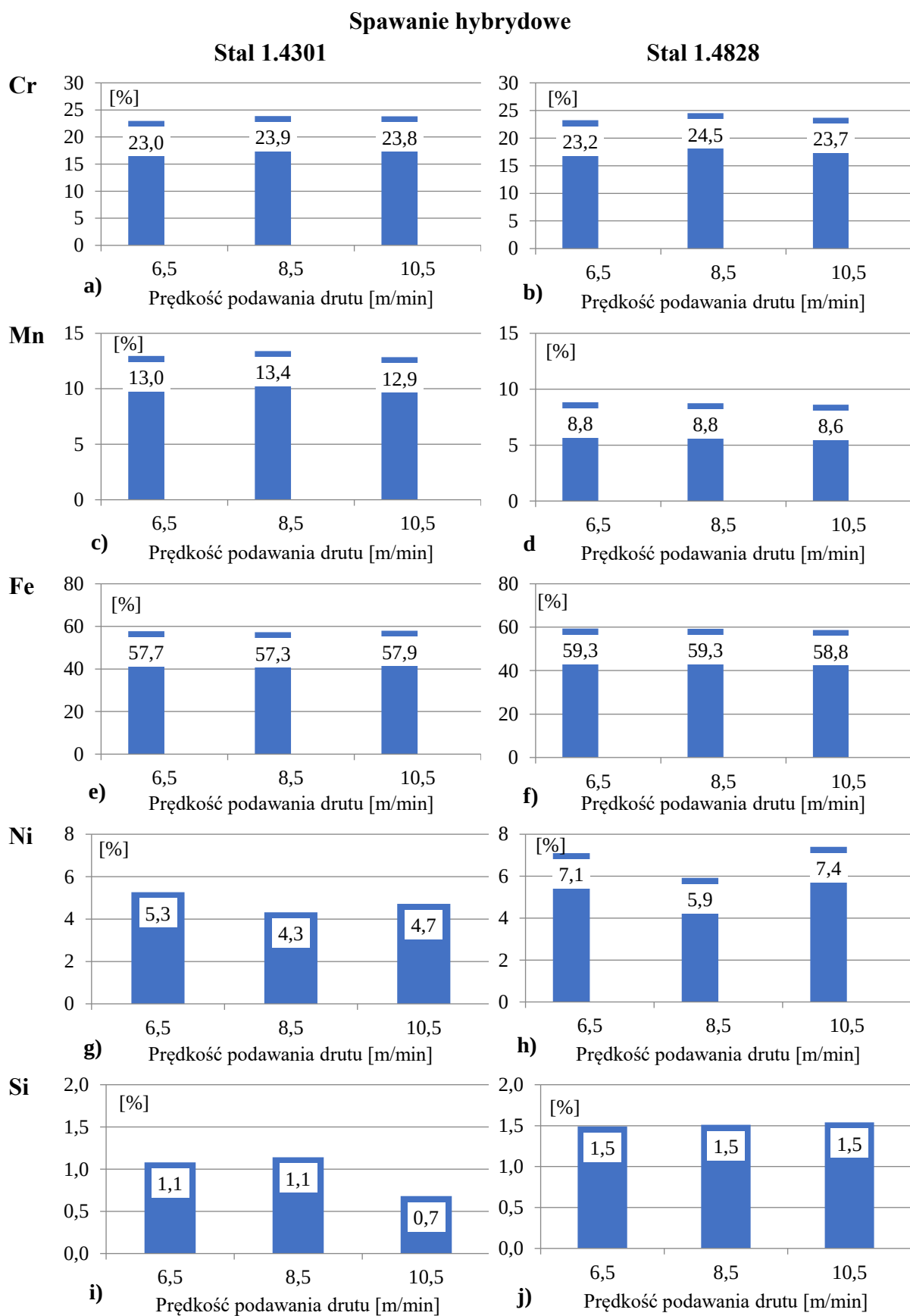
Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828 drutem litym 308 L Si o średnicy 1,2 mm w osłonie argonu na skład chemiczny pyłu pokazano na rysunku 6.9. Zawartość chromu, manganu, żelaza, niklu i krzemu w pyłe spawalniczym przedstawiono dla trzech prędkości podawania drutu: 6,5; 8,5 i 10,5 m/min. Moc wiązki laserowej wyniosła 4500 W, a prędkość spawania 1,0 m/min.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że zawartość chromu dla trzech analizowanych prędkości spawania jest zbliżona. Dla stali 1.4301 różnice w udziale masowym Cr nie przekroczyły 1%, natomiast dla 1.4828 1,3% (rys. 6.9). Największą zawartość chromu w pyłe oznaczono dla badanych stali podczas spawania z prędkością podawania drutu 8,5 m/min (rys. 6.9 a, b). Zwiększenie prędkości podawania drutu z 6,5 na 10,5 m/min powodowało spadek zawartości manganu w pyłe. Dla stali 1.4301 spadek ten wyniósł 0,1%, a dla stali 1.4828 0,2% (rys. 6.9 c, d).

Zawartość żelaza w pyłe była bardzo zbliżona. Dla obu gatunków stali różnice w udziale masowym Fe nie przekraczały 0,6% (rys. 6.9 e, f).

Również w przypadku niklu i krzemu nie wykazano jednoznacznej zależności pomiędzy prędkością podawania drutu a udziałem masowym tych pierwiastków (rys. 6.9 g–j).

Analiza wyników badań nie ujawniła wpływu prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego na zawartość chromu, manganu, żelaza, niklu i krzemu.



Rys. 6.9. Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu

Wpływ mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego na skład chemiczny pyłu

Na rysunku 6.10 przedstawiono oddziaływanie mocy wiązki laserowej na skład chemiczny pyłu wydzielającego się podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 dla trzech prędkości spawania: 0,8; 1,0 i 1,5 m/min. Prędkość podawania drutu była stała i wynosiła 8,5 m/min.

Dla próbek pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego wykazano związek pomiędzy mocą wiązki laserowej a zawartością chromu. Wzrost mocy wiązki powodował wzrost udziału masowego Cr w pyle. Zależność ta wystąpiła dla wszystkich trzech analizowanych prędkości spawania (rys. 6.10 a, b).

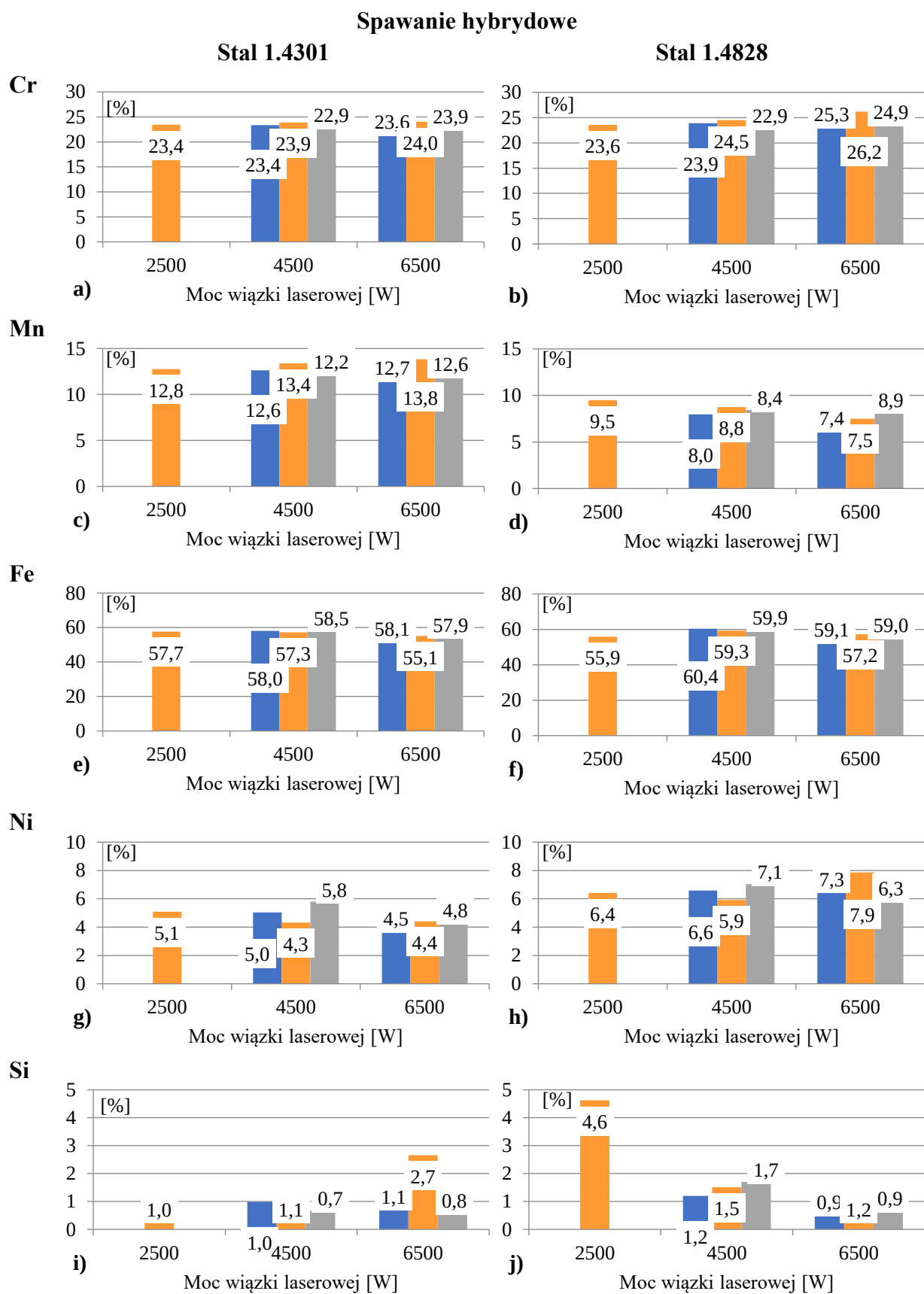
Wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego zwiększał się udział masowy manganu w analizowanych próbkach. Reguła ta wystąpiła dla trzech prędkości spawania stali 1.4301. Podczas spawania z prędkością 1,0 m/min przy zwiększeniu mocy wiązki laserowej z 2500 W na 4500 W stwierdzono wzrost zawartości manganu o 0,6% (rys. 6.10 c). Dla stali 1.4828 przy prędkości spawania 0,8 i 1,0 m/min wzrost mocy wiązki laserowej powodował spadek zawartości Mn w pyle (rys. 6.10 d).

Zwiększenie mocy wiązki powodowało zmniejszenie zawartości żelaza w pyle spawalniczym. Podczas spawania stali 1.4301 z prędkością 1,0 m/min wzrost mocy wiązki laserowej z 4500 W na 6500 W spowodował spadek zawartości Fe z 57,3% na 55,1% (rys. 6.10 e). Podczas spawania stali 1.4828 z prędkością 1,0 m/min nie wykazano jednoznacznej zależności (rys. 6.10 f).

Nie stwierdzono jednoznacznej zależności między mocą wiązki laserowej a zawartością niklu w pyle. Dla prędkości spawania 1,5 m/min udział masowy Ni spada wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej (rys. 6.10 g, h). W przypadku spawania stali 1.4301 z prędkością 0,8 m/min zawartość Ni dla wiązki o mocy 4500 W wyniosła 5,0%, a dla wiązki o mocy 6500 W 4,5% (rys. 6.10 g), natomiast dla stali 1.4828 wzrost mocy wiązki powoduje wzrost zawartości niklu w pyle (rys. 6.10 h).

Wzrost mocy wiązki laserowej wiązał się ze wzrostem zawartości krzemu w pyle podczas spawania stali 1.4301, z kolei dla stali 1.4828 wykazano odwrotną zależność – wzrost mocy wiązki laserowej powodował zmniejszenie udziału masowego krzemu (rys. 6.10 i, j).

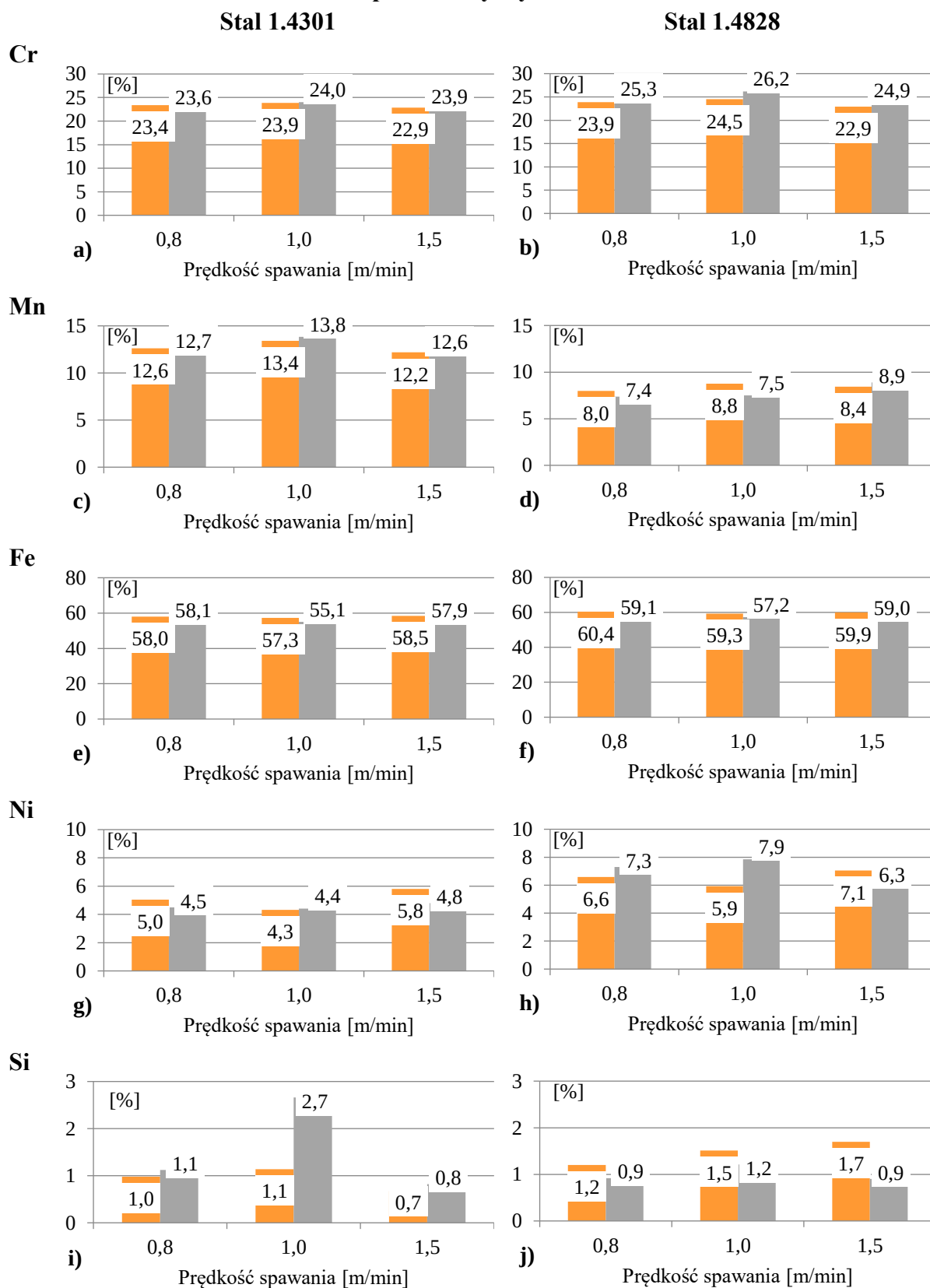
Analiza wyników badań wykazała, że wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego wzrasta udział masowy chromu i manganu oraz obniża się zawartość żelaza w pyle. Nie stwierdzono wpływu mocy wiązki laserowej na zawartość niklu i krzemu.



Rys. 6.10. Wpływ mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – $V_{sp}=0,8$ m/min, ■ – $V_{sp}=1,0$ m/min, ■ – $V_{sp}=1,0$ m/min)

Wpływ prędkości spawania hybrydowego na skład chemiczny pyłu spawalniczego

Spawanie hybrydowe



Rys. 6.11. Wpływ prędkości spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu (■ – P=4500 W, ■ – P=6500 W)

Wpływ prędkości spawania hybrydowego stali w gat. 1.4301 i 1.4828 na skład chemiczny pyłu analizowano w odniesieniu do dwóch wartości mocy wiązki laserowej 4500 W i 6500 W. Prędkość podawania drutu była stała i wynosiła 8,5 m/min. Uzyskane wyniki udziału masowego chromu, manganu, żelaza i niklu przedstawiono na rysunku 6.11.

Największy udział masowy chromu, manganu i krzemu ujawniono dla spawania z prędkością 1,0 m/min (rys. 6.11 a, b, c, d, i, j). Największą zawartością żelaza charakteryzowało się spawanie z prędkością 0,8 m/min (rys. 6.11 e, f). W przypadku niklu największy udział masowy wystąpił podczas spawania z prędkością 1,5 m/min (rys. 6.11 g, h).

Analiza nie wykazała wpływu prędkości spawania hybrydowego na skład chemiczny pyłu.

6.1.6. Podsumowanie analizy składu chemicznego

Analiza składu chemicznego pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali w gatunku 1.4301 i 1.4828 ujawniła, że głównymi składnikami pyłu są żelazo, chrom, mangan, nikiel i krzem (tablice 6.1 - 6.3). Przeprowadzona analiza wyników wykazała wpływ parametrów technologicznych procesu na udział masowy poszczególnych pierwiastków (tablica 6.4).

Tablica 6.4. Wpływ parametrów technologicznych spawania łukowego, laserowego i hybrydowego na skład chemiczny pyłu ↓

	Wzrost	Udział masowy				
		Cr	Mn	Fe	Ni	Si
Spawanie łukowe	V _{dr}	↑	↓	↓	↑	↑
	V _{sp}	↓	↓	↑	↑	↑
Spawanie laserowe techniką z oczkiem	P	↑	↑	↓	↓	--
	V _{sp}	↓	--	--	↑	↑
Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem	P	↑	↑	↓	↓	--
	V _{sp}	--	↓	↑	↓	--
Spawanie hybrydowe	P	↑	↑	↓	--	--
	V _{dr}	--	--	--	--	--
	V _{sp}	--	--	--	--	--
↑ – wzrost; ↓ – spadek; -- – brak zależności V _{dr} – prędkość podawania drutu [m/min]; V _{sp} – prędkość spawania [m/min]; P – moc wiązki laserowej [W]						

W badaniach wykazano również wpływ gatunku materiału podstawowego na skład chemiczny pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego (rys. 6.1).

Zawartość krzemu, chromu, żelaza i niklu w stali 1.4828 była większa w porównaniu do stali 1.4301. Badania składu chemicznego pyłu potwierdziły, że dla wszystkich analizowanych metod spawania stali 1.4828 wykazano większy udział masowy tych pierwiastków. Z kolei spawanie łukowe, laserowe i hybrydowe stali 1.4301 charakteryzowało się większą zawartością manganu (rys. 6.1 a-d).

O zagrożeniu środowiska pracy emisją substancji niebezpiecznych decyduje nie tylko ich zawartość procentowa w pyle, ale również bardzo istotnym czynnikiem jest wielkość emisji pyłu całkowitego. W tablicach 6.5 – 6.7 zestawiono wielkość emisji głównych pierwiastków podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego.

Tablica 6.5. Emisja czasowa głównych pierwiastków podczas spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie łukowe stali 1.4301								
Parametry technologiczne				Emisja czasowa [mg/s]				
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
250	28	8,5	0,8	0,091	0,515	0,291	1,286	0,157
250	28	8,5	1,0	0,089	0,491	0,278	1,258	0,155
250	28	8,5	1,5	0,084	0,395	0,209	1,035	0,137
200	25	6,5	1,0	0,038	0,214	0,132	0,582	0,064
300	30	10,5	1,0	0,133	0,553	0,289	1,422	0,203
Spawanie łukowe stali 1.4828								
Parametry technologiczne				Emisja czasowa [mg/s]				
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
250	28	8,5	0,8	0,097	0,428	0,177	1,070	0,149
250	28	8,5	1,0	0,107	0,400	0,144	1,042	0,156
250	28	8,5	1,5	0,093	0,330	0,106	0,918	0,134
200	25	6,5	1,0	0,051	0,182	0,075	0,538	0,054
300	30	10,5	1,0	0,150	0,539	0,183	1,367	0,211

Tablica 6.6. Emisja czasowa głównych pierwiastków podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie laserowe stali 1.4301						
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
4500	0,5	0,004	0,174	0,099	0,401	0,033
4500	1,0	0,001	0,099	0,055	0,281	0,024
4500	1,5	0,001	0,091	0,050	0,257	0,021
6500	1,0	0,001	0,114	0,070	0,272	0,023
6500	1,5	0,002	0,098	0,056	0,262	0,023
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	0,003	0,113	0,051	0,262	0,020
2500	1,0	0,001	0,077	0,040	0,189	0,013
4500	0,5	0,002	0,169	0,094	0,387	0,028
4500	1,0	0,000	0,097	0,055	0,233	0,015
4500	1,5	0,001	0,078	0,051	0,235	0,014
Spawanie laserowe stali 1.4828						
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	0,008	0,145	0,028	0,355	0,054
4500	0,5	0,011	0,177	0,028	0,446	0,058
4500	1,0	0,011	0,129	0,025	0,340	0,046
4500	1,5	0,008	0,111	0,025	0,288	0,039
6500	1,0	0,006	0,150	0,031	0,365	0,048
6500	1,5	0,010	0,119	0,032	0,291	0,038
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	0,5	0,002	0,118	0,022	0,291	0,036
2500	1,0	0,000	0,099	0,014	0,244	0,032
4500	0,5	0,006	0,185	0,033	0,412	0,054
4500	1,0	0,002	0,141	0,023	0,310	0,034
4500	1,5	0,002	0,114	0,017	0,251	0,027

Tablica 6.7. Emisja czasowa głównych pierwiastków podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie hybrydowe stali 1.4301									
Parametry technologiczne					Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	250	28	8,5	1,0	0,012	0,274	0,149	0,675	0,060
4500	250	28	8,5	0,8	0,014	0,341	0,184	0,847	0,074
4500	250	28	8,5	1,0	0,014	0,299	0,168	0,716	0,054
4500	250	28	8,5	1,5	0,007	0,238	0,127	0,608	0,060
6500	250	28	8,5	0,8	0,017	0,356	0,192	0,877	0,068
6500	250	28	8,5	1,0	0,037	0,334	0,192	0,765	0,061
6500	250	28	8,5	1,5	0,009	0,274	0,145	0,666	0,055
4500	200	25	6,5	1,0	0,011	0,232	0,131	0,583	0,053
4500	300	30	10,5	1,0	0,010	0,336	0,181	0,817	0,067
Spawanie hybrydowe stali 1.4828									
Parametry technologiczne					Emisja czasowa [mg/s]				
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
2500	250	28	8,5	1,0	0,049	0,250	0,101	0,593	0,068
4500	250	28	8,5	0,8	0,016	0,315	0,105	0,797	0,087
4500	250	28	8,5	1,0	0,017	0,274	0,098	0,664	0,066
4500	250	28	8,5	1,5	0,015	0,206	0,076	0,539	0,063
6500	250	28	8,5	0,8	0,013	0,354	0,103	0,827	0,102
6500	250	28	8,5	1,0	0,015	0,317	0,091	0,693	0,095
6500	250	28	8,5	1,5	0,009	0,259	0,092	0,613	0,066
4500	200	25	6,5	1,0	0,013	0,205	0,078	0,522	0,062
4500	300	30	10,5	1,0	0,020	0,306	0,111	0,758	0,095

Największą emisję czasową chromu, niklu, żelaza, manganu i krzemu obserwowano podczas spawania łukowego, ponieważ spawanie łukowe charakteryzowało się największą emisją pyłu całkowitego. Analiza wyników wykazała, że emisja czasowa chromu i niklu podczas spawania laserowego była średnio trzykrotnie mniejsza niż podczas spawania hybrydowego i blisko 5-krotnie niż podczas spawania łukowego (tablice 6.5-6.7).

Uzupełnieniem analizy składu chemicznego pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828 było oznaczenie chromu(VI) z uwagi na jego udowodnione działanie rakotwórcze na organizm człowieka [8].

Zawartość chromu(VI) oznaczono metodą spektrofotometryczną na fotometrze SQ118 firmy Merck będącego na wyposażeniu Grupy Badawczej: Chemia Analityczna, Łukasiewicz- Górnośląskiego Instytutu Technologicznego. Zasada działania spektrofotometru polega na rejestrowaniu monochromatycznego promieniowania emitowanego przez źródło promieniowania. Urządzenie mierzy, ile światła zostaje pochłonięte przez substancje chemiczne w próbce. Pochłonięte światło jest proporcjonalne do stężenia analitu, co pozwala na ilościową analizę różnych związków. Spektrum działania fotometru SQ118 obejmuje długość fal od około 320 nm do 1100 nm. Oznacza to, że urządzenie może wykorzystywać zarówno światło widzialne, jak i część bliskiej podczerwieni do analizy próbek.

Wyniki zawartości chromu(VI) w pyłe oraz zawartości procentowej chromu(VI) w odniesieniu do chromu całkowitego przedstawiono w tablicach 6.8-6.10.

Tablica 6.8. Zawartość chromu(VI) w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828

Stal 1.4301					
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
200	25	6,5	1,0	0,020	0,096
250	28	8,5	0,8	0,007	0,032
250	28	8,5	1,0	0,010	0,046
250	28	8,5	1,5	0,038	0,179
300	30	10,5	1,0	0,017	0,080
Stal 1.4828					
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
200	25	6,5	1,0	0,023	0,114
250	28	8,5	0,8	0,024	0,108
250	28	8,5	1,0	0,026	0,120
250	28	8,5	1,5	0,022	0,105
300	30	10,5	1,0	0,024	0,109

Tablica 6.9. Zawartość chromu(VI) w pyłe pochodzącym ze spawania laserowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828

Stal 1.4301			
Spawanie laserowe – technika z oczkiem			
P [W]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
4500	0,5	0,023	0,094
4500	1	0,036	0,168
4500	1,5	0,005	0,023
6500	1,0	0,110	0,463
6500	1,5	0,076	0,342
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem			
P [W]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
2500	0,5	0,110	0,437
2500	1,0	0,053	0,221
4500	0,5	0,049	0,197
4500	1,0	0,120	0,494
4500	1,5	0,180	0,874
Stal 1.4828			
Spawanie laserowe – technika z oczkiem			
P [W]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
2500	0,5	0,056	0,228
4500	0,5	0,069	0,281
4500	1,0	0,061	0,261
4500	1,5	0,035	0,149
6500	1,5	0,068	0,280
Spawanie laserowe – technika z jeziorkiem			
P [W]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
2500	0,5	0,071	0,282
2500	1,0	0,043	0,169
4500	0,5	0,073	0,272
4500	1,0	0,098	0,355
4500	1,5	0,082	0,296

Tablica 6.10. Zawartość chromu(VI) w pyłe pochodzącym ze spawania hybrydowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828

Stal 1.4301						
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
2500	250	28	8,5	1,0	0,001	0,006
4500	250	28	8,5	0,8	0,005	0,020
4500	250	28	8,5	1,0	0,003	0,011
4500	250	28	8,5	1,5	0,002	0,007
6500	250	28	8,5	0,8	0,001	0,005
6500	250	28	8,5	1,0	0,001	0,005
6500	250	28	8,5	1,5	0,001	0,006
4500	200	25	6,5	1,0	0,002	0,007
4500	300	30	10,5	1,0	0,001	0,005
Stal 1.4828						
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Udział Cr(VI) w pyłe [%]	Udział Cr(VI) w chromie całkowitym [% Cr _{całk.}]
2500	250	28	8,5	1,0	0,002	0,007
4500	250	28	8,5	0,8	0,001	0,005
4500	250	28	8,5	1,0	0,001	0,006
4500	250	28	8,5	1,5	0,011	0,049
6500	250	28	8,5	0,8	0,001	0,005
6500	250	28	8,5	1,0	0,016	0,063
6500	250	28	8,5	1,5	0,002	0,006
4500	200	25	6,5	1,0	0,002	0,008
4500	300	30	10,5	1,0	0,001	0,005

Zawartość chromu(VI) w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 zawierała się w przedziale od 0,007 do 0,04%, w przypadku spawania laserowego udział chromu(VI) był w zakresie od 0,02 do 0,18%, natomiast w pyłe ze spawania hybrydowego zawartość chromu(VI) w pyłe nie przekroczyła 0,02%.

Analizując zawartość chromu(VI) w odniesieniu do chromu całkowitego w pyłe stwierdzono:

- podczas spawania łukowego chrom(VI) stanowił 0,03-0,18% chromu całkowitego;
- w pyłe pochodzącym ze spawania laserowego udział chromu(VI) w pyłe był największy ze wszystkich analizowanych metod spawania, a jego udział w chromie całkowitym wyniósł do 0,9%;
- w przypadku spawania hybrydowego stosunek chromu(VI) do Cr całkowitego był w zakresie od 0,005 do 0,06%.

6.1.7. Oznaczenie składu chemicznego pyłu w warunkach przemysłowych

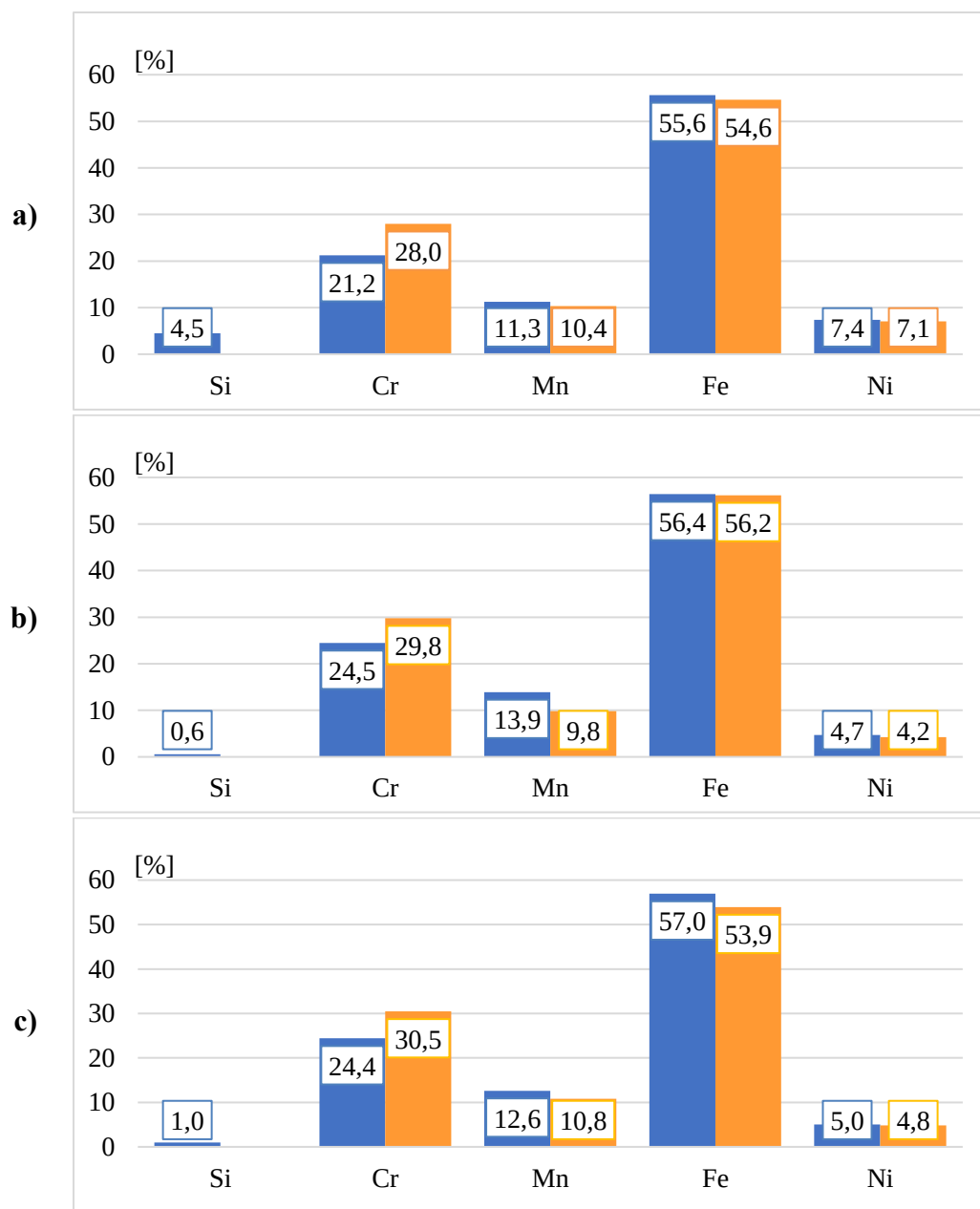
Oznaczenie składu chemicznego za pomocą mikroanalizy składu chemicznego EDS odbywa się w warunkach laboratoryjnych, a przygotowanie próbek do badania jest procesem czasochłonnym. W celu szybkiej weryfikacji próbek pyłu pod kątem składu chemicznego w warunkach przemysłowych korzystne jest zastosowanie przenośnych urządzeń analitycznych. Przykładem takiego narzędzia jest przenośny fluorescencyjny spektrometr rentgenowski. Fluorescencyjna spektrometria rentgenowska (XRF) służy do jakościowej i ilościowej identyfikacji pierwiastków w danej substancji. Pierwiastki są wykrywane na podstawie charakterystycznej długości fali lub energii emisji promieniowania rentgenowskiego. Stężenie danego pierwiastka określane jest za pomocą pomiaru intensywności linii jego charakterystyki [155].

Badania składu chemicznego pyłu spawalniczego wykonano we współpracy z firmą Olympus/ Evident Scientific. Do badań wykorzystano przenośny spektrometr Vanta C firmy Olympus (VCA) (anoda srebrna (Ag) z kalibracjami do badania próbek geochemicznych (filtry) oraz stopów metali. Czas pomiaru dla każdej próbki wynosił 45 s. Parametry lampy rentgenowskiej (miniaturowej) to 4 W, 8-50 kV. Na rysunku 6.12 przedstawiono przykładowe wyniki badania składu chemicznego metodą XRF wybranych próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego oraz zestawiono je z wynikami uzyskanymi podczas analizy SEM-EDS.

Podobnie jak w metodzie EDS dominującym składnikiem pyłu było żelazo, następnie chrom, mangan i nikiel. Uzyskane wyniki wykazały, że udział masowy poszczególnych pierwiastków w pyłe jest związany z zastosowaną do ich oznaczenia metodą badawczą. Porównując udział masowy poszczególnych pierwiastków wykazano następujące różnice (tablica 6.11).

Tablica 6.11. Porównanie udziału masowego pierwiastków w pyłe pochodzących ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828

	Fe	Cr	Mn	Ni	Si
SEM-EDS	+	-	+	+	+
XRF	-	+	-	-	nie wykryto
+ - większy udział masowy; - - mniejszy udział masowy					



Rys. 6.12. Skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania: a) łukowego, b) laserowego techniką z oczkiem, c) hybrydowego stali 1.4301 oznaczonego metodami SEM-EDS (■) i XRF (■)

- a) spawanie łukowe ($I=250$ A; $U=28$ V; $V_{dr}=8,5$ m/min; $V_{sp}=1,5$ m/min),
 b) spawanie laserowe techniką z oczkiem ($P=4500$ W; $V_{sp}=0,5$ m/min),
 c) spawanie hybrydowe ($P=4500$ W; $V_{dr}=8,5$ m/min; $V_{sp}=0,8$ m/min)

W podsumowaniu należy stwierdzić, że podczas opracowywania technologii spawania połączonej z oceną zagrożenia emisją pyłu spawalniczego należy zastosować do oznaczania składu chemicznego pyłu metodę EDS jako bardziej dokładną, natomiast w celu sprawdzenia i weryfikacji w warunkach przemysłowych przenośny spektrometr XRF z uwagi na szybkość wykonania analizy będzie odpowiedni.

6.2. Jakościowa i ilościowa analiza fazowa pyłu

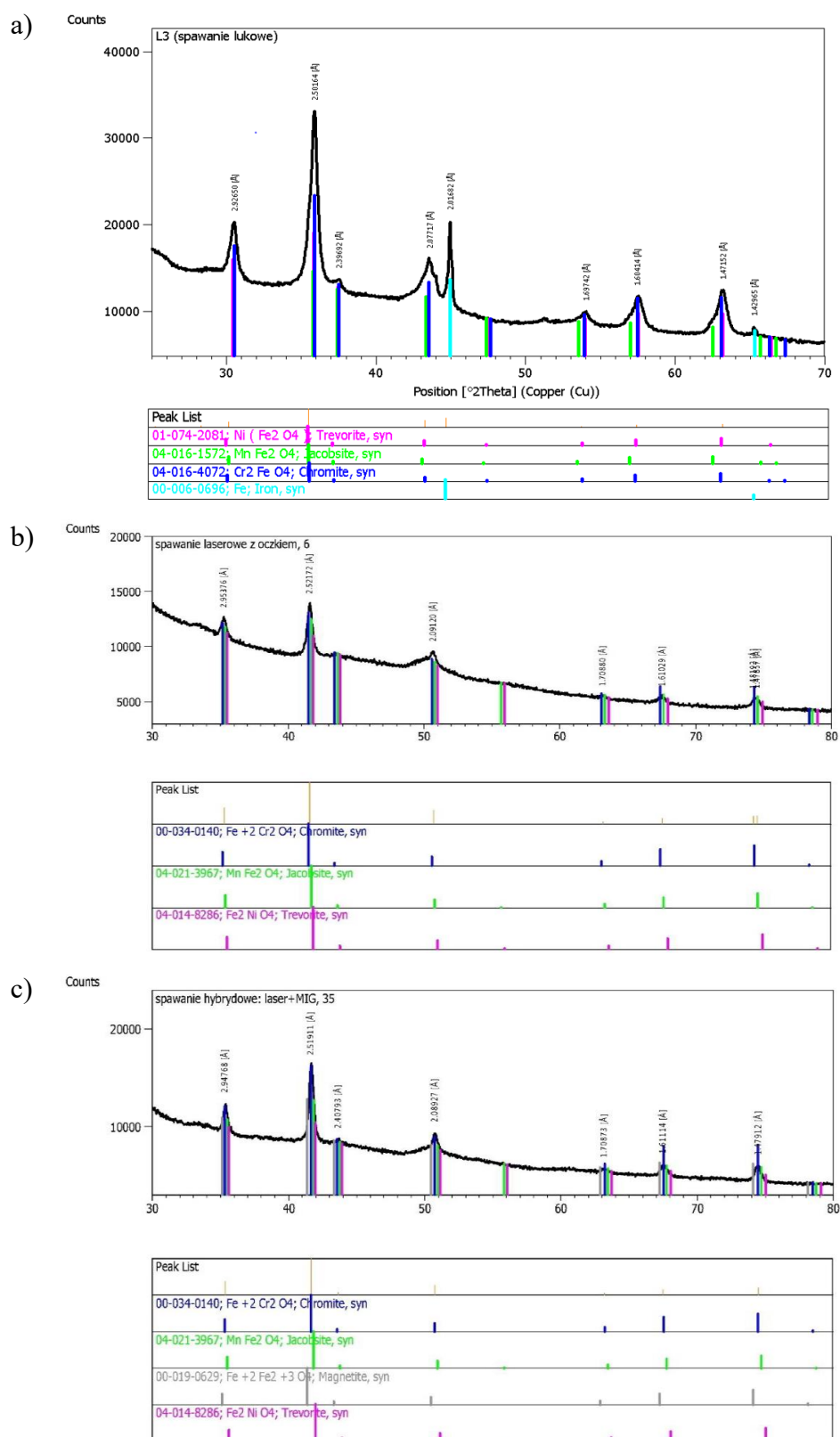
Do wykonania rentgenowskiej jakościowej analizy fazowej pyłu ze spawania, wykorzystano proszkowy dyfraktometr rentgenowski Empyrean, firmy PANalytical. Dyfraktometr znajduje się na wyposażeniu Grupy Badawczej Badań Właściwości i Struktury Materiałów, Górnośląskiego Instytutu Technologicznego w Gliwicach. Badania wykonano stosując filtrowane promieniowanie miedzi w konfiguracji z detektorem Pixcel. Identyfikacji składu fazowego dokonano zgodnie z akredytowaną procedurą M1-RTG pt.: "Identyfikacja fazowa" (wydanie siódme z dn. 13.07.2018) oraz bazą International Centre for Diffraction Data PDF-4+, wersja 2022. Analiza ilościowa została wykonana metodą Rietvela zgodnie z akredytowaną procedurą M2-RTG pt.: Ilościowa analiza fazowa (wyd. siódme z dnia 13.07.2018). Warunki pomiarowe:

- warunki pracy lampy: 40 kV / 40 mA,
- zakres kątowy: 10° - $100^{\circ} 2\theta$,
- krok pomiarowy: $0,02626^{\circ} 2\theta$,
- czas zliczeń: 600 s.

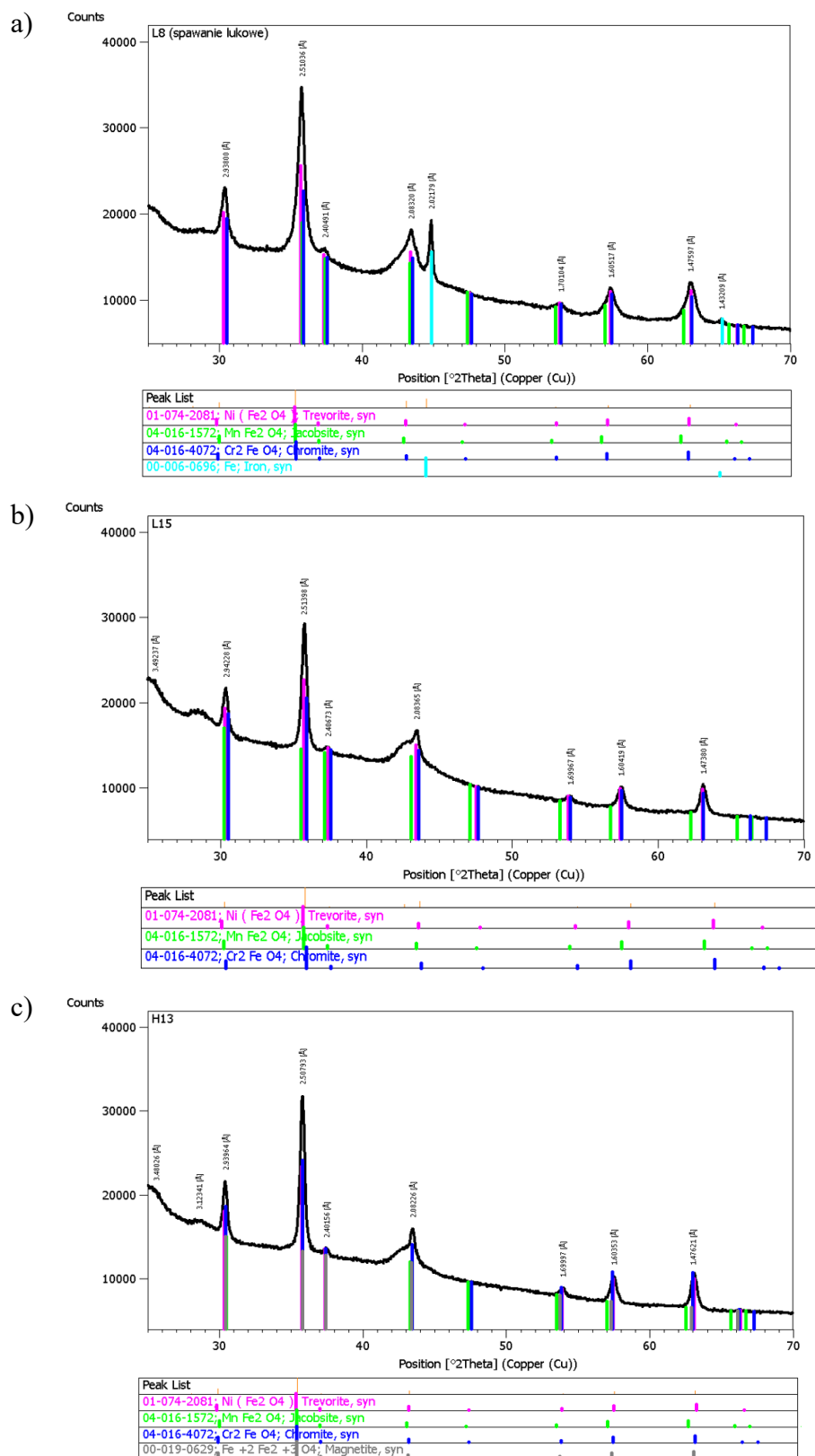
Próbki do badań wycięto z filtru, na którym znajdował się pył z procesu spawania. Następnie wycinek umieszczono w uchwycie krzemowym. W celu wyeliminowania linii dyfrakcyjnych pochodzących od filtru, wykonano również dyfraktogram rentgenowski czystego filtru i porównywano każdorazowo z dyfraktogramem uzyskanym dla badanej próbki.

6.2.1. Wyniki identyfikacji fazowej i ilościowej analizy fazowej pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

Dyfraktogramy rentgenowskie wybranych próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunkach 6.13 i 6.14.



Rys. 6.13. Dyfraktogramy rentgenowskie próbek pyłu ze spawania stali 1.4301: a) spawania łukowego prędkość spawania 1,0 m/min; prędkość podawania drutu 8,5 m/min; b) spawania laserowego techniką z oczkiem: moc wiązki laserowej 4500 W; prędkość spawania 1,0 m/min, c) spawania hybrydowego: moc wiązki laserowej 4500 W; prędkość spawania 1,0 m/min; prędkość podawania drutu 8,5 m/min



Rys. 6.14. Dyfraktogramy rentgenowskie próbek pyłu ze spawania stali 1.4828: a) spawania łukowego prędkość spawania 1,0 m/min; prędkość podawania drutu 8,5 m/min; b) spawania laserowego techniką z oczkiem: moc wiązki laserowej 2500 W; prędkość spawania 0,5 m/min; c) spawania hybrydowego: moc wiązki laserowej 4500 W; prędkość spawania 0,8 m/min; prędkość podawania drutu 8,5 m/min

W tablicach 6.12-6.14 przedstawiono ilościowe wyniki analizy fazowej próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828.

Tablica 6.12. Skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie łukowe stali 1.4301							
Parametry technologiczne				Udział składników fazowych [% mas.]			
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	α-Fe
250	28	8,5	0,8	68,7 ± 1,1	5,4 ± 0,9	7,7 ± 0,8	18,2 ± 1,2
250	28	8,5	1,0	70,1 ± 1,2	7,8 ± 0,9	6,8 ± 0,8	15,3 ± 1,1
250	28	8,5	1,5	67,9 ± 2,1	6,9 ± 0,9	7,1 ± 1,3	18,1 ± 0,9
200	25	6,5	1,0	69,8 ± 1,1	6,3 ± 1,2	5,9 ± 0,9	18,0 ± 1,2
300	30	10,5	1,0	69,3 ± 0,4	7,0 ± 0,2	6,3 ± 0,3	17,4 ± 0,2
Spawanie łukowe stali 1.4828							
Parametry technologiczne				Udział składników fazowych [% mas.]			
I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	α-Fe
250	28	8,5	0,8	72,8 ± 1,4	6,2 ± 1,0	7,0 ± 1,2	14,0 ± 0,9
250	28	8,5	1,0	71,8 ± 1,1	5,1 ± 0,9	9,6 ± 0,9	13,5 ± 1,0
250	28	8,5	1,5	71,1 ± 1,1	5,5 ± 0,8	8,1 ± 1,0	15,3 ± 0,8
200	25	6,5	1,0	71,3 ± 1,1	5,7 ± 0,9	7,9 ± 0,9	15,1 ± 0,9
300	30	10,5	1,0	71,5 ± 0,4	3,4 ± 0,2	7,2 ± 0,3	17,9 ± 0,2

Tablica 6.13. Skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie laserowe stali 1.4301				
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Udział składników fazowych [% mas.]		
Moc [W]	V _{sp} [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	1,0	78,2 ± 1,3	6,8 ± 0,9	15,0 ± 1,0
4500	0,5	79,7 ± 1,6	8,1 ± 0,5	12,6 ± 1,2
4500	1,0	75,3 ± 1,3	9,9 ± 1,0	14,8 ± 1,0
4500	1,5	75,1 ± 1,2	8,6 ± 0,5	16,3 ± 0,5
6500	1,0	72,7 ± 1,2	7,8 ± 0,9	19,5 ± 0,9
6500	1,5	79,6 ± 1,5	4,2 ± 0,7	16,2 ± 1,0
Parametry procesu spawania techniką z jeziorciem		Udział składników fazowych [% mas.]		
Moc [W]	V _{sp} [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	0,5	78,4 ± 1,6	2,7 ± 1,3	18,9 ± 0,7
2500	1,0	76,3 ± 1,7	4,8 ± 1,4	18,9 ± 1,3
4500	0,5	77,7 ± 1,3	11,1 ± 1,0	11,2 ± 0,9
4500	1,0	79,9 ± 1,3	7,4 ± 1,2	12,7 ± 1,2
4500	1,5	80,7 ± 1,4	3,4 ± 1,4	15,9 ± 0,9

Tablica 6.13. Skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie laserowe stali 1.4828				
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Udział składników fazowych [% mas.]		
Moc [W]	Vsp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	1,0	81,4 ± 0,8	9,3 ± 0,5	9,3 ± 0,7
4500	0,5	71,9 ± 2,1	3,4 ± 1,0	24,7 ± 1,4
4500	1,0	78,8 ± 0,9	9,9 ± 0,6	11,3 ± 0,7
4500	1,5	74,8 ± 1,6	5,3 ± 0,9	19,9 ± 1,0
6500	1,5	72,7 ± 1,9	7,0 ± 1,3	20,3 ± 1,1
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Udział składników fazowych [% mas.]		
Moc [W]	Vsp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	0,5	81,8 ± 2,1	5,1 ± 1,0	13,1 ± 0,9
2500	1,0	73,5 ± 0,8	9,2 ± 0,6	17,3 ± 0,7
4500	0,5	73,3 ± 0,9	8,7 ± 0,6	18,0 ± 0,7
4500	1,0	74,5 ± 0,7	7,1 ± 0,5	18,4 ± 0,7
4500	1,5	79,8 ± 0,8	7,7 ± 0,5	12,5 ± 0,7

Tablica 6.14. Skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie hybrydowe stali 1.4301						
Parametry technologiczne			Udział składników fazowych [% mas.]			
Moc [W]	Vsp [m/min]	Vdr [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄
2500	1,0	8,5	78,0 ± 1,5	6,5 ± 1,2	12,2 ± 1,0	3,3 ± 0,5
4500	0,8	8,5	71,9 ± 1,8	9,7 ± 0,8	14,3 ± 1,0	4,1 ± 0,8
4500	1,0	8,5	79,7 ± 2,2	4,9 ± 0,8	10,9 ± 1,0	4,5 ± 2,0
4500	1,5	8,5	76,7 ± 1,1	7,8 ± 0,5	10,4 ± 0,6	5,1 ± 1,0
6500	0,8	8,5	74,3 ± 1,8	8,8 ± 1,6	12,5 ± 0,9	4,4 ± 0,9
6500	1,0	8,5	67,7 ± 1,2	14,1 ± 1,0	12,6 ± 0,8	5,6 ± 0,5
6500	1,5	8,5	72,8 ± 1,3	8,9 ± 0,5	13,2 ± 0,8	5,1 ± 0,7
4500	1,0	6,5	74,4 ± 1,7	7,8 ± 0,7	11,9 ± 0,9	5,9 ± 0,7
4500	1,0	10,5	71,4 ± 1,0	7,1 ± 0,5	14,6 ± 0,6	6,9 ± 0,7
Spawanie hybrydowe stali 1.4828						
Parametry technologiczne			Udział składników fazowych [% mas.]			
Moc [W]	Vsp [m/min]	Vdr [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄
2500	1,0	8,5	64,5 ± 0,7	10,4 ± 0,5	8,4 ± 0,5	16,7 ± 0,4
4500	0,8	8,5	67,3 ± 0,9	7,2 ± 1,3	8,2 ± 1,1	17,3 ± 1,2
4500	1,0	8,5	69,0 ± 0,8	11,6 ± 0,7	10,3 ± 0,6	9,1 ± 0,4
4500	1,5	8,5	69,3 ± 1,2	6,7 ± 1,0	13,9 ± 0,8	10,1 ± 0,9
6500	0,8	8,5	69,1 ± 0,8	5,8 ± 0,7	18,3 ± 0,6	6,8 ± 0,4
6500	1,0	8,5	64,0 ± 1,0	8,7 ± 0,8	17,6 ± 0,6	9,7 ± 0,5
6500	1,5	8,5	66,4 ± 0,9	10,7 ± 0,7	14,6 ± 0,6	8,4 ± 0,4
4500	1,0	6,5	67,5 ± 1,0	11,4 ± 0,8	12,4 ± 0,7	8,7 ± 0,4
4500	1,0	10,5	67,6 ± 0,9	9,7 ± 0,8	13,5 ± 0,6	9,2 ± 0,4

Wyniki identyfikacji fazowej pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 wykazały obecność związków żelaza, manganu, chromu i niklu. Na podstawie wyników analizy XRD zidentyfikowano następujące fazy: tlenek chromu(III) żelaza(II) ($\text{Cr}_2\text{FeO}_4 - \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$), tlenek manganu(II) żelaza(III) ($\text{MnFe}_2\text{O}_4 - \text{MnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) oraz tlenek niklu(II) żelaza(III) ($\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{NiO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$). Pył pochodzący ze spawania łukowego zawierał dodatkowo żelazo. W przypadku spawania hybrydowego oznaczono także tlenek żelaza(II) żelaza(III) ($\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) (tablice 6.12-6.14).

Fazę główną pyłu we wszystkich badanych metodach spawania stanowił tlenek chromu(III) żelaza(II) ($\text{Cr}_2\text{FeO}_4 - \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$) (tablice 6.12-6.14). Związek ten należy do grupy spineli chromowych o wzorze ogólnym AB_2O_4 [104]. Związki te w swojej strukturze zawierają również chrom na VI stopniu utlenienia. Chrom(VI) jest substancją zaklasyfikowaną według wytycznych IARC (Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem) do grupy 1, czyli do substancji mających udowodnione działanie rakotwórcze [8].

Podobnie jak w przypadku składu chemicznego wyniki analizy składu fazowego pyłu należy rozpatrywać w odniesieniu do emisji pyłu całkowitego, dlatego też w tablicach 6.15-6.17 zestawiono emisję głównych składników fazowych pyłu wyrażoną w mg/s.

Tablica 6.15. Emisja czasowa składników fazowych pyłu powstającego podczas spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie łukowe stali 1.4301							
Parametry technologiczne				Emisja składników fazowych [mg/s]			
I [A]	U [V]	Vdr [m/min]	Vsp [m/min]	Cr_2FeO_4	MnFe_2O_4	NiFe_2O_4	$\alpha\text{-Fe}$
250	28	8,5	0,8	1,608	0,126	0,180	0,426
250	28	8,5	1,0	1,591	0,177	0,154	0,347
250	28	8,5	1,5	1,263	0,128	0,132	0,337
200	25	6,5	1,0	0,719	0,065	0,061	0,185
300	30	10,5	1,0	1,802	0,182	0,164	0,452
Spawanie łukowe stali 1.4828							
Parametry technologiczne				Emisja składników fazowych [mg/s]			
I [A]	U [V]	Vdr [m/min]	Vsp [m/min]	Cr_2FeO_4	MnFe_2O_4	NiFe_2O_4	$\alpha\text{-Fe}$
250	28	8,5	0,8	1,398	0,119	0,134	0,269
250	28	8,5	1,0	1,328	0,094	0,178	0,250
250	28	8,5	1,5	1,123	0,087	0,128	0,242
200	25	6,5	1,0	0,642	0,051	0,071	0,136
300	30	10,5	1,0	1,752	0,083	0,176	0,439

Tablica 6.16. Emisja czasowa składników fazowych pyłu powstającego podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie laserowe stali 1.4301				
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Emisja składników fazowych [mg/s]		
Moc [W]	Vsp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	1,0	0,289	0,025	0,056
4500	0,5	0,563	0,058	0,089
4500	1,0	0,346	0,046	0,068
4500	1,5	0,315	0,036	0,068
6500	1,0	0,349	0,037	0,094
6500	1,5	0,350	0,018	0,071
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Emisja składników fazowych [mg/s]		
Moc [W]	Vsp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	0,5	0,353	0,012	0,085
2500	1,0	0,244	0,015	0,060
4500	0,5	0,528	0,075	0,076
4500	1,0	0,320	0,030	0,051
4500	1,5	0,307	0,013	0,060
Spawanie laserowe stali 1.4828				
Parametry procesu spawania techniką z oczkiem		Emisja składników fazowych [mg/s]		
Moc [W]	Vsp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	1,0	0,383	0,044	0,044
4500	0,5	0,518	0,024	0,178
4500	1,0	0,433	0,054	0,062
4500	1,5	0,352	0,025	0,094
6500	1,5	0,356	0,034	0,099
Parametry procesu spawania techniką z jeziorkiem		Emisja składników fazowych [mg/s]		
Moc [W]	V sp [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄
2500	0,5	0,384	0,024	0,062
2500	1,0	0,287	0,036	0,067
4500	0,5	0,506	0,060	0,124
4500	1,0	0,380	0,036	0,094
4500	1,5	0,327	0,032	0,051

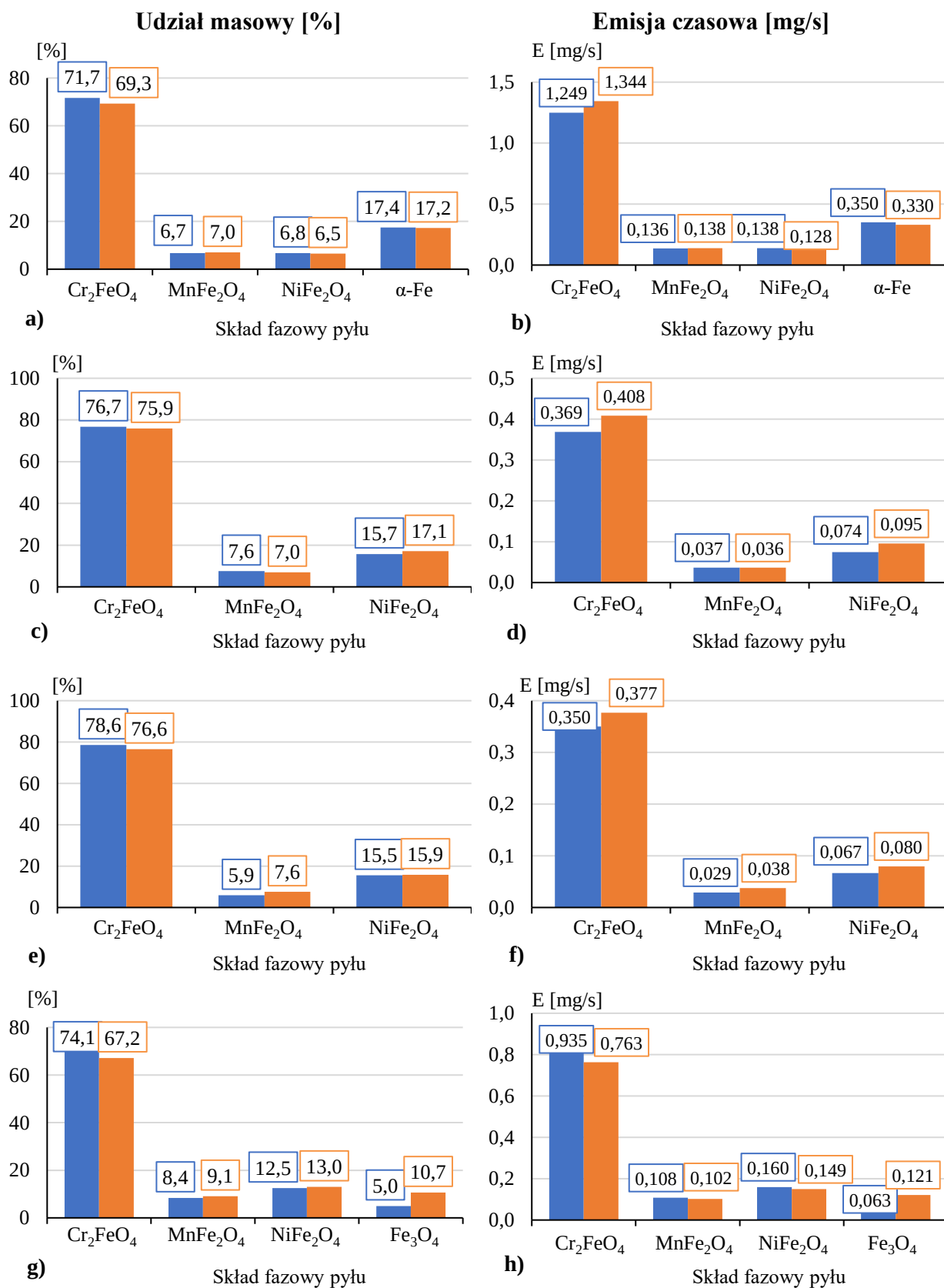
Tablica 6.17. Emisja czasowa składników fazowych pyłu powstającego podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828

Spawanie hybrydowe stali 1.4301						
Parametry technologiczne			Emisja składników fazowych [mg/s]			
Moc [W]	Vsp [m/min]	Vdr [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄
2500	1,0	8,5	0,913	0,076	0,143	0,039
4500	0,8	8,5	1,050	0,142	0,209	0,060
4500	1,0	8,5	0,996	0,061	0,136	0,056
4500	1,5	8,5	0,798	0,081	0,108	0,053
6500	0,8	8,5	1,122	0,133	0,189	0,066
6500	1,0	8,5	0,941	0,196	0,175	0,078
6500	1,5	8,5	0,837	0,102	0,152	0,059
4500	1,0	6,5	0,751	0,079	0,120	0,060
4500	1,0	10,5	1,007	0,100	0,206	0,097
Spawanie hybrydowe stali 1.4828						
Parametry technologiczne			Emisja składników fazowych [mg/s]			
Moc [W]	Vsp [m/min]	Vdr [m/min]	Cr ₂ FeO ₄	MnFe ₂ O ₄	NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄
2500	1,0	8,5	0,684	0,110	0,089	0,177
4500	0,8	8,5	0,888	0,095	0,108	0,228
4500	1,0	8,5	0,773	0,130	0,115	0,102
4500	1,5	8,5	0,624	0,060	0,125	0,091
6500	0,8	8,5	0,967	0,081	0,256	0,095
6500	1,0	8,5	0,774	0,105	0,213	0,117
6500	1,5	8,5	0,690	0,111	0,152	0,087
4500	1,0	6,5	0,594	0,100	0,109	0,077
4500	1,0	10,5	0,872	0,125	0,174	0,119

Uzyskane wyniki wykazały, że najmniejszą emisję głównego składnika fazowego - tlenku chromu(III) żelaza(II), zarejestrowano podczas spawania laserowego techniką z oczkiem i jeziorkiem. Emisja Cr₂FeO₄ zawierała się w zakresie od 0,24 do 0,56 mg/s. Największą emisję tlenku chromu(III) żelaza(II), charakteryzowało się spawanie łukowe - 0,65 - 1,8 mg/s. Podczas spawania łukowego emisja Cr₂FeO₄ była ponad trzykrotnie większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa w porównaniu do spawania hybrydowego.

6.2.2. Wpływ gatunku materiału podstawowego na skład fazowy pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego

Na rysunku 6.15 przedstawiono wpływ materiału podstawowego na zawartość i emisję czasową składników fazowych pyłu pochodzącego ze spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828. Na wykresach zestawiono wartości średnie dla całego analizowanego zakresu parametrów technologicznych.



Rys. 6.15. Wpływ gatunku materiału podstawowego na zawartość i emisję czasową składników fazowych pyłu podczas spawania: a), b) łukowego, c), d) laserowego techniką z oczkiem, e), f) laserowego techniką z jeziorkiem, g), h) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Stwierdzono, że większą zawartością tlenku chromu(III) żelaza(II) charakteryzował się pył pochodzący ze spawania stali 1.4301 (rys. 6.15 a, c, e, g). Przykładowo, w pyłe ze spawania laserowego techniką z oczkiem zawartość Cr_2FeO_4 w pyłe wyniosła 76,7% dla stali 1.4301 i 75,9% dla stali 1.4828 (rys. 6.15 c).

Analiza wyników wykazała większy udział masowy MnFe_2O_4 w pyłe powstającym podczas spawania stali 1.4828 w porównaniu do pyłu ze stali 1.4301 (rys. 6.15 a, e, g). Jedynie podczas spawania laserowego techniką z oczkiem zależność była odwrotna (rys. 6.15 c).

Większy udział masowy NiFe_2O_4 obserwowano podczas spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4828 w stosunku do stali 1.4301 (rys. 6.15 c, e, g). Natomiast w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego było odwrotnie - zawartość NiFe_2O_4 wyniosła odpowiednio 6,8% dla stali 1.4301 i 6,5% dla stali 1.4828 (rys. 6.15 a).

Porównując wartości emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) podczas spawania łukowego i laserowego wykazano, że większe wartości wystąpiły dla stali 1.4828 w stosunku do stali 1.4301. Różnice w emisji tego tlenku pokazano na rys. 6.15 b, d, f. Podczas spawania hybrydowego zależność była odwrotna, większa emisja Cr_2FeO_4 wystąpiła dla stali 1.4301 (rys. 6.15 h).

Przy badanych metodach spawania wielkość emisji MnFe_2O_4 dla analizowanych stali była zbliżona (rys. 6.15 b, d, f, h).

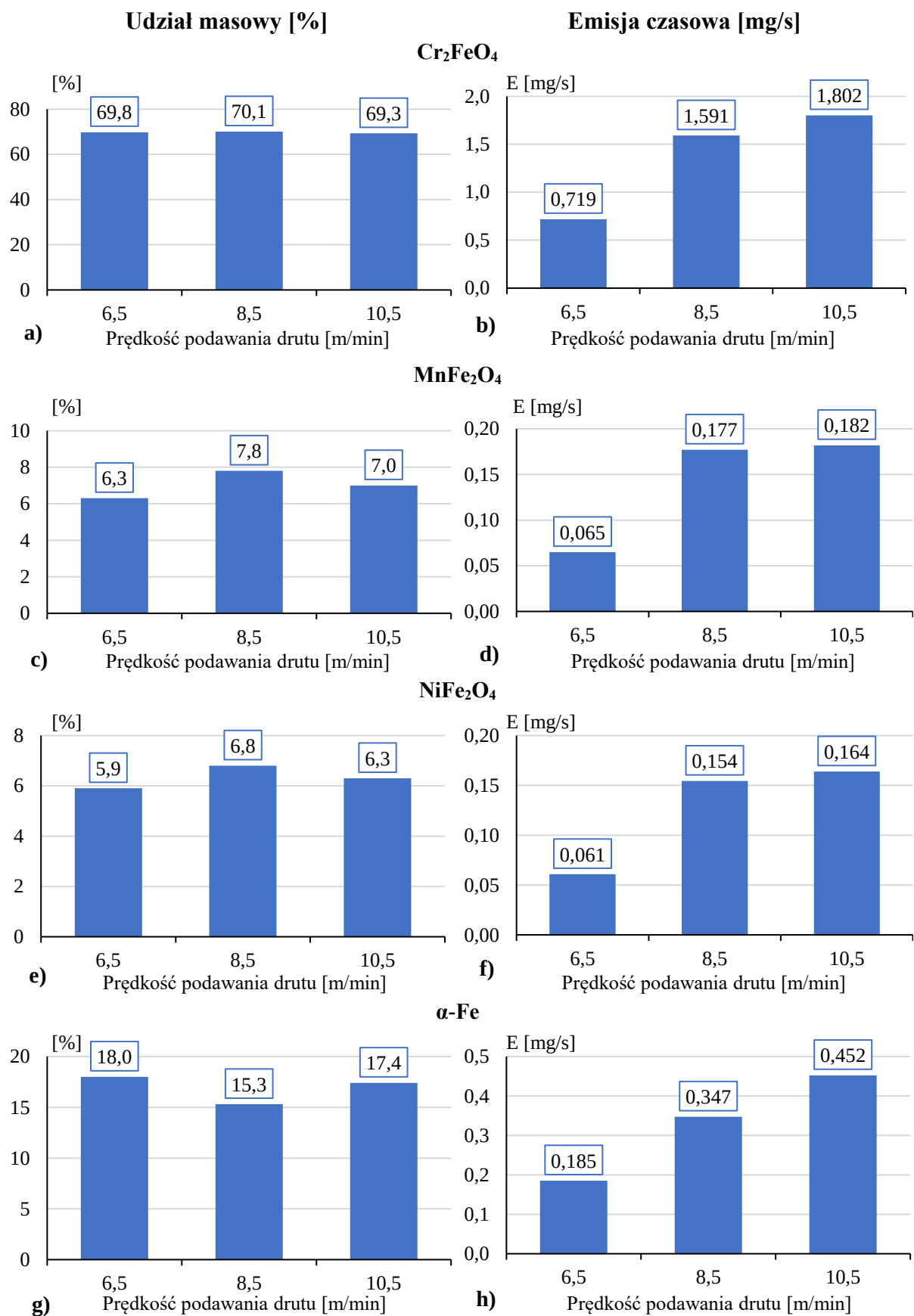
Podczas spawania laserowego większą emisję tlenku niklu(II) żelaza(III) stwierdzono dla stali 1.4828 (rys. 6.15 d, f), a podczas spawania łukowego i hybrydowego większa emisja NiFe_2O_4 wystąpiła dla stali 1.4301 (rys. 6.15 b, h). Różnica w emisji NiFe_2O_4 podczas spawania łukowego i hybrydowego wyniosła 0,01 mg/s (rys. 6.15 b, h).

6.2.3. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania łukowego na skład fazowy pyłu

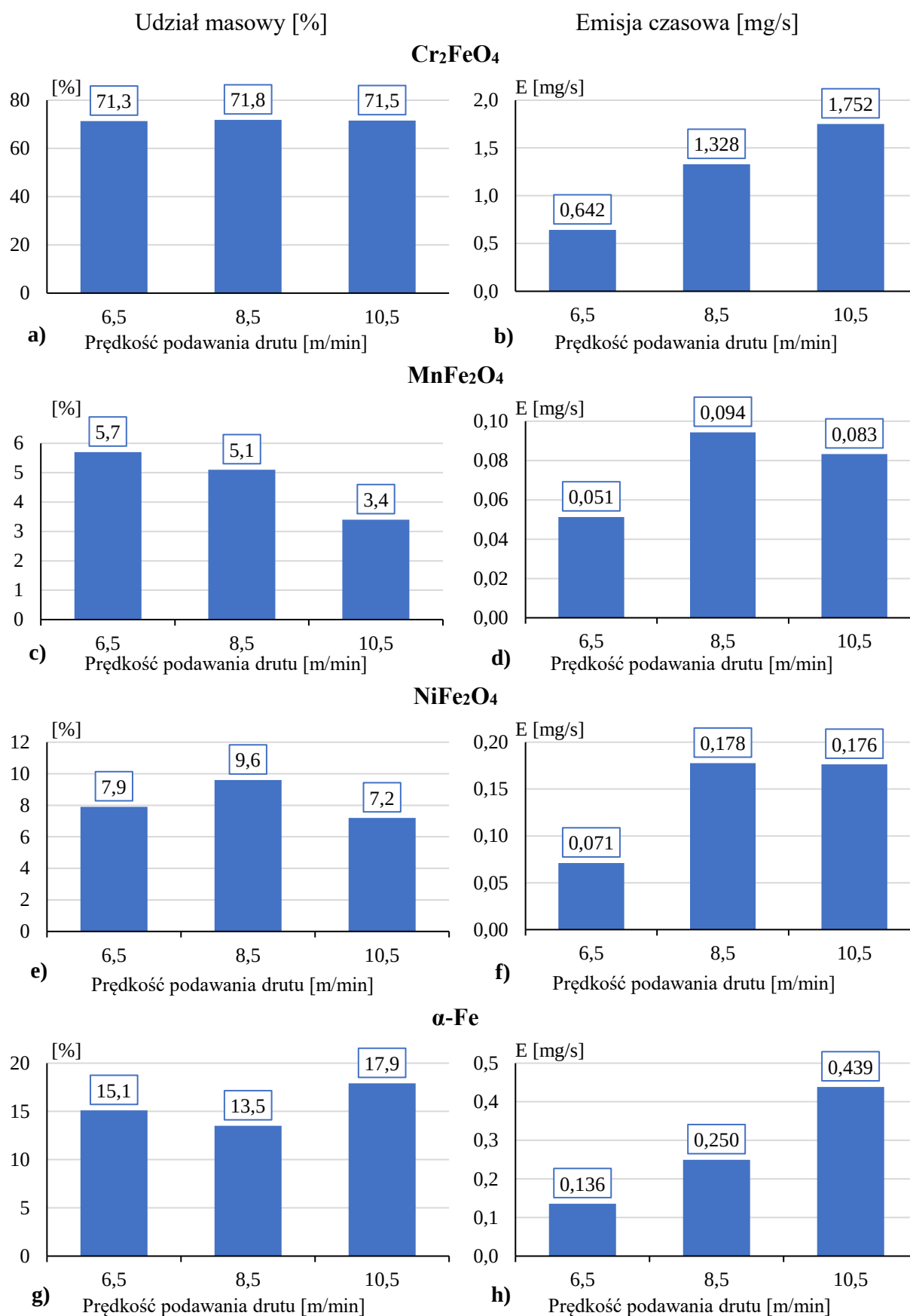
Uzyskane wyniki analizy fazowej pyłu umożliwiły określenie wpływu parametrów technologicznych procesu spawania łukowego, tj.: ilości stopionego materiału dodatkowego charakteryzowanej przez prędkość podawania drutu – V_{dr} [m/min] oraz prędkości spawania – V_{sp} [m/min] na skład fazowy pyłu.

Wpływ prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego

Skład fazowy pyłu oznaczono podczas spawania z prędkością 1,0 m/min dla trzech prędkości podawania drutu: 6,5; 8,5 i 10,5 m/min. Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy pyłu i emisję czasową składników fazowych przedstawiono na rysunkach 6.16 i 6.17.



Rys. 6.16. Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu powstającego podczas spawania łukowego stali 1.4301



Rys. 6.17. Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu powstającego podczas spawania łukowego stali 1.4828

Zawartość Cr_2FeO_4 w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 dla trzech analizowanych prędkości podawania drutu była zbliżona – różnice nie przekraczały 0,5% (rys. 6.16 a, 6.17 a). Nie wykazano również wpływu prędkości podawania drutu na zawartość pozostałych składników fazowych (rys. 6.16 c, e, g i 6.17 c, e, g). Największy udział masowy tlenku manganu(II) żelaza(III) w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4301 oznaczono dla prędkości podawania drutu 8,5 m/min, w przypadku pyłu ze spawania łukowego stali 1.4828 największa zawartość MnFe_2O_4 wystąpiła gdy spawano z prędkością podawania drutu wynoszącą 6,5 m/min (rys. 6.16 c i 6.17 c). Największą zawartość tlenku niklu(II) żelaza(III) w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 ujawniono dla prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min (rys. 6.16 e i 6.17 e). Najmniejsza zawartość żelaza wystąpiła dla prędkości podawania drutu 8,5 m/min i wyniosła 15,3% dla stali 1.4301 i 13,5% dla stali 1.4828 (rys. 6.16 g i 6.17 g).

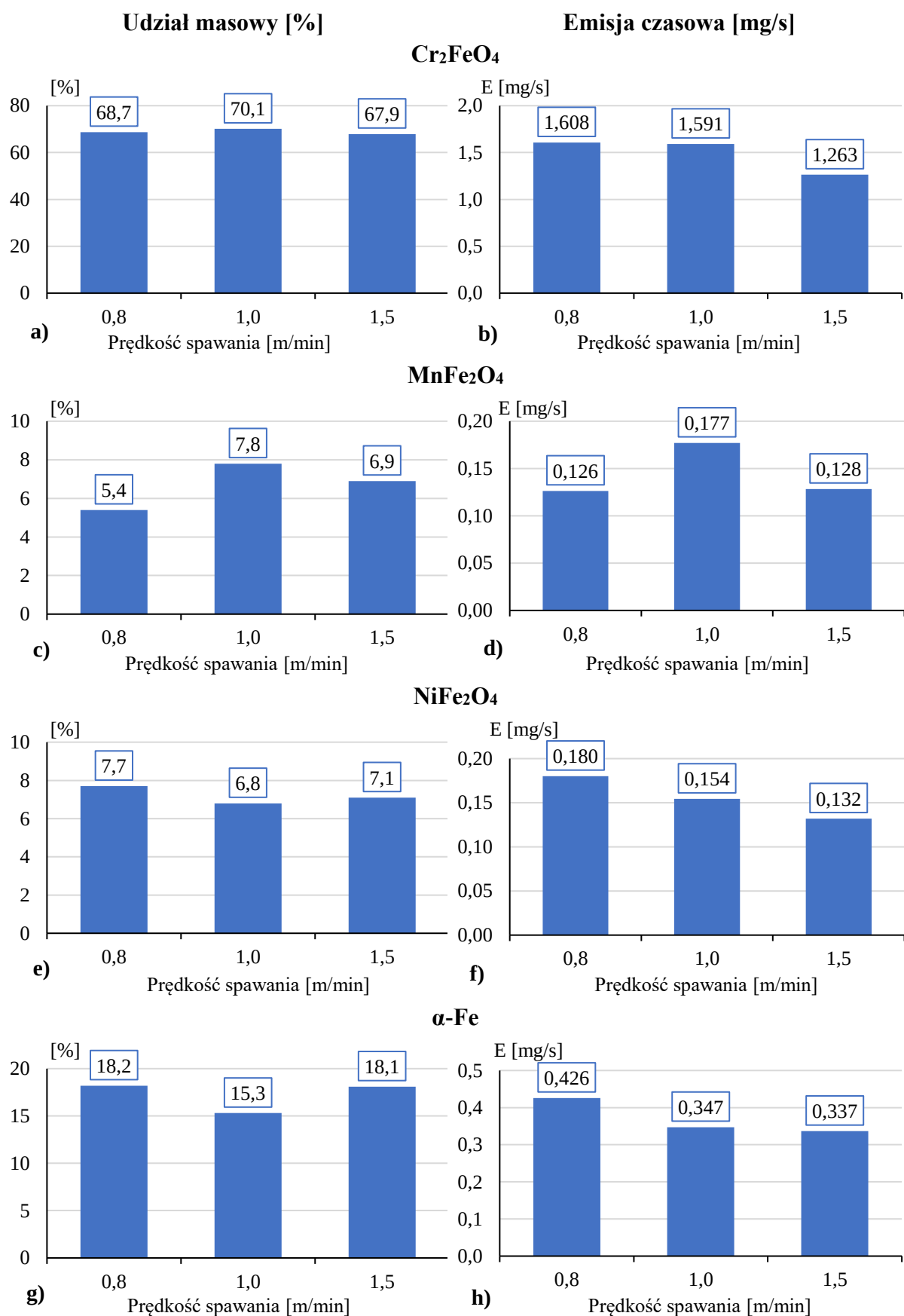
Z kolei w przeliczeniu na emisję czasową wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania stali 1.4301 spowodował wzrost wielkości emisji czasowej składników fazowych pyłu (rys. 6.16 b, d, f, h).

W przypadku pyłu pochodzącego ze spawania stali 1.4828 wykazano, że zwiększenie prędkości podawania drutu przyczynia się do zwiększenia emisji Cr_2FeO_4 i Fe (rys. 6.17 b, h). Analizując emisję czasową MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 największe wartości stwierdzono dla prędkości podawania drutu 8,5 m/min (rys. 6.17 d, f). Jednak w porównaniu do emisji uzyskanej dla prędkości podawania drutu 10,5 m/min różnice nie przekroczyły 0,01 mg/s.

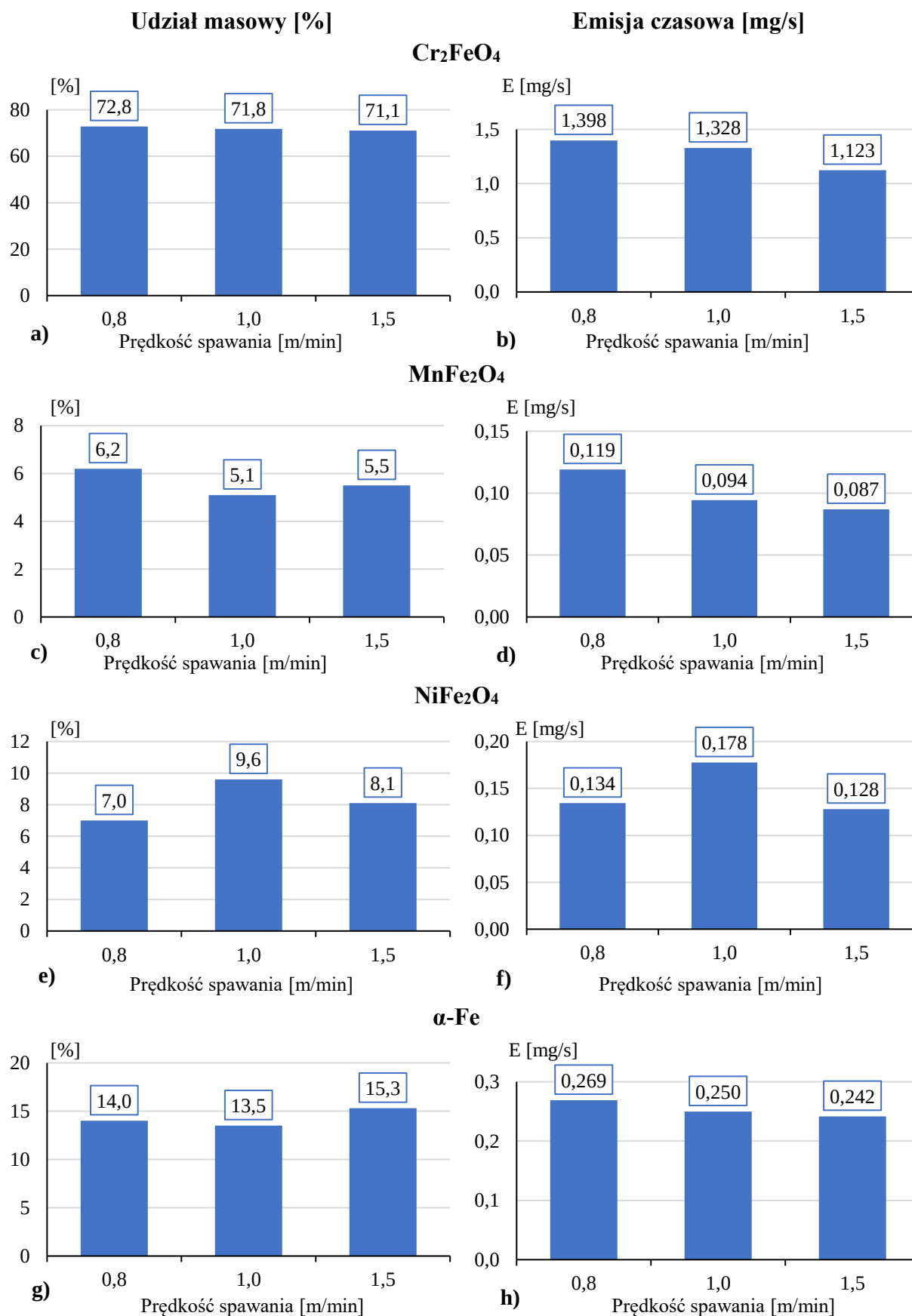
Analiza wyników badań nie wykazała wpływu prędkości podawania drutu podczas spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy pyłu. Po przeliczeniu na emisję czasową stwierdzono, że wzrost prędkości podawania drutu powoduje zwiększenie emisji składników fazowych.

Wpływ prędkości spawania łukowego

Ocenę wpływu prędkości spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu wykonano dla trzech prędkości: 0,8; 1,0 i 1,5 m/min przy stałej prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min (rys. 6.18-6.19)



Rys. 6.18. Wpływ prędkości spawania łukowego stali 1.4301 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu



Rys. 6.19. Wpływ prędkości spawania łukowego stali 1.4828 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu

Zawartość Cr_2FeO_4 w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4301 była w zakresie 67,9% – 70,1% (rys. 6.18 a). W przypadku spawania stali 1.4828 udział masowy tej fazy wyniósł 71,1-72,8% (rys. 6.19 a).

Analizując dane dla stali 1.4301 największy udział masowy MnFe_2O_4 - 7,8%, wystąpił podczas spawania z prędkością 1,0 m/min, a najmniejszy gdy prędkość spawania wyniosła 0,8 m/min – 5,1% (rys. 6.18 c). W przypadku stali 1.4828 sytuacja była odwrotna, największą zawartością charakteryzowało się spawanie z prędkością 0,8 m/min, a najmniejszą z prędkością 1,0 m/min (rys. 6.19 c). Podobną zależność obserwowano analizując zawartość NiFe_2O_4 w pyłe, gdy prędkość spawania wyniosła 1,0 m/min dla stali 1.4301 zanotowano najmniejszą zawartość – 6,8%, a podczas spawania stali 1.4828 największą - 9,6% (rys. 6.18 e i 6.19 e). Udział masowy żelaza był w zakresie 15,3-18,2% dla stali 1.4301 i 13,5-15,3% dla stali 1.4828. Przy czym dla obu gatunków stali najmniejszą zawartość Fe wykazano podczas spawania z prędkością 1,0 m/min (rys. 6.18 g i 6.19 g).

Natomiast wzrost prędkości spawania łukowego wiązał się z obniżeniem wielkości emisji czasowej składników fazowych. Jedynie w przypadku spawania stali 1.4301 wykazano najmniejszą emisję MnFe_2O_4 dla prędkości spawania 0,8 m/min (rys. 6.18 d). Z kolei podczas spawania stali 1.4828 największą emisję NiFe_2O_4 stwierdzono dla prędkości spawania 1,0 m/min (6.19 f).

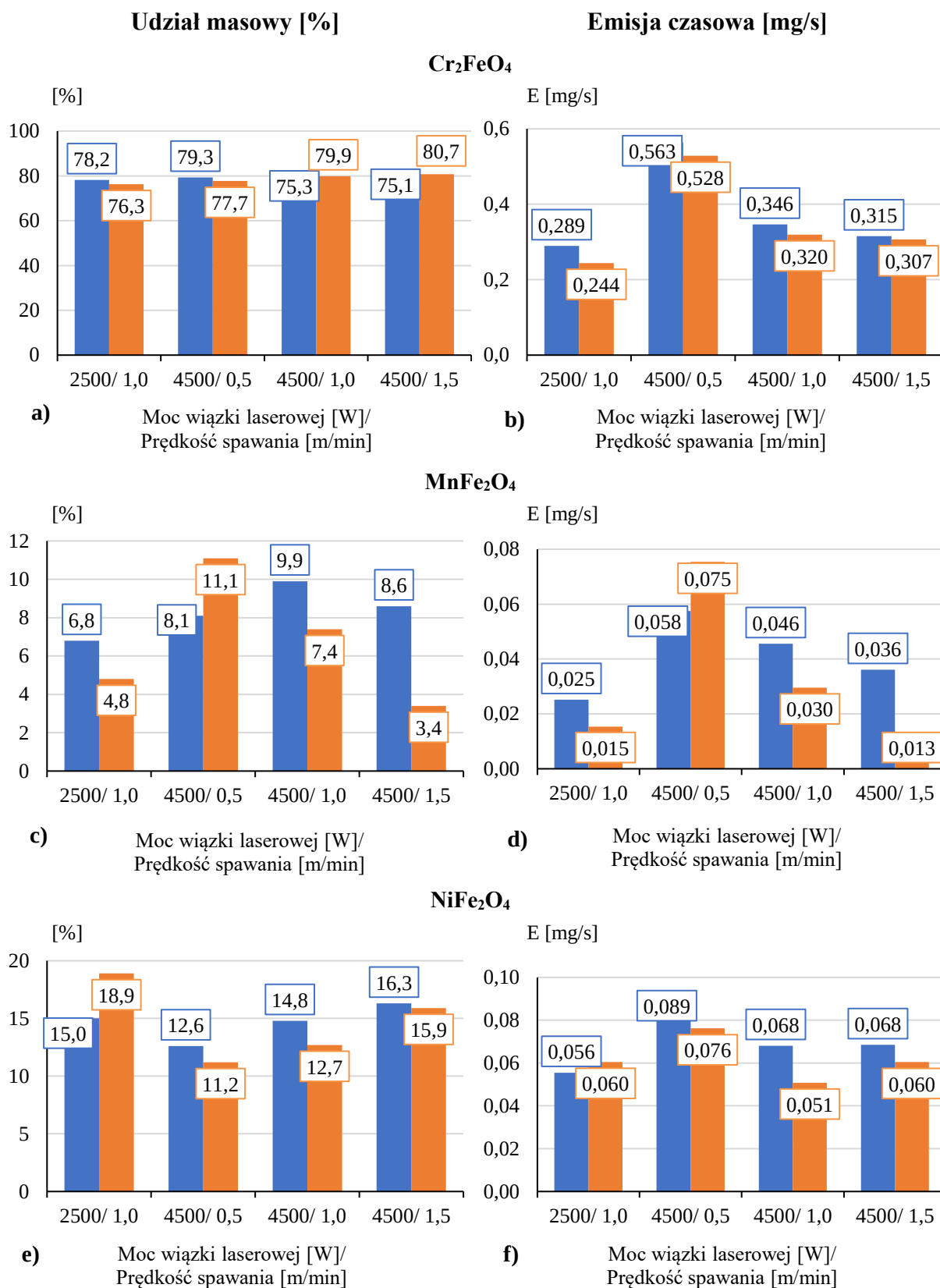
Nie stwierdzono wpływu prędkości spawania na skład fazowy pyłu podczas spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828. Wykazano, po przeliczeniu udziału masowego na emisję czasową, że wraz ze wzrostem prędkości spawania zmniejsza się emisja składników fazowych.

6.2.4. Wpływ techniki spawania i parametrów technologicznych procesu spawania laserowego na skład fazowy pyłu

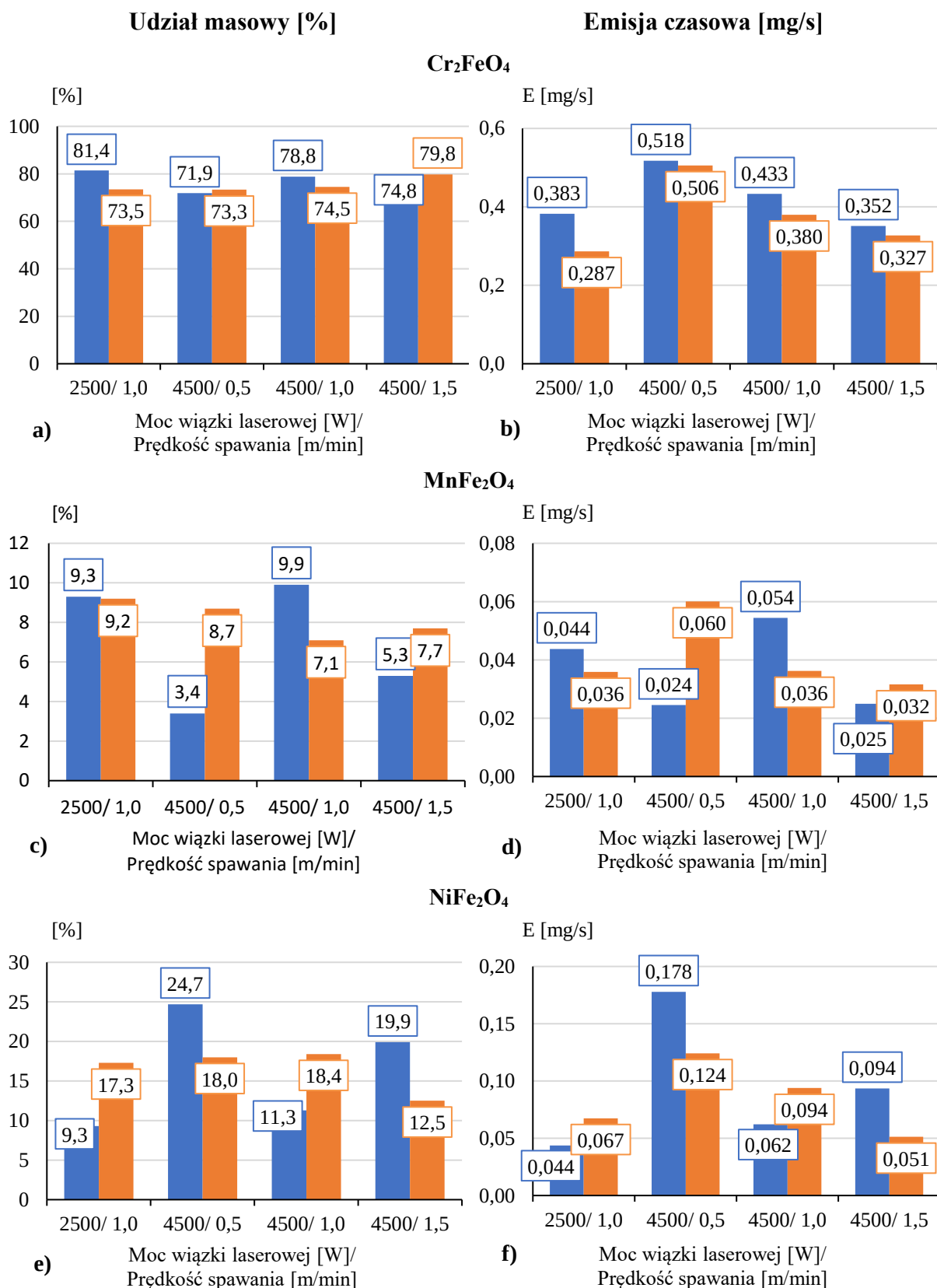
Określono wpływ techniki spawania laserowego (z jeziorkiem/ z oczkiem) oraz parametrów technologicznych procesu spawania laserowego tj. mocy wiązki laserowej [W] i prędkości spawania [m/min] na skład fazowy pyłu.

Wpływ techniki spawania laserowego

Wpływ techniki spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu przedstawiono na rysunkach 6.20 i 6.21.



Rys. 6.20. Wpływ techniki spawania laserowego stali 1.4301 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)



Rys. 6.21. Wpływ techniki spawania laserowego stali 1.4828 na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)

Większą zawartość tlenku chromu(III) żelaza(II) w pyłe pochodzącym ze spawania laserowego stali 1.4301 stwierdzono dla techniki z oczkiem dla zestawów parametrów (tj. mocy wiązki laserowej i prędkości spawania): 2500 W i 1,0 m/min oraz 4500 W i 0,5 m/min. Podczas spawania z prędkością 1,0 i 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W większa zawartość Cr_2FeO_4 była dla techniki z jeziorkiem (rys. 6.20 a). Analizując dane uzyskane dla stali 1.4828, spawanie z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 2500 i 4500 W techniką z oczkiem charakteryzowało się większym udziałem masowym Cr_2FeO_4 (rys. 6.21 a). Z kolei dla techniki z jeziorkiem obserwowano większą zawartość Cr_2FeO_4 , gdy spawano z prędkością 0,5 i 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W (rys. 6.21 a). Dla pozostałych składników fazowych również nie ujawniono jednoznacznego wpływu techniki spawania na ich udział masowy (rys. 6.20 c, e, g i 6.21 c, e, g).

Biorąc pod uwagę emisję czasową Cr_2FeO_4 to dla stali 1.4301 i 1.4828 większa była dla spawania laserowego techniką z oczkiem (rys. 6.20 b i 6.21 b).

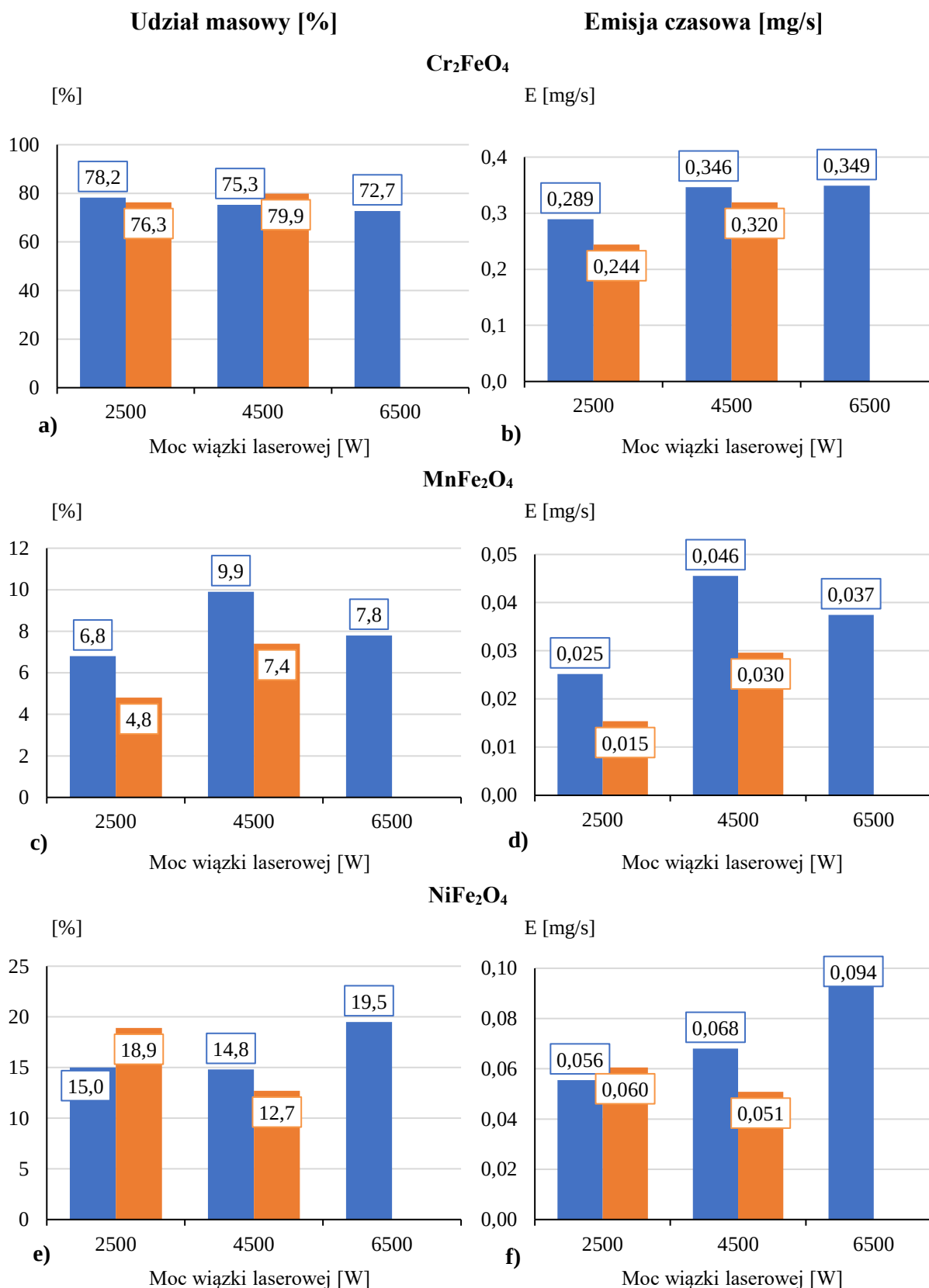
W przypadku emisji czasowej tlenku manganu(II) żelaza(III) nie stwierdzono wpływu techniki spawania. Podczas spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 2500 W większa zawartość i emisja wystąpiły dla techniki z oczkiem, natomiast podczas spawania z prędkością 0,5 m/min wiązką o mocy 4500 W dla techniki z jeziorkiem (rys. 6.20 d i 6.21 d).

Analiza wyników emisji czasowej tlenku niklu(II) żelaza(III) również nie wykazała jednoznacznej zależności (rys. 6.20 f i 6.21 f). Przykładowo, podczas spawania stali 1.4828 z prędkością 1,0 m/min większa emisja wystąpiła dla techniki z jeziorkiem, z kolei większe wartości zanotowano dla techniki z oczkiem gdy spawano wiązką o mocy 4500 W z prędkością 0,5 i 1,5 m/min (rys. 6.21 f).

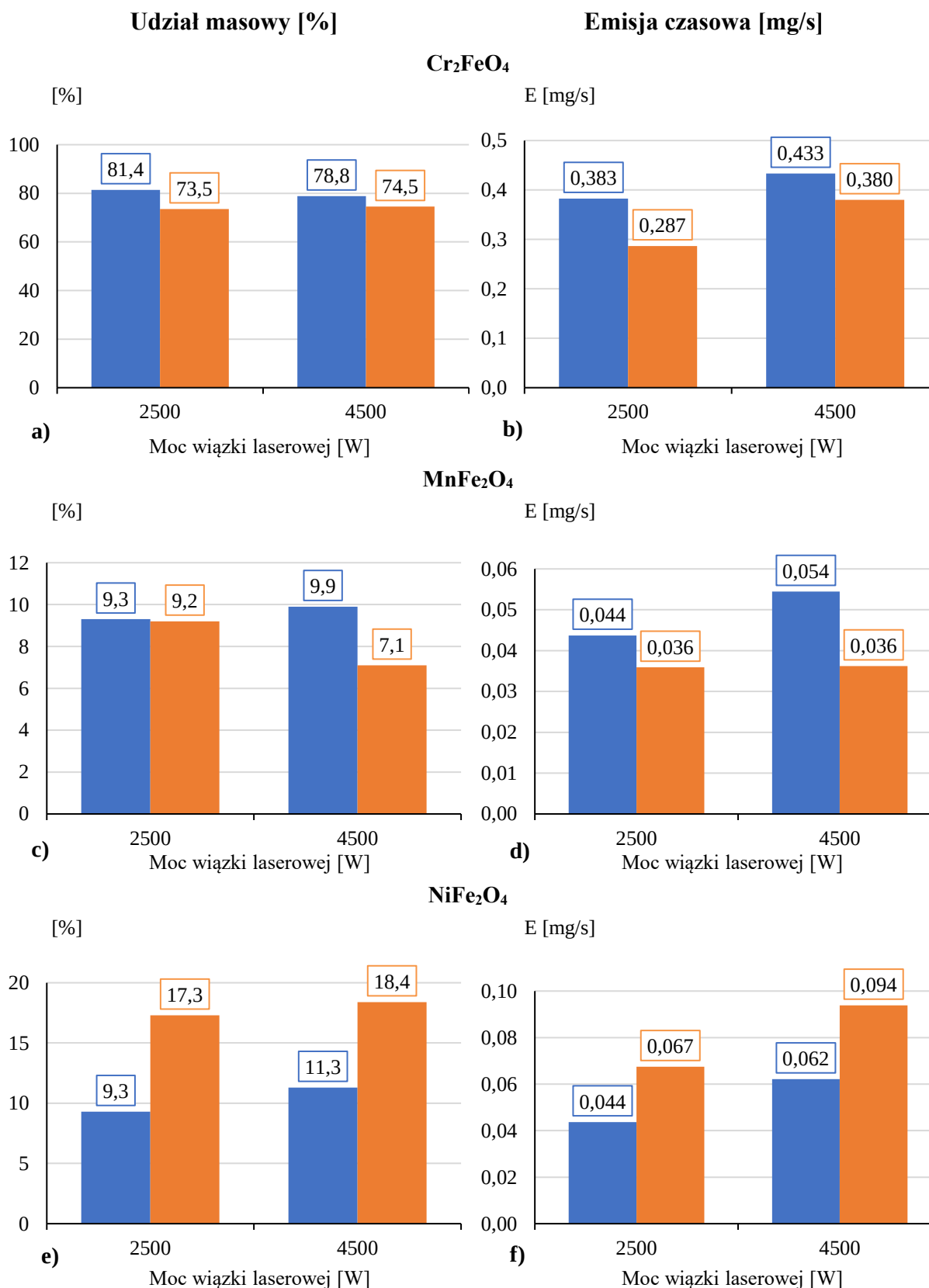
W badaniach nie ujawniono wpływu techniki spawania laserowego stali w gatunku 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy pyłu. W przeliczeniu na emisję czasową wykazano, że większe wartości Cr_2FeO_4 - głównego składnika fazowego pyłu, wystąpiły podczas spawania laserowego techniką z oczkiem.

Wpływ mocy wiązki laserowej

Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunkach 6.22 i 6.23. Udział masowy i emisję czasową składników fazowych oznaczono dla trzech wartości mocy wiązki laserowej (2500, 4500 i 6500 W) w przypadku techniki spawania z oczkiem i dwóch wartości mocy wiązki laserowej (2500 i 4500 W) dla techniki z jeziorkiem; prędkość spawania była stała i wynosiła 1,0 m/min.



Rys. 6.22. Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu powstającego podczas spawania stali 1.4301 (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)



Rys. 6.23. Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję czasową składników pyłu powstającego podczas spawania stali 1.4828 (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)

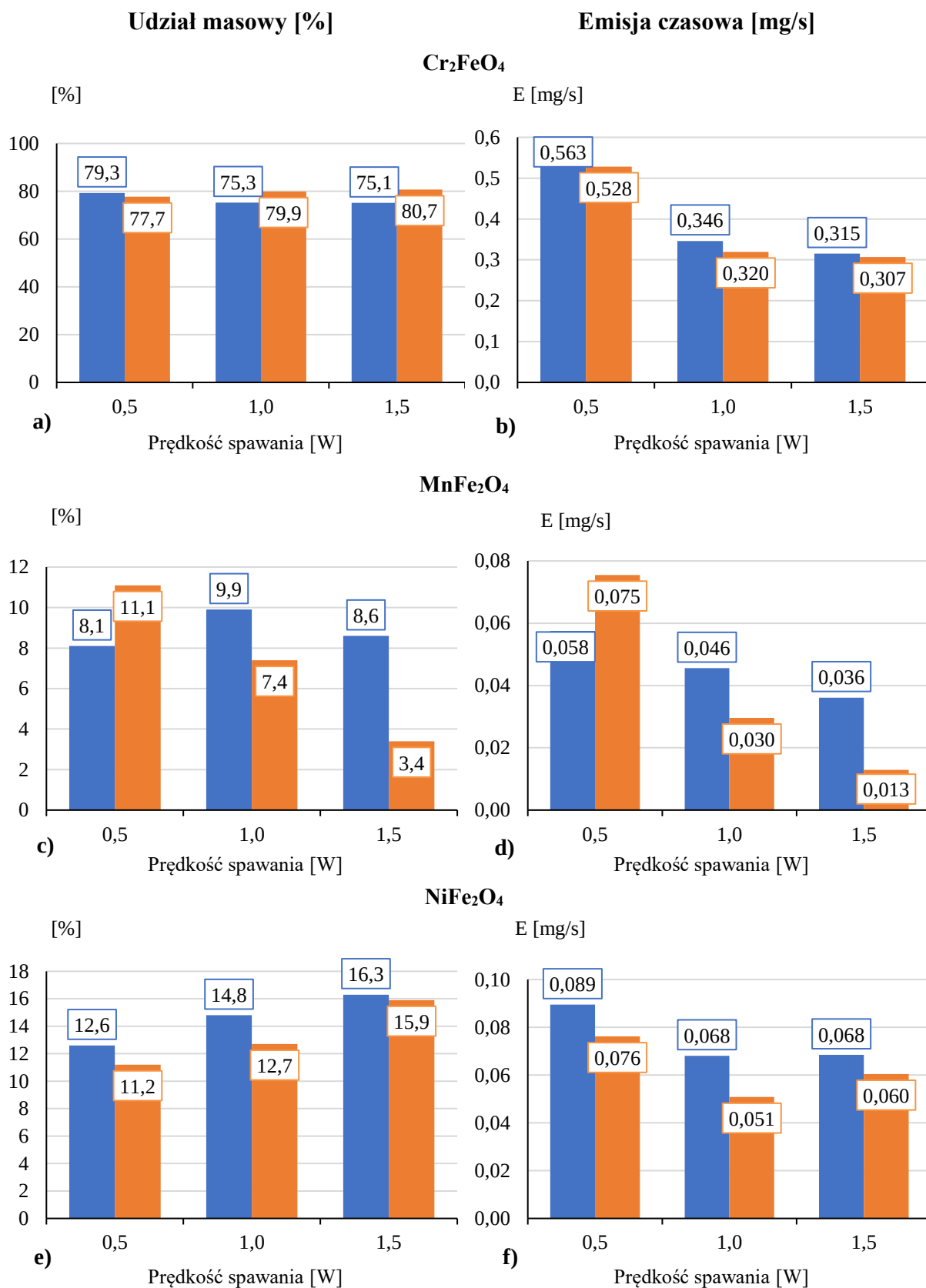
Podczas spawania techniką z oczkiem stali 1.4301 stwierdzono, że wzrost mocy wiązki laserowej powodował spadek zawartości Cr_2FeO_4 w pyłe. Natomiast gdy spawano techniką z jeziorkiem obserwowano, że wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej zwiększała się zawartość Cr_2FeO_4 (rys. 6.22 a). Nie wykazano również jednoznacznego wpływu mocy wiązki laserowej na zawartość pozostałych składników fazowych tj. tlenku manganu(II) żelaza(III) oraz tlenku niklu(II) żelaza(III) (rys. 6.22 a, c, e i 6.23 a, c, e).

Analizując dane dotyczące wielkości emisji wykazano, że dla obu technik spawania wzrost mocy wiązki laserowej powodował wzrost emisji czasowej składników fazowych (rys. 6.22 i 6.23). Jedynie podczas spawania stali 1.4301 techniką z oczkiem stwierdzono, że wzrost mocy wiązki z 4500 W na 6500 W wiązał się ze zmniejszeniem emisji MnFe_2O_4 (rys. 6.22 d). Również gdy spawano tą stal techniką z jeziorkiem zwiększenie mocy wiązki spowodowało zmniejszenie emisji NiFe_2O_4 (rys. 6.22 f). Spadek emisji w obu przypadkach wyniósł 0,009 mg/s.

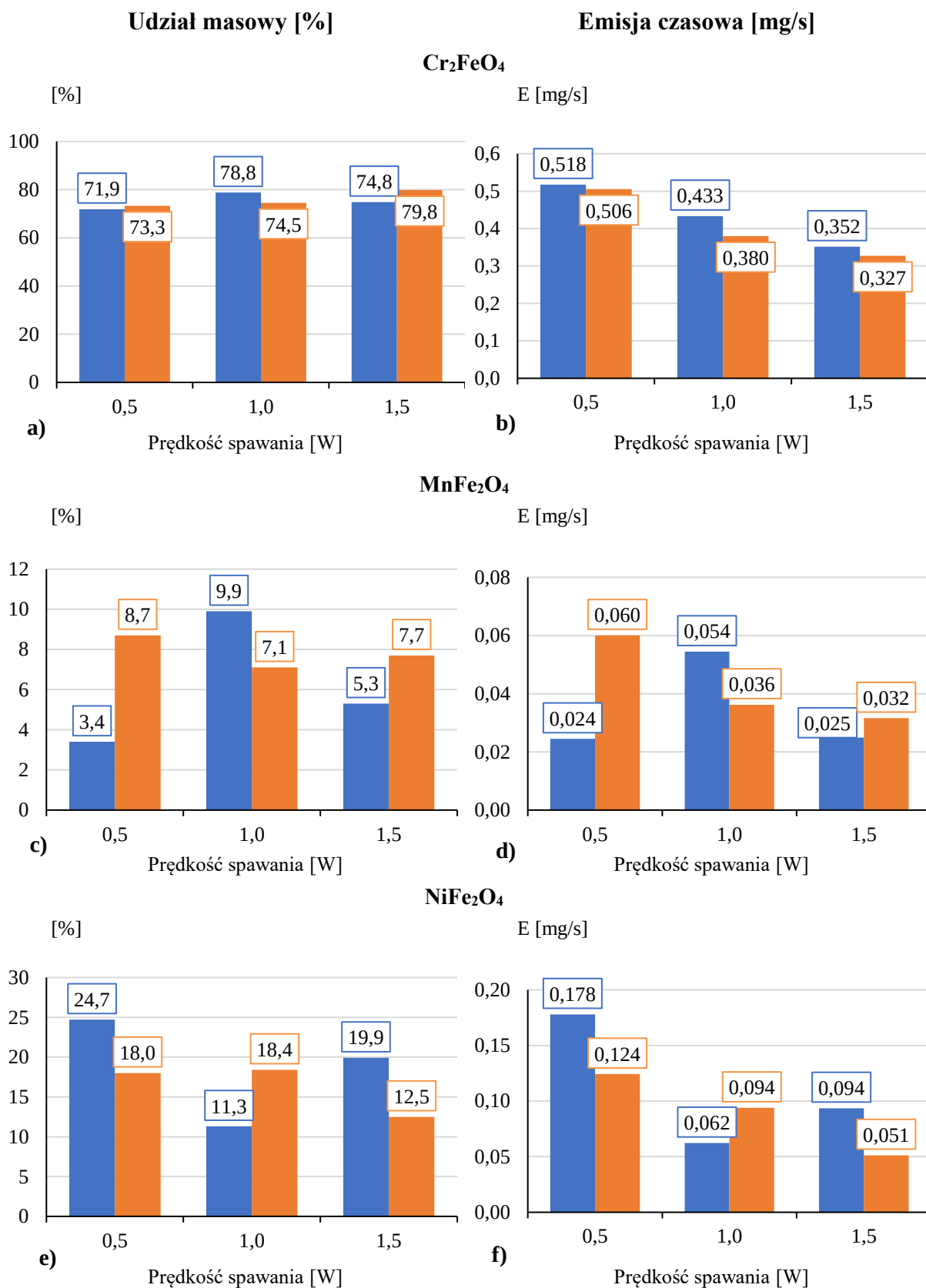
Analiza wyników badań wykazała, że wzrost mocy wiązki laserowej powoduje zwiększenie emisji czasowej głównych składników fazowych pyłu: Cr_2FeO_4 , MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 . Nie stwierdzono wpływu mocy wiązki laserowej na udział masowy tych składników w powstającym pyłe.

Wpływ prędkości spawania laserowego

Wpływ prędkości spawania laserowego techniką z oczkiem i z jeziorkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy i emisję składników pyłu przedstawiono na rysunkach 6.24 i 6.25. Udział masowy i emisję czasową składników fazowych pyłu określono dla trzech prędkości spawania (0,5; 1,0 i 1,5 m/min), moc wiązki laserowej była stała i wynosiła 4500 W.



Rys. 6.24. Wpływ prędkości spawania laserowego stali 1.4301 na skład fazowy i emisję składników pyłu (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)



Rys. 6.25. Wpływ prędkości spawania laserowego stali 1.4828 na skład fazowy i emisję składników pyłu (■ – technika z oczkiem; ■ – technika z jeziorkiem)

Stwierdzono, że wzrost prędkości spawania laserowego powodował zwiększenie udziału masowego tlenku chromu(III) żelaza(II) w technice z jeziorkiem, natomiast w technice z oczkiem nie wykazano zależności. Dla obu technik spawania wzrost prędkości spawania wiązał się z obniżeniem emisji Cr_2FeO_4 (rys. 6.24 b i 6.25 b).

Z kolei dane dotyczące tlenku manganu(II) żelaza(III) oraz tlenku niklu(II) żelaza(III) nie wykazały wpływu prędkości spawania na jego zawartość procentową (rys. 6.24 c, e i 6.25 c, e). W przeliczeniu na emisję czasową wykazano, że wzrost prędkości spawania stali 1.4301 spowodował spadek emisji zarówno MnFe_2O_4 jak i NiFe_2O_4 . Zależność ta wystąpiła dla obu technik spawania laserowego (rys. 6.24 d, f). Analizując wyniki uzyskane dla stali 1.4828 obserwowano, że w technice jeziorkiem zwiększenie prędkości spawania powoduje zmniejszenie emisji czasowej MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 (rys. 6.25 d, f). Dla techniki z oczkiem nie stwierdzono jednoznacznej zależności (rys. 6.25 d,f).

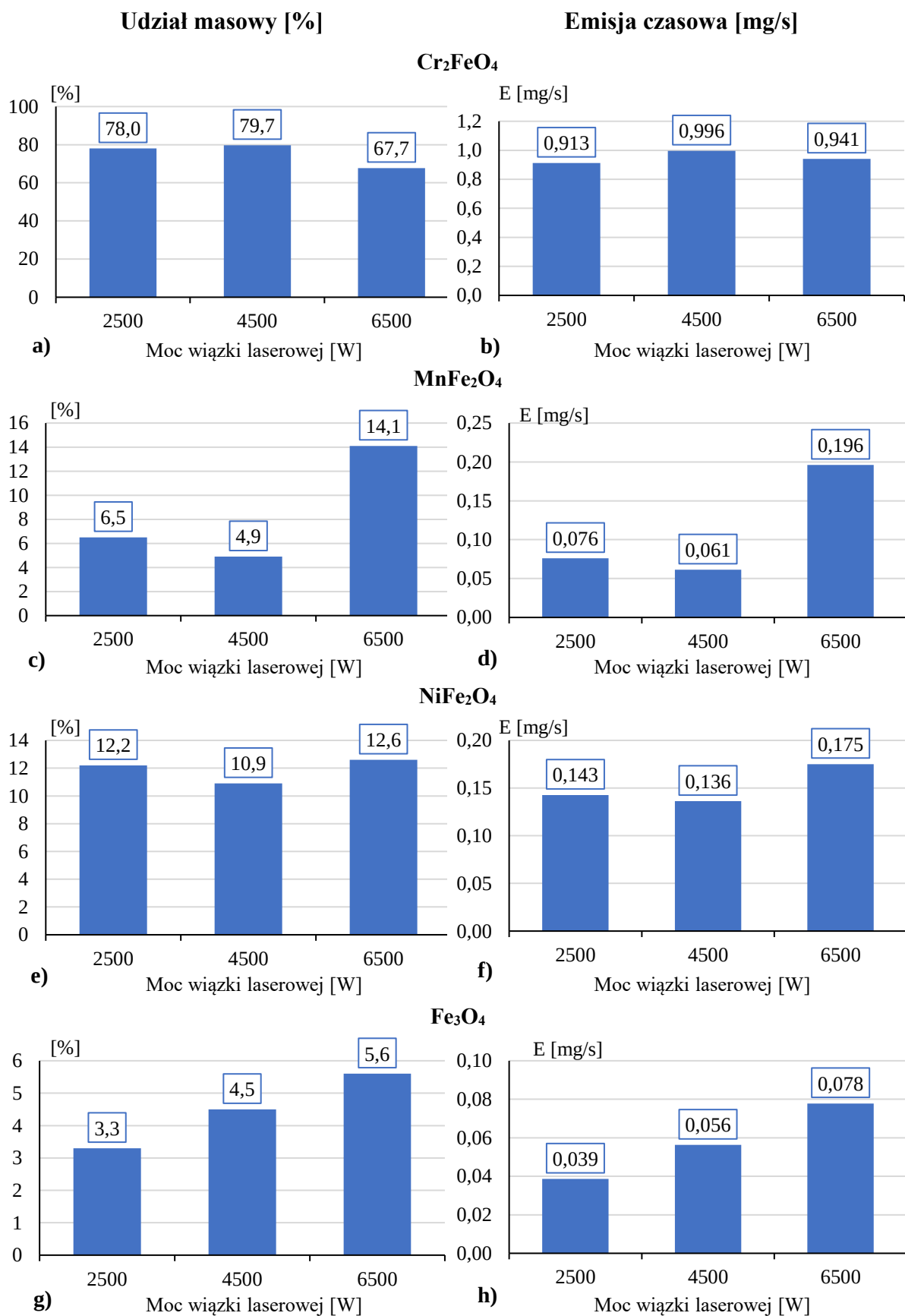
Nie ustalono wpływu prędkości spawania laserowego techniką z oczkiem i z jeziorkiem stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy pyłu. Podczas spawania laserowego badanymi technikami wzrost prędkości spawania powoduje spadek emisji Cr_2FeO_4 .

6.2.5. Wpływ parametrów technologicznych procesu spawania hybrydowego na skład fazowy pyłu

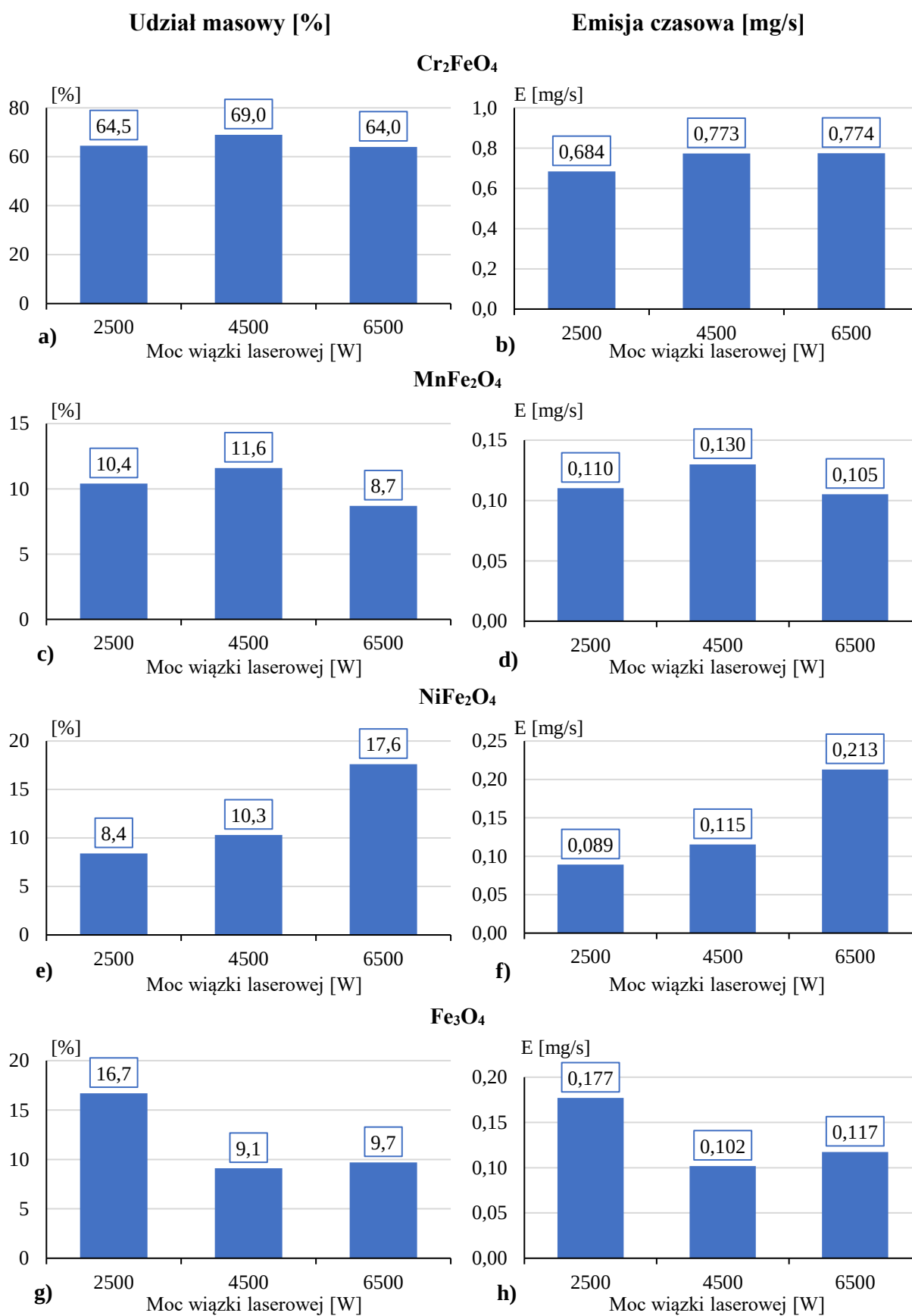
Podczas spawania hybrydowym stali 1.4301 i 1.4828 drutem litym w gat. 308 L Si o średnicy 1,2 mm w osłonie Ar badano wpływ parametrów technologicznych procesu tj. mocy wiązki laserowej [W], prędkości spawania [m/min] i prędkości podawania drutu [m/min] na skład fazowy i emisję składników pyłu.

Wpływ mocy wiązki laserowej podczas spawania hybrydowego

Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunkach 6.26 i 6.27. Oznaczono udział masowy i wielkość emisji czasowej składników fazowych pyłu dla trzech wartości mocy wiązki laserowej - 2500, 4500 i 6500 W, przy prędkości spawania 1,0 m/min. Prędkość podawania drutu była stała i wynosiła 8,5 m/min.



Rys. 6.26. Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję składników pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego stali 1.4301



Rys. 6.27. Wpływ mocy wiązki laserowej na skład fazowy i emisję składników pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego stali 1.4828

Podczas spawania stali 1.4301 z prędkością 1,0 m/min największa zawartość i emisja Cr_2FeO_4 wystąpiła dla wiązki o mocy 4500 W (rys. 6.26 a, b). Udział masowy Cr_2FeO_4 wyniósł 79,7%, a emisja 0,996 mg/s. Zwiększenie mocy wiązki laserowej, podczas spawania stali 1.4828, powodowało wzrost emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) (rys. 6.27 b).

W przypadku zawartości tlenku manganu(II) żelaza(III) nie można stwierdzić wpływu mocy wiązki laserowej. Podczas spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką laserową o mocy 2500 W zawartość MnFe_2O_4 w pyłe wyniosła 6,5%, natomiast wiązką o mocy 4500 W – 4,9%, a o mocy 6500 W – 14,1% (rys. 6.26 c). Także analiza wielkości emisji czasowej MnFe_2O_4 nie wykazała jednoznacznej relacji (rys. 6.26 d, 6.27 d).

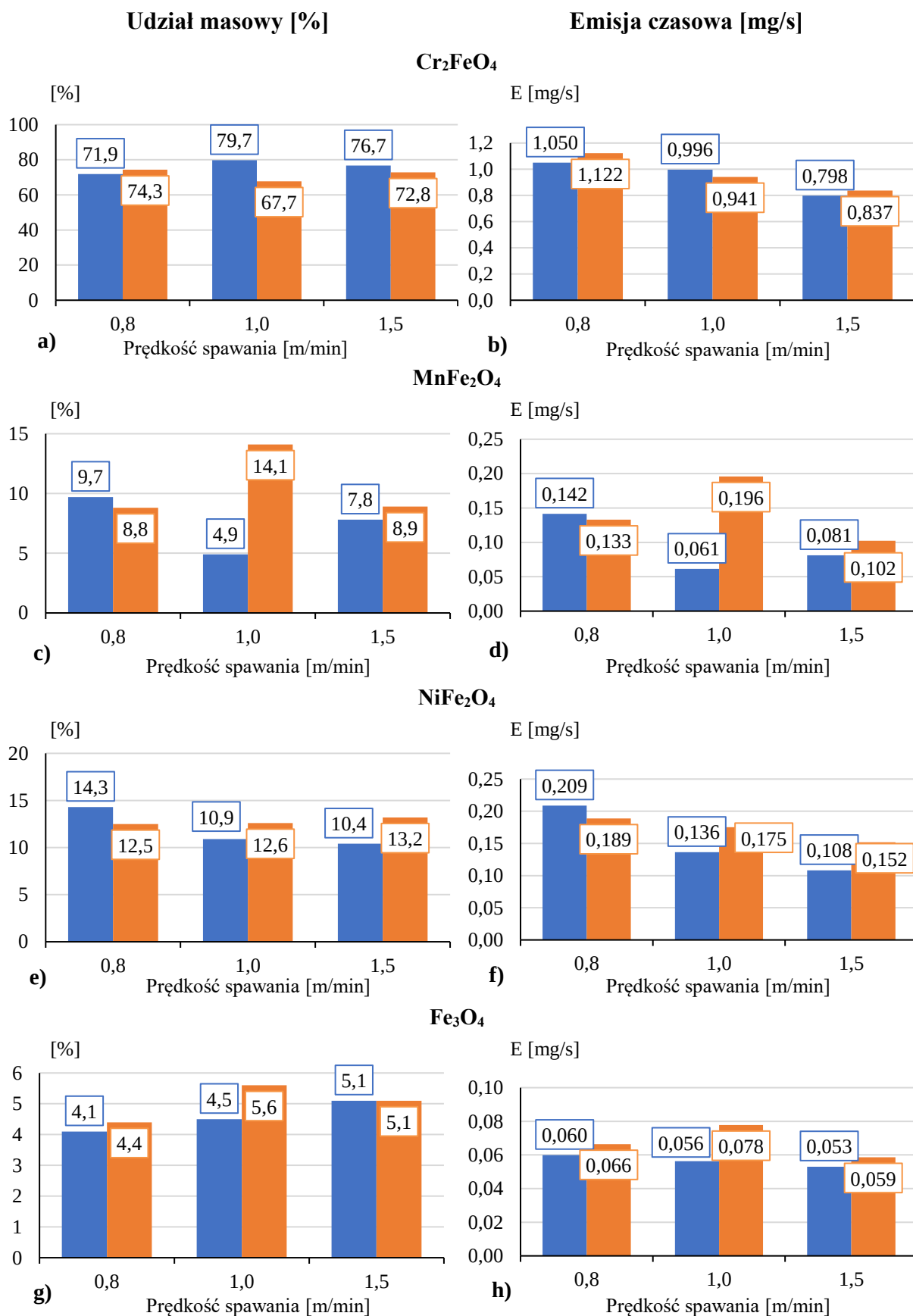
Oceniając wpływ mocy wiązki laserowej na udział masowy i emisję tlenku niklu(II) żelaza(III) podczas spawania stali 1.4301 nie ujawniono jednoznacznej zależności (rys. 6.26 e, f). W przypadku stali 1.4828 wzrost mocy wiązki laserowej powodował zwiększenie zarówno udziału masowego jak i emisji czasowej NiFe_2O_4 (rys. 6.27 e, f).

Analizując proces spawania stali 1.4301 obserwowano, że wraz ze wzrostem mocy wiązki wzrosła zawartość i emisja tlenku żelaza(II) żelaza(III) (rys. 6.26 g, h). Natomiast podczas spawania stali 1.4828 nie obserwowano takiej zależności (rys. 6.27 g, h).

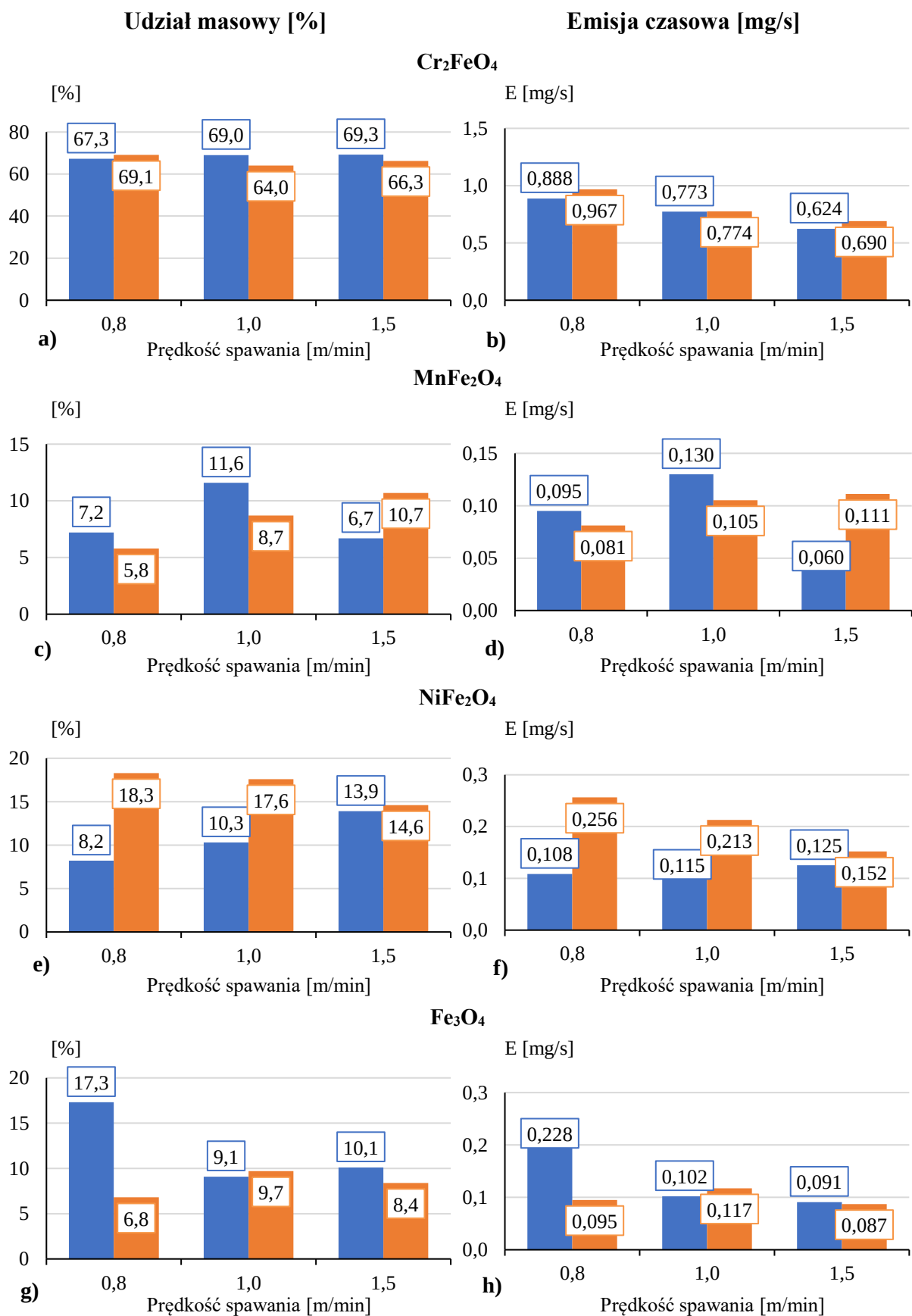
Stwierdzono, po przeliczeniu na emisję czasową, że wzrost mocy wiązki laserowej powoduje zwiększenie emisji Cr_2FeO_4 i NiFe_2O_4 . Nie wykazano jednoznacznego wpływu mocy wiązki laserowej na skład fazowy pyłu.

Wpływ prędkości spawania hybrydowego

Wpływ prędkości spawania na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 przedstawiono na rysunkach 6.28 i 6.29. Określono udział masowy i emisję czasową składników fazowych pyłu dla trzech prędkości spawania (0,8; 1,0 i 1,5 m/min), dla dwóch wartości mocy wiązki laserowej (4500 i 6500 W) i stałej prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min.



Rys. 6.28. Wpływ prędkości spawania hybrydowego stali 1.4301 na skład fazowy i emisję składników pyłu (■ – P=4500 W; ■ – P=6500 W)



Rys. 6.29. Wpływ prędkości spawania hybrydowego stali 1.4828 na skład fazowy i emisję składników pyłu (■ – P=4500 W; ■ – P=6500 W)

Podczas spawania stali 1.4828 wiązką o mocy 4500 W nie stwierdzono wpływu prędkości spawania na zawartość Cr_2FeO_4 (rys. 6.28 a i 6.29 a). W przeliczeniu na emisję czasową podczas spawania wiązką o mocy 4500 i 6500 W wzrost prędkości spawania wiązał się z obniżeniem wielkości emisji czasowej dla stali 1.4301 i 1.4828 (rys. 6.28 b i 6.29 b).

Nie stwierdzono również wpływu prędkości spawania na udział masowy MnFe_2O_4 w tym zakresie parametrów technologicznych (rys. 6.28 c, 6.29 c). Również, po przeliczeniu na emisję czasową nie wykazano jednoznacznej zależności pomiędzy prędkością spawania a wielkością emisji czasowej MnFe_2O_4 (rys. 6.28 d, 6.29 d).

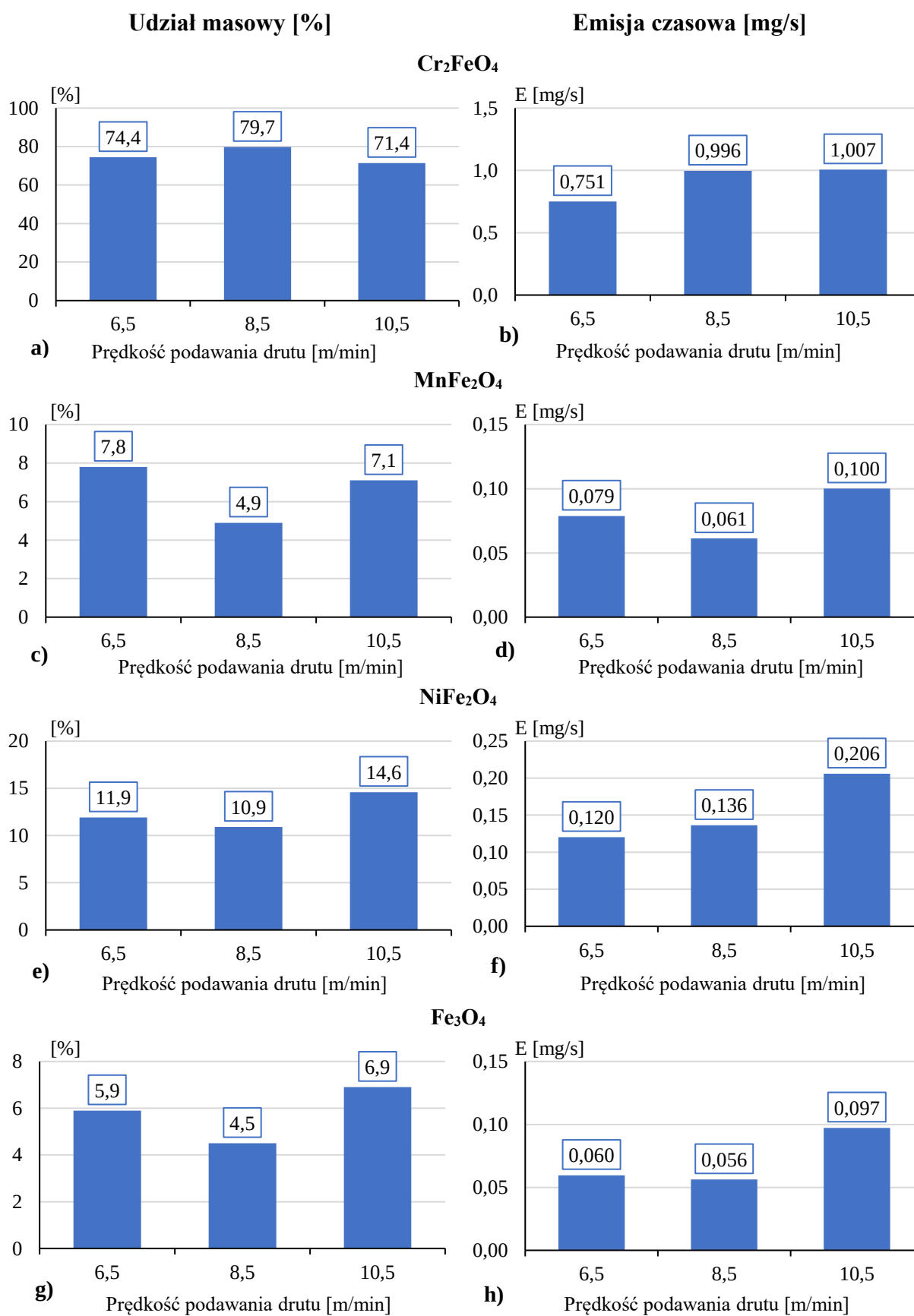
Analiza wpływu prędkości spawania na udział masowy i emisję czasową tlenku niklu(II) żelaza(III) nie wykazała jednoznacznej zależności (rys. 6.28 e, f, 6.29 e, f). Podczas spawania stali 1.4301 wiązką o mocy 4500 W wraz ze wzrostem prędkości spawania zmniejszała się zawartość NiFe_2O_4 , natomiast dla mocy wiązki 6500 W zależność była odwrotna (rys. 6.28 e). Dla analizowanych wartości mocy wiązki (tj. 4500 i 6500 W) wzrost prędkości spawania stali 1.4301 wiązał się z obniżeniem wielkości emisji czasowej tlenku niklu(II) żelaza(III) (rys. 6.28 f). Z kolei podczas spawania stali 1.4828 wiązką o mocy 4500 W wraz ze wzrostem prędkości spawania wzrastała zawartość i emisja NiFe_2O_4 (rys. 6.29 e, f). Dla mocy wiązki 6500 W wzrost prędkości spawania wiązał się ze spadkiem zarówno udziału masowego jak i emisji NiFe_2O_4 (rys. 6.29 e, f).

Wykazano, że wzrost prędkości spawania przekłada się na mniejszą emisję czasową Fe_3O_4 w pyłe podczas spawania wiązką o mocy 4500 W; dla spawania wiązką o mocy 6500 W nie wykazano jednoznacznych zależności (rys. 6.28 g, h i 6.29 g, h).

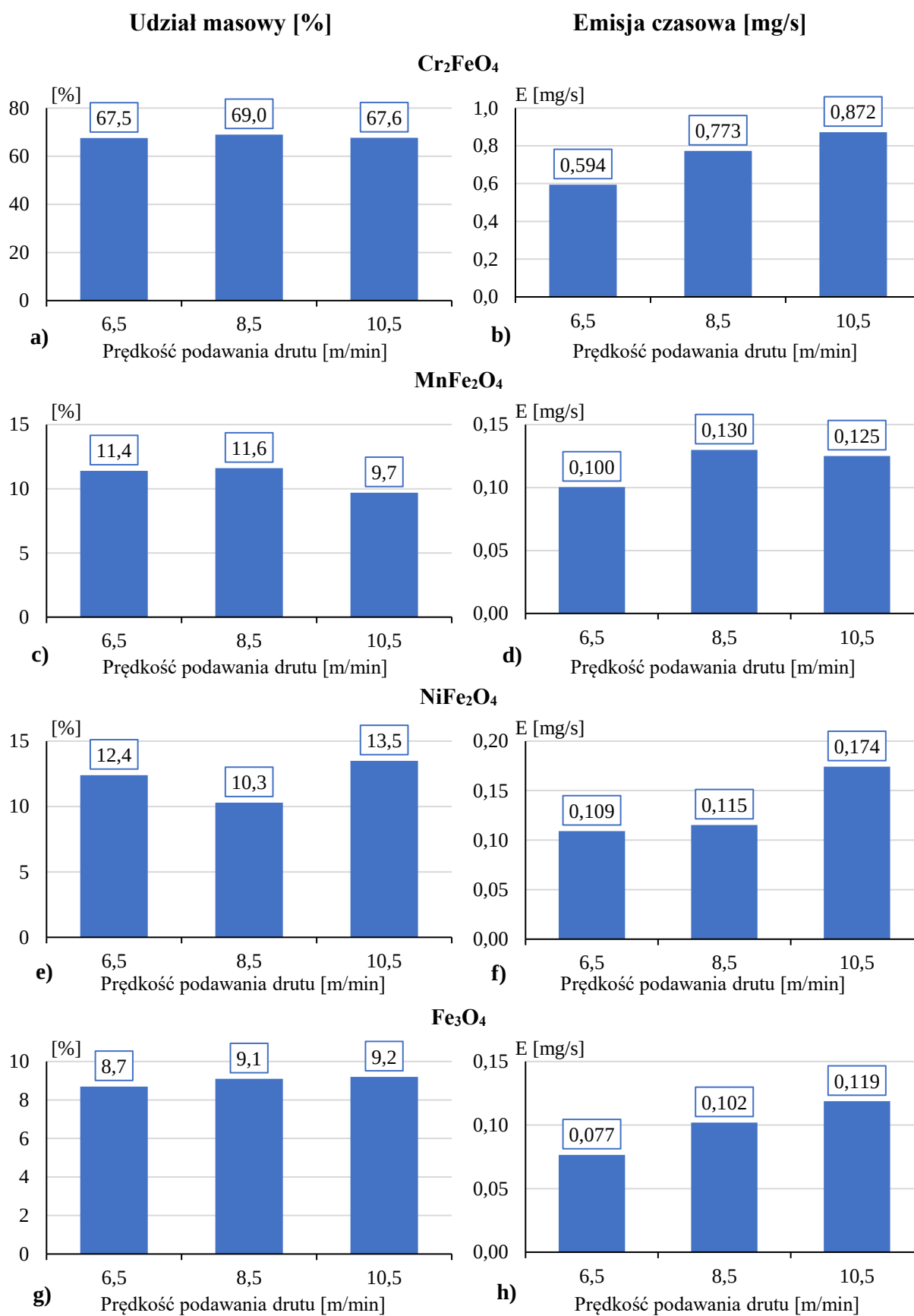
W analizowanym zakresie parametrów technologicznych nie stwierdzono wpływu prędkości spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na skład fazowy pyłu. Po przeliczeniu udziału masowego na emisję czasową wykazano, że wraz ze wzrostem prędkości spawania zmniejsza się emisja Cr_2FeO_4 .

Wpływ prędkości podawania drutu

Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 pokazano na rysunkach 6.30 i 6.31. Udział masowy i emisję czasową składników fazowych pyłu określono dla próbek pochodzących ze spawania z prędkością 1,0 m/min wiązką o mocy 4500 W przy trzech prędkościach podawania drutu - 6,5; 8,5 i 10,5 m/min.



Rys. 6.30. Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301



Rys. 6.31. Wpływ prędkości podawania drutu na skład fazowy i emisję składników pyłu podczas spawania hybrydowej stali 1.4828

Nie wykazano wpływu prędkości podawania drutu na zawartość tlenku chromu(III) żelaza(II) – największa zawartość Cr_2FeO_4 w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4301 i 1.4828 wystąpiła dla prędkości podawania drutu wynoszącej 8,5 m/min (rys. 6.30 a i 6.31 a). Natomiast w przeliczeniu na emisję czasową, wzrost prędkości podawania drutu spowodował zwiększenie wielkości emisji czasowej Cr_2FeO_4 (rys. 6.30 b i 6.31 b).

Analiza wpływu prędkości podawania drutu zarówno na udział masowy jak i na emisję czasową tlenku manganu(II) żelaza(III) nie ujawniła zależności (rys. 6.30 c, d i 6.31 c, d). Wraz ze wzrostem prędkości podawania drutu wzrastała emisja czasowa NiFe_2O_4 (rys. 6.30 f i 6.31 f).

Podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 w tym zakresie parametrów nie wykazano wpływu prędkości podawania drutu zarówno na udział masowy jak i na emisję czasową tlenku żelaza(II) żelaza(III) (rys. 6.30 g, h). W przypadku spawania stali 1.4828 wraz ze wzrostem prędkości podawania drutu wzrosła zawartość i emisja czasowa Fe_3O_4 (rys. 6.31 g, h).

Wykazano, po przeliczeniu na emisję czasową, że wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 powoduje zwiększenie emisji Cr_2FeO_4 i NiFe_2O_4 . Nie obserwowano jednak wpływu prędkości podawania drutu na skład fazowy pyłu.

W pyłe pochodzącym zarówno ze spawania łukowego, hybrydowego jak i laserowego fazę główną stanowił tlenek chromu(III) żelaza(II) ($\text{Cr}_2\text{FeO}_4 - \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$). W próbkach pyłu pochodzącego ze spawania łukowego udział masowy tego składnika wyniósł 68-73%; podczas spawania laserowego zawartość Cr_2FeO_4 wyniosła od 72 do 82%, natomiast podczas spawania hybrydowego 64-80%. Analiza uzyskanych wyników nie wykazała wpływu parametrów technologicznych procesów spawania łukowego, laserowego i hybrydowego na zawartość Cr_2FeO_4 w pyłe. Natomiast po przeliczeniu na emisję czasową zaobserwowano następujące zależności:

- a) w przypadku spawania laserowego większa emisja wystąpiła w technice z oczkiem;
- b) wzrost mocy wiązki laserowej powodował wzrost emisji czasowej Cr_2FeO_4 zarówno podczas spawania laserowego jak i hybrydowego;
- c) wzrost prędkości spawania powodował spadek emisji czasowej Cr_2FeO_4 zarówno podczas spawania łukowego, laserowego jak i hybrydowego;
- d) w przypadku spawania łukowego i hybrydowego stwierdzono, że wzrost prędkości podawania drutu powodował wzrost emisji czasowej Cr_2FeO_4 .

6.3. Ocena morfologii pyłu spawalniczego

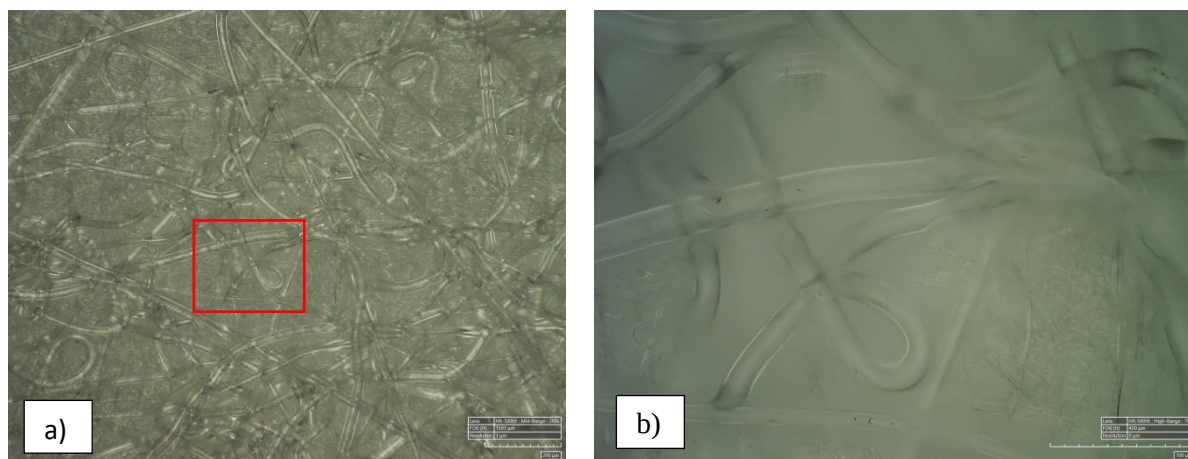
Ocena morfologii cząstek pyłu spawalniczego prowadzona była z wykorzystaniem następujących metod analitycznych:

- a. mikroskopii optycznej z cyfrową rejestracją wyników,
- b. dyfrakcji laserowej,
- c. wysokorozdzielczej skaningowej mikroskopii elektronowej (HR SEM).

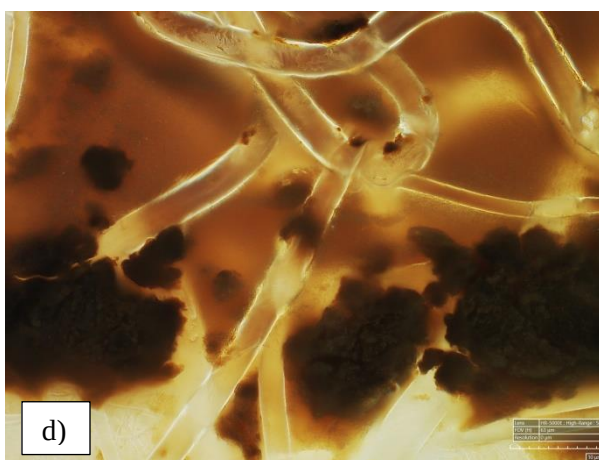
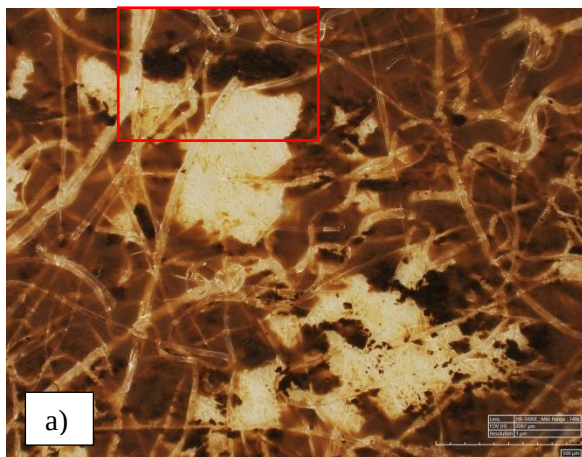
6.3.1. Ocena morfologii pyłu przy wykorzystaniu mikroskopii optycznej

Badania próbek pyłu przeprowadzono we współpracy z firmą Technolutions z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego Hirox HRX-01. Jest to mikroskop optyczny z cyfrową rejestracją i analizą obrazu. Mikroskop cyfrowy Hirox umożliwia obserwacje przy powiększeniach od 20x do 2500x, a obrotowa głowica rejestrująca umożliwia analizę detali z częstotliwością 50 klatek/s. Mikroskop wyposażony jest w obiektywy podłączone do kamery, która umożliwia uzyskanie powiększenia do 10000x.

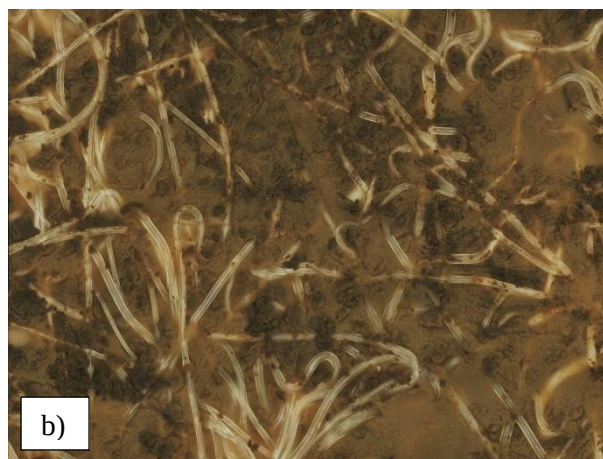
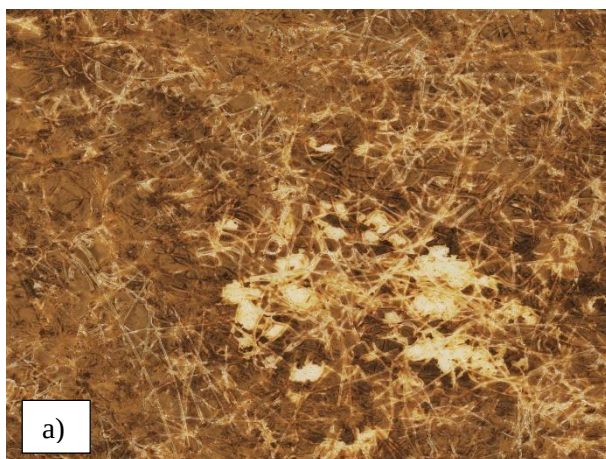
Badano próbki pyłu osadzonego na filtrach pochodzącego ze spawania laserowego (technika z jeziorkiem i technika z oczkiem) oraz hybrydowego. Na rysunkach 6.30 – 6.33 przedstawiono zdjęcia próbek – czystego filtra i próbek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4301.



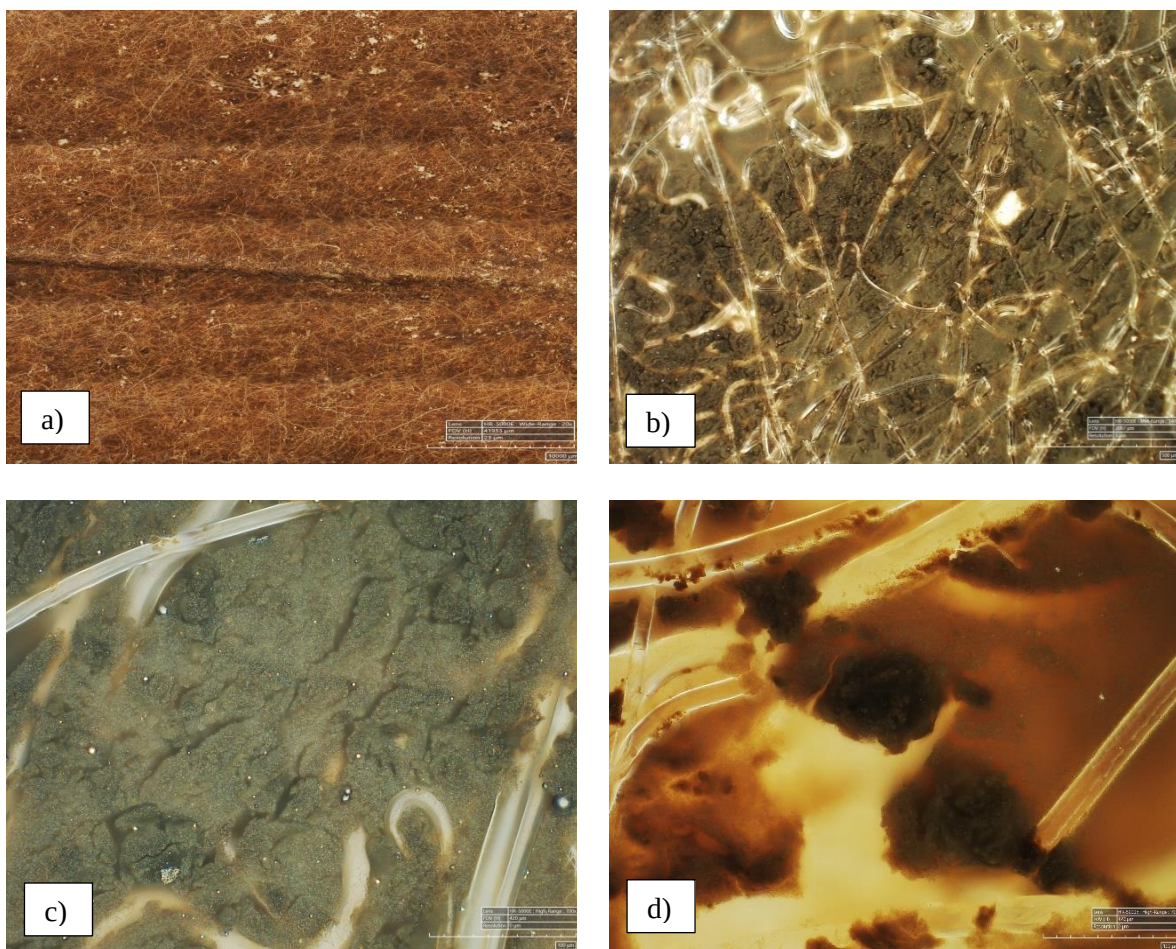
Rys. 6.30. Struktura czystego filtra a) widoczne włókna polimerowe, b) obszar zaznaczony na czerwono w powiększeniu 700x



Rys. 6.31. Morfologia pyłu pochodzącego ze spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4301 a) pył zebrany na filtrze, b) cząstki pyłu zebrane w aglomeraty - obszar zaznaczony na czerwono, c) i d) widoczne drobne cząstki pyłu o kształcie podłużnym, nieregularnym i zbliżonym do kulistego tworzące aglomerat



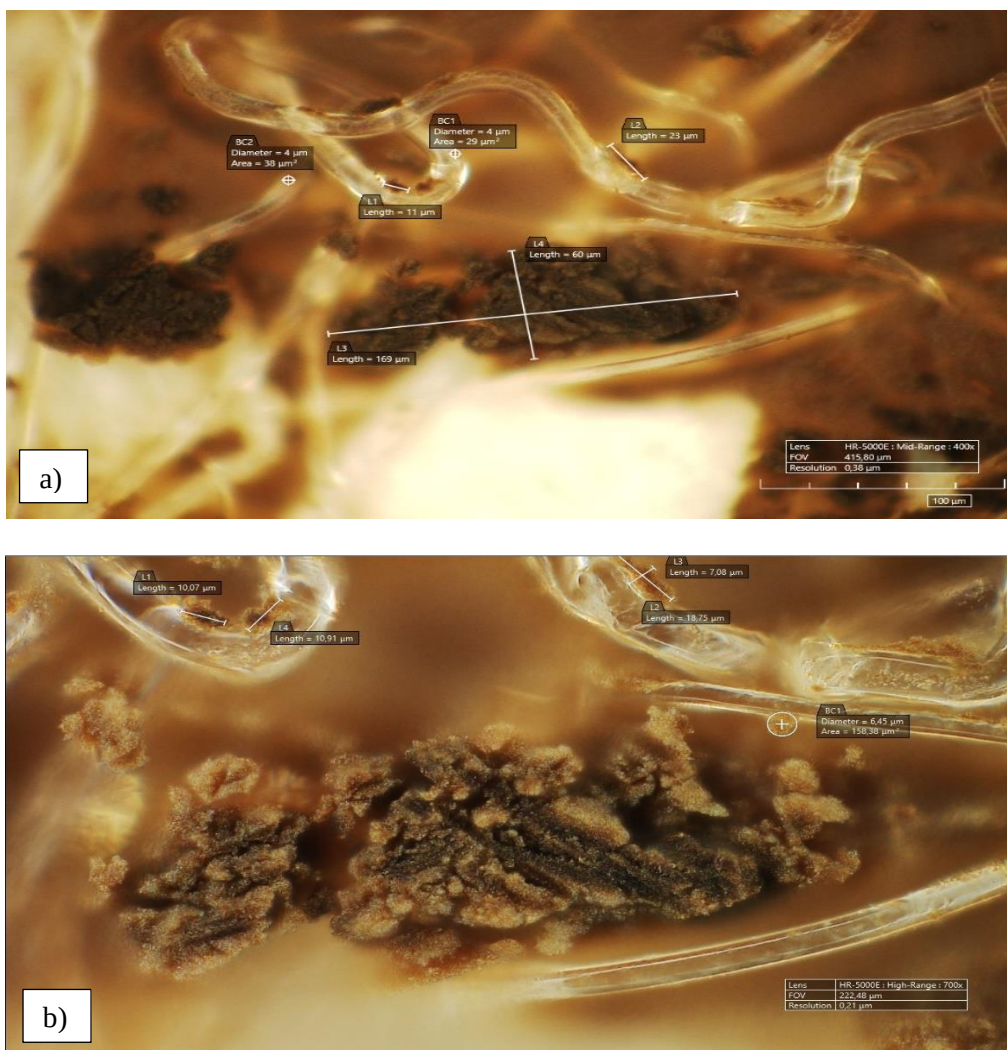
Rys. 6.32. Budowa pyłu pochodzącego ze spawania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4301 a) pył osadzony na filtrze pomiarowym, b) występowanie cząstek pyłu w postaci aglomeratów



Rys. 6.33. Morfologia pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego stali 1.4301
a) pył osadzony na filtrze pomiarowym, b) cząstki pyłu zebrane w aglomeraty,
c) i d) widoczne drobne cząstki pyłu o kształcie podłużnym, nieregularnym
i zbliżonym do kulistego tworzące aglomerat

Stwierdzono, że widoczne na zdjęciach cząstki pyłu występują w postaci łańcuchów i aglomeratów (rys. 6.31-6.33). Jest to związane z faktem, że w procesie spawania pod wpływem wysokiej temperatury zwiększa się ruchliwość pojedynczych cząstek pyłu i łączą się one w większe formy. Podczas kontaktu dochodzi do oddziaływań molekularnych i/lub mechanicznych związanych z zaczepieniem się nieregularnych krawędzi cząstek.

Dla próbek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4828 wykonano również pomiary wielkości cząstek. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 6.34.



Rys. 6.34. Wymiary cząstek pyłu spawalniczego pochodzącego ze spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4828 a) aglomerat o długości 169 μm i szerokości 60 μm , b) struktura aglomeratu w powiększeniu 700x

Ujawniono cząstki w postaci łańcuchów i aglomeratów o kształcie kulistym i podłużnym (rys. 6.34 a). Złożone aglomeraty miały wymiary w zakresie od 60 do 170 μm , łańcuchy o długości 10-25 μm oraz cząstki średnicach 4 μm , których powierzchnia wynosiła ok 30 μm^2 (rys. 6.34 a).

Na rysunku 6.34b przedstawiającym pył spawalniczy pochodzący ze spawania laserowego techniką z oczkiem oznaczono cząstki o długości poniżej 20 μm oraz cząstki, których średnica nie przekraczała 1 μm (0,36-0,89 μm). Cząstki te należały do frakcji respirabilnej, która jest najbardziej niebezpieczna z punktu widzenia zdrowia człowieka.

6.3.2. Rozkład wielkości cząstek

Do określenia rozkładu wielkości cząstek stosuje się technikę dyfrakcji laserowej, która wykorzystuje zjawisko rozpraszania światła na cząstkach. Światło trafiając w obiekt ulega rozproszeniu, a kąt ugięcia fali jest ściśle zależny od wielkości cząstki (im mniejsza cząstka, tym większy kąt rozpraszania) [156]. Zarejestrowane widmo rozproszonego światła jest analizowane i w efekcie uzyskuje się rozkład wielkości cząstek.

Badania rozkładu wielkości cząstek prowadzone były ze współpracy z Wydziałem Chemicznym Politechniki Śląskiej, który wyposażony jest w laserowy analizator cząstek Analysette 22 (Fritsch GmbH). Analizator umożliwia pomiar wielkości cząstek w zakresie 0,16 – 2000 μm . Wyposażony jest w przystawki pozwalające na badanie zarówno cieczy jak i suchych proszków. System jest jednoobiektywowy i nie wymaga wymiany soczewek podczas pomiaru. Częstotliwość próbkowania wynosi 10 kHz.

W celu oceny możliwości wykonania badania wielkości cząstek pyłu spawalniczego zebrano pył pochodzący ze spawania laserowego i hybrydowego oraz łukowego stali 1.4301 i 1.4828. Z uwagi na konieczność dostarczenia odpowiedniej ilości pyłu do badań, pył pochodzący ze spawania laserowego i hybrydowego oznaczono łącznie. Wyniki w postaci średniej arytmetycznej udziału objętościowego z trzech prób oraz wartości skumulowane (cum.) przedstawiono w tabelicy 6.18.

Tablica 6.18. Wyniki laserowej analizy wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali 1.4301 i 1.4828

Wielkość cząstek [μm]	Spawanie laserowe i hybrydowe stali 1.4301		Spawanie laserowe i hybrydowe stali 1.4828		Spawanie łukowe stali 1.4301		Spawanie łukowe stali 1.4828	
	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]
< 10	20,45	20,45	20,96	20,96	15,70	15,70	17,72	17,72
10-20	26,00	46,45	27,20	48,16	31,55	47,25	31,29	49,01
20-30	20,13	66,58	19,85	68,01	22,77	70,02	21,65	70,66
30-40	10,97	77,55	11,36	79,37	12,02	82,04	11,19	81,86
40-50	4,81	82,36	4,84	84,21	4,91	86,95	4,57	86,43
50-60	4,74	87,10	4,24	88,44	4,14	91,10	3,92	90,34
60-70	6,35	93,45	6,48	94,93	5,78	96,87	5,72	96,06
70-80	0,40	93,85	0,00	94,93	0,15	97,02	0,40	96,46
80-90	2,61	96,46	2,20	97,12	1,60	98,63	1,78	98,24
90-100	2,58	99,05	1,55	98,67	0,90	99,53	1,15	99,38
>100	0,95	100,00	1,33	100,00	0,47	100,00	0,62	100,00

Na rysunku 6.35 przedstawiono histogram wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali 1.4301 i 1.4828. Kryterium analizy wielkości cząstek była ich średnica zastępcza. Wykazano, że uzyskane w 3 pomiarach wartości były powtarzalne, co oznaczało, że ilość dostarczonego do analizy pyłu była wystarczająca.

Analiza wyników nie wykazała wpływu gatunku materiału podstawowego na rozkład wielkości cząstek. Dla pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego różnice dla poszczególnych frakcji w zależności od gatunku stali nie przekroczyły 1,2%, natomiast w przypadku spawania łukowego 2% (tablica 6.18).

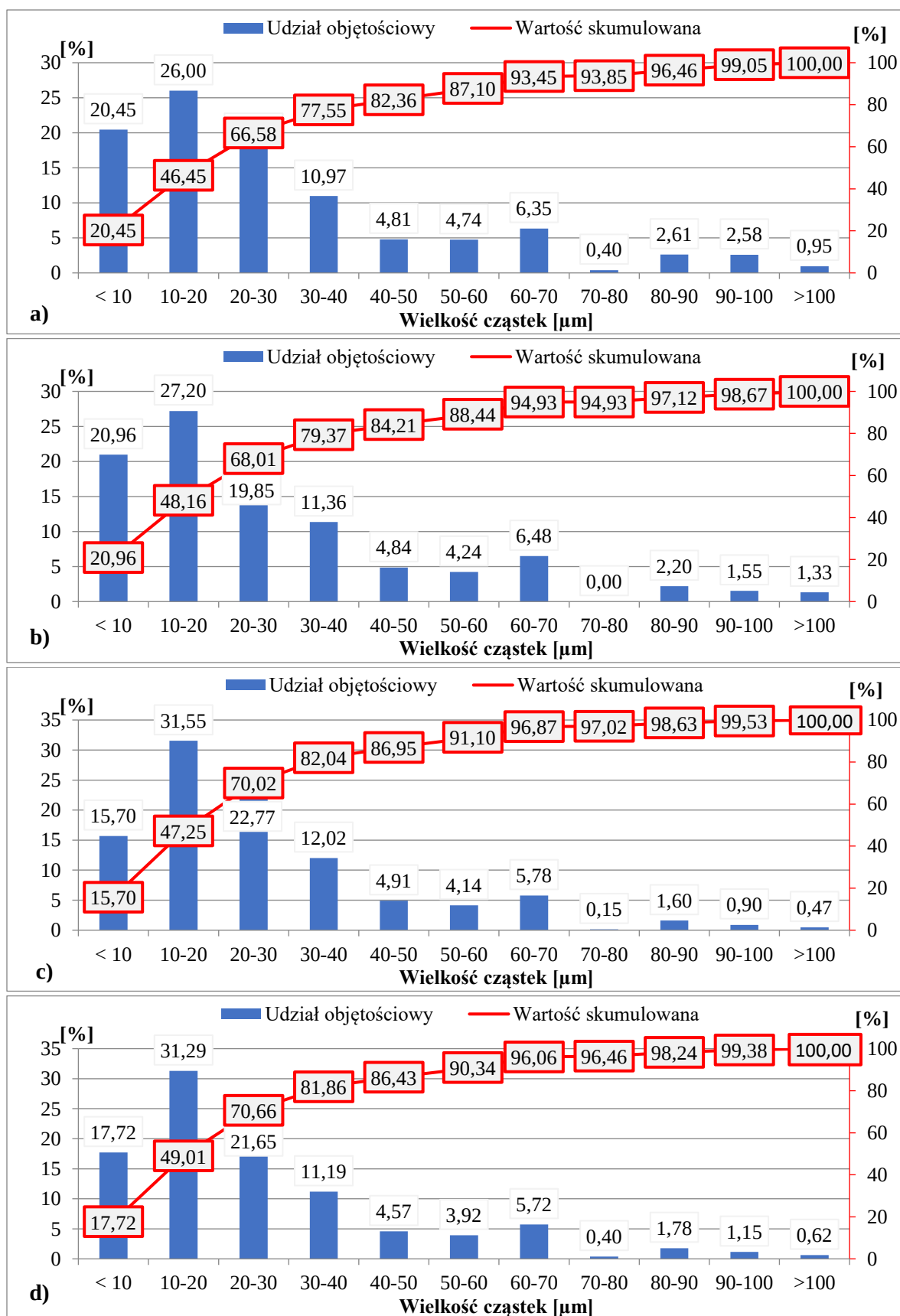
Oceniając wpływ metody spawania, stwierdzono, że w pyłe pochodzącym zarówno ze spawania laserowego oraz hybrydowego, jak i łukowego stali 1.4301 i 1.4828 najliczniejszy był przedział obejmujący cząstki z zakresu 10-20 μm . W próbkach pyłu ze spawania laserowego i hybrydowego udział objętościowy tej frakcji wyniósł 26-27% (rys. 6.35 a i b), natomiast ze spawania łukowego ponad 31% (rys. 6.35 c i d).

W próbkach pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego drugim największym udziałem objętościowym wynoszącym od 20,45 do 20,96% charakteryzował się przedział o wymiarach cząstek poniżej 10 μm . Natomiast w przedziale 20-30 μm znajdowało się ok. 20% cząstek (rys. 6.35 a i b).

Odwrotna sytuacja wystąpiła w przypadku pyłu ze spawania łukowego ponieważ w przedziale 20-30 μm ujawniono ok. 22% cząstek. Z kolei udział objętościowy cząstek z frakcji 0-10 μm wyniósł od 15,7 do 17,7% (rys. 6.35 c i d).

Analiza wyników pomiarów wykazała, że w przypadku pyłu pochodzącego ze spawania laserowego, hybrydowego i łukowego, cząstki o rozmiarze poniżej 20 μm stanowiły blisko 50% całości próbki, a poniżej 30 μm ponad 2/3 próbki (tablica 6.18). We wszystkich badanych próbkach pyłu blisko 99% stanowiły cząstki, których wielkość nie przekraczała 100 μm . Udział objętościowy cząstek większych niż 100 μm nie przekraczał 1,4% (tablica 6.18).

W celu określenia zagrożenia dla człowieka związanego z emisją pyłu w tablicy 6.19 przedstawiono dokładny rozkład wielkości cząstek należących do frakcji najdrobniejszej tj. w zakresie poniżej 10 μm . Wyszczególniono tutaj cząstki pyłu należące do frakcji respirabilnej, czyli takie, których wielkość nie przekracza 3 μm oraz tchawicznej, których wielkość zawierała się w przedziale od 3 do 10 μm .



Rys. 6.35. Histogram wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania: a) laserowego i hybrydowego stali 1.4301, b) laserowego i hybrydowego stali 1.4828, c) łukowego stali 1.4301, d) łukowego stali 1.4828

Tablica 6.19. Wyniki laserowej analizy wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali 1.4301 i 1.4828 obejmującą frakcję respirabilną poniżej 3 μm (zaznaczoną na czerwono) i tchawiczną 3-10 μm

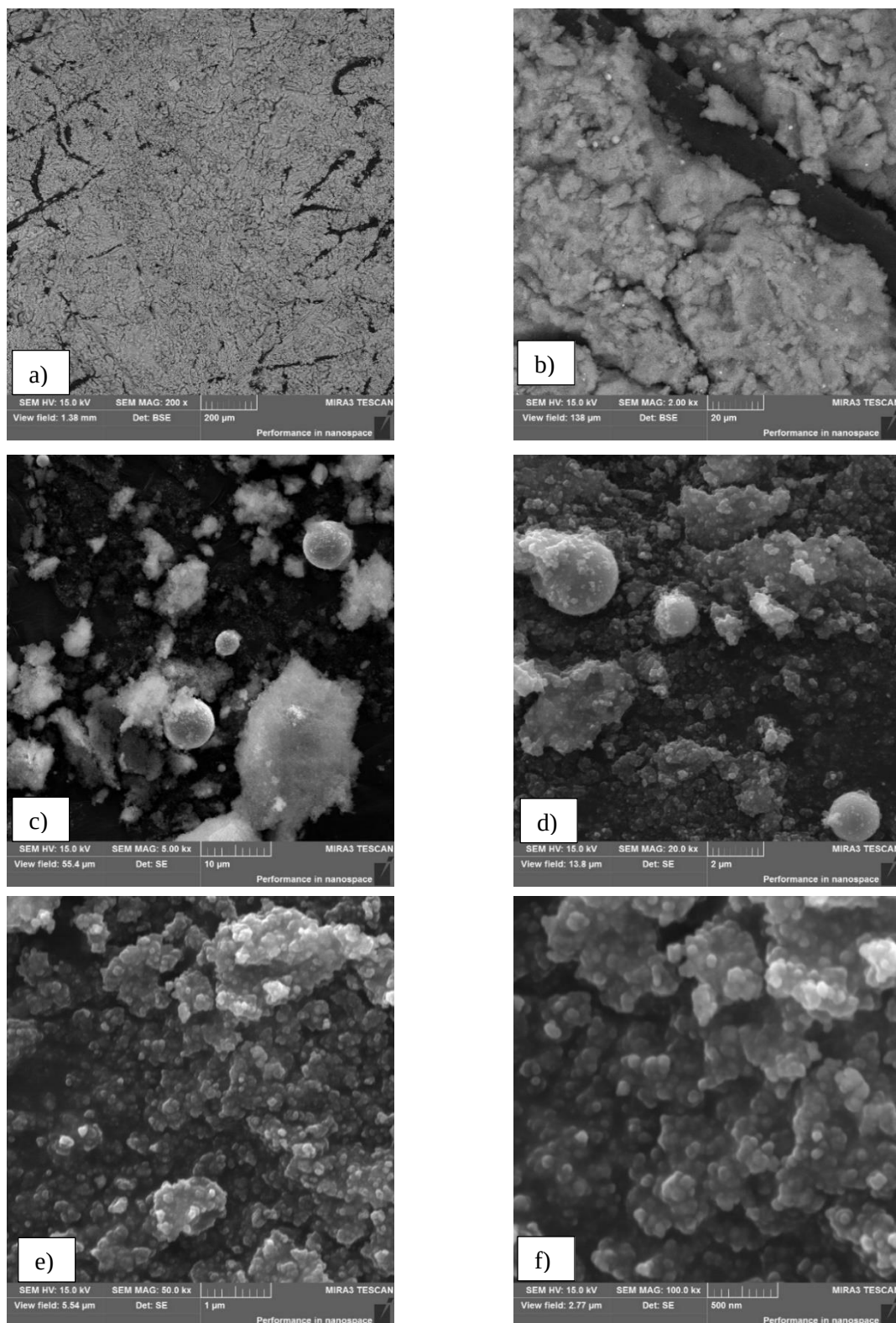
Wielkość cząstek [μm]	Spawanie laserowe i hybrydowe stali 1.4301		Spawanie laserowe i hybrydowe stali 1.4828		Spawanie łukowe stali 1.4301		Spawanie łukowe stali 1.4828	
	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]	Udział obj. [%]	Wartość cum. [%]
< 1	1,18	1,18	1,18	1,18	0,61	0,61	0,79	0,79
1-2	2,54	3,72	1,94	3,12	1,23	1,84	1,48	2,27
2-3	2,63	6,35	2,09	5,21	1,29	3,13	1,44	3,71
3-4	2,20	8,55	1,92	7,12	1,21	4,35	1,35	5,06
4-5	2,56	11,11	2,45	9,57	1,62	5,96	1,85	6,91
5-6	1,46	12,57	1,51	11,08	1,05	7,02	1,23	8,13
6-7	1,61	14,18	1,78	12,86	1,33	8,35	1,54	9,67
7-8	1,82	16,00	2,16	15,02	1,76	10,11	1,99	11,67
8-9	2,07	18,07	2,66	17,68	2,38	12,48	2,62	14,28
9-10	2,37	20,45	3,29	20,96	3,22	15,70	3,43	17,72

Analiza wyników wykazała, że 5-6% pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego należy do frakcji respirabilnej, a więc cząstek docierających i wnikaających do bezrzęskowych dróg oddechowych, a 14-16% do frakcji tchawicznej - cząstek wnikaających poza krtani. W przypadku pyłu ze spawania łukowego wartości te były nieco niższe – do frakcji respirabilnej zalicza się ok. 3,5% cząstek, natomiast do tchawicznej 12,5-14%. Należy mieć jednak na uwadze, że badaniom poddano próbki pyłu zebrane na filtrach, gdzie w wyniku zwiększonej ruchliwości na skutek wysokiej temperatury cząstki połączyły się większe skupiska.

6.3.3. Ocena budowy cząstek w połączeniu z analizą ich składu chemicznego

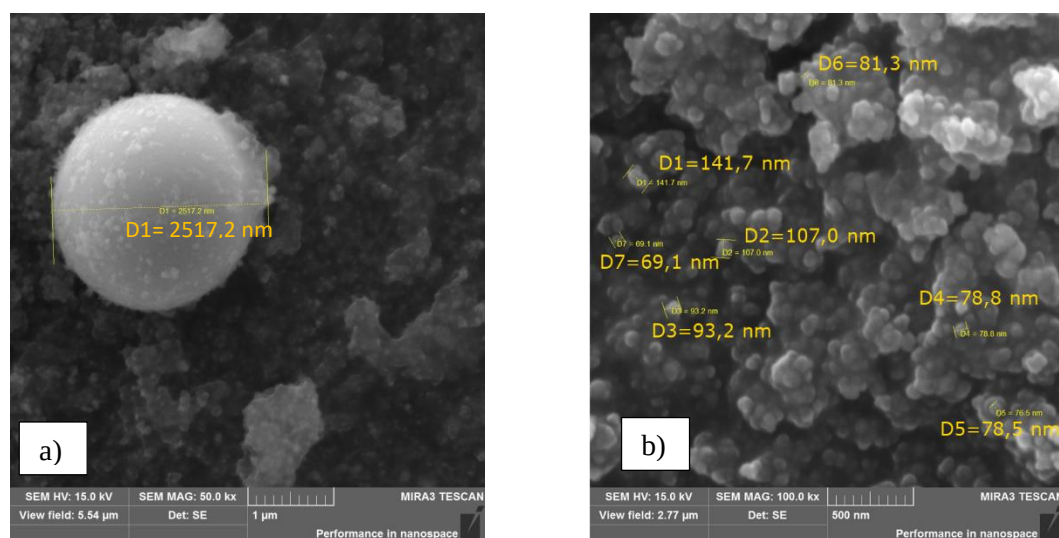
Do szczegółowej oceny budowy cząstek wykorzystano wysokorozdzielczą skaningową mikroskopię elektronową (HR SEM). Badania uzupełniono o mikrostrukturę składu chemicznego EDS. W tym celu nawiązano współpracę z Łukasiewicz – Instytutem Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Gliwicach, który wyposażony jest w wysokorozdzielczy skaningowy mikroskop elektronowy MIRA 3 firmy TESCAN. Pozwala on na badania przy powiększeniu do 250000x. Badania wykonano dla próbek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali 1.4301 i 1.4828. Na rysunku 6.36 przedstawiono próbki pyłu ze spawania hybrydowego stali 1.4301 w powiększeniu od 200x (a) do 100000x (f).

Obserwacje potwierdzają informacje uzyskane podczas przeglądu literatury oraz analiz wykonanych przy użyciu mikroskopu cyfrowego (podrozdział 6.3.1) – pył występuje w postaci pojedynczych cząstek o kształcie podłużnym lub zbliżonym do kulistego, albo też w postaci łańcuchów czy aglomeratów (rys. 6.36).



Rys. 6.36. Pył pochodzący ze spawania hybrydowej stali 1.4301 a) struktura pyłu w powiększeniu 200x, b) widok cząstek w powiększeniu 2000x, c) widok wierzchniej warstwy pyłu – powiększenie 5000x, d) struktura pyłu w powiększeniu 20000x, e) i f) morfologia pyłu w powiększeniu 50000x i 100000x

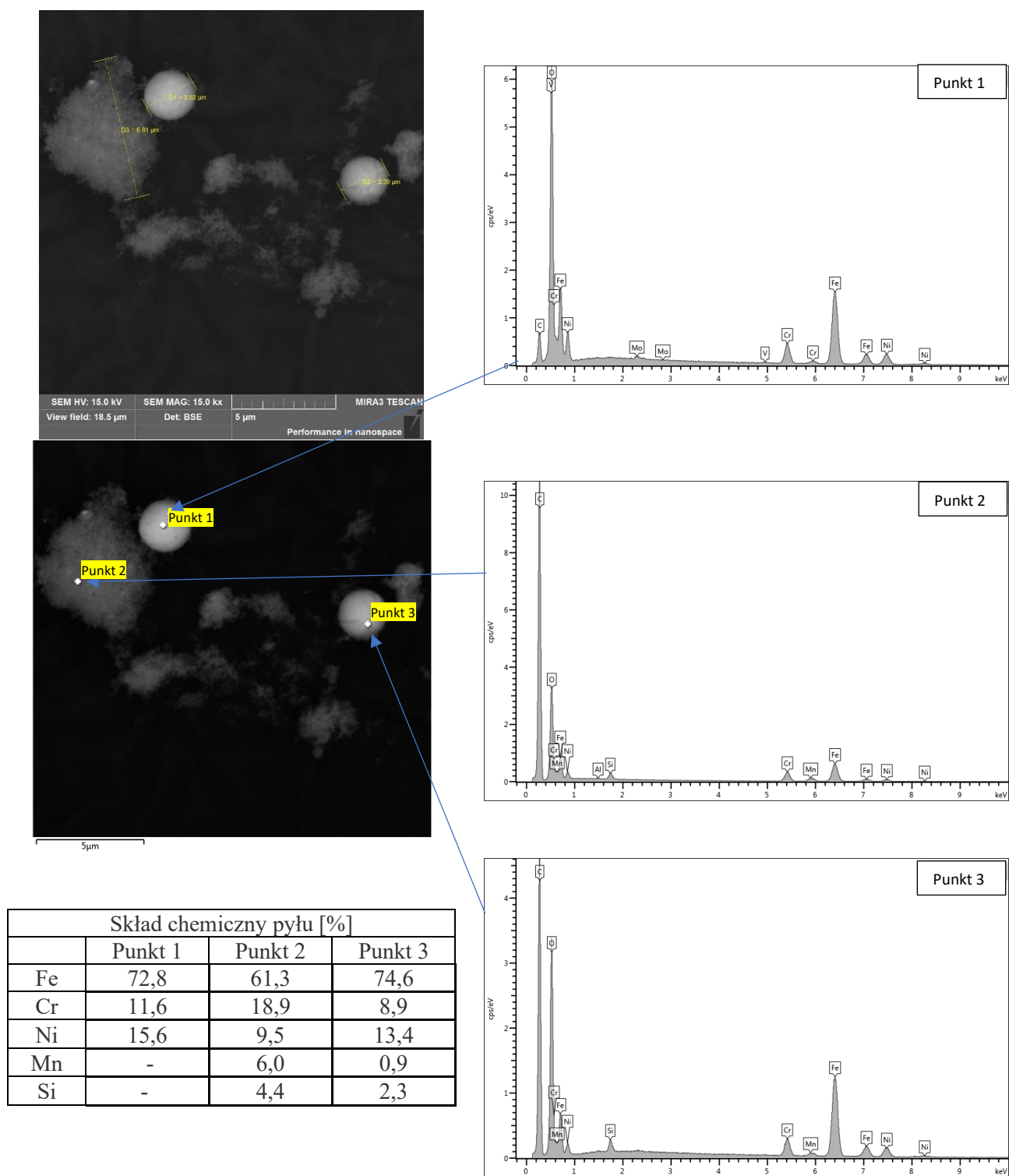
Dodatkowo, przeprowadzono również pomiary wielkości cząstek pyłu - przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 6.37.



Rys. 6.37. Wymiary cząstek pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4301 a) cząstka o kształcie kulistym o średnicy 2,5 μm , b) drobne kuliste cząstki o średnicach 70-110 nm

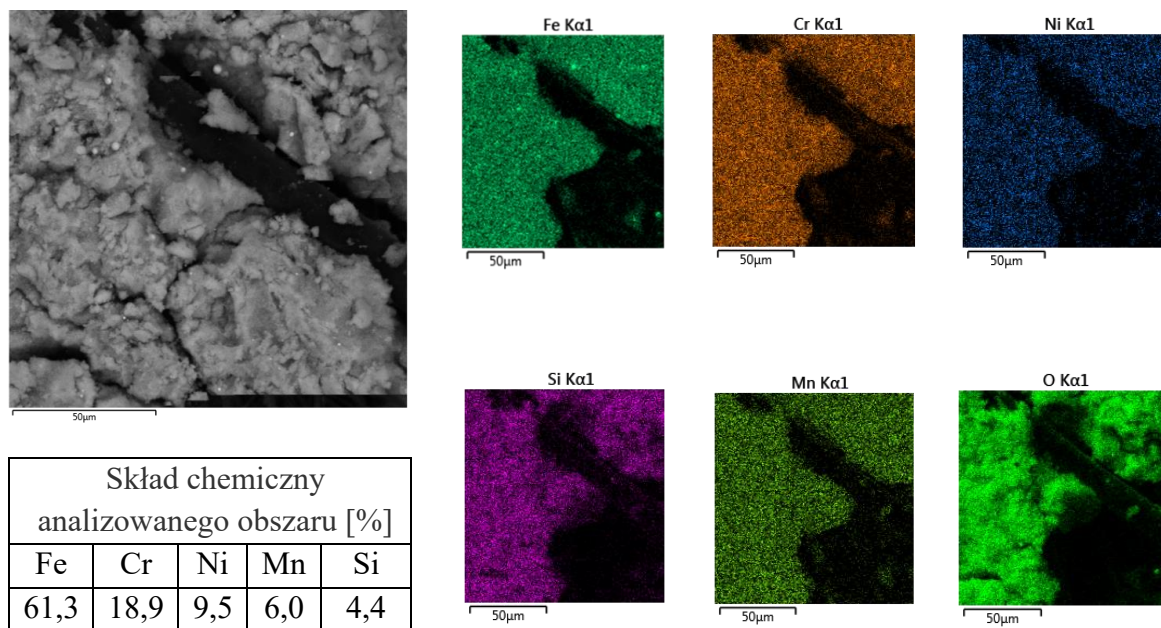
Analizowano morfologię cząstek oraz ich skład chemiczny metodą EDS. Cząstka pyłu widoczna na rysunku 6.37 a ma średnicę 2,5 μm i zawiera głównie żelazo. W powiększeniu 100000x udało się oznaczyć cząstki pyłu o wymiarach 70-110 nm (rys. 6.37 b). Dodatkowo, dla wybranych próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali odpornych na korozję w gatunku 1.4301 i 1.4828 wykonano analizę składu chemicznego w połączeniu z analizą wielkości cząstek. Przykładowe wyniki dla stali 1.4301 przedstawiono na rysunku 6.38.

Cząstki o kształcie kulistym (punkty pomiarowe 1 i 3) o średnicy 2,5 μm składały się w ponad 70% z żelaza, nikiel stanowił ok. 13,3-15,5%, a chrom ok. 9-11,5%. Z kolei cząstka o kształcie nieregularnym (punkt pomiarowy 2) ma długość 6,81 μm i składa się w ponad 60% z żelaza, blisko 19% z chromu, blisko 9,5% z niklu, blisko 1% z manganu i w ponad 2% z krzemu. Wyniki analizy składu chemicznego dla wszystkich 3 punktów pomiarowych wykazały obecność tlenu (rys. 6.38). Sugeruje to, że wspomniane wcześniej pierwiastki występują w formie tlenków. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonej wcześniej identyfikacji fazowej, gdzie wykazano obecność związków żelaza, manganu, chromu i niklu, które występowały w postaci tlenków – spineli o wzorze ogólnym AB_2O_4 – gdzie w miejsce A i B wpisują się Cr, Mn, Ni i Fe.

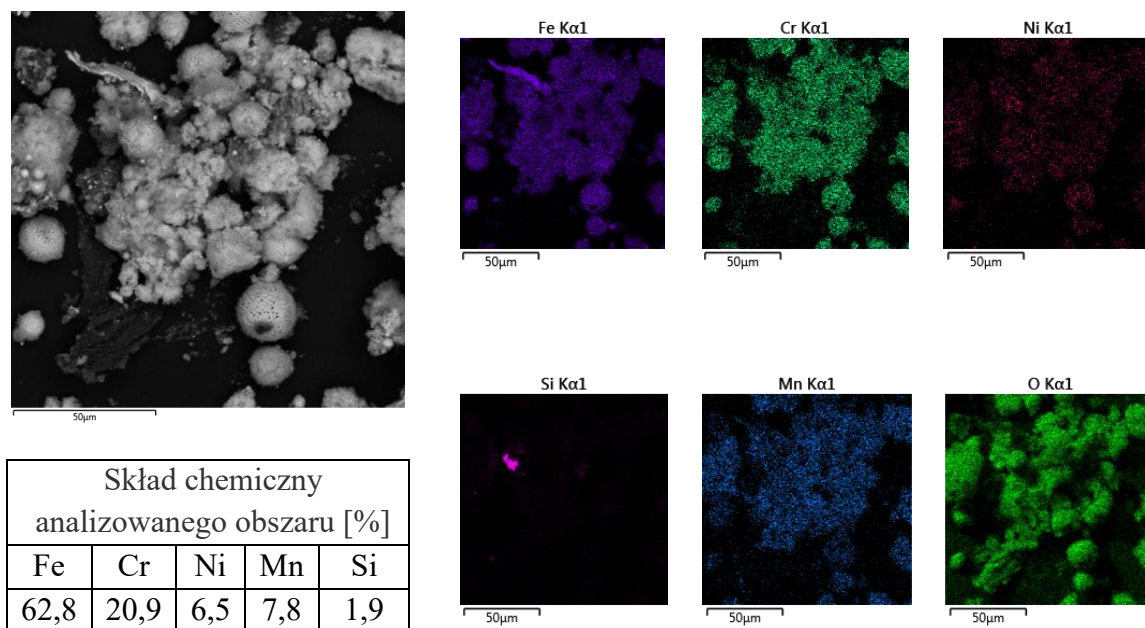


Rys. 6.38. Analiza składu chemicznego i morfologii pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali austenitycznej 1.4301 [158]

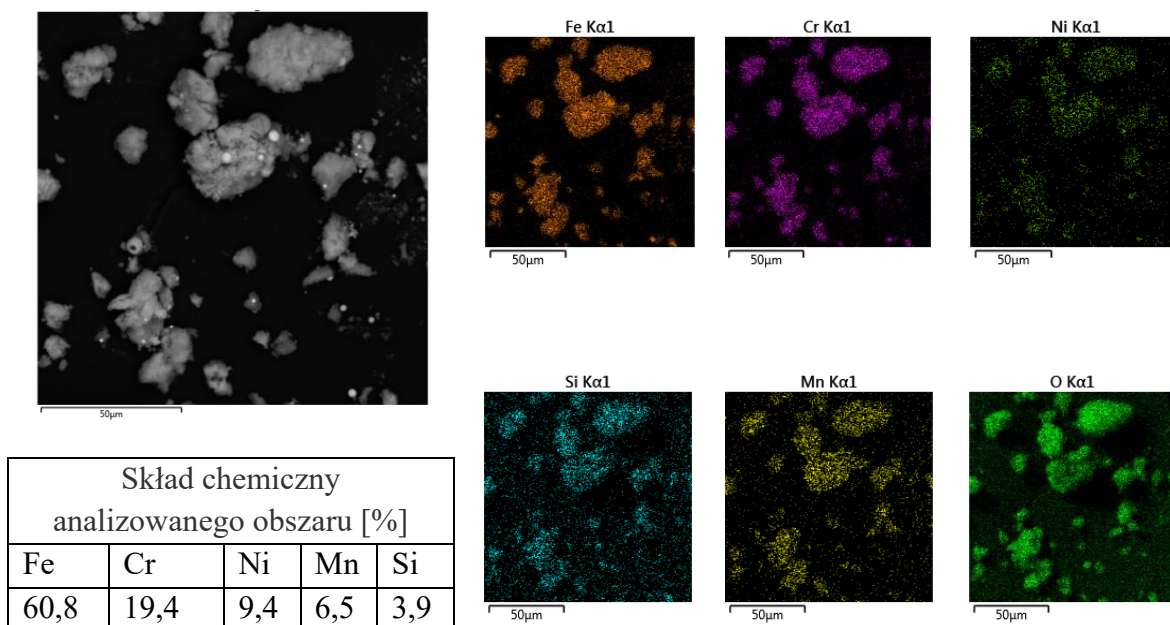
Na rysunkach 6.39 - 6.42 przedstawiono mapę rozkładu pierwiastków w próbkach pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego oraz łukowego stali 1.4301 i 1.4828.



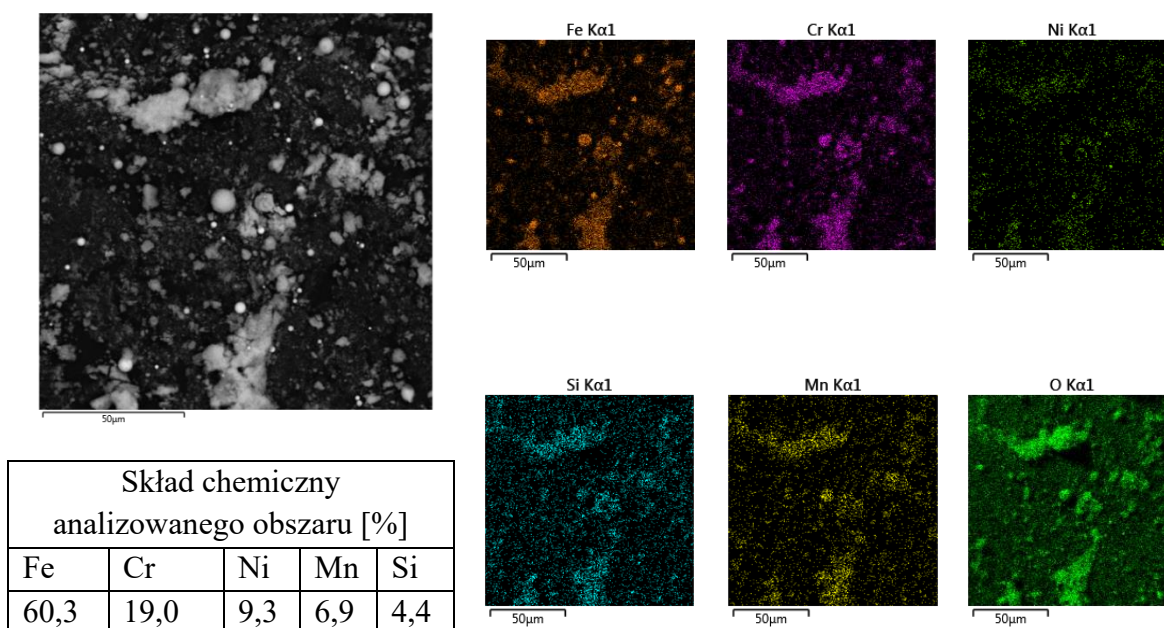
Rys. 6.39. Analiza składu chemicznego z zaznaczonej powierzchni oraz mapa rozkładu pierwiastków próbki pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4301



Rys. 6.40. Analiza składu chemicznego z zaznaczonej powierzchni oraz mapa rozkładu pierwiastków próbki pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4828



Rys. 6.41. Analiza składu chemicznego z zaznaczonej powierzchni oraz mapa rozkładu pierwiastków próbki pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4301 [159]



Rys. 6.42. Analiza składu chemicznego z zaznaczonej powierzchni oraz mapa rozkładu pierwiastków próbki pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4828 [159]

Ocena uzyskanych wyników nie wykazała różnic w morfologii pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego oraz łukowego stali 1.4301 i 1.4828. W analizowanych próbkach pyłu obserwowano występowanie zarówno pojedynczych cząstek jak i obecność większych skupisk - łańcuchów lub aglomeratów (rys. 6.36).

Porównując wyniki analizy składu chemicznego pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 wykazano, że pył pochodzący ze spawania stali w gat. 1.4828 charakteryzował się większą zawartością żelaza, chromu i manganu (różnice wyniosły 1,5% dla Fe, 2% dla Cr i 1,8% dla Mn) – rys. 6.39. W analizowanym obszarze pyłu pochodzącego ze spawania stali 1.4301 obserwowano większą zawartość niklu i krzemu (różnice wyniosły 3% dla Ni i 2,5% dla Si) – rys. 6.40.

Wyniki analizy składu chemicznego pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali 1.4301 i 1.4828 były bardzo zbliżone. Pył pochodzący ze spawania stali w gat. 1.4301 charakteryzował się nieco większą zawartością żelaza, chromu i niklu (różnice wyniosły 0,49% dla Fe, 0,42% dla Cr i 0,06% dla Si) - rys. 6.41. Natomiast w pyłe pochodzącym ze spawania łukowego stali 1.4828 ujawniono większą zawartość manganu i krzemu (różnice wyniosły 0,43% dla Ni i 0,54% dla Si) – rys. 6.42.

Porównując skład chemiczny pyłu pochodzącego ze spawania łukowego oraz laserowego i hybrydowego stali 1.4301 wykazano, że zawartość analizowanych pierwiastków jest zbliżona. Różnice w udziale masowym nie przekroczyły 0,5% (rys. 6.39 i 6.41). W przypadku pyłu ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4828 stwierdzono większą zawartość żelaza (o 2,5%), chromu (o blisko 2%) i manganu (o 0,9%). Natomiast pył pochodzący ze spawania łukowego stali 1.4828 charakteryzował się większym udziałem masowym niklu (o blisko 3 %) i krzemu (o 2,5%) – rys. 6.40 i 6.42.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że wyniki rozkładu wielkości cząstek oraz analizy HR SEM i EDS w powiązaniu z oznaczeniem wielkości emisji pyłu oraz jego składu chemicznego i fazowego pozwalają na uzyskanie pełnej oceny zagrożenia dla zdrowia związanego z emisją pyłu spawalniczego. Jest to szczególnie ważne podczas procesów spawania stali odpornych na korozję z uwagi na obecność w pyłe związków chromu oraz niklu stanowiących istotne zagrożenie dla zdrowia pracowników ze względu na ich udowodnione działanie kancerogenne (Grupa 1 zgodnie z wytycznymi IARC).

Stwierdzono, że ponad 20% cząstek pochodzących ze spawania laserowego i hybrydowego oraz 15-17% ze spawania łukowego należy do frakcji respirabilnej i tchawicznej, a więc tych należących do najbardziej szkodliwych bo wnikających poza obszar krtani. Cząstki te charakteryzują się jednorodnym rozkładem pierwiastków i zawierają w swoim składzie ok. 19% chromu i blisko 10% niklu, co potwierdziły wyniki mikroanalizy EDS.

7. Analiza wyników badań

Technologie spawalnicze są najczęściej stosowanymi technologiami łączenia stali odpornych na korozję. Pomimo, że spawanie łukowe nadal pozostaje główną metodą spajania tych stali, to jednak coraz częściej wykorzystuje się, w wielu gałęziach przemysłu technologie laserowe [5]. Oprócz spawania laserowego, jedną z metod stosowanych do spawania materiałów konstrukcyjnych z wykorzystaniem wiązki laserowej jest spawanie hybrydowe (HLAW - laser + łuk elektryczny). Metoda HLAW polega na wykorzystaniu zarówno wiązki promieniowania laserowego, jak i klasycznego spawalniczego źródła ciepła w postaci łuku elektrycznego w jednym procesie hybrydowym [60]. Daje to możliwość uzyskania dużych głębokości przetopienia przy niskiej energii liniowej (charakterystycznych dla spawania laserowego) z większą tolerancją przygotowania elementów do spawania i możliwością modyfikacji składu chemicznego spoiny (charakterystycznych dla metody łukowej) [60]. Porównanie procesów spawania łukowego, laserowego i hybrydowego przedstawiono w tablicy 7.1.

Tablica 7.1. Porównanie procesów spawania łukowego, laserowego i hybrydowego [60]

Spawanie laserowe	Spawanie łukowe
▪ duże prędkości spawania ▪ duże głębokości przetopienia ▪ niska energia liniowa ▪ min. odkształcenia i wąska SWC	▪ tanie tradycyjne źródło prądu ▪ duża tolerancja przygotowania złącza ▪ możliwość regulacji składu chemicznego spoiny (metoda MIG/MAG)
Spawanie hybrydowe laser + spawalniczy łuk elektryczny (HLAW)	
▪ stabilizacja procesu dzięki wzajemnemu oddziaływaniu obu procesów ▪ zwiększona tolerancja przygotowania złącza w porównaniu do spawania laserowego - możliwość spawania materiałów zestawionych z odstępem ▪ niska energia liniowa spawania ▪ możliwość wzrostu wydajności spawania poprzez zwiększenie prędkości spawania lub grubości spawanych elementów ▪ brak konieczności ukosowania blach przed spawaniem	

Opracowywanie i wdrażanie nowoczesnych technologii spawalniczych jest odpowiedzią na rosnące wymagania przemysłu odnoszące się do jakości połączeń spawanych i efektywności procesu spawania. Powinno to jednak iść w parze z przeprowadzeniem analizy aspektów środowiskowych procesu.

Spawanie stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej wiąże się z emisją pyłu spawalniczego, który stanowi istotne zagrożenie dla środowiska, zdrowia i bezpieczeństwa pracowników. Zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem pył spawalniczy od 2018 r. należy do grupy czynników o udowodnionym działaniu rakotwórczym. Podstawowymi składnikami stopowymi tych stali są chrom i nikiel. Ich związki również zaliczane są do substancji o udowodnionym lub prawdopodobnym działaniu rakotwórczym [14].

Ulepszenie technologii mające na celu zmniejszenie zagrożenia zdrowia i środowiska pracy wiąże się z wykonaniem analizy i oceny czynników mających wpływ na ilość, skład chemiczny i morfologię powstających zanieczyszczeń pyłowych. Do czynników tych zalicza się parametry technologiczne procesu, których modyfikacja w znaczący sposób wpływa na poprawę procesu w aspekcie ograniczenia wielkości emisji pyłu spawalniczego, w tym udziału pierwiastków i związków kancerogennych.

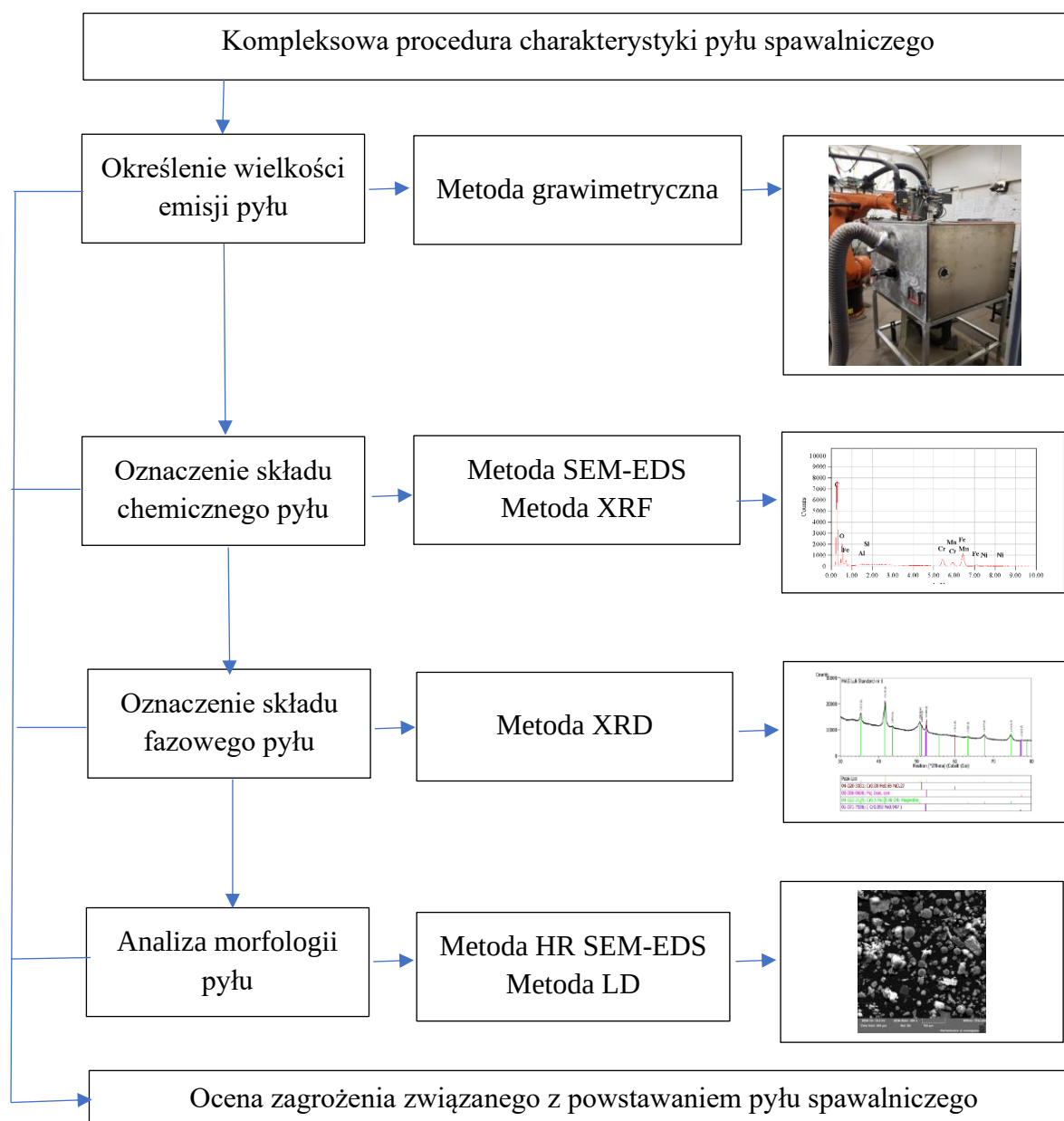
Zagadnienia dotyczące wpływu parametrów technologicznych procesu spawania laserowego i hybrydowego na wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych, na skład chemiczny pyłu nie były dotychczas szczegółowo opisane w literaturze. Pojawiające się informacje dotyczyły jedynie pojedynczych wskaźników dla tych procesów spawania.

Analiza danych literaturowych oraz wyniki badań własnych pokazały, że brak jest jednoznacznego sposobu oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu spawalniczego. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano własną procedurę oceny. Metodyka ta obejmuje wykonanie prób napawania na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym wyposażonym w komorę pyłową (rys. 6.1). Umożliwia to określenie wielkości emisji pyłu całkowitego wyrażonej w mg/s; rozumianej jako ilość powstającego pyłu w czasie. Ilość pyłu określa się metodą grawimetryczną na podstawie różnicy mas filtrów przed i po badaniu prowadzonym w komorze umożliwiającej uzyskanie powtarzalnych wyników.

W celu określenia jakie pierwiastki chemiczne są obecne w pyle, kolejny etap procedury obejmuje wykonanie analizy składu chemicznego pyłu. Badanie to prowadzone jest metodą SEM-EDS, która umożliwia oznaczenie składu chemicznego próbek pyłu zebranych na filtrach. W warunkach przemysłowych w celu sprawdzenia i weryfikacji dopuszcza się również stosowanie przenośnego spektrometru fluorescencji rentgenowskiej (XRF) z uwagi na szybkość wykonania analizy. Dopelnieniem analizy składu chemicznego jest przeprowadzenie analizy fazowej pyłu, której zadaniem jest określenie faz występujących w pyle. Badanie to prowadzone jest metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD).

Uzupełnieniem badań powinna być również analiza morfologii pyłu, umożliwiającą określenie wielkości, kształtu i budowy cząstek. Prowadzona jest ona z wykorzystaniem wysokorozdzielczej skaningowej mikroskopii elektronowej z systemem EDS (HR SEM-EDS). W celu pomiaru wielkości cząstek stosuje się technikę dyfrakcji laserowej (LD).

Opracowana metodyka zapewnia uzyskanie pełnej charakterystyki pyłu obejmującej wielkość emisji, jego skład chemiczny i fazowy oraz morfologię (rys. 7.1). Umożliwia to przeprowadzenie oceny zagrożenia związanego z tworzeniem się pyłu spawalniczego.



Rys. 7.1. Kompleksowa procedura charakterystyki pyłu spawalniczego

W pracy przyjęto, że energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego (laser + MIG) podczas spawania stali o strukturze austenitycznej decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii.

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że energia liniowa nie jest pojęciem jednoznacznym. Jest to wielkość łącząca ze sobą podstawowe parametry procesu – natężenie prądu spawania, napięcie łuku i prędkość spawania. Energia liniowa (E_l) często w literaturze jest określana jako ilość wprowadzonego ciepła (Q) na jednostkę długości [148], jednak między tymi dwoma wielkościami istnieją pewne różnice.

W procesach spawania łukowego ilość wprowadzonego ciepła (heat input - HI) i energia liniowa (arc energy - AE) są miarami ilości energii dostarczonej do materiału w celu utworzenia spoiny. Obydwie wielkości są mierzone w jednostkach energii na jednostkę długości [157].

Energia liniowa to energia dostarczana przez łuk spawalniczy do materiału przed uwzględnieniem efektywności procesu i oblicza się ją za pomocą wzoru:

$$E_l = \frac{U \cdot I}{v_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (7.1)$$

gdzie: E_l – energia liniowa [kJ/mm]; U – napięcie łuku [V]; I – natężenie prądu spawania [A]; v_{sp} – prędkość spawania [mm/s].

Z kolei ilość wprowadzonego ciepła (Q) uwzględnia wpływ wydajności procesu na energię, która faktycznie dociera do spawanego materiału w celu utworzenia spoiny. Ten parametr zapewnia bardziej odpowiedni sposób porównywania procesów spawania łukowego. Zależność pomiędzy ilością wprowadzonego ciepła a energią liniową opisuje poniższy wzór:

$$Q = \eta E_l \quad (7.2)$$

gdzie: η – współczynnik sprawności procesu spawania łukowego uzależniony jest od metody spawania (tablica 7.2).

Tablica 7.2. Wartość współczynnika wydajności procesu spawania łukowego w zależności od metody spawania [157]

Metoda spawania łukowego	Współczynnik wydajności procesu
Spawanie łukiem krytym (SAW)	1,0
Spawanie elektrodą otuloną (MMA) Spawanie drutami proszkowymi (FCAW) Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazu (MIG/MAG)	0,8
Spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazu (TIG) Spawanie plazmowe	0,6

W przypadku procesów wykorzystujących wiązkę światła lub elektronów, takich jak spawanie laserowe lub elektronowe, pomiędzy źródłem ciepła a spawanym materiałem nie powstaje łuk. Współczynnik przenoszenia energii (efektywności) procesu może się zmieniać w zależności od intensywności mocy wiązki i konfiguracji złącza [157].

Podczas spawania laserowego współczynnik wydajności nie jest uwzględniany. Wpływ wprowadzonego ciepła na szybkość chłodzenia w procesach z użyciem wiązki mocy nie jest taki sam, jak w przypadku procesów spawania łukowego, ze względu na różnice w kształcie spoiny [147]. Energia liniowa dla spawania laserowego i hybrydowego obliczana jest ze wzorów:

- dla spawania laserowego:

$$E_l = \frac{P}{V_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (7.3) [157]$$

- dla spawania hybrydowego (laser + MIG):

$$E_l = \frac{(P+U \cdot I)}{V_{sp}} \cdot 10^{-3} \quad (7.4) [157]$$

gdzie: P – moc lasera [W]; U – napięcie łuku [V]; I – natężenie prądu spawania [A];
 V_{sp} – prędkość spawania [mm/s].

Podsumowując, w pracy przyjęto do obliczania energii liniowej następujące wzory:

Spawanie łukowe	Spawanie laserowe	Spawanie hybrydowe
$E_l = \frac{U \cdot I}{V_{sp}} \cdot 10^{-3}$	$E_l = \frac{P}{V_{sp}} \cdot 10^{-3}$	$E_l = \frac{(P + U \cdot I)}{V_{sp}} \cdot 10^{-3}$

Celem pracy było określenie wpływu:

- energii liniowej spawania łukowego, laserowego i hybrydowego,
- gatunku materiału podstawowego,
- metody spawania

na wielkość emisji, skład chemiczny, skład fazowy i morfologię pyłu.

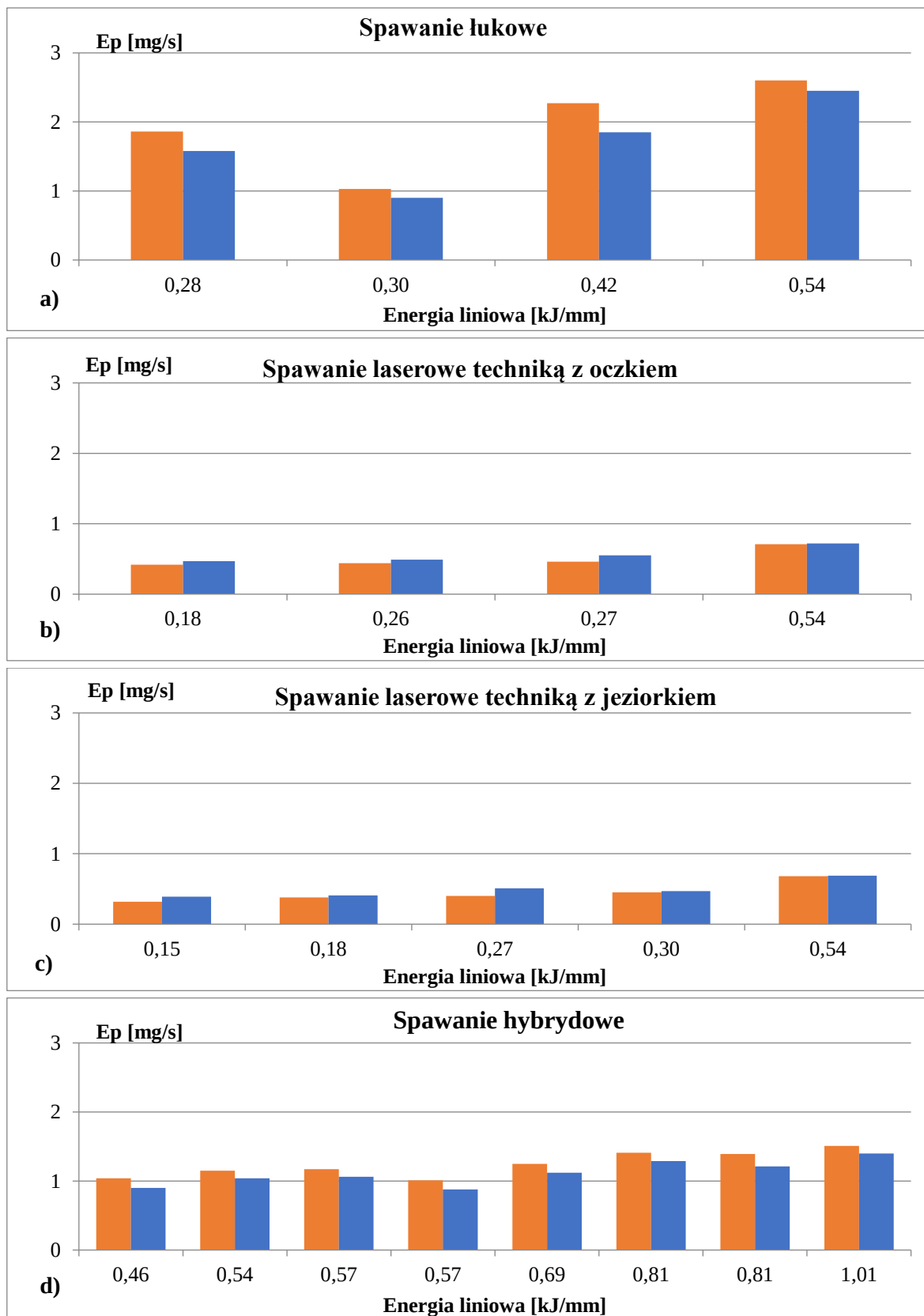
Analizę prowadzono dla zestawów parametrów technologicznych zapewniających uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B według norm dotyczących spawania łukowego, laserowego i hybrydowego [142-144] (tablice 4.7 i 4.8).

7.1. Wpływ parametrów technologicznych procesu (energii liniowej spawania) na wielkość emisji, skład chemiczny i fazowy oraz morfologię pyłu

Wpływ parametrów technologicznych rozumiany jako wpływ energii liniowej spawania łukowego, laserowego oraz hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na wielkość emisji pyłu przedstawiono na rysunku 7.2. Przedstawione w formie graficznej wyniki zostały zestawione w tablicy 7.3.

Tablica 7.3. Wielkość emisji pyłu powstającego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 w zależności od energii liniowej spawania

Spawanie łukowe										
E _l [kJ/mm]			0,28		0,30		0,42		0,54	
Emisja pyłu		1.4301	1,86		1,03		2,27		2,60	
		1.4828	1,58		0,90		1,85		2,45	
Spawanie laserowe techniką z oczkiem										
E _l [kJ/mm]			0,18		0,26		0,27		0,54	
Emisja pyłu		1.4301	0,42		0,44		0,46		0,71	
		1.4828	0,47		0,49		0,55		0,72	
Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem										
E _l [kJ/mm]			0,15		0,18		0,27		0,30	
Emisja pyłu		1.4301	0,32		0,38		0,40		0,45	
		1.4828	0,39		0,41		0,51		0,47	
Spawanie hybrydowe										
E _l [kJ/mm]		0,46	0,54	0,57	0,57	0,69	0,81	0,81	1,01	
Emisja pyłu	1.4301	1,04	1,15	1,17	1,01	1,25	1,41	1,39	1,51	
	1.4828	0,90	1,04	1,06	0,88	1,12	1,29	1,21	1,40	



Rys. 7.2. Wpływ energii liniowej oraz gatunku materiału podstawowego na wielkość emisji pyłu powstającego podczas spawania: a) łukowego, b) laserowego techniką z oczkiem, c) laserowego techniką z jeziorkiem, d) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Wykazano, że wraz ze wzrostem energii liniowej spawania zwiększała się emisja pyłu całkowitego, a w szczególności:

- zmiana energii liniowej dla procesu spawania łukowego z 0,28 do 0,54 kJ/mm skutkowała wzrostem emisji pyłu o 40% dla stali 1.4301 i o 55% w przypadku spawania stali 1.4828 (rys. 7.2 a);
- modyfikacja parametrów spawania laserowego stali 1.4301 powodująca dwukrotny wzrost energii liniowej wiązki przyczyniła się do zwiększenia emisji pyłu o 55% dla techniki spawania laserowego z oczkiem i o 70% dla techniki spawania laserowego z jeziorkiem (rys. 7.2 b, c). Porównując wyniki uzyskane dla tych samych wartości energii liniowej w przypadku stali 1.4828 ten wzrost był mniejszy i wyniósł odpowiednio 30% dla spawania z oczkiem i 35% dla techniki spawania z jeziorkiem (rys. 7.2 b, c);
- wzrost emisji pyłu o 45% dla stali 1.4301 i o 55% dla stali 1.4828 był efektem zwiększenia energii liniowej spawania hybrydowego o 0,55 kJ/mm (z 0,46 do poziomu 1,01 kJ/mm) - rys. 7.2 d.

Analiza wyników badań wykazała, że wzrost energii liniowej powoduje wzrost emisji pyłu całkowitego podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828. Wzrost energii liniowej spawania łukowego i hybrydowego jest ściśle związany ze wzrostem natężenia prądu spawania, a to przekłada się na sposób przenoszenia stopionego metalu elektrody do jeziora spawalniczego. Wyróżnia się trzy modele przenoszenia ciekłego metalu: zwarciový, kropłowy i natryskowy. Podczas spawania łukiem zwarciovým ciekły metal jest przenoszony do jeziora spawalniczego w wyniku każdorazowego dotknięcia się kropli metalu z jeziorkiem spawalniczym, co powoduje powstawanie zwarcia. Podczas spawania łukiem kropłowym ciekły metal przechodzi do jeziora spawalniczego w sposób mieszany tzn. zwarciový lub natryskowy. Z kolei w łuku natryskowym przenoszenie ciekłego metalu do jeziora spawalniczego odbywa się w sposób bez zwarciový, w postaci drobnych kropeł [161]. Wzrost energii liniowej podczas spawania łukowego i hybrydowego wiąże się z dostarczeniem większej ilości materiału dodatkowego w jednostce czasu, a jego parowanie w jeziorku ciekłego metalu przekłada się na większą emisję powstających zanieczyszczeń pyłowych.

Natomiast przy procesach spawania laserowego większa energia liniowa związana jest ze wzrostem mocy wiązki laserowej, co powoduje zwiększenie głębokości wtopienia i tym samym zwiększenie obszaru parowania ciekłego metalu. Efektem tego jest większa emisja pyłu całkowitego.

Z uwagi na fakt, że wielkość emisji pyłu jest głównym czynnikiem decydującym o zagrożeniu związanym z powstawaniem pyłu spawalniczego, w programie Minitab wykonano analizę regresji liniowej wpływu energii liniowej spawania na wielkość emisji pyłu.

Wpływ zależności pomiędzy energią liniową i emisją pyłu dla danej metody spawania został opisany równaniem pierwszego stopnia o wzorze ogólnym:

$$y = ax + b \quad (7.5)$$

gdzie: y - emisja czasowa pyłu, x - energia liniowa

W tablicy 7.4 przedstawiono wartości współczynników a i b dla każdej z metod. Obliczono również współczynnik korelacji R i determinacji R^2 .

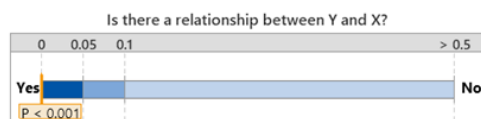
Tablica 7.4. Wartości współczynników a i b w równaniu 7.5 w zależności od metody spawania

Stal	Metoda spawania	Współczynniki			
		a	b	korelacji R	determinacji R ²
1.4301	Spawanie laserowe z oczkiem	0,8764	0,2320	98%	96%
	Spawanie laserowe z jeziorkiem	0,8777	0,1939	98%	97%
	Spawanie hybrydowe	0,9448	0,5956	93%	86%
	Spawanie łukowe	4,5750	0,1768	81%	66%
1.4828	Spawanie laserowe z oczkiem	0,7100	0,3351	98%	96%
	Spawanie laserowe z jeziorkiem	0,7630	0,2729	97%	94%
	Spawanie hybrydowe	0,9339	0,4749	94%	88%
	Spawanie łukowe	4,6560	0,0963	87%	75%

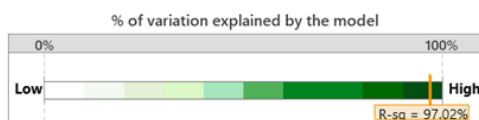
Analiza statystyczna wyników badania emisji pyłu potwierdziła zależność pomiędzy energią liniową spawania laserowego, hybrydowego i łukowego, a wielkością emisji zanieczyszczeń. Wystąpiła korelacja pełna dodatnia (związek wprost proporcjonalny), ze wzrostem energii liniowej rośnie wartość emisji pyłu. Wprost proporcjonalną korelację dodatnią pomiędzy energią liniową a wielkością emisji zanieczyszczeń wykazano dla wszystkich badanych metod spawania.

Przykładowe wyniki analizy regresji dla procesu spawania laserowego z jeziorkiem stali 1.4301 przedstawiono na rysunku 7.3.

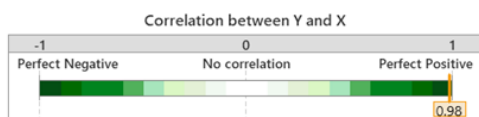
Y: Emisja pyłu
X: Energia liniowa



The relationship between SLzJ_Ep_1.4301 and SLzJ_EL is statistically significant ($p < 0.05$).



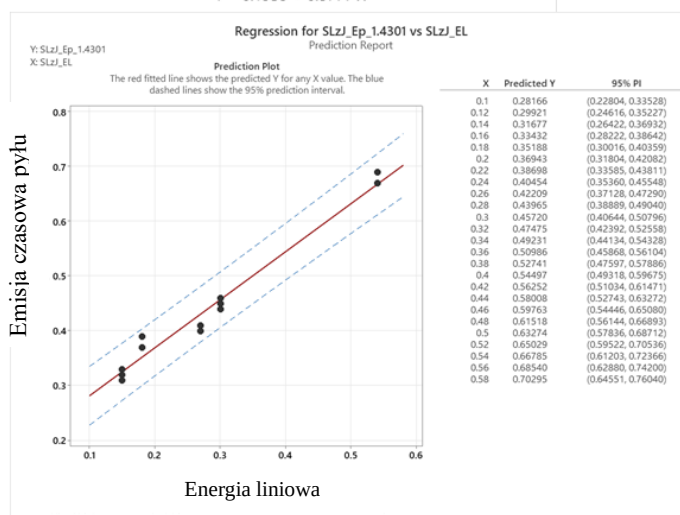
97.02% of the variation in SLzJ_Ep_1.4301 can be explained by the regression model.



The positive correlation ($r = 0.98$) indicates that when SLzJ_EL increases, SLzJ_Ep_1.4301 also tends to increase.

Równanie dla modelu liniowego

$$Y = 0.1939 + 0.8777 X$$



$$\text{Emisja czasowa pyłu} = 0,8777 \cdot \text{energia liniowa} + 0,1939$$

$$R = 0,98$$

$$R^2 = 0,97$$

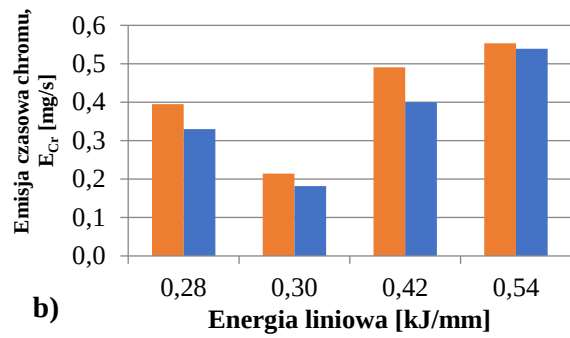
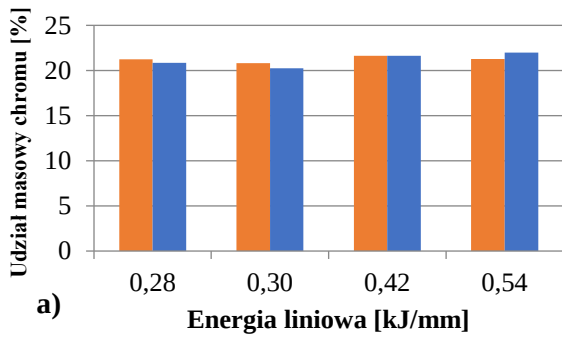
Rys. 7.3. Wpływ zależności pomiędzy energią liniową i emisją czasową pyłu dla spawania laserowego z jeziorkiem stali 1.4301

Kolejnym elementem analizy wyników było określenie oddziaływania parametrów technologicznych spawania na skład chemiczny pyłu. Analiza składu chemicznego wykazała obecność w pyłe żelaza, manganu, chromu, niklu i krzemu (tablice 6.1-6.3). W ocenie oddziaływania pyłu na zdrowie człowieka istotna jest analiza zawartości chromu oraz niklu, z uwagi na kancerogenne działanie tych pierwiastków na organizm człowieka (tablica 7.5) [8]. Wpływ energii liniowej spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 na udział masowy i wielkość emisji chromu oraz niklu pokazano na rysunkach 7.4 i 7.5.

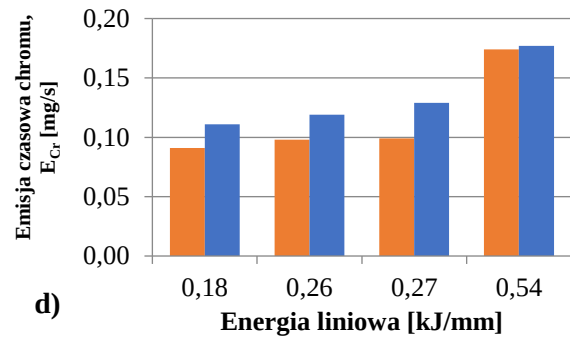
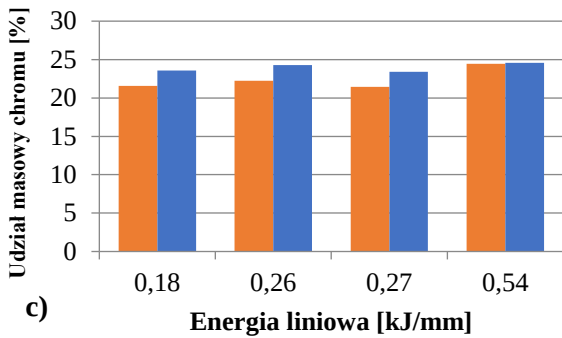
Tablica 7.5. Zawartość oraz wielkość emisji chromu i niklu podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 w zależności od energii liniowej spawania

Spawanie łukowe									
E _l [kJ/mm]		0,28		0,30		0,42		0,54	
1.4301	Zawartość chromu [%]	21,2		20,8		21,6		21,3	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,395		0,214		0,491		0,553	
	Zawartość niklu [%]	7,4		6,2		6,8		7,8	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,137		0,064		0,155		0,203	
1.4828	Zawartość chromu [%]	20,9		20,2		21,6		22,0	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,330		0,182		0,400		0,539	
	Zawartość niklu [%]	8,5		6,0		8,4		8,6	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,134		0,054		0,156		0,211	
Spawanie laserowe techniką z oczkiem									
E _l [kJ/mm]		0,18		0,26		0,27		0,54	
1.4301	Zawartość chromu [%]	21,6		22,2		21,5		24,5	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,091		0,098		0,099		0,174	
	Zawartość niklu [%]	5,1		5,2		5,1		4,7	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,021		0,023		0,024		0,033	
1.4828	Zawartość chromu [%]	23,6		24,3		23,4		24,6	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,111		0,119		0,129		0,177	
	Zawartość niklu [%]	8,2		7,7		8,3		8,1	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,039		0,038		0,046		0,058	
Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem									
E _l [kJ/mm]		0,15		0,18		0,27		0,30	
1.4301	Zawartość chromu [%]	24,0		20,6		24,3		25,2	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,077		0,078		0,097		0,113	
	Zawartość niklu [%]	4,2		3,7		3,7		4,4	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,013		0,014		0,015		0,020	
1.4828	Zawartość chromu [%]	25,4		27,7		27,6		25,2	
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,099		0,114		0,141		0,118	
	Zawartość niklu [%]	8,3		6,6		6,7		7,6	
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,032		0,027		0,034		0,036	
Spawanie hybrydowe									
E _l [kJ/mm]		0,46	0,54	0,57	0,57	0,69	0,81	0,81	1,01
1.4301	Zawartość chromu [%]	22,9	23,9	23,4	23,0	23,9	23,8	24,0	23,6
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,238	0,274	0,274	0,232	0,299	0,336	0,334	0,356
	Zawartość niklu [%]	5,8	4,8	5,1	5,3	4,3	4,7	4,4	4,5
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,060	0,055	0,060	0,053	0,054	0,067	0,061	0,068
1.4828	Zawartość chromu [%]	22,9	24,9	23,6	23,2	24,5	23,7	26,2	25,3
	Emisja czasowa chromu [mg/s]	0,206	0,259	0,250	0,205	0,274	0,306	0,317	0,354
	Zawartość niklu [%]	7,1	6,3	6,4	7,1	5,9	7,4	7,9	7,3
	Emisja czasowa niklu [mg/s]	0,063	0,066	0,068	0,062	0,066	0,095	0,095	0,102

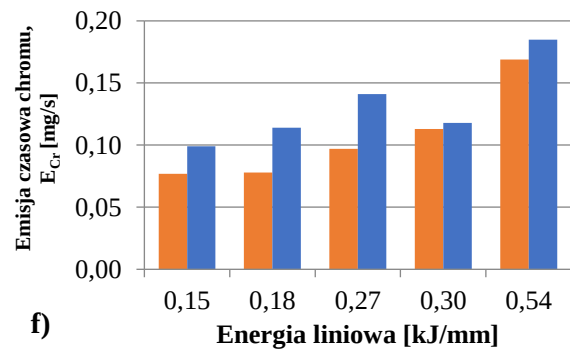
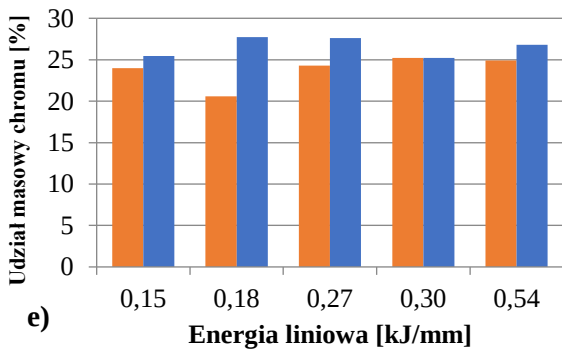
Spawanie łukowe



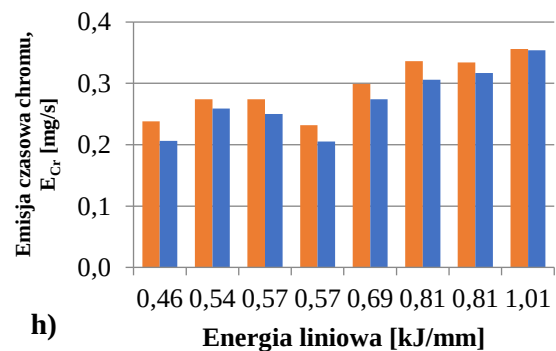
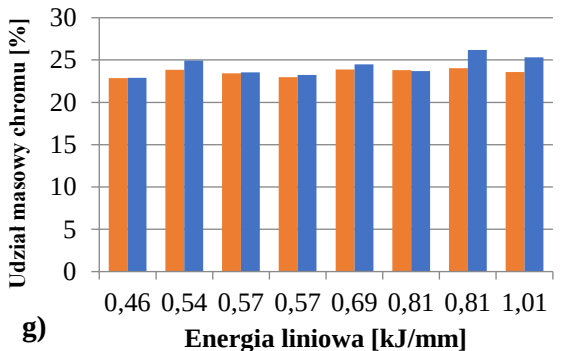
Spawanie laserowe techniką z oczkiem



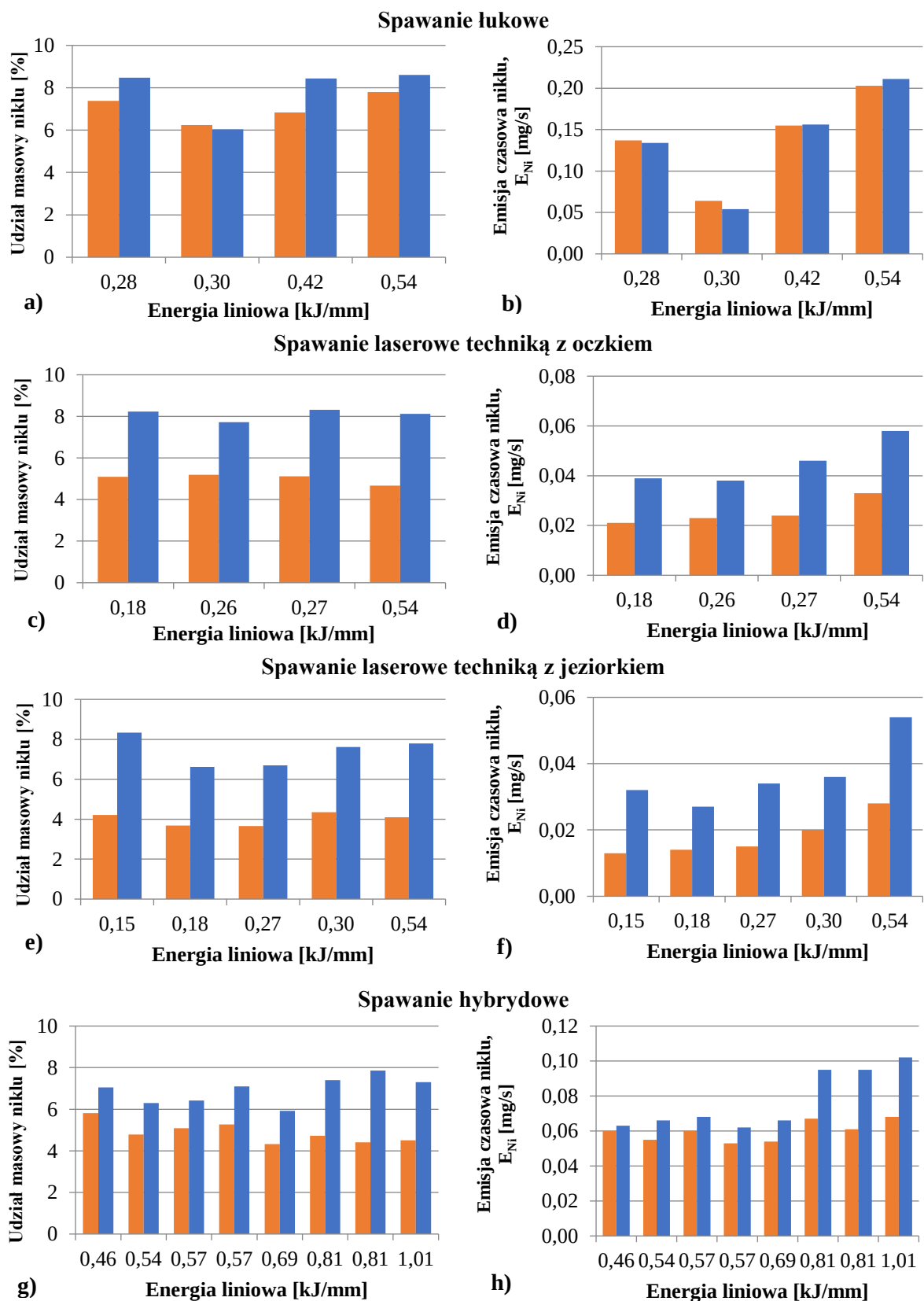
Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem



Spawanie hybrydowe



Rys. 7.4. Wpływ energii liniowej oraz materiału podstawowego na udział masowy i wielkość emisji chromu podczas spawania: a), b) łukowego, c), d) laserowego techniką z oczkiem, e), f) laserowego techniką z jeziorkiem, g), h) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)



Rys. 7.5. Wpływ energii liniowej oraz materiału podstawowego na udział masowy i wielkość emisji niklu podczas spawania: a), b) łukowego, c), d) laserowego techniką z oczkiem, e), f) laserowego techniką z jeziorkiem, g), h) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Stwierdzono na podstawie uzyskanych wyników, że zawartość chromu w pyłe była w zakresie: 20-22% podczas spawania łukowego; 21,5-28% dla spawania laserowego; 22-26% podczas spawania hybrydowego. Różnice dla określonej metody i danego materiału podstawowego nie przekroczyły 4,5% (tablica 7.5). Istotnym z punktu widzenia oceny oddziaływania chromu i niklu na organizm człowieka jest powiązanie ich zawartości w pyłe z emisją pyłu całkowitego. Wykazano wpływ energii liniowej na obliczoną wielkość emisji tych pierwiastków (chromu i niklu) dla badanych stali. Wzrost energii liniowej powodował wzrost emisji chromu podczas spawania stali 1.4301 i 1.4828 (rys. 7.4; tablica 7.5), a dokładnie:

- w wyniku zmiany energii liniowej spawania łukowego o 0,26 kJ/mm emisja chromu wzrosła o 40% dla stali 1.4301 i o 63% dla stali 1.4828 (rys. 7.4 b);
- efektem trzykrotnego zwiększenia energii liniowej spawania laserowego stali 1.4301 był wzrost emisji chromu o ponad 90% dla techniki spawania laserowego z oczkiem; dla techniki spawania z jeziorkiem wzrost emisji był ponad dwukrotny. W przypadku spawania stali 1.4828 przy takiej samej zmianie energii emisja chromu wzrosła o 0,066 mg/s (tj. o blisko 60%) dla techniki z oczkiem i o 0,086 mg/s (o 87%) dla techniki z jeziorkiem (rys. 7.4 d, f);
- wzrost energii liniowej spawania hybrydowego o blisko 50% (z 0,69 do 1,01 kJ/mm) powoduje wzrost emisji chromu o 0,057 mg/s (tj. o niespełna 20%) w przypadku stali 1.4301 oraz o 0,08 mg/s (o blisko 30%) podczas spawania stali 1.4828 (rys. 7.4 h).

Natomiast w przypadku niklu analiza wyników wykazała, że jego udział masowy w pyłe zawierał się w przedziałach: 6-9% podczas spawania łukowego; 3,5-8,5% dla spawania laserowego; 4-8% podczas spawania hybrydowego. Różnice dla określonej metody i danego materiału podstawowego nie przekroczyły 2,5% (tablica 7.5). Podobnie jak w przypadku emisji chromu, wzrost energii liniowej spawania stali 1.4301 i 1.4828 przekłada się na wzrost obliczonej emisji niklu (rys. 7.5; tablica 7.5), dla przykładu:

- emisja niklu wzrasta o 0,066 mg/s (tj. o 48%) w przypadku stali 1.4301 i o 0,077 mg/s (tj. o 57%) podczas spawania łukowego stali 1.4828 wraz ze wzrostem energii łuku o 0,26 kJ/mm (rys. 7.5 b);
- spawanie laserowe stali 1.4301 techniką z oczkiem przy zmianie energii liniowej z 0,18 do 0,54 kJ/mm wiąże się ze wzrostem emisji niklu o 57%. W przypadku spawania tej stali techniką z jeziorkiem, wynikiem trzykrotnego zwiększenia energii liniowej jest dwukrotny wzrost emisji niklu. Zmiana parametrów technologicznych spawania laserowego stali 1.4828 tj. energii liniowej wiązki (0,54 kJ/mm w porównaniu do 0,27 kJ/mm)

spowodowała 26% wzrost emisji niklu podczas spawania techniką z oczkiem; w przypadku spawania z jeziorkiem emisja wzrosła o 50% (rys. 7.5 d, f);

- skutkiem zwiększenia energii liniowej spawania hybrydowego z 0,69 do 1,01 kJ/mm był wzrost emisji niklu o 25% podczas spawania stali 1.4301 i o blisko 55% w przypadku stali 1.4828 (rys. 7.5 h).

Uzupełnieniem analizy składu chemicznego pyłu była analiza fazowa pyłu. W pyłe wydzielającym się podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 stwierdzono obecność następujących związków: tlenek chromu(III) żelaza(II) ($\text{Cr}_2\text{FeO}_4 - \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$), tlenek manganu(II) i żelaza(III) ($\text{MnFe}_2\text{O}_4 - \text{MnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) oraz tlenek niklu(II) żelaza(III) ($\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{NiO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$). Pył pochodzący ze spawania łukowego zawierał dodatkowo żelazo. W przypadku spawania hybrydowego oznaczono także tlenek żelaza(II) i żelaza(III) ($\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) (tablice 6.12-6.14).

Fazę główną pyłu pochodzącego zarówno ze spawania łukowego, hybrydowego jak i laserowego stanowił tlenek chromu(III) i żelaza(II) ($\text{Cr}_2\text{FeO}_4 - \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$). W próbkach pyłu pochodzącego ze spawania łukowego udział masowy tego składnika wyniósł 68-72%; podczas spawania laserowego zawartość Cr_2FeO_4 wyniosła od 72 do 82%, natomiast w pyłe pochodzącym ze spawania hybrydowego udział masowy Cr_2FeO_4 był w przedziale 64-80%. W zakresie analizowanych wartości energii liniowej spawania zawartość tlenku(III) żelaza(II) dla danego materiału podstawowego była w zakresie (tablica 7.6):

- dla spawania łukowego stali 1.4301 od 67,9% do 70,1% i od 71,1% do 71,8% dla stali 1.4828;
- podczas spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4301 od 75,1% do 79,7%, a dla stali 1.4828 w przedziale od 71,9% do 78,8%;
- podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4301 76,3% do 80,7%, a dla stali 1.4828 od 73,3% do 81,8%;
- dla spawania hybrydowego stali 1.4301 zawartość Cr_2FeO_4 była w zakresie od 67,7% do 79,7%, a w przypadku stali 1.4828 od 64,0% do 69,3%.

Z uwagi na fakt, że zawartość Cr_2FeO_4 w analizowanych próbkach pyłu wyniosła powyżej 60%, oddziaływanie tej fazy na zdrowie człowieka jest dominujące (tablica 7.6). Wpływ energii liniowej spawania na udział masowy i wielkość emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) przedstawiono na rysunku 7.6. Podobnie jak w przypadku składu chemicznego pyłu, o wpływie określonej substancji chemicznej na zdrowie człowieka decyduje całkowita ilość tego składnika wnikażąca do organizmu. Uzależnione jest to nie tylko od jej udziału jednostkowego w pyłe, ale także od wielkości emisji pyłu całkowitego.

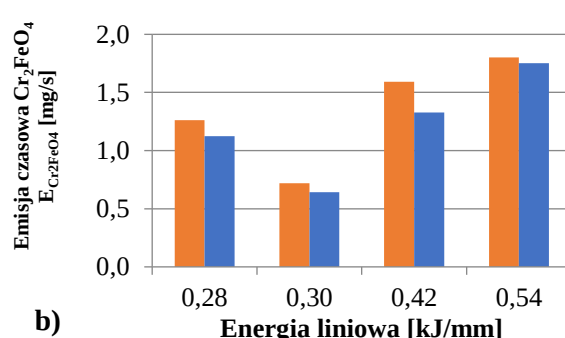
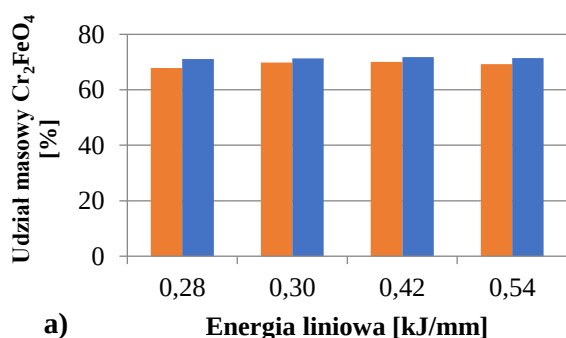
Tablica 7.6. Zawartość oraz wielkość emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828 w zależności od energii liniowej spawania

Spawanie łukowe									
E _l [kJ/mm]		0,28	0,30	0,42	0,54				
1.4301	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	67,9	69,8	70,1	69,3				
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	1,263	0,719	1,591	1,802				
1.4828	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	71,1	71,3	71,8	71,5				
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	1,123	0,642	1,328	1,752				
Spawanie laserowe techniką z oczkiem									
E _l [kJ/mm]		0,18	0,26	0,27	0,54				
1.4301	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	75,1	79,6	75,3	79,7				
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,315	0,350	0,346	0,563				
1.4828	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	74,8	72,7	78,8	71,9				
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,352	0,356	0,433	0,518				
Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem									
E _l [kJ/mm]		0,15	0,18	0,27	0,30	0,54			
1.4301	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	76,3	80,7	79,9	78,4	77,7			
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,244	0,307	0,320	0,353	0,528			
1.4828	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	73,5	79,8	74,5	81,8	73,3			
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,287	0,327	0,380	0,384	0,506			
Spawanie hybrydowe									
E _l [kJ/mm]		0,46	0,54	0,57	0,57	0,69	0,81	0,81	1,01
1.4301	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	76,7	72,8	78,0	74,4	79,7	67,7	71,4	74,3
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,798	0,837	0,913	0,751	0,996	0,941	1,007	1,122
1.4828	Zawartość Cr ₂ FeO ₄ [%]	69,3	66,4	64,5	67,5	69,0	64,0	67,6	69,1
	Emisja czasowa Cr ₂ FeO ₄ [mg/s]	0,624	0,690	0,684	0,594	0,773	0,774	0,872	0,967

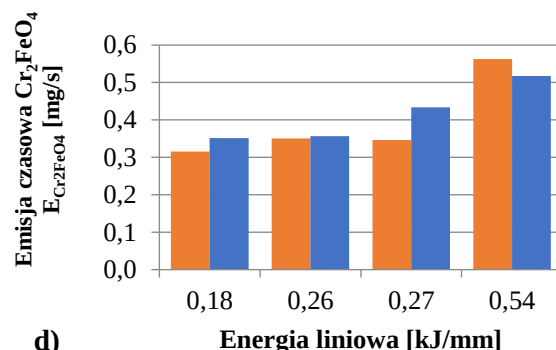
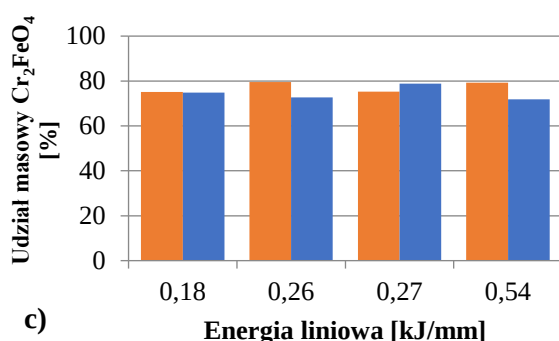
Stwierdzono wpływ energii liniowej na obliczoną wielkość emisji dominującej fazy dla badanych stali. Wzrost energii liniowej powodował wzrost emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) podczas spawania stali 1.4301 i 1.4828 (rys. 7.6; tablica 7.6), a dokładnie:

- zwiększenie energii liniowej spawania łukowego o 0,28 do 0,54 kJ/mm przyczyniło się do wzrostu emisji Cr₂FeO₄ o blisko 45% dla stali 1.4301 i o ponad 55% dla stali 1.4828 (rys. 7.6 b);
- emisja czasowa Cr₂FeO₄ podczas spawania techniką z oczkiem stali 1.4301 wzrosła o blisko 80% na skutek trzykrotnego zwiększenia energii liniowej spawania laserowego. W przypadku techniki z jeziorkiem wzrost emisji był dwukrotny. Z kolei spawanie stali 1.4828 przy takiej samej zmianie energii wiązało się z emisją Cr₂FeO₄ większą o blisko 50% dla techniki z oczkiem i ponad 75% dla techniki z jeziorkiem (rys. 7.6 d, f);
- emisja Cr₂FeO₄ podczas spawania stali 1.4301 zwiększyła się o 12% przy zmianie energii liniowej spawania hybrydowego o blisko 50% (z 0,69 do 1,01 kJ/mm); w przypadku stali 1.4828 emisja wzrosła o 25% (rys. 7.6 h).

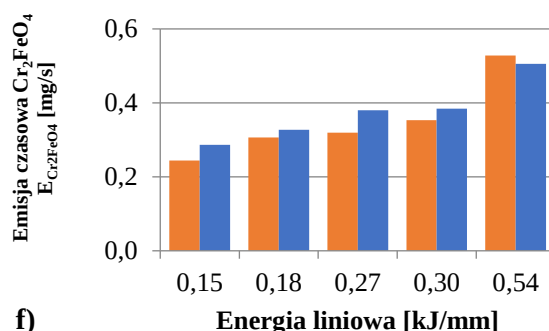
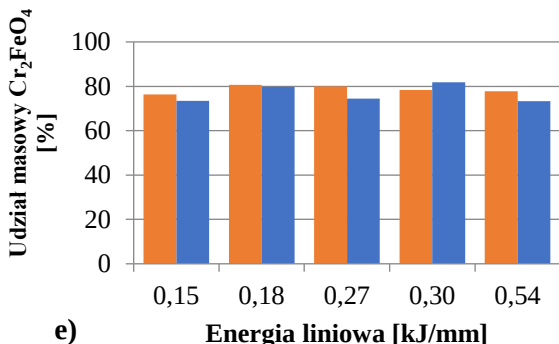
Spawanie łukowe



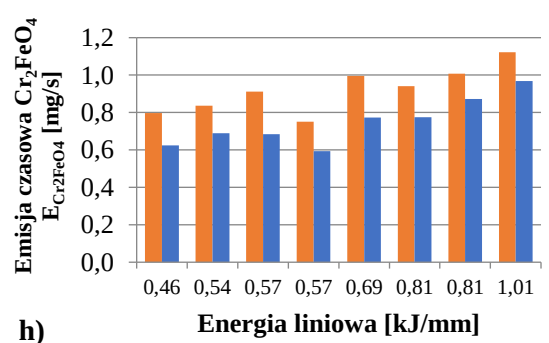
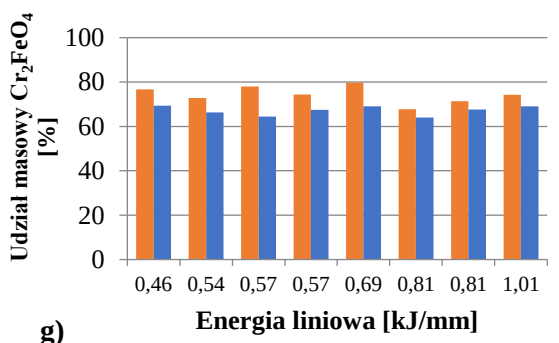
Spawanie laserowe techniką z oczkiem



Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem



Spawanie hybrydowe



Rys. 7.6. Wpływ energii liniowej oraz materiału podstawowego na udział masowy i wielkość emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) podczas spawania: a), b) łukowego, c), d) laserowego techniką z oczkiem, e), f) laserowego techniką z jeziorkiem, g), h) hybrydowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■)

Analiza wyników badań wykazała, że wzrost energii liniowej powodował wzrost emisji chromu i niklu oraz tlenku chromu(III) żelaza(II) podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4301 i 1.4828. Wzrost emisji wynika z dostarczenia większej ilości materiału dodatkowego w czasie i/lub zwiększenia głębokości wtopienia czego efektem jest większy obszar parowania ciekłego metalu i większa emisja pyłu całkowitego w tym chromu oraz niklu oraz głównego składnika fazowego – Cr_2FeO_4 .

Wyniki analizy morfologii pyłu ujawniły cząstki w postaci łańcuchów i aglomeratów o kształcie kulistym i podłużnym. Jest to związane z faktem, że w procesie spawania na skutek działania wysokiej temperatury zwiększa się ruchliwość pojedynczych cząstek pyłu i łączą się one w większe formy. Oznaczono również pojedyncze cząstki, których średnica nie przekraczała $3\mu\text{m}$, a więc należące do frakcji respirabilnej, która jest najbardziej niebezpieczna z punktu widzenia zdrowia człowieka. Uzyskane w badaniach wyniki nie wykazały jednoznacznego wpływu parametrów technologicznych na wielkość cząstek.

7.2. Wpływ materiału rodzimego na wielkość emisji, skład chemiczny, fazowy i morfologię pyłu

Analizę porównawczą wielkości emisji, składu chemicznego, fazowego i morfologii pyłu przeprowadzono dla dwóch gatunków stali odpornych na korozję: X5CrNi18-10 (1.4301) oraz X15CrNiSi20-12 (1.4828) (tablica 3.1). Stale te różnią się zawartością chromu (różnica wynosi 2%) oraz niklu (różnica o 3%). Większa zawartość tych pierwiastków występuje w stali austenitycznej żaroodpornej – 1.4828.

Oddziaływanie energii liniowej procesu spawania łukowego, laserowego i hybrydowego na wielkość emisji pyłu w zależności od gatunku materiału podstawowego przedstawiono na rysunku 7.2.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy ich wyników stwierdzono, że spawanie łukowe i hybrydowe stali 1.4301 charakteryzowało się większą emisją pyłu (rys. 7.2 a, d). W przypadku spawania łukowego różnice w emisji wyniosły od 0,13 mg/s do 0,42 mg/s (tablica 7.3). Natomiast w czasie spawania hybrydowego różnice w emisji między dwoma gatunkami nie przekroczyły 0,2 mg/s (rys. 7.2 d).

Odwrotną zależność obserwowano podczas spawania laserowego zarówno techniką z oczkiem jak i z jeziorciem – większą emisję pyłu stwierdzono dla stali 1.4828 (rys. 7.2 b, c). Dla obu technik spawania laserowego różnice w wielkości emisji pyłu zawierały się w zakresie od 0,01 do 0,1 mg/s (rys. 7.2 b, c). Przykładowo, dla energii liniowej spawania wynoszącej 0,27 kJ/mm emisja pyłu podczas spawania stali 1.4828 techniką z oczkiem była

o blisko 20% większa w stosunku do stali 1.4301 (tablica 7.3). W sytuacji gdy spawano stal 1.4828 techniką z jeziorkiem emisja pyłu była większa o ponad 27% (tablica 7.3).

Podobnie jak w przypadku analizy oddziaływania parametrów technologicznych spawania na skład chemiczny pyłu, oceniając znaczenie materiału podstawowego wzięto pod uwagę zawartość oraz wielkość emisji chromu i niklu oraz tlenku chromu(III) żelaza (II) (rys. 7.4 -7.6).

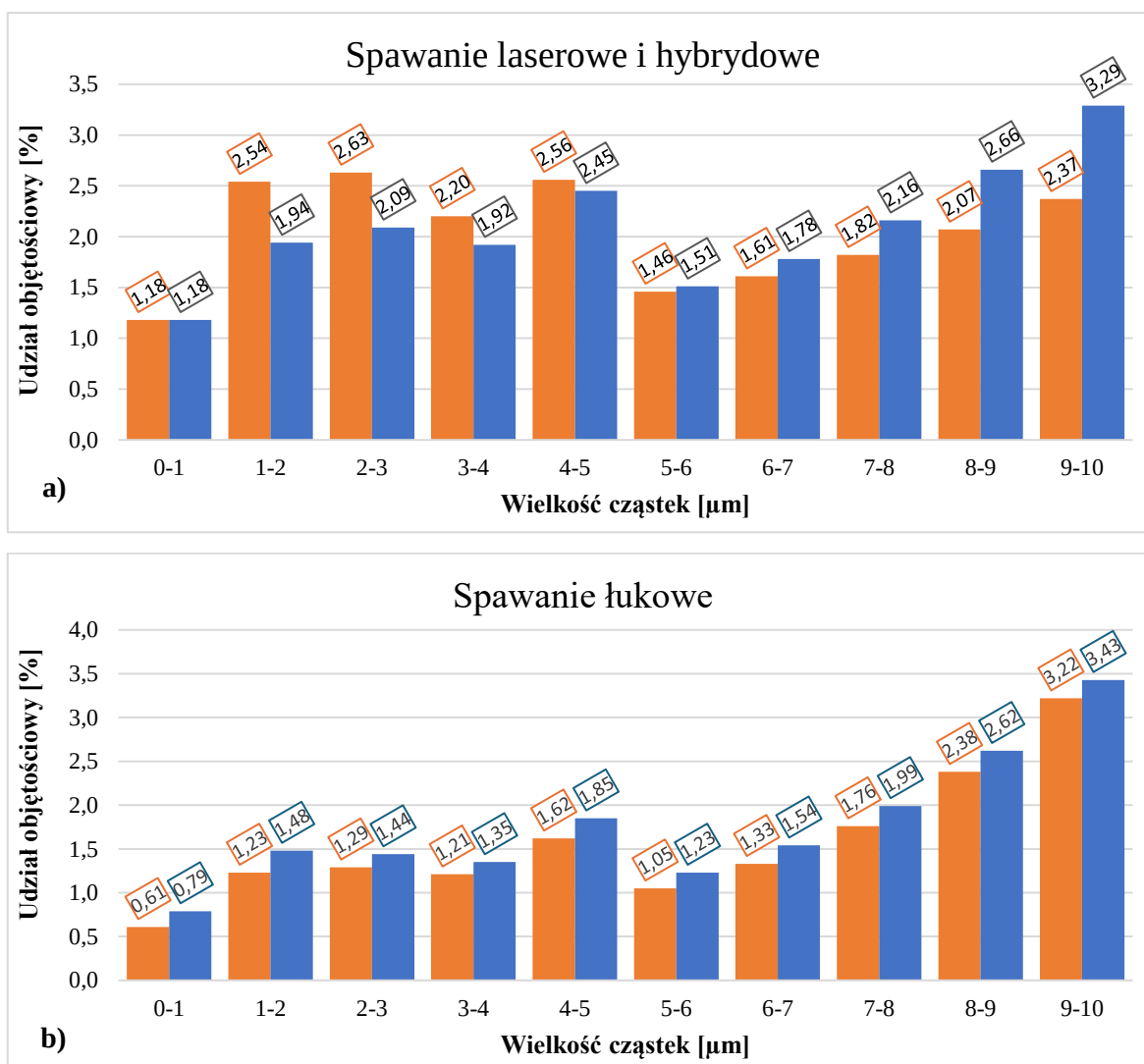
Analiza wpływu gatunku materiału podstawowego na zawartość chromu i niklu wykazała większy udział masowy tych pierwiastków podczas spawania łukowego, laserowego i hybrydowego stali 1.4828 (rys. 7.4 a,c,e,g; 7.5 a,c,e,g). Związane jest to z większą zawartością chromu i niklu w materiale rodzimym.

Ocena emisji chromu wykazała, podobne zależności jak w przypadku wielkości emisji pyłu całkowitego. Podczas spawania łukowego i hybrydowego większa emisja Cr była dla stali 1.4301 (rys. 7.4 b, h). Natomiast w procesie spawania laserowego analizowanymi technikami (z jeziorkiem i z oczkiem) większą emisją chromu charakteryzowało się spawanie stali 1.4828 (rys. 7.4 d, f).

Oceniając znaczenie materiału podstawowego w kontekście wielkości emisji niklu stwierdzono, że procesy spawania laserowego (techniką z oczkiem i z jeziorkiem) oraz hybrydowego stali 1.4828 wiązały się z większą emisją niklu (rys. 7.5 d, f, h). Podczas spawania łukowego emisja niklu dla obu gatunków stali była bardzo zbliżona. Dla energii liniowej wynoszącej 0,28 i 0,30 kJ/mm nieznacznie większą emisję niklu obserwowano dla stali 1.4301. Natomiast w przypadku energii liniowej równej 0,42 i 0,54 kJ/mm większa emisja Ni wystąpiła dla stali 1.4828 (rys. 7.5 b).

Podczas analizy emisji Cr_2FeO_4 obserwowano podobne zależności jak w przypadku wielkości emisji pyłu całkowitego i emisji chromu. Spawanie łukowe i hybrydowe stali 1.4301 wiązało się z większą emisją Cr_2FeO_4 (rys. 7.6 b, h). Odwrotną zależność wykazano podczas spawania laserowego analizowanymi technikami (z jeziorkiem i z oczkiem) - większą emisją tlenku chromu(III) żelaza(II) charakteryzowało się spawanie stali 1.4828 (rys. 7.6 d, f).

Wpływ materiału podstawowego na morfologię pyłu określono na podstawie wyników laserowej analizy wielkości cząstek. W analizie porównawczej skupiono się na cząstkach o wielkości poniżej 10 μm - należących do frakcji respirabilnej i tchawicznej. Na podstawie danych podanych tablicy 6.19 wyniki w formie graficznej pokazano na rys. 7.7. Rysunek przedstawia procentowy udział cząstek o danym zakresie średnic aerodynamicznych w całkowitej objętości cząstek zebranego pyłu.



Rys. 7.7. Rozkład wielkości cząstek pyłu powstającego podczas spawania: a) laserowego + hybrydowego, b) łukowego stali 1.4301 (■) i 1.4828 (■) charakteryzowanych przez średnicę aerodynamiczną w zależności od gatunku materiału podstawowego dla energii liniowej spawania wynoszącej 0,54 kJ/mm

W przypadku pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stwierdzono, że większy udział objętościowy cząstek o średnicy od 1 do 5 μm wystąpił podczas spawania stali 1.4301. Różnice te zawierały w zakresie od 0,1 do 0,6%. Natomiast w przypadku cząstek o średnicy powyżej 5 μm większą ilość stwierdzono dla stali 1.4828. Różnice wyniosły od 0,05 do 0,9% (rys. 7.7 a).

Pył pochodzący ze spawania laserowego i hybrydowego należący do frakcji respirabilnej (o średnicy poniżej 3 μm) obejmował 6,35% dla stali 1.4301 i 5,21% dla stali 1.4828 (tablica 6.19). Natomiast biorąc pod uwagę cząstki pyłu o średnicy poniżej 10 μm ich udział objętościowy był większy o 0,5% w przypadku spawania stali 1.4828 - wyniósł on 20,96%.

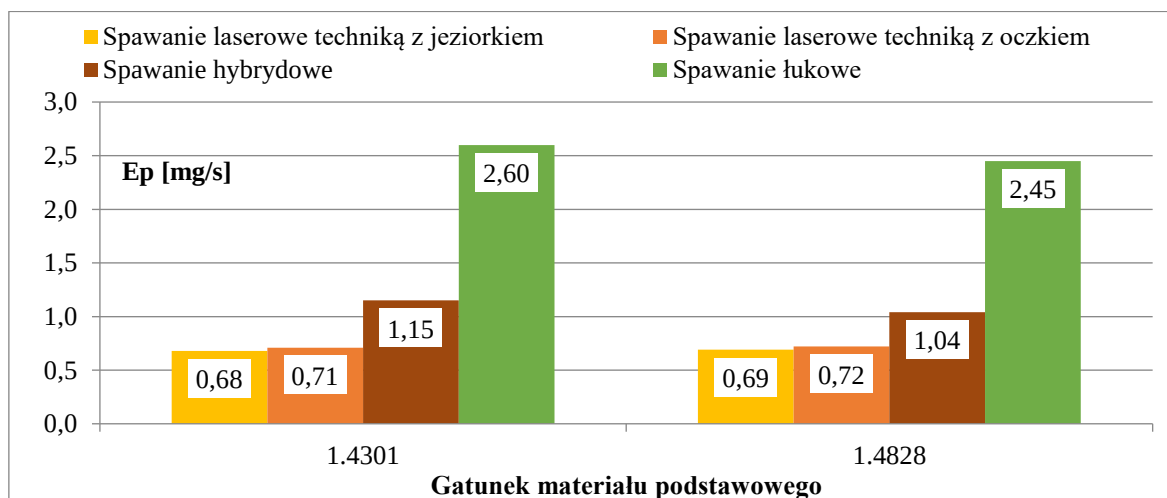
Dla próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego stali 1.4828 wykazano większą ilość cząstek dla całego analizowanego zakresu średnic. Różnice pomiędzy badanymi gatunkami stali zawierały się w przedziale od 0,14 do 0,25% (rys. 7.7 b).

Odsetek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego należący do frakcji respirabilnej wyniósł 3,13% dla stali 1.4301 i 3,71% dla stali 1.4828 (tablica 6.19). Natomiast cząstki pyłu o średnicy poniżej 10 μm wyniosły dla stali 1.4301 15,7%, ich ilość była o 2% mniejsza niż w przypadku spawania stali 1.4828 – 17,72% (tablica 6.19).

Uzyskane wyniki wykazały większy udział objętościowy cząstek o średnicy aerodynamicznej poniżej 10 μm podczas spawania zarówno laserowego i hybrydowego jak i łukowego dla stali 1.4828 w stosunku do stali 1.4301 (tablica 6.19).

7.3. Wpływ procesów spawania laserowego, hybrydowego i łukowego w aspekcie oddziaływania zanieczyszczeń pyłowych na środowisko pracy i organizm człowieka

Wpływ procesów spawania stali 1.4301 i 1.4828 na wielkość emisji pyłu przedstawiono na rysunku 7.8. Na wykresie zamieszczono dane dla energii liniowej wynoszącej 0,54 kJ/mm.



Rys. 7.8. Wpływ metody spawania stali 1.4301 i 1.4828 na wielkość emisji pyłu

Analiza danych wykazała, że najmniejsza emisja pyłu wystąpiła podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem (0,68 mg/s dla stali 1.4301 i 0,69 mg/s dla stali 1.4828) oraz z oczkiem (0,71 mg/s dla stali 1.4301 i 0,72 mg/s dla stali 1.4828). W przypadku spawania hybrydowego emisja pyłu była na poziomie 1,04 mg/s podczas spawania stali 1.4828 i 1,15 mg/s dla stali 1.4301. Stwierdzono, że w porównaniu do spawania laserowego, emisja pyłu podczas spawania hybrydowego stali 1.4301 była większa o blisko 65%, a dla stali 1.4828 o 50% (tablica 7.3). Największą emisją pyłu charakteryzowała się metoda

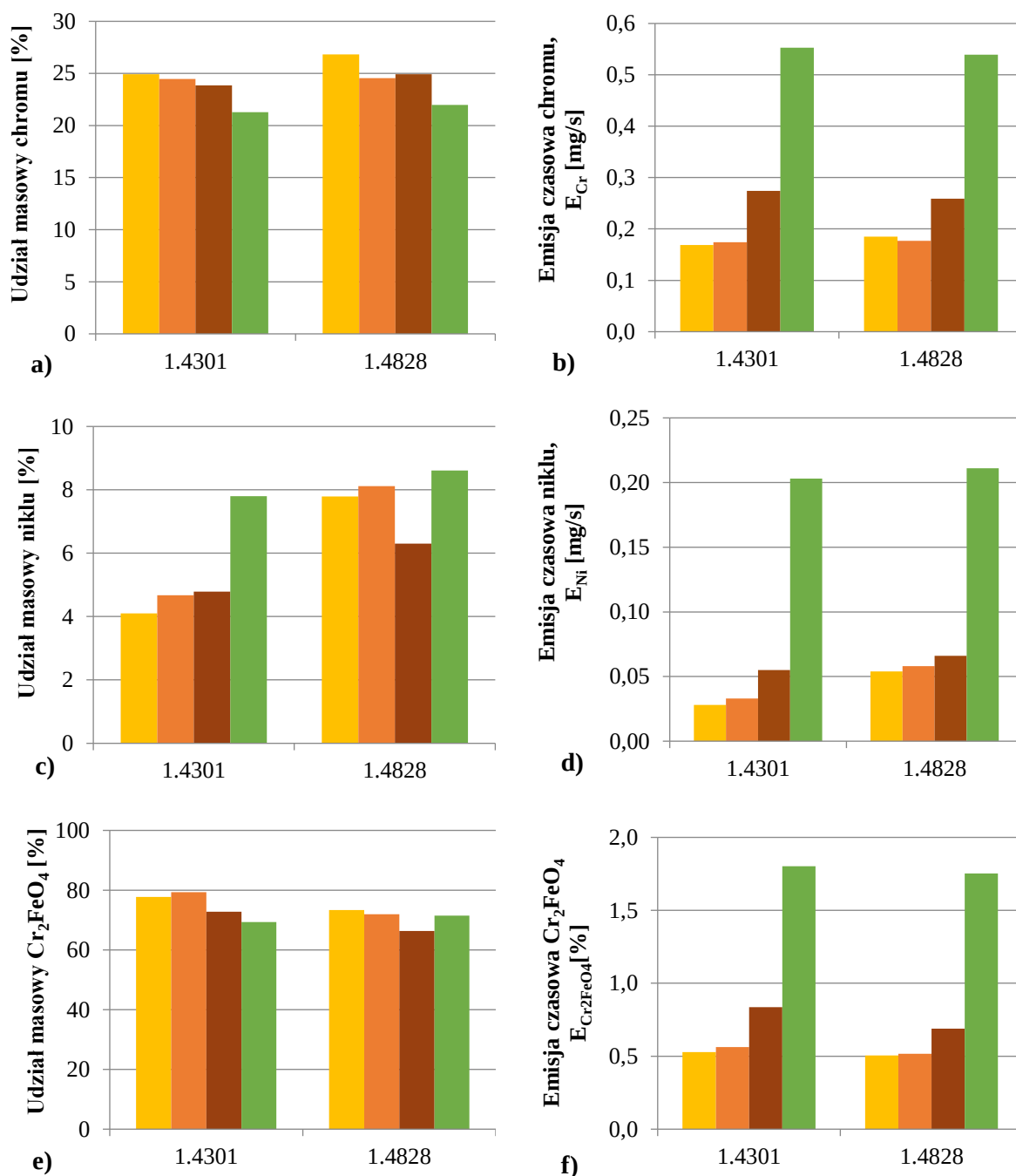
spawania łukowego. Emisja wyniosła 2,60 mg/s dla stali 1.4301 i odpowiednio dla stali 1.4828 - 2,45 mg/s. Była ona 3,5-razy większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa niż podczas spawania hybrydowego (tablica 7.3).

Oddziaływanie procesów spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali 1.4301 i 1.4828 na zawartość chromu, niklu oraz tlenku chromu(III) żelaza(II) pokazano na rysunku 7.9. Przedstawiono dane dla energii liniowej wynoszącej 0,54 kJ/mm.

Analizując udział masowy chromu w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4301 i 1.4828 największą zawartość oznaczono podczas spawania laserowego techniką jeziorkiem (odpowiednio 24,9% i 26,8%). Z kolei najmniejszą zawartością chromu w pyłe charakteryzowało się spawanie łukowe – dla stali 1.4301 udział masowy wyniósł 21,3%, a dla stali 1.4828 – 22,0% (rys. 7.9 a). Biorąc jednak pod uwagę emisję czasową chromu, najmniejszą stwierdzono dla procesów spawania laserowego techniką z oczkiem i jeziorkiem, natomiast największą emisją charakteryzowało się spawanie łukowe. Emisja chromu podczas spawania łukowego była ponad trzykrotnie większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa w porównaniu do spawania hybrydowego (rys. 7.9 b).

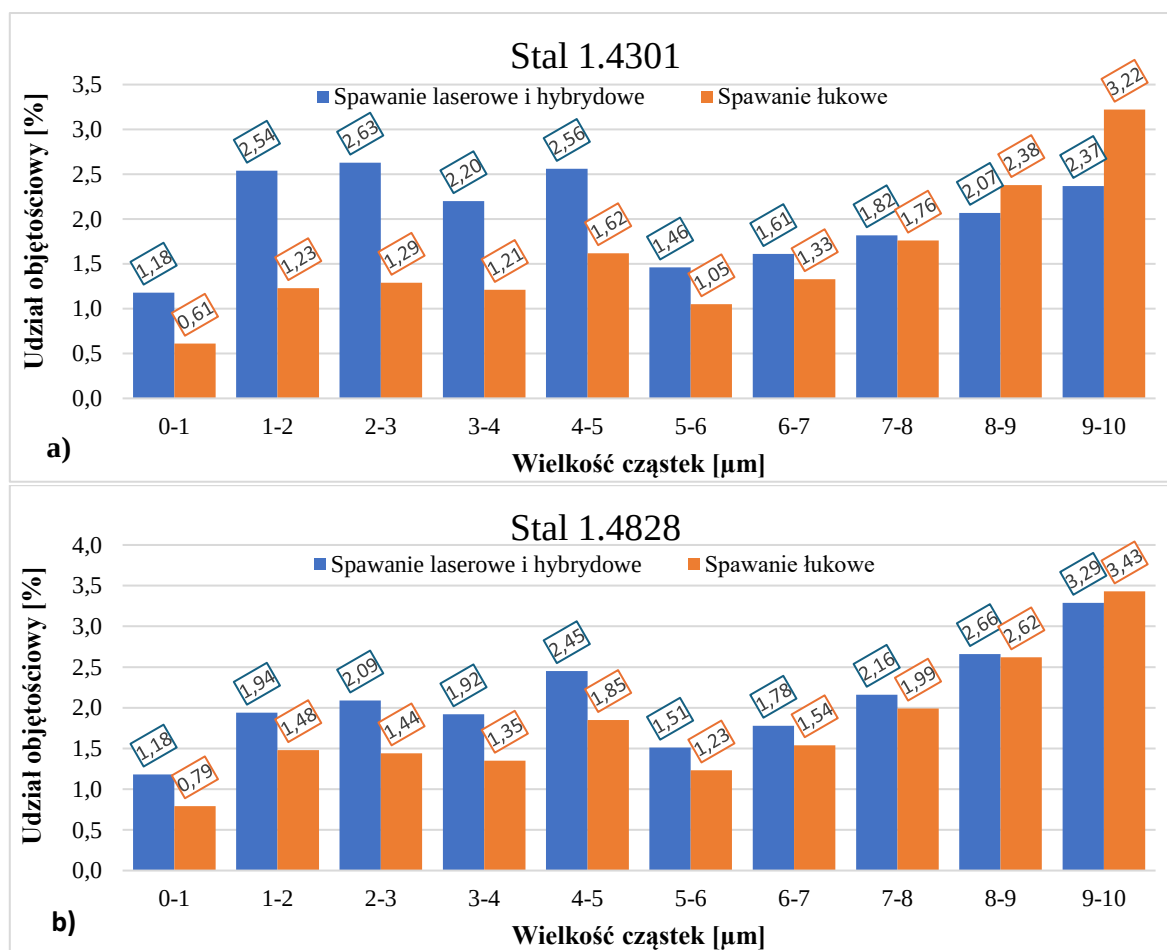
Wyniki badań udziału masowego i emisji czasowej niklu wskazują, że najwięcej niklu ujawniono dla spawania łukowego (rys. 7.9 c, d). Emisja niklu dla obu gatunków stali była zbliżona. Była ona blisko 10-krotnie większa niż podczas spawania laserowego stali 1.4301 i 4-krotnie większa niż podczas spawania laserowego stali 1.4828. Spawanie hybrydowe stali 1.4301 charakteryzowało się 4-krotnie mniejszą emisją Ni w stosunku do spawania łukowego, a w przypadku stali 1.4828 ta różnica była trzykrotna (rys. 7.9 d).

Ocena zawartości tlenku chromu(III) żelaza(II) w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4301 wykazała, że największą wartość uzyskano podczas spawania laserowego techniką z oczkiem (79,3%), a najmniejszą dla spawania łukowego – 69,3%. Natomiast w pyłe pochodzącym ze spawania stali 1.4828 największy udział masowy stwierdzono podczas spawania laserowego techniką z jeziorkiem – 73,3%. Z kolei najmniejszą zawartością Cr_2FeO_4 w pyłe charakteryzowało się spawanie hybrydowe – 66,3% (rys. 7.9 e). Analizując emisję czasową głównego składnika fazowego, podobnie jak w przypadku emisji chromu i niklu, najmniejszą stwierdzono dla procesów spawania laserowego techniką z oczkiem i jeziorkiem, natomiast największą emisją charakteryzowało się spawanie łukowe. Emisja Cr_2FeO_4 podczas spawania łukowego była ponad trzykrotnie większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa w porównaniu do spawania hybrydowego (rys. 7.9 f).



Rys. 7.9. Wpływ metody spawania stali 1.4301 i 1.4828 na udział masowy i wielkość emisji: a), b) chromu, c), d) niklu, e), f) tlenku chromu(III) żelaza(II) (gdzie: ■ - spawanie laserowe techniką z jeziorkiem, ■ - spawanie laserowe techniką z oczkiem, ■ - spawanie hybrydowe, ■ - spawanie łukowe)

Wpływ metody spawania na morfologię pyłu obejmował porównanie procentowego udziału cząstek o średnicy aerodynamicznej poniżej $10\ \mu m$ w całkowitej objętości próbki pyłu pochodzącego ze spawania laserowego + hybrydowego i łukowego (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Rozkład wielkości cząstek pyłu powstającego podczas spawania stali: a) 1.4301, b) 1.4828 charakteryzowanych przez średnicę aerodynamiczną w zależności od metody spawania dla energii liniowej spawania wynoszącej 0,54 kJ/mm

Większy udział objętościowy cząstek o średnicy poniżej 10 μm ujawniono podczas spawania laserowego i hybrydowego w porównaniu do spawania łukowego. Różnice te wykazano dla obu gatunków stali: 1.4301 i 1.4828 (tablica 6.19). W przypadku stali 1.4301 różnica wyniosła blisko 5% (20,45% dla spawania laserowego i hybrydowego; 15,70% dla spawania łukowego) (tablica 6.19; rys. 7.10 a). Dla stali 1.4828 odsetek cząstek pyłu o średnicy poniżej 10 μm wyniósł dla spawania laserowego + hybrydowego 20,96% i był o 3% większy niż w przypadku spawania łukowego – 17,72% (tablica 6.19; rys. 7.10 b).

W próbkach pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego zaobserwowano również większą ilość pyłu należącego do frakcji respirabilnej (cząstki o średnicy poniżej 3 μm). Udział objętościowy pyłu pochodzącego ze spawania laserowego i hybrydowego stali 1.4301 wyniósł 6,35% i był dwukrotnie większy niż w przypadku spawania łukowego - 3,13% (tablica 6.19). Z kolei dla stali 1.4828 udział objętościowy pyłu należącego do frakcji respirabilnej był na poziomie 5,21% dla spawania laserowego + hybrydowego i 3,71% dla spawania łukowego (tablica 6.19).

8. Wytyczne i zalecenia w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję

Pracodawca zobowiązany jest przeprowadzać na stanowisku pracy badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 02.02.2011 r. stanowiącego załącznik do Obwieszczenia Ministra Zdrowia z dnia 06.02.2023 r. (Dz. U. 2023 poz. 419). Do najważniejszych informacji dotyczących wykonywania badań czynników szkodliwych dla zdrowia odnoszących się do emisji pyłu spawalniczego należą:

Zgodnie z § 2. 1. Pracodawca wskazuje czynniki szkodliwe dla zdrowia w środowisku pracy, dla których wykonuje się badania i pomiary, po przeprowadzeniu rozpoznania źródeł ich emisji oraz warunków wykonywania pracy, które mają wpływ na poziom stężeń lub natężeń tych czynników lub na poziom narażenia na oddziaływanie tych czynników (...).

2. Pracodawca konsultuje z pracownikami lub ich przedstawicielami, w trybie przyjętym u danego pracodawcy, działania dotyczące:

- 1) rozpoznania i typowania czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy;
- 2) wykonywania badań, pomiarów i pobierania próbek tych czynników na stanowisku pracy.

§ 3. Pracodawca zapewnia wykonanie badań i pomiarów czynnika szkodliwego dla zdrowia w środowisku pracy, nie później niż w terminie 30 dni od dnia rozpoczęcia działalności.

§ 4. W przypadku występowania szkodliwego dla zdrowia czynnika chemicznego lub pyłu, z wyjątkiem czynnika o działaniu rakotwórczym lub mutagennym, badania i pomiary wykonuje się:

- 1) co najmniej raz na dwa lata – jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono stężenie czynnika szkodliwego dla zdrowia powyżej 0,1 do 0,5 wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS), określonego w przepisach wydanych na podstawie art. 228 § 3 ustawy z dnia 26 czerwca 1974 r. – Kodeks pracy, zwanego dalej „NDS”;
- 2) co najmniej raz w roku – jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono stężenie czynnika szkodliwego dla zdrowia powyżej 0,5 wartości NDS.

§ 6. 1. W przypadku występowania czynnika o działaniu rakotwórczym lub mutagennym, o którym mowa w przepisach wydanych na podstawie art. 222 § 3 ustawy z dnia 26 czerwca 1974 r. – Kodeks pracy, badania i pomiary wykonuje się:

- 1) co najmniej raz na sześć miesięcy – jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono stężenie czynnika o działaniu rakotwórczym lub mutagennym powyżej 0,1 do 0,5 wartości NDS;

2) co najmniej raz na trzy miesiące – jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono stężenie czynnika o działaniu rakotwórczym lub mutagennym powyżej 0,5 wartości NDS.

§ 7. Jeżeli wyniki dwóch ostatnich badań i pomiarów szkodliwych dla zdrowia czynników chemicznych lub pyłów, o których mowa w § 4, wykonanych w odstępie co najmniej dwóch lat, a w przypadku czynników o działaniu rakotwórczym lub mutagennym, o których mowa w § 6 – co najmniej sześciu miesięcy, nie przekroczyły 0,1 wartości NDS, pracodawca może odstąpić od wykonywania badań i pomiarów.

14 czerwca 2024 r. opublikowana została nowelizacja Ustawy z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy [123]. Rozszerzono w niej obowiązek pracodawcy dotyczący rejestracji wszystkich rodzajów prac, w których występuje kontakt z substancjami chemicznymi, ich mieszaninami, czynnikami lub procesami technologicznymi o działaniu rakotwórczym i mutagennym o substancje o działaniu reprotoksycznym, a także o konieczności prowadzenia rejestru pracowników zatrudnionych przy tych pracach [123]. Działanie reprotoksyczne oznacza niekorzystny wpływ na funkcje seksualne i płodność u dorosłych mężczyzn i kobiet. Do substancji o działaniu reprotoksycznym zalicza się m.in. związki metali takich jak: ołów, kadm, chrom, nikiel [123].

Odniesienie do NDS (Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń) dla tych substancji istotne jest nie tylko w trakcie wykonywania badań środowiskowych ale również podczas projektowania systemów wentylacyjnych. Na podstawie Rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (Dz.U. 2018 poz. 1286) w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, w tablicy 2.7 (rozdział 2.4.2) podano wartości NDS dla substancji odnoszących się do emisji pyłu pochodzącego ze spawania stali odpornych na korozję. W celu dotrzymania wartości NDS konieczna jest znajomość wielkości emisji pyłu oraz jego składu chemicznego.

Istotnym elementem zapewnienia jakości w spawalnictwie jest kwalifikowanie technologii spawania. Proces kwalifikowania zgodnie z normą PN-EN ISO 15614 (Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali - Badanie technologii spawania) umożliwia wykazanie, że opracowany dla konstrukcji proces łączenia nadaje się do wykonania złączy spełniających zakładane własności mechaniczne dla planowanego zastosowania. Brak jest tam jednak informacji na temat warunków środowiskowych i BHP podczas prowadzenia procesu spawania. Na podstawie uzyskanych wyników badań proponuje się więc umieszczenie w Protokole kwalifikowania technologii spawania – *WPQR (Welding Procedure Qualification Record)* informacji dotyczących wielkości emisji pyłu w powiązaniu z parametrami technologicznymi spawania. Najistotniejsza z punktu widzenia zdrowia

i bezpieczeństwa pracownika podczas spawania stali odpornych na korozję jest informacja o wielkości emisji pyłu, zawartości chromu, chromu(VI) i niklu.

Dane te dostępne są w internetowym systemie doradczym i-EkoSpawanie znajdującym się na stronie internetowej Centrum Spawalnictwa Ł-GIT i zawierającym wskaźniki emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych oraz skład chemiczny powstającego pyłu. Jest to istotne gdyż na podstawie *WPQR* opracowywana jest Instrukcja Technologiczna Spawania (*WPS – Welding Procedure Specification*), która przekazywana jest spawaczom i/lub operatorom i jest podstawą do wykonywania złączy. Uzupełnienie tych informacji pozwoli uświadomić inżynierom technologom aspekty związane ze zdrowiem i bezpieczeństwem spawaczy oraz pracowników pracujących w pobliżu stanowisk spawalniczych.

Na podstawie wyników prowadzonych badań, w tablicach 8.2. i 8.3, przedstawiono zestawy parametrów technologicznych spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję, dla których uzyskano poziom jakości B według norm: PN-EN ISO 13919 - 1 dla spawania laserowego i PN-EN ISO 12932 dla spawania hybrydowego [143-144], podano również energię liniową procesu, wielkość emisji pyłu, a także, z uwagi na kancerogenne i reprotoksyczne działanie chromu i niklu na organizm człowieka, dane dla tych pierwiastków.

Tablica 8.2. Zestawienie parametrów technologicznych spawania stali 1.4301, przy których spełnione zostały wymagania poziomu jakości B

Spawanie laserowe stali 1.4301 – technika z oczkiem														
P [W]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄				
				[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]			
4500	0,5	0,54	0,71	24,5	0,174	0,023	0,00016	4,7	0,033	79,7	0,563			
4500	1,0	0,27	0,46	21,5	0,099	0,036	0,00017	5,1	0,024	75,3	0,346			
4500	1,5	0,18	0,42	21,6	0,091	0,005	0,00002	5,1	0,021	75,1	0,315			
6500	1,0	0,39	0,48	23,8	0,114	0,110	0,00053	4,9	0,023	72,7	0,349			
6500	1,5	0,26	0,44	22,2	0,098	0,076	0,00033	5,2	0,023	79,6	0,350			
Spawanie laserowe stali 1.4301 – technika z jeziorkiem														
P [W]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄				
				[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]			
2500	0,5	0,30	0,45	25,2	0,113	0,110	0,00050	4,4	0,020	78,4	0,353			
2500	1,0	0,15	0,32	24,0	0,077	0,053	0,00017	4,2	0,013	76,3	0,244			
4500	0,5	0,54	0,68	24,9	0,169	0,049	0,00033	4,1	0,028	77,7	0,528			
4500	1,0	0,27	0,40	24,3	0,097	0,120	0,00048	3,7	0,015	79,9	0,320			
4500	1,5	0,18	0,38	20,6	0,078	0,180	0,00068	3,7	0,014	80,7	0,307			
Spawanie hybrydowe stali 1.4301														
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄	
							[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]
2500	250	28	8,5	1,0	0,57	1,17	23,4	0,274	0,001	0,00001	5,1	0,060	78,0	0,913
4500	250	28	8,5	0,8	0,86	1,46	23,4	0,341	0,005	0,00007	5,0	0,074	71,9	1,050
4500	250	28	8,5	1,0	0,69	1,25	23,9	0,299	0,003	0,00004	4,3	0,054	79,7	0,996
4500	250	28	8,5	1,5	0,46	1,04	22,9	0,238	0,002	0,00002	5,8	0,060	76,7	0,798
6500	250	28	8,5	0,8	1,01	1,51	23,6	0,356	0,001	0,00002	4,5	0,068	74,3	1,122
6500	250	28	8,5	1,0	0,81	1,39	24,0	0,334	0,001	0,00001	4,4	0,061	67,7	0,941
6500	250	28	8,5	1,5	0,54	1,15	23,9	0,274	0,001	0,00001	4,8	0,055	72,8	0,837
4500	200	25	6,5	1,0	0,57	1,01	23,0	0,232	0,002	0,00002	5,3	0,053	74,4	0,751
4500	300	30	10,5	1,0	0,81	1,41	23,8	0,336	0,001	0,00001	4,7	0,067	71,4	1,007

Tablica 8.3. Zestawienie parametrów technologicznych spawania stali 1.4828, przy których spełnione zostały wymagania poziomu jakości B

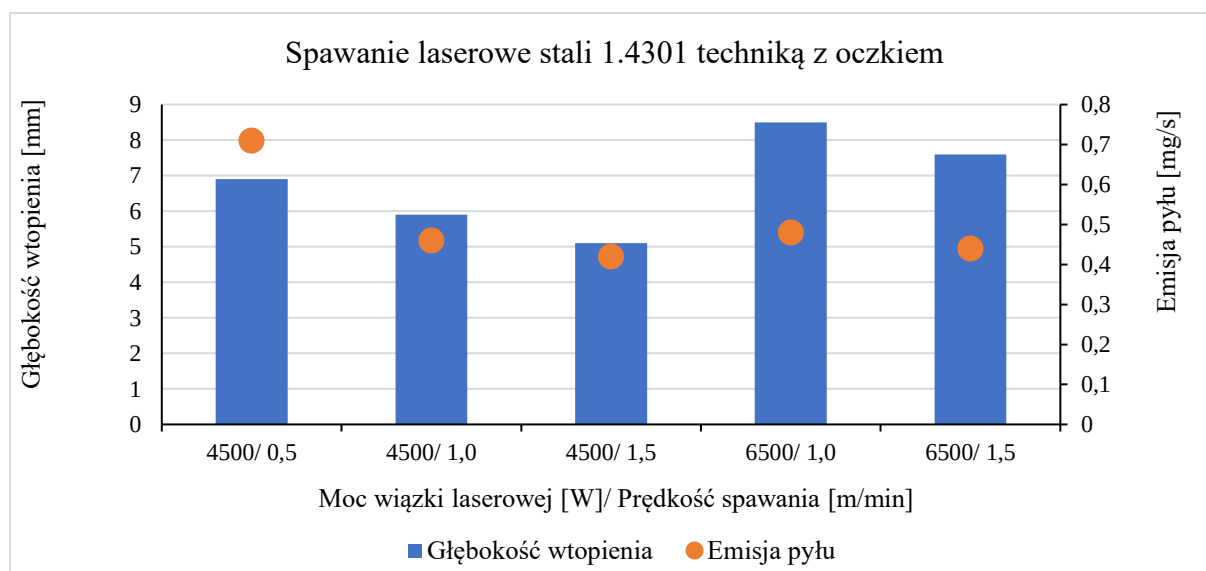
Spawanie laserowe stali 1.4828 – technika z oczkiem														
P [W]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄				
				[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]			
4500	0,5	0,54	0,72	24,6	0,177	0,069	0,00050	8,1	0,058	71,9	0,518			
4500	1,0	0,27	0,55	23,4	0,129	0,061	0,00034	8,3	0,046	78,8	0,433			
4500	1,5	0,18	0,47	23,6	0,111	0,035	0,00016	8,2	0,039	74,8	0,352			
6500	1,5	0,26	0,49	24,3	0,119	0,069	0,00033	7,7	0,038	72,7	0,356			
Spawanie laserowe stali 1.4828 – technika z jeziorkiem														
P [W]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄				
				[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]			
2500	0,5	0,30	0,47	25,2	0,118	0,071	0,00033	7,6	0,036	81,8	0,384			
2500	1,0	0,15	0,39	25,4	0,099	0,043	0,00017	8,3	0,032	73,5	0,287			
4500	0,5	0,54	0,69	26,8	0,185	0,073	0,00050	7,8	0,054	73,3	0,506			
4500	1,0	0,27	0,51	27,6	0,141	0,098	0,00050	6,7	0,034	74,5	0,380			
4500	1,5	0,18	0,41	27,7	0,114	0,082	0,00034	6,6	0,027	79,8	0,327			
Spawanie hybrydowe stali 1.4828														
P [W]	I [A]	U [V]	V _{dr} [m/min]	V _{sp} [m/min]	El [kJ/mm]	Ep [mg/s]	Cr		Cr(VI)		Ni		Cr ₂ FeO ₄	
							[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]	[%]	[mg/s]
2500	250	28	8,5	1,0	0,57	1,06	23,6	0,250	0,002	0,00002	6,4	0,068	64,5	0,684
4500	250	28	8,5	1,0	0,69	1,12	24,5	0,274	0,001	0,00001	5,9	0,066	69,0	0,773
4500	250	28	8,5	1,5	0,46	0,90	22,9	0,206	0,011	0,00010	7,1	0,063	69,3	0,624
6500	250	28	8,5	0,8	1,01	1,40	25,3	0,354	0,001	0,00001	7,3	0,102	69,1	0,967
6500	250	28	8,5	1,0	0,81	1,21	26,2	0,317	0,016	0,00019	7,9	0,095	64,0	0,774
6500	250	28	8,5	1,5	0,54	1,04	24,9	0,259	0,002	0,00002	6,3	0,066	66,4	0,690
4500	200	25	6,5	1,0	0,57	0,88	23,2	0,205	0,002	0,00002	7,1	0,062	67,5	0,594
4500	300	30	10,5	1,0	0,81	1,29	23,7	0,306	0,001	0,00001	7,4	0,095	67,6	0,872

Uzyskane wyniki potwierdziły, że wzrost energii liniowej procesu powoduje zwiększenie emisji pyłu spawalniczego. Wykazano również wpływ parametrów technologicznych procesu spawania laserowego i hybrydowego, tj. mocy wiązki laserowej i prędkości spawania, a w przypadku spawania hybrydowego również prędkości podawania drutu. Stwierdzono, że:

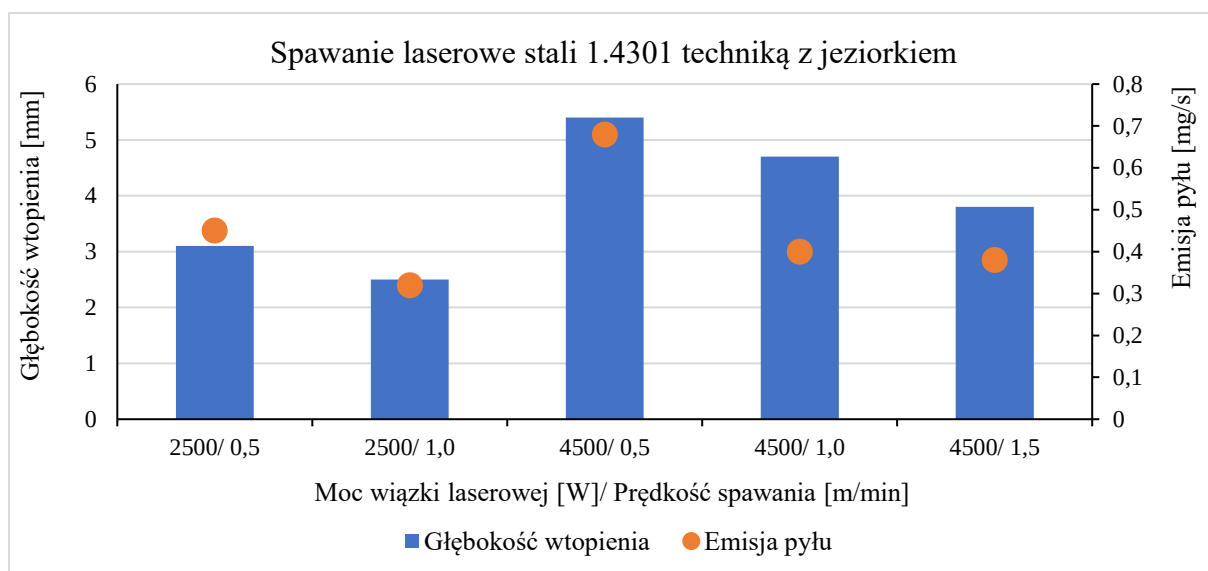
- wraz ze wzrostem wartości mocy wiązki laserowej wzrasta wielkość emisji pyłu całkowitego.
- wzrost prędkości spawania powoduje zmniejszenie emisji pyłu całkowitego.
- wzrost prędkości podawania drutu podczas spawania hybrydowego powoduje zwiększenie emisji pyłu całkowitego.

Przyjmując jako kryteria uzyskanie połączenia spełniającego wymagania poziomu jakości B oraz redukcję emisji pyłu, opracowano wytyczne i zalecenia w aspekcie zdrowia i bezpieczeństwa pracowników dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.

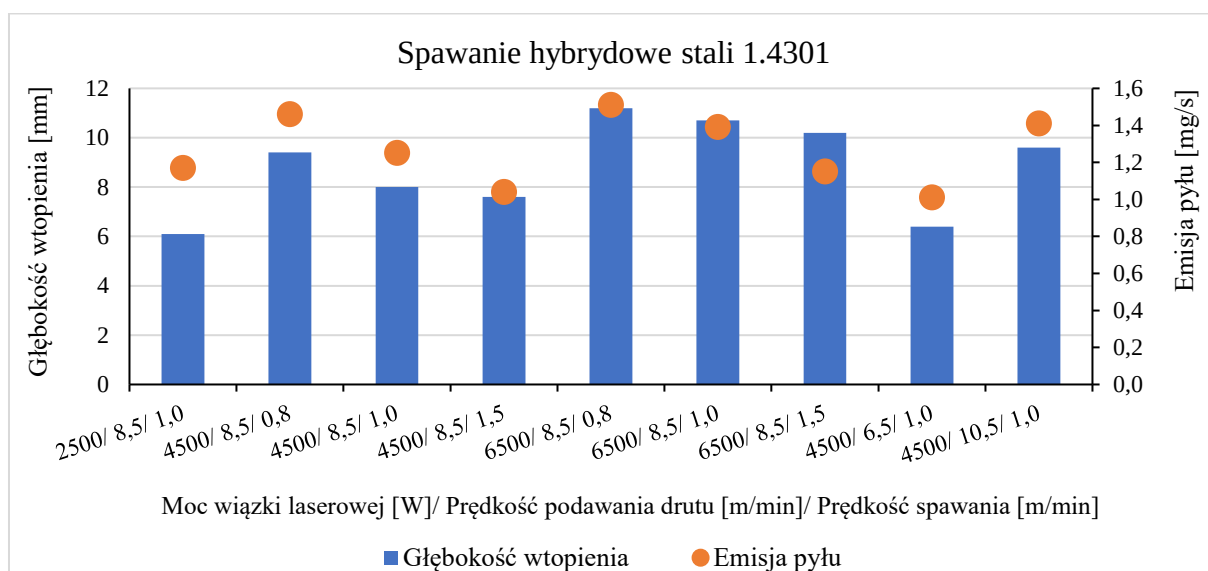
Zestawienia pozwalające na dobór parametrów z uwzględnieniem kryterium głębokości wtopienia i wielkości emisji pyłu pokazano na rysunkach 8.1-8.6. Stanowią one wytyczne dla inżynierów, spawalników i konstruktów odnośnie doboru parametrów technologicznych spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję.



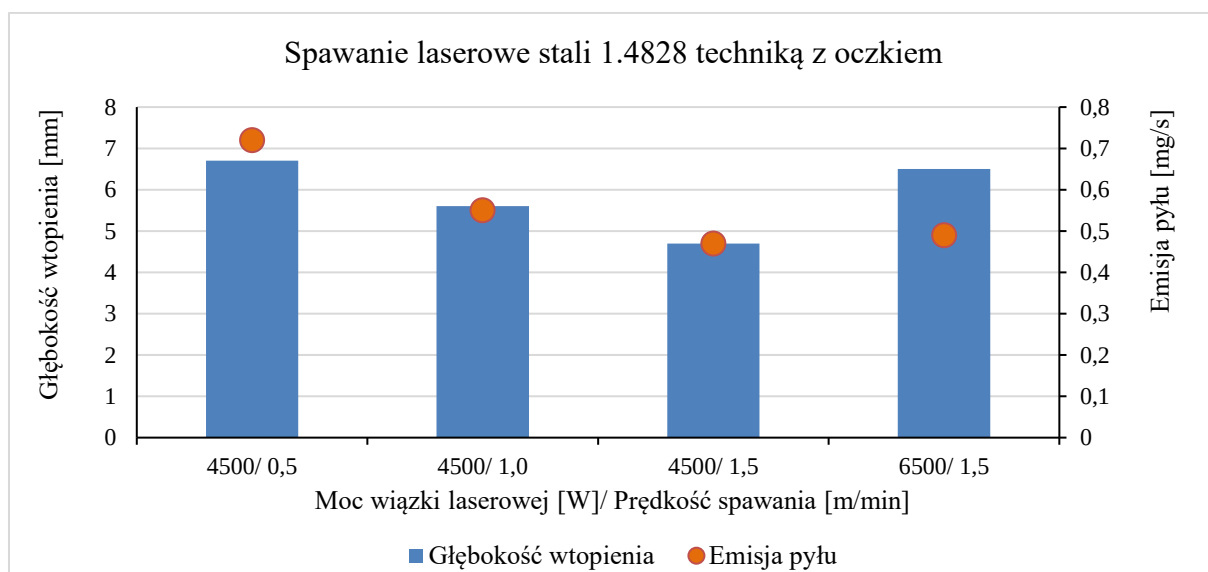
Rys. 8.1. Zestawienie dla spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4301



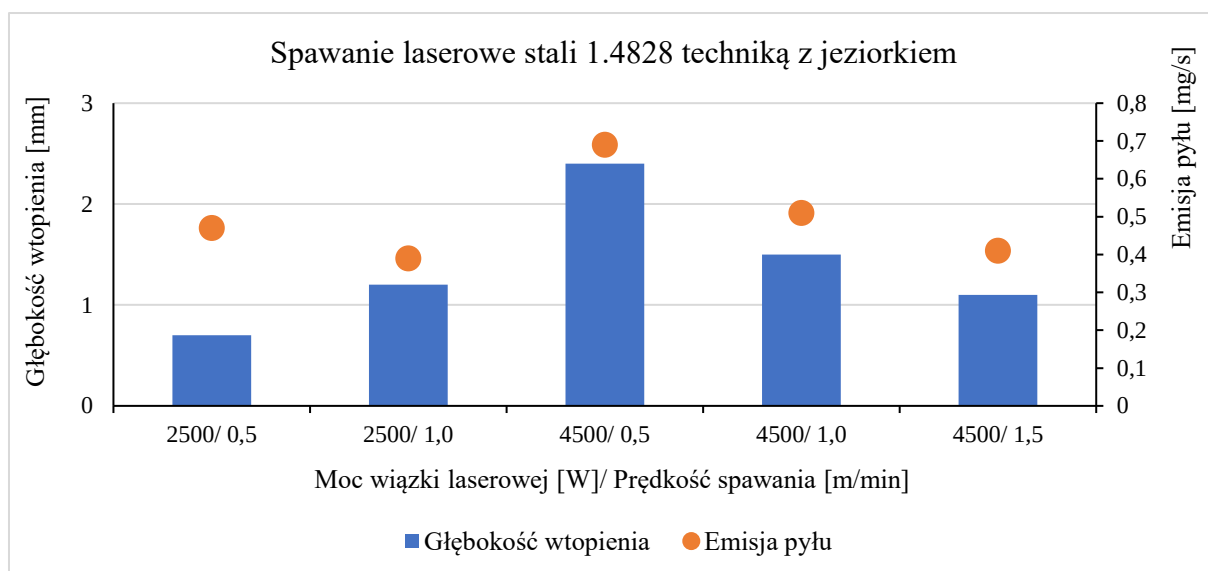
Rys. 8.2. Zestawienie dla spawania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4301



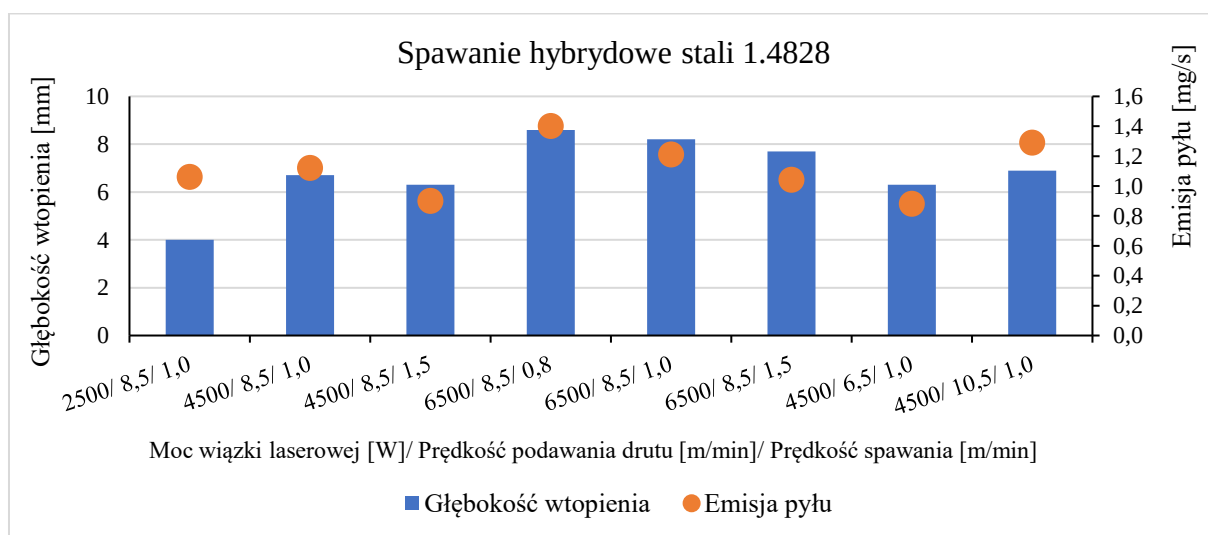
Rys. 8.3. Zestawienie dla spawania hybrydowego stali 1.4301



Rys. 8.4. Zestawienie dla spawania laserowego techniką z oczkiem stali 1.4828



Rys. 8.5. Zestawienie dla spawania laserowego techniką z jeziorkiem stali 1.4828



Rys. 8.6. Zestawienie dla spawania hybrydowego stali 1.4828

Najkorzystniejsze zestawy parametrów technologicznych pozwalające na uzyskanie możliwie najmniejszej emisji pyłu i największej głębokości wtopienia:

Spawanie laserowe techniką z oczkiem stali 1.4301

Spawanie parametrami: moc wiązki laserowej 6500 W, prędkość spawania 1,0 m/min pozwala na uzyskanie głębokości wtopienia 8,5 mm, a emisja pyłu wynosi 0,48 mg/s.

Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem stali 1.4301

Dla mocy wiązki laserowej 4500 W i prędkości spawania 1,0 m/min uzyskuje się głębokość wtopienia 4,7 mm, co związane jest z emisją pyłu na poziomie 0,40 mg/s.

Spawanie hybrydowe stali 1.4301

Najkorzystniejsze z punktu widzenia redukcji pyłu okazały się następujące zestawy parametrów:

- $P=4500\text{ W}$; $V_{dr}=8,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,5\text{ m/min}$ – dla tego zestawu parametrów głębokość wtopienia była na poziomie 7,6 mm, a emisja pyłu wyniosła 1,04 mg/s;
- $P=6500\text{ W}$; $V_{dr}=8,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,5\text{ m/min}$ – dla tego zestawu parametrów osiągnięto głębokość wtopienia równą 10,2 mm, a emisja pyłu była na równą 1,15 mg/s.

Spawanie laserowe techniką z oczkiem stali 1.4828

Dla mocy wiązki laserowej 6500 W i prędkości spawania 1,5 m/min uzyskano głębokość wtopienia 6,5 mm oraz emisję pyłu równą 0,49 mg/s.

Spawanie laserowe techniką z jeziorkiem stali 1.4828

Następujące zestawy parametrów charakteryzowały się najmniejszą emisją pyłu przy uzyskaniu zbliżonych głębokości wtopienia:

- Dla mocy wiązki laserowej 2500 W i prędkości spawania 1,0 m/min uzyskuje się głębokość wtopienia 1,2 mm, co związane jest z emisją pyłu na poziomie 0,39 mg/s.
- Podczas spawania z prędkością 1,5 m/min wiązką o mocy 4500 W osiągnięto głębokość wtopienia 1,1 mm i emisję 0,41 mg/s. Ten zestaw jest bardziej wskazany, ponieważ pozwala na osiągnięcie większej wydajności.

Spawanie hybrydowe stali 1.4828

Najkorzystniejsze z punktu widzenia redukcji pyłu okazały się następujące zestawy parametrów pozwalające na uzyskanie głębokości wtopienia 6,3 mm:

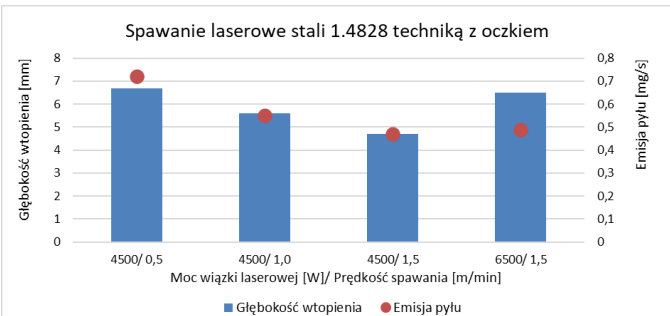
- $P=4500\text{ W}$; $V_{dr}=8,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,5\text{ m/min}$ – emisja pyłu wyniosła 0,90 mg/s;
- $P=4500\text{ W}$; $V_{dr}=6,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,0\text{ m/min}$ – emisja pyłu była na poziomie 0,88 mg/s.

W przypadku konieczności uzyskania większych głębokości wtopienia zalecane jest spawanie następującymi parametrami:

- $P=6500\text{ W}$; $V_{dr}=8,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,0\text{ m/min}$ – uzyskano głębokość wtopienia na poziomie 8,2 mm, a emisja pyłu wyniosła 1,21 mg/s;
- $P=6500\text{ W}$; $V_{dr}=8,5\text{ m/min}$; $V_{sp}=1,5\text{ m/min}$ – głębokość wtopienia wynosiła 7,7 mm, a emisja pyłu była na poziomie 1,04 mg/s.

W tablicach 8.4 i 8.5 przedstawiono przykładowe Instrukcje Technologiczne Spawania (WPS) dla spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję uzupełnione o informacje dotyczące charakterystyki pyłu spawalniczego.

Tablica 8.4. Instrukcja technologiczna spawania laserowego stali 1.4828

Instrukcja technologiczna spawania Welding Procedure Specification wg / acc. to PN-EN ISO 15609-4:2009		WPS																				
		Strona/stron: 1/1 Page/Pages:																				
1. pWPS Wytwórcy Nr: LBW/1/2024 Manufacturer's pWPS No.:	2. WPQR Nr: WPQR/SR/LBW/01/2024 WPQR No.:																					
3. Wytwórca: Sieć Badawcza Łukasiewicz – GIT Manufacturer: Centrum Spawalnictwa	4. Proces spawania / Welding Process: spawanie laserowe (521) laser welding wg / acc. to PN-EN ISO 4063:2011																					
5. Identyfikacja urządzenia / Equipment identification: TruRobot Station 5020 Źródło laserowe i rodzaj urządzenia / Laser Source and Beam Implant System: Trudisk 12002 Jakość wiązki / Beam Quality (K, m ² lub/or BPP): 8 BPP Polaryzacja wiązki / Beam Polarisation: liniowa System transmisji wiązki / Beam DeliverySystem: światłowod 300 μm System ogniskowania wiązki / Beam Focusing System: Kolimator: φ 200 mm, Soczewka ogniskująca φ 400 mm System podawania gazu osłonowego / Plasma Shielding Gas System: dysza gazowa																						
6. Specyfikacja materiału podstawowego / Parent Material Specification: stal 1.4828																						
7. Grubość materiału/ Material Thickness (mm): 6 + 6 mm																						
8. Gaz osłonowy / Shielding Gas Rodzaj i oznaczenie /Classification and Type Natężenie przepływu / Flow Rate (l/min)		11 Ar 16																				
9. Rodzaj złącza / Joint type: złącze doczołowe ze spoiną czolową		wg/acc. to PN-EN ISO 17659:2008																				
10. Rodzaj spoiny/ Type of Weld czolowa/ Butt weld		Spoina/ Welding Pass																				
11. Pozycja spawania / Welding Position		PA																				
12. Technika spawania / Welding Technique		Z oczkiem																				
13. Moc wiązki na powierzchni materiału Beam Power at Workpiece	Tryb pracy ciągły /Continuous (W) Kształt/Shape Średnica/ Diameter (mm)	4500 Kołowa 0,6																				
14. Kąt orientacji wiązki Beam Orientation Angle		Prostopadle do powierzchni blach / Transverse																				
15. Prędkość spawania/ Travel Speed (m/min)		1,5																				
16. Informacje dot. emisji pyłu/ Data concerning fume emission Wielkość emisji pyłu/ Fume emission rate (mg/s)		0,47																				
Spawanie laserowe stali 1.4828 techniką z oczkiem <table border="1"><thead><tr><th>Moc wiązki laserowej [W]</th><th>Prędkość spawania [m/min]</th><th>Głębokość wtopienia [mm]</th><th>Emisja pyłu [mg/s]</th></tr></thead><tbody><tr><td>4500</td><td>0,5</td><td>6,8</td><td>0,72</td></tr><tr><td>4500</td><td>1,0</td><td>5,8</td><td>0,58</td></tr><tr><td>4500</td><td>1,5</td><td>4,8</td><td>0,48</td></tr><tr><td>6500</td><td>1,5</td><td>6,5</td><td>0,52</td></tr></tbody></table>		Moc wiązki laserowej [W]	Prędkość spawania [m/min]	Głębokość wtopienia [mm]	Emisja pyłu [mg/s]	4500	0,5	6,8	0,72	4500	1,0	5,8	0,58	4500	1,5	4,8	0,48	6500	1,5	6,5	0,52	Skład chemiczny pyłu - Udział masowy [%]
		Moc wiązki laserowej [W]	Prędkość spawania [m/min]	Głębokość wtopienia [mm]	Emisja pyłu [mg/s]																	
		4500	0,5	6,8	0,72																	
		4500	1,0	5,8	0,58																	
		4500	1,5	4,8	0,48																	
6500	1,5	6,5	0,52																			
Si	Cr	Cr(VI)	Mn	Fe	Ni																	
1,6	23,6	0,035	5,3	61,4	8,2																	
Udział składników fazowych w pyle [% mas.]																						
Cr ₂ FeO ₄		MnFe ₂ O ₄		NiFe ₂ O ₄																		
74,8		5,3		19,9																		
17. Opracowała/ Prepared by mgr inż. Joanna Wyciślik-Sośnierz		18. Egzaminator - imię i nazwisko/ Examiner - Name: dr inż. Michał Urbańczyk, IWE, IWI-C																				
Data i podpis: 26.02.2025 Date and Signature:		Data i podpis: 10.03.2025 Date and Signature:																				

Tablica 8.5. Instrukcja technologiczna spawania hybrydowego (HLAW) stali 1.4301

Instrukcja technologiczna spawania/ <i>Welding Procedure Specification</i>		WPS																															
wg / acc. to PN-EN ISO 15609-4:2009		Strona/stron Page/Pages.: 1/1																															
1. pWPS Wytwórca Nr/ <i>Manufacturer's pWPS No.</i> : HLAW/1/2024		2. WPQR Nr/ <i>WPQR No.</i> : WPQR/SR/HLAW/01/2024																															
3. Wytwórca: Sieć Badawcza Łukasiewicz – GIT <i>Manufacturer:</i> Centrum Spawalnictwa		4. Proces spawania / <i>Welding Process</i> : spawanie hybrydowe (521+131) hybrid welding (HLAW) wg / acc. to PN-EN ISO 4063:2011																															
5. Identyfikacja urządzenia / <i>Equipment identification</i> : TruRobot Station 5020 Źródło laserowe i rodzaj urządzenia / <i>Laser Source and Beam Implant System</i> : Trudisk 12002 Jakość wiązki / <i>Beam Quality</i> (K, m ² lub/or BPP): 8 BPP Polaryzacja wiązki / <i>Beam Polarisation</i> : liniowa System transmisji wiązki / <i>Beam Delivery System</i> : światłowód 300 μm System ogniskowania wiązki / <i>Beam Focusing System</i> : Kolimator: φ 200 mm, Soczewka ogniskująca φ 400 mm System podawania gazu osłonowego / <i>Plasma Shielding Gas System</i> : dysza gazowa uchwytu metody MIG Podajnik materiału dodatkowego / <i>Filler Material Feeding System</i> : KS-Arctec 03/10 – KS 2079																																	
6. Specyfikacja materiału podstawowego / <i>Parent Material Specification</i> : stal 1.4301																																	
7. Grubość materiału/ <i>Material Thickness</i> (mm): 6 + 6 mm																																	
8. Materiał dodatkowy lub inny materiał pomocniczy / <i>Filler or other additional material</i> : 309 LSi Oznaczenie/Designation: 308 LSi (EN ISO 14341-A – G 19 9 L Si) Wymiary/Dimensions (mm): Ø 1,2 Podawanie/Handling: podajnik rolkowy typu „push-pull” Odległość robocza /Working Distance (mm) 18																																	
9. Gaz osłonowy / <i>Shielding Gas</i> Rodzaj i oznaczenie /Classification and Type Natężenie przepływu / <i>Flow Rate</i> (l/min)		I1 Ar 16																															
10. Rodzaj złącza / <i>Joint type</i> : złącze doczołowe ze spoiną czółową		wg/acc. to PN-EN ISO 17659:2008																															
11. Rodzaj spoiny/ <i>Type of Weld</i> czółowa/ Butt weld		Spoina/ <i>Welding Pass</i>																															
12. Pozycja spawania / <i>Welding Position</i>		PA																															
13. Technika spawania / <i>Welding Technique</i>		A-L																															
14. Moc wiązki na powierzchni materiału <i>Beam Power at Workpiece</i>		Tryb pracy ciągły /Continuous (W) Kształt/Shape Średnica/ <i>Diameter</i> (mm)																															
15. Kąt orientacji wiązki <i>Beam Orientation Angle</i> Kąt ustawienia uchwytu MIG w stosunku do powierzchni blach Kąt pomiędzy osią wiązki i uchwytu MIG		Prostopadle do powierzchni blach / <i>Transverse</i> 65° 25°																															
16. Prędkość spawania/ <i>Travel Speed</i> (m/min)		1,5																															
17. Prędkość podawania drutu / <i>Wire Feed Rate</i> (m/min)		8,5																															
18. Odległość robocza (mm)/Working Distance (mm)		18																															
19. Informacje dot. emisji pyłu/ <i>Data concerning fume emission</i> Wielkość emisji pyłu/ <i>Fume emission rate</i> (mg/s)		1,04																															
Spawanie hybrydowe stali 1.4301 <table border="1"><thead><tr><th>Parametry</th><th>Głębokość wtopienia [mm]</th><th>Emisja pyłu [mg/s]</th></tr></thead><tbody><tr><td>2500/ 8,5/ 1,0</td><td>6,5</td><td>1,1</td></tr><tr><td>4500/ 8,5/ 0,8</td><td>9,5</td><td>1,4</td></tr><tr><td>4500/ 8,5/ 1,0</td><td>8,5</td><td>1,2</td></tr><tr><td>4500/ 8,5/ 1,5</td><td>7,5</td><td>1,0</td></tr><tr><td>6500/ 8,5/ 0,8</td><td>11,5</td><td>1,4</td></tr><tr><td>6500/ 8,5/ 1,0</td><td>10,5</td><td>1,2</td></tr><tr><td>6500/ 8,5/ 1,5</td><td>10,5</td><td>1,0</td></tr><tr><td>4500/ 6,5/ 1,0</td><td>6,5</td><td>0,8</td></tr><tr><td>4500/ 10,5/ 1,0</td><td>9,5</td><td>1,2</td></tr></tbody></table>		Parametry	Głębokość wtopienia [mm]	Emisja pyłu [mg/s]	2500/ 8,5/ 1,0	6,5	1,1	4500/ 8,5/ 0,8	9,5	1,4	4500/ 8,5/ 1,0	8,5	1,2	4500/ 8,5/ 1,5	7,5	1,0	6500/ 8,5/ 0,8	11,5	1,4	6500/ 8,5/ 1,0	10,5	1,2	6500/ 8,5/ 1,5	10,5	1,0	4500/ 6,5/ 1,0	6,5	0,8	4500/ 10,5/ 1,0	9,5	1,2	Skład chemiczny pyłu - Udział masowy [%]	
		Parametry	Głębokość wtopienia [mm]	Emisja pyłu [mg/s]																													
		2500/ 8,5/ 1,0	6,5	1,1																													
		4500/ 8,5/ 0,8	9,5	1,4																													
		4500/ 8,5/ 1,0	8,5	1,2																													
4500/ 8,5/ 1,5	7,5	1,0																															
6500/ 8,5/ 0,8	11,5	1,4																															
6500/ 8,5/ 1,0	10,5	1,2																															
6500/ 8,5/ 1,5	10,5	1,0																															
4500/ 6,5/ 1,0	6,5	0,8																															
4500/ 10,5/ 1,0	9,5	1,2																															
SiCrCr(VI)MnFeNi																																	
0,722,90,00212,258,55,8																																	
Udział składników fazowych w pyłe [% mas.]																																	
Cr ₂ FeO ₄ MnFe ₂ O ₄ NiFe ₂ O ₄ Fe ₃ O ₄																																	
76,77,810,45,1																																	
20. Opracowała/ <i>Prepared by</i> mgr inż. Joanna Wyciślik-Sośnierz		21. Egzaminator - imię i nazwisko/ <i>Examiner - Name</i> : dr inż. Michał Urbańczyk, IWE, IWI-C																															
Data i podpis: 26.02.2025 <i>Date and Signature:</i>		Data i podpis: 10.03.2025 <i>Date and Signature:</i>																															

9. Wnioski

Przedstawione w pracy wyniki badań potwierdziły przyjętą tezę, że energia liniowa wiązki laserowej oraz układu hybrydowego (laser + MIG) podczas spawania stali o strukturze austenitycznej decyduje o wielkości emisji pyłu, jego składzie chemicznym i morfologii. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników potwierdzono zrealizowanie założonych celów pracy oraz sformułowano następujące wnioski:

- 1. Opracowano kompleksową procedurę oceny emisji pyłu spawalniczego obejmującą analizę ilościową pyłu metodą grawimetryczną oraz analizę jakościową i ilościową za pomocą mikroanalizy składu chemicznego EDS i analizy składu fazowego metodą XRD. Uzupełnieniem jakościowej i ilościowej analizy pyłu jest ocena jego morfologii z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej i wysokorozdzielczej mikroskopii skaningowej ze szczególnym uwzględnieniem cząstek pyłu o wymiarach poniżej 10 μm jako najbardziej niebezpiecznych z punktu widzenia zdrowia pracowników. Wynikiem procedury jest opis wielkości emisji pyłu, jego składu chemicznego i fazowego oraz wielkości cząstek.**
- 2. Spawanie łukowe metodą MIG charakteryzowało się największą emisją pyłu w porównaniu do spawania laserowego i hybrydowego (od 0,9 do 2,6 mg/s dla energii liniowej w zakresie 0,30-0,55 kJ/mm). Wielkość emisji pyłu podczas spawania laserowego stali odpornych na korozję, w zakresie energii liniowej 0,15-0,54 kJ/mm, wyniosła od 0,3 do 0,7 mg/s. Podczas spawania hybrydowego, dla energii liniowej wynoszącej od 0,45 do 1 kJ/mm, emisja pyłu była w zakresie 0,9-1,5 mg/s. Dla energii liniowej wynoszącej 0,54 kJ/mm emisja pyłu podczas spawania łukowego była 3,5-razy większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa niż podczas spawania hybrydowego.**
- 3. Wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję zależy od energii liniowej procesu tj. parametrów technologicznych - mocy wiązki laserowej i prędkości spawania oraz w przypadku spawania hybrydowego także od prędkości podawania drutu, a w szczególności:**

- **podczas spawania laserowego:**

wzrost mocy wiązki laserowej powoduje zwiększenie głębokości wtopienia, co przekłada się na zwiększenie obszaru parowania ciekłego metalu i skutkuje większą emisją pyłu całkowitego. Wzrost mocy wiązki laserowej o 2 kW (z 2,5 do 4,5 kW) powodował wzrost emisji pyłu, w zależności od prędkości spawania, w zakresie od 17 do 50%,

- wzrost prędkości spawania powoduje zmniejszenie wielkości emisji pyłu. Wynika to z dostarczenia mniejszej ilości materiału dodatkowego na jednostkę powierzchni, co powoduje mniejszą głębokość wtopienia. Mniejsza powierzchnia parowania skutkuje mniejszą emisją powstających zanieczyszczeń. Dwukrotny wzrost prędkości spawania (z 0,5 do 1,0 m/min) wiązał się ze zmniejszeniem emisji pyłu od 17 do 40%;

- **podczas spawania hybrydowego:**

- wzrost prędkości podawania drutu wiązał się ze zwiększeniem wielkości emisji pyłu. Związane jest to z dostarczeniem większej ilości materiału dodatkowego w jednostce czasu i przyczynia się do większej emisji powstających zanieczyszczeń pyłowych. Zwiększenie prędkości podawania drutu o 2 m/min (z 6,5 do 8,5 m/min) powodowało wzrost emisji pyłu średnio o 25%,
- podobnie jak w przypadku spawania laserowego, wraz ze wzrostem mocy wiązki laserowej wzrasta wielkość emisji pyłu. Wzrost mocy wiązki laserowej o 2 kW (z 2,5 do 4,5 kW) przyczynił się do wzrostu emisji pyłu, w zależności od prędkości spawania i prędkości podawania drutu, w zakresie od 5 do 34%,
- wzrost prędkości spawania powodował obniżenie emisji pyłu. Emisja pyłu była o 7-15% mniejsza przy zwiększeniu prędkości spawania z 0,5 do 1,0 m/min.

4. Wielkość emisji zanieczyszczeń pyłowych podczas spawania laserowego stali odpornych na korozję zależy również od techniki spawania. Technika spawania laserowego z jeziorkiem charakteryzuje się, w zależności od energii liniowej, od 4% do 22% mniejszą emisją pyłu całkowitego w porównaniu do techniki spawania z oczkiem. Wynika to z faktu, że spawanie techniką z jeziorkiem charakteryzuje się mniejszą głębokością wtopienia i tym samym mniejszą emisją pyłu.

5. W pyłe pochodzącym ze spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję stwierdzono obecność żelaza (55-63%), chromu (20-28%), manganu (3-14%), niklu (4-9%) oraz krzemu (0,1-6%). Pierwiastki te występują w formie tlenków (spinelu) żelaza, manganu, chromu i niklu, tj. Cr_2FeO_4 , MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 .

- **Podczas spawania laserowego:**
 - wzrost mocy wiązki laserowej powoduje wzrost zawartości chromu i manganu oraz obniżenie zawartości żelaza i niklu w pyłe podczas spawania zarówno techniką z jeziorkiem jak i z oczkiem,
 - wpływ prędkości spawania na skład chemiczny uzależniony jest od techniki spawania laserowego: podczas spawania techniką z oczkiem wzrost prędkości spawania powoduje wzrost zawartości niklu i krzemu oraz obniżenie zawartości chromu, z kolei podczas spawania techniką z jeziorkiem wraz ze wzrostem prędkości spawania wzrasta zawartość żelaza, natomiast spada zawartość manganu i niklu;
 - **Podczas spawania hybrydowego:**
 - wzrost mocy wiązki laserowej powoduje zwiększenie zawartości chromu i manganu oraz obniżenie zawartości żelaza w pyłe; dla pozostałych pierwiastków nie ujawniono jednoznacznej zależności,
 - nie wykazano zależności pomiędzy prędkością podawania drutu i prędkością spawania a składem chemicznym pyłu.
6. Istotne zagrożenie związane ze spawaniem stali odpornych na korozję stanowi emisja do środowiska pracy pyłu zawierającego związki chromu(VI) i niklu – substancji o udowodnionym działaniu rakotwórczym. Zawartość chromu(VI) w pyłe w zależności od energii liniowej zawierała się w przedziale od 0,007 do 0,038% dla spawania łukowego, od 0,005 do 0,110% dla spawania laserowego i od 0,001 do 0,016% dla spawania hybrydowego.
 7. Główną fazę pyłu powstającego podczas spawania hybrydowego i laserowego stanowi tlenek chromu(III) żelaza(II) (Cr_2FeO_4). W zależności od parametrów technologicznych, w pyłe pochodzącym ze spawania laserowego zawartość Cr_2FeO_4 wyniosła od 72 do 82%, natomiast ze spawania hybrydowego 64-80%. Udział masowy Cr_2FeO_4 w pyłe ze spawania łukowego był w zakresie 67-73%.
 8. Najmniejszą emisją tlenku chromu(III) żelaza(II) charakteryzowały się procesy spawania laserowego techniką z oczkiem i jeziorkiem, natomiast największa emisja wystąpiła podczas spawania łukowego. Emisja Cr_2FeO_4 podczas spawania łukowego była ponad trzykrotnie większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa w porównaniu do spawania hybrydowego.

9. Na wielkość emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) (Cr_2FeO_4) podczas spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję wpływ mają parametry technologiczne - moc wiązki laserowej i prędkość spawania oraz w przypadku spawania hybrydowego także prędkość podawania drutu, a w szczególności:

- **wzrost mocy wiązki laserowej powodował wzrost emisji czasowej Cr_2FeO_4 zarówno podczas spawania laserowego jak i hybrydowego:**
 - zwiększenie mocy wiązki laserowej o 2 kW (z 2,5 do 4,5 kW) powodowało wzrost emisji Cr_2FeO_4 , w zależności od techniki i prędkości spawania laserowego, w zakresie od 13 do 33%,
 - podczas spawania hybrydowego taka sama zmiana mocy wiązki laserowej skutkowałą zwiększeniem emisji Cr_2FeO_4 o ok. 9-13%;
- **podczas spawania laserowego i hybrydowego wzrost prędkości spawania powodował spadek emisji czasowej Cr_2FeO_4 :**
 - trzykrotne zwiększenie prędkości spawania laserowego przyczyniło się do spadku emisji Cr_2FeO_4 w zakresie od 32 do 45%,
 - dwukrotny wzrost prędkości spawania hybrydowego (z 0,8 do 1,5 m/min) powoduje zmniejszenie wielkości emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) o 24-29%;
- **w przypadku spawania hybrydowego stwierdzono, że wzrost prędkości podawania drutu powodował wzrost emisji czasowej Cr_2FeO_4 - zwiększenie prędkości podawania drutu z 6,5 do 10,5 m/min wiązało się ze zwiększeniem emisji tlenku chromu(III) żelaza(II) od 33 do 47%.**

10. Analiza wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego i laserowego stali odpornych na korozję wykazała, że ponad 20% cząstek pyłu wchodzi w skład frakcji respirabilnej i tchawicznej (tj. o wymiarze poniżej 10 μm), stanowiących największe zagrożenia dla zdrowia.

10. Literatura

- [1] PN-EN 10088-1:2024-06 Stale odporne na korozję. Część 1 Wykaz stali odpornych na korozję
- [2] ISO/TR 15608 Welding — Guidelines for a metallic materials grouping system
- [3] Euro Inox The European Stainless Steel Development Association Własności stali odpornych na korozję ISBN 2-87997-083-0, Euro Inox 2002
- [4] *van der Mee V.*: Welding of (Super) Duplex Stainless Steel Bulletin of the Institute of Welding, 5/2016, s. 44-56
- [5] Innovationen für die Wirtschaft. Forschung in der Fügetechnik, www.dvs-forschung.de (2010-2020) (data dostępu 02.11.2021 r.)
- [6] *Kowalski Z., Makara A.*: Metody ocen ekologicznych i ekonomicznych technologii, Chemik 64 (3)/ 2010
- [7] *Latoszek E., Proczek M., Krukowska M.* (pod redakcją naukową): Zrównoważony rozwój a globalne dobra publiczne w teorii i praktyce organizacji międzynarodowych, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, ISBN 978-83-8017-122-0, Warszawa 2016
- [8] Agents classified by the iarc <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/> (data dostępu 05.11.2021 r.)
- [9] *Matusiak J.*: Bezpieczeństwo i higiena prac spawalniczych, Poradnik Inżyniera Spawalnictwo – tom 1, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003, s. 1004-1034
- [10] *Matusiak J., Wyciślik J., Wyciślik A.*: Environmental Criteria for Shielding Gas Selection during Arc Welding of Stainless Steels, Solid State Phenomena vol. 246, 2016, s. 275-278
- [11] *Spiegel-Ciobanu V. E., Costa L., Zschiesche W.*: Hazardous Substances in Welding and Allied Processes, International Institute of Welding 2020, ISBN 978-3-030-36928-6
- [12] *Jenkins N.T., Eagar T.W.*: Chemical analysis of welding fume particles, Welding Journal 2005 (84) – supplement, s. 87-93
- [13] *Brożek-Mucha Z.*: Chemical and physical characterisation of welding fume particles for distinguishing from gunshot residue, Forensic Science International, 254 (2015), s. 51-58
- [14] Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–129 <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications> (data dostępu 05.11.2021 r.)
- [15] *Maciejny A.*: Rozdział 7 - Stale stopowe, Metaloznawstwo - praca zbiorowa, Sekcja Wydawnictw Naukowych Politechniki Śląskiej, 1966
- [16] Charakterystyka pierwiastków wchodzących w skład stali <https://www.alfa-tech.com.pl/zelazo-ferrum> (data dostępu 05.12.2021 r.)
- [17] Wpływ molibdenu, niklu lub azotu na właściwości stali <http://www.stalenierdzewne.pl/940/wpływ-molibdenu-niklu-lub-azotu-na-wlasciwosci-stali> (data dostępu 05.12.2021 r.)
- [18] Pierwiastki stopowe w stalach https://mech.pg.edu.pl/documents/174709/36494029/PIM_6_%20pierwiastki%20stopowe%20w%20stalach.pdf (data dostępu 05.12.2021 r.)
- [19] *Łabanowski J.*: Stale odporne na korozję i ich spawalność, Gdańsk 2019, ISBN 978-83-7348-756-7

- [20] Surowska B.: Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją, Politechnika Lubelska, Lublin 2002, ISBN 83-88110-54-3
- [21] Możaryn T., Wójtowicz M., Strąk A.: Korozja i zabezpieczanie konstrukcji stalowych Część III – Stale odporne na korozję, Przegląd Budowlany 9/2016, s. 45-50
- [22] Ilevbare G. O., Burstein G.T.: The role of alloyed molybdenum in the inhibition of pitting corrosion in stainless steels, Corrosion Science 43 (2001), s. 485-513
- [23] Magdy A.M. Ibrahim, S.S. Abd El Rehim, M.M. Hamza: Corrosion behaviour of some austenitic stainless steels in chloride environments, Materials Chemistry and Physics 115 (2009), s. 80-85
- [24] Polska wersja Podręcznika projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych (Design Manual for Structural Stainless Steel, 4th Edition, SCI 2017), ISBN 978-1-85942-230-4, Rzeszów 2017
- [25] Brózda J: Stale austenityczne nowej generacji stosowane na urządzenia energetyki o parametrach nadkrytycznych i ich spawanie; <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20975253> (data dostępu 04.01.2022 r.)
- [26] Biserova Tahcieva A., Llorca-Isern N., Cabrera J.M.: Duplex and superduplex stainless steels: Microstructure and property evolution by surface modification processes, Metals 2019, 9 (3), 347
- [27] Charles J.: Duplex families and applications: A review Part 3: The lean duplex grades, Stainless Steel World, October 2015
- [28] Applications of Duplex Stainless Steel (titanmf.com) (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [29] O stalach nierdzewnych <http://www.stalenierdzewne.pl/1150/o-stalach-nierdzewnych> (data dostępu 10.05.2021 r.)
- [30] PN-EN 10027-2:2015-07 Systemy oznaczania stali - Część 2: System cyfrowy
- [31] Description of 1.4301 steel <https://www.aperam.com/product/304-1-4301/> (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [32] Stal nierdzewna AISI 304/ 1.4301 – przydatne informacje https://siatkitkane.com.pl/blog/13_stal-nierdzewna-aisi-304-14301-przydatne-informacje.html (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [33] List of products <https://www.i-king.pl/en/inne.php> (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [34] Houska C.: Looking at the long-term sustainability of stainless steel <https://www.constructioncanada.net/looking-at-the-long-term-sustainability-of-stainless-steel/> (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [35] Stal 1.4571 - Karta charakterystyki produktu <https://www.stalespecjalne.com.pl/oferta/stale-nierdzewne/1-4571.html> (data dostępu 10.12.2021 r.)
- [36] Zawór kulowy wysokiego ciśnienia- stal nierdzewna 1.4571 - https://www.esska-tech.pl/shop/Zawor-kulowy-wysokiego-cisnienia-stal-nierdzewna-1-4571-polaczenie-pierscieniem-zacinajacym-seria-ciezka-otwor-T-DN-5-do-22-PN-0-do-400--KHXSTHDES000-19580?hlid=KH3_38STHDES (data dostępu 15.12.2021 r.)

- [37] Obejmy do łączenia i naprawy rur (DIN 86128) <https://www.tubes-international.pl/obejmy-do-laczenia-i-naprawy-rur-standard-din-86128/> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [38] Stal żaroodporna a żarowytrzymała – różnice i zastosowania <https://www.polmet.eu/blog/stal-zaroodporna-a-zarowytrzymala-roznice-i-zastosowania> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [39] Datasheet of 1.4828 steel <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/56/> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [40] X5CrNiSi20-12, 1.4828, AISI 309- Heat resistant steel <https://virgamet.com/x15crnisi2012-1-4828-aisi-309-uns-s30900-heat-resistant-steel> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [41] Exhaust gas line in high temperature – stainless steel 1.4828 <https://www.lbf-technik.de/en/gallery/our-services/stainless-steel-aluminium-special-materials/item/151-exhaust-gas-line-in-high-temperature-stainless-steel-1-4828> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [42] Odporna na korozję, wysokostopowa stal żaroodporna i żarowytrzymała – charakterystyka <https://www.alfa-tech.com.pl/stale-wysokostopowe-o-specjalnych-wasnosciach-stal-zaroodporna-i-zarowytrzymala> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [43] Stal 1.4903 – Karta charakterystyki produktu <https://www.stalespecjalne.com.pl/program-dostaw/stale-arowytrzymae/1-4903.html> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [44] ASTM A335 P91 pipe <https://www.tridentsteel.co.in/astm-a335-p91-pipe.html> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [45] Procesy spawalnicze – szczegółowe objaśnienie <https://www.kemppi.com/pl-PL/support/abc-spawania/co-to-jest-spawanie/> (data dostępu 15.12.2021 r.)
- [46] Mazur M.: Podstawy spawalnictwa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993, ISBN 83-85718-30-3
- [47] Ambroziak A. (pod red.): Techniki Wytwarzania. Spawalnictwo. Laboratorium pod red., Wrocław 2010, ISBN 978-83-7493-592-0
- [48] Opis metody MIG/MAG https://www.icd.pl/poradnik/post/metoda_mig_mag (data dostępu 15.02.2022 r.)
- [49] Wytyczne W-12/IS-95 Nazwy i numery procesów spawalniczych według zestawienia w normie PN-EN ISO 4063:2011 <http://is.gliwice.pl/biblioteka-plikow/wytyczne-nazwy-i-numery-procesow-spawalniczych-wedlug-zestawienia-w-normie-pn-en> (data dostępu 15.02.2022 r.)
- [50] Technika spawania MIG/MAG https://www.icd.pl/poradnik/post/technika_spawania_mig_mag/print (data dostępu 15.02.2022 r.)
- [51] Biegus A.: Projektowanie konstrukcji stalowych według EUROKODU 3 część 5 – Połączenia spawane, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010
- [52] Spawanie stali nierdzewnych metodą MIG/MAG <https://www.hordawire.com/artykuly/spawanie-stali-nierdzewnych-metoda-mig-mag/> (data dostępu 15.02.2022 r.)

- [53] *Banasik M., Dworak J.*: Spawanie elektronowe i laserowe, Poradnik inżyniera. Spawalnictwo tom 2, WNT 2005, ISBN: 978-83-01-22155-3
- [54] *Stano S., Urbańczyk M., Dworak J.*: Spawanie laserowe – materiały szkoleniowe IWE, Gliwice, 2022
- [55] Co warto wiedzieć na temat spawania laserowego? <https://www.myрма.eu/co-warto-wiedziec-na-temat-spawania-laserowego/> (data dostępu 11.03.2022 r.)
- [56] *Li S., Chen G., Zhou C.*: Effects of welding parameters on weld geometry during high-power laser welding of thick plate, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol. 79/2015, s. 177-182
- [57] *Danielewski H., Zowczak Wł.*: Problemy laserowego spawania materiałów do pracy w podwyższonej temperaturze, Mechanik 12/2016 s. 1844-1848
- [58] What is laser welding and how does it work? <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-how-does-laser-welding-work> (data dostępu 11.03.2022 r.)
- [59] Principles of laser welding <https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/laser/mechanism.jsp> (data dostępu 11.03.2022 r.)
- [60] *Urbańczyk M.*: Wpływ technologii spawania hybrydowego (laser + MAG) na strukturę i właściwości złączy doczołowych stali o wysokiej granicy plastyczności S960QL, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Katowice, 2018
- [61] *Acherjee B.*: Hybrid laser arc welding: State-of-art review, Optics & Laser Technology, 99 (1), 2018, s. 60-71
- [62] *Churiaque C., Sánchez-Amaya J. M., Porriá-Lara M., Gumenyuk A., Rethmeier M.*: The Effects of HLAW Parameters for One Side T-Joints in 15 mm Thickness Naval Steel, Metals 2021, 11, 600
- [63] *Rao Z. H., Liao S. M., Tsai H. L.*: Modelling of hybrid laser–GMA welding: review and challenges Science and Technology of Welding and Joining 2011 vol, 16 (4)
- [64] *Victor M.B.*: Hybrid Laser Arc Welding, ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes, https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05264G_Sample.pdf (data dostępu 11.03.2022 r.)
- [65] *Gawrysiuk W., Siennicki M.*: Robotyzacja procesu spawania hybrydowego – przykład aplikacji, Przegląd Spawalnictwa 8/2011, s. 32-33
- [66] *Urbańczyk M., Banasik M., Stano S., Adamiec J.*: Effect of Hybrid Laser Arc Welding on the Structure and Properties of High Yield Point Steel S960QL, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5/2018, s. 183-190
- [67] *Alhart T.*: GE unveils ultra powerful high-tech laser welding system <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-unveils-ultra-powerful-high-tech-laser-welding-system> (data dostępu 11.03.2022 r.)

- [68] *Niaqaj J.*: Gazy osłonowe do spawania plazmowego i laserowego stali nierdzewnych, *Stal. Metale & Nowe Technologie*, 01-02/ 2018, s. 80-86
- [69] *Górka J.*: Assessment of the Effect of Laser Welding on the Properties and Structure of TMCP Steel Butt Joints *Materials* 2020, 13(6), 1312
- [70] *Lembeck H.*: Laser hybrid welding of thick sheet metals with disk lasers in shipbuilding industry, *International Laser Technology Congress AKL* 2010
- [71] Hybrid – laser GMAW Welding process scheme <https://ahssinsights.org/wp-content/uploads/2020/05/image005-3.jpg> (data dostępu 19.03.2022 r.)
- [72] *Matusiak J.*: Zagrożenia zdrowia spawaczy podczas spawania stali nierdzewnych, *Przegląd Spawalnictwa* nr 3/2008, s. 3-9
- [73] *Matusiak J.*: Spawanie bezpieczne ale efektywne. *Magazyn przemysłowy MM* 11/2008
- [74] *Matusiak J., Wyciślik J.*: Zdrowie i bezpieczeństwo przy produkcji spawalniczej. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* nr 3/2009, s. 24-35
- [75] Środki ochrony indywidualnej - promieniowanie laserowe, www.ciop.pl (data dostępu 19.03.2022 r.)
- [76] *Tasak E.*: *Metalurgia spawania*, Kraków 2008, ISBN 978-83-923191-1-5
- [77] *Lancaster J. F.*: *Metalurgia procesów spawalniczych*, WNT, Warszawa, 1966
- [78] *Linnert G. E.*: *Welding metallurgy*, vol. 1 Fundamentals, American Welding Society, New York, 1965
- [79] *Linnert G. E.*: *Welding metallurgy*, vol. 2 Technology, American Welding Society, New York, 1967
- [80] *Welding Metallurgy Module 3*, <https://www.nrc.gov/docs/ML1215/ML12157A607.pdf> (data dostępu 19.03.2022 r.)
- [81] *Dong C., Xue J., Zhang Z., Jin L., Hu Y., Wu W.*: High-Speed Welding of Stainless Steel with Additional Compensatory Gas Jet Blow Molten Pool, *Applied Sciences*, 2018, 8, 2170; doi:10.3390/app8112170
- [82] *Rochalski D., Golański D., Chmielewski T.*: Modele spawalniczych źródeł ciepła w analizie pola temperatury, *Przegląd Spawalnictwa* Vol. 89 5/2017, s. 109-116
- [83] *Lampman S.*: *Weld Solidification (Chapter 1), Weld Integrity and Performance*, ASM International, 1997, ISBN: 978-0-87170-600-8
- [84] *Le Guen E., Fabbro R., Carin M., Coste F., Le Masson P.*: Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes, *Optics & Laser Technology* – 2011, Vol. 43, p.1155-1166

- [85] *Gomes Nunes Silva R., Mano Monteiro de Paço C., Baranenko Rodrigues M., Sá de Sousa J. M., Pereira M., Borges Ramos B., Barancelli Schwedersky M., Gonçalves e Silva R. H.*: A comparison between LBW and hybrid laser-GMAW processes based on microstructure and weld geometry for hardenable steels *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 110:2801–2814 <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06076-1>
- [86] *Gonser M., Hogan T.*: Arc Welding Health Effects, Fume Formation Mechanisms, and Characterization Methods (Chapter) *Arc Welding*, 2011, DOI 10.5772/29131, ISBN 978-953-307-642-3 <https://www.intechopen.com/chapters/25071> https://cdn.intechopen.com/pdfs/25071/InTech-Arc_welding_health_effects_fume_formation_mechanisms_and_characterization_methods.pdf (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [87] *Melton G.*: The Effect of Metal Transfer Modes on Welding Fume Emission in MIG/MAG Welding, Eighth European Conference on Joining Technology, Eurojoin 8, Pula, Croatia, 24 - 26 May 2012 <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-effect-of-metal-transfer-modes-on-welding-fume-emission-in-mig-mag-welding> (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [88] *Matusiak J.*: Wpływ warunków technologicznych spawania stali nierdzewnych na toksyczność pyłu. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2007
- [89] *Juda-Rezler K., Toczko B. (pod red.)*: Pyły drobne w atmosferze Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce, Biblioteka Monitoringu Środowiska Warszawa, 2016, ISBN 978-83-61227-73-1 https://www.gios.gov.pl/images/aktualnosci/Pyly_drobne_w_atmosferze.Kompendium_wiedzy.pdf (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [90] *Janas S.*: Oznaczanie pyłu całkowitego i respirabilnego metodą filtracyjno – wagową na stanowiskach pracy, 2009, <https://radwag.com/pl/publikacje,11,5,0> (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [91] *Hinds W.C.*: Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Aerosol Particles. John Wiley & Sons Inc; New York, 1999, ISBN 0471194107
- [92] *Jankowska E., Pośniak M.*: Aerozole emitowane w procesach wysokotemperaturowych. Wytyczne do oceny narażenia zawodowego, CIOP-PIB, 2012, ISBN 978-83-7373-115-8
- [93] *Zimmer A.T., Biswas P.*: Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes, *J Aerosol Sci* 2001 Aug; 32(8):993-1008
- [94] *Kumar P., Rivas I., Singh A.P., Ganesh V. J., Ananya M., Frey H.Ch.*: Dynamics of coarse and fine particle exposure in transport microenvironments, *Climate and Atmospheric Science* (2018) 11
- [95] *Gubunya I.P., Yavdoshchin I.R.*: Mechanisms of formation of welding aerosol solid component and paths of its penetration into the living organism (review), ISSN 0957-798X *The Paton Welding Journal*, 1/2016, s. 49-51
- [96] Welding and cancer <https://www.cancer.org.au/cancer-information/causes-and-prevention/workplace-cancer/welding> (data dostępu 19.05.2022 r.)

- [97] *Matusiak J., Rams B., Machaczek S.*: Emisja zanieczyszczeń pyłowych i gazowych przy procesach spawania i lutowania, Katalog charakterystyk materiałów spawalniczych pod względem emisji zanieczyszczeń, wyd. WAM - Instytut Spawalnictwa 2004, ISBN 83-7318-494-5
- [98] *Matusiak J., Wyciślik J.*: „Ocena zagrożeń chemicznych, pyłowych i fizycznych w środowisku pracy przy innowacyjnych metodach spajania różnych materiałów konstrukcyjnych jako działanie wspomagające kształtowanie bezpiecznych warunków pracy”. Program wieloletni pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” etap II realizowany w latach 2011-2013. Koordynator CIOP PIB Warszawa
- [99] Air products focus on fume 12754/1/02, TWI 2002 <https://www.twi-global.com/dfs/pdfs-public/airproducts-fume0605.pdf> (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [100] *Walter J., Hustedt M., Hennigs Ch., Stein J., Barcikowski S.*: Emission data and costs for environmental measures during laser joining of metals. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* vol. 6, 2/2011, s. 138-144
- [101] *Honovar D.S.*: Fumes, Health & Safety in Arc Welding, <https://weldfabtechtimes.com/article/fumes-health-safety-in-arc-welding> (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [102] *Pasic S., Begic R., Bestic D.*: Chemical analysis of welding fume generated in shielded metal arc welding, 1st SEE Welding congress Welding and Joining Technologies for a Sustainable Development and Environment, Timisoara 2006, Rumunia
- [103] *Westin E. M., McCarrick S., Laundry-Mottiar L., Wei Z., Biesinger M.C., Barker I., Wagner R., Persson K.-A., Trydell K., Odnevall I., Karlsson H. L., Hedberg Y. S.*: New weldable 316L stainless flux-cored wires with reduced Cr(VI) fume emissions: part 1—health aspects of particle composition and release of metals, *Welding in the World* (2021) 65:2319–2337
- [104] *Floros N.*: Welding fume main compounds and structure *Welding in the World* (2018) 62:311–316, <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0552-3>
- [105] *Bojarski Z., Gigla M., Stróż K., Surowiec M.*: Krystalografia, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, ISBN 978-83-01-14704-4
- [106] *Matusiak J., Wyciślik-Sośnierz J.*: Fume emission during the arc and laser welding of cast stainless austenitic steel, *Metalurgija* 62 (2023) 3-4, s. 480-483
- [107] *Krztoń H.*: Raport z badań Nr N0-0535 (29/RTG/2019) Badania jakościowe i ilościowe składu fazowego próbek pyłu pochodzącego ze spawania łukowego i laserowego. (Gliwice, 04.07.2019)
- [108] *Matusiak J., Wyciślik-Sośnierz J.*: Opracowanie innowacyjnej technologii spawania łukowego i laserowego wraz z określeniem ich wpływu na emisje do atmosfery i środowiska pracy, Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa nr Ma-44 (B-319/19), Gliwice, 2019
- [109] Nomination of welding fumes for toxicity studies, National Institute for Occupational Safety and Health, 2002, http://issehs.com/spanish/additional-resources/weldingfumes_508.pdf (data dostępu 09.06.2022 r.)

- [110] *Jenkins N.T., Pierce W., Eager T.W.*: Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes, *Welding Journal, Welding Research Supplement* nr 10, 2005, s. 156-163
- [111] *Brand P., Lenz K., Reisgen U., Kraus T.*: Number Size Distribution of Fine and Ultrafine Fume Particles From Various Welding Processes, *Ann. Occup. Hyg.*, 2013, Vol. 57, No. 3, s. 305–313
- [112] *Antonini J. M., Roberts J. R., Stone S., Chen B.T., Schwegler-Berry D., Chapman R., Zeidler-Erdely P.C., Andrews R.N., Frazer D.G.*: Persistence of deposited metals in the lungs after stainless steel and mild steel welding fume inhalation in rats, *Arch Toxicol* (2011) 85, s. 487-498
- [113] *Mei N., Belleville L., Cha Y., Olofsson U., Odnevall Wallinder I., Persson K.-A., Hedberg Y. S.*: Size-separated particle fractions of stainless steel welding fume particles – A multi-analytical characterization focusing on surface oxide speciation and release of hexavalent chromium, *Journal of Hazardous Materials* 342 (2018), s. 527-535
- [114] Welding fume – a known carcinogen https://www.wilhelmsen.com/contentassets/4a01dfdc0db448c6b9bb02d20ce0daf8/welding-fumes_infographics.png (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [115] *Biały W., Kuboszek A.*: Systemy wspomagania w inżynierii produkcji, Środowisko i Bezpieczeństwo w Inżynierii Produkcji, Wydawnictwo P.A. Nova, 2013, ISBN 8393784522, 9788393784523
- [116] *Zawiślak K.*: Pyły w przemyśle spożywczym, *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego* 2/4–2014 (10), s. 41-43
- [117] *Leonard S.S., Chen B. T., Stone S. G., Schwegler-Berry D., Kenyon A.J., Frazer D., Antonini J.M.*: Comparison of stainless and mild steel welding fumes in generation of reactive oxygen species, *Particle and Fibre Toxicology* 2010, 7:32
- [118] *Isaxon C., Pagels J., Gudmundsson A., Asbach C., John A.C., Kuhlbusch T.A.J., Karlsson J.E., Kammer R., Tinnerberg H., Nielsen J., Bohgard M.*: Characteristics of Welding Fume Aerosol Investigated in Three Swedish Workshops, *Journal of Physics: Conference Series* 151 (2009) 012059 doi:10.1088/1742-6596/151/1/012059
- [119] *Ignatova A., Ignatov M., Kuznecov D.*: The Influence a Type of Welding Material on Parameters of a Solid Parts Welding Fumes, *Proceedings of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering Prague, Czech Republic, August 11-12, 2014*
- [120] Welding, IARC Monographs, vol.94 (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [121] *Casjens S., Henry J., Rihs H.-P., Martin Lehnert M., Raulf-Heimsoth M., Welge P., Lotz A., Van Gelder R., Hahn J.-U., Stiegler H., Eisele L., Weiss T., Hartwig A., Bruning T., Pesch B.*: Influence of Welding Fume on Systemic Iron Status, *Ann. Occup. Hyg.*, 2014, Vol. 58, No. 9, s. 1143-1154
- [122] *Jankowska E., Więcek E.*: Ocena narażenia zawodowego na pyły, http://nop.ciop.pl/m6-10/m6-10_5.htm (data dostępu 09.06.2022 r.)

- [123] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U.2018 poz.1286 wraz z późniejszymi zmianami
- [124] *Zeidler-Erdely P. C., Erdely A., Antonini J. A.*: Immunotoxicology of arc welding fume: Worker and experimental animal studies, *Journal of Immunotoxicology*, 2012; 9(4), s.411-425
- [125] Spawarka migomat - sposób przenoszenia materiału w łuku MIG/MAG <https://www.centrometwarszawa.pl/inne-produkty/artykuly-o-spawaniu/spawarka-migomat-sposob-przenoszenia-materialu-w-luku-migmag> (data dostępu 19.05.2022 r.)
- [126] *de Souza N.*: Total Fume Emissions and Emission Factors Applicable to Gas Metal Arc Welding, (2019). University of New Orleans Theses and Dissertations. 2603. <https://scholarworks.uno.edu/td/2603>(data dostępu 09.06.2022 r.)
- [127] *Pires I., Quintino L., Miranda R. M.*: Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate, *Materials & design*, (2007), 28(5), s. 1623-1631.
- [128] *Wyciślik- Sośnierz J., Matusiak J., Adamiec J.*: Wpływ warunków technologicznych spawania stali odpornych na korozję na wielkość emisji pyłu Materiały Konferencyjne Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa pt. Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych, Brenna 2023
- [129] *Genet M., Orban C.*: Steel, Alloys and Stainless: Part II, *Stainless Steel World*, Beaune, France, October 13, 2010
- [130] *Rimnac A., Pfatschbacher T.*: Trends and Solutions for Future Steel Grade Development, *Materials Science Forum* ISSN: 1662-9752, 2019 Vol. 949,s. 66-75 doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.949.66
- [131] *Stainless Steels - Introduction To The Grades And Families* <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=470> (data dostępu 09.07.2022 r.)
- [132] *Shen Y., Chacón R.*: Effect of Uncertainty in Localized Imperfection on the Ultimate Compressive Strength of Cold-Formed Stainless Steel Hollow Sections, *Appl. Sci.* 2019, 9, 3827; doi:10.3390/app9183827
- [133] *Wyciślik-Sośnierz J., Matusiak J.*: Ocena ekologiczna procesu spawania laserowego i hybrydowego laser + MIG stali odpornych na korozję o mikrostrukturze austenitycznej, Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa nr Ma-46 (ST-32/21), Gliwice, 2021
- [134] *Wyciślik-Sośnierz J., Matusiak J., Adamiec J.*: Ocena wpływu warunków technologicznych spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję na wielkość emisji pyłu, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach* 3/2023, s. 28-34
- [135] *Cena L. G., Chisholm W.P., Keane M.J., Cumpston A., Chen B.T.*: Size Distribution and Estimated Respiratory Deposition of Total Chromium, Hexavalent Chromium, Manganese, and Nickel in Gas Metal Arc Welding Fume Aerosols, *Aerosol Sci Technol.* 2014 ; 48(12): 1254–1263. doi:10.1080/02786826.2014.980883

- [136] Riccelli M. G., Goldoni M., Poli D., Mozzoni P., Cavallo D., Corradi M.: Welding Fumes, a Risk Factor for Lung Diseases, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 2552; doi:10.3390/ijerph17072552
- [137] Brand P., Lenz K., Reisgen U., Kraus T.: Number size distribution of fine and ultrafine fume particles from various welding processes. *Ann. Occup. Hyg.* 2013, 57, s. 305–313.
- [138] Koniecznyński J. (pod red.): Właściwości pyłu respirabilnego emitowanego z wybranych instalacji, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze 2010, PL ISSN 0208-4112 ISBN 978-83-60877-64-7
- [139] PN-EN 10088-4:2010 Stale odporne na korozję - Część 4: Warunki techniczne dostawy blach grubych, blach cienkich i taśm ze stali nierdzewnych do zastosowań konstrukcyjnych
- [140] PN-EN ISO 14343:2025-06 Materiały dodatkowe do spawania - Druty elektrodowe, taśmy elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego stali nierdzewnych i żaroodpornych – Klasyfikacja
- [141] PN-EN ISO 14175:2009 Materiały dodatkowe do spawania - Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych
- [142] PN-EN ISO 5817:2023-08 Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) - Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych
- [143] PN-EN ISO 13919-1:2020-04 Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego - Wymagania i zalecenia do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych - Część 1: Stal, nikiel, tytan i ich stopy
- [144] PN-EN ISO 12932:2013-10 Spawanie - Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu - Poziomy jakości dla niezgodności
- [145] PN-EN ISO 15614-1:2017-08 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania. Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu
- [146] PN-EN ISO 15614-11:2005 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania. Część 11: Spawanie wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego
- [147] PN-EN ISO 15614-14:2013-10 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania. Część 14: Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu
- [148] Kudła K., Wojsyk K.: Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania, *Przegląd Spawalnictwa* 12/2010, s. 21-25
- [149] PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie
- [150] Inkscape – poręcznik <https://inkscape.org/learn/tutorials/> (data dostępu 05.11.2023 r.)

- [151] *Wyciślik-Sośnierz J., Matusiak J.*: „Opracowanie stanowiska doświadczalnego oraz metodyki badawczej do badania zagrożeń pyłowych i chemicznych przy procesach spawania laserowego” praca badawcza nr Ma-45 (ST-32/20), Gliwice 2020
- [152] PN-EN ISO 15011-1:2010 Zdrowie i bezpieczeństwo przy spawaniu i procesach pokrewnych - Metoda laboratoryjna pobierania próbek dymu i gazów - Część 1: Określanie wielkości emisji dymu podczas spawania łukowego i pobieranie dymu do analizy
- [153] Internetowy Podręcznik Statystyki <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (data dostępu 19.12.2023 r.)
- [154] *Ręklewski M.*: Statystyka opisowa – teoria i przykłady, Włocławek 2020, ISBN 978-83-60607-93-0
- [155] Spektrometria rentgenowska XRF – podstawy teoretyczne <https://www.metalogis.com/baza-wiedzy/spektrometria-rentgenowska-xrf-podstawy-teoretyczne/> (data dostępu 05.11.2023 r.)
- [156] Laserowy analizator wielkości cząstek – zasada działania <https://apinstruments.pl/aparatura/malvern-panalytical/rodzina-mastersizer/mastersizer-3000/> (data dostępu 09.05.2024 r.)
- [157] What is the difference between heat input and arc energy? TWI technical knowledge <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-difference-between-heat-input-and-arc-energy> (data dostępu 09.05.2024 r.)
- [158] Wyciślik-Sośnierz J., Matusiak J., Adamiec J., Lemanowicz M., Kusiorowski R., Gerle A., "Morphology of welding fume derived from stainless steels arc welding" Abstract - Proceedings 2024, 108, 8
- [159] Wyciślik-Sośnierz J., Matusiak J., Adamiec J., Lemanowicz M., Kusiorowski R., Gerle A., "Morphology of welding fume derived from stainless steels arc welding" Archives of Foundry Engineering ISSN (2299-2944), 4/2024, 103-108
- [160] Czynniki reprotoksyczne- zmiana w kodeksie pracy, WSSE, Rzeszów, 2024 <https://www.gov.pl/web/wsse-rzeszow/czynniki-reprotoksyczne--zmiana-w-kodeksie-pracy> (data dostępu 19.02.2025 r.)
- [161] Melton G. The Effect of Metal Transfer Modes on Welding Fume Emission in MIG/MAG Welding, Eighth European Conference on Joining Technology, Eurojoin 8, Pula, Croatia, 24 - 26 May 2012. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-effect-of-metal-transfer-modes-on-welding-fume-emission-in-mig-mag-welding> (data dostępu 19.05.2023 r.)

STRESZCZENIE

Spawanie stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej wiąże się z emisją pyłu spawalniczego, który stanowi istotne zagrożenie dla środowiska, zdrowia i bezpieczeństwa pracowników. Zgodnie z wytycznymi Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem pył spawalniczy od 2018 r. należy do grupy czynników o udowodnionym działaniu rakotwórczym. Podstawowymi składnikami stopowymi tych stali są chrom i nikiel. Ich związki również zaliczane są do substancji o udowodnionym działaniu kancerogennym.

Technologie spawalnicze są najczęściej stosowanymi technologiami łączenia stali odpornych na korozję. Podstawową metodą spawania stali austenitycznych jest proces spawania łukowego, jednak zwiększające się wymagania w zakresie poprawy wydajności i jakości złączy spawanych oraz efektywności procesu spawania spowodowały wzrost zastosowania w przemyśle technik laserowych. Oprócz spawania laserowego, procesem wykorzystującym wiązkę laserową jest spawanie hybrydowe (HLAW – hybrid laser arc welding). Proces ten polega na jednoczesnym zastosowaniu dwóch źródeł ciepła (wiązek promieniowania laserowego i łuku elektrycznego).

W ramach realizacji pracy doktorskiej opracowano metodykę oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu spawalniczego. Metodyka ta obejmuje określenie wielkości emisji pyłu całkowitego wyrażonej w mg/s; rozumianej jako ilość powstającego pyłu w czasie. W celu określenia jakie pierwiastki chemiczne są obecne w pyłe wykonano analizę składu chemicznego pyłu metodą SEM-EDS. Uzupełnieniem analizy składu chemicznego jest analiza fazowa pyłu metodą XRD, która umożliwia określenie faz występujących w pyłe. Wykonano również badania morfologii pyłu, określając wielkość, kształt i budowę cząstek. Do oceny wielkości cząstek zastosowano technikę dyfrakcji laserowej (LD).

Opracowana metodyka zapewnia uzyskanie pełnej charakterystyki pyłu obejmującej wielkość emisji, jego skład chemiczny i fazowy oraz morfologię. Umożliwiło to przeprowadzenie oceny zagrożenia związanego z powstawaniem pyłu podczas spawania laserowego, hybrydowego i łukowego stali w gatunku 1.4301 i 1.4828.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że spawanie łukowe metodą MIG charakteryzowało się największą emisją pyłu w porównaniu do spawania laserowego i hybrydowego. Dla energii liniowej wynoszącej 0,54 kJ/mm emisja pyłu podczas spawania łukowego była 3,5-razy większa niż podczas spawania laserowego i ponad dwukrotnie większa niż podczas spawania hybrydowego. W pyłe pochodzącym ze spawania laserowego i hybrydowego stali odpornych na korozję stwierdzono obecność żelaza (55-63%), chromu (20-28%), manganu (3-14%), niklu (4-9%) oraz krzemu (0,1-6%). Pierwiastki te występują w formie tlenków (spinel) żelaza, manganu, chromu i niklu, tj. Cr_2FeO_4 , MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 . Analiza wielkości cząstek pyłu pochodzącego ze spawania hybrydowego i laserowego stali odpornych na korozję wykazała, że ponad 20% cząstek pyłu wchodzi w skład frakcji respirabilnej i tchawicznej (tj. o wymiarze poniżej 10 μm), stanowiących największe zagrożenia dla zdrowia.

Słowa kluczowe: emisja pyłu spawalniczego, spawanie laserowe, spawanie hybrydowe (HLAW – hybrid laser arc welding), spawanie łukowe, stale odporne na korozję

ABSTRACT

The welding of corrosion-resistant austenitic steels involves the emission of welding fume, which poses a significant risk to the environment, health and safety of workers. According to the International Agency for Research on Cancer guidelines, welding fume has been a proven carcinogen since 2018. The main alloying elements of these steels are chromium and nickel. Their compounds are also included in the substances with proven carcinogenic effects.

Welding technologies are the most commonly used joining technologies for corrosion-resistant steels. The basic welding method for austenitic steels is the arc welding process, but increasing demands for improved productivity and quality of welded joints and the efficiency of the welding process have increased the use of laser techniques in industry. In addition to laser welding, a process that uses a laser beam is hybrid laser arc welding (HLAW). This process involves the simultaneous use of two heat sources (a laser beam and an electric arc).

Within the framework of doctoral thesis, a methodology for the assessment of welding fume hazard was developed. This methodology includes the determination of total fume emission rate expressed in mg/s; defined as the amount of fume generated over time. In order to determine which chemical elements are present in the fume, a chemical composition analysis was performed using the SEM-EDS method. The chemical composition analysis was complemented by a phase analysis of the fume using the XRD method, making it possible to determine the phases present in the fume. A study of fume morphology was also carried out, determining particle size, shape and structure. The laser diffraction (LD) technique was used to assess particle size.

The developed methodology provided a complete characterization of the fume including the emission rate, its chemical and phase composition and morphology. This enabled a fume hazard assessment to be carried out during laser, hybrid and arc welding of 1.4301 and 1.4828 steel grades.

The study results demonstrated that arc MIG welding had the highest fume emission rate compared to laser and hybrid welding. For an arc energy of 0.54 kJ/mm, the fume emission rate from arc welding was 3.5 times that of laser welding and more than twice that of hybrid welding. The chemical analysis of fume from laser and hybrid welding of corrosion-resistant steels revealed the presence of iron (55-63%), chromium (20-28%), manganese (3-14%), nickel (4-9%) and silicon (0.1-6%). These elements are in the form of iron, manganese, chromium and nickel oxides (spinels) - Cr_2FeO_4 , MnFe_2O_4 i NiFe_2O_4 .

The analysis of the particle size of fume from laser and hybrid welding of corrosion-resistant steels showed that more than 20% of the fume particles were part of the respirable and tracheal fraction (i.e. with a dimension of less than 10 μm), posing the greatest health risks.

Keywords: welding fume emission, laser welding, hybrid laser arc welding (HLAW), arc welding, corrosion-resistant steels