

Politechnika Śląska
Wspólna Szkoła Doktorska

Rozprawa Doktorska
**„Wpływ technologii spawania laserowego/ hybrydowego na strukturę
i właściwości złączy doczołowych rur kompozytowych stosowanych
w przemyśle energetycznym”**

mgr inż. Radosław Ciokan

Promotor:
dr hab. inż. Santina Topolska, prof. PŚ

Promotor pomocniczy
dr inż. Michał Urbańczyk

Opiekun z firmy
inż. Tomasz Treppa

Spis treści

1.	Wstęp	5
2.	Charakterystyka rur kompozytowych.....	8
2.1.	Skład chemiczny rur kompozytowych	10
2.2.	Sposób wytwarzania rur kompozytowych.....	12
2.2.1.	Odlewanie komponentów i wstępna obróbka.....	14
2.2.2.	Łączenie komponentów i wyciskanie na gorąco.....	15
2.2.3.	Walcowanie na zimno w walcierce pielgrzymowej	17
2.2.4.	Kontrola i badania nieniszczące.....	18
2.3.	Mikrostruktura rur kompozytowych	19
2.3.1	Mikrostruktura rur kompozytowych.....	19
2.4.	Zastosowanie rur kompozytowych w przemyśle.....	21
3.	Spawanie rur kompozytowych.....	25
3.1.	Konwencjonalne spawanie dwuwarstwowych rur kompozytowych 3R12/4L7 i Sanicro 38/4L7 25	
3.1.1.	Przygotowanie złączy do spawania	25
3.1.2.	Materiały dodatkowe i zastosowane urządzenia.....	25
3.1.3.	Parametry procesu spawania metodami 141 i 111	27
3.2.	Napawanie hybrydowe (łączenie wiązki laserowej i łuku MAG) oraz napawanie laserowe... 29	
3.3.	Stanowisko spawalnicze – spawanie laserowe, napawanie hybrydowe.....	31
3.3.1.	Ogólna charakterystyka stanowiska spawalniczego	32
3.3.2.	Spawanie laserowe rur kompozytowych	35
3.3.3.	Napawanie hybrydowe laserowo-łukowe.....	37
3.3.4.	Zaawansowane metody kontroli jakości.....	38
3.3.5.	Znaczenie i perspektywy rozwojowe.....	39
3.4.	Inne metody nanoszenia powłok ochronnych i regeneracyjnych na rury energetyczne	39
3.4.1.	Natryskiwanie cieplne (metalizacja natryskowa).....	40
3.4.2.	Napawanie łukiem krytym (SAW)	41
3.4.3.	Napawanie łukowe elektrodą topliwą (MMA oraz MIG/MAG)	43
3.4.4.	Napawanie metodą TIG (GTAW).....	46
4.	Podsumowanie części teoretycznej.....	48
5.	Cel i teza pracy	50
5.1.	Teza	50
5.2.	Problem badawczy	50
5.3.	Cel rozprawy	50
5.4.	Cel użyteczny.....	51

6.	Materiał do badań	52
6.1.	Charakterystyka rur kompozytowych wykorzystanych w badaniach	52
6.2.	Materiały dodatkowe wykorzystane do łączenia rur.....	54
6.2.1.	Druty spawalnicze	54
6.2.2.	Gaz osłonowy	55
7.	Metodyka badań.....	55
7.1.	Plan badań	55
7.2.	Badania wizualne (VT)	58
7.3.	Badania radiograficzne (RT)	59
7.4.	Badania prądami wirowymi (ET).....	60
7.5.	Analiza naprężeń w złączu spawanym metodą radiograficzną	61
7.6.	Badania penetracyjne (PT)	62
8.	Metodyka badań – badania niszczące.....	63
8.1.	Badanie twardości	64
8.2.	Próba rozciągania	68
8.3.	Próba zginania	72
8.4.	Podsumowanie i wnioski z badań niszczących bez badań makro i mikroskopowych	74
9.	Badania metalograficzne	75
9.1.	Badania makroskopowe	75
9.2.	Mikrostruktura i skład chemiczny złączy (SEM/EDS)	80
9.3.	Mikroskopia świetlna	88
9.4.	Podsumowanie badań mikroskopowych	98
10.	Dobór parametrów technologicznych spawania laserowego	99
11.	Dobór parametrów technologicznych napawania hybrydowego	101
11.1.	Charakterystyka technologii hybrydowej laser + MAG.....	102
11.2.	Parametry technologiczne procesu napawania hybrydowego	102
11.3.	Omówienie parametrów procesu napawania.....	102
11.4.	Podsumowanie badań	103
12.	Wytyczne technologiczne spawania laserowego i hybrydowego rur kompozytowych...	104
12.1.	Spawanie laserowe	105
12.2.	Napawanie hybrydowe (laser + MAG)	106
12.3.	Zalecenia technologiczne	107
12.4.	Uwagi i wnioski końcowe	108
13.	Kwalifikacja technologii spawania rur kompozytowych	108
13.1.	Wnioski z procesu kwalifikacji	110
14.	Ocena wpływu technologii spawania hybrydowego na strukturę i właściwości rur kompozytowych	110

14.1.	Wnioski końcowe.....	112
15.	Ocena struktury złączy spawanych.....	112
15.1.	Podsumowanie oceny struktury złączy spawanych.....	114
16.	Analiza wyników badań po próbach technologicznych spawania laserowego i napawania hybrydowego	114
16.1.	Synteza wyników analizy	116
17.	Wnioski końcowe z wykonanych badań oraz perspektywy badawcze	116
17.1.	Wnioski naukowe.....	117
17.2.	Wnioski wdrożeniowe.....	117
17.3.	Znaczenie dla przemysłu	118
17.4.	Perspektywy dalszych badań.....	118
	Bibliografia.....	119

1. Wstęp

Współczesny rozwój technologii spawalniczych stanowi fundament ciągłego doskonalenia procesów produkcyjnych w przemyśle energetycznym. Wymagania w zakresie jakości, wytrzymałości i niezawodności złączy konstrukcyjnych w tym sektorze osiągają poziomy niespotykane w innych gałęziach przemysłu. Dynamiczny postęp w zakresie innowacyjnych metod łączenia materiałów, zwłaszcza technik laserowych oraz hybrydowych (laser + MAG), umożliwia uzyskiwanie połączeń o wysokiej jakości, doskonałej kontroli parametrów procesu, minimalnym wpływie cieplnym na materiał oraz zoptymalizowanej mikrostrukturze strefy spoiny [1].

Niniejsza praca doktorska koncentruje się na badaniu zastosowania spawania laserowego i hybrydowego do łączenia rur kompozytowych, co stanowi istotny krok w kierunku wdrożenia tych nowoczesnych technologii do praktyki przemysłowej. Rury kompozytowe są konstrukcjami złożonymi współosiowo z dwóch rur wykonanych z różnych gatunków stali, trwale połączonych ze sobą już na etapie wytwarzania (np. w procesie walcowania). Dzięki połączeniu w jednej strukturze korzystnych właściwości dwóch materiałów uzyskuje się elementy o zwiększonej odporności na zmienne obciążenia, korozję oraz działanie wysokich temperatur. Takie rury znajdują zastosowanie w warunkach jednoczesnego oddziaływania zróżnicowanych czynników, np. wysokiego ciśnienia i agresywnego środowiska wewnątrz rury przy równoczesnej ekspozycji na zmienne obciążenia mechaniczne i wysoką temperaturę na zewnątrz. Aby w pełni wykorzystać potencjał rur kompozytowych, konieczne jest opracowanie precyzyjnych technologii łączenia ich odcinków, które zagwarantują spójność strukturalną złącza oraz spełnienie rygorystycznych norm jakościowych, takich jak wymagania PN-EN ISO 13919-1 dla spoin laserowych. Dotychczas stosowane tradycyjne metody spawalnicze (MIG, TIG, MMA) pozwalały na uzyskiwanie trwałych połączeń, jednak charakteryzowały się istotnymi ograniczeniami: trudnością w kontroli ilości wprowadzanego ciepła, szeroką strefą wpływu ciepła oraz ograniczoną precyzją w przypadku grubych, wielowarstwowych konstrukcji. Wobec tych ograniczeń konieczne jest poszukiwanie nowych rozwiązań. Spawanie laserowe oraz hybrydowe (łączące wiązkę laserową z łukiem MAG) jawią się jako metody szczególnie obiecujące. Umożliwiają one uzyskanie pełnego przetopu na całym obwodzie złącza przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu cieplnego [2, 3]. Dodatkowo wdrożenie tych technik w praktyce przemysłowej sprzyja poprawie efektywności procesów: skróceniu czasu

spawania, zwiększeniu wykorzystania energii, redukcji odkształceń oraz ograniczeniu negatywnego oddziaływania na środowisko [4].

Problem badawczy podjęty w niniejszej rozprawie polega na przeanalizowaniu wpływu parametrów procesu spawania laserowego i hybrydowego na mikrostrukturę oraz makrostrukturę złączy doczołowych wykonanych z rur kompozytowych. Szczególną uwagę poświęcono doborowi parametrów technologicznych, takich jak prędkość spawania, moc lasera, położenie ogniska i rodzaj gazu osłonowego. W przypadku procesu hybrydowego analizie poddano także parametry łuku MAG (prędkość podawania drutu, natężenie prądu spawania, napięcie łuku wraz z korektą) oraz geometrię szczeliny spawalniczej [5, 6].

Celem badań jest ustalenie kombinacji parametrów, które zapewnią uzyskanie złącza o pełnym przetopie i wysokiej jakości, zgodnego z wymaganiami norm (m.in. PN-EN ISO 13919-1 dla spoin laserowych) oraz spełniającego surowe kryteria eksploatacyjne obowiązujące w przemyśle energetycznym. Niewielka liczba dotychczasowych opracowań naukowych poświęconych zastosowaniu technik laserowych do łączenia rur kompozytowych potwierdza pionierski charakter tematyki, wskazując zarówno na naukową nowość, jak i praktyczne znaczenie podjętych badań.

Plan badań obejmuje wykonanie spoiny warstwy wewnętrznej rury z użyciem wiązki laserowej oraz wypełnienie i wykończenie spoiny od strony zewnętrznej metodą hybrydową (laser sprzężony z łukiem MAG). Takie dwustopniowe podejście, łączące zalety obu technik, ma na celu zapewnienie pełnego przetopu na całej grubości dwuwarstwowej ścianki rury. Uzyskane złącza zostaną poddane kompleksowej ocenie jakości, obejmującej zarówno badania nieniszczące (oględziny wizualne, badania penetracyjne, radiograficzne oraz testy prądami wirowymi), jak i niszczące (próby udarność, statyczne próby rozciągania i zginania, pomiary twardości i mikrotwardości). Dodatkowo przeprowadzone zostaną badania metalograficzne, makroskopowe i mikroskopowe, w tym obserwacje przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), co pozwoli szczegółowo scharakteryzować strukturę złącza i strefy wpływu ciepła.

Znaczenie naukowe i praktyczne podejmowanych badań wynika z realnego zapotrzebowania na nowoczesne technologie łączenia rur kompozytowych, które mogą stanowić przewagę konkurencyjną krajowego przemysłu energetycznego na rynku międzynarodowym. Oczekuje się, że wyniki uzyskane w rozprawie przyczynią się do podniesienia standardów bezpieczeństwa, wydajności i trwałości urządzeń energetycznych poprzez poprawę jakości połączeń spawanych. Wdrożenie opracowanej technologii może przełożyć się bezpośrednio na zwiększenie niezawodności eksploatacyjnej kotłów, rurociągów

i innych elementów infrastruktury, co ma kluczowe znaczenie dla efektywności oraz bezpieczeństwa systemów energetycznych.

Istotnym atutem projektu jest współpraca z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Górnośląskim Instytutem Technologicznym, Centrum Spawalnictwa, oraz Politechniką Śląską. Partnerstwo to zapewnia dostęp do nowoczesnej aparatury badawczej i wiedzy eksperckiej, znacząco zwiększając szanse na opracowanie i wdrożenie proponowanych rozwiązań w warunkach przemysłowych.

Struktura niniejszej rozprawy została zaplanowana tak, aby odzwierciedlać złożoność podjętej tematyki. Podsumowując, praca podejmuje problematykę zastosowania innowacyjnych metod spawania w łączeniu dwuwarstwowych rur kompozytowych dla potrzeb przemysłu energetycznego. Planowane badania eksperymentalne, wsparte zaawansowanymi analizami strukturalnymi i wytrzymałościowymi, mają na celu opracowanie optymalnych rozwiązań technologicznych, które przyczynią się do zwiększenia efektywności produkcji oraz poprawy bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji przemysłowych. Wdrożenie technologii spawania laserowego i hybrydowego przy wytwarzaniu rur kompozytowych otwiera nowe perspektywy w obszarze innowacyjności, zrównoważonego rozwoju i konkurencyjności na rynku energetycznym. Niniejszy wstęp stanowi podstawę do dalszych rozważań, przedstawionych w kolejnych rozdziałach pracy – obejmujących wyniki badań oraz propozycje technologiczne umożliwiające praktyczne wdrożenie zaproponowanych metod w praktyce inżynierskiej [7, 8].

Na podstawie analizy literatury przedmiotu podjęto realizację niniejszej rozprawy. Stan badań wskazał istotną lukę dotyczącą zastosowania technologii spawania i napawania laserowego oraz hybrydowego (laser + MAG) w odniesieniu do rur kompozytowych łączących różne gatunki stali w jednej strukturze. Brak szczegółowych opracowań dotyczących doboru parametrów technologicznych dla takich połączeń – zarówno pod względem mikrostruktury, jak i właściwości mechanicznych – potwierdza konieczność przeprowadzenia badań eksperymentalnych w tym obszarze.

2. Charakterystyka rur kompozytowych

Rury kompozytowe stanowią zaawansowane technologicznie rozwiązanie konstrukcyjne, w którym zastosowano połączenie różnych gatunków stali w jednym, zintegrowanym przekroju. Są to rury dwuwarstwowe, w których jedna rura (najczęściej wykonana ze stali ferrytycznej lub ferrytyczno-perlitycznej) stanowi warstwę nośną, natomiast druga (austenityczna lub stop niklowy) pełni funkcję ochronną, zapewniając wysoką odporność na korozję oraz działanie czynników środowiskowych [9].

Zasadniczą ideą konstrukcji kompozytowej jest optymalizacja właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych w warunkach intensywnej pracy - szczególnie w przemyśle energetycznym, gdzie występują wysokie ciśnienia, zmienne temperatury i agresywne środowiska chemiczne. Dzięki doborowi odpowiednich materiałów możliwe jest uzyskanie elementów o znakomitej trwałości, a jednocześnie bardziej ekonomicznych niż analogiczne komponenty wykonane w całości z drogich stali stopowych [10].

W niniejszej pracy analizie poddano rury kompozytowe produkcji Sandvik o średnicy zewnętrznej 63,5 mm i grubości ścianki 6,53 mm. Konstrukcja tych rur oparta jest na współśrodkowym połączeniu warstwy wewnętrznej ze stali P265GH oraz warstwy zewnętrznej ze stali austenitycznej 3R12 (AISI 304L) lub stopu niklowego Sanicro 38 (Alloy 825).

Rury tego typu znajdują zastosowanie między innymi w:

- instalacjach parowych i wodnych w elektrowniach,
- instalacjach petrochemicznych,
- systemach przesyłowych narażonych na działanie mediów agresywnych chemicznie,
- układach pracujących w środowiskach o zmiennej temperaturze.

Kluczowe cechy rur kompozytowych to:

- podwyższona odporność na pękanie i zmęczenie cieplne,
- wysoka szczelność strukturalna w warunkach ciśnienia roboczego,
- optymalizacja kosztów przez redukcję udziału materiałów wysoko stopowych.

Rury kompozytowe wymagają szczególnej uwagi na etapie łączenia — zarówno pod względem przygotowania krawędzi, jak i doboru parametrów spawalniczych. Interakcja różnych materiałów w strefie połączenia wpływa na mechanikę procesu oraz mikrostrukturę złącza. W kolejnych rozdziałach pracy omówione zostały szczegółowo właściwości warstw składowych rur, sposoby ich wytwarzania oraz implikacje mikrostrukturalne wynikające z zastosowania różnych metod łączenia [9, 10, 11].

Na poniższym rysunku 1 zaprezentowano rurę kompozytową Sanicro38/4L7. Natomiast na rysunku 2 przedstawiono ścianę szczelną kotła sodowego wykonaną z rur kompozytowych 3R12/4L7



rys. 1. Rura kompozytowa Sanicro38/4L7[1]



rys. 2. Ściana szczelna kotła sodowego wykonana z rur kompozytowych 3R12/4L7

2.1. Skład chemiczny rur kompozytowych

Kluczowym aspektem w projektowaniu rur kompozytowych z perspektywy inżynierii materiałowej jest skład chemiczny poszczególnych warstw, determinujący ich mikrostrukturę, a w konsekwencji właściwości mechaniczne i odporność korozyjną. W ramach badań wykorzystano dwuwarstwowe rury kompozytowe firmy Sandvik o średnicy zewnętrznej 63,5 mm i grubości ścianki 6,53 mm. W dalszej części rozdziału przedstawiono charakterystykę chemiczną oraz materiałową obu warstw: wewnętrznej i zewnętrznej.

Warstwę wewnętrzną stanowi stal 4L7 (P265GH). Jej skład chemiczny obejmuje: węgiel (0,18%), krzem (0,30%), mangan (0,69%), chrom (0,14%), nikiel (0,25%), molibden (0,04%), miedź (0,03%) oraz tytan (0,005%). Zgodnie z normą EN stal P265GH klasyfikowana jest jako stal kotłowa, przeznaczona do pracy pod ciśnieniem w podwyższonych temperaturach. Niska zawartość węgla (~0,18%) sprzyja zachowaniu plastyczności, ułatwiając procesy obróbki plastycznej, takie jak walcowanie czy gięcie. Obecność krzemu i manganu podnosi wytrzymałość mechaniczną i stabilność mikrostruktury, a śladowe ilości chromu i niklu dodatkowo wspierają odporność korozyjną. Również molibden (0,04%) i miedź (0,03%) poprawiają hartowność i odporność w specyficznych środowiskach, natomiast tytan (0,005%)

pełni funkcję stabilizującą, ograniczając kruchość w podwyższonych temperaturach poprzez wiązanie węgla w trwałe węgliki [11, 12].

Mikrostruktura stali P265GH ma charakter ferrytyczno-perlityczny, przy czym osnowę tworzy ferryt z równomiernie rozproszonym perlitem. Takie proporcje zapewniają korzystny kompromis pomiędzy wytrzymałością a plastycznością – ferryt odpowiada za ciągliwość, a perlit zwiększa twardość i wytrzymałość na rozciąganie. W kontekście zastosowania w rurach kompozytowych, warstwa wewnętrzna pełni funkcję nośną, skutecznie przenosząc obciążenia ciśnieniowe i termiczne. Jej wysoka plastyczność ma również istotne znaczenie w procesach spawalniczych, minimalizując ryzyko pęknięć w strefie wpływu ciepła [14].

Warstwa zewnętrzna rur kompozytowych wykonana jest natomiast ze stali 3R12 (AISI 304L) lub stopu Sanicro 38 (Alloy 825). Pierwszy z materiałów – stal 3R12 – charakteryzuje się zawartością: chromu (18,22%), niklu (10,04%), krzemu (0,36%), manganu (1,11%), molibdenu (0,24%), miedzi (0,26%), węgla (0,008%) oraz tytanu (0,004%). Tak dobrany skład zapewnia austenityczną mikrostrukturę, odpowiedzialną za wysoką odporność na korozję w szerokim zakresie środowisk. Niski poziom węgla eliminuje ryzyko sensybilizacji, tj. wytrącania się węglików chromu podczas spawania, co pozwala zachować odporność korozyjną spoiny. Dodatek molibdenu poprawia odporność na korozję szczelinową i wżerową, szczególnie w obecności chlorków, natomiast tytan stabilizuje mikrostrukturę.

Alternatywnie, jako warstwę zewnętrzną stosuje się stop Sanicro 38 (Alloy 825), zawierający: chrom (19,92%), nikiel (38,24%), krzem (0,15%), mangan (0,47%), molibden (2,57%), miedź (1,61%), węgiel (0,012%) i tytan (0,75%). Wysoka zawartość niklu nadaje materiałowi właściwości typowe dla stopów niklowych, w tym wyjątkową odporność na korozję w środowiskach kwasowych (np. H_2SO_4 , HCl) oraz żaroodporność. Chrom i molibden synergicznie zwiększają odporność na korozję wżerową w obecności chlorków, a miedź poprawia odporność na działanie kwasów redukujących. Istotną rolę odgrywa również tytan, który w stężeniu 0,75% stabilizuje strukturę przez wiązanie węgla i azotu, co ogranicza powstawanie szkodliwych węglików chromu. Dzięki temu stop Sanicro 38 znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle petrochemicznym i naftowym, gdzie wymagana jest ekstremalna odporność korozyjna.

Podsumowanie składu chemicznego zastosowanych rur kompozytowych, obejmujących konfiguracje Sanicro 38/4L7 oraz 3R12/4L7, przedstawiono w tablicy 1 [9, 10].

Tablica 1. Skład chemiczny rury kompozytowej: Sanicro 38/4L7, 3R12/4L7 [9, 10]

Skład chemiczny, [%]								
Gatunek stali (atest)	Warstwa wewnętrzna							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti
4L7 (P265GH)	0,18	0,30	0,69	0,14	0,25	0,04	0,030	0,005
Gatunek stali (atest)	Warstwa zewnętrzna							
	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Cu	C	Ti
3R12 (AISI 304L)	18,22	10,04	0,36	1,11	0,24	0,26	0,008	0,004
Sanicro 38 (Alloy 825)	19,92	38,24	0,15	0,47	2,57	1,61	0,012	0,75

Integracja warstwy wewnętrznej (4L7/P265GH) i zewnętrznej (3R12 lub Alloy 825) opiera się na komplementarności ich właściwości. Warstwa wewnętrzna, o mikrostrukturze ferrytyczno-perlitycznej, zapewnia wysoką wytrzymałość mechaniczną oraz odporność na obciążenia ciśnieniowe, zachowując stabilność przy cyklicznych zmianach temperatury. Natomiast warstwa zewnętrzna pełni funkcję ochronną przed korozją; stal 3R12 (AISI 304L) skutecznie zabezpiecza w środowiskach ogólnokorozyjnych, podczas gdy stop Alloy 825 wykazuje optymalne właściwości w obecności agresywnych czynników chemicznych, takich jak chlorki czy kwasy [13].

Połączenie obu warstw uzyskuje się poprzez zaawansowane procesy termomechaniczne, w tym walcowanie zgrzewające, które zapewniają integralność interfejsu. Jednorodność fazy metalicznej w strefie przejściowej, pozbawiona inkluzji i pęknięć, jest kluczowa dla bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Taka hybrydowa konstrukcja pozwala na synergiczne wykorzystanie zalet obu materiałów, łącząc wytrzymałość mechaniczną warstwy wewnętrznej z wysoką odpornością na degradację chemiczną i środowiskową warstwy zewnętrznej [14].

2.2. Sposób wytwarzania rur kompozytowych

Wytwarzanie rur kompozytowych, zwanych również rurami platerowanymi lub bimetalicznymi, stanowi zaawansowany proces technologiczny, którego celem jest trwałe połączenie dwóch różnych materiałów w jednej strukturze współosiowej. Dzięki synergii właściwości mechanicznych i korozyjnych użytych materiałów możliwe jest uzyskanie

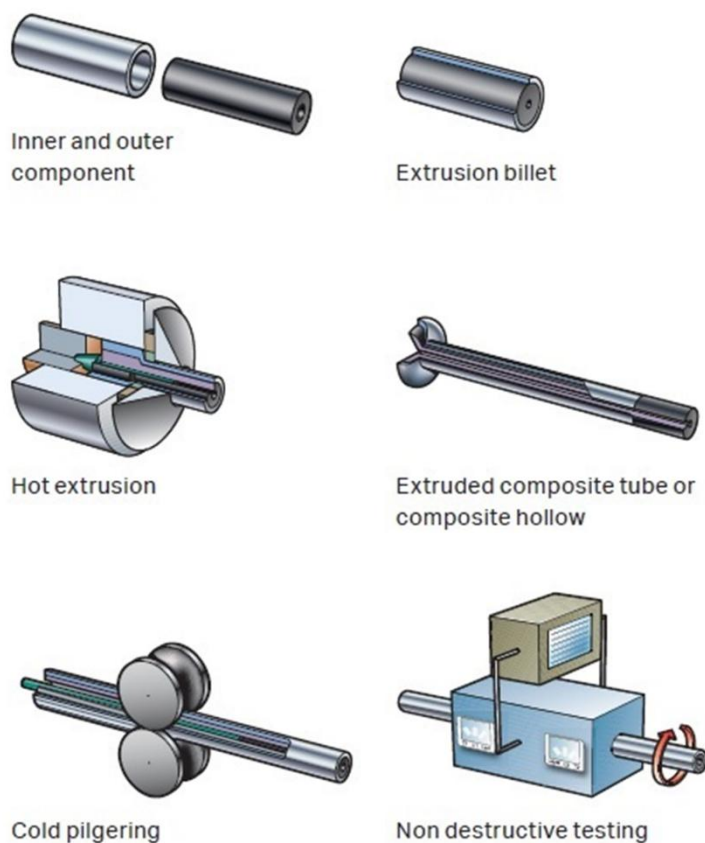
pożądanych parametrów użytkowych. W praktyce przemysłowej stosuje się różne metody produkcji, do których należą walcowanie zgrzewające, współwytłaczanie (co-extrusion), spiekanie proszkowe oraz metalurgiczne napawanie. Najczęściej stosowaną metodą jest walcowanie zgrzewające. Proces ten polega na dokładnym spasowaniu rur wewnętrznej i zewnętrznej, a następnie ich walcowaniu w warunkach wysokiej temperatury i nacisku, co prowadzi do utworzenia spójnego połączenia metalurgicznego bez udziału spoiwa. W wyniku walcowania powstaje warstwa przejściowa o wysokiej jednorodności strukturalnej, minimalizująca ryzyko rozwarstwienia i zwiększająca bezpieczeństwo eksploatacyjne gotowego produktu [15].

Alternatywnie stosuje się współwytłaczanie, w którym obie rury są nagrzewane i jednocześnie przeciągane przez zestaw matryc formujących. Proces ten umożliwia uzyskanie ścisłego przylegania międzywarstwowego oraz bardziej kontrolowany rozkład naprężeń szczątkowych, co przekłada się na lepszą charakterystykę zmęzeniową komponentu. Metoda ta jest szczególnie przydatna przy produkcji rur o małych średnicach lub gdy wymagana jest wysoka precyzja wymiarowa. W bardziej wymagających zastosowaniach, np. w przemyśle jądrowym czy chemicznym, stosuje się napawanie laserowe lub łukowe do tworzenia warstwy zewnętrznej. W tym procesie materiał stopowy наносzony jest warstwowo na powierzchnię bazową za pomocą energii cieplnej, co umożliwia precyzyjne sterowanie grubością warstwy oraz jej właściwościami mikrostrukturalnymi. Ze względu na wysokie koszty i wymagania technologiczne, metoda ta stosowana jest w przypadkach o szczególnie wysokich wymaganiach eksploatacyjnych [16].

Integralnym etapem połączenia obu materiałów jest obróbka cieplna, której zadaniem jest homogenizacja struktury w strefie przejściowej oraz redukcja naprężeń wewnętrznych powstałych podczas łączenia. W zależności od zastosowanego materiału stosuje się wyżarzanie zmiękczające, wyżarzanie normalizujące lub procesy starzenia. Po zakończeniu właściwego procesu wytwarzania rury poddawane są kalibracji wymiarowej, cięciu na długości handlowe oraz, w razie potrzeby, obróbce końcówek, np. fazowaniu lub gwintowaniu. Gotowe produkty przechodzą kompleksową kontrolę jakości obejmującą pomiary geometryczne, badania metalograficzne oraz próby nieniszczące, w tym badania ultradźwiękowe i prądami wirowymi, mające na celu wykrycie ewentualnych wad połączenia [9].

Dobór odpowiedniej technologii wytwarzania zależy od wymaganej kombinacji właściwości użytkowych, przeznaczenia rur oraz uwarunkowań ekonomicznych. Niezwykle istotne jest zapewnienie jednorodności strukturalnej na styku obu materiałów, gdyż to właśnie

ta strefa w największym stopniu determinuje trwałość i niezawodność rury kompozytowej w warunkach eksploatacyjnych. Schemat procesu wytwarzania rur kompozytowych przedstawiono na rysunku 3 [9].



rys. 3. Sposób wytwarzania rur kompozytowych [9]

2.2.1. Odlewanie komponentów i wstępna obróbka

Proces wytwarzania rur kompozytowych rozpoczyna się od przygotowania poszczególnych warstw materiałowych, które w kolejnych etapach zostaną połączone w jednolitą strukturę współosiową. Komponenty te, posiadające różne właściwości materiałowe, muszą zostać wytworzone w sposób zapewniający ich dalsze połączenie przy zachowaniu pełnej integralności strukturalnej. Kluczowym etapem jest odlewanie i wstępna obróbka, które mają na celu uzyskanie odpowiednich kształtów, wymiarów oraz mikrostruktury materiałów [19].

Warstwa wewnętrzna, odpowiedzialna za nośność konstrukcyjną, wykonywana jest zazwyczaj ze stali ferrytyczno-perlitycznej, takiej jak P265GH. Jej głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń mechanicznych i termicznych, dlatego już na etapie odlewania uwzględnia się konieczność uzyskania jednorodnej struktury, równomiernego rozkładu ziaren oraz eliminacji wtrąceń. Odlewa się wlewki o przekroju rurowym lub pełnym, które następnie poddawane są wstępnej obróbce plastycznej, takiej jak kucie, walcowanie czy ciągnięcie wstępne, w zależności od wymagań wymiarowych i mechanicznych [19].

Warstwa zewnętrzna, pełniąca funkcję ochronną, wykonywana jest równolegle przy użyciu stali nierdzewnych, np. AISI 304L, lub specjalistycznych stopów niklowych, takich jak Sanicro 38. Na tym etapie kluczowe jest zapewnienie odpowiedniej czystości metalurgicznej oraz składu chemicznego materiału, który będzie pracował w agresywnych środowiskach korozyjnych i w podwyższonych temperaturach. Odlewanie warstwy zewnętrznej przeprowadza się przy użyciu precyzyjnych technologii kontrolujących skład kąpiel, parametry chłodzenia oraz stopień deoksydacji [20].

Po odlaniu oba komponenty przechodzą etap wstępnej obróbki plastycznej, mającej na celu nadanie im właściwego kształtu i wymiarów, co ułatwia dalszy montaż i proces wyciskania. Obróbka może obejmować walcowanie na gorąco, współbieżne ciągnięcie lub wstępne wyciskanie, w zależności od rodzaju materiału i docelowej geometrii rur. Stosowanie odpowiednich procedur cieplno-plastycznych pozwala również na poprawę mikrostruktury poprzez ujednorodnienie ziaren oraz redukcję naprężeń wewnętrznych. Na tym etapie szczególną uwagę przykładą się do wysokiej dokładności wymiarowej i gładkości powierzchni, które mają kluczowe znaczenie dla jakości późniejszego połączenia współśrodkowego. Niezbędne jest także spełnienie określonych tolerancji pasowania między rurą wewnętrzną i zewnętrzną, co bezpośrednio wpływa na efektywność procesu wyciskania oraz trwałość wiązania metalurgicznego [20, 21].

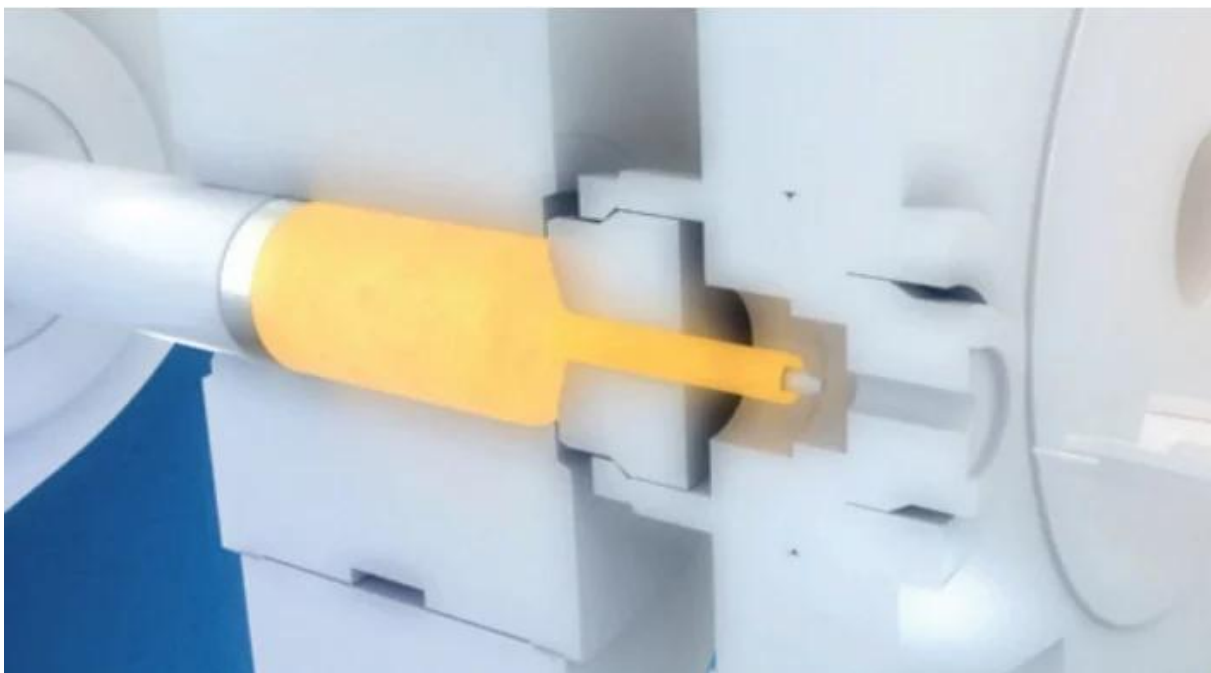
2.2.2. Łączenie komponentów i wyciskanie na gorąco

Po wstępnej obróbce mechanicznej komponenty rur kompozytowych przygotowuje się do jednego z kluczowych etapów ich wytwarzania – współosiowego łączenia warstwy wewnętrznej i zewnętrznej w jednolitą strukturę kompozytową. Rury są zestawiane w układzie współśrodkowym, co wymaga precyzyjnego dopasowania wymiarów. Odpowiedni kontakt

między warstwami na całym obwodzie jest niezbędny do uzyskania jednorodnej struktury, trwałości połączenia oraz eliminacji wad wewnętrznych [9].

W celu zapewnienia stabilnego ustawienia komponentów stosuje się pierścienie dystansowe lub inne elementy prowadzące, które utrzymują rurę wewnętrzną w osi rury zewnętrznej. Szczególną uwagę zwraca się na czystość powierzchni stykowych – obecność tlenków, zanieczyszczeń lub smarów mogłaby osłabić wiązania metalurgiczne i obniżyć jakość połączenia. Właściwe łączenie warstw odbywa się podczas procesu wyciskania na gorąco. Do wnętrza zespołu rur wprowadza się trzpień w formie precyzyjnie dopasowanego walca, który stabilizuje wymiar wewnętrzny rury i chroni ją przed deformacjami podczas intensywnego odkształcenia plastycznego. Trzpień wykonany jest z materiału odpornego na wysokie temperatury i tarcie, a jego długość odpowiada długości wyciskanego odcinka. Zespół rury zewnętrznej, rury wewnętrznej i trzpienia jest podgrzewany w piecu do temperatury plastycznego płynięcia stali, zwykle w zakresie $(1000\div 1250)^{\circ}\text{C}$, zależnie od zastosowanych materiałów. Następnie gorący układ umieszczany jest w prasie wyciskającej, gdzie przy użyciu wysokiego nacisku materiał zostaje przeciśnięty przez matrycę o żądanym profilu. W wyniku intensywnego odkształcenia plastycznego rura wewnętrzna zostaje trwale dociśnięta do rury zewnętrznej, a powierzchnie stykowe łączą się poprzez dyfuzję oraz wspólne płynięcie metalu [9, 10].

Kluczowymi parametrami procesu są prędkość wyciskania, siła nacisku oraz geometria matrycy. Zbyt szybkie wyciskanie może prowadzić do lokalnych przegrzań, natomiast zbyt wolne zwiększa ryzyko utleniania powierzchni lub nierównomiernego odkształcenia. Optymalizacja tych parametrów zapewnia równomierny rozkład naprężeń i właściwy kierunek przepływu metalu. Efektem wyciskania na gorąco jest uzyskanie rury kompozytowej o jednolitej strukturze w całym przekroju poprzecznym. Trwałe połączenie warstw umożliwia dalszą obróbkę mechaniczną i cieplną, gwarantując wymagane właściwości mechaniczne i eksploatacyjne. Proces eliminuje ryzyko delaminacji, poprawia spójność warstw i zapewnia wysoką jakość powierzchni zarówno wewnętrznej, jak i zewnętrznej. Schemat przebiegu wyciskania warstwy zewnętrznej na gorąco przedstawiono na rysunku 4 [9].



rys. 4. Wyciskanie warstwy zewnętrznej na gorąco [9]

2.2.3. Walcowanie na zimno w walcierce pielgrzymowej

Po zakończeniu procesu wyciskania na gorąco otrzymuje się tzw. wyciśniętą rurę kompozytową, której wymiary mogą jeszcze odbiegać od wartości docelowych wymaganych dla produktu końcowego. W związku z tym przed przystąpieniem do dalszej obróbki przeprowadza się szczegółową kontrolę jakości, obejmującą pomiar geometrii (średnicy zewnętrznej, grubości ścianki oraz prostoliniowości) oraz badania nieniszczące – najczęściej ultradźwiękowe – pozwalające wykryć ewentualne wady materiałowe lub separacje warstw. Kolejnym etapem produkcji jest walcowanie pielgrzymowe, zaliczane do metod przeróbki plastycznej na zimno. Proces polega na wprowadzeniu rury pomiędzy dwa walce pracujące cyklicznie – materiał zostaje ściskany i przeciągany z jednoczesnym ruchem posuwisto-zwrotnym trzpienia. Dzięki tej metodzie możliwe jest dalsze zmniejszenie średnicy zewnętrznej i grubości ścianki rury przy jednoczesnym wydłużeniu jej długości. Walcowanie odbywa się w kontrolowanych warunkach bez podgrzewania materiału, co sprzyja uzyskaniu drobnoziarnistej struktury i wysokiej precyzji wymiarowej [9, 16].

Walcowanie pielgrzymowe stosuje się przede wszystkim w celu poprawy właściwości mechanicznych (poprzez zgniot na zimno) oraz jakości powierzchni. Proces redukuje chropowatość, eliminuje mikropęknięcia i inne wady zewnętrzne, a także prowadzi do ujednoludzenia mikrostruktury w całym przekroju rury. Istotne jest również precyzyjne

kontrolowanie wymiarów geometrycznych, co ma szczególne znaczenie w zastosowaniach przemysłowych o wysokich wymaganiach tolerancyjnych [17].

Rury kompozytowe po walcowaniu na zimno charakteryzują się znacznie wyższą jakością wykonania, zarówno pod względem wizualnym, jak i funkcjonalnym. Proces ten przygotowuje je do kolejnych etapów – takich jak wyżarzanie zmiękczające, prostowanie, cięcie na wymiar oraz końcowa kontrola jakości – które poprzedzają zastosowanie rur w środowiskach eksploatacyjnych o podwyższonych wymaganiach technicznych [18].

2.2.4. Kontrola i badania nieniszczące

Na każdym etapie produkcji rur kompozytowych, zarówno po wyciskaniu na gorąco, jak i po walcowaniu na zimno, przeprowadza się kontrolę geometryczną obejmującą pomiary średnicy, grubości ścianki oraz długości rury. Równolegle dokonywana jest weryfikacja wizualna oraz w razie potrzeby badania ultradźwiękowe, umożliwiające wczesne wykrycie ewentualnych pęknięć, rozwarstwień czy innych nieciągłości [19].

Badania prądami wirowymi (ang. Eddy Current Testing, ECT) stanowią często końcowy etap kontroli jakości. Metoda ta pozwala na wykrycie wad materiałowych i nieciągłości powierzchniowych, takich jak pęknięcia czy ubytki w ściankach. Przepuszczenie prądu zmiennego przez cewki indukcyjne wytwarza pole magnetyczne, a zmiany w odpowiedzi elektromagnetycznej wskazują na obecność niejednorodności materiałowych [20].

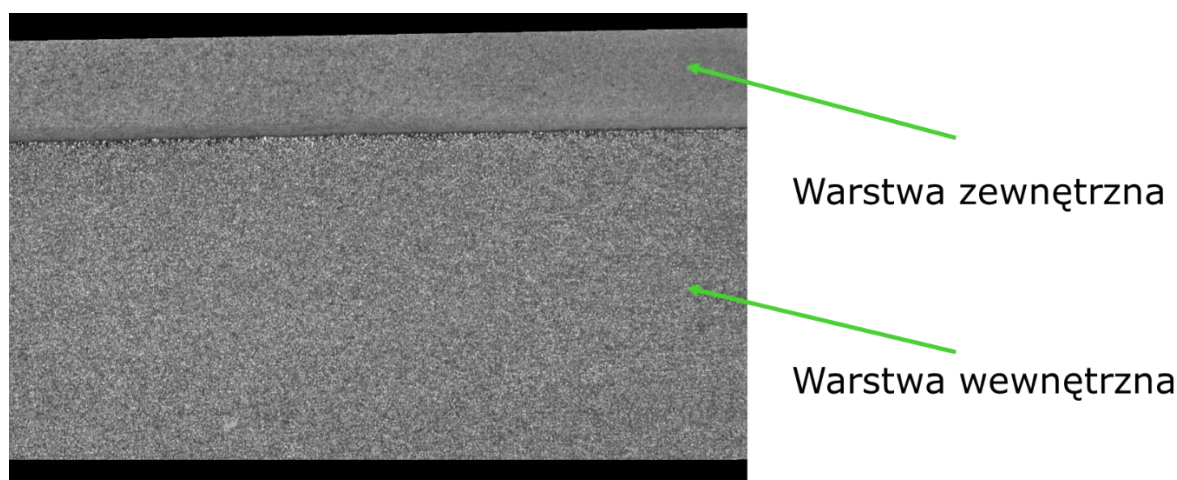
W przypadku rur grubościennych lub tam, gdzie wymagana jest bardzo wysoka pewność diagnostyki, stosuje się badania ultradźwiękowe wzdłuż całej długości rury w celu wykrycia ewentualnych rozwarstwień między warstwami oraz radiografię (RT) w newralgicznych obszarach, np. w rejonach zgrzeiny czy miejscach, w których rura była poddawana zginaniu lub spawaniu wzdłużnemu.

Oprócz badań nieniszczących, dla wybranych próbek wykonywane są również testy niszczące. Należą do nich próby rozciągania, badania twardości oraz analizy mikrostrukturalne – makro- i mikroskopowe. Ich celem jest potwierdzenie prawidłowego zespolenia obu warstw rur kompozytowych oraz weryfikacja osiągnięcia założonych parametrów technicznych [21].

2.3. Mikrostruktura rur kompozytowych

Mikrostruktura rur kompozytowych odgrywa decydującą rolę w kształtowaniu ich właściwości fizycznych, mechanicznych i korozyjnych. Koncepcja tych rozwiązań opiera się na połączeniu dwóch warstw stali o odmiennych charakterystykach: wewnętrznej (odpornej na wysokie ciśnienie i temperaturę) oraz zewnętrznej (zapewniającej odporność na korozję lub ścieranie). Kluczowe znaczenie ma metalurgiczne dopasowanie warstw, szczególnie w strefie interfejsu, gdzie wymagana jest doskonała adhezja i brak defektów, takich jak mikroszczeliny czy nieciągłości [22].

W niniejszym rozdziale analizowane są rury kompozytowe z warstwą wewnętrzną 4L7 oraz dwoma wariantami warstwy zewnętrznej: stalą Sandvik 3R12 (odpowiednik stali 304L) i stopem Sanicro 38 (pokrewnym stopowi Alloy 825). Omówiono mikrostrukturę poszczególnych stref, a także jej wpływ na właściwości eksploatacyjne rur w zastosowaniach energetycznych i petrochemicznych. Na rysunku 5 przedstawiono makrostrukturę rur dwuwarstwowych [23].



rys. 5. Makrostruktura rur dwuwarstwowej [10]

2.3.1 Mikrostruktura rur kompozytowych

Warstwa wewnętrzna rur kompozytowych, wykonana ze stali 4L7, charakteryzuje się składem chemicznym zbliżonym do klasy P265GH, z niską zawartością węgla (ok. 0,18%) oraz ograniczonymi dodatkami stopowymi (Mn, Si, śladowe ilości Cr, Ni, Mo). W stanie wyjściowym, po obróbce cieplnej i termomechanicznej, dominuje mikrostruktura ferrytyczno-

perlityczna. Perlit występuje w formie pasm lub drobnych wysepek rozproszonych w osnowie ferrytycznej, przy udziale wynoszącym zwykle kilka do kilkunastu procent. Proces wyciskania na gorąco prowadzi do rekrytalizacji dynamicznej, co sprzyja rozdrobnieniu ziaren. W strefach kontaktu z warstwą zewnętrzną mogą powstawać lokalne pasma odkształceń, jednak prawidłowo przeprowadzony proces eliminuje ryzyko mikroszczelin. Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna zapewnia wysoką przewodność cieplną, kompromis pomiędzy wytrzymałością (granica plastyczności 240÷300 MPa) a plastycznością oraz odporność na pękanie w temperaturach do (450÷500)°C [24, 25].

Warstwa zewnętrzna w wariacie Sandvik 3R12, odpowiadającym gatunkowi stali 304L, jest materiałem austenitycznym zawierającym około 18% Cr i 10% Ni przy minimalnej zawartości węgla (<0,03%). Jej mikrostruktura oparta na sieci kubicznej ściennie centrowanej (FCC) zapewnia wysoką plastyczność i odporność na korozję. Procesy wyciskania i walcowania na zimno mogą powodować umocnienie odkształceniowe, lecz niska zawartość węgla ogranicza ryzyko sensybilizacji i utraty zdolności do pasywacji [24, 25]. Warstwa ta odznacza się zdolnością do tworzenia stabilnej warstwy pasywnej, wysoką odpornością na pękanie zmęczeniowe oraz większym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej niż stale ferrytyczne. W strefie interfejsu z warstwą 4L7 obserwuje się płynny gradient pierwiastków (Fe, Cr), przy czym dyfuzja węgla pozostaje ograniczona [26, 27].

Alternatywnie stosowaną warstwą zewnętrzną jest stop Sanicro 38 (Alloy 825), zawierający ok. 38% Ni, 20% Cr, 2–3% Mo oraz dodatki Cu i Ti. Jego mikrostruktura oparta na austenicie niklowym nadaje mu wyjątkową odporność na korozję zarówno w środowiskach utleniających, jak i redukujących, w tym w obecności kwasów i chlorków. Kontrolowany proces wytwarzania minimalizuje ryzyko wytrącania niekorzystnych faz (np. węglików czy fazy σ), co jest szczególnie istotne przy ekspozycji w zakresie temperatur (600÷900)°C [28]. W porównaniu do stali ferrytycznych, Sanicro 38 odznacza się niższą przewodnością cieplną oraz wyższym współczynnikiem rozszerzalności, co wymaga uwzględnienia na etapie projektowania instalacji. W strefie interfejsu z warstwą 4L7 powstaje cienka warstwa przejściowa, w której struktura stopniowo przechodzi z ferrytycznej w austenityczną. Prawidłowe prowadzenie procesu wyciskania i chłodzenia pozwala uniknąć powstawania mikroszczelin [29, 30].

2.4. Zastosowanie rur kompozytowych w przemyśle

Rury kompozytowe dwuwarstwowe (bimetaliczne) stanowią obecnie istotne rozwiązanie konstrukcyjne w wielu sektorach przemysłu, w których wymagane jest jednocześnie sprośnienie surowym warunkom eksploatacyjnym wewnątrz i na zewnątrz rurociągu. Ich konstrukcja opiera się na połączeniu dwóch metalicznych warstw: wewnętrznej warstwy nośnej wykonanej z konwencjonalnej stali kotłowej (węglowej lub niskostopowej) oraz zewnętrznej warstwy odpornej na korozję, wytworzonej ze stali wysokostopowej bądź stopu niklu. Obie warstwy są trwale zespolone na całej długości poprzez połączenie metalurgiczne, co zapewnia integralność strukturalną oraz dobre przewodnictwo cieplne przez ściankę rury. Przykładem są rury produkowane przez firmę Sandvik (obecnie Alleima), która od lat 70. XX wieku dostarczyła już ponad 1,5 mln metrów rur typu 3R12/4L7 do ponad 250 kotłów na świecie. W oznaczeniu tym część „3R12” odnosi się do warstwy zewnętrznej wykonanej ze stali austenitycznej X2CrNi18-10 (odpowiadającej 304L), natomiast „4L7” oznacza stal kotłową P235GH/P265GH zastosowaną jako rdzeń. W warunkach bardziej agresywnych stosuje się wariant Sanicro 38/4L7, gdzie zewnętrzną warstwę stanowi stop nikłowy Sanicro 38 (odpowiadający Incoloy 825, UNS N08825), zapewniający podwyższoną odporność korozyjną, przy zachowaniu wewnętrznej warstwy nośnej ze stali kotłowej [30, 31, 40].

Zaletą rur dwuwarstwowych jest połączenie najlepszych właściwości obu materiałów – odporności korozyjnej i żarowytrzymałości stopów wysokostopowych oraz wytrzymałości mechanicznej i ciśnieniowej stali kotłowych. W praktyce oznacza to, że jedna warstwa chroni przed korozją i oddziaływaniem wysokiej temperatury, podczas gdy druga przenosi obciążenia mechaniczne i zapobiega procesom pełzania [30, 31, 33, 39]. Kluczową korzyścią ekonomiczną jest fakt, że droga stal odporna na korozję zastosowana jest jedynie jako cienka powłoka, co obniża koszty w stosunku do rur wykonanych w całości z materiałów szlachetnych. Dodatkowo rdzeń ze stali kotłowej, aprobowany do pracy pod ciśnieniem według norm ASME, zapewnia korzystniejsze parametry fizyczne niż stal nierdzewna – wyższą przewodność cieplną, niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej i mniejsze ryzyko pęknięcia naprężeniowego (SCC). W aspekcie technologicznym istotne jest także ułatwione spawanie: złącze nośne wykonywane jest w warstwie stalowej, co ogranicza zużycie drogich materiałów dodatkowych, a sam proces spawania jest bardziej niezawodny. Podobnie proces gięcia rur jest mniej problematyczny, gdyż wewnętrzna warstwa stalowa stabilizuje cienką powłokę stopową, zapobiegając jej uszkodzeniom [40].

Rury kompozytowe znalazły szerokie zastosowanie w energetyce i przemyśle chemicznym. Szczególnie ważnym obszarem są kotły sodowe w przemyśle celulozowo-papierniczym. W tego typu jednostkach spalany jest tzw. czarny ług, a w ich wnętrzu występuje smalec sodowy – stopiona mieszanina soli o temperaturze $(1000\div 1200)^{\circ}\text{C}$, powodująca wyjątkowo silną korozję stali węglowej. Już w latach 70. rozwiązano ten problem, stosując rury dwuwarstwowe, w których zewnętrzna powłoka ze stali 304L chroniła ściany kotła przed degradacją, a rdzeń stalowy przenosił obciążenia mechaniczne. Z czasem jednak ujawniła się podatność 304L na pękanie korozyjne pod naprężeniem (SCC), spowodowane resztkowymi naprężeniami wynikającymi z różnic rozszerzalności cieplnej oraz agresywnym środowiskiem alkalicznym. Problem ten zminimalizowano, wprowadzając stopy o wyższej zawartości niklu, chromu i molibdenu, takie jak Incoloy 825 czy Inconel 625, które wykazują większą odporność na korozję alkaliczną i mniejszą skłonność do SCC. Obecnie standardem w tego typu kotłach są rury typu Sanicro 38/4L7, w których zewnętrzny stop niklowy gwarantuje wysoką trwałość i bezpieczeństwo eksploatacji. Makrostrukturę ścian szczelnych kotłów wykonanych z rur kompozytowych przedstawiono na rysunku 6, ilustrującym rozwiązania stosowane m.in. w Energoinstal S.A. [36÷42].

Drugim obszarem zastosowań są kotły parowe w energetyce zawodowej i przemysłowej, w tym jednostki opalane biomasą, odpadami komunalnymi lub węglem o wysokiej zawartości siarki i chloru. Produkty spalania zawierają związki agresywnie korozyjne (siarczki, chlorki, fluorowce), które powodują intensywną degradację stali węglowej. Historycznie stosowano zabezpieczenia w postaci wykładzin ogniotrwałych lub napawania stopami niklu, jednak obecnie coraz powszechniej stosuje się rury dwuwarstwowe, np. Sandvik 3R12/4L7, które dzięki zewnętrznej warstwie austenitycznej zapewniają odporność na korozję wysokotemperaturową i osady spalinowe, a dzięki rdzeniowi ferrytowemu – nośność i żarowytrzymałość. Rozwiązanie to umożliwia zwiększenie trwałości i niezawodności instalacji przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów [44, 45].

Kolejną gałęzią przemysłu szeroko wykorzystującą rury kompozytowe jest petrochemia i rafinerie, gdzie rurociągi i wymienniki ciepła pracują w warunkach wysokich ciśnień, temperatur i agresywnych mediów procesowych. Typowym przykładem są instalacje przesyłu ropy i gazu o dużej zawartości siarkowodoru (tzw. sour service), w których cienka warstwa stopu niklowego lub stali nierdzewnej chroni przed korozją siarczkową i kwasową, a stalowy rdzeń przenosi obciążenia mechaniczne. Wymienniki ciepła, płomieniówki i podgrzewacze wykonuje się w podobnej technologii – warstwa wewnętrzna jest odporna na korozję, natomiast

zewnętrzna odpowiada za nośność, co pozwala ograniczyć koszty budowy przy zachowaniu trwałości urządzeń [32÷35].

Istotnym zagadnieniem eksploatacyjnym jest także spawanie rur kompozytowych. W praktyce przemysłowej stosuje się sekwencyjne łączenie obu warstw: najpierw rdzenia stalowego metodą TIG (141), a następnie zewnętrznej powłoki metodami MMA (111) lub MIG/MAG, z użyciem odpowiednich dodatków stopowych, takich jak druty 27.31.4.LCu czy na bazie stopu 625. Takie podejście ogranicza rozcieńczenie chemiczne w strefie łączenia i minimalizuje ryzyko defektów metalurgicznych [46÷52]. Rysunek 6 przedstawia przykład zastosowania metod hybrydowych w spawaniu ścian szczelnych kotłów, potwierdzając możliwości technologiczne współczesnego przemysłu energetycznego [10].



rys.6. Ściany szczelne kotłów spawane metodą hybrydową w Energoinstal S.A. [10]

Na rysunku 7 przedstawiono przykład zastosowania rur kompozytowych 3R12/4L7 w kotle sodowym eksploatowanym w pielni Mondi. Fotografia ilustruje praktyczne wdrożenie rozwiązań konstrukcyjnych, które zyskały uznanie w przemyśle celulozowo-papierniczym, przyczyniając się do znaczącego wydłużenia żywotności i poprawy bezpieczeństwa instalacji.



rys. 7. Rury 3R12/4L7 wykorzystane w kotle sodowym w pielni Mondi

Podsumowując, dwuwarstwowe rury kompozytowe stanowią kluczowy element nowoczesnych instalacji przemysłowych, łącząc odporność na korozję i żarowytrzymałość stopów wysokostopowych z nośnością i niezawodnością stali kotłowych. Ich zastosowanie pozwala na wydłużenie trwałości i poprawę efektywności pracy kotłów energetycznych, rurociągów przesyłowych oraz wymienników ciepła w rafineriach i zakładach chemicznych. Dzięki postępowi w technologii materiałowej i spawalniczej rury kompozytowe stały się produktem o ugruntowanej pozycji na rynku i można przewidywać dalszy wzrost ich znaczenia w przemyśle, zwłaszcza tam, gdzie decydujące są kryteria trwałości, bezpieczeństwa i ekonomiczne [46, 48].

3. Spawanie rur kompozytowych

3.1. Konwencjonalne spawanie dwuwarstwowych rur kompozytowych 3R12/4L7 i Sanicro 38/4L7

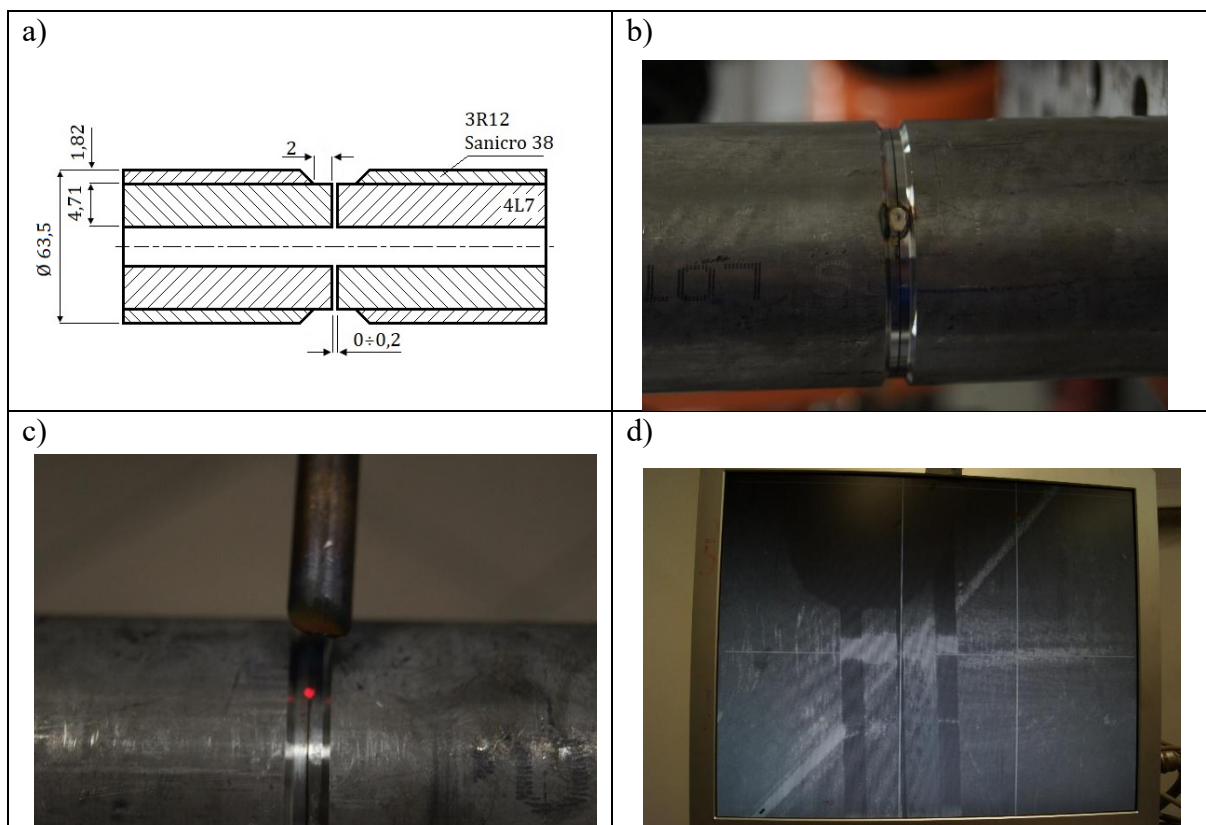
3.1.1. Przygotowanie złączy do spawania

Proces spawania dwuwarstwowych rur wymaga specjalnego przygotowania krawędzi, tak aby każda z warstw została właściwie połączona i zachowana została ciągłość zarówno wewnętrznej, jak i zewnętrznej powłoki. Przed spawaniem warstwy wewnętrznej stalowej, część zewnętrzną ze stali nierdzewnej zaleca się lokalnie usunąć w strefie brzegowej złącza co przedstawiono na rysunku 8a. Takie mechaniczne odsunięcie warstwy nierdzewnej od krawędzi (tzw. peel-off) na pewną odległość od czoła rury minimalizuje jej udział w pierwszych przebiegach spawalniczych i ogranicza niekorzystne wymieszanie materiałów. Krawędzie wewnętrznej rury stalowej 4L7 przygotowuje się z odpowiednim fazowaniem w celu zapewnienia pełnego przetopu na grubość ścianki [53, 54]. Uzyskany kształt złącza przypomina stopniowe ukosowanie: najpierw spawana będzie warstwa wewnętrzna stali węglowej, a następnie uzupełniana warstwa zewnętrzna stali odpornej na korozję. Takie przygotowanie zapewnia, że spoiny w warstwie węglowej i nierdzewnej mogą być wykonane oddzielnie, każda optymalną metodą, bez nadmiernego przegrzewania strefy połączenia metali. Jest to istotne, gdyż strefa połączenia (wiązania metalurgicznego obu warstw) ma niższą temperaturę topnienia niż sama stal nierdzewna – zbyt duży dopływ ciepła mógłby spowodować jej lokalne przetopienie i osłabienie ciągłości bimetalu [55]. Po przygotowaniu krawędzi próbki do badań zostały odcięte na żadaną długość przy użyciu przecinarki taśmowej (np. marki Bianco) w celu uzyskania prostopadłych czołowych powierzchni. Następnie wykonano obróbkę skrawaniem (toczenie/frezowanie) i szlifowanie krawędzi celem uzyskania zalecanego ukosu oraz usunięcia warstwy zewnętrznej na wymaganej długości. Przed rozpoczęciem spawania powierzchnie złączy starannie oczyszczono z tlenków, zgorzeliny i odtłuszczono. Prawidłowo przygotowane złącze zapewnia właściwe przyleganie elementów, szczelinę odpowiednią dla przetopu oraz brak zanieczyszczeń, co przekłada się na jakość spoiny [56, 57].

3.1.2. Materiały dodatkowe i zastosowane urządzenia

W celu wykonania złączy zastosowano metody spawania 141 (TIG) oraz 111 (MMA), dobierając materiały dodatkowe odpowiednie dla każdej warstwy. Warstwa wewnętrzna (stal 4L7) spawana była metodą TIG z użyciem drutu Böhlér DMO-IG, czyli miedziowanego pręta

o podwyższonej wytrzymałości do spawania metodą GTAW. Jest to niskostopowy materiał dodatkowy dostosowany do stali kotłowych i urządzeń ciśnieniowych – odpowiada on z grubsza klasie ER70S-6/ER80S-D2 zgodnie z AWS, co zapewnia dopasowanie wytrzymałości do stali 4L7. Dobór nie stopowego (unalloyed) dodatku do spawania części stalowej zapobiega nadmiernemu wzbogaceniu spoiny w austenit i gwarantuje odpowiednią ciągliwość i właściwości mechaniczne spoiny w rdzeniu ze stali węglowej [58]. Z kolei warstwa zewnętrzna ze stali nierdzewnej wymaga użycia materiału wysoko stopowego (over-alloyed) w celu zachowania odporności korozyjnej i uniknięcia kruchości po zmieszaniu z elementami ferrytycznymi. Spoinę warstwy zewnętrznej wykonywano ręcznie elektrodą otuloną (metoda 111) używając elektrod Cromarod 309MoL oraz Cromarod 383. Elektroda Cromarod 309MoL (typ E309MoL-17, otulina rutylovo-zasadowa) zawiera ok. 23% Cr, 13% Ni oraz dodatki molibdenu – jest przeznaczona do spawania połączeń niejednorodnych stali austenitycznych z ferrytycznymi. Umożliwia ona wykonanie tzw. warstwy buforowej tolerującej domieszkę Fe z warstwy wewnętrznej, dzięki czemu zapobiega pęknięciom gorącym w pierwszej warstwie spoiny na styku różnych materiałów. Natomiast elektroda Cromarod 383 (typ E383-16) to wysoko stopowy materiał odporny na korozję, zawierający ~27% Cr, ~31% Ni oraz dodatek Cu – osadza on w spoinie metal o właściwościach zbliżonych, a nawet przewyższających pod względem odporności korozyjnej stal 3R12 [59]. Zastosowanie tej elektrody w ściegach wierzchnich warstwy zewnętrznej gwarantuje utrzymanie ciągłości powłoki nierdzewnej o wysokiej odporności na agresywne środowisko spalin kotła sodowego. Producent rur zaleca dla warstwy zewnętrznej stosowanie właśnie nadstopowych austenitycznych materiałów dodatkowych (typu ER383 lub alternatywnie stopu na bazie Ni, np. Sanicro 60) celem uniknięcia zarazem korozji, jak i pęknięć gorących. Do wykonania spoin warstwy wewnętrznej wykorzystano spawarkę inwertorową Kemppi MasterTIG MLS 3000 przystosowaną do spawania metodą TIG prądem stałym (DC). Urządzenie to zapewnia stabilny łuk i precyzyjną regulację parametrów, co jest istotne przy spawaniu root-passu (spoiny graniowej) metodą 141. Spawanie elektrodowe (MMA 111) realizowano przy użyciu tego samego źródła prądu w trybie MMA (MasterTIG umożliwia także spawanie elektrodami otulonymi) lub alternatywnie dedykowanego prostownika spawalniczego o podobnych parametrach. Elektrody otulone przed użyciem suszono zgodnie z zaleceniami producenta, aby zminimalizować zawartość wodoru. Dodatkowo wykorzystano oprzyrządowanie pomocnicze, m.in. obrotniki lub uchwyty pozwalające na rotację próbki, tak by spawanie mogło być prowadzone w dogodnej pozycji [60].



rys. 8. Przygotowanie złączy do spawania – a i b; pozycjonowanie lasera dyskowego – c i d

3.1.3. Parametry procesu spawania metodami 141 i 111

Kluczowym aspektem konwencjonalnego spawania rur dwuwarstwowych jest kontrola parametrów spawania tak, aby zapewnić pełny przetop warstwy wewnętrznej oraz nieuszkodzenie warstwy zewnętrznej. Spawanie warstwy wewnętrznej (stal 4L7) metodą TIG 141 wykonano zazwyczaj z biegunowością DC- (elektroda ujemna) i natężeniem prądu rzędu 90–120 A (w zależności od grubości ścianki i przygotowania krawędzi). Napięcie łuku utrzymywano na poziomie około 12 V, co odpowiada krótkiemu, stabilnemu łukowi sprzyjającemu wtopieniu bez nadmiernego przepalania. Jako gaz osłonowy zastosowano czysty argon techniczny (kl. I) o przepływie ~8–10 l/min. Do podawania materiału dodatkowego (drutu Böhler DMO-IG o średnicy 2,0 lub 2,4 mm) używano techniki ręcznej – spawacz dodawał stopniowo drut do jeziora spawalniczego, kontrolując jego wielkość i kształt. Parametry dobrano dość restrykcyjnie, tak aby liniowa energia spawania nie przekraczała ~2,5 kJ/mm w warstwie węglowej; zgodnie z wytycznymi producenta rur zwiększenie energii liniowej jest dopuszczalne tylko pod warunkiem większego usunięcia powłoki nierdzewnej od krawędzi. Spoinę warstwy wewnętrznej wykonano najczęściej w dwóch przejściach: pierwszy ścieg graniowy (root) od wewnątrz z pełnym przetopem, a następnie ewentualny drugi ścieg

wypełniający od zewnątrz od strony stali węglowej (w przypadku grubszych ścianek) – oba metodą TIG. Tak zrealizowane połączenie części wewnętrznej stanowi szczelną i wytrzymałą spoinę łączącą warstwy 4L7 obu rur na całej grubości [61, 62].

Po zakończeniu spawania warstwy wewnętrznej, przed przystąpieniem do spawania warstwy zewnętrznej, kontrolowano temperaturę międzyściegową. Istotne jest, aby przed napawaniem warstwy nierdzewnej złącze ostygło poniżej maksymalnej zalecanej temperatury międzyściegowej $\sim 150^{\circ}\text{C}$. Ogranicza to naprężenia i minimalizuje czas przebywania austenitycznej spoiny w zakresie temperatur sprzyjających powstawaniu pęknięć krystalizacyjnych. Spawanie warstwy zewnętrznej metodą MMA 111 realizowano zazwyczaj na 2–3 ściegi (w zależności od grubości powłoki nierdzewnej, zwykle $\sim 1,5\text{--}2\text{ mm}$). Pierwszy ścieg napawany (warstwa buforowa) wykonywano elektrodą 309MoL, prowadząc krótki łuk przy natężeniu prądu $\sim 80\text{--}100\text{ A}$ (dla elektrody $\varnothing 2,5\text{ mm}$; większe średnice $3,2\text{ mm}$ wymagały prądu $\sim 110\text{--}120\text{ A}$). Napięcie łuku w metodzie 111 wynosiło ok. $20\text{--}22\text{ V}$. Taki reżim parametrów zapewnia stosunkowo niewielką głębokość wtopienia – co jest pożądane, aby nowy ścieg nie przetopił nadmiernie już zespawanej warstwy wewnętrznej i nie uszczuplił przekroju nośnego stali węglowej. Z tego powodu przy spawaniu ręcznym preferuje się elektrody otulone, gdyż dają one płytszy przetop i łatwiej kontrolować nimi ilość wprowadzanego ciepła niż np. metodą MIG/MAG. Ścieg buforowy 309MoL tworzy przejściową spoinę austenityczną tolerującą domieszkę żelaza ze stali 4L7, co zabezpiecza przed pęknięciami i zapewnia dobre połączenie z warstwą nierdzewną. Kolejne ściegi (jeden lub dwa) wykonano elektrodą Cromarod 383, która dostarcza metal o wyższej zawartości stopowych dodatków (Ni, Cr, Cu). Parametry prądu pozostawały zbliżone ($90\text{--}110\text{ A}$), a spawanie prowadzono z zachowaniem maksymalnej energii liniowej rzędu $1,0\text{ kJ/mm}$ dla części nierdzewnej. Temperaturę międzyściegową utrzymywano poniżej 150°C w trakcie układania kolejnych warstw stali 3R12 (w przypadku spoin zewnętrznych ze stopu niklowego Sanicro 38 zaleca się jeszcze niższą temperaturę międzyściegową, np. 100°C). Po zakończeniu spawania złącze pozostawiono do powolnego ostygnięcia na powietrzu; nie było wymagane odprężanie cieplne, jako że zastosowane materiały (stal 304L i stop 825) nie ulegają hartowaniu, a naprężenia spawalnicze mieszczą się w akceptowalnym zakresie.[63]

3.2. Napawanie hybrydowe (łączenie wiązki laserowej i łuku MAG) oraz napawanie laserowe

Napawanie hybrydowe (Laser-MAG) laserowo-łukowe polega na jednoczesnym wykorzystaniu dwóch źródeł ciepła, skupionej wiązki laserowej oraz łuku spawalniczego (np. metodą MAG) – działających na wspólne jeziorko spawalnicze. W procesie tym laser generuje w materiale głęboką i wąską kapilarną szczelinę (tzw. *keyhole*), zapewniając bardzo głęboki przetop, natomiast łuk MAG topi materiał dodatkowy (drut spawalniczy) i uzupełnia jeziorko, zwiększając tolerancję na niepełne przyleganie i różnice w szczelinie łączenia. Dzięki połączeniu dwóch technik uzyskuje się jednocześnie zalety obu metod: laser dostarcza energię o wysokiej gęstości mocy w wąski obszar, zaś proces łukowy wprowadza dodatek metalu i stabilizuje proces spawania. Synergia ta skutkuje większą szybkością spawania, głębszym przetopem oraz lepszą jakością spoiny, niż jest to możliwe w metodach konwencjonalnych [64].

Charakterystyczne cechy napawania hybrydowego Laser-MAG (w porównaniu ze spawaniem samym łukiem elektrycznym) to m.in. znacznie węższa spoina i mniejsza strefa wpływu ciepła (SWC/HAZ), nawet kilkukrotnie mniejsze zużycie materiału dodatkowego (drutu spawalniczego) oraz dużo większa prędkość spawania (rzędu kilku m/min). Co ważne, proces ten pozwala uzyskać pełny przetop grubych elementów już w jednym przejściu spawalniczym – odnotowano pełne przetopienie złączy nawet przy łączeniu elementów o znacznie różniących się grubościach (np. rura 3 mm z płaskownikiem 8 mm). Dzięki niższemu dopływowi ciepła do materiału minimalizowane są odkształcenia spawalnicze i naprężenia własne, co przekłada się na wyższą jakość złącza oraz właściwości mechaniczne zbliżone do materiału rodzimego [65]. Dodatkowo, hybrydowa technika Laser-MAG cechuje się wysoką efektywnością – łączne wykorzystanie obu źródeł ciepła pozwala zredukować jednostkowe zużycie energii nawet o około 50% przy zachowaniu wymaganej głębokości wtopienia. Zastosowanie tej metody wymaga precyzyjnego zautomatyzowanego stanowiska (m.in. z uwagi na wymogi bezpieczeństwa i dokładność prowadzenia wiązki laserowej), jednak korzyści w postaci zwiększonej wydajności procesu, wysokiej jakości spoin oraz ograniczenia strefy wpływu ciepła są bardzo znaczące [66]. Technologia spawania hybrydowego Laser-MAG znajduje już zastosowanie w przemyśle – np. przy produkcji paneli ścian szczelnych kotłów energetycznych ze stali nowej generacji odnotowano istotne skrócenie czasu spawania i poprawę jakości złączy. Należy podkreślić, że metoda ta jest również przedmiotem bieżących badań pod kątem zastosowania do łączenia rur kompozytowych i posiada duży potencjał

wdrożeniowy w tym obszarze (m.in. ze względu na możliwość uzyskania wysokiej jakości złączy bimetalicznych) [67].

Napawanie laserowe to proces wykorzystujący wysokoenergetyczny laser jako źródło ciepła do wytworzenia na powierzchni elementu warstwy materiału dodatkowego o pożądanych właściwościach. W technice tej wiązka laserowa jest skupiana na niewielkim obszarze powierzchni detalu, powodując jego lokalne stopienie, jednocześnie do tego obszaru podawany jest materiał dodatkowy – najczęściej w postaci proszku metalowego przenoszonego gazem obojętnym lub ciągłego drutu – który topi się i łączy metalurgicznie z podłożem, tworząc napoinę (nową warstwę) [68]. Proces napawania laserowego umożliwia precyzyjne nadtopienie jedynie cienkiej warstwy materiału rodzimego, co skutkuje niewielkim udziałem podłoża w napoinie i minimalną strefą wpływu ciepła. Dzięki temu uzyskuje się powłoki o zwartej strukturze, mocnym połączeniu z podłożem i ograniczonej grubości (zazwyczaj wystarczają 1–2 warstwy napoiny) przy znikomych odkształceniach termicznych elementu. Laserowe napawanie pozwala nakładać warstwy odporne na zużycie, ścieranie i korozję, znacznie wydłużając żywotność drogich lub krytycznych części maszyn i urządzeń – jest stosowane zarówno do regeneracji zużytych powierzchni (naprawa zamiast kosztownej wymiany całego elementu), jak i do wytwarzania nowych powłok ochronnych na elementach eksploatowanych w środowiskach agresywnych. Przykładowo, w przemyśle energetycznym napawanie laserowe wykorzystuje się do nanoszenia odpornych na korozję i erozję powłok na elementy kotłów lub turbin, co pozwala znacząco obniżyć koszty utrzymania i poprawić niezawodność tych urządzeń. Charakterystyczne zalety napawania laserowego to znakomite właściwości metalurgiczne napoin – odznaczają się one wysoką twardością i gęstością (niską porowatością) oraz jednorodną mikrostrukturą – a także niewielkie wbudowane naprężenia własne i brak istotnych pęknięć czy odkształceń dzięki bardzo małej energii liniowej procesu. Powłoki napawane laserowo często przewyższają pod względem jakości i trwałości właściwości pierwotnego materiału części. Proces ten daje się łatwo automatyzować, co zapewnia wysoką powtarzalność oraz wydajność w warunkach przemysłowych. Jednocześnie zastosowanie nowoczesnych laserów (np. światłowodowych) oznacza wysoką sprawność energetyczną urządzeń – znaczna część pobieranej energii elektrycznej przekształcana jest bezpośrednio w użyteczne ciepło procesu, co przekłada się na niższe zużycie energii w porównaniu z tradycyjnymi metodami napawania. Napawanie laserowe postrzegane jest zatem jako technologia energooszczędna i przyjazna ekonomicznie, zwłaszcza przy długotrwałym procesie pokrywania dużych powierzchni. Podobnie jak napawania hybrydowe, metoda napawania

laserowego znajduje się obecnie w fazie intensywnych badań pod kątem zastosowania w obszarze rur kompozytowych. Potencjalnie może ona umożliwić wytwarzanie takich rur poprzez nakładanie warstwy odpornej na korozję na wewnętrznej lub zewnętrznej powierzchni rur ze stali konstrukcyjnej, jak również naprawę uszkodzonych powłok w już eksploatowanych rurach kompozytowych. Choć technologia ta nie jest jeszcze stosowana bezpośrednio do spawania rur kompozytowych, wyniki dotychczasowych prac badawczych wskazują na duże możliwości jej przyszłego wdrożenia w energetyce – oferuje ona bowiem powłoki o wysokiej jakości przy minimalnym wpływie cieplnym na strukturę rury, co jest kluczowe dla zachowania wytrzymałości i szczelności elementów ciśnieniowych [69].

Zarówno napawania hybrydowe laser-MAG, jak i napawanie laserowe reprezentują nowoczesne technologie spełniające wymagania przemysłu energetycznego w zakresie podniesienia jakości i trwałości połączeń, przy jednoczesnej poprawie efektywności energetycznej procesu. Obie metody charakteryzują się wąską strefą wpływu ciepła oraz ograniczonymi odkształceniami, co pozwala zachować właściwości materiałów łączonych lub napawanych. Dzięki głębokiemu przetopowi i stabilności procesu napawanie hybrydowe zapewnia wykonanie wysokiej jakości spoin o pełnym wtopieniu, natomiast napawanie laserowe umożliwia uzyskanie trwałych warstw ochronnych o lepszych właściwościach użytkowych niż tradycyjne napawania. Technologie te stanowią przedmiot badań ukierunkowanych na zastosowania w energetyce (m.in. dla rur kompozytowych) i wykazują duży potencjał wdrożeniowy, mogąc w przyszłości przyczynić się do zwiększenia niezawodności oraz wydłużenia żywotności elementów urządzeń energetycznych [70].

3.3. Stanowisko spawalnicze – spawanie laserowe, napawanie hybrydowe

Współczesne technologie wytwarzania i regeneracji rur kompozytowych wymagają zastosowania zaawansowanych procesów spawalniczych, spośród których szczególne znaczenie mają techniki wykorzystujące wiązkę laserową oraz rozwiązania hybrydowe łączące laser z łukiem elektrycznym. Zastosowanie tych metod przynosi szereg istotnych korzyści technologicznych, wśród których na szczególną uwagę zasługuje minimalizacja wprowadzanej energii cieplnej, precyzyjna kontrola strefy przetopu oraz znacząca poprawa jakości i trwałości uzyskiwanych połączeń. W niniejszym rozdziale szczegółowo omówiono konstrukcję i zasadę działania specjalistycznego stanowiska umożliwiającego realizację obu procesów, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań technicznych i organizacyjnych związanych z ich

implementacją w kontekście produkcji rur kompozytowych, szczególnie tych złożonych z warstwy wewnętrznej ze stali gatunku 4L7 oraz zewnętrznej wykonanej ze stali 3R12 lub stopu Sanicro 38. Na rysunku 9 znajduje się zrobotyzowane stanowisko z laserem dyskowym usytuowane w GIT-Łukasiewicz, Centrum [71].



rys. 9. Stanowisko zrobotyzowane z laserem dyskowym w GIT-Łukasiewicz Centrum Spawalnictwa

3.3.1. Ogólna charakterystyka stanowiska spawalniczego

Nowoczesne stanowisko do spawania laserowego i napawania hybrydowego stanowi złożony system technologiczny, którego poszczególne komponenty zostały zaprojektowane w celu zapewnienia optymalnych warunków realizacji procesu. Centralnym elementem układu jest źródło promieniowania laserowego, w którym najczęściej stosuje się lasery włóknowe lub CO₂ charakteryzujące się wysoką gęstością mocy. W przypadku obróbki rur kompozytowych szczególnie preferowane są lasery emitujące promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni o długości fali 1,06 μm , co wynika z ich doskonałych właściwości skupiających i minimalnego wpływu na otaczający materiał. Wymagana moc źródła laserowego jest ściśle związana

z parametrami technologicznymi procesu i dla typowych zastosowań obejmujących spawanie obwodowe rur o grubości ścianki 4-6 mm mieści się w zakresie od 2 do 10 kW, przy czym dokładna wartość zależy od wielkości elementu oraz pożądanego tempa przetopu [72].

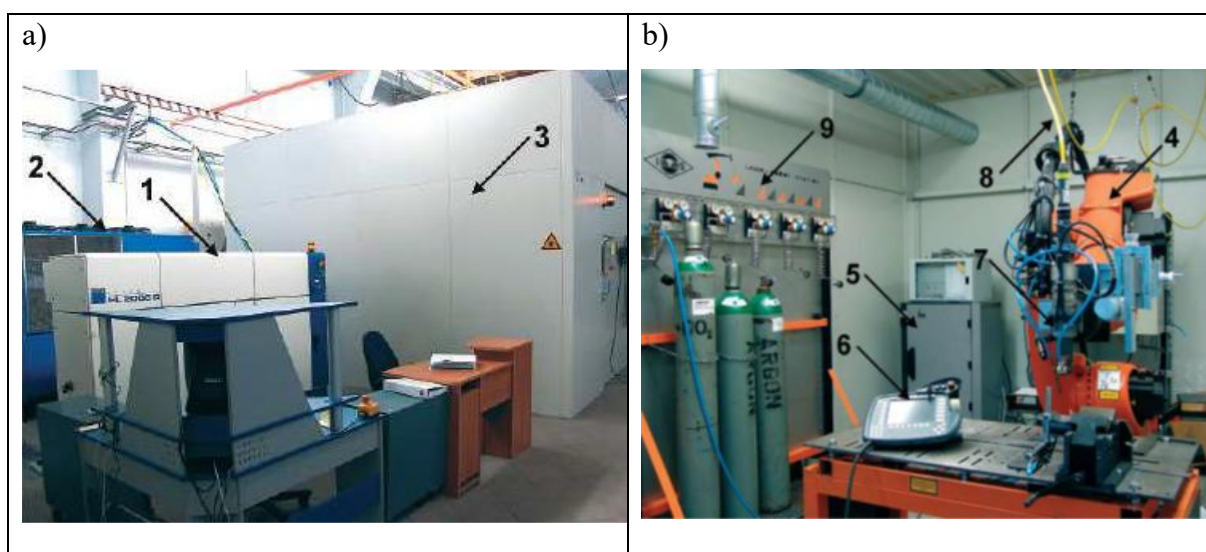
Integralną częścią stanowiska jest system napawania hybrydowego, który łączy w sobie zalety techniki laserowej i konwencjonalnego spawania łukowego MAG. Konfiguracja ta obejmuje standardowy półautomat spawalniczy z ciągłym podawaniem drutu elektrodowego oraz specjalistyczny palnik hybrydowy, którego zadaniem jest precyzyjna integracja wiązki laserowej z jeziorem ciekłego metalu wytworzonym przez łuk elektryczny. Kluczowym elementem zapewniającym prawidłową synchronizację procesu jest zaawansowany system sterowania wyposażony w sterownik główny (Master Control), który w czasie rzeczywistym koordynuje parametry zarówno wiązki laserowej (moc, położenie ogniska), jak i procesu łukowego (wartość prądu, napięcie, prędkość podawania drutu) [73].

Niezwykle istotnym aspektem funkcjonalnym stanowiska jest precyzyjny układ pozycjonujący i manipulatory, co przedstawiono na rysunku 8c, 8d, które umożliwiają dokładne ustawienie elementów względem narzędzia spawalniczego. Specjalistyczny uchwyt spawalniczy wyposażony w mechanizmy regulacji kąta natarcia pozwala na optymalne ustawienie zarówno wiązki laserowej, jak i dyszy spawalniczej, co ma kluczowe znaczenie dla prawidłowej koordynacji obu źródeł energii w obszarze jeziorka spawalniczego. W przypadku spawania obwodowego rur stosuje się najczęściej manipulator rurowy (obrotnik), który zapewnia jednostajny obrót elementu wokół jego osi ze stałą prędkością liniową, gwarantując równomierny przetop na całym obwodzie. Alternatywne rozwiązanie, stosowane szczególnie w przypadku elementów o dużych gabarytach, zakłada przemieszczanie głowicy spawalniczej wokół nieruchomej rury. Dodatkowym elementem zwiększającym precyzję procesu jest system kontroli kąta i odległości palnika, wykorzystujący czujniki laserowe lub zaawansowane urządzenia wizyjne, które umożliwiają dynamiczną korektę trajektorii spawania w przypadku wystąpienia niewielkich odchyłek geometrycznych krawędzi łączonych elementów [74].

Kolejnym krytycznym elementem stanowiska jest system ochrony gazowej, którego prawidłowe funkcjonowanie ma fundamentalne znaczenie dla jakości uzyskiwanych połączeń. W typowych zastosowaniach stosuje się gazy osłonowe takie jak argon, hel lub ich mieszaniny, przy czym w przypadku procesów hybrydowych często wykorzystuje się argon z domieszką 2-5% CO₂. Specyfika procesu wymaga szczególnej ochrony zarówno szczeliny spawalniczej, jak i przyległych powierzchni, co ma na celu zapobieganie niepożądanemu utlenianiu stopionego metalu w wysokiej temperaturze. Jest to szczególnie istotne w przypadku spawania

materiałów austenitycznych i niklowych, gdzie nawet niewielkie wtrącenia tlenków mogą prowadzić do znaczącego obniżenia odporności korozyjnej złącza [75].

Kompletne stanowisko spawalnicze obejmuje także szereg urządzeń pomocniczych, wśród których na szczególną uwagę zasługuje system chłodzenia głowicy, niezbędny ze względu na intensywność zarówno promieniowania laserowego, jak i energii wprowadzanej przez proces łukowy. Współczesne rozwiązania techniczne często wykorzystują wydajne chłodnice cieczy lub w niektórych przypadkach systemy powietrzne. Równie istotnym elementem jest zaawansowany system monitorowania jakości spoin, który może obejmować kamery termowizyjne lub analizatory spektralne jeziora spawalniczego, umożliwiające wykrywanie w czasie rzeczywistym potencjalnych nieprawidłowości procesu, takich jak powstawanie porowatości czy lokalnych podtopień. Przykład stanowiska badawczego do zrobotyzowanego spawania laserowego przedstawiono na rysunku 10. Stanowisko to jest usytuowane w GIT-Łukasiewicz, Centrum Spawalnictwa (dawny instytut Spawalnictwa) zlokalizowany na ul. Błogosławionego Czesława w Gliwicach [76].



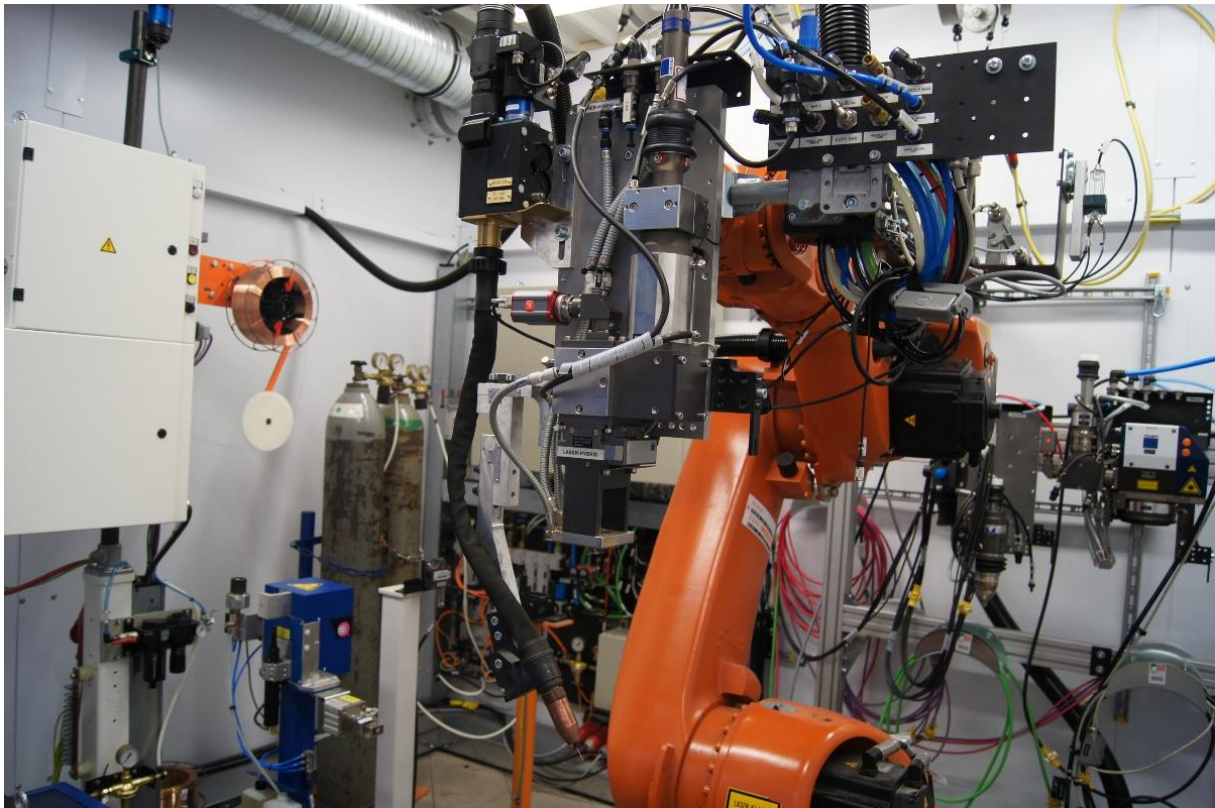
rys. 10. Stanowisko badawcze do zrobotyzowanego spawania laserowego;

- a) stanowisko badawcze do zrobotyzowanego spawania laserowego; 1 – laser Nd:YAG, 2 – chłodnica lasera, 3 – kabina ochronna; b) zrobotyzowane stanowisko spawalnicze, 4 – robot przemysłowy, 5 – układ sterowania, 6 – panel sterujący, 7 – laserowa głowica, 8 – światłowód, 9 – stacja rozprężania gazów roboczych.

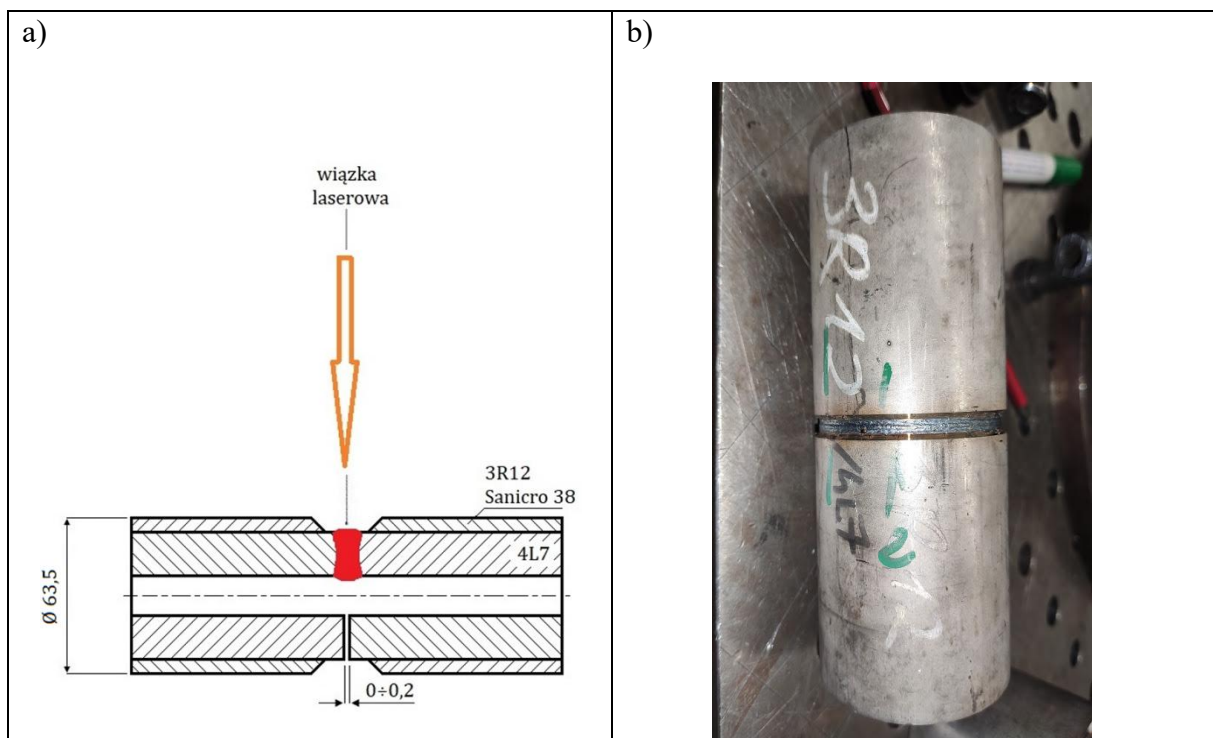
3.3.2. Spawanie laserowe rur kompozytowych

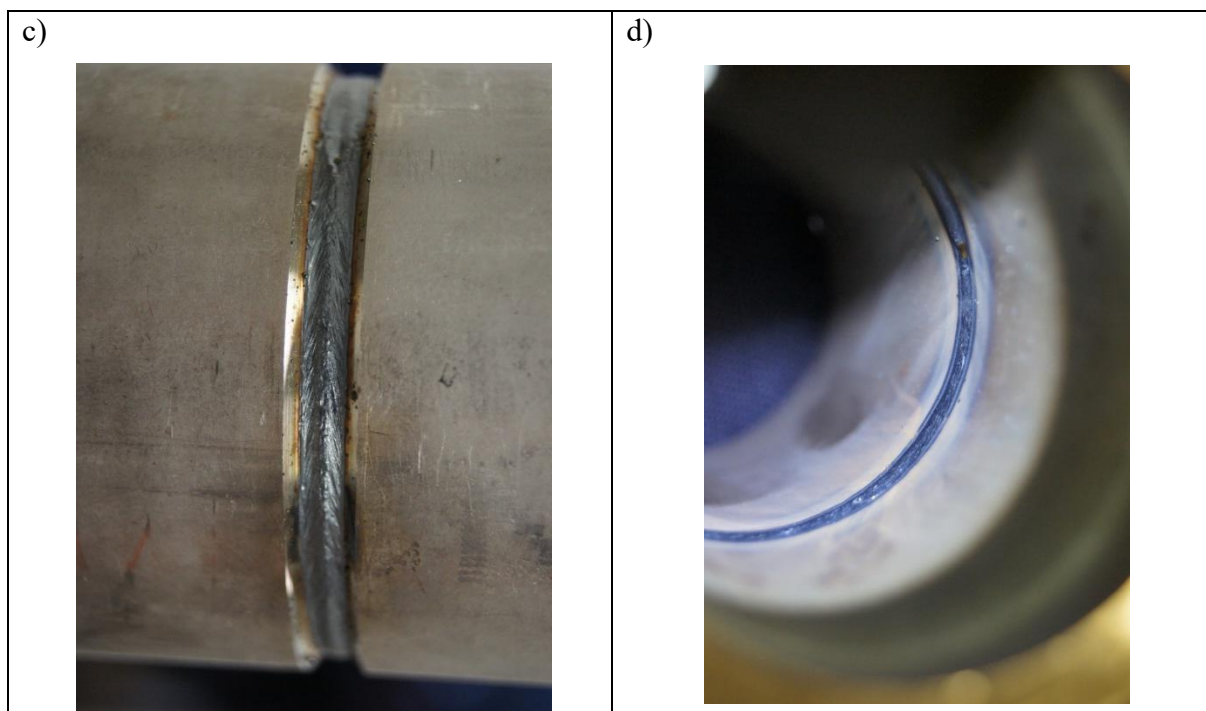
Proces spawania laserowego rur kompozytowych charakteryzuje się unikalnymi cechami wynikającymi ze specyfiki materiałów dwuwarstwowych. Kluczowym aspektem technologicznym jest precyzyjne skupienie wiązki laserowej o średnicy spotu rzędu 0,2-0,6 mm, co umożliwia osiągnięcie głębokiego przetopu przy jednoczesnym minimalnym wpływie termicznym na otaczający materiał. Szczególną uwagę należy zwrócić na kontrolę pełnego przetopu warstwy wewnętrznej wykonanej ze stali gatunku 4L7 (na rysunku, przy jednoczesnym zapobieganiu nadmiernemu wtopieniu w warstwę zewnętrzną z materiału 3R12 lub Sanicro 38. Ta delikatna równowaga wymaga szczególnej kontroli parametrów procesu ze względu na znaczne różnice we współczynnikach rozszerzalności cieplnej obu warstw, które mogą prowadzić do powstawania niepożądanych naprężeń [77].

Optymalizacja parametrów technologicznych dla procesu spawania laserowego rur kompozytowych wymaga kompleksowego podejścia uwzględniającego szereg czynników. Dla typowych grubości ścianek w zakresie 4-6 mm, zalecana moc lasera mieści się w przedziale 2-8 kW, podczas gdy prędkość spawania powinna być dostosowana w zakresie 2-10 m/min w zależności od konkretnej kombinacji materiałów. Położenie ogniska wiązki laserowej, krytyczny parametr decydujący o głębokości penetracji, powinno być ustawione na poziomie 1-2 mm pod powierzchnią łączonych elementów. Należy podkreślić, że proces ten wykazuje szczególną wrażliwość na szczelinę montażową, gdzie wartości przekraczające 0,2 mm mogą skutkować powstawaniem nieciągłości w strefie przetopu. Równie istotnym wymogiem jest zapewnienie odpowiedniej czystości krawędzi łączonych elementów, z chropowatością powierzchni nieprzekraczającą $3,2\text{ }\mu\text{m}$ [78]. Na rysunku 11 przedstawiono stanowisko do spawania HLAW usytuowane w GIT-Łukasiewicz, Centrum Spawalnictwa. Natomiast na rysunku nr 12 przedstawiono spawanie laserowe warstwy wewnętrznej rury kompozytowej spawanej laserem dyskowym.



rys. 11. Stanowisko do spawania HLAW





rys. 12. Spawanie laserowe warstwy wewnętrznej rury 3R12/4L7, Sanicro 38/4L7

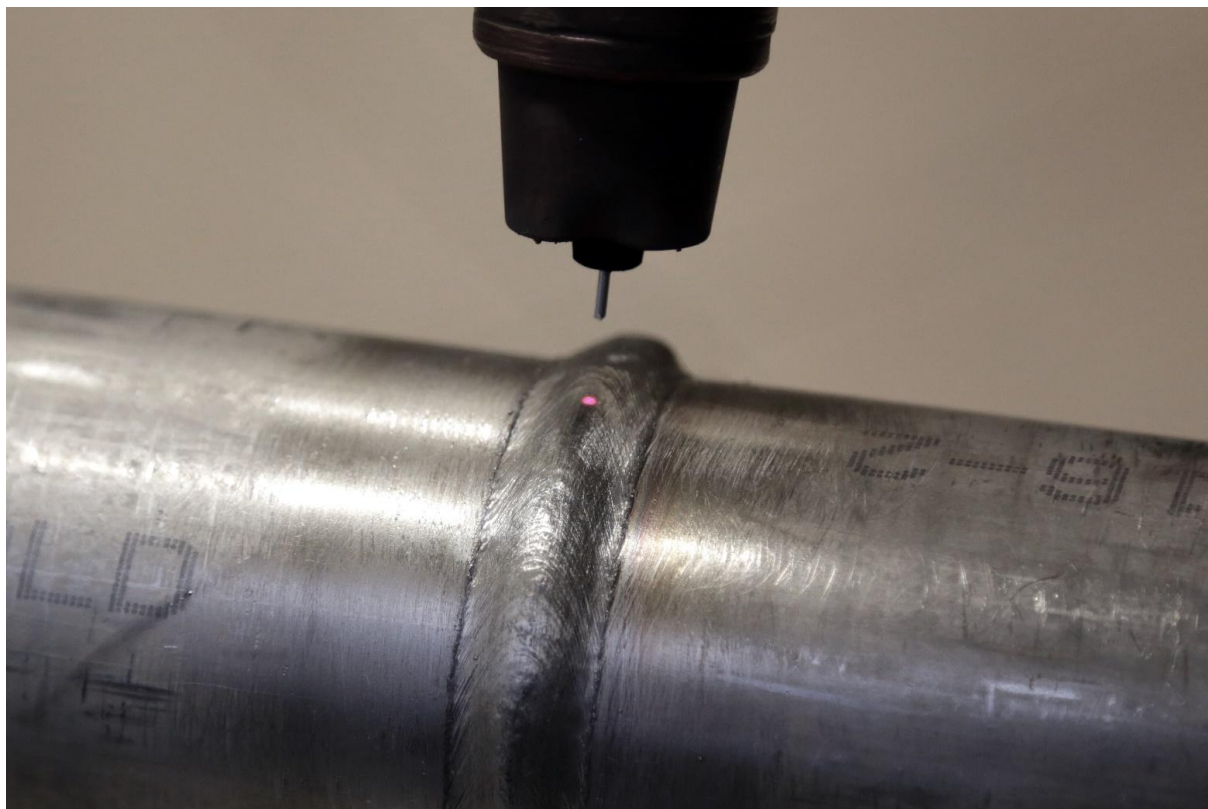
- a) schemat spawania laserowego warstwy wewnętrznej, b) widok warstwy wewnętrznej rury 3R12/4L7 od lica, c) widok warstwy wewnętrznej rury Sanicro 38/4L7 od strony lica, d) widok warstwy wewnętrznej rury 3R12/4L7 od strony grani.

3.3.3. Napawanie hybrydowe laserowo-łukowe

Technologia napawania hybrydowego łącząca wiązkę laserową z procesem MAG reprezentuje nowoczesne podejście do łączenia rur kompozytowych, synergicznie wykorzystujące zalety obu metod. Integracja głębokiego przetopu charakterystycznego dla spawania laserowego z możliwością uzupełniania materiału typową dla procesu MAG pozwala na osiągnięcie unikalnych korzyści technologicznych (rysunek 13). W praktyce przemysłowej przekłada się to na zwiększoną tolerancję na szczeliny montażowe sięgające 1-2 mm, znaczącą poprawę stabilności jeziora spawalniczego oraz redukcję naprężeń termicznych nawet o 30-40% w porównaniu z konwencjonalnym procesem MAG [80].

W kontekście optymalizacji parametrów procesu dla rur kompozytowych, badania wykazały szczególną skuteczność konfiguracji z przesunięciem wiązki laserowej względem drutu na poziomie 2-3 mm w tzw. układzie leading laser. Stosunek mocy lasera do energii wprowadzanej przez proces MAG na poziomie 1:2, na przykład 3 kW dla lasera przy 6 kW dla procesu MAG, zapewnia optymalne warunki dla większości zastosowań. W przypadku pracy ze stopami

niklowymi, szczególnie istotny jest dobór odpowiedniej atmosfery ochronnej, gdzie mieszanina argonu z 2% domieszką CO₂ wykazuje najlepsze właściwości ochronne [81].



rys. 13. Napawanie hybrydowe warstwy zewnętrznej rury 3R12/4L7

3.3.4. Zaawansowane metody kontroli jakości

Współczesne systemy monitorowania procesów spawalniczych umożliwiają kompleksową kontrolę jakości w czasie rzeczywistym. Kamery termowizyjne o zakresie pomiarowym 800-1400°C pozwalają na precyzyjne śledzenie rozkładu temperatury w strefie wpływu ciepła. Równolegle stosowane spektrometry emisji plazmy dostarczają cennych informacji o stabilności procesu, podczas gdy czujniki akustyczne wykazują szczególną skuteczność we wczesnym wykrywaniu powstawania nieciągłości takich jak porowatość.

Wyniki badań niszczących przekrojów poprzecznych złączy spawanych potwierdzają wysoką jakość procesu. Analizy mikroskopowe ujawniają całkowity brak nieciągłości w strefie przetopu oraz jednorodną mikrostrukturę w obszarze wpływu ciepła. W przypadku spoin niklowanych, pomiary twardości wykazują typowe wartości w zakresie 220-240 HV_{0,5}, co potwierdza prawidłowy przebieg procesu metalurgicznego [82].

3.3.5. Znaczenie i perspektywy rozwojowe

Zastosowanie zaawansowanych technologii spawalniczych w produkcji rur kompozytowych przynosi wymierne korzyści technologiczne i ekonomiczne. W aspekcie wydajnościowym, czas wykonania spoin obwodowych ulega skróceniu nawet o 40% w porównaniu z konwencjonalnymi metodami TIG. Równie istotna jest jakość uzyskiwanych połączeń, eliminująca w wielu przypadkach konieczność dodatkowej obróbki wykańczającej. Elastyczność technologiczna nowoczesnych rozwiązań umożliwia skuteczne łączenie różnorodnych kombinacji materiałowych, co ma szczególne znaczenie w przypadku rur kompozytowych [83].

Perspektywy rozwojowe w dziedzinie zaawansowanych technik spawalniczych koncentrują się na trzech głównych obszarach. Po pierwsze, integracja systemów sztucznej inteligencji pozwala na dynamiczną optymalizację parametrów procesu w czasie rzeczywistym. Po drugie, zastosowanie robotów współrzędnościowych o dokładności pozycjonowania $\pm 0,05$ mm otwiera nowe możliwości w zakresie precyzji wykonania. Wreszcie, rozwój specjalistycznych drutów proszkowych dedykowanych dla konkretnych kombinacji materiałów kompozytowych stanowi istotny kierunek badań materiałowych [84].

3.4. Inne metody nanoszenia powłok ochronnych i regeneracyjnych na rury energetyczne

W przemyśle energetycznym stosuje się szereg technologii napawania i natryskiwania powłok ochronnych na rury kotłowe i inne elementy ze stali ferrytycznych i niskostopowych, jako alternatywę dla metod laserowych. Poniżej omówiono wybrane konwencjonalne metody, takie jak natryskiwanie cieplne (metalizacja natryskowa), napawanie łukiem krytym (SAW) oraz napawanie łukowe konwencjonalne (przy użyciu elektrody otulonej, metod MIG/MAG oraz TIG). Każdą z tych metod scharakteryzowano pod względem zasady działania, typowych zastosowań (np. powłoki antykorozyjne, warstwy odporne na ścieranie, regeneracja rur kotłowych), efektywności, ograniczeń technologicznych oraz cech jakościowych uzyskiwanej napoiiny lub powłoki. Należy podkreślić, że poniższe rozważania dotyczą powłok na stalowych rurach energetycznych i *nie* odnoszą się do specyficznych rozwiązań typu rury kompozytowe [85].

3.4.1. Natryskiwanie cieplne (metalizacja natryskowa)

Natryskiwanie cieplne to proces polegający na nanoszeniu na powierzchnię przedmiotu stopionych cząstek materiału powłokowego przy użyciu strumienia gazu. W praktyce stosuje się różne techniki: natrysk płomieniowy, natrysk elektryczno-lukowy oraz wysokoenergetyczne metody typu HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Zasadniczo proces polega na topieniu materiału dodatkowego (w postaci proszku lub drutu) w specjalnym palniku (np. płomieniowym z mieszanką tlenu i acetylenu lub w palniku HVOF), a następnie wyrzucaniu kropeł stopionego metalu sprężonym gazem na przygotowaną (zwykle uprzednio piaskowaną) powierzchnię rury. Cząstki te zestalają się, tworząc warstwę powłoki o założonej grubości i właściwościach. W odróżnieniu od napawania spawalniczego, natrysk cieplny nie wprowadza istotnego ciepła do podłoża – temperatura rury podczas pokrywania pozostaje niska, dzięki czemu w materiale rodzimym nie powstają naprężenia, odkształcenia ani zmiany strukturalne.

Metalizację natryskową wykorzystuje się zarówno do powłok eksploatacyjnych na nowych elementach, jak i powłok regeneracyjnych na częściach zużytych. W kontekście rur energetycznych natryskiwanie cieplne służy m.in. do nanoszenia powłok antykorozyjnych (np. aluminium lub cynku na zewnętrzne powierzchnie rurociągów i wymienników ciepła) oraz powłok ochronnych przeciwzużyciowych na rury kotłowe narażone na erozję popiołową czy wysokotemperaturową korozję. Przykładowo, metodą HVOF nakłada się bardzo twarde i gęste warstwy na bazie węglików (np. węgla wolframu) lub stopów niklu, co zwiększa odporność powierzchni rur na ścieranie i korozję w warunkach wysokiej temperatury. Natrysk płomieniowy i lukowy są zaś często stosowane do metalizacji przeciwkorozyjnej – np. powłoki aluminiowe na elementach kotłów lub cynkowe na dużych konstrukcjach rurowych. Ponadto technologię natrysku wykorzystuje się przy regeneracji wymiarowej zużytych rur i walczaków kotłowych, nanosząc warstwy metalu (stali, brązu itp.) w celu odtworzenia ubytków.

Proces natryskiwania jest wydajny powierzchniowo – umożliwia szybkie pokrywanie nawet dużych obszarów rury cienką warstwą materiału. Przykładowo, grubość pojedynczej warstwy może wynosić od ok. 0,5 do 4 mm, przy czym często nakłada się powłoki rzędu dziesiątych części milimetra. Metody takie jak HVOF zapewniają wysoką gęstość powłoki i silną adhezję dzięki nadźwiękowej prędkości cząstek, jednak wymagają kosztownej aparatury i precyzyjnej kontroli parametrów. Ograniczeniem natrysku cieplnego jest względnie słabsza więź powłoki z podłożem (głównie adhezja mechaniczna, bez przetopienia podłoża)

w porównaniu z napoiną spawalniczą. Powłoki natryskowe mają zwykle nie wielką grubość i mogą zawierać niewielką porowatość (rzędu kilku procent), dlatego w zastosowaniach wymagających pełnej szczelności lub dużych obciążeń mechanicznych czasem konieczne jest ich zagęszczenie, uszczelnienie lub zastosowanie innej technologii. Mimo to, zaletą metalizacji jest brak wpływu na strukturę materiału bazowego oraz możliwość pokrywania praktycznie każdego rodzaju podłoża (stal, żeliwo, metale nieżelazne, a nawet materiały niemetaliczne) bez ryzyka deformacji. Proces wymaga jednak starannego przygotowania powierzchni (oczyszczenie, chropowacenie przez piaskowanie) oraz odpowiedniego sprzętu ochronnego dla operatora ze względu na pyły i promieniowanie ciepłe.

Powłoki natryskowe odznaczają się warstwową (lamelarną) mikrostrukturą złożoną ze splaszczonych cząstek materiału. Ich twardość i odporność zależą od użytego materiału dodatkowego – osiągalne są wartości od ok. 170 HB aż do ~67 HRC dla węglkowych powłok HVOF. Powłoka jest na ogół jednorodna chemicznie (brak rozcieńczenia materiałem podłoża, w przeciwieństwie do napoin spawalniczych) i posiada dobrą przyczepność. Pewna porowatość może działać korzystnie w warstwach przeciwzużyciowych (mogąc zatrzymywać smar lub produkty utleniania), lecz dla powłok antykorozyjnych często pożądane jest jej zminimalizowanie – nowoczesne systemy HVOF dają powłoki o porowatości <2% i wysokiej gęstości. Charakterystyczną cechą jest także brak naprężeń własnych i pęknięć w powłoce przy prawidłowej technice. W razie potrzeby natryskowane warstwy można poddawać obróbce mechanicznej (szlifowanie, toczenie) w celu uzyskania wymaganych wymiarów lub gładkości powierzchni [86].

3.4.2. Napawanie łukiem krytym (SAW)

Napawanie łukiem krytym (ang. *Submerged Arc Welding*, SAW) polega na stapianiu ciągłego drutu elektrodowego pod warstwą sypkiego topnika. Łuk elektryczny jarzy się między końcem drutu a napawaną rurą, jednak jest on całkowicie osłonięty przez topnik, który podczas procesu topi się powierzchniowo i tworzy ochronną warstwę żużla. Taki układ zapewnia stabilne warunki termiczne i osłonę jeziora przed dostępem powietrza. Materiał dodatkowy (drut) topi się wydajnie, tworząc napoinę mocno zespojoną z podłożem. Proces ten jest zazwyczaj zmechanizowany – prowadzenie ręczne jest praktycznie niemożliwe ze względu na konieczność utrzymania warstwy topnika. Napawanie łukiem krytym stosuje się na ogół w pozycji podolnej lub na obracających się elementach cylindrycznych, co pozwala utrzymać topnik na miejscu.

SAW znajduje zastosowanie przede wszystkim przy napawaniu dużych elementów i odcinków rur w warunkach warsztatowych. Dzięki bardzo wysokiej wydajności stapiania drutu i dużej głębokości wtopienia, metodę tę wybiera się do nakładania *grubych warstw* ochronnych na elementach kotłów i rurociągów pracujących w ekstremalnych warunkach. Przykładem może być fabryczne napawanie wewnętrznych powierzchni rur lub paneli ścian szczelnych kotłów warstwą stopu odpornego na korozję wysokotemperaturową (np. ze stopu na bazie niklu) przed ich zgięciem i montażem. SAW jest preferowaną technologią w przemyśle ciężkim, m.in. przy regeneracji i produkcji elementów dużych gabarytów narażonych na ścieranie, wysoką temperaturę i korozję. W energetyce metoda ta bywa wykorzystywana do odtwarzania zużytych powierzchni walczaków, kolektorów parowych czy króćców kotłowych, gdzie wymagana jest jednorodna, szczelna i gruba warstwa stopiwa na całej powierzchni. Napawanie łukiem krytym daje napoiny o gładkiej powierzchni lica i równomiernej geometrii – często stosuje się je tam, gdzie późniejsza obróbka mechaniczna napoiny jest utrudniona lub niepożądana.

Proces SAW charakteryzuje się *bardzo wysoką efektywnością* – można uzyskać jedno z najwyższych wydajności napawania wśród metod łukowych (kilka do kilkunastu kilogramów spoiwa przetopionych na godzinę). Wysoka koncentracja ciepła łuku i osłona topnika przekładają się na głęboki przetop i dobrą przyczepność napoiny. Z drugiej strony, wysoki wkład ciepła oznacza większą strefę wpływu ciepła w materiale rury oraz potencjalnie większe odkształcenia – z tego powodu SAW stosuje się raczej do elementów o znacznej grubości ścianki lub w kontrolowanych warunkach (np. napawanie spiralne na prostych odcinkach rur przed ich ukształtowaniem). Ograniczeniem jest także pozycja spawania: metoda wymaga, by napawana powierzchnia była w układzie poziomym lub stale zasypywana topnikiem, co utrudnia aplikację na zamontowanych pionowych rurach kotła w terenie. Ponadto proces generuje żużel, który po ostygnięciu trzeba usunąć. Mimo to, dzięki osłonie topnika jakość metalurgiczna napoin jest bardzo wysoka – zanieczyszczenie gazowe spoiny (porowatość, azotki) jest minimalne. Proces jest również wydajny materiałowo, gdyż niemal cały stopiony drut tworzy napoinę (straty materiału są niewielkie, głównie w postaci żużla).

Napoiny wykonane pod topnikiem cechują się jednorodnością składu chemicznego i dobrą kontrolą rozcieńczenia. Typowo, pierwszy ścieg napawany ma pewien udział stopionego metalu podłoża (tzw. *rozcieńczenie* rzędu kilkunastu procent), ale często nakłada się kolejne warstwy, aby uzyskać wierzchnią warstwę o wymaganym składzie stopu. Napoiny SAW są gęste, pozbawione porów i nieciągłości, o korzystnych właściwościach mechanicznych.

Struktura napoina zależy od użytego materiału dodatkowego – np. napawanie stelitów (stopów z węglnikami kobaltu) da warstwę bardzo odporną na ścieranie, zaś napawanie stali austenitycznej na rurze ze stali ferrytycznej utworzy warstwę buforową odporną na korozję. Jakość powierzchni po napawaniu łukiem krytym jest zazwyczaj dobra – lico jest gładkie i równe, co jest istotne dla elementów pracujących w przepływie spalin lub wody (mniejsze zaburzenia przepływu, mniejsza podatność na osadzanie zanieczyszczeń). Wadą może być ewentualna gruboziarnistość struktury napoiny wynikająca z powolnego stygnięcia przy dużym cieple wprowadzonym, jednak często właściwa obróbka cieplna (np. odpężanie) i stopniowe chłodzenie pozwalają uzyskać wymagane własności [87].

3.4.3. Napawanie łukowe elektrodą topliwą (MMA oraz MIG/MAG)

Do konwencjonalnych metod napawania łukowego *łukiem otwartym* (bez ciągłej osłony topnika) należą napawanie elektrodą otuloną (MMA, metoda 111) oraz napawanie metodą półautomatyczną MIG/MAG (metoda 135/136). W obu przypadkach stopiwo stanowi materiał topliwy – odpowiednio rdzeń elektrody otulonej lub drut spawalniczy podawany w sposób ciągły – który ulega roztopieniu w łuku elektrycznym jarzącym się nad powierzchnią napawanej rury.

Napawanie ręczne elektrodą otuloną polega na stapianiu otulonej elektrody za pomocą łuku elektrycznego. Topiąca się otulina wydziela gazy osłonowe i tworzy ochronny żużel na powierzchni napoiny, co chroni ciekłe jezioro spoiny przed wpływem powietrza. Napawanie MMA jest procesem wszechstronnym, dającym możliwość nakładania różnorodnych materiałów poprzez dobór odpowiednich elektrod otulonych. Wymaga jednak dużej wprawy spawacza do uzyskania równomiernej warstwy. Zasada działania (MIG/MAG): W metodzie MIG/MAG do napawania używa się ciągłego drutu elektrodowego podawanego ze szpuli przez uchwyt spawalniczy. Jarzący się łuk topi w sposób ciągły drut i nadtapiany powierzchniowo materiał podłoża, tworząc napoinę. Proces odbywa się w osłonie gazowej (obojętnej – MIG lub aktywnej – MAG), dzięki czemu nie powstaje żużel, a łuk jest otwarty i dobrze widoczny. Ciągłość podawania drutu sprawia, że napawanie MIG/MAG cechuje się wysoką wydajnością stapiania i pozwala na szybkie oraz równomierne pokrycie powierzchni. Metoda ta może być realizowana ręcznie lub zmechanizowana (np. napawanie orbitalne rur, automatyczne napawanie paneli kotłowych).

Napawanie elektrodą otuloną (MMA) stosowane jest często w pracach remontowych i regeneracyjnych na obiektach energetycznych w terenie, ze względu na prostotę sprzętu i dostępność elektrod. Używa się go do punktowego napawania ubytków korozyjnych na rurach kotłów, wzmacniania przetartych miejsc, napraw pęknięć czy uszkodzeń erozyjnych. Typowe jest też napawanie ręczne niewielkich elementów armatury (gniazda zaworów, krótkie odcinki rurociągów) materiałami odpornymi na korozję lub ścieranie. Z kolei metoda MIG/MAG jest powszechnie wykorzystywana przy regeneracji większych powierzchni i seryjnych naprawach: np. do nakładania warstw ze stali nierdzewnej lub stopów niklu na całe powierzchnie ścian szczelnych w kotłach (w celu zwiększenia odporności na korozję wysokotemperaturową i erozję popiołową). W praktyce przemysłowej duże panele rurowe kotłów są napawane stopami Inconel lub austenitycznymi (309/312) metodą MIG w sposób zautomatyzowany – przykładowo, w elektrowniach w USA metodą tą pokryto ok. 80% eksploatowanych ścian szczelnych, zużywając rocznie setki ton drutu proszkowego ze stopów niklu. MIG/MAG znajduje też zastosowanie w warsztatach do odbudowy zużytych czopów wałów, powierzchni czołowych, krawędzi tnących itp. – czyli wszędzie tam, gdzie potrzebna jest dość gruba (kilka milimetrów), ciągła warstwa metalu o podwyższonej trwałości. Napawanie drutem elektrodowym umożliwia naprawę lub ulepszenie powierzchni wykonanych ze stali węglowych, stopowych, a także stali nierdzewnych; dostępne są także druty do napawania żeliwa czy brązu, co rozszerza zakres aplikacji. Podsumowując, metoda MIG/MAG bywa stosowana zarówno profilaktycznie (do nałożenia ochronnej powłoki na nowe rury kotłowe przed oddaniem ich do użytku, np. warstwa austenityczna na rurach ze stali niskostopowej), jak i interwencyjnie (do regeneracji zniszczonych eksploatacją miejsc na istniejących instalacjach).

W napawaniu MMA efektywność jest ograniczona względnie wolnym procesem i przerwami na wymianę elektrod. Jednorazowo elektrodą otuloną można uzyskać warstwę o grubości typowo 1–3 mm; proces jest czasochłonny przy większych powierzchniach. Rozcieńczenie chemiczne napoiu metalem podłoża może sięgać nawet 30–40% przy pierwszej warstwie, co oznacza konieczność nakładania wielowarstwowego, jeśli wymagane są właściwości czystego materiału stopiwa. Zaletą MMA jest natomiast prostota sprzętu i możliwość pracy w trudno dostępnych miejscach oraz w różnych pozycjach (również pionowej i pułapowej, co bywa istotne przy naprawach kotłów na miejscu). Ograniczeniem jest też powstawanie żużla – po każdym ściegu wymaga usunięcia, aby nałożyć kolejny, co spowalnia pracę. W metodzie MIG/MAG efektywność jest znacznie wyższa: proces ciągły pozwala osiągać stropy topienia rzędu kilku kg drutu na godzinę przy napawaniu ręcznym,

a jeszcze więcej w procesach zmechanizowanych. Napawanie metodą 131 (Metal inert gas) jest stosunkowo łatwe do zautomatyzowania i daje powtarzalne rezultaty. Należy jednak dysponować źródłem zasilania o stabilnych parametrach i zapewnić odpowiednią osłonę gazową w warunkach polowych (wiatr może rozwiewać gaz, pogarszając jakość spoiny). Metoda MIG/MAG ma również pewne ograniczenia w pozycjach przymusowych – napawanie pułapowe jest trudne z uwagi na grawitacyjne wypływanie ciekłego metalu. Rozcieńczenie napoin MIG/MAG bywa niższe niż w MMA (zwykle ~10–20%), co poprawia właściwości warstwy już po jednym przejściu. Niemniej, przy wymaganiach wysokiej czystości chemicznej powłoki, także wykonuje się *warstwę buforową* i *warstwę wierzchnią*. Pewnym wyzwaniem może być kontrola jakości napoiny MIG/MAG: proces generuje odpryski, które zanieczyszczają powierzchnię, a szybkie chłodzenie może powodować naprężenia w napoinie. Nowoczesne warianty procesu, jak CMT (Cold Metal Transfer) czy MIG pulsacyjny, umożliwiają obniżenie wprowadzanej energii i bardziej kontrolowane napawanie cienkich warstw bez nadmiernego przegrzewania rury.

Napoiny uzyskane metodą MMA i MIG/MAG są w pełni metalurgicznie związane z podłożem (fuzja materiału powłoki z rurą). Charakteryzują się zatem bardzo dobrą przyczepnością i ciągłością – tworzą integralną część powierzchni rury. Właściwości napoin zależą od zastosowanego spoiwa: np. typowe elektrody i druty stopiwe na bazie Fe-Cr-Ni pozwalają uzyskać warstwy austenityczne odporne na korozję, natomiast druty z węglnikami chromu dają napoiny twarde (50–60 HRC) odporne na ścieranie. Struktura napoin spawalniczych może być jednak bardziej gruboziarnista niż materiał natryskiwany cieplnie, z uwagi na wolniejsze stygnięcie stopiwa. Dylatacją cieplną pomiędzy warstwą napawaną a stalowym podłożem może generować pewne naprężenia, dlatego czasem stosuje się obróbkę cieplną po napawaniu (np. odprężanie lub powolne studzenie). Jakość napoin MIG/MAG bywa bardzo dobra, choć występuje ryzyko niezgodności spawalniczych typowych dla spawania łukowego – np. wtrąceń żużlowych (zwłaszcza w MMA), porowatości (przy niewystarczającej osłonie gazowej) czy pęknięć krystalizacyjnych (przy nadmiernym naprężeniu w warstwie napoiny). Przy odpowiednim doborze parametrów i materiałów dodatkowych można jednak uzyskać napoiny spełniające surowe kryteria wytrzymałości i trwałości. Próby wytrzymałościowe pokazują, że panele kotłowe napawane stopami Inconel 625/686 zachowują wysoką wytrzymałość i plastyczność, a przyczepność warstwy do rury jest na tyle duża, że rury takie wytrzymują gięcie i eksploatację bez odwarstwiania [88].

3.4.4. Napawanie metodą TIG (GTAW)

Zasada działania: Napawanie TIG (ang. *Gas Tungsten Arc Welding*, oznaczenie 141) wykorzystuje nietopliwą elektrodę wolframową do wytworzenia łuku jarzącego się między elektrodą a napawanym elementem. Materiał dodatkowy podawany jest osobno – w postaci pręta lub drutu, ewentualnie proszku – i topi się w jeziorku utworzonym na powierzchni rury. Cały proces odbywa się w osłonie gazu obojętnego (najczęściej argonu), dzięki czemu ciekła napoina jest skutecznie chroniona przed utlenieniem. Metoda TIG może być realizowana manualnie (spawacz dodaje przetop własnoręcznie prętem) lub automatycznie – istnieją systemy orbitalnego napawania TIG, gdzie palnik porusza się wokół rury, a drut podawany jest mechanicznie. W zastosowaniach przemysłowych często używa się wariantu *Hot Wire TIG*, w którym drut jest podgrzewany prądem przed stopieniem – zwiększa to wydajność procesu.

Typowe zastosowania: Napawanie TIG jest stosowane tam, gdzie wymagana jest *wysoka precyzja i jakość* napoiny. Typowe obszary to naprawa drobnych lokalnych ubytków korozyjnych na rurach kotłowych (np. punktowe napawanie ubytków grubości 1–2 mm), napawanie materiałów trudnospawalnych lub wrażliwych (jak staliwny element armatury kotłowej, który może pękać przy bardziej agresywnym cieple – TIG daje łagodniejszy cykl cieplny). TIG jest niezastąpiony przy *napawaniu cienkich warstw* na małych średnicach rur od wewnątrz – orbitalne głowice GTAW potrafią nałożyć równomierną warstwę np. stopu Inconel wewnątrz rury o średnicy kilkudziesięciu milimetrów, gdzie inne metody by nie dotarły. Ponadto, TIG często wykorzystuje się do napawania i napraw elementów o niewielkich rozmiarach lub złożonych kształtach: np. grzybków i gniazd zaworów turbin parowych, uszkodzonych krawędzi łopatek, powierzchni uszczelniających. W energetyce znajduje zastosowanie w serwisach remontowych – gdy wykryte zostaną lokalne wżery lub pęknięcia w rurach kotła, metoda TIG pozwala precyzyjnie je wypełnić materiałem odpornym na dalszą degradację (np. stopem na bazie Cr-Ni). Ze względu na stabilność procesu, napawanie TIG bywa też używane do nanoszenia pierwszej warstwy buforowej o niskim rozcieńczeniu, na którą następnie nakłada się kolejne warstwy metodą o wyższej wydajności (hybrydowe podejście dla wymagających aplikacji).

Wydajność napawania TIG jest najniższa spośród omawianych metod łukowych. Ręczne podawanie pręta lub nawet automatyczne podawanie drutu daje mniejsze stopy stopienia niż MIG/MAG czy SAW. W jednym przejściu zazwyczaj uzyskuje się warstwę o grubości ok. 1,5–3 mm (maksymalnie do ~5 mm), co w praktyce często wymaga nałożenia kilku ściegów dla uzyskania grubszej powłoki. Proces jest też relatywnie wolny – przesuw spawarki TIG jest

mały ze względu na konieczność dokładnego kontrolowania jeziora. Ograniczeniem jest także wysoka czułość na czystość i precyzję: powierzchnia rury musi być perfekcyjnie oczyszczona z tlenków i zanieczyszczeń, a sam proces wymaga dużych umiejętności operatora lub zaawansowanej automatyki. Zaletą TIG jest natomiast *świetna kontrola nad procesem* – można precyzyjnie sterować energią liniową, kształtem jeziora i ilością dodawanego materiału. To przekłada się na minimalne rozcieńczenie napoiny materiałem podłoża, często rzędu zaledwie 5–10%. Dzięki temu już pierwsza warstwa napawana TIG posiada niemal w pełni skład i właściwości stopiwa (np. całkowicie austenitycznego), co jest istotne gdy wymagana jest odporność na korozję bez domieszki ferrytycznej stali podłoża. Kolejną zaletą jest niewielka strefa wpływu ciepła i ograniczone naprężenia – łuk TIG jest skoncentrowany, a dodatek ciepła umiarkowany, przez co ryzyko pęknięć hartowniczych czy odkształceń rury jest zminimalizowane. Wadą pozostaje koszt – proces jest pracochłonny, a sprzęt (źródła prądu wysokiej częstotliwości, systemy chłodzenia uchwytu, mechanizmy orbitalne) bywa drogi. Mimo wyższych nakładów, metoda TIG jest często uzasadniona ekonomicznie dla małych powierzchni lub krytycznych napraw, gdzie jakość jest priorytetem.

Napoiny wykonane metodą TIG uchodzą za najwyższej jakości pod względem jednorodności i czystości. Dzięki ochronie argonem są wolne od żużla i mają znikomą porowatość. Struktura takiej napoiny bywa drobnoziarnista ze względu na stosunkowo szybkie krzepnięcie małego jeziora spawalniczego. Niska zawartość domieszek z podłoża oznacza, że właściwości warstwy są zbliżone do właściwości napawanego materiału dodatkowego już po jednym ściegu. Przykładowo napawanie TIG stopem Inconel 625 na stali P265GH da wierzchnią warstwę praktycznie w 100% zbudowaną z austenitycznego stopu niklu, co gwarantuje maksymalną odporność na korozję i pełni rolę bariery dla mediów agresywnych. Twardość, odporność na ścieranie czy żarowytrzymałość napoin TIG jest zazwyczaj nieco wyższa niż analogicznych napoin wykonanych metodą MMA, ze względu na mniejsze wymieszanie ze stalą i lepszą kontrolę nad parametrami (uniknięcie przegrzania składników stopu). Napoiny TIG wyróżniają się gładkim, równym licem i brakiem podtopień na krawędziach ściegu, co zmniejsza potrzebę dodatkowej obróbki. W badaniach jakościowych często stwierdza się, że napawane warstwy TIG wykazują najmniejszą liczbę niezgodności (takich jak pory czy pęknięcia) w porównaniu z innymi procesami. Należy jednak uważać na zjawisko *wtrąceń wolframowych* – przy niewłaściwej technice cząstki elektrody wolframowej mogą się oderwać i znaleźć w napoinie, co jest niepożądane. Ogólnie jednak, dzięki swoim zaletom, napawanie TIG jest uznawane za metodę dostarczającą napoin o najwyższej jakości

metalurgicznej, często porównywalnej z napoinami laserowymi, choć przy znacznie mniejszej wydajności procesu.

Omówione powyżej metody nielaserowe stanowią ważny zestaw technik inżynierii powierzchni w sektorze energetycznym. Natryskiwanie cieplne pozwala tworzyć powłoki ochronne na rurach bez wpływu na ich strukturę, ale o nieco ograniczonej grubości i wytrzymałości mechanicznej wiązania. Napawanie łukiem krytym (SAW) zapewnia bardzo wydajne nakładanie grubych, jednorodnych warstw na duże elementy, jednak wymaga specyficznych warunków prowadzenia procesu. Metody konwencjonalne łukowe (MMA, MIG/MAG) są uniwersalne i szeroko stosowane do napraw oraz nakładania powłok odpornych na korozję i ścieranie na rury kotłowe – ich atutem jest względnie prosta implementacja i możliwość wykorzystania w terenie, kosztem pewnych ograniczeń jakościowych. Napawanie TIG z kolei oferuje najwyższą jakość i precyzję napoin, sprawdzając się w krytycznych zastosowaniach regeneracyjnych, choć jego niska wydajność ogranicza użycie do lokalnych aplikacji. Wybór odpowiedniej metody zależy od konkretnych wymagań: pożądanego materiału powłoki, grubości i rozległości warstwy, warunków pracy rury (temperatura, korozyjność środowiska, obciążenia) oraz uwarunkowań ekonomiczno-technicznych danego projektu. Możliwe jest także łączenie metod (np. natrysk cieplny jako wstępna warstwa barierowa + napawanie dla wzmocnienia, lub warstwa buforowa TIG + wydajne napawanie MIG na wierzch) w celu osiągnięcia optymalnych rezultatów. Dzięki opisanym technologiom, eksploatowane rury energetyczne mogą zyskać *drugie życie* poprzez regenerację, a nowe komponenty – znacząco wydłużoną trwałość w trudnych warunkach pracy [89].

4. Podsumowanie części teoretycznej

Rury kompozytowe stosowane w energetyce to dwuwarstwowe rury metalowe (tzw. rury bimetalowe) łączące dwa różne materiały dla uzyskania optymalnych właściwości eksploatacyjnych, których jeden materiał nie zapewniłby samodzielnie. Przykładowo rura Sandvik 3R12/4L7 składa się z zewnętrznej warstwy stali austenitycznej 3R12 (X2CrNi18-10)

gwarantującej wysoką odporność na korozję oraz wewnętrznej warstwy stali ferrytyczno-perlitycznej 4L7 (np. P235GH) zapewniającej wymaganą wytrzymałość mechaniczną i odporność na pękanie pod ciśnieniem. Podobnie rura Sandvik Sanicro 38/4L7 łączy stop niklu (Sanicro 38 – Inconel 825) ze stalą 4L7, aby uzyskać jednocześnie lepsze właściwości przewodzenia ciepła, wyższą odporność korozyjną oraz mniejszą rozszerzalność cieplną. Takie rury znajdują zastosowanie m.in. w nowoczesnych kotłach odzysknicowych, wodnorurkowych i spalarniach odpadów – np. na ściany szczelne komór paleniskowych czy przegrzewacze pary – gdzie panują agresywne warunki (wysoka temperatura, korozyjne spaliny) i wymagane są cechy, których nie spełnia jednorodny materiał. Producent rur kompozytowych zaleca łączenie ich konwencjonalnymi metodami spawalniczymi, takimi jak spawanie łukowe elektrodą otuloną (MMA), w osłonie gazów aktywnych (MAG/MIG) czy w osłonie gazów obojętnych elektrodą wolframową (TIG) a to tradycyjne techniki szeroko stosowane przy spawaniu rur stalowych, zapewniające odpowiednią jakość i szczelność złączy [91].

Nowoczesne podejścia do spajania takich rur obejmują wykorzystanie technologii laserowych oraz hybrydowych (łączyjących laser ze spawaniem łukowym). Spawanie laserowe odznacza się silnie skoncentrowanym źródłem ciepła, dzięki czemu umożliwia wykonanie głębokich i wąskich spoin o minimalnej strefie wpływu ciepła. Połączenie wiązki lasera z łukiem elektrycznym (np. metodą MAG) w procesie hybrydowym pozwala uzyskać zarówno duży przetop i precyzję charakterystyczne dla lasera, jak i skuteczne wtopienie materiału dodatkowego z procesu łukowego. Wprowadzenie spawania laserowego i hybrydowego rur kompozytowych przyczynia się do zwiększenia wydajności oraz jakości połączeń, stąd rośnie zainteresowanie tymi rozwiązaniami w sektorze energetycznym. Oprócz stosowania rur kompozytowych, innym sposobem ochrony elementów kotłów przed korozją i zużyciem jest nakładanie powłok ochronnych na zwykłe rury stalowe. W praktyce stosuje się w tym celu dwie grupy technik: napawanie oraz natryskiwanie cieplne. Napawanie (np. napawanie łukiem krytym – SAW) polega na nanoszeniu na powierzchnię rury dodatkowej warstwy poprzez stapianie materiału stopiwa (często używa się stopów niklu o wysokiej żaroodporności). Natomiast natryskiwanie cieplne, szczególnie metodą HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), pozwala osadzić na podłożu gęstą, bardzo twardą powłokę odporną na ścieranie i korozję, bez nadtapiania materiału bazowego. Obie technologie umożliwiają wytwarzanie warstw ochronnych o wysokiej trwałości w warunkach podwyższonej temperatury, skutecznie zabezpieczając elementy kotłów przed agresywnym działaniem spalin i przedłużając ich żywotność [92].

5. Cel i teza pracy

5.1. Teza

Podstawową tezą rozprawy jest założenie, że zastosowanie nowoczesnych procesów spawania laserowego oraz hybrydowego (laser + MAG) stwarza możliwość uzyskania złączy doczołowych rur kompozytowych o jakości spełniającej rygorystyczne wymagania eksploatacyjne przemysłu energetycznego. Osiągnięcie tego celu jest możliwe dzięki precyzyjnemu sterowaniu parametrami procesu, ograniczeniu strefy wpływu ciepła oraz kształtowaniu korzystnej mikrostruktury i właściwości mechanicznych spoin. W konsekwencji otwiera to drogę do wdrażania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych w warunkach przemysłowych, gdzie dotychczas dominowały konwencjonalne metody spawania łukowego.

5.2. Problem badawczy

Centralnym problemem badawczym, na którym koncentruje się niniejsza praca, jest określenie parametrów technologicznych procesów spawania laserowego i hybrydowego (laser + MAG), które umożliwią uzyskanie:

- pełnego przetopu w złączach doczołowych rur kompozytowych,
- jednorodnej i wolnej od defektów mikrostruktury,
- optymalnych właściwości mechanicznych zgodnych z wymaganiami eksploatacyjnymi sektora energetycznego.

Rozwiązanie tego problemu ma charakter interdyscyplinarny – obejmuje zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej (badanie mikrostruktury i własności mechanicznych), technologii spawania (dobór parametrów procesowych i materiałów dodatkowych) oraz eksploatacji urządzeń energetycznych (odporność na wysoką temperaturę, ciśnienie i środowisko korozyjne).

5.3. Cel rozprawy

Głównym celem rozprawy jest opracowanie innowacyjnej technologii spawania doczołowego dwuwarstwowych rur kompozytowych z wykorzystaniem metod laserowych i hybrydowych (laser + MAG), która pozwoli na wytwarzanie złączy spełniających wymagania jakościowe określone w PN-EN ISO 13919-1:2020 [93] oraz wymagania eksploatacyjne

przemysłu energetycznego. Cel ten realizowany będzie poprzez systematyczny dobór i optymalizację kluczowych parametrów procesowych (moc lasera, prędkość spawania, ustawienie ogniska wiązki, dobór gazu osłonowego, parametry prądu MAG).

Hipoteza główna

Przyjęto, że odpowiednio dobrane parametry spawania laserowego i hybrydowego umożliwiają wykonanie złączy doczołowych rur kompozytowych o wysokiej jakości, jednorodnej mikrostrukturze i wymaganych właściwościach mechanicznych, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu cieplnego i poprawie efektywności procesu technologicznego.

Hipotezy szczegółowe rozprawy:

- Optymalizacja mocy lasera, prędkości spawania, położenia ogniska wiązki i rodzaju gazu osłonowego umożliwia uzyskanie pełnego przetopu w złączach rur kompozytowych spawanych wiązką laserową.
- Zastosowanie technologii hybrydowej (laser + MAG) pozwala skutecznie wypełnić i wykończyć spoinę od strony zewnętrznej, zapewniając korzystne właściwości mechaniczne i ograniczenie odkształceń w spoinie.
- Spoiny wykonane metodą laserową i hybrydową charakteryzują się węższą strefą wpływu ciepła oraz drobnoziarnistą mikrostrukturą w porównaniu do spoin wytworzonych tradycyjnymi metodami łukowymi.
- Opracowane złącza spełniają wymagania norm jakościowych (PN-EN ISO 13919-1:2020 [93]) i wykazują odporność na warunki eksploatacyjne typowe dla przemysłu energetycznego (wysoka temperatura, ciśnienie, środowisko korozyjne).

5.4. Cel użyteczny

Cel użyteczny rozprawy wiąże się z opracowaniem i weryfikacją technologii łączenia rur kompozytowych z zastosowaniem procesów laserowych i hybrydowych, która będzie możliwa do wdrożenia w praktyce przemysłowej – w sektorze energetycznym, chemicznym i petrochemicznym.

W szczególności, celem praktycznym było:

- zwiększenie trwałości i niezawodności złączy rurowych eksploatowanych w środowiskach agresywnych chemicznie i wysokotemperaturowych (np. kotły sodowe, rurociągi rafineryjne, instalacje odsiarczania spalin),
- skrócenie czasu wykonania złączy oraz minimalizacja wpływu ciepłego na mikrostrukturę materiału,
- poprawa jakości spoin poprzez zastosowanie nowoczesnych technik spawania o wysokiej precyzji,
- stworzenie podstaw do standaryzacji procesu łączenia rur kompozytowych z wykorzystaniem technologii laserowych i hybrydowych,
- ograniczenie kosztów eksploatacyjnych poprzez wydłużenie żywotności złączy oraz zwiększenie efektywności napraw i regeneracji.

Ostateczne rezultaty badań stanowić będą podstawę do wdrożenia nowoczesnych procedur spawalniczych w zakładach przemysłowych oraz punkt wyjścia do dalszych badań nad automatyzacją i optymalizacją procesów łączenia materiałów wielowarstwowych.

6. Materiał do badań

6.1. Charakterystyka rur kompozytowych wykorzystanych w badaniach

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zastosowano rury kompozytowe produkcji Sandvik Materials Technology (obecnie funkcjonującej pod marką Alleima), stanowiące przykład zaawansowanych rozwiązań materiałowych przeznaczonych do zastosowań w sektorze energetycznym i petrochemicznym. Rury tego typu wytwarzane są w konstrukcji dwuwarstwowej, co umożliwia połączenie odmiennych właściwości w jednym przekroju poprzecznym – warstwa wewnętrzna pełni funkcję nośną i odpowiada za wytrzymałość mechaniczną, natomiast warstwa zewnętrzna zapewnia odporność korozyjną i wysokotemperaturową.

W badaniach wykorzystano dwa warianty materiałowe:

- Sanicro 38/4L7 – kompozyt łączący stop niklowo-żelazowy (Sanicro 38, odpowiednik Alloy 825) o podwyższonej odporności na korozję z ferrytyczno-perlityczną stalą 4L7 (P235GH),
- 3R12/4L7 – kompozyt stalowy oparty na połączeniu stali austenitycznej 3R12 (X2CrNi18-10, odpowiednik stali 304L) z ferrytyczną stalą kotłową 4L7.

Oba warianty charakteryzowały się identycznymi wymiarami geometrycznymi:

- średnica zewnętrzna: 63,5 mm,
- grubość ścianki: 6,53 mm,
- długość próbki: 140 mm.

Dwuwarstwowa budowa rur umożliwia ich stosowanie w środowiskach, gdzie występują jednocześnie agresywne czynniki korozyjne, wysokie temperatury oraz ciśnienie robocze. Warstwa wewnętrzna (4L7) została zaprojektowana jako nośna, o dużej odporności na pełzanie i zmęczenie cieplne, natomiast warstwa zewnętrzna w każdym z wariantów miała chronić przed oddziaływaniem czynników chemicznych i mechanicznych. Rury typu Sanicro 38/4L7 przeznaczone są do pracy w najbardziej wymagających warunkach eksploatacyjnych, takich jak kotły odzysknicowe (ang. waste heat recovery boiler lub WHRB) spalarni odpadów, gdzie występują spaliny zawierające siarkowodór, chlorowodór, tlenki azotu czy agresywne aerozole kwasowe. Dzięki zawartości niklu (ok. 38%), chromu (ok. 20%), molibdenu oraz dodatków miedzi i tytanu, warstwa Sanicro 38 wykazuje wysoką odporność na korozję szczelinową i naprężeniową. Rury typu 3R12/4L7 stanowią rozwiązanie bardziej ekonomiczne, stosowane w klasycznych blokach energetycznych opalanych paliwami konwencjonalnymi, gdzie wymagania korozyjne są niższe, lecz istotna jest dobra spawalność i stabilność strukturalna w temperaturach do ok. 600°C. Warstwa zewnętrzna (3R12) dzięki zawartości chromu i niklu zapewnia odporność na utlenianie i korzystne własności plastyczne, ułatwiające procesy wytwarzania i łączenia.

W badaniach uwzględniono także różnice w składzie chemicznym obu wariantów, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości niklu, chromu, molibdenu i tytanu, które decydują o podatności na procesy spawalnicze oraz wpływają na mikrostrukturę strefy przetopu. Aspekty

te mają kluczowe znaczenie przy projektowaniu technologii łączenia i były podstawą do dalszych badań własnych.

Zastosowanie rur kompozytowych w energetyce i petrochemii przynosi szereg wymiernych korzyści technologicznych i ekonomicznych, takich jak:

- zwiększenie trwałości eksploatacyjnej komponentów ciśnieniowych,
- redukcja częstotliwości kosztownych przestojów remontowych,
- możliwość stosowania cieńszych ścianek rur dzięki lepszym własnościom cieplnym,
- zmniejszenie masy instalacji przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości.

6.2. Materiały dodatkowe wykorzystane do łączenia rur

Odpowiedni dobór materiałów dodatkowych był niezbędnym warunkiem opracowania skutecznej technologii spawania złączy doczołowych rur kompozytowych. Ich zadaniem było nie tylko zapewnienie spójności spoiny, lecz także eliminacja ryzyka powstawania kruchych struktur intermetalicznych, które mogłyby obniżyć odporność eksploatacyjną połączenia.

6.2.1. Druty spawalnicze

Dobór drutu spawalniczego miał krytyczne znaczenie, ponieważ niewłaściwie dobrany materiał mógł prowadzić do powstania kruchych struktur intermetalicznych, nieciągłości spoiny, a nawet jej degradacji podczas eksploatacji w warunkach wysokotemperaturowych.

W procesie spawania wykorzystano następujące druty:

- Sanicro 38/4L7 – drut OK Autrod NiCrMo-3 (S Ni 6625), zgodny z normą PN-EN ISO 18274, o średnicy 1,0 mm. Dzięki wysokiej zawartości niklu, molibdenu i niobu materiał ten zapewnia odporność na korozję wżerową i naprężeniową, ogranicza ryzyko pęknięcia gorącego oraz umożliwia pracę w temperaturach powyżej 600°C.
- 3R12/4L7 – drut MIG-308LSi, zgodny z PN-EN ISO 14343:2025 [94], o średnicy 1,2 mm. Obniżona zawartość węgla i podwyższona zawartość krzemu poprawiają płynność stopiwa i ograniczają ryzyko tworzenia się ferrytu delta w spoinie.

Dobór powyższych spoiw był podyktowany koniecznością uzyskania spoin o jednorodnej mikrostrukturze, wysokiej jakości geometrycznej oraz odporności na degradację eksploatacyjną.

6.2.2. Gaz osłonowy

W procesie napawania hybrydowego (laser + MAG) zastosowano gaz osłonowy typu M12, będący mieszaniną 97,5% argonu i 2,5% CO₂, zgodnie z PN-EN ISO 14175:2009 [95]. Parametry mieszaniny dobrano w taki sposób, aby:

- zapewnić stabilność łuku w obecności wiązki laserowej,
- ograniczyć utlenianie stopiwa i powstawanie wtrąceń,
- zminimalizować ilość odprysków i mikroporów w spoinie.

Przepływ gazu ustalono na poziomie 16 l/min, co umożliwiło skuteczną ochronę strefy przetopu przed dostępem atmosfery i miało istotny wpływ na jakość lica i grani spoiny.

7. Metodyka badań

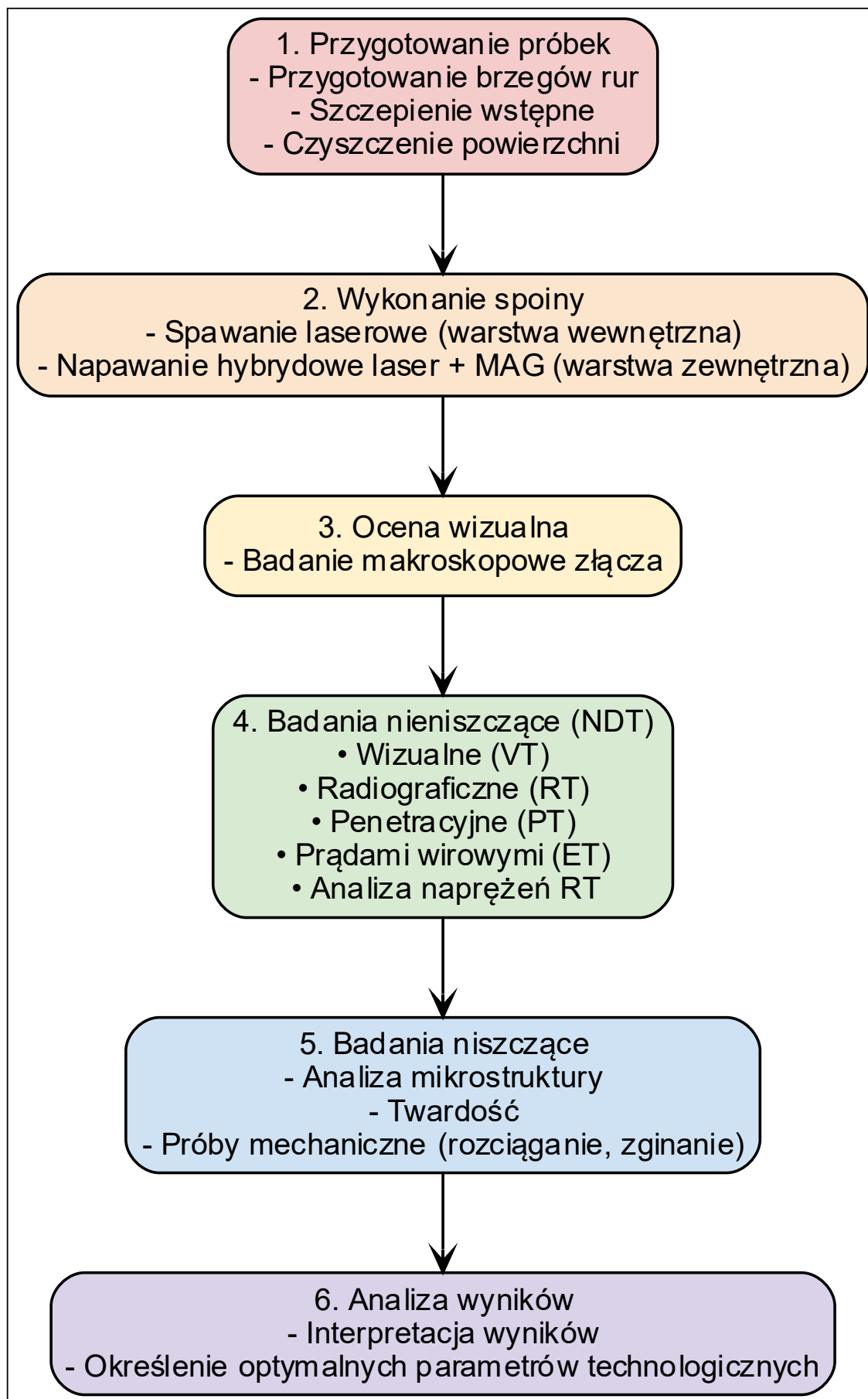
Metodyka badań obejmuje szereg procedur eksperymentalnych mających na celu ocenę jakości złącza spawanego rur kompozytowych Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7. W celu kompleksowej analizy zastosowano badania nieniszczące oraz niszczące, które pozwalają na ocenę struktury, właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej badanych materiałów.

7.1. Plan badań

Plan badań przedstawiony na rys. 14 obejmuje następujące etapy:

1. Przygotowanie próbek – mechaniczne przygotowanie brzegów rur, wstępne szczepienie oraz czyszczenie powierzchni spawanych.
2. Wykonanie spoiny – zastosowanie technologii spawania laserowego do warstwy wewnętrznej oraz napawania hybrydowego laser + MAG dla warstwy zewnętrznej.
3. Ocena wizualna – badanie makroskopowe złącza spawanego pod kątem niezgodności powierzchniowych.

4. Badania nieniszczące – kontrola jakości złączy poprzez badania wizualne, radiograficzne, penetracyjne oraz prądami wirowymi.
5. Badania niszczące – analiza mikrostruktury, pomiary twardości, badania mechaniczne (próby rozciągania, zginania).
6. Analiza wyników – interpretacja wyników badań oraz określenie optymalnych parametrów technologicznych.



Rys. 14. Plan badań pracy doktorskiej

Badania nieniszczące (NDT – Non-Destructive Testing) stanowią nieodzowny element oceny jakości złączy spawanych, umożliwiając wykrywanie wad i nieciągłości bez naruszania struktury materiału. Ich zastosowanie w przypadku rur kompozytowych Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 pozwala na wczesną identyfikację potencjalnych defektów, które mogłyby wpłynąć na integralność strukturalną połączenia i jego dalszą eksploatację w warunkach wysokiego obciążenia mechanicznego oraz środowiskowego.

W niniejszym rozdziale omówiono kluczowe metody badań nieniszczących, które zostały zastosowane w pracy:

- badania wizualne (VT),
- badania radiograficzne (RT),
- badania prądami wirowymi (ET),
- badania penetracyjne (PT),
- analiza naprężeń metodą radiograficzną.

7.2. Badania wizualne (VT)

Badania VT przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 17637:2017 [96], która określa zasady oceny wizualnej spoin oraz parametry oświetlenia, kontrastu i narzędzi optycznych. Do inspekcji zastosowano:

- lupę 10× z podziałką milimetrową,
- oświetlenie punktowe LED o natężeniu powyżej 500 lx,
- lustro inspekcyjne (dla kontroli grani spoiny),
- spoinomierz spawalniczy do pomiaru nadlewu i podtopienia.

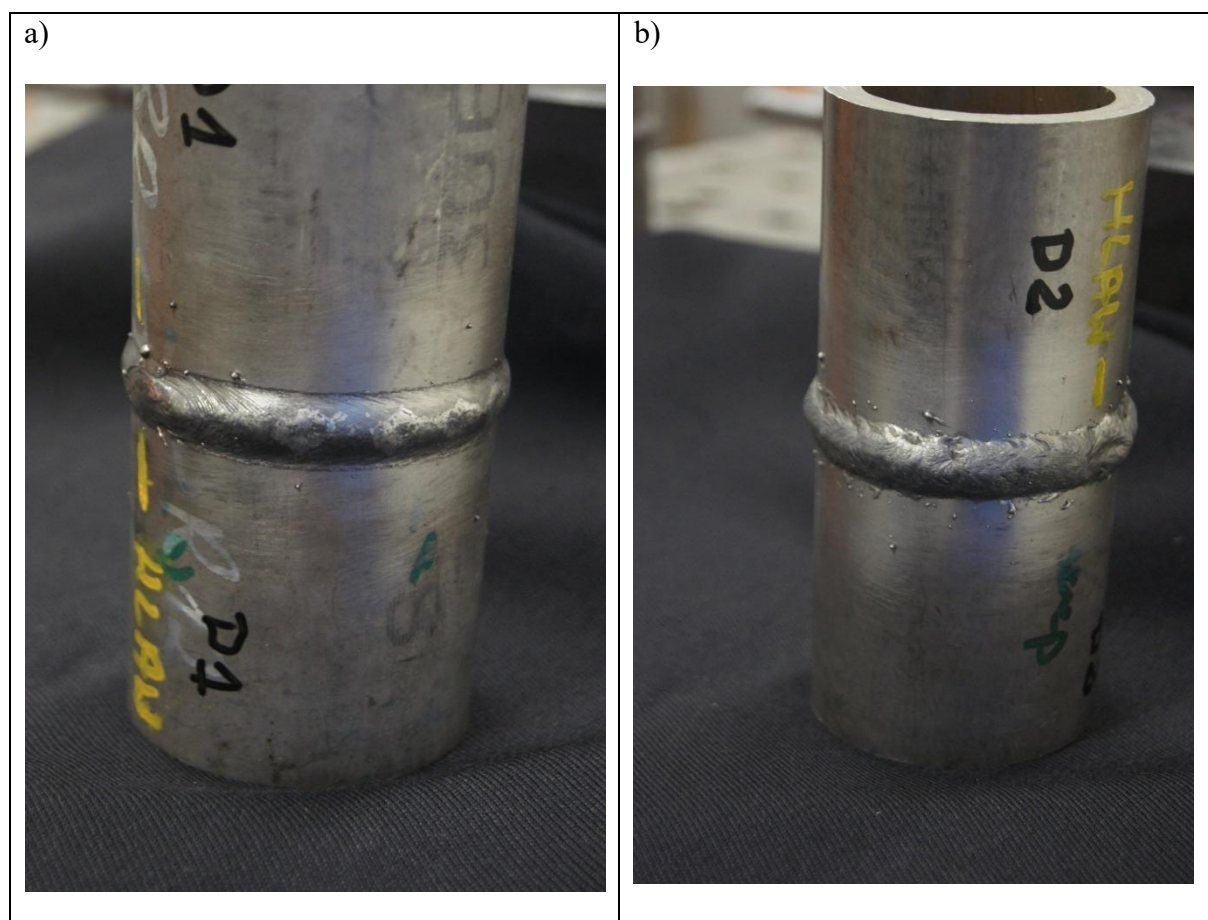
Inspekcję przeprowadzono zarówno przed, jak i po procesie spawania. W przypadku złączy doczołowych rur, szczególną uwagę poświęcono gładkości przejścia między napoiną a materiałem rodzinnym, symetrii łożyska i grani spoiny, a także obecności ewentualnych przebarwień tlenkowych, mogących świadczyć o niedostatecznej ochronie gazowej.

Badania wizualne potwierdziły poprawność przygotowania i wykonania połączeń.

Na złączach spawanych w osłonie gazu nie wykryto niezgodności, na połączeniach spawanych

bez osłony gazu występowały rozpryski (602). Brak nieakceptowalnych niezgodności powierzchniowych pozwolił na zakwalifikowanie próbek do dalszych badań nieniszczących oraz niszczących. Kształt i geometria_l_ica napoiny świadczą o stabilności procesu i dobrze dobranych parametrach technologicznych procesu (rysunek 15).

Uzyskane złącza spełniały wymagania poziomu jakości B zgodnie z normą PN-EN-ISO 13919-1 (spawanie laserowe)[93] i PN-EN ISO 12932 (napawanie hybrydowe)[118].



rys. 15. Widok warstwy zewnętrznej podczas badań wizualnych a) Rura 3R12/4L7, b) Rura Sanicro 38/4L7

7.3. Badania radiograficzne (RT)

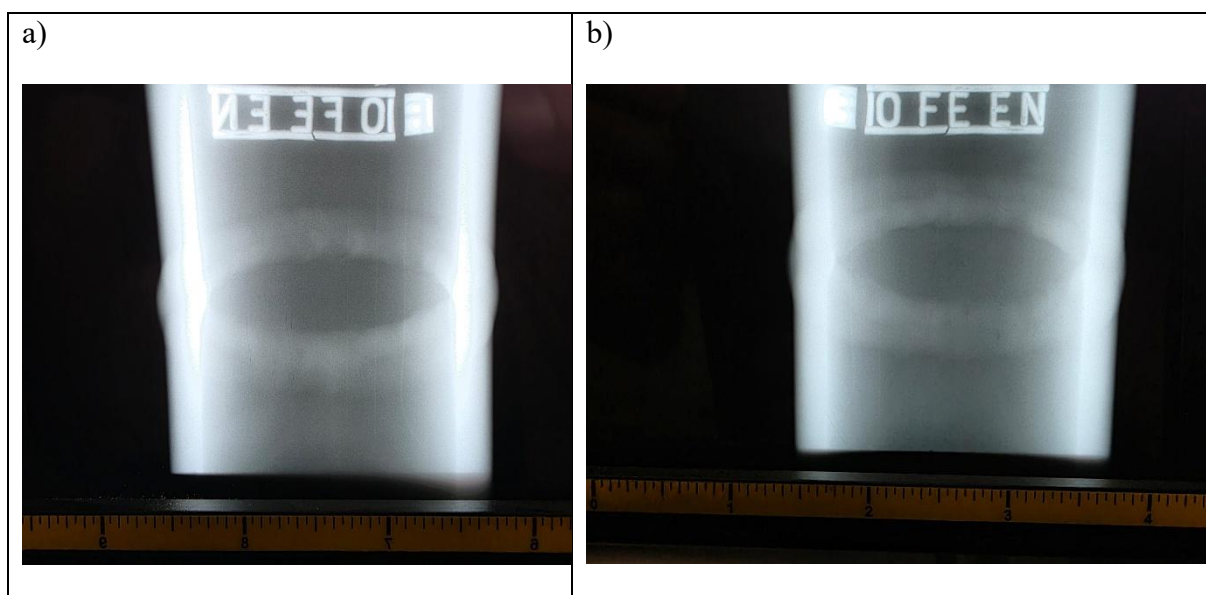
Do badań użyto lampy rentgenowskiej 220 kV, błon radiograficznych typu D4 i intensyfikatorów ołowiowych. Próbkę umieszczano na stole z ograniczoną ekspozycją promieniowania, a po zakończeniu naświetlania filmy były wywoływane chemicznie i oceniane przy użyciu negatoskopu klasy 4

Badania RT wykonano zgodnie z następującymi normami:

- PN-EN ISO 17636-1:2013 [98] – wymagania ogólne dla radiografii klasycznej,
- PN-EN ISO 10675-1:2017[99] – poziom akceptacji niezgodności (poziom 1 – najwyższy),
- PN-EN ISO 11699-1:2009[100] – rodzaje i klasy błon rentgenowskich.

Wszystkie złącza spełniły wymagania B zgodnie z normą PN-EN-ISO 13919-1 (spawanie laserowe)[93] i PN-EN ISO 12932 (napawanie hybrydowe)[118] oraz poziomu akceptacji 1. W żadnym z przypadków nie wykryto poważnych niezgodności wewnętrznych. Obserwowane nieciągłości ograniczały się do drobnych wtrąceń metalicznych i pojedynczych mikroporów, o średnicy nieprzekraczającej 0,5 mm.

Radiografia potwierdziła wysoką jakość wykonania złącza co można zaobserwować na rysunku 16a oraz 16b.



rys.16. Radiogram złącza 3R12/4L7 – a; radiogram złącza Sanicro38/4L7 – b

7.4. Badania prądami wirowymi (ET)

Do pomiarów użyto nowoczesnego defektoskopu eddy current z sondami różnicowymi oraz obwodami kompensacyjnymi, który umożliwia wykrywanie wad do głębokości 3 mm z rozdzielczością poniżej 0,2 mm. Badania prowadzono zarówno liniowo, jak i spiralnie, w celu dokładnego zeskanowania całej powierzchni spoiny oraz jej sąsiedztwa.

Badania prądami wirowymi przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm:

- PN-EN ISO 15549:2023 [101] – ogólne zasady i procedury,
- PN-EN ISO 17643:2021 [102] – specyfika badań złączy spawanych.

Badania metodą prądów wirowych (ET) nie wykazały obecności istotnych niezgodności w złączach obu analizowanych wariantów rur kompozytowych. W obszarze strefy wpływu ciepła (SWC) oraz na granicy wtopienia zarejestrowano jedynie nieliczne sygnały o charakterze anomalii, które po szczegółowej weryfikacji zostały zinterpretowane jako efekt lokalnych zmian w przewodności elektrycznej materiału, a nie rzeczywiste pęknięcia czy nieciągłości. Wszystkie zarejestrowane wskazania mieściły się poniżej progu detekcji odpowiadającego uszkodzeniom o znaczeniu krytycznym. Warto podkreślić, że próbki wykonane metodą hybrydową (laser + MAG) charakteryzowały się mniejszym zróżnicowaniem odpowiedzi elektromagnetycznej, co wskazuje na wyższą jednorodność metalurgiczną i stabilność mikrostrukturalną w strefie połączenia.

Zastosowanie badań ET pozwoliło skutecznie uzupełnić wyniki uzyskane technikami wizualnymi (VT) oraz radiograficznymi (RT), dostarczając szczegółowych informacji na temat integralności powierzchniowej spoiny. Brak wykrytych niezgodności metodą prądów wirowych potwierdza wysoką jakość uzyskanych złączy, zarówno pod względem jednorodności struktury, jak i skuteczności zastosowanych procedur przygotowania powierzchni oraz parametrów procesu spawania.

7.5. Analiza naprężeń w złączu spawanym metodą radiograficzną

W celu określenia rozkładu naprężeń reszkowych w złączach spawanych rur kompozytowych zastosowano pośrednią metodę radiograficzną wspomaganą cyfrową analizą obrazu. Technika ta opiera się na rejestracji zmian konturu próbki przy wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego oraz dalszej interpretacji danych z użyciem modelu obliczeniowego 2D. Do badań zastosowano promieniowanie X o napięciu 200 kV, kamerę CCD o wysokiej rozdzielczości do monitorowania odkształceń oraz dedykowane oprogramowanie do analizy tensometrycznej.

Procedura badawcza została przeprowadzona zgodnie z wymaganiami następujących norm:

- PN-EN ISO 17636-2:2021 [103] – radiografia cyfrowa złączy spawanych,

- PN-EN ISO 10675-1:2017 [104] – kryteria akceptacji dla niezgodności w spoinach,
- PN-EN ISO 9712:2022 [105] – kwalifikacje i certyfikacja personelu badań nieniszczących.

Wyniki analizy wskazały obecność naprężeń resztkowych w strefie przylegającej do spoiny. W przypadku rur typu 3R12/4L7 zarejestrowano dominujące naprężenia rozciągające o wartości 120÷180 MPa, natomiast w rurach typu Sanicro 38/4L7 zakres ten wynosił 150÷200 MPa. W próbkach wykonanych metodą hybrydowego napawania zaobserwowano bardziej równomierny rozkład naprężeń, co przypisano korzystniejszemu przebiegowi cyklu cieplnego podczas procesu łączenia. Istotnym spostrzeżeniem jest brak wyraźnych koncentracji naprężeń w rejonie linii wtopienia oraz nieobecność ostrych gradientów naprężeniowych. Wyniki te sugerują, że zastosowane parametry cieplne i odpowiednio dobrana technologia spawania skutecznie ograniczają powstawanie niekorzystnych warunków naprężeniowych, sprzyjających inicjacji pęknięć.

Podsumowując, uzyskane dane potwierdzają, iż proces łączenia zapewnia korzystny i stabilny rozkład naprężeń resztkowych w badanych rurach kompozytowych. Jednorodny charakter rozkładu naprężeń wskazuje na przewidywalne zachowanie złączy podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach obciążeń cieplno-mechanicznych.

7.6. Badania penetracyjne (PT)

Badania penetracyjne (PT) wykonano w celu weryfikacji obecności nieciągłości powierzchniowych w złączach spawanych rur kompozytowych typu 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 po procesie napawania hybrydowego (laser + MAG). Procedurę przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 3452-1 [112], natomiast ocenę wyników dokonano w oparciu o kryteria określone w normie PN-EN ISO 23277 [117], przy zastosowaniu poziomu akceptacji 2X.

Próbki do badań poddano starannemu przygotowaniu poprzez mechaniczne i chemiczne oczyszczenie powierzchni spoin oraz strefy przyległej z pozostałości olejowych, tlenków i produktów procesu napawania. Na tak przygotowaną powierzchnię naniesiono penetrant barwny o wysokiej czułości metodą natryskową, zapewniając jego równomierne rozprowadzenie. Czas penetracji wynosił 10 minut, co umożliwiło wnikięcie barwnika

w ewentualne mikronieciągłości. Nadmiar penetranta został usunięty metodą zmywania powierzchniowego z użyciem czystej ściereczki nasączonej zmywaczem. Następnie naniesiono cienką i jednorodną warstwę wywoływacza proszkowego metodą natryskową, którą pozostawiono do działania przez minimum 10 minut, umożliwiając migrację barwnika na powierzchnię.

Analiza wskazań wykazała brak istotnych nieciągłości powierzchniowych. Nie zarejestrowano liniowych wskazań o długości przekraczającej 1,5 mm ani skupisk wskazań porowatości otwartej przewyższających wartości dopuszczalne dla poziomu akceptacji 2X. Wyniki badań potwierdziły ciągłość i jednorodność spoiny, bez oznak pęknięć, porowatości otwartej, przyklejeń ani innych wad powierzchniowych.

Podsumowując, wszystkie analizowane złącza spełniły wymagania normatywne określone w PN-EN ISO 23277 [117]. Brak wykrycia istotnych wskazań stanowi dowód na prawidłowość doboru parametrów technologicznych procesu napawania hybrydowego, a także potwierdza wysoką jakość uzyskanych spoin pod względem powierzchniowej integralności.

8. Metodyka badań – badania niszczące

Badania niszczące stanowią jedną z najbardziej wiarygodnych metod oceny jakości połączeń spawanych, ponieważ pozwalają na kompleksową charakterystykę zarówno właściwości mechanicznych, jak i mikrostrukturalnych złączy. W przeciwieństwie do badań nieniszczących, które ograniczają się do oceny integralności geometrycznej i powierzchniowej, próby niszczące umożliwiają bezpośrednią weryfikację parametrów wytrzymałościowych, plastycznych oraz odpornościowych, a tym samym dają pełniejszy obraz zachowania materiału w warunkach eksploatacyjnych.

Badania niszczące przeprowadzono dla złączy doczołowych rur kompozytowych typu 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7, które zaprojektowane są do pracy w środowiskach silnie obciążających materiał, obejmujących działanie wysokiej temperatury, ciśnienia oraz agresywnych czynników korozyjnych. Prawidłowa ocena ich jakości wymagała zatem zastosowania metod pozwalających na identyfikację potencjalnych nieciągłości w obszarze spoiny i strefy wpływu ciepła (SWC), a także na określenie wpływu parametrów technologii

spawania laserowego i napawania hybrydowego (laser + MAG) na właściwości końcowe połączeń.

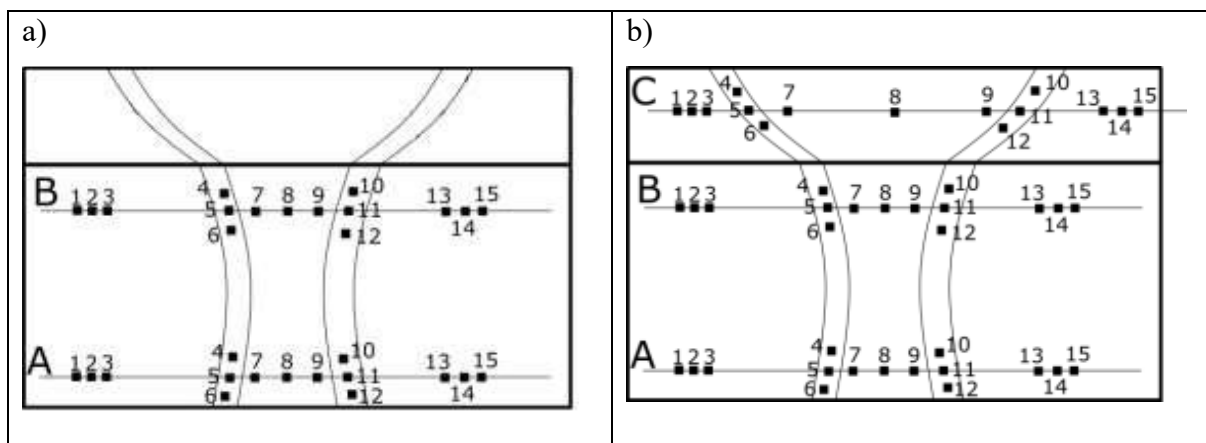
Celem przeprowadzonych analiz było:

- określenie odporności złączy na obciążenia statyczne i dynamiczne,
- ocena ciągłości i jednorodności struktury w obszarze spoiny oraz SWC,
- identyfikacja potencjalnych defektów powstałych w procesie spawania,
- potwierdzenie prawidłowości i skuteczności doboru parametrów technologii spawania laserowego i hybrydowego.

8.1. Badanie twardości

Badania twardości przeprowadzono metodą Vickersa, stosując obciążenie 98N (HV10), zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6507-1:2018 [106]. Pomiarów dokonano na przekrojach poprzecznych złączy spawanych, rozmieszczając siatkę punktów pomiarowych prostopadle do osi spoiny. Dla każdej próbki wykonano trzy niezależne przekroje. Obszary pomiarowe obejmowały: materiał podstawowy (BM) w odległości 4÷6 mm od granicy strefy wpływu ciepła (SWC), strefę SWC w odległości 1÷3 mm od linii wtopienia oraz spoinę (WZ) w jej geometrycznym centrum.

Wszystkie próbki zostały zatopione w żywicy epoksydowej, zeszlifowane papierem ściernym o gradacji od 220 do 2000, a następnie wypolerowane pastą diamentową. Dla uwidocznienia struktury zastosowano trawienie elektrochemiczne w 10% roztworze szczawianu amonu. Pomiarów wykonano na automatycznym twardościomierzu Mitutoyo HM-200, wyposażonym w mikroskop optyczny z kamerą cyfrową. Warunki środowiskowe utrzymywano na poziomie 21 ± 1 °C oraz wilgotności względnej poniżej 60%. Każdy punkt pomiarowy został uśredniony z trzech odczytów, a odchylenia standardowe nie przekroczyły 3%. Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 17.



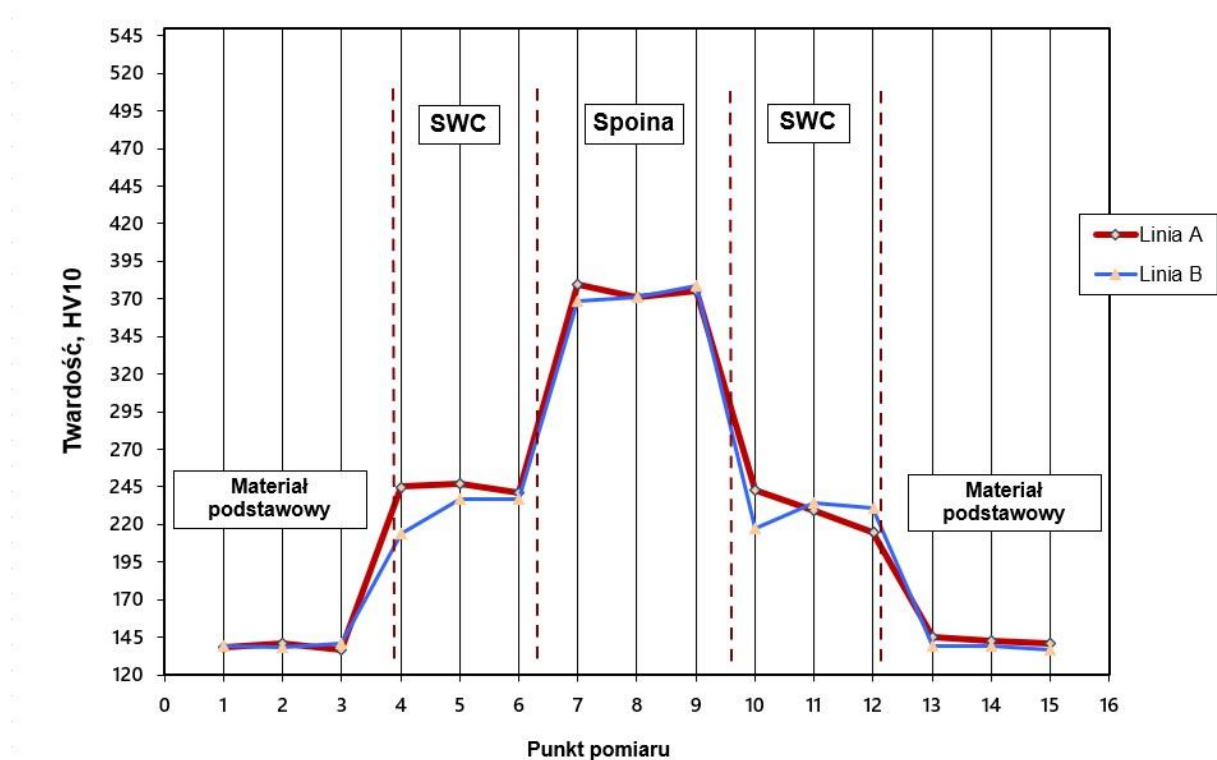
rys. 17. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru twardości dla badanych złączy:

a) spawanych laserowo, b) spawanych laserowo i napawanych hybrydowo

W przypadku rury kompozytowej 3R12/4L7 uzyskano charakterystyczny rozkład twardości w układzie „M” (tablica 2). Bezpośrednio po spawaniu wartości w strefie WZ osiągały nawet 380 HV10, co wynikało z intensywnego nagrzania i szybkiego chłodzenia metalu. Po procesie napawania warstwy zewnętrznej zaobserwowano częściowe odpuszczenie cieplne, które obniżyło twardość poniżej 350 HV10, co jest korzystne, ponieważ redukuje ryzyko kruchości spoiny. Rozkład twardości przedstawiono również na rysunku 18.

Tablica 2. Rozkład twardości - rura kompozytowa 3R12/4L7

Obszar	Zakres twardości [HV10]
Materiał podstawowy (BM)	135 ÷ 152
SWC	215 ÷ 255
Spoina (WZ) – po spawaniu	300 ÷ 380
Spoina (WZ) – po napawaniu warstwy zewnętrznej	270 ÷ 340



rys. 18. Schemat rozkładu twardości rury 3R12/4L7 – spawanie warstwy wewnętrznej (4L7)

Analogiczne wyniki uzyskano dla rury kompozytowej Sanicro 38/4L7 (tablica 3). Wysoka twardość spoiny po spawaniu (do 375 HV10) wynikała ze złożonej struktury chemicznej stopu oraz obecności pierwiastków stopowych, takich jak nikiel i molibden. Proces napawania zewnętrznej warstwy spowodował efekt odpuszczania cieplnego, który obniżył wartości HV do poziomu bezpiecznego pod kątem eksploatacyjnym.

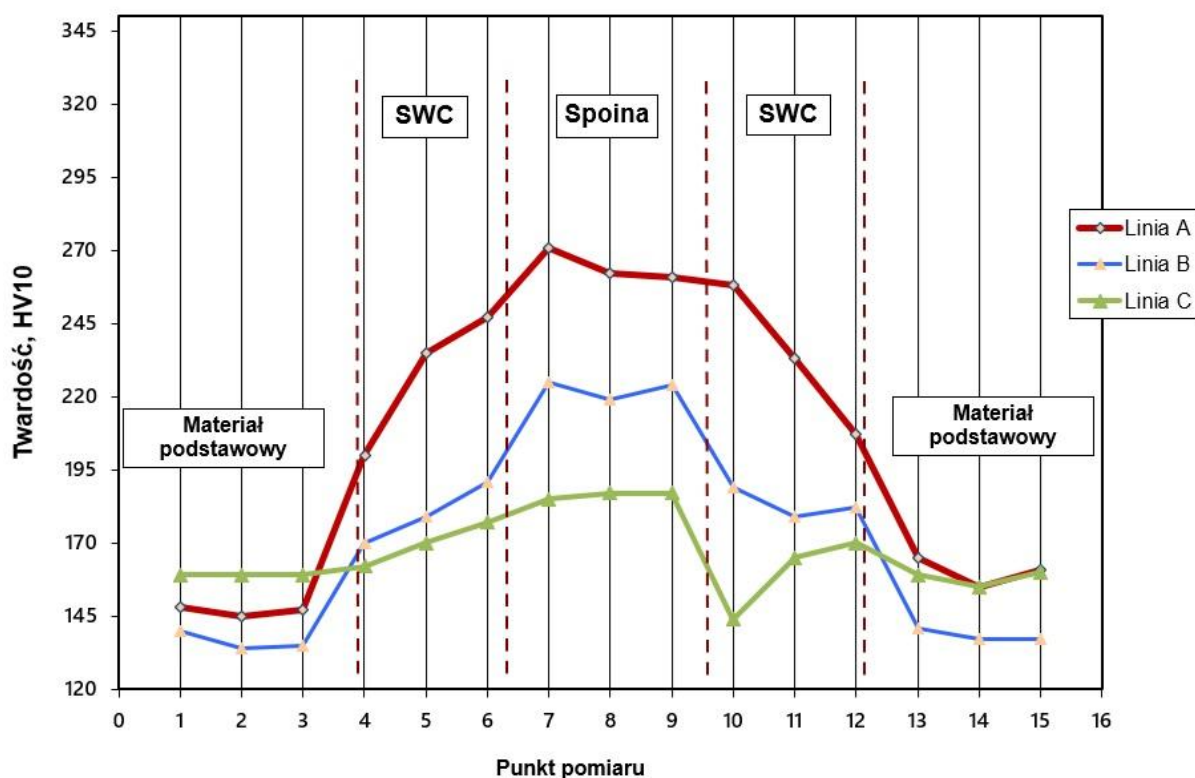
Tablica 3. Rozkład twardości – rura kompozytowa Sanicro 38/4L7

Obszar	Zakres twardości [HV10]
Materiał podstawowy (BM)	145 ÷ 162
SWC	220 ÷ 265
Spoina (WZ) – po spawaniu	305 ÷ 375
Spoina (WZ) – po napawaniu warstwy zewnętrznej	280 ÷ 340

W warstwie zewnętrznej rury 3R12/4L7, napawanej metodą hybrydową (laser + MAG), twardość spoiny wynosiła 250÷270 HV10, co było wyraźnie wyższą wartością niż w materiale bazowym, ale mieściło się w dopuszczalnym zakresie dla stali nierdzewnych (tablica 4). Rozkład twardości tej warstwy przedstawiono na rysunku 19.

Tablica 4. Rozkład twardości warstwy zewnętrznej 3R12

Obszar	Zakres twardości [HV10]
Materiał podstawowy (BM)	140 ÷ 150
SWC	200 ÷ 245
Spoina (WZ)	250–÷270



rys. 19. Rury dwuwarstwowe – spawanie warstwy zewnętrznej - rozkład twardości warstwy zewnętrznej 3R12

W przypadku warstwy zewnętrznej wykonanej ze stopu Sanicro 38 (Alloy 825), wartości twardości były nieco wyższe niż przy materiale 3R12, co przedstawiono w tablicy 5. Obecność

znacznych ilości niklu, chromu, molibdenu i tytanu sprzyjała wzrostowi twardości do poziomu 345 HV10, przy zachowaniu bezpieczeństwa strukturalnego.

Tablica 5. Rozkład twardości warstwy zewnętrznej Sanicro38

Obszar	Zakres twardości [HV10]
Materiał podstawowy (BM)	155 ÷ 175
SWC	210 ÷ 265
Spoina (WZ)	310 ÷ 345

Analiza twardości złączy spawanych i napawanych wykazała, że obie warstwy zachowały wymagane właściwości strukturalne i mechaniczne. Spawanie laserowe generowało lokalny wzrost twardości do wartości 380 HV10, jednak dzięki procesowi napawania hybrydowego i wynikającemu z niego odpuszczeniu cieplnemu wartości te spadły do poziomu poniżej 350 HV10, co minimalizowało ryzyko kruchości. Warstwy zewnętrzne osiągnęły maksymalną twardość rzędu 345 HV10, bez przekroczenia granicy niebezpiecznych przemian fazowych. Wyniki potwierdzają poprawność doboru parametrów technologicznych oraz skuteczność zastosowanej techniki łączenia w kontekście przemysłowym.

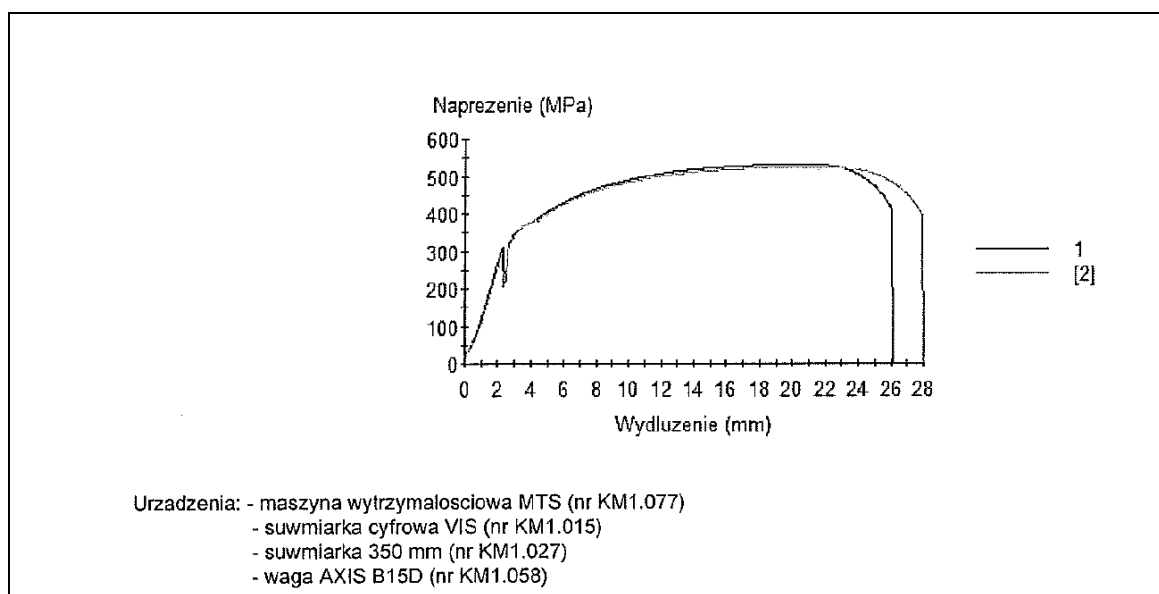
8.2. Próba rozciągania

W celu oceny wytrzymałości mechanicznej złączy doczołowych rur kompozytowych 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 przeprowadzono badania rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2019 [107], wykorzystując uniwersalną maszynę wytrzymałościową MTS z cyfrowym systemem pomiaru siły i przemieszczenia. Próbkę została wycięta prostopadłe do osi spoiny, a ich wymiary odpowiadały wymaganiom normatywnym dla stali stopowych, tj. długość między znacznikami 100 mm, szerokość 20 mm oraz grubość ścianki 6,5 mm, odpowiadająca pełnej grubości rury.

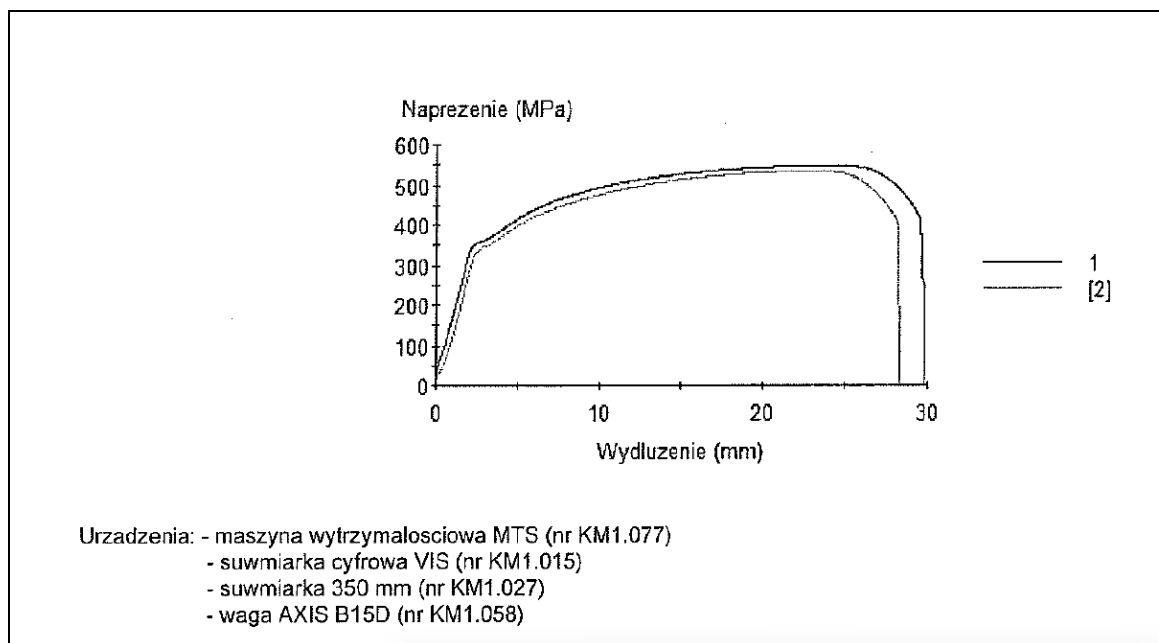
Każde złącze testowano trzykrotnie, a wynik końcowy obliczono jako średnią arytmetyczną. Prędkość odkształcenia w początkowej fazie wynosiła 1 mm/min, natomiast w fazie zerwania – 5 mm/min, co umożliwiło precyzyjne określenie charakterystyk wytrzymałościowych złączy (rys. 20, 21).

Wyniki badań przedstawiają się następująco:

- Dla złącza 3R12/4L7 uzyskano:
 - $R_e = 340,2 \text{ MPa}$
 - $R_m = 506,0 \text{ MPa}$
 - $A = 18,5\%$
 - Siła zerwania = 43,52 kN
 - Miejsce zerwania: materiał podstawowy, poza strefą spoiny
- Dla złącza Sanicro 38/4L7 wyniki przedstawiały się następująco:
 - $R_e = 354,1 \text{ MPa}$
 - $R_m = 522,3 \text{ MPa}$
 - $A = 22,3\%$
 - Siła zerwania = 47,60 kN
 - Miejsce zerwania: poza strefą spoiny

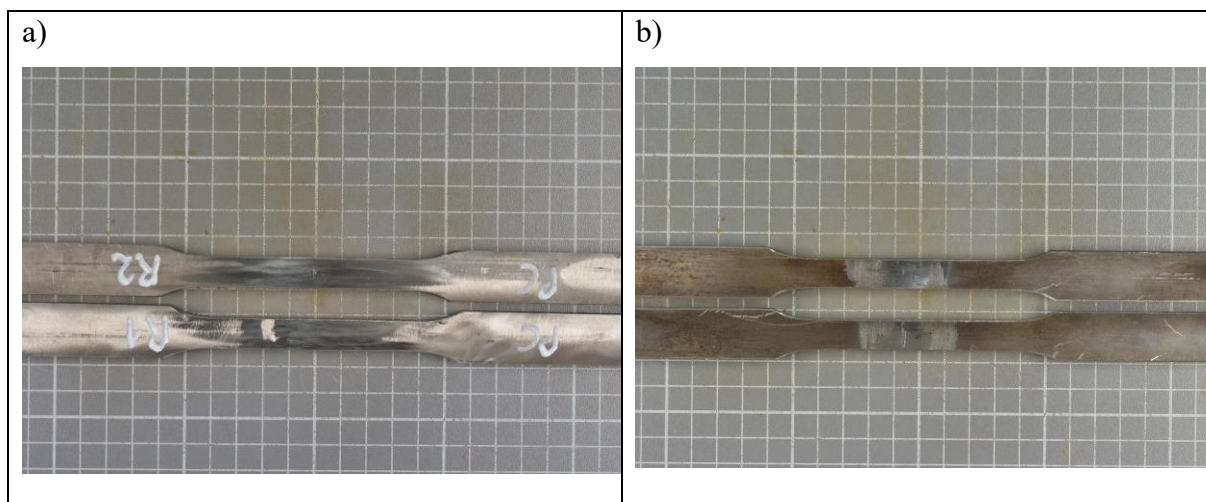


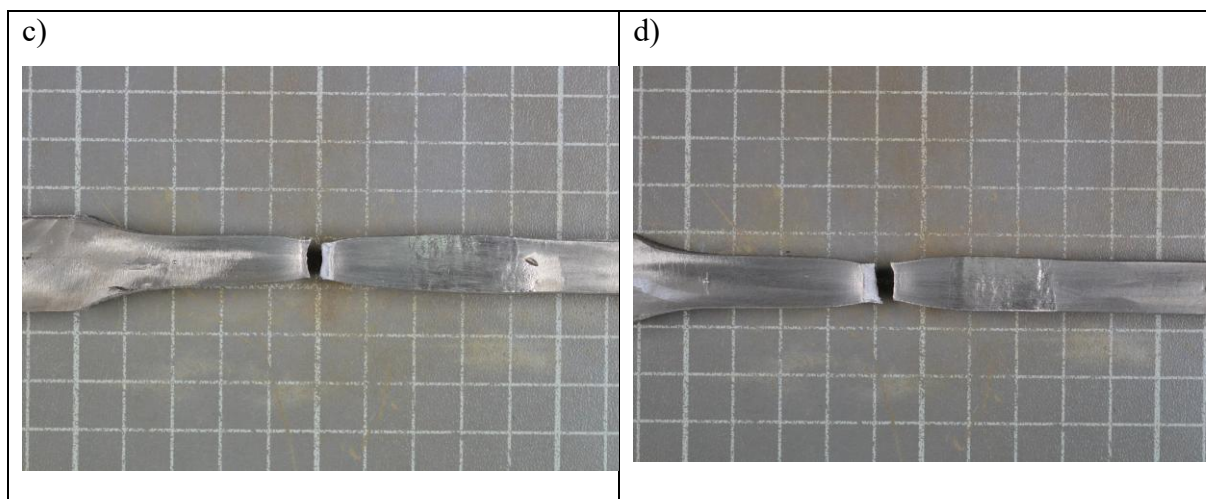
rys. 20. Wykres rozciągania poprzecznego złącza doczołowego 3R12/4L7



rys. 21. Wykres rozciągania poprzecznego złącza doczołowego Sanicro 38/4L7

Fotograficzna dokumentacja próbek przed i po badaniu (rys. 22a–d) pozwala ocenić zachowanie się materiału pod wpływem obciążeń. Analiza obrazów potwierdziła, że miejsce zerwania nastąpiło poza obszarem złącza w materiale podstawowym (rys. 22). Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 12932 złącze spełnia wymagania poziomu jakości B [literatura].





rys. 22. Widok próbek: a) 3R12R1, Sanicro 38/4L7R2 przygotowanych do próby rozciągania poprzecznego widok od strony lica; b) Sanicro 38/4L7R2 przygotowanych do próby rozciągania poprzecznego widok od strony grani, c) 3R12R1, po przeprowadzeniu próby rozciągania poprzecznego, d) Sanicro 38/4L7R2 po przeprowadzeniu próby rozciągania poprzecznego.

Uzyskane wartości wydłużenia powyżej 15% w momencie zerwania, zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-11[110] oraz PN-EN ISO 15614-14[111], świadczą o bardzo dobrej jakości struktury złączy. Złącza 3R12/4L7 wykazały wysoką wytrzymałość i dobrą ciągliwość, natomiast lepsze parametry mechaniczne Sanicro 38/4L7 wynikają z obecności dodatków stopowych, takich jak Ni i Mo, które zwiększają odporność na obciążenia rozciągające. Brak zerwania w strefie spoiny potwierdza, że połączenie nie stanowi osłabionego punktu konstrukcyjnego, a zastosowane technologie spawania (laserowe i hybrydowe) zapewniają pełną integralność metalurgiczną złączy. Wyniki te wskazują również na możliwość stosowania Sanicro 38/4L7 w instalacjach narażonych na wysokie i zmienne obciążenia mechaniczne.

Wnioski

1. Złącza wykazały wysoką wytrzymałość i dobrą ciągliwość, przekraczając wymagania norm branżowych dla elementów ciśnieniowych.
2. Miejsce zerwania w materiale rodzinnym potwierdza skuteczność zespolenia metalurgicznego spoiny.
3. Wyższe parametry mechaniczne Sanicro 38 wskazują na zwiększony potencjał zastosowania tego materiału w warunkach obciążeń dynamicznych i ekstremalnych.

8.3. Próba zginania

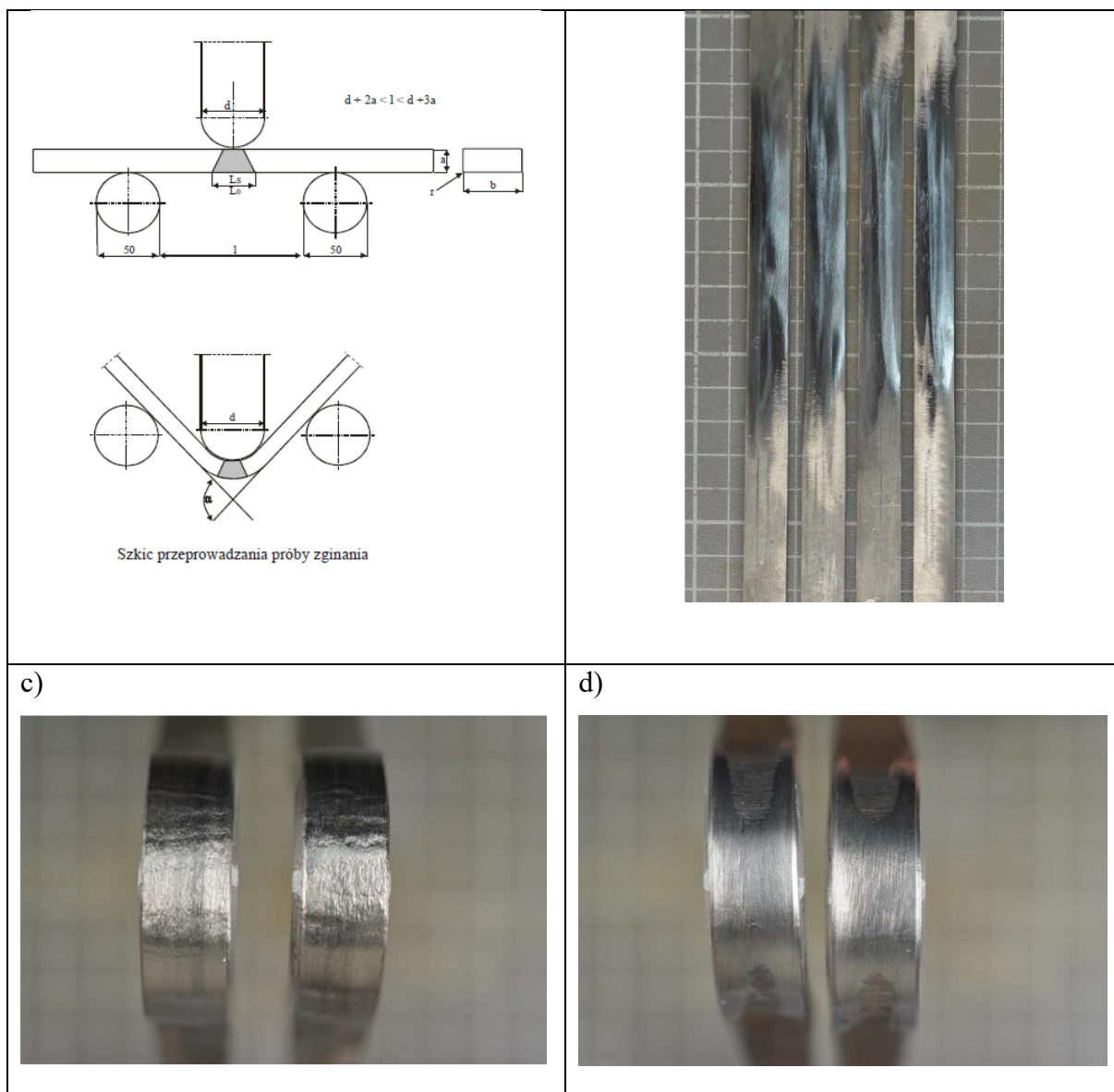
W celu oceny ciągłości złączy doczołowych rur kompozytowych 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 przeprowadzono próby zginania zgodnie z normą PN-EN ISO 5173:2010 [108]. Próbki o wymiarach: długość 100 mm, szerokość 20 mm oraz grubość 6,5 mm, zostały poddane zginaniu do kąta 180° przy użyciu trzpienia o średnicy czterokrotnej grubości próbki (ok. 26 mm). Obserwacji poddano powierzchnię spoiny oraz strefy wpływu ciepła (SWC) z obu stron próbki, tj. od strony lica i grani, przy użyciu mikroskopu inspekcyjnego $20\times$.

Analiza wyników wykazała, że w żadnej z badanych próbek nie stwierdzono:

- pęknięć powierzchniowych,
- mikropęknięć w spoinie,
- rozwarstwień na granicy SWC/spoiny(WZ).

Wszystkie złącza przeszły próbę zginania bez wykrycia nieciągłości, zachowując pełną ciągłość strukturalną oraz estetykę powierzchni. Wyniki były powtarzalne dla każdej serii próbek, co potwierdza stabilność i powtarzalność zastosowanej technologii spawania i napawania. Brak uszkodzeń w próbie zginania wskazuje na dobrą ciągłość materiału złącza oraz brak krytycznych naprężeń resztkowych, co jest zgodne z literaturą wskazującą, że złącza o twardości poniżej 350 HV i bez stref utwardzonych wykazują odporność na pękanie przy zginaniu do kąta 180° (rys. 23).

a)	b)
----	----



rys. 23 a) Schemat przeprowadzenia poprzecznej próby zginania, b) Widok przygotowanych próbek do próby zginania poprzecznego materiał 3R12/4L7, Sanicro 38/4L7 c) Próba zginania poprzecznego widok próbek od strony grani, d) Próba zginania poprzecznego widok próbki od strony grani

Wnioski z przeprowadzonych badań są następujące:

- Złącza wykazały pełną ciągłość strukturalną i odporność na naprężenia zgniatające oraz zginające.
- Brak mikropęknięć i rozwarstwień potwierdza prawidłowy dobór parametrów procesu spawania i napawania.

- Wyniki potwierdzają, że technologia łączenia rur kompozytowych pozwala na zachowanie wysokiej jakości mechanicznej i estetycznej spoin w warunkach przemysłowych.

8.4. Podsumowanie i wnioski z badań niszczących bez badań makro i mikroskopowych

Analiza wyników badań niszczących przeprowadzonych na złączach doczołowych rur kompozytowych 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 pozwala sformułować następujące wnioski dotyczące jakości i niezawodności połączeń:

1. Twardość – badania wykazały, że spoina oraz strefa wpływu ciepła (SWC) charakteryzowały się podwyższonymi wartościami twardości, osiągającymi maksymalnie 320 HV10. Pomimo lokalnego wzrostu twardości nie stwierdzono występowania nieciągłości ani przekroczeń wartości krytycznych, co potwierdza stabilność procesu cieplnego oraz kontrolowany przebieg spawania i napawania. Rozkład twardości w każdej ze stref był równomierny, co świadczy o przewidywalnym zachowaniu materiału w czasie eksploatacji.
2. Wytrzymałość na rozciąganie – złącza obu typów rur osiągnęły wysokie parametry mechaniczne: granicę plastyczności R_e powyżej 340 MPa oraz wytrzymałość na rozciąganie R_m przekraczającą 500 MPa. W każdym przypadku miejsce zerwania znajdowało się w materiale podstawowym, z dala od spoiny, co potwierdza skuteczność zespolenia metalurgicznego i wysoką odporność połączeń na obciążenia statyczne.
3. Odporność na zginanie – w próbach zginania do 180° wszystkie próbki zachowały ciągłość strukturalną spoin oraz SWC. Nie zaobserwowano pęknięć powierzchniowych, mikropęknięć ani rozwarstwień na granicy stref, co wskazuje na wysoką plastyczność materiału i brak krytycznych naprężeń resztkowych.
4. Ocena ogólna – zastosowane technologie, spawanie laserowe warstwy wewnętrznej oraz napawanie hybrydowe warstwy zewnętrznej, pozwoliły na uzyskanie złączy o wysokich parametrach wytrzymałościowych, jednorodnej strukturze oraz dobrej ciągliwości. Analiza wyników potwierdza, że złącza są odporne na uszkodzenia mechaniczne i spełniają wymagania eksploatacyjne dla zastosowań w energetyce, instalacjach wysokotemperaturowych oraz ciśnieniowych.

Uzyskane wyniki badań niszczących stanowią podstawę do dalszej optymalizacji procesów łączenia rur kompozytowych oraz potwierdzają zasadność wdrożenia technologii laserowej i hybrydowej w warunkach przemysłowych.

9. Badania metalograficzne

Badania metalograficzne stanowią kluczowy element oceny jakości połączeń spawanych, umożliwiając analizę struktury krystalicznej, morfologii ziaren, obecności wydzieleni oraz ewentualnych defektów strukturalnych. Dzięki nim możliwa jest nie tylko ocena poprawności wykonania złącza, ale również identyfikacja wpływu parametrów procesu spawania na przemiany fazowe i mikrostrukturę materiału. W przypadku rur kompozytowych Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7, przeznaczonych do pracy w warunkach wysokotemperaturowych i korozyjnych, szczególnie istotna była ocena:

- kształtu i ciągłości spoiny,
- mikrostruktury w strefie wpływu ciepła (SWC),
- jednorodności przetopu,
- oraz wpływu technologii (spawanie laserowe i napawanie hybrydowe) na charakterystykę złącza.

9.1. Badania makroskopowe

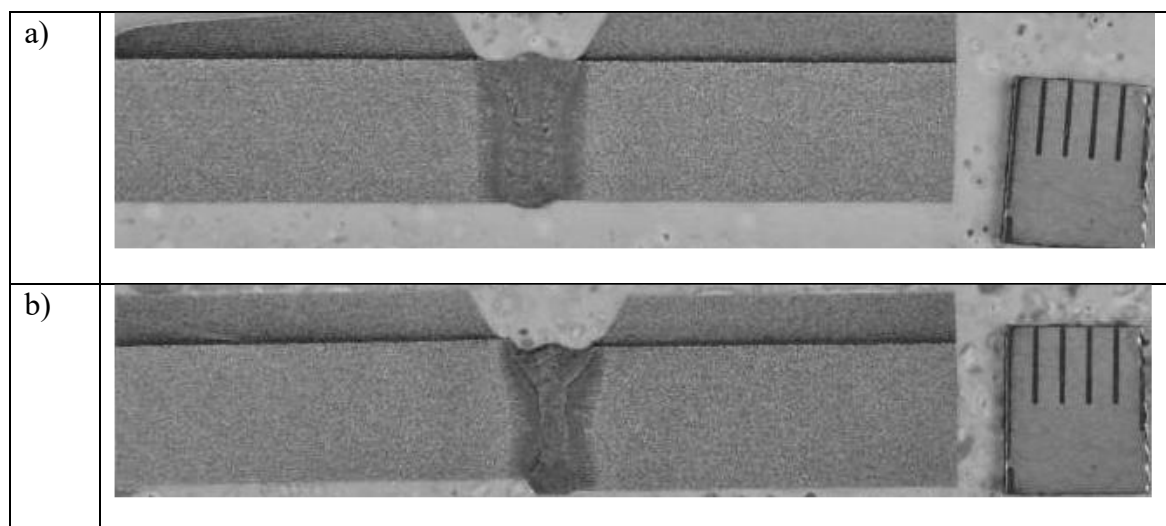
Celem badań makroskopowych było określenie ogólnej geometrii spoin, identyfikacja niezgodności widocznych w skali makroskopowej oraz weryfikacja jednorodności linii wtopienia. Analiza makroskopowa pozwala na ocenę jakości przetopu, obecności porów, pęcherzy gazowych, braków przetopu, nieciągłości, podtopień oraz nadlewu spoiny. Symetria przetopu i brak różnic pomiędzy stroną lica i grani są istotne dla dalszej oceny mikrostrukturalnej.

Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2013 [109]. Z każdego typu połączenia wycięto próbki poprzeczne o szerokości ok. 15 mm i zatopiono w żywicy akrylowej. Następnie wykonano szlifowanie (ziarnistość 240–1200) oraz polerowanie końcowe pastą

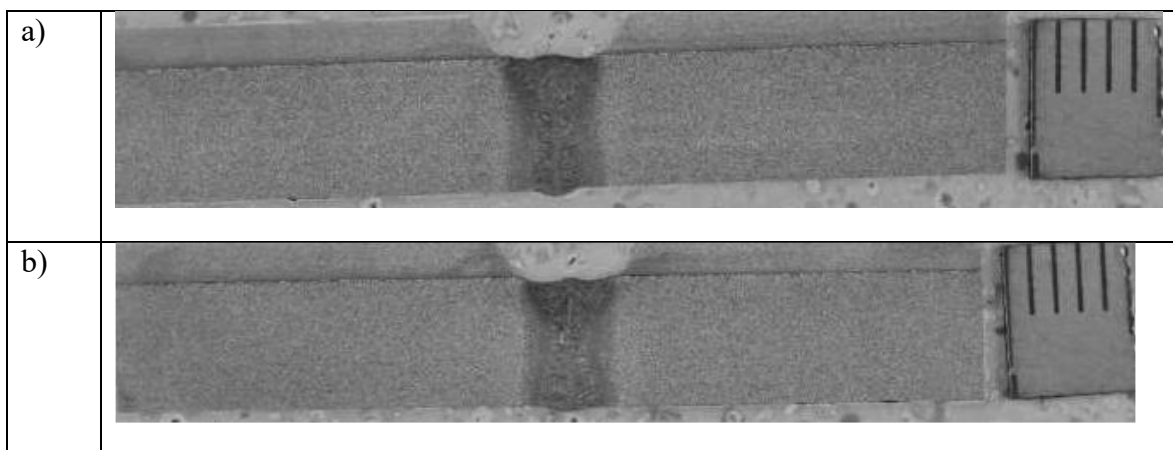
1 μm . Struktura ujawniona została poprzez trawienie chemiczne odpowiednimi roztworami: 10% kwasu szczawiowego z HCl dla Sanicro 38 oraz 3% roztworu HNO_3 w alkoholu metylowym dla 3R12. W niektórych przypadkach zastosowano trawienie elektrochemiczne (15 V, 30 s), co pozwoliło wyraźnie zobrazować granice ziaren i strefy przejściowe. Dokumentację fotograficzną wykonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Leica M125.

W niektórych przypadkach zastosowano trawienie elektrochemiczne (15 V, 30 s) w celu uwidocznienia granic ziaren i stref przejściowych. Obserwacje prowadzono gołym okiem, pod światłem odbitym oraz przy użyciu lupy inspekcyjnej 10 $\times$. Dokumentację fotograficzną wykonano mikroskopem stereoskopowym Leica M125 z kamerą cyfrową.

Złącza rur 3R12/4L7 i Sanicro 38/4L7 cechowały się wąską, głęboką spoiną o regularnej linii przetopu, wykonaną w procesie laserowym. Lico i grań spoin były prawidłowo uformowane, a brak podtopień i brak przetopu wskazywał na stabilny przebieg procesu. W przekrojach obserwowano soczewkowatą strefę wpływu ciepła z wyraźnym przejściem do materiału bazowego (rys. 24, 25).

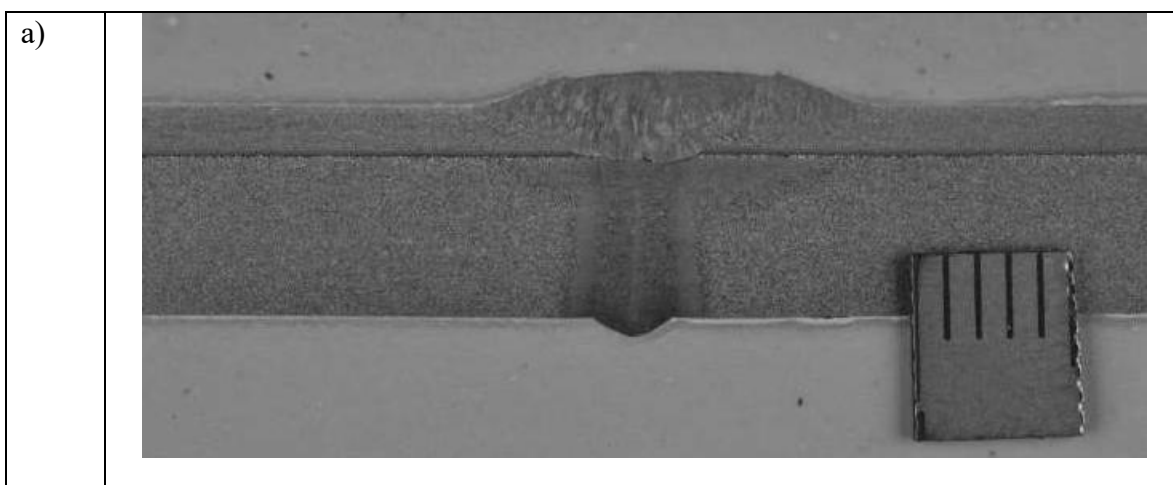


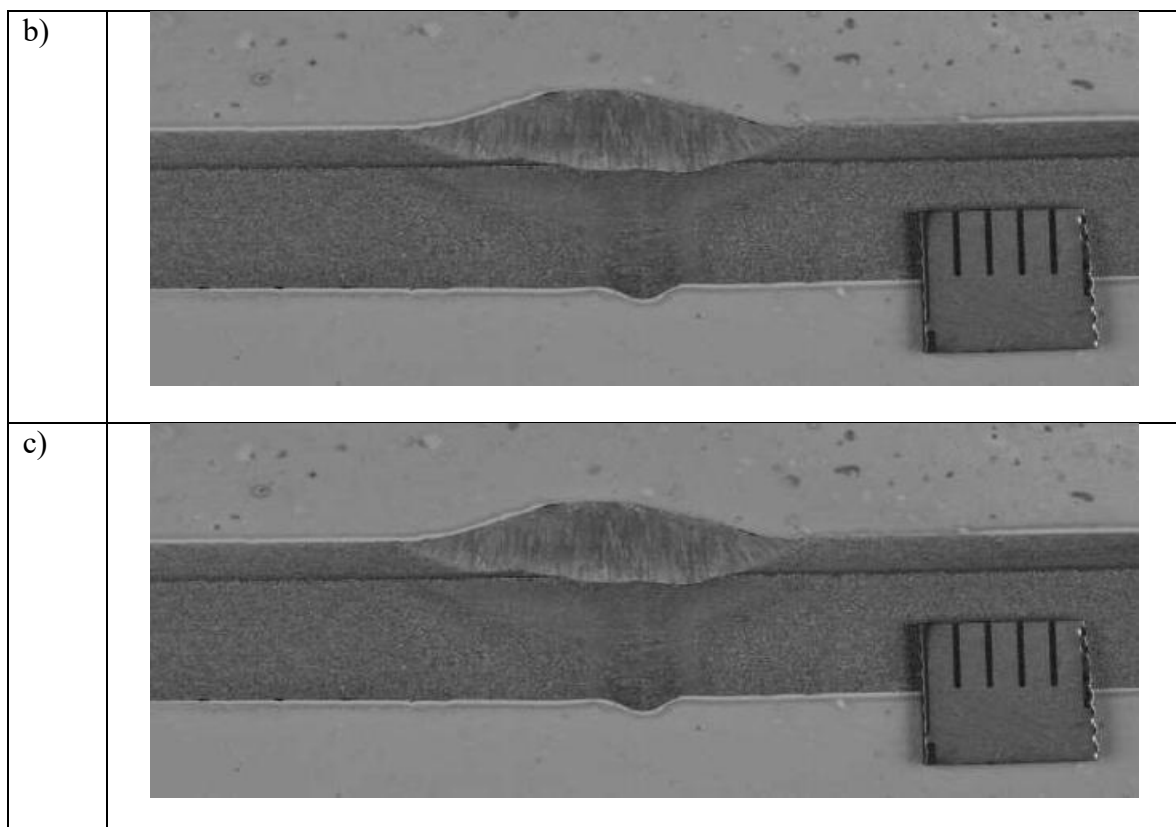
rys. 24 Zdjęcie makrograficzne próbki D2 warstwa wewnętrzna rury Sanicro 38/4L7 wykonana laserem dyskowym w osłonie argonu a) kąt 120°,
b) kąt 240°



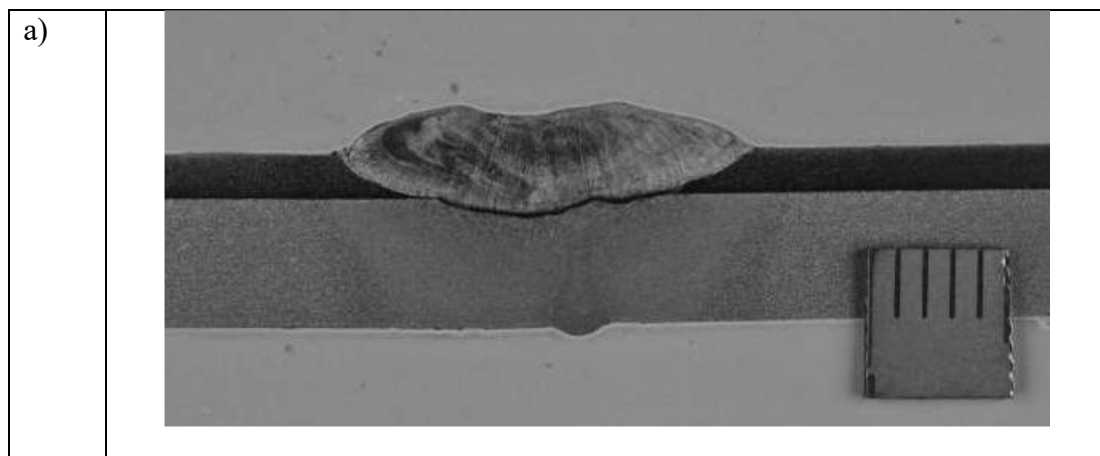
rys. 25. Zdjęcie makrograficzne próbki D1 warstwa wewnętrzna rury 3R12/4L7 wykonana laserem dyskowym w osłonie argonu, a) kąt 120° ,
b) kąt 240°

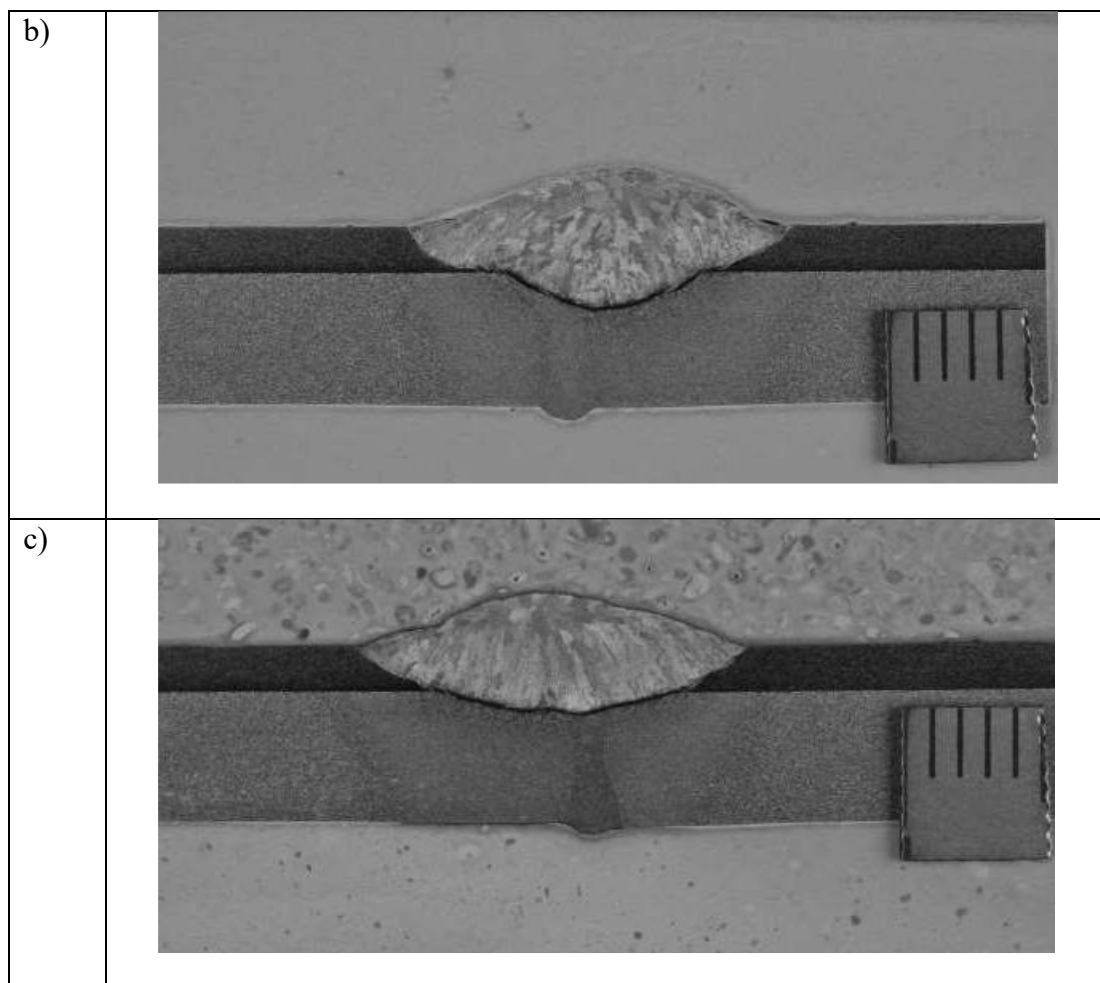
Napoiny wykonane metodą hybrydową (laser + MAG) charakteryzowały się szerszą strefą przetopu i łagodnym przejściem strukturalnym, bez ostrych granic. Spoiny były pełne, bez porów i wtrąceń, a obszar grani wykazywał lekkie nadtopienie materiału bazowego, świadczące o dobrej penetracji cieplnej. Profil spoin hybrydowych był bardziej rozłożysty niż spoin laserowych, przy zachowaniu pełnej kontroli procesu (rys. 26 i 27).





rys. 26. Makrostruktura próbki D1 (2-kąt 120°) materiał rury 3R12/4L7 warstwa zewnętrzna spoiny wykonana laserem dyskowym, warstwa zewnętrzna cladding wykonana poprzez napawanie hybrydowe a) kąt 0° - początek spawania b) kąt 120°, c) kąt 240°





rys. 27. Makrostruktura próbki D2 materiał rury Sanicro 38/4L7 warstwa
wewnętrzna spoiny wykonana laserem dyskowym, warstwa zewnętrzna
cladding wykonana poprzez napawanie hybrydowe z dodatkiem materiału dodatkowego
w postaci drutu Lincoln NiCrMo-3 $\varnothing 1,0$ mm. a) kąt 0° - początek spawania b) kąt 120° ,
c) kąt 240°

Porowatość nie została stwierdzona w żadnym z badanych zglądów. Linie wtopienia były gładkie, bez defektów oraz bez niejednorodności. Brak ostrych zmian kierunku wskazuje na stabilny przebieg topienia i stygnięcia materiału. Na podstawie badań makroskopowych można stwierdzić:

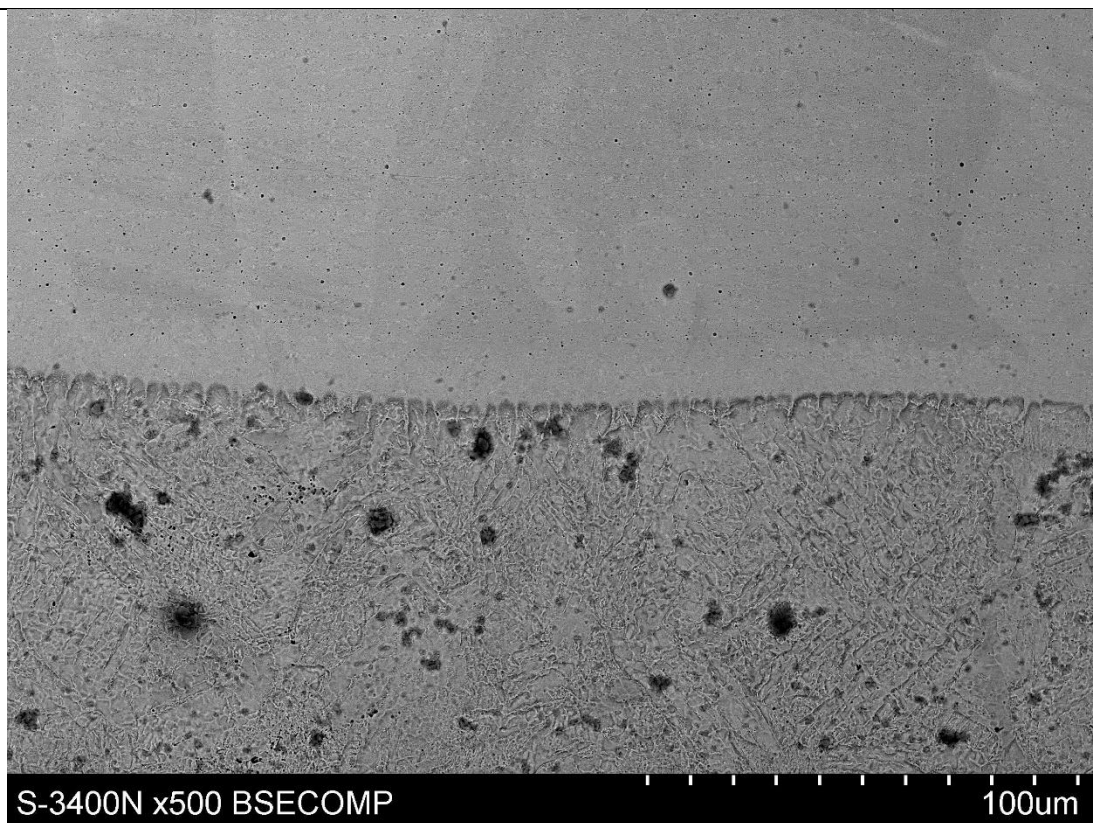
1. Złącza wykonane zarówno techniką laserową, jak i hybrydową wykazują dobrą geometrię spoin, równomierny przetop oraz brak widocznych defektów makroskopowych
2. Spoiny laserowe są węższe i głębsze, natomiast hybrydowe charakteryzują się bardziej rozłożystą strefą przetopioną i lepszym połączeniem z materiałem bazowym.

3. Brak niezgodności świadczy o prawidłowym prowadzeniu procesu, skutecznym oczyszczeniu materiału oraz kontroli parametrów spawania.
4. Badania makroskopowe wykazały wysoką jakość geometryczną i jednorodność złączy.

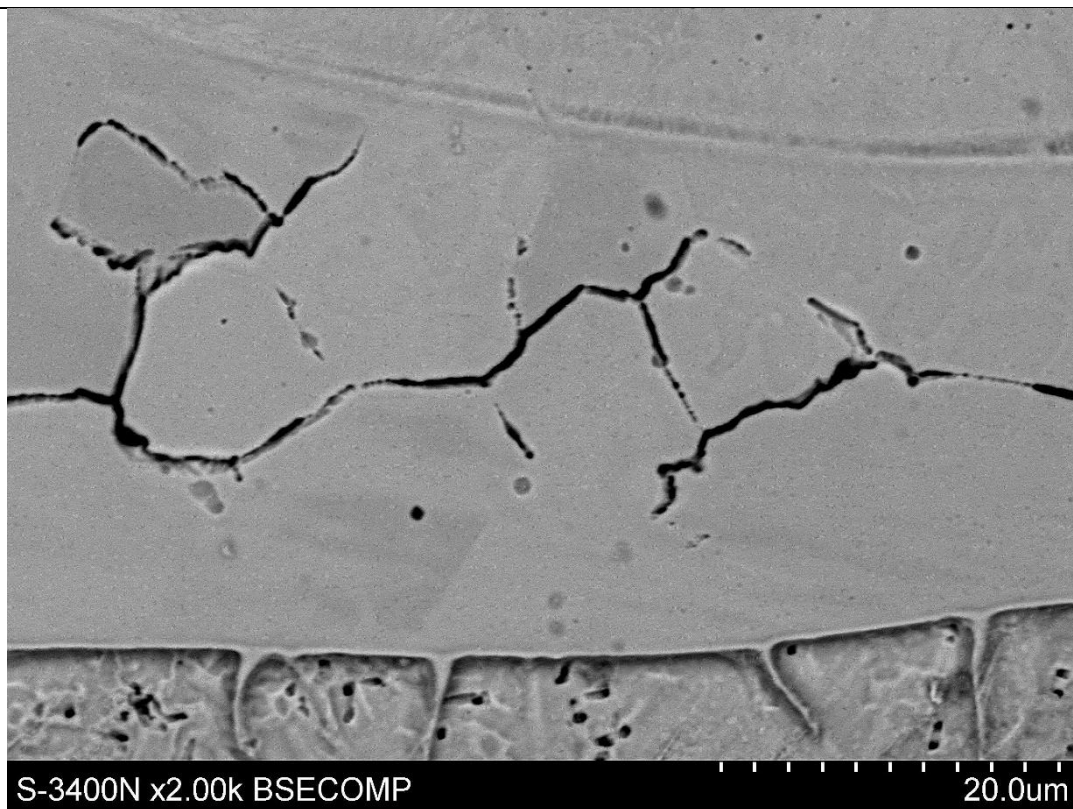
9.2. Mikrostruktura i skład chemiczny złączy (SEM/EDS)

Badania mikrostruktury i lokalnego składu chemicznego przeprowadzono na złączach kompozytowych D1.2 (3R12/4L7) i D2.1 (Sanicro 38/4L7) przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi S-3400N (SEM) w trybach elektronów wtórnych (SE) i wstecznie rozproszonych (BSE), uzupełnionych analizą składu chemicznego metodą EDS. Obrazy SE pozwalały ocenić topografię i morfologię krystalitów, natomiast tryb BSE uwidaczniał kontrasty składu chemicznego między spoiną a strefą wpływu ciepła (SWC). Analizy punktowe i liniowe EDS umożliwiły ocenę stopnia wymieszania materiałów, identyfikację segregacji pierwiastków stopowych oraz charakterystykę wydzielen międzydendrytycznych. Obserwacje prowadzono przy napięciu przyspieszającym 15 kV i powiększeniach 1000–2000×

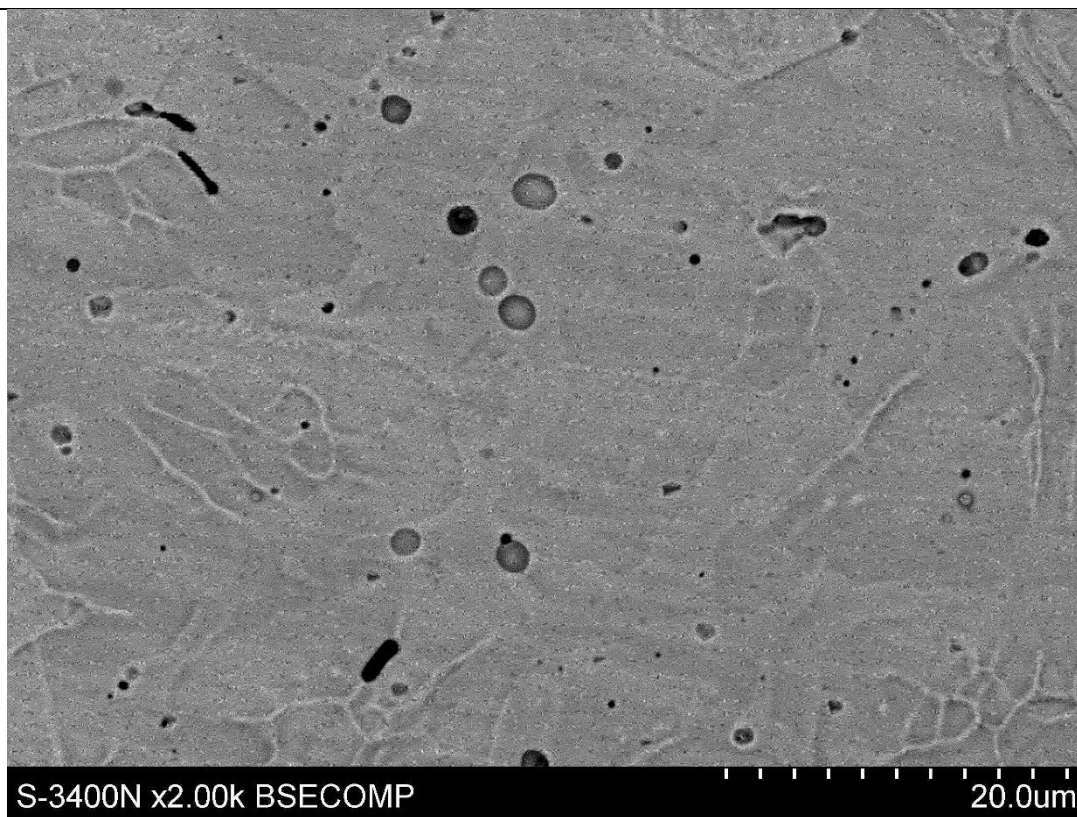
W próbce D1.2 (3R12/4L7) materiał rodzimy stali 4L7 wykazywał strukturę ferrytyczno-perlitową z pasmowym układem ziaren. W SWC stwierdzono rozdrobnienie ziaren oraz lokalną strukturę Widmanstättena, typową dla szybkiego chłodzenia po nagraniu. Spoina laserowa wykazała drobne, kolumnowe dendryty zgodne z kierunkiem krzepnięcia, bez widocznych porów czy defektów. Warstwa zewnętrzna 3R12 charakteryzowała się strukturą austenityczną z regularnymi dendrytami, pozbawioną lokalnej segregacji i defektów (Rys. 28, 29 i 30).



rys. 28. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 500x, linia wtopienia spoiny rury w spoinę rury wewnętrznej

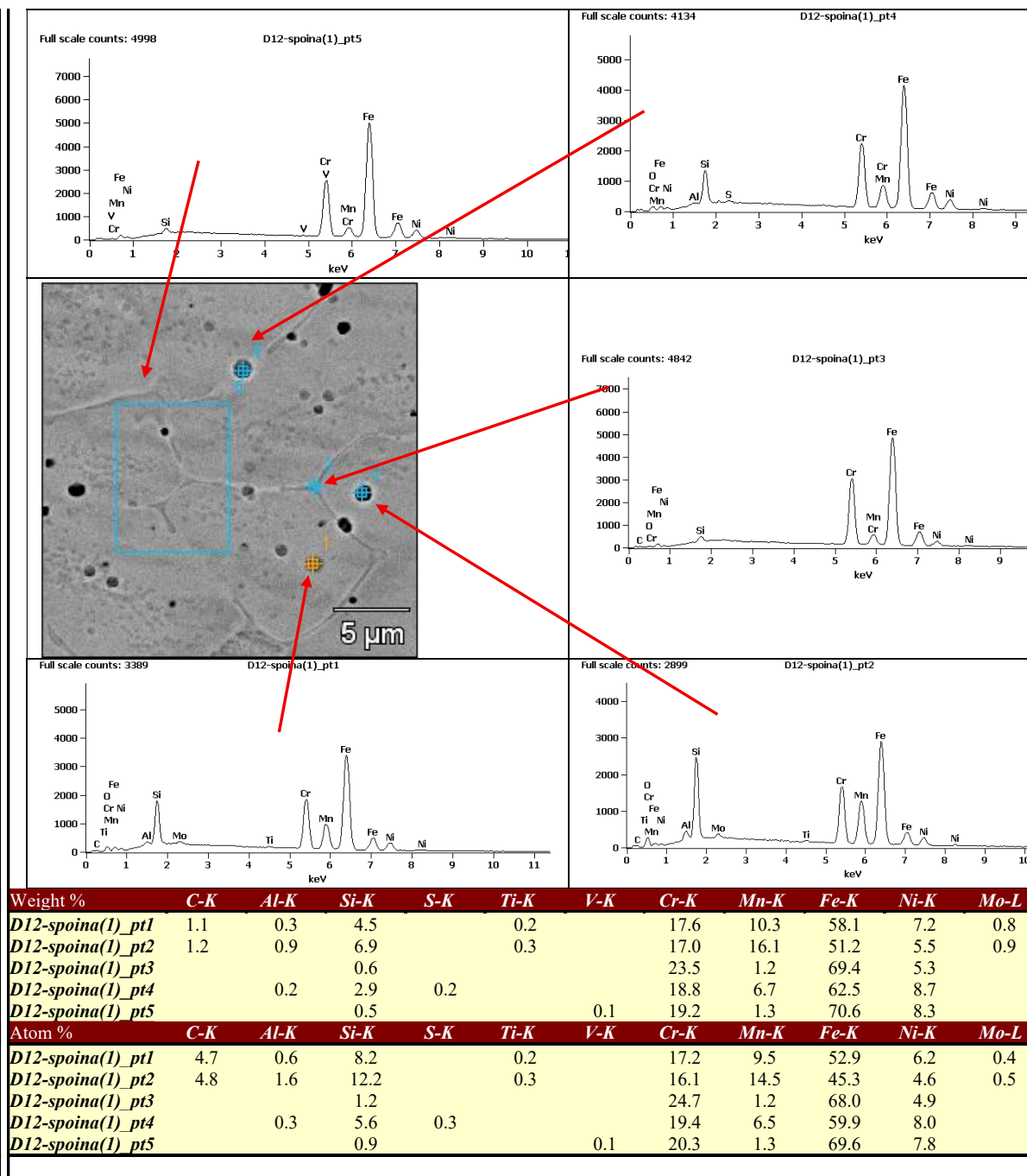


rys. 29. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 2000x, obszar materiału rodzimego rury wewnętrznej (na dole), obszar o strukturze austenitycznej w SWC rury zewnętrznej (środek próbki), spoina w złączu rury zewnętrznej (na górze próbki)

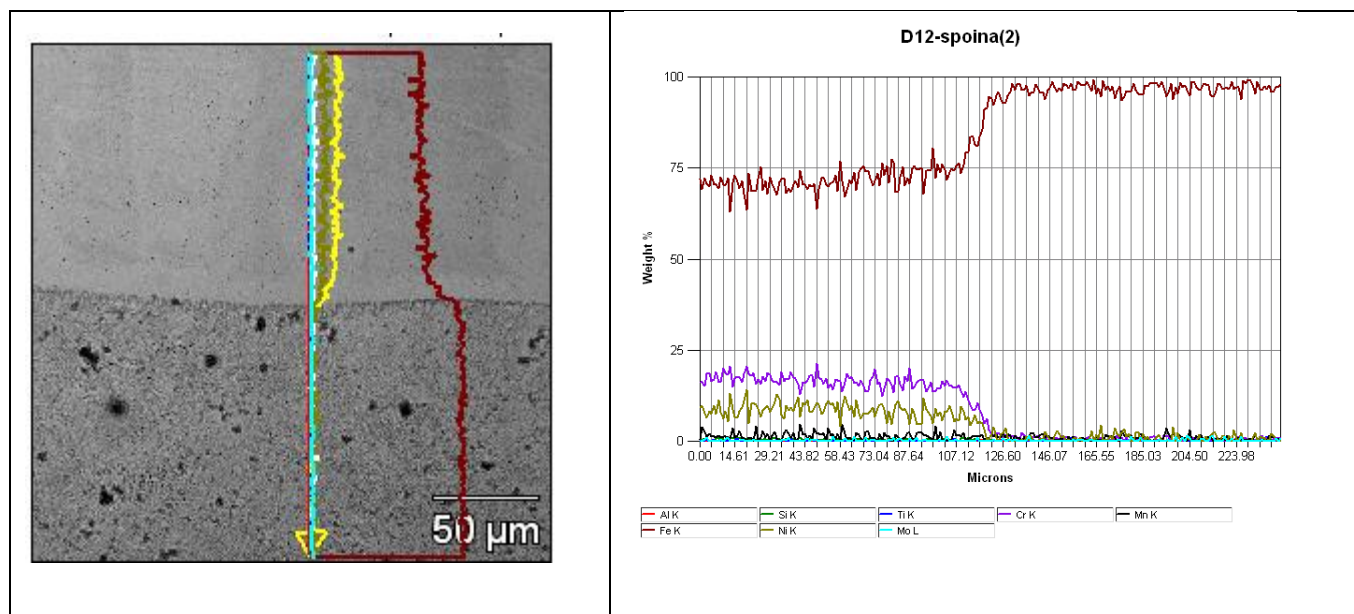


rys. 30. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 2000x, obszar spoiny złącza rury zewnętrznej z widocznymi wtrąceniami i wżerami, które powstały podczas trawienia próbki

Analizy punktowe EDS wykazały skład zgodny ze stalą 304L: Fe 62–70%, Cr 18–21%, Ni 7–10%, z niewielkim lokalnym wzbogaceniem w Ti i V. Liniowa analiza EDS przez granicę 4L7/3R12 pokazała płynny gradient stężeń, bez ostrych skoków, co świadczy o dobrej ciągłości metalurgicznej (Rys. 31 i 32).

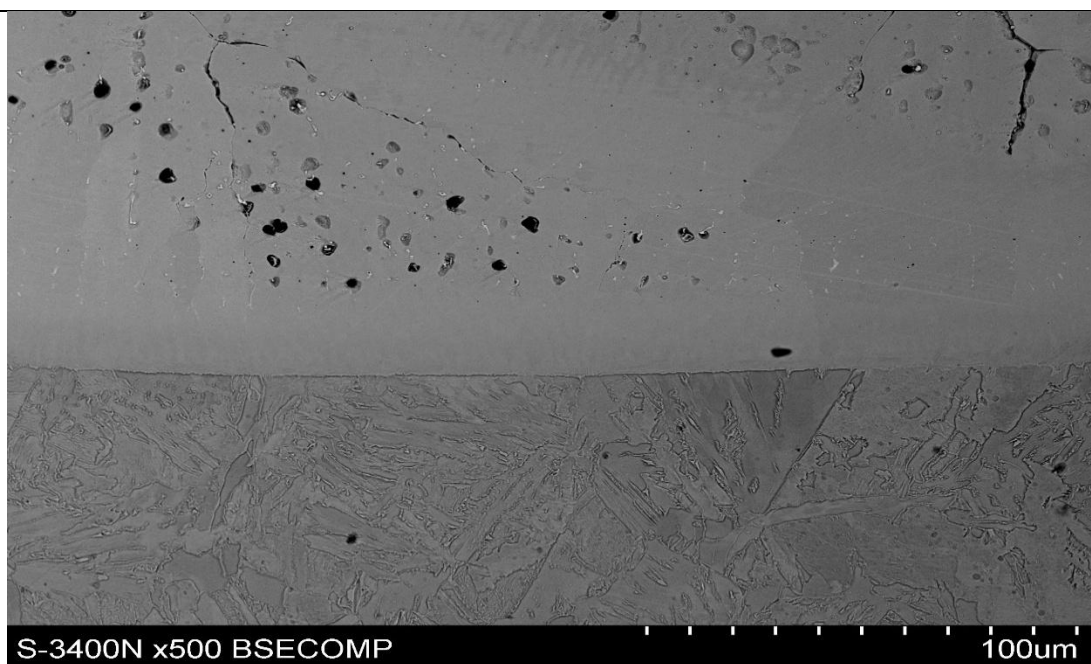


rys. 31. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS ujawnionych faz w obszarze spoiny rury zewnętrznej, próbka 12D

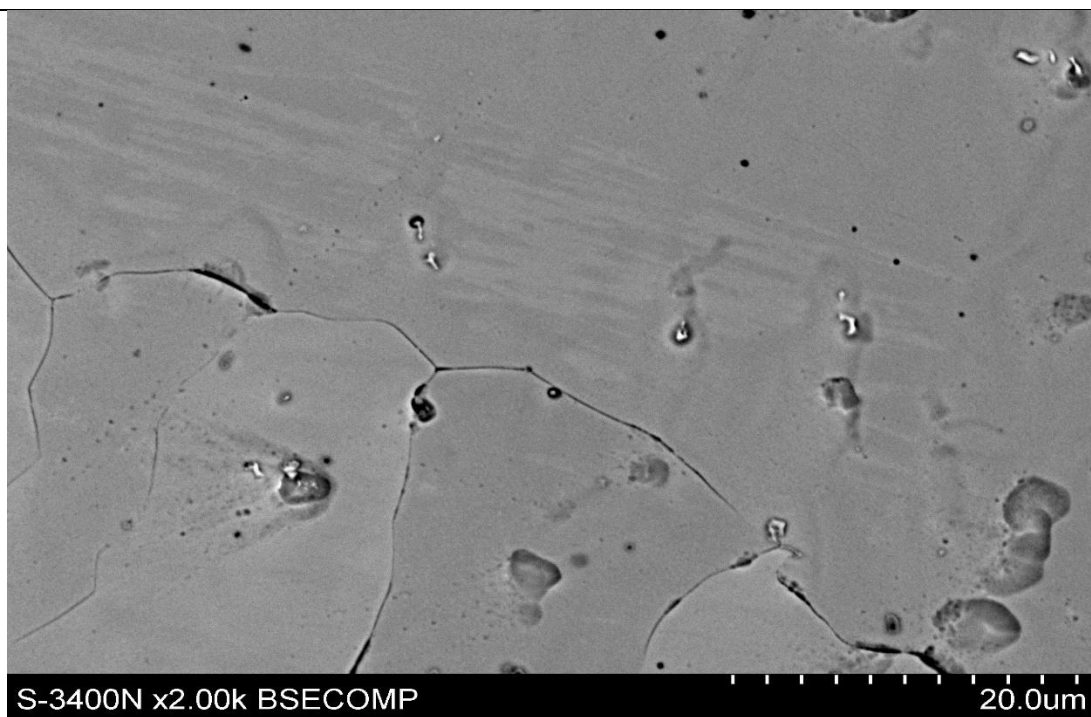


rys. 32. Rozkład liniowy pierwiastków na linii wtopienia spoiny złącza rury zewnętrznej w spoinę złącza rury wewnętrznej, złącze 12D

W próbce D2.1 (Sanicro 38/4L7) materiał rodzimy zachował strukturę ferrytyczno-perlitową, natomiast w SWC występowały zarówno obszary drobnoziarniste, jak i przegrzane z morfologią Widmanstättena. Przy granicy z warstwą Sanicro 38 obserwowano strefę odwęglenia, widoczną jako jasny pas ferrytu pozbawionego perlitu. Spoina hybrydowa wykazała kolumnowe dendryty austenityczne o nieregularnym układzie wachlarzowym, a obrazy BSE ujawniły kontrasty fazowe wskazujące na lokalną segregację pierwiastków ciężkich (Rys. 33 i 34).



rys. 33. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, linia wtopienia spoiny rury w spoinę rury wewnętrznej

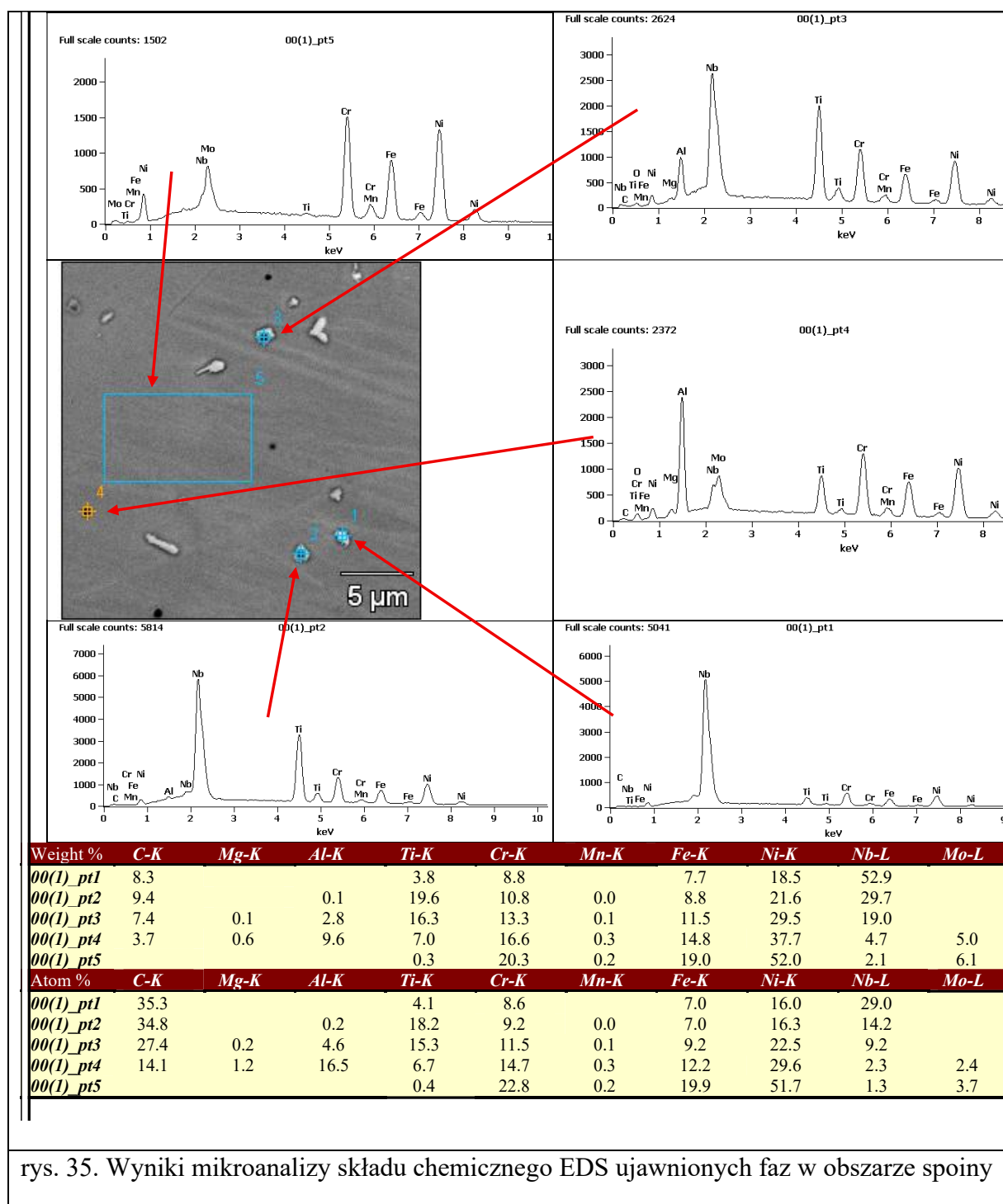


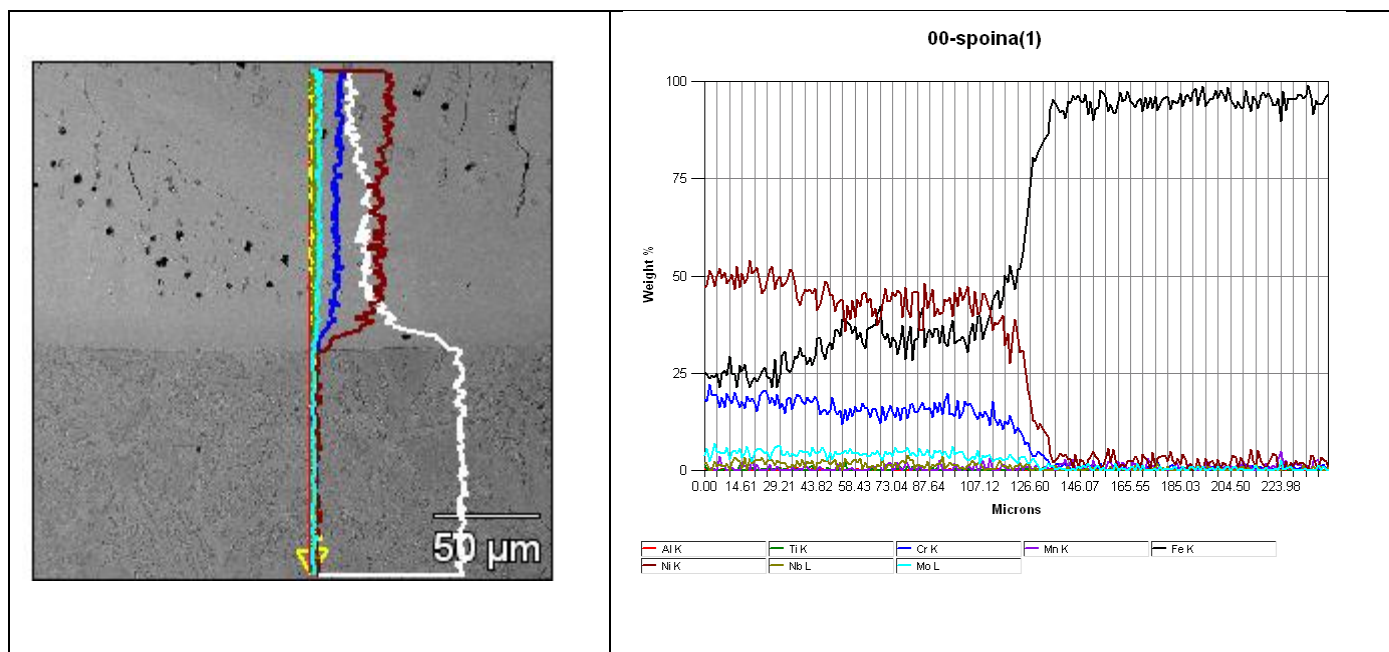
rys. 34. Mikrostruktura złącza – próbka, D2.1 powiększenie 2000x, obszar spoiny złącza rury zewnętrznej z widocznymi wtrąceniami i wżerami, które powstały podczas trawienia próbki

Punktowe analizy EDS (Rys. 35) potwierdziły skład osnowy spoiny Alloy 825: Ni 35–40%, Cr 19–23%, Fe 25–30%, Mo 5–8%, Cu 1,5–2%, Ti 0,5–1%. W mikroobszarach międzydendrytycznych stwierdzono lokalne wzbogacenie w Nb (do 19%) i Mo (12–13%), odpowiadające wydzieleniom typu Laves oraz węglikom/azotkom Ti-Nb. Obecność Nb, nieobecnego w składzie nominalnym Sanicro 38, jednoznacznie wskazuje na wpływ materiału dodatkowego użytego w procesie hybrydowym. Dodatkowo w jednej z próbek zaobserwowano pęcherz gazowy, co sugeruje możliwość lokalnej porowatości spoin hybrydowych. Analiza liniowa wykazała płynny gradient składu przez granicę 4L7/Sanicro 38, z widocznym wzrostem udziału Ni, Cr i Mo po stronie spoiny oraz strefą odwęglenia po stronie stali (Rys. 36).

Porównanie wyników z danymi katalogowymi producenta Alleima potwierdziło zgodność składu spoin z materiałami bazowymi. W spoinie 3R12 odnotowano niewielkie zwiększenie Fe z powodu rozcieńczenia materiałem 4L7, natomiast w spoinie Sanicro 38 zidentyfikowano wpływ materiału dodatkowego, skutkujący powstawaniem lokalnych faz Lavesa.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że spawanie laserowe sprzyja powstawaniu drobnej, jednorodnej struktury dendrytycznej z minimalną segregacją, natomiast napawanie hybrydowe prowadzi do grubszej morfologii dendrytów, szerszej SWC, obecności stref odwęglenia i lokalnej segregacji pierwiastków stopowych. Mimo występowania drobnych defektów, obie metody umożliwiają uzyskanie spoin o poprawnej mikrociągłości i składzie chemicznym zgodnym z założeniami, co potwierdza ich przydatność w wytwarzaniu elementów ciśnieniowych dla przemysłu energetycznego.





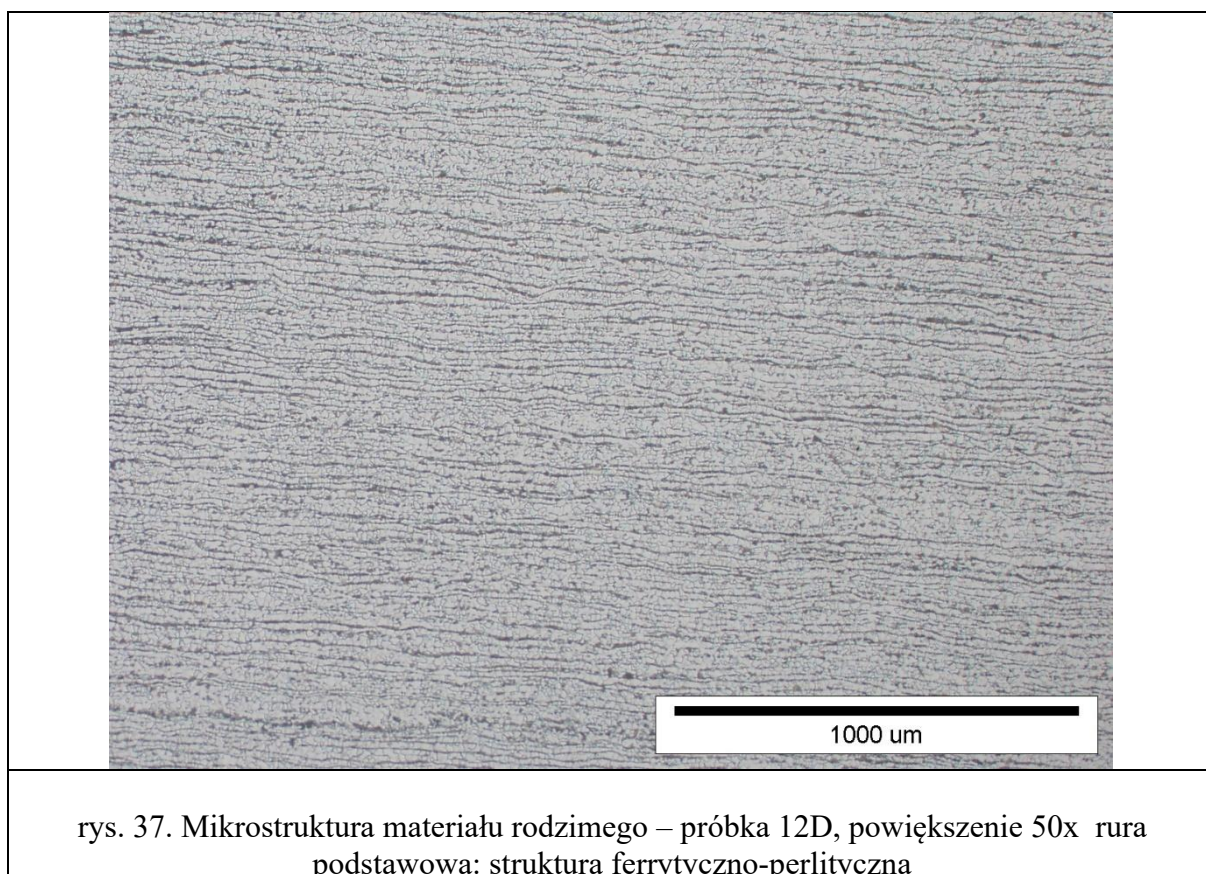
rys. 36. Rozkład liniowy pierwiastków na linii wtopienia spoiny złącza rury zewnętrznej w spoinę złącza rury wewnętrznej, złącze D2.1

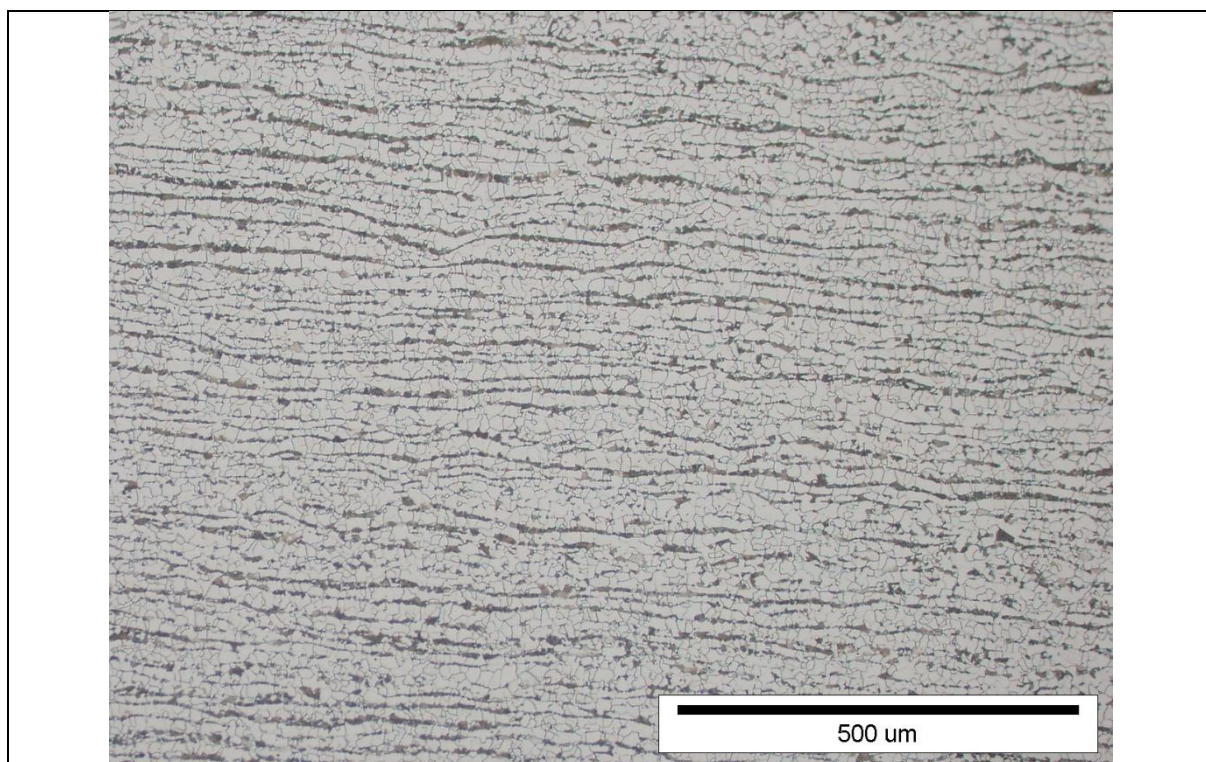
9.3. Mikroskopia świetlna

Mikroskopia świetlna pozwoliła na analizę mikrostruktury materiału rodzimego, stref wpływu ciepła (SWC) oraz metalu spoin w badanych złączach dwuwarstwowych. Obserwacjom poddano przekroje poprzeczne próbek D1.2 (3R12/4L7) i D2.1 (Sanicro 38/4L7). Poniżej przedstawiono charakterystyczne mikrostruktury poszczególnych obszarów (Rys. 37÷53).

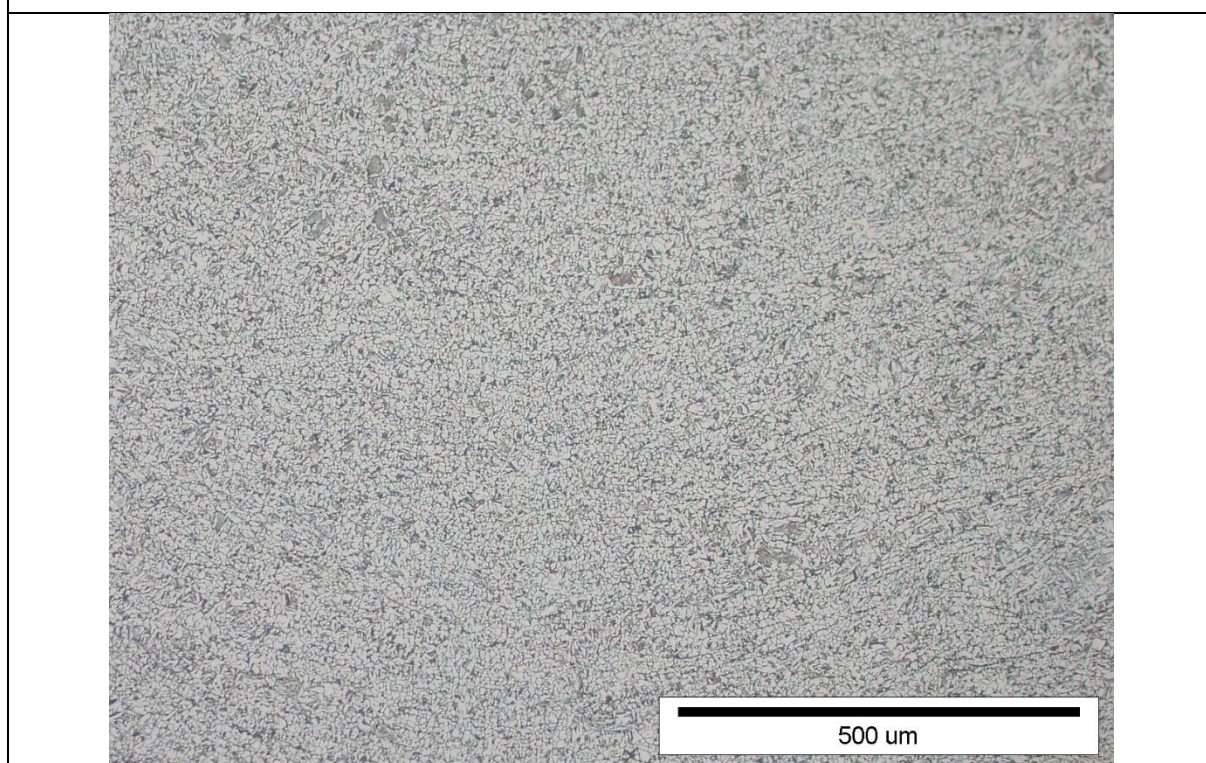
W próbce D1.2 materiał rodzimy stali 4L7 wykazywał typową dwufazową mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną (Rys. 37 i 38). W SWC, wraz ze zbliżaniem się do spoiny, obserwowano przemiany strukturalne: w obszarach niższych temperatur powstawała drobnoziarnista mikrostruktura (Rys. 39), natomiast w rejonach o najwyższym nagrzaniu – gruboziarnista struktura przegrzana z widoczną morfologią Widmanstättena (Rys. 40 i 41). Podobne zmiany zachodziły w materiale spoiny wewnętrznej 4L7, częściowo przegrzanej podczas łączenia warstwy zewnętrznej. Linia wtopienia spoiny zewnętrznej 3R12 była wyraźnie zaznaczona; lokalnie obserwowano drobne pęcherze gazowe (Rys. 42 i 43). Metal spoiny wykazywał kolumnową strukturę dendrytów, rosnących prostopadle do linii wtopienia, co wskazuje na kierunkowe krzepnięcie przy dużym gradiencie temperatury (Rys. 44).

W próbce D2.1 materiał rodzimy stali 4L7 miał pasmową mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną (Rys. 45). W SWC powstawały drobnoziarniste struktury w obszarach niższych temperatur (Rys. 46) oraz bliżej spoiny występuje obszar przegrzany o grubym ziarnie z charakterystyczną strukturą Widmanstättena (Rys. 48, 49 i 50). Szczególnym elementem była strefa odwęglenia przy granicy z Sanicro 38, widoczna jako jasny pas pozbawiony perlitu, wynikający z dyfuzji węgla do stopu wysokostopowego (Rys. 47). W obszarze spoiny próbki D2.1 zaobserwowano strukturę przegrzaną ferrytyczno-perlityczną w metalu spoiny rury wewnętrznej 4L7 (Rys. 50). W centralnej części spoiny zaobserwowano pęcherz gazowy (Rys. 51), potwierdzający porowatość zidentyfikowaną w badaniach makroskopowych. Linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej Sanicro 38 jest wyraźnie zaznaczona, a po stronie stopu wysokostopowego mikrostruktura pozostaje jednorodna, austenityczna (Rys. 52). Spoina wykazywała kolumnową strukturę dendrytów, analogiczną do obserwowanej w spoinie 3R12, co świadczy o kierunkowym krzepnięciu metalu przy znacznym gradiencie cieplnym (Rys. 53).

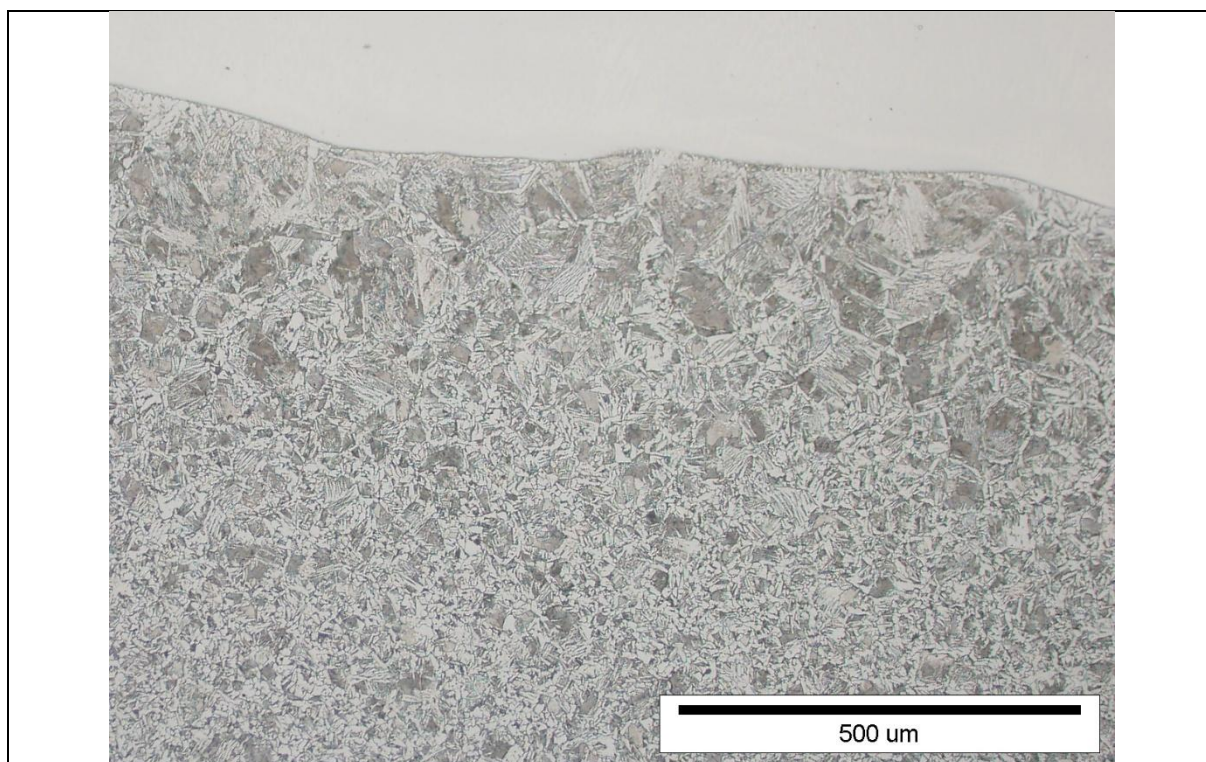




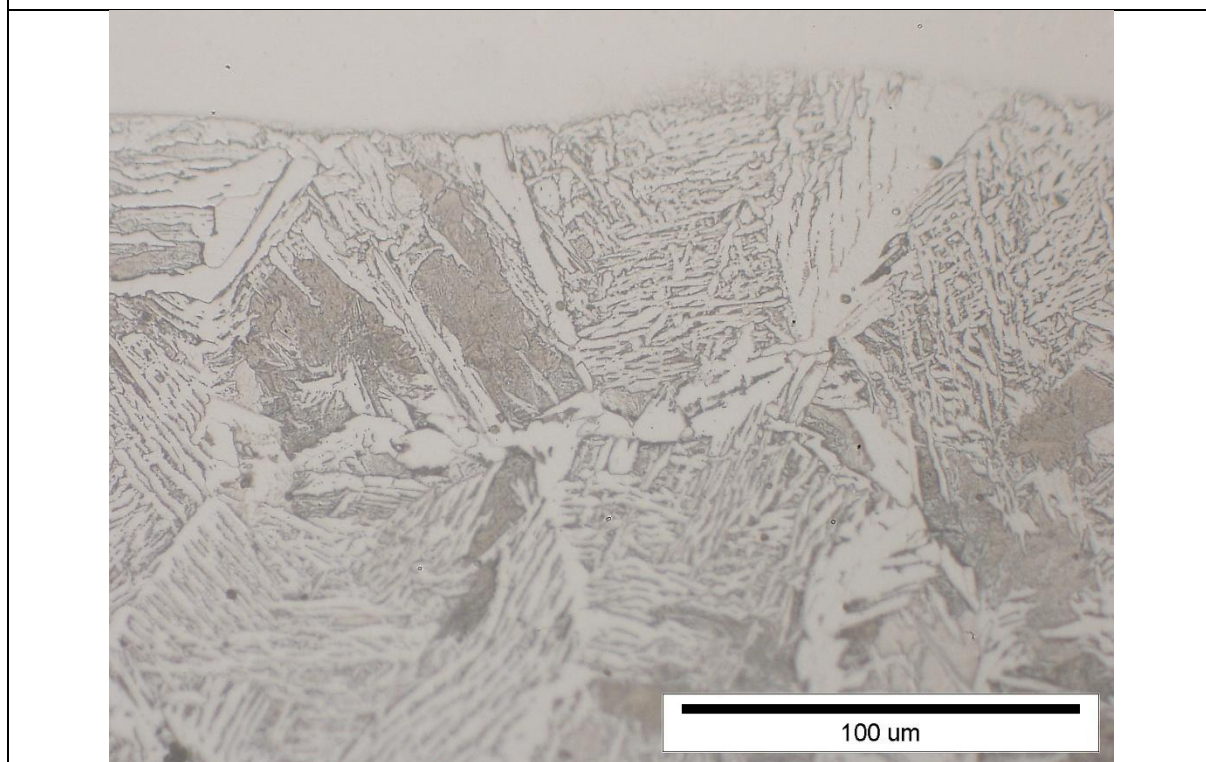
rys. 38. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: struktura ferrytyczno-perlityczna



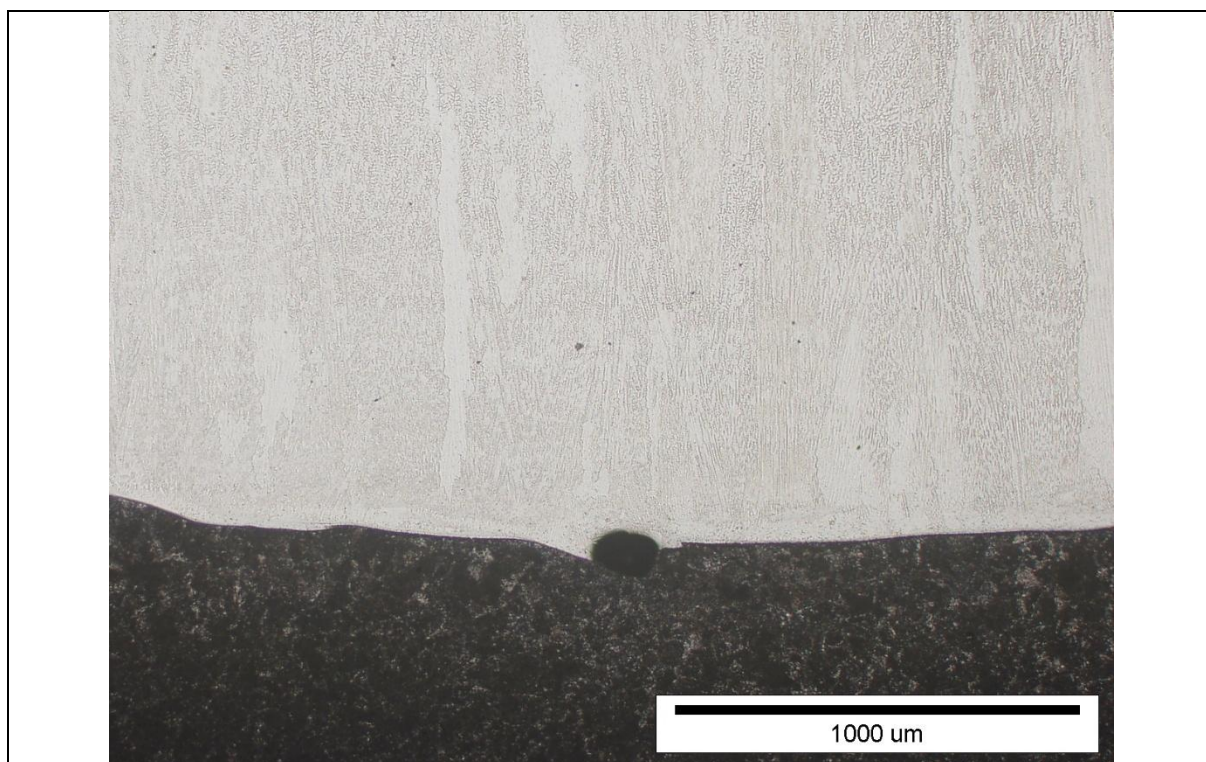
rys. 39. Mikrostruktura spoiny warstwy wewnętrznej – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna w SWC



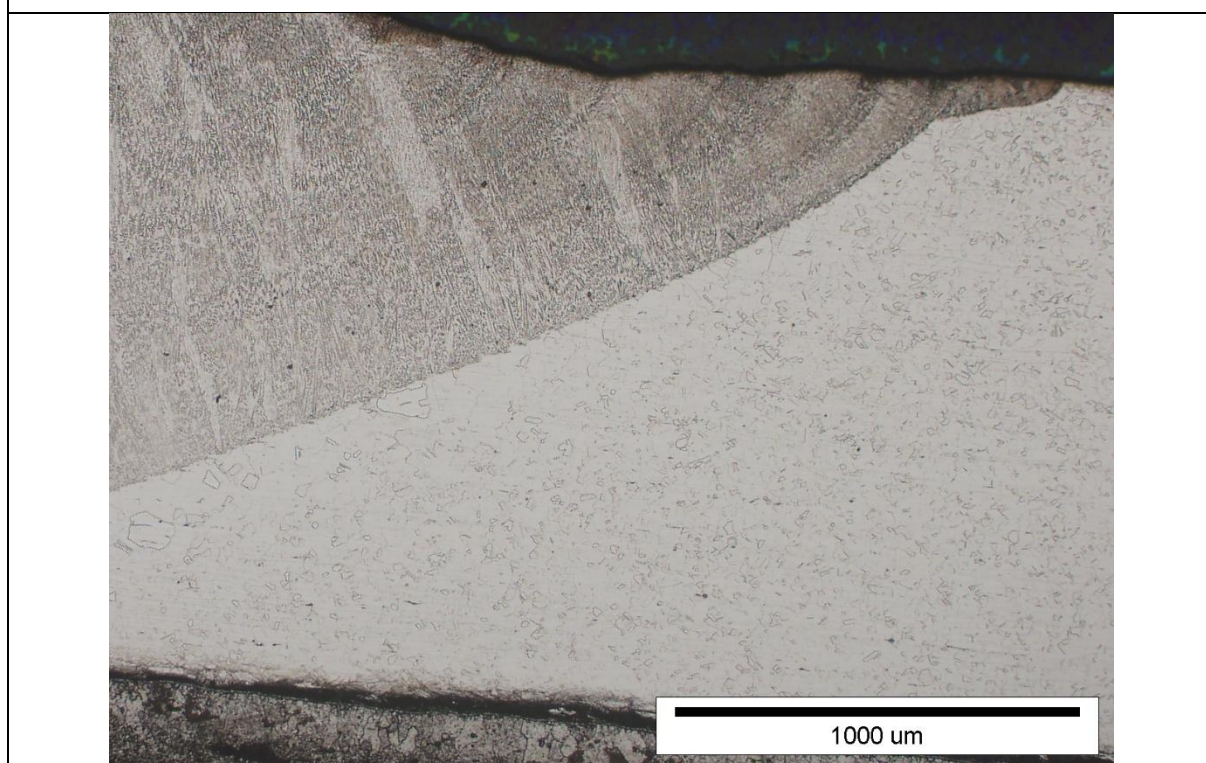
Rys. 40. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)



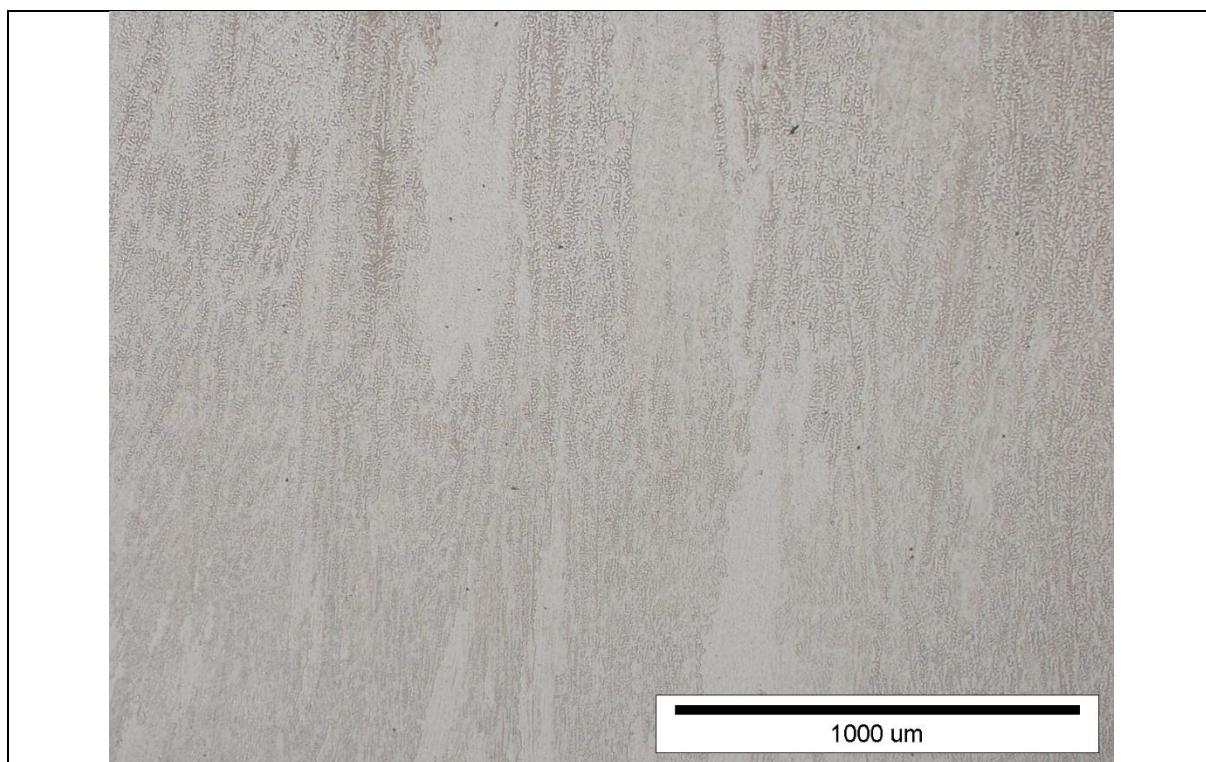
rys. 41. Mikrostruktura spoiny – próbka 12D, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)



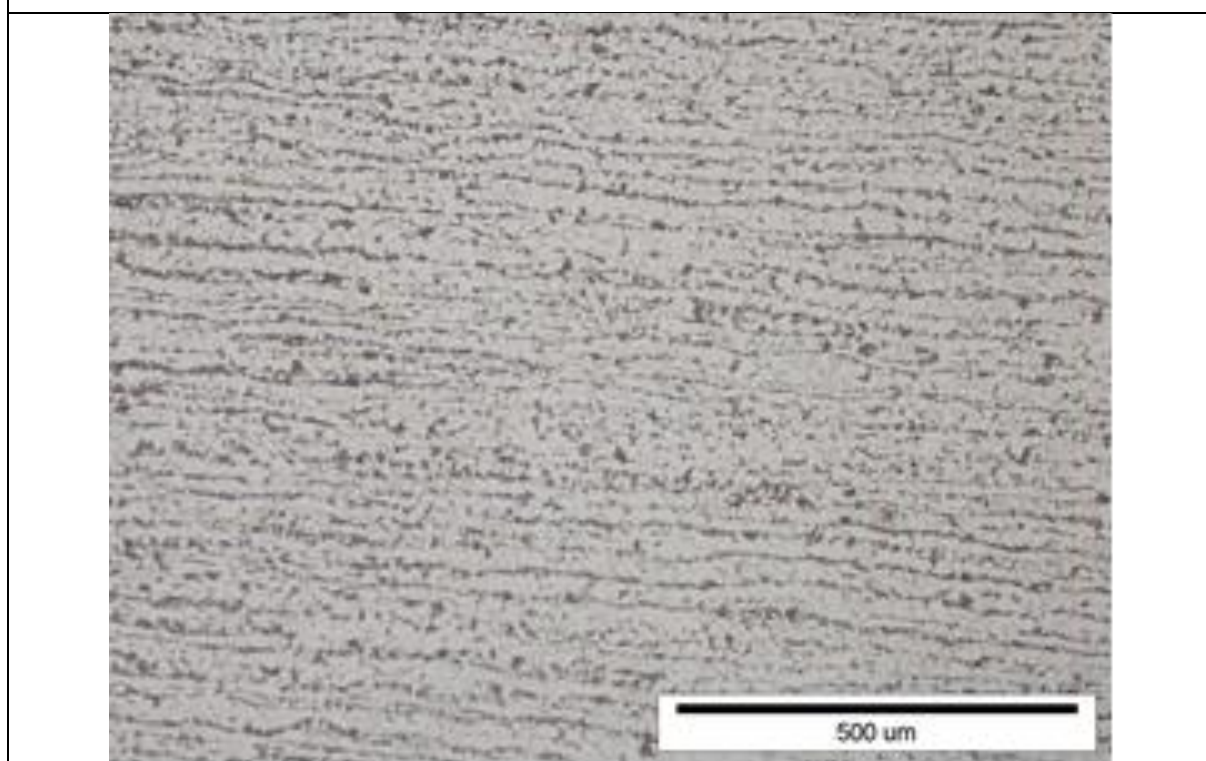
rys. 42. Mikrostruktura spoiny – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej z widocznym pęcherzem w spoinę rury wewnętrznej



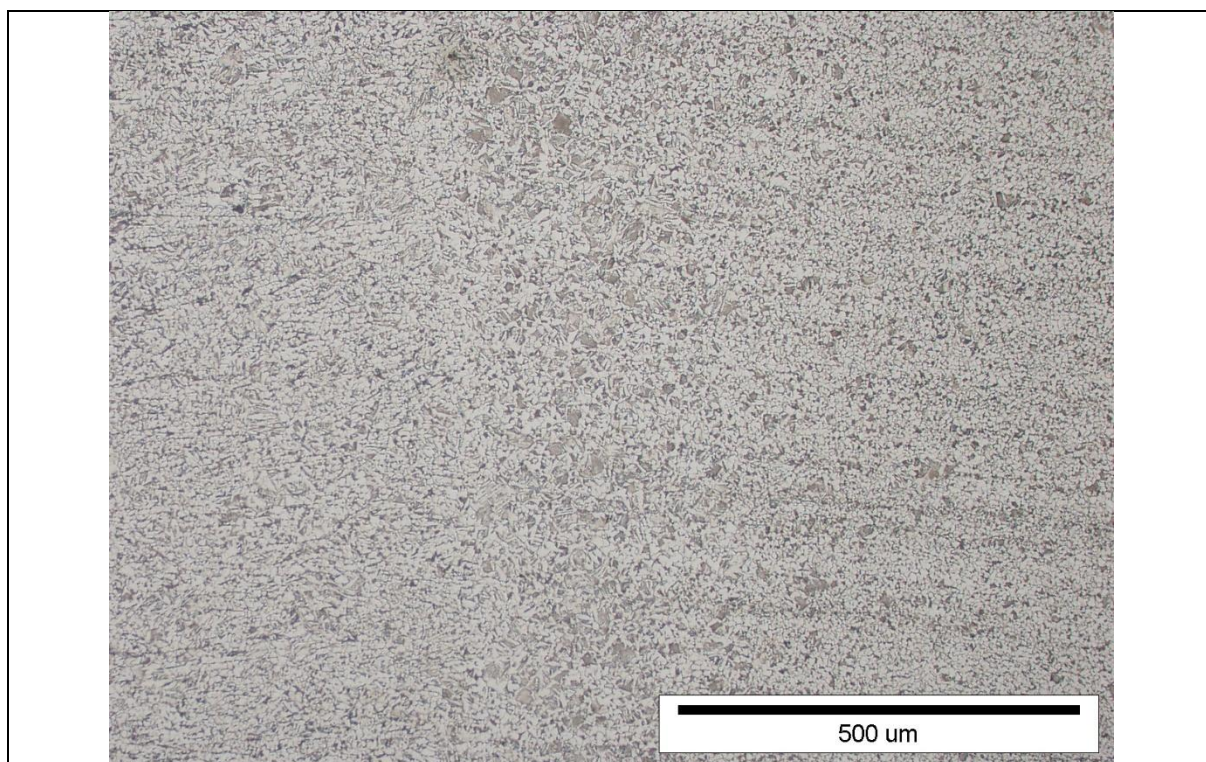
rys. 43. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej materiał rury zewnętrznej



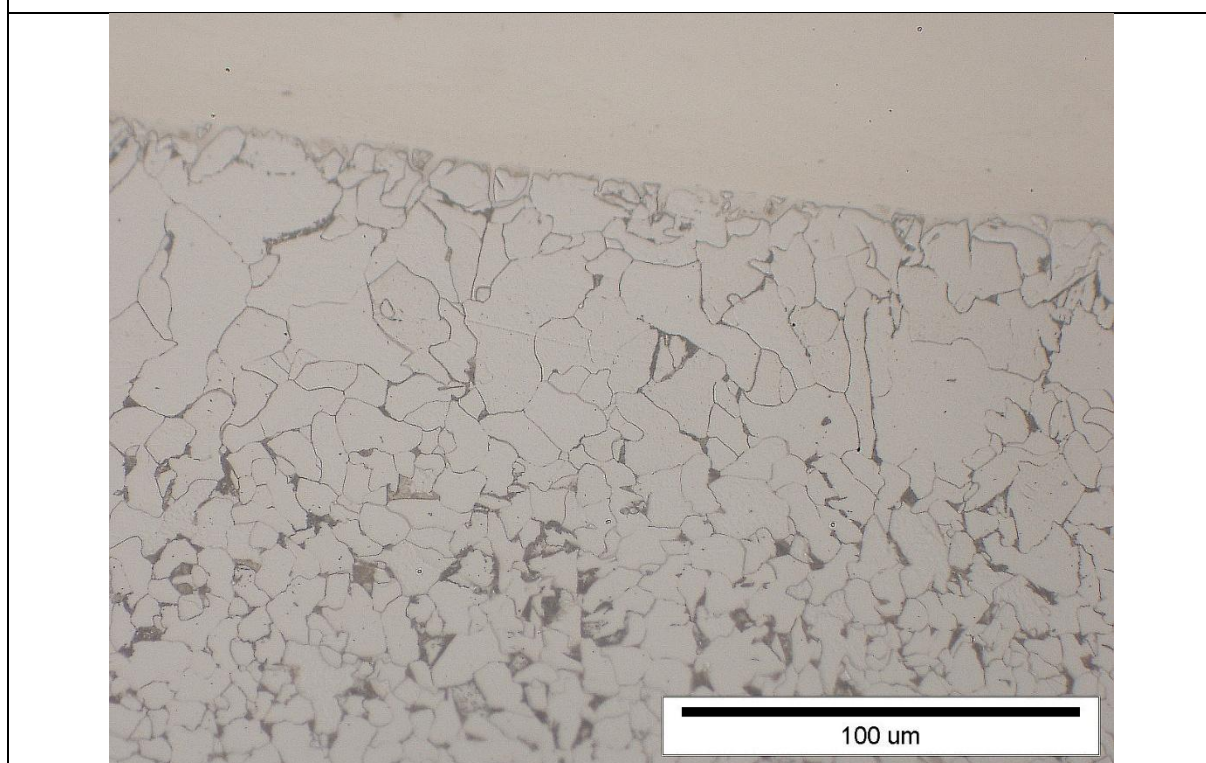
rys. 44. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: struktura kolumnowa spoiny rury zewnętrznej



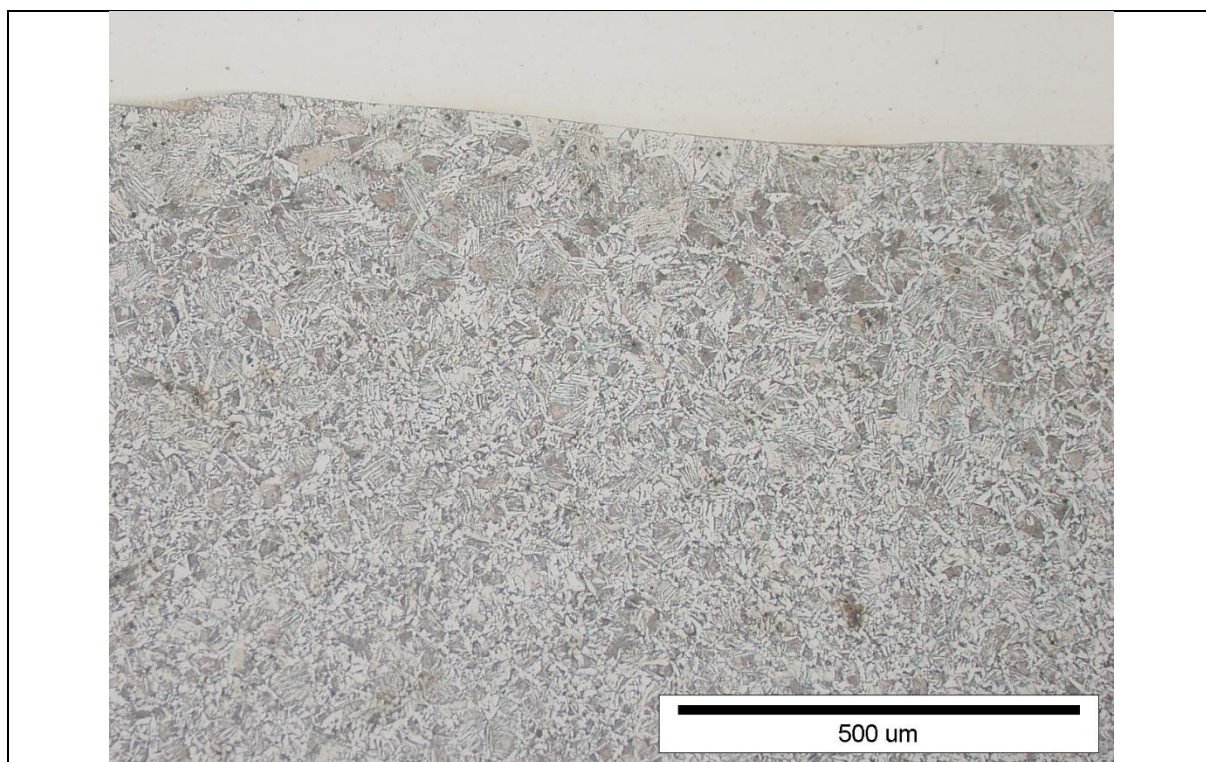
rys. 45. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: pasmowa struktura ferrytyczno-perlityczna



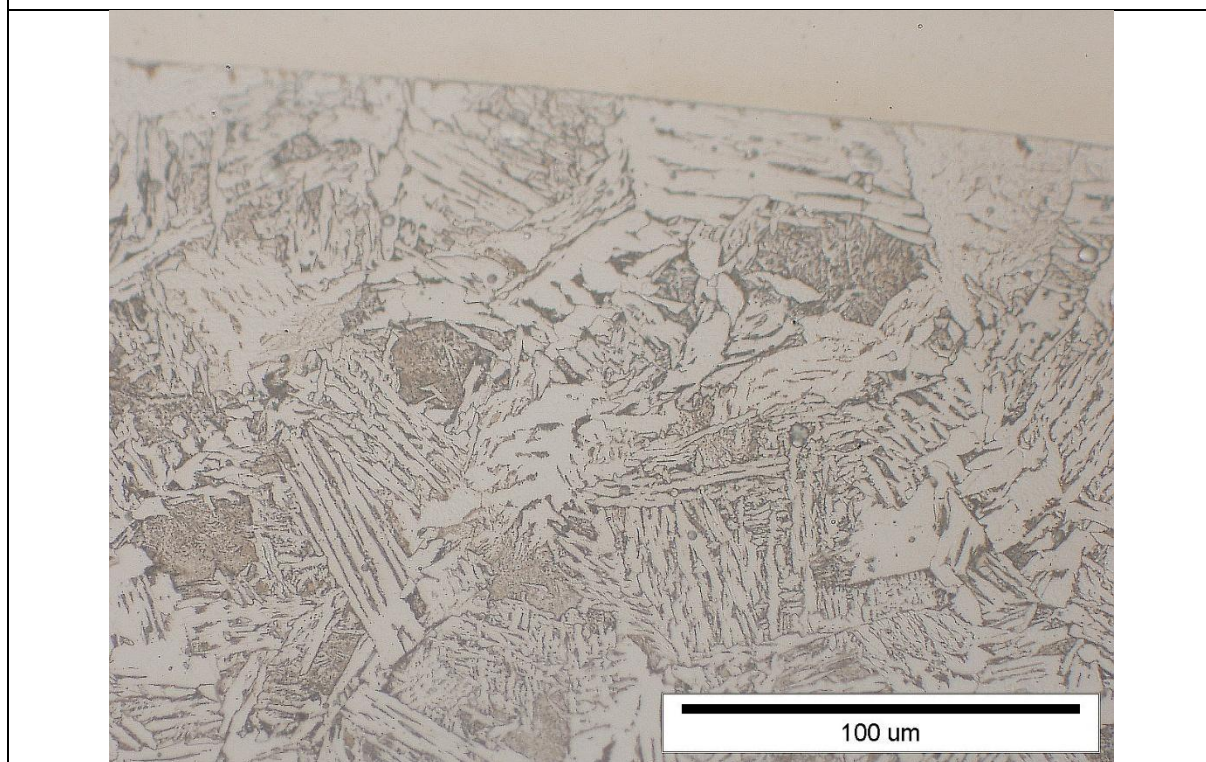
rys. 46. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna w SWC rury podstawowej



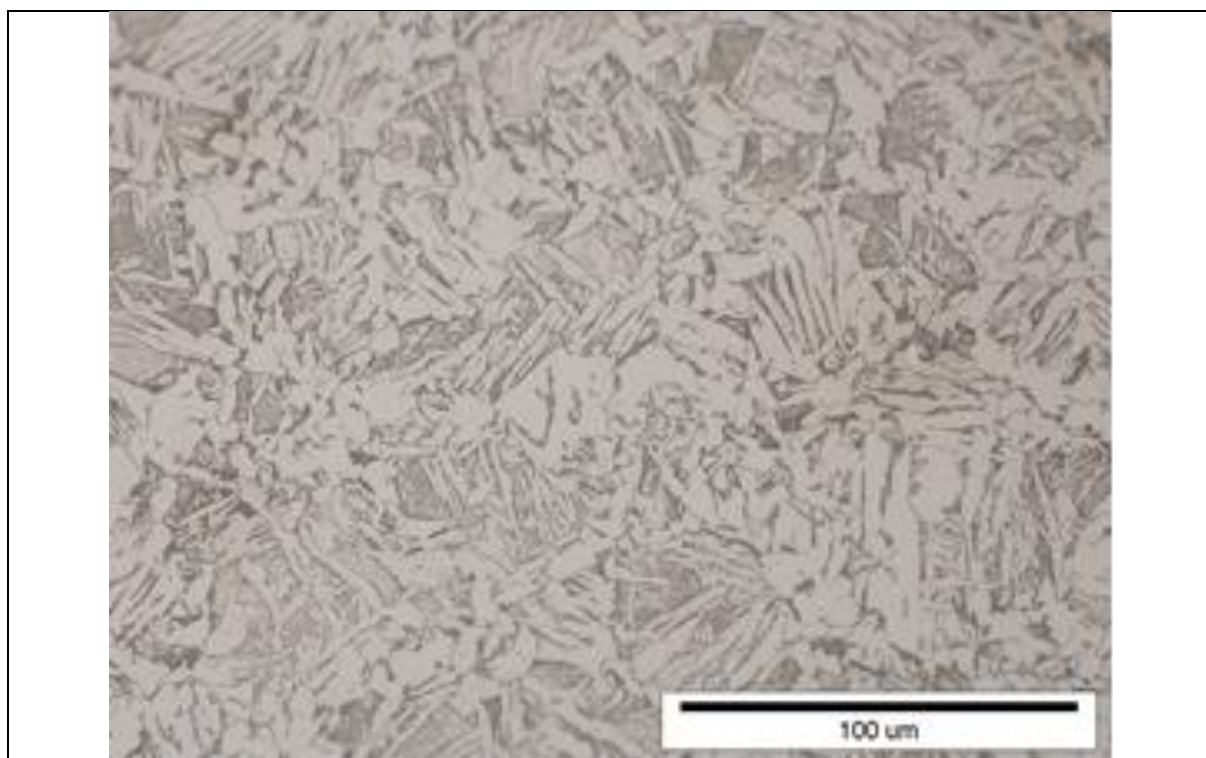
rys. 47. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: struktura połączenia rura zewnętrzna z rurą wewnętrzną, widoczne odwęglenie od strony rury wewnętrznej



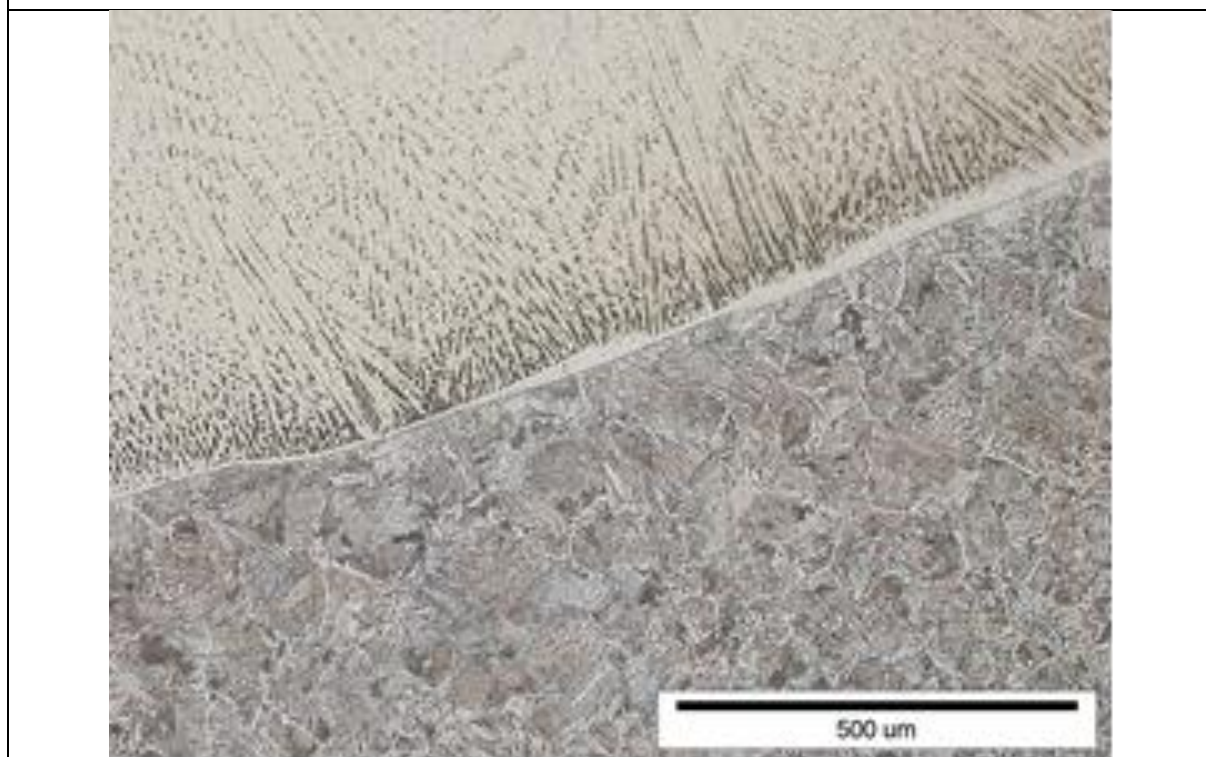
rys. 48. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączu rury podstawowej)



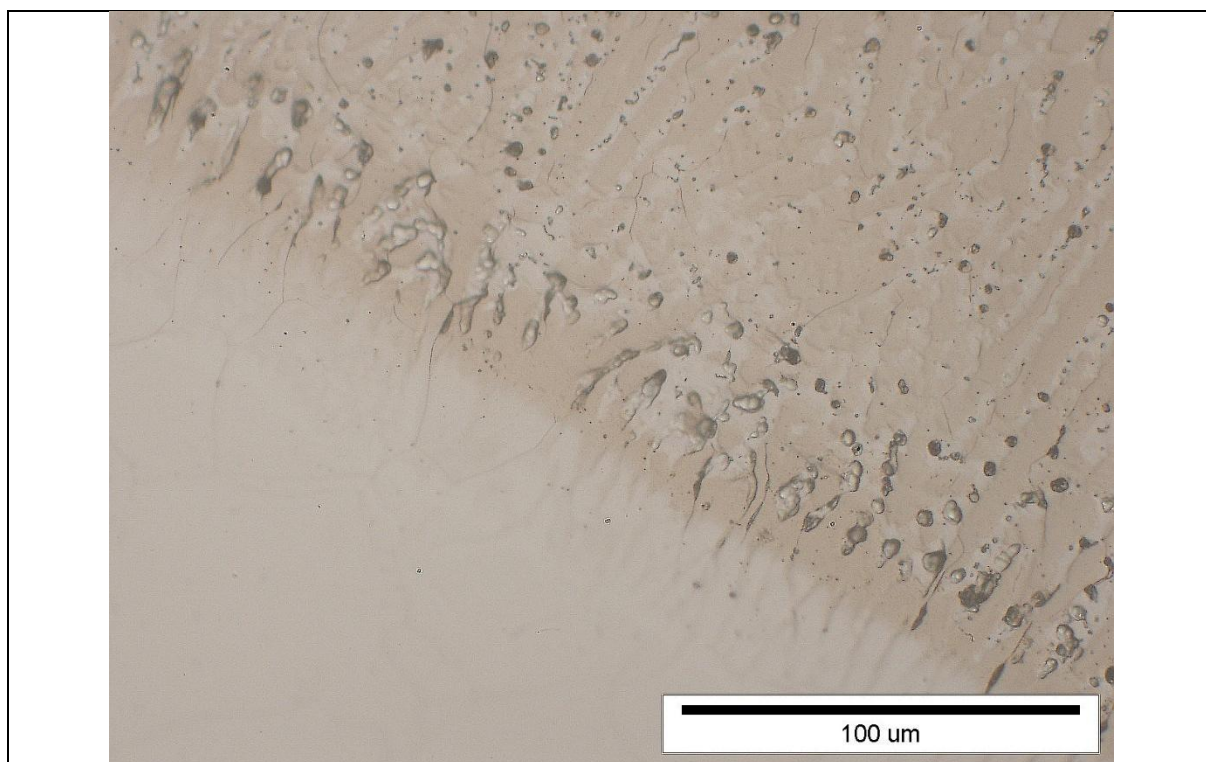
rys. 49. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączu rury podstawowej)



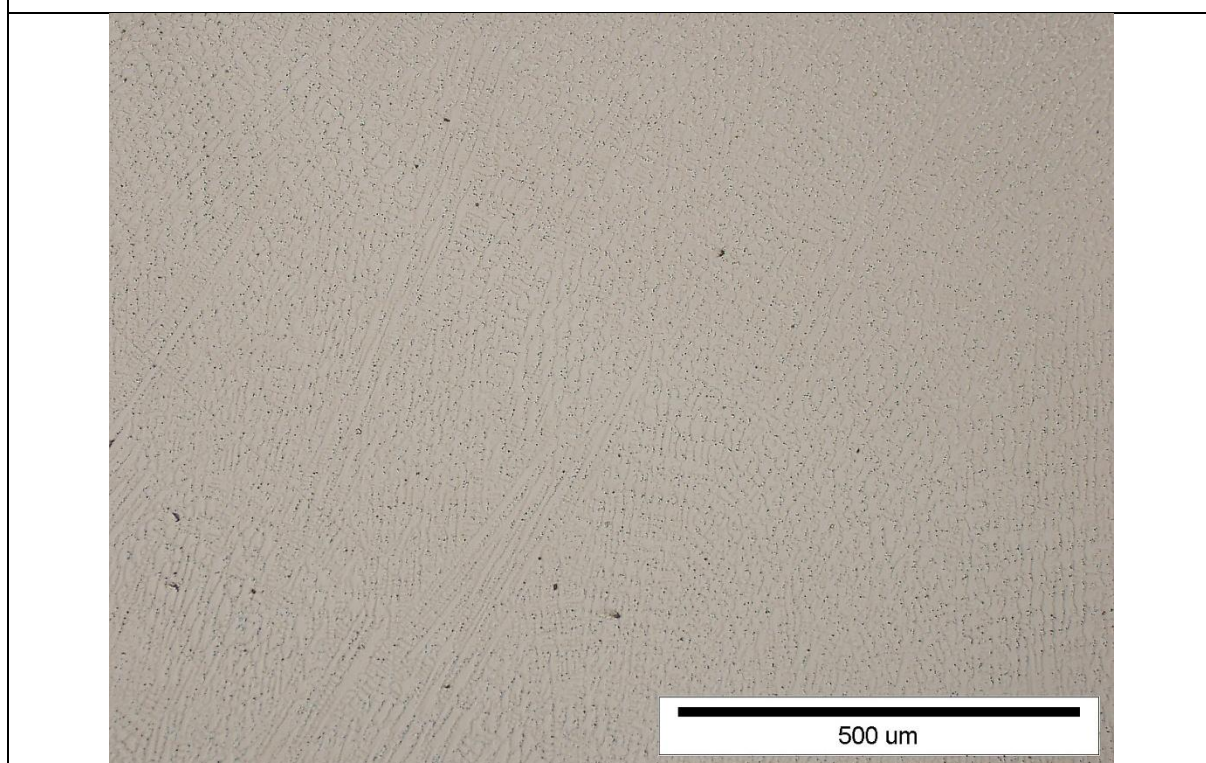
rys. 50. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)



Rys. 51. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej z widocznym pęcherzem w spoinę rury wewnętrznej



Rys. 52. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka D2.1, powiększenie 500x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej w materiał rury zewnętrznej



rys. 53. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka D2.1, powiększenie 100x, Spoina: struktura kolumnowa spoiny rury zewnętrznej

9.4. Podsumowanie badań mikroskopowych

Analiza przekrojów złączy potwierdziła prawidłową geometrię spoin i pełne przetopienie ścianek. Obserwacje makroskopowe nie wykazały istotnych niezgodności ani deformacji. Materiał stali 4L7 zachowuje typową mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną z pasmowym układem perlitu. W strefie wpływu ciepła zidentyfikowano drobnoziarniste obszary oraz lokalne występowanie struktury Widmanstättena, co świadczy o krótkotrwałym nagrzaniu do wysokich temperatur i szybkim stygnięciu. Metal spoiny 4L7 jest drobno dendrytyczny, bez mikropęknięć i porów, co wskazuje na stabilny przebieg krystalizacji.

Spoina stali 3R12 ma jednorodną strukturę austenityczną z dobrze wykształconymi dendrytami kolumnowymi. Mikrostruktura pozostaje jednofazowa, a udział δ -ferryty jest śladowy. Analizy EDS wykazały skład zgodny z nominalną stalą X2CrNi18-10, z niewielkimi wzbogaceniami Ti i V w obszarach granicznych, wynikającymi z mikrostopowych dodatków 4L7. Gradient stężeń pierwiastków jest łagodny, co potwierdza płynne przejście składu chemicznego między stalami.

W złączy Sanicro 38 obserwuje się również jednofazową, austenityczną mikrostrukturę, lecz dendryty są grubsze i bardziej nieregularnie ułożone. W obrazie BSE ujawniono kontrasty wskazujące na segregację pierwiastków stopowych oraz lokalne wydzielения bogate w Nb i Mo, interpretowane jako faza Lavesa. EDS potwierdziło, że osnowa spoiny odpowiada Alloy 825, a lokalne wzbogacenia wynikają z użycia materiału dodatkowego. Przy granicy z 4L7 występuje wąska strefa odwęglenia, świadcząca o dyfuzji węgla w kierunku stopu niklu. Szerokość strefy wpływu ciepła jest większa niż w złączy 3R12/4L7, co odzwierciedla wyższy wkład ciepła podczas procesu.

Podsumowując, oba złącza wykazują wysoką jakość metalurgiczną: spoiny są ciągłe i jednorodne, a składy chemiczne odpowiadają deklarowanym materiałom. Różnice wynikają z właściwości stopów – spoiny ze stali nierdzewnej są drobno dendrytyczne i bardziej jednorodne, natomiast spoiny ze stopu niklu mają grubszą morfologię dendrytów i większą skłonność do lokalnych segregacji. Brak faz kruchych i intensywnej porowatości potwierdza odporność złączy na pękanie oraz ich przydatność w eksploatacji dwuwarstwowych rur kompozytowych.

10. Dobór parametrów technologicznych spawania laserowego

Proces spawania laserowego rur kompozytowych 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7 przeprowadzono z wykorzystaniem głowicy optycznej Trumpf BEO D70, stosowanej także w technologii napawania hybrydowego. Głowica wyposażona była w kolimator o ogniskowej $f_c = 200$ mm oraz soczewkę skupiającą o ogniskowej $f_{og} = 400$ mm, co pozwoliło na uzyskanie wiązki o średnicy ogniska $d_{og} = 0,6$ mm i strefy Rayleigh'a $ZR = 10$ mm. Promień prowadzono światłowodem o średnicy $300\ \mu\text{m}$. Tak skonfigurowany układ zapewniał wysoką gęstość mocy, umożliwiając pełny przetop warstwy wewnętrznej rury stalowej 4L7 (P265GH). Poprawny dobór parametrów technologicznych w procesie spawania laserowego ma fundamentalne znaczenie dla zapewnienia optymalnej jakości spoiny, jednorodności mikrostruktury oraz powtarzalności wyników. Zmienność warunków cieplnych, wpływ materiału osłonowego oraz specyfika składników chemicznych warstw kompozytowych wymagała starannego ustalenia podstawowych parametrów spawania.

Parametry procesu utrzymywano na stałym poziomie, co pozwoliło na wiarygodne porównanie wpływu zmiennych czynników, takich jak rodzaj materiału czy zastosowanie gazu osłonowego. Wartości przyjęte do badań były następujące:

- moc wiązki lasera $P = 4500$ W,
- prędkość spawania $V_s = 0,8$ m/min,
- prędkość wiązki $V = 0,013333$ m/s,
- pozycja ogniska $f = 0$ mm (na powierzchni złącza),
- gaz osłonowy: argon lub brak (zależnie od próbki).

Zestawienie parametrów technologicznych przedstawiono w tabelicy 7.

Tablica 7. Zestawienie parametrów procesu dla poszczególnych próbek

Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7

Materiał	Oznaczenie próbek	Moc lasera (P), [W]	Prędkość spawania (V_s), [m/min]	Prędkość wiązki, (V) [m/s]	Położenie ogniska (f), [mm]	Gaz osłonowy
3R12/4L7	D1	4500	0,8	0,013333	0	Brak
Sanicro 38/4L7	D2	4500	0,8	0,013333	0	Brak
Sanicro 38/4L7	D3	4500	0,8	0,013333	0	Argon
3R12/4L7	D4	4500	0,8	0,013333	0	Argon
Sanicro 38/4L7	D5	4500	0,8	0,013333	0	Argon
3R12/4L7	D6	4500	0,8	0,013333	0	Argon

Dobór parametrów technologicznych spawania laserowego rur kompozytowych Sanicro 38/4L7 oraz 3R12/4L7 wykazał jednoznacznie, że obecność gazu osłonowego w istotny sposób wpływa na jakość spoin. W próbkach wykonanych bez zastosowania osłony (D1 i D2) zaobserwowano lokalne przebarwienia, porowatość oraz powierzchniowe utlenienia w obszarze lica. Natomiast w przypadku próbek D3–D6, w których wykorzystano osłonę argonową, spoiny charakteryzowały się gładkim licem, równomiernym rozproszaniem stopiwa oraz brakiem zmian barwnych. Zmiany te potwierdzają, że argon zapewnia skuteczniejszą ochronę cieplną i metalurgiczną złącza przed dostępem powietrza.

Utrzymanie stałych wartości mocy lasera i prędkości przesuwu wiązki we wszystkich próbkach pozwoliło na rzetelną analizę wpływu zmiennych czynników, ograniczając możliwość wystąpienia niejednoznaczności interpretacyjnych. Dzięki temu uzyskano podstawy do precyzyjnego porównania efektów metalurgicznych uzyskanych w różnych wariantach materiałowych i przy różnych warunkach osłony gazowej.

Dodatkowo skupienie wiązki na powierzchni złącza ($f = 0$ mm) umożliwiło uzyskanie stabilnego przetopu w warstwie wewnętrznej, bez ryzyka przepalenia materiału i bez konieczności korekty położenia wiązki w głąb. W rezultacie otrzymano spoiny

charakteryzujące się symetryczną strefą wpływu ciepła (SWC) oraz równomiernym przetopem przez całą grubość ścianki rury (6,53 mm).

Zestawienie wyników jednoznacznie wskazuje, że zastosowanie osłony gazowej w postaci argonu znacząco poprawia jakość powierzchni i właściwości metalurgiczne spoiny, a odpowiednia konfiguracja układu optycznego umożliwia osiągnięcie pełnego przetopu w jednym przejściu. Utrzymanie ustabilizowanych warunków procesu dodatkowo sprzyja precyzyjnej ocenie porównawczej, co potwierdza zasadność przyjętych założeń technologicznych.

11. Dobór parametrów technologicznych napawania hybrydowego

Napawanie hybrydowe stanowi jedną z najbardziej zaawansowanych i perspektywicznych technologii łączenia materiałów konstrukcyjnych, szczególnie w aplikacjach wymagających połączeń o wysokiej jakości, wytrzymałości oraz powtarzalności parametrów technologicznych. Metoda ta łączy zalety dwóch procesów: wysokoenergetycznego spawania laserowego, cechującego się dużą precyzją i głębokością penetracji, oraz konwencjonalnego spawania łukowego MAG (Metal Active Gas), zapewniającego stabilne wypełnienie szczeliny i korzystne kształtowanie lica spoiny. Synergiczne oddziaływanie obu źródeł energii umożliwia pełniejszą kontrolę przebiegu procesu, a tym samym kształtowanie właściwości strukturalnych i mechanicznych wytworzonych połączeń.

W ramach niniejszej pracy badania prowadzono na rurach kompozytowych typu Sandvik, zbudowanych z dwóch warstw: wewnętrznej ze stali węglowej 4L7 (odpowiednik P265GH) oraz zewnętrznej wykonanej odpowiednio ze stali nierdzewnej X2CrNi18-10 (oznaczenie 3R12) lub stopu niklu Sanicro 38 (Alloy 825). Proces spawania hybrydowego realizowano w konfiguracji L-A (łuk atakujący), w której łuk elektryczny skierowany był w stronę kierunku spawania. Zastosowanie takiej konfiguracji sprzyjało stabilizacji jeziora spawalniczego, poprawiało stabilność łuku oraz umożliwiało uzyskanie głębszego przetopu, co miało szczególne znaczenie przy łączeniu warstw o odmiennych właściwościach cieplnych.

11.1. Charakterystyka technologii hybrydowej laser + MAG

Technologia hybrydowa laser + MAG znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle stoczniovym, energetycznym oraz petrochemicznym ze względu na możliwość wykonywania połączeń w trudnodostępnych miejscach, przy minimalnym odkształceniu cieplnym oraz często w jednym przejściu. Połączenie zalet spawania laserowego i łukowego umożliwia zwiększenie głębokości wtopienia, poprawę stabilności procesu dzięki synergii źródeł energii, efektywne wprowadzanie materiału dodatkowego oraz ograniczenie naprężeń reszkowych. W badaniach przyjęto założenie, że zastosowanie konfiguracji L-A, w której łuk atakujący poprzedza działanie wiązki laserowej, pozwoli na poprawę jakości napoin na zewnętrznej warstwie rur kompozytowych. Oczekiwano, że rozwiązanie to zapewni korzystniejszy rozkład temperatury, stabilną kontrolę jeziora spawalniczego oraz ograniczy ryzyko powstawania wad.

11.2. Parametry technologiczne procesu napawania hybrydowego

Parametry procesu napawania hybrydowego zestawiono w tablicy 8. Analizie poddano dwie próbki (D1 i D2), różniące się prędkością napawania i podawania drutu, przy zachowaniu stałej mocy lasera oraz niezmiennej pozycji ogniska.

Tablica 8. Parametry technologiczne spawania hybrydowego laser + MAG

Nr próbki	P [kW]	Vn [m/min]	Vd [m/min]	I [A]	U [V]	Kor. U [V]	a [mm]	f [mm]	Dw [mm]	Q [kJ/cm]
D1	0,5	0,2	5	150	18	3	3	0	16	9,6
D2	0,5	0,1	8,5	120	20	3	3	0	16	17,4

P, [kW] - moc lasera, Vn, [m/min] - prędkość napawania, Vd, [m/min] - prędkość podawania drutu, I, [A] - natężenie prądu spawania, U, [V] - napięcie łuku spawalniczego, kor. U, [V] - korekcja napięcia, a, [mm] - długość wysuwu drutu, f, [mm] - odległość ogniska lasera.

Dw, [mm] - średnica wiązki lasera, Q, [kJ/cm] - energia liniowa

11.3. Omówienie parametrów procesu napawania

Moc wiązki laserowej w obu próbkach wynosiła 0,5 kW, co okazało się wystarczające do uzyskania stabilnego przetopu w warstwie wierzchniej, bez nadmiernego nagrzewania czy

wpływu materiału. Laser odpowiadał głównie za inicjację penetracji, podczas gdy łuk MAG dostarczał materiał dodatkowy i stabilizował jeziorko spawalnicze.

W przypadku próbki D1 zastosowano prędkość napawania 0,2 m/min oraz podawanie drutu z prędkością 5 m/min. W próbce D2 prędkość napawania zmniejszono do 0,1 m/min, jednocześnie zwiększając prędkość podawania drutu do 8,5 m/min. Taka konfiguracja sprzyjała powstawaniu napoiny o większej grubości, zwiększeniu udziału materiału dodatkowego oraz rozszerzeniu strefy wpływu ciepła, co przełożyło się na intensywniejszy rozwój struktury dendrytycznej.

Parametry łuku również wpływały na charakter połączenia. W próbce D1 zastosowano natężenie prądu 150 A przy napięciu 18 V, co skutkowało niższym udziałem cieplnym i ograniczonym rozwojem jeziorka. W próbce D2 natężenie zmniejszono do 120 A, a napięcie zwiększono do 20 V, co poprawiło stabilność łuku i równomierne rozprowadzenie materiału dodatkowego. Odległość łuku od punktu padania wiązki ($a = 3$ mm) oraz ustawienie ogniska wiązki ($f = 0$ mm) gwarantowały zestrojenie obu źródeł energii, natomiast długość wylotu drutu ($D_w = 16$ mm) zapewniała stabilność procesu.

Ilość ciepła dostarczanego na jednostkę długości spoiny, określana równaniem (rów. 1), była istotnym wskaźnikiem efektywności procesu. Przy założonej sprawności $\eta = 1$, w próbce D2 wartość Q była niemal dwukrotnie wyższa niż w D1, co prowadziło do szerszej strefy wpływu ciepła oraz bardziej rozwiniętej struktury krystalicznej napoiny[119].

$$Q = (U \times I \times 60) / (1000 \times V_n \times \eta) \quad (\text{rów. 1})$$

Zastosowanie konfiguracji L-A miało kluczowe znaczenie dla jakości uzyskanych napoin. Skierowanie łuku zgodnie z kierunkiem napawania poprawiało płynność jeziorka, sprzyjało efektywnemu stapianiu drutu i ograniczało powstawanie rozprysków. W rezultacie napoiny charakteryzowały się gładką powierzchnią, jednorodnością oraz korzystnym gradientem mikrostrukturalnym w obszarze SWC.

11.4. Podsumowanie badań

Analiza procesu napawania hybrydowego wykazała, że prawidłowe zestrojenie parametrów technologicznych ma kluczowe znaczenie dla uzyskania spoin o właściwej geometrii i stabilnej strukturze metalograficznej. Wraz ze wzrostem energii liniowej,

odpowiadającej ilości ciepła dostarczanego do złącza, obserwuje się poszerzenie strefy wpływu ciepła oraz tendencję do silniejszej segregacji pierwiastków w obrębie struktury dendrytycznej. Zmniejszenie prędkości napawania przy równoczesnym zwiększeniu prędkości podawania drutu prowadzi do powstawania bardziej masywnych napoin o większej objętości, jednak wymaga precyzyjnej kontroli napięcia łuku i kształtu jeziora spawalniczego, aby uniknąć niekorzystnych defektów.

Szczególnie korzystne efekty uzyskano dzięki zastosowaniu konfiguracji łuku atakującego, w której łuk poprzedza działanie wiązki laserowej. Rozwiązanie to poprawiało stabilność procesu, ułatwiało stapianie drutu i ograniczało ryzyko powstawania wad powierzchniowych, co przełożyło się na wysoką jakość uzyskanych napoin. Przedstawione wyniki wskazują jednoznacznie, że zaproponowane parametry stanowią wartości wyjściowe do dalszej optymalizacji technologii hybrydowej, ukierunkowanej na przemysłowe zastosowanie w energetyce, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność i trwałość rur kompozytowych.

12. Wytyczne technologiczne spawania laserowego i hybrydowego rur kompozytowych

Opracowanie wytycznych dla procesów spawania laserowego oraz hybrydowego stanowi kluczowy element w zapewnieniu wysokiej jakości i powtarzalności połączeń wykonywanych w rurach kompozytowych. Badane układy materiałowe, takie jak 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7, zbudowane są z wewnętrznej warstwy stali P265GH (4L7) oraz zewnętrznej powłoki wykonanej odpowiednio ze stali nierdzewnej X2CrNi18-10 (3R12) lub stopu niklu Sanicro 38 (Alloy 825). Złożona budowa materiałowa wymaga indywidualnego podejścia do doboru parametrów, tak aby zagwarantować wysoką jakość złączy, zminimalizować naprężenia własne i jednocześnie zachować korzystne właściwości mechaniczne oraz odporność korozyjną.

W niniejszym rozdziale przedstawiono zestaw zaleceń technologicznych obejmujących dobór rodzaju źródła laserowego, parametrów procesu, konfiguracji hybrydowej (laser + MAG), a także zastosowania gazów osłonowych. Uwzględniono również rekomendacje optymalizacyjne wynikające z przeprowadzonych badań, które mogą stanowić podstawę dalszych prac badawczo-rozwojowych nad przemysłowym zastosowaniem technologii spawania rur kompozytowych w energetyce.

12.1. Spawanie laserowe

Proces spawania laserowego realizowano przy użyciu głowicy Trumpf BEO D70, z kolimatorem o ogniskowej $f_c = 200$ mm i soczewką skupiającą $f_{og} = 400$ mm. Zastosowany światłowód o średnicy 300 μm umożliwiał uzyskanie średnicy ogniska wiązki $d_{og} = 0,6$ mm i długości Rayleigh'a $ZR = 10$ mm. Tak skonfigurowany układ pozwalał na odpowiednie skupienie energii i osiągnięcie pełnego przetopu w warstwie wewnętrznej rury stalowej.

W ramach badań przyjęto zestaw parametrów, które następnie stosowano w sposób powtarzalny dla różnych wariantów materiałowych. Szczegółowe wartości parametrów procesu, obejmujące moc lasera, prędkość spawania, pozycję ogniska oraz rodzaj gazu osłonowego, przedstawiono w tablicy 9. Analiza uzyskanych rezultatów wskazała jednoznacznie, że zastosowanie gazu osłonowego w postaci argonu miało korzystny wpływ na jakość powierzchni spoiny oraz ograniczało ryzyko jej utleniania. Próbkę spawaną bez osłony (D1 i D2) charakteryzowały się lokalnymi przebarwieniami i porowatością, podczas gdy zastosowanie argonu (D3–D6) zapewniało równomierne i gładkie lico. Istotne znaczenie miało również utrzymywanie jednakowej mocy lasera (4500 W) oraz stałej prędkości spawania (0,8 m/min), co umożliwiło wyeliminowanie czynników zakłócających i pozwoliło skoncentrować analizę na wpływie gazu osłonowego oraz mikrostruktury materiału. Pozycjonowanie ogniska bezpośrednio na powierzchni złącza ($f = 0$ mm) gwarantowało maksymalną gęstość energii w obszarze przetopu, zapewniając pełne stopienie materiału na całej grubości ścianki.

Tablica 9. Szczegółowe parametry zastosowane podczas spawania rur kompozytowych Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7

Materiał	Oznaczenie próbek	Moc lasera (P), [W]	Prędkość spawania (V_s), [m/min]	Prędkość wiązki, (V) [m/s]	Położenie ogniska (f), [mm]	Gaz osłonowy
3R12/4L7	D1	4500	0,8	0,013333	0	Brak
Sanicro 38/4L7	D2	4500	0,8	0,013333	0	Brak
Sanicro 38/4L7	D3	4500	0,8	0,013333	0	Argon
3R12/4L7	D4	4500	0,8	0,013333	0	Argon

Materiał	Oznaczenie próbek	Moc lasera (P), [W]	Prędkość spawania (Vs), [m/min]	Prędkość wiązki, (V) [m/s]	Położenie ogniska (f), [mm]	Gaz osłonowy
Sanicro 38/4L7	D5	4500	0,8	0,013333	0	Argon
3R12/4L7	D6	4500	0,8	0,013333	0	Argon

12.2. Napawanie hybrydowe (laser + MAG)

Napawanie hybrydowe, łączące spawanie laserowe z metodą MAG, stanowiło kluczowe uzupełnienie badań nad spawaniem laserowym. Technologia ta umożliwia jednoczesne wykorzystanie precyzji wiązki laserowej oraz efektywnego podawania materiału dodatkowego wprowadzanego łukiem elektrycznym. W badaniach przyjęto konfigurację L-A (łuk atakujący), w której łuk skierowany był w stronę ruchu głowicy spawalniczej. Rozwiązanie to zapewniało stabilniejsze prowadzenie jeziora spawalniczego, skuteczniejsze stapianie drutu oraz bardziej jednorodne rozprowadzenie materiału dodatkowego.

Dla zapewnienia równomierności i pełnego wypełnienia napoiny zastosowano ścięgi zakosowe o długości skoku 1,5 mm i amplitudzie 6 mm. Parametry technologiczne dobrane dla próbek D1 i D2 zestawiono w tablicy 10. Z porównania tych wariantów wynika, że niższa prędkość napawania (0,1 m/min) przy równoczesnym zwiększeniu prędkości podawania drutu do 8,5 m/min, jak w przypadku próbki D2, pozwalała uzyskać bardziej masywną i nasyconą napoinę. Wyższa wartość energii liniowej, wynosząca 17,4 kJ/cm, sprzyjała wzrostowi udziału objętościowego materiału dodatkowego i korzystnie wpływała na jednorodność metalurgiczną spoiny. W próbce D1, przy wyższej prędkości napawania i mniejszej ilości wprowadzonego materiału, energia liniowa była prawie dwukrotnie niższa (9,6 kJ/cm), co przekładało się na węższą strefę wpływu ciepła i mniejszą objętość napoiny.

W całym procesie zastosowano osłonę gazową w postaci mieszaniny M12 (97,5% Ar i 2,5% CO₂) z przepływem 16 l/min, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 14175. Obecność tej mieszaniny była niezbędna dla stabilizacji łuku, ochrony jeziora przed utlenianiem oraz redukcji powstawania porów i wtrąceń niemetalicznych.

Tablica 10. Szczegółowe parametry technologiczne napawania hybrydowego zastosowane w próbkach D1 i D2:

Nr próbki	P, [kW]	Vn, [m/min]	Vd, [m/min]	I, [A]	U, [V]	Kor. U, [V]	a, [mm]	f, [mm]	Dw, [mm]	Q, [kJ/cm]
D1	0,5	0,2	5	150	18	3	3	0	16	9,6
D2	0,5	0,1	8,5	120	20	3	3	0	16	17,4

P, [kW] - moc lasera, Vn, [m/min] - prędkość napawania, Vd, [m/min] - prędkość podawania drutu, I, [A] - natężenie prądu spawania, U, [V] - napięcie łuku spawalniczego, kor. U, [V] - korekcja napięcia, a, [mm] - długość wysuwu drutu, f, [mm] - odległość ogniska lasera.

Dw, [mm] - średnica wiązki lasera, Q, [kJ/cm] - energia liniowa

12.3. Zalecenia technologiczne

Analiza uzyskanych wyników umożliwiła sformułowanie zestawu zaleceń technologicznych dla spawania laserowego i napawania hybrydowego rur kompozytowych. W przypadku technologii laserowej, na podstawie parametrów przedstawionych w tablicy 9, optymalne warunki obejmowały moc wiązki równą 4,5 kW oraz prędkość spawania 0,8 m/min, co gwarantowało pełny przetop przy ograniczonej szerokości strefy wpływu ciepła. Skupienie ogniska bezpośrednio na powierzchni złącza pozwalało na maksymalizację gęstości energii, a zastosowanie argonu jako gazu osłonowego eliminowało problemy związane z powstawaniem przebarwień, tlenków i chropowatości powierzchni.

W odniesieniu do napawania hybrydowego, którego szczegółowe parametry przedstawiono w tablicy 10, najkorzystniejsze efekty uzyskano przy prowadzeniu procesu w konfiguracji L-A. W zakresie ilości wprowadzonego ciepła, wartości mieszczące się pomiędzy 9,6 a 17,4 kJ/cm zapewniały odpowiednie przetopienie i jednorodność napoiny przy jednoczesnej kontroli mikrostruktury. Kluczowe było także utrzymanie długości wylotu drutu na poziomie 16 mm oraz odległości pomiędzy ogniskiem a końcówką drutu wynoszącej 3 mm, co sprzyjało stabilności łuku. Obowiązkowym elementem procesu było wykorzystanie mieszaniny M12 z przepływem 16 l/min, która gwarantowała odpowiednią ochronę jeziora i stabilizację przebiegu spawania.

12.4. Uwagi i wnioski końcowe

Opracowane wytyczne technologiczne pozwalają na uzyskanie złączy spełniających wymagania jakościowe określone w normie PN-EN ISO 13919-1 dla poziomu jakości B. Prawidłowo dobrane parametry procesu, zarówno w spawaniu laserowym, jak i napawaniu hybrydowym, umożliwiały pełny przetop, zachowanie jednorodnej mikrostruktury oraz uzyskanie połączeń o wysokiej odporności mechanicznej i korozyjnej. Szczególną rolę odgrywała osłona gazowa – argon w przypadku spawania laserowego oraz mieszanina M12 przy napawaniu hybrydowym – której obecność była niezbędna dla zapewnienia odpowiedniej jakości metalurgicznej spoin. Dodatkowo potwierdzono, że konfiguracja L-A w technologii hybrydowej oferuje korzystniejsze warunki metalurgiczne i geometryczne niż inne układy, co czyni ją szczególnie przydatną w przypadku rur kompozytowych stosowanych w energetyce. Wyniki przeprowadzonych badań i opracowane zalecenia mogą stanowić podstawę do dalszej optymalizacji parametrów procesu w kierunku ich przemysłowego wdrożenia.

13. Kwalifikacja technologii spawania rur kompozytowych

Proces kwalifikowania technologii spawania stanowi jedno z kluczowych ogniw wdrażania nowych rozwiązań technologicznych do praktyki przemysłowej. Jego celem jest potwierdzenie, że opracowane procedury łączenia materiałów spełniają rygorystyczne wymagania jakościowe w zakresie właściwości mechanicznych i strukturalnych.

W przypadku rur kompozytowych stosowanych w warunkach wysokotemperaturowych i korozyjnych, takich jak Sandvik 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7, kwalifikacja obejmowała zarówno warstwę wewnętrzną spawaną metodą laserową, jak i warstwę zewnętrzną napawaną technologią hybrydową (laser + MAG). Zgodnie z obowiązującymi przepisami technicznymi, proces prowadzono według wytycznych serii norm PN-EN ISO 15614 [111]. Dla spawania laserowego podstawę stanowiła norma PN-EN ISO 15614-11:2005 [111], natomiast kwalifikowanie procesu hybrydowego realizowano w oparciu o wymagania normy PN-EN ISO

15614-14:2013 [112]. Oba dokumenty określają szczegółowe zasady przygotowania próbek, prowadzenia badań kontrolnych oraz kryteria akceptacji wyników.

W dalszej części rozdziału przedstawiono przebieg procedur kwalifikacyjnych dla obu technologii oraz wyniki badań, których pozytywne rezultaty umożliwiły zatwierdzenie spawania laserowego i hybrydowego do zastosowań przemysłowych w energetyce oraz przemyśle ciężkim.

Proces kwalifikacji spawania laserowego został przeprowadzony zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-11:2005 [110], dedykowanej tej metodzie. Opracowano pełną dokumentację technologiczną, obejmującą opis procesu, dobór parametrów oraz harmonogram przygotowania próbek. Do badań wykorzystano próbki wykonane z rur kompozytowych o średnicy 63,5 mm i grubości ścianki 6,53 mm.

Spawanie warstwy wewnętrznej realizowano przy użyciu lasera dyskowego TruDisk 12002 oraz głowicy optycznej Trumpf BEO D70. Parametry procesu – moc wiązki 4,5 kW, prędkość spawania 0,8 m/min, pozycjonowanie ogniska $f = 0$ mm oraz zastosowanie (lub brak) gazu osłonowego w postaci argonu o czystości 99,99% – odpowiadały warunkom ustalonym we wcześniejszych badaniach.

Próbki poddano pełnemu zestawowi badań nieniszczących i niszczących. Badania wizualne (PN-EN ISO 17637 [97]) nie wykazały niezgodności powierzchniowych, a badania radiograficzne (PN-EN ISO 17636-1 [98]) oraz penetracyjne (PN-EN ISO 3452-1 [112]) potwierdziły brak wad wewnętrznych. Próby niszczące obejmowały rozciąganie (PN-EN ISO 4136 [113]), zginanie (PN-EN ISO 5173 [108]) i twardość Vickersa (PN-EN ISO 6507-1 [106]). Wszystkie wyniki mieściły się w wymaganych przedziałach. Analizy makro i mikrostrukturalne (PN-EN ISO 17639 [109]) wykazały jednorodną, drobnoziarnistą mikrostrukturę o korzystnym rozkładzie fazowym.

Na podstawie uzyskanych rezultatów technologia spawania laserowego uzyskała pełną kwalifikację i może być stosowana do wykonywania złączy w rurach kompozytowych w warunkach przemysłowych.

Kwalifikacja procesu napawania hybrydowego, łączącego źródło lasera i łuku elektrycznego MAG, została przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-14:2013

[111]. Próbkę wykonano na rurach 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7, wykorzystując laser TruDisk 12002 w połączeniu z urządzeniem EWM Phoenix 452 RC PULS. Parametry procesu (moc lasera 0,5 kW, prędkość napawania $0,1 \div 0,2$ m/min, prędkość podawania drutu $5 \div 8,5$ m/min, napięcie $18 \div 20$ V, natężenie prądu $120 \div 150$ A) dobrano na podstawie wcześniejszych analiz technologicznych.

Badania wizualne potwierdziły brak wad powierzchniowych, a kontrola radiograficzna i penetracyjna nie wykazała niezgodności wewnętrznych. Próby mechaniczne, obejmujące rozciąganie i zginanie, spełniły wymagania normatywne, a wartości twardości w napoinie i strefie wpływu ciepła mieściły się w dopuszczalnym zakresie. Analizy metalograficzne wykazały jednorodność struktury napoiny, prawidłowe przejście między warstwą napawaną a materiałem podstawowym oraz brak niekorzystnych wydzieleni czy faz kruchych.

Wyniki badań umożliwiły pełną kwalifikację technologii hybrydowego napawania jako metody skutecznej i bezpiecznej w zastosowaniach przemysłowych, zwłaszcza w energetyce i przemyśle chemicznym.

13.1. Wnioski z procesu kwalifikacji

Obie technologie – spawanie laserowe i napawanie hybrydowe – uzyskały pozytywną kwalifikację zgodnie z odpowiednimi normami europejskimi. Potwierdzono możliwość stosowania spawania laserowego do wykonywania warstw wewnętrznych rur kompozytowych, a napawania hybrydowego do kształtowania warstw zewnętrznych odpornych na korozję i ścieranie.

Przeprowadzone badania nieniszczące i niszczące potwierdziły wysoką jakość połączeń oraz skuteczność doboru parametrów technologicznych. Brak wykrytych niezgodności stanowi podstawę do wdrożenia obu metod w praktyce przemysłowej. Zastosowanie tych technologii w sektorze energetycznym przyczynia się do zwiększenia trwałości instalacji, zmniejszenia ryzyka awarii oraz wydłużenia okresu eksploatacji elementów konstrukcyjnych.

14. Ocena wpływu technologii spawania hybrydowego na strukturę i właściwości rur kompozytowych

Napawanie hybrydowe, łączące procesy laserowy i łukowy (MAG), stanowi jedną z najbardziej efektywnych technologii łączenia materiałów o zróżnicowanych właściwościach strukturalnych i chemicznych. W przypadku rur kompozytowych, zbudowanych z warstwy bazowej ze stali P265GH (4L7) oraz warstwy zewnętrznej ze stali nierdzewnej 3R12 lub stopu niklowego Sanicro 38, metoda ta pozwala na precyzyjne sterowanie parametrami cieplnymi, co jest istotne dla zachowania integralności mikrostruktury spoiny.

W ramach niniejszej pracy oceniono wpływ spawania hybrydowego na mikrostrukturę złączy, właściwości mechaniczne oraz jakość połączeń rur typu 3R12/4L7 i Sanicro 38/4L7.

Analiza mikrostruktury wykazała, że zastosowanie konfiguracji L-A (łuk atakujący) sprzyja stabilnemu jeziorku spawalniczemu i głębokiemu przetopowi, przyczyniając się do korzystnych zmian w rozkładzie ziaren i faz. W przypadku rur 3R12/4L7 zaobserwowano strukturę ferrytowo-austenityczną z przewagą austenitu pierwotnego i obecnością ferrytu wtórnego, co zapewnia optymalną kombinację wytrzymałości i odporności na pękanie. W złączach rur Sanicro 38/4L7 mikrostruktura napoiny była niemal całkowicie austenityczna, jednorodna, bez mikroszczelin, pęcherzy czy wydzielen niepożądanych. Rozdrobnienie ziaren w strefie wpływu ciepła wpłynęło pozytywnie na twardość i ciągliwość materiału. Na granicy warstw kompozytowych zachowano pełną integralność metalurgiczną, bez wtopień, nieciągłości ani widocznych naprężeń reszkowych, a brak wytrąceń węglików chromu w SWC zwiększał odporność korozyjną stali nierdzewnej.

Wpływ technologii hybrydowej na właściwości mechaniczne złączy oceniano na podstawie wytrzymałości na rozciąganie, twardości i odporności na zginanie. Średnia wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 506 MPa dla rur 3R12/4L7 i 522 MPa dla Sanicro 38/4L7, co wynika z wyższego udziału niklu i chromu w stopie Sanicro 38, zwiększających granicę plastyczności i odporność na pełzanie. Twardość spoin (HV10) mieściła się w zakresie 145–370 dla 3R12/4L7 i 145–325 dla Sanicro 38/4L7, wskazując na umiarkowaną strefę utwardzenia cieplnego bez ryzyka kruchości. Próby zginania potwierdziły pełną plastyczność złączy, brak pęknięć i zachowanie ciągłości strukturalnej w warunkach odkształcenia plastycznego. Ze względu na niewystarczającą grubość ścianek (<5 mm) nie przeprowadzono prób udarności, jednak analiza mikrostrukturalna i twardościowa dostarczyła wystarczających informacji do oceny ogólnej odporności mechanicznej.

Spoiny wykonane metodą hybrydową charakteryzowały się gładkim lica, równomierną geometrią i jednorodną strukturą krystaliczną. Badania nieniszczące (radiograficzne i penetracyjne) nie wykazały obecności typowych wad, takich jak pęknięcia gorące,

porowatość, brak przetopu czy rozwarstwienia. Zastosowanie argonu jako gazu osłonowego chroniło jeziorko spawalnicze przed utlenianiem, ograniczając przebarwienia i rozpryski. Wszystkie połączenia spełniały wymagania klasy jakości „B” wg PN-EN ISO 13919-1:2019 [114], co potwierdza przydatność technologii w aplikacjach przemysłowych wysokotemperaturowych i chemicznie agresywnych.

14.1. Wnioski końcowe

Analiza wykazała, że technologia hybrydowa korzystnie wpływa na strukturę i właściwości mechaniczne złączy rur kompozytowych. Uzyskano spoiny o wysokiej jakości, spełniające normy w zakresie wytrzymałości, plastyczności i jednorodności mikrostrukturalnej. Obecność gazu osłonowego była krytyczna dla zachowania integralności spoiny i ograniczenia wad powierzchniowych. Analizy metalograficzne potwierdziły pełną integralność strukturalną i równomierny rozkład faz. Technologia hybrydowa, szczególnie dla Sanicro 38, wykazała lepszą odporność na korozję, co czyni ją zalecaną do środowisk chemicznie agresywnych. W dalszych badaniach rekomenduje się optymalizację parametrów napawania pod kątem minimalizacji strefy wpływu ciepła, redukcji naprężeń resztkowych oraz ograniczenia wpływu temperatury na morfologię spoiny.

15. Ocena struktury złączy spawanych

Ocena struktury złączy spawanych stanowi jeden z kluczowych etapów procesu kwalifikowania technologii łączenia materiałów, szczególnie w przypadku rur kompozytowych eksploatowanych w warunkach przemysłu energetycznego i chemicznego. Z uwagi na złożoną budowę tych elementów, łączących warstwę wewnętrzną ze stali ferrytycznej P265GH (oznaczenie 4L7) z warstwą zewnętrzną odporną na korozję (taką jak 3R12 lub Sanicro 38), struktura powstałego złącza powinna charakteryzować się spójnością oraz jednorodnością fazową.

W ramach badań strukturalnych oceniono wpływ technologii spawania laserowego i hybrydowego na rozkład faz, obecność defektów oraz ogólną jakość metalurgiczną złączy. Analizie poddano zarówno spoinę, jak i strefę wpływu ciepła (SWC), koncentrując się na

jednorodności mikrostruktury, obecności pęknięć, porowatości oraz wydzielen węglikowych, a także na identyfikacji przemian fazowych zachodzących podczas procesu spawania. Zakres badań obejmował ocenę makroskopową zgodnie z PN-EN ISO 17639 [109], analizę mikrostruktury według PN-EN ISO 643:2020 [115] oraz badania skaningowe z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej SEM, prowadzone zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 14577:2015 [116].

Obserwacje makroskopowe przekrojów poprzecznych złączy potwierdziły prawidłowe ukształtowanie spoin oraz pełne przetopienie ścianek. W złączach typu 4L7/3R12 oraz 4L7/Sanicro 38 nie stwierdzono deformacji ani istotnych niezgodności powierzchniowych. Strefy wpływu ciepła były wąskie, a przejścia między spoiną a materiałem rodzimym charakteryzowały się płynnym rozkładem stężeń pierwiastków. W napoinach zewnętrznych stwierdzono sporadyczne, pojedyncze pory o niewielkich wymiarach, które nie wpływały na ciągłość połączenia. Ogólny obraz makroskopowy wskazuje na wysoką jednorodność i brak wad o znaczeniu technicznym.

Mikroskopia świetlna umożliwiła śledzenie przebiegu przemian mikrostrukturalnych w stali 4L7 i materiałach napawanych. W materiale rodzimym stwierdzono klasyczną strukturę ferrytyczno-perlitową z pasmowym ułożeniem perlitu. W strefie wpływu ciepła obserwowano wyraźne drobnienie ziaren, a przy linii wtopienia lokalnie występowała struktura Widmanstättena, typowa dla przegrzanych obszarów. Spoina wewnętrzna w stali 4L7 miała drobnodendrytyczną mikrostrukturę, pozbawioną mikropęknięć. Po stronie warstwy 3R12 struktura spoiny miała charakter jednofazowy austenityczny, z dendrytami kolumnowymi i bardzo wąską SWC. W złączach z Sanicro 38 również dominował austenit, jednak dendryty były grubsze i bardziej nieregularne; dodatkowo, w strefie przylegającej do stali 4L7 zaobserwowano wąski pas odwęglenia. Te wyniki potwierdzają ciągłość strukturalną złączy przy jednoczesnych różnicach w morfologii dendrytów i szerokości SWC.

Analiza SEM/BSE, wsparta badaniami EDS, ujawniła subtelne różnice w rozkładzie pierwiastków. W spoinie 3R12 skład chemiczny odpowiadał typowej stali X2CrNi18-10, a przejście w kierunku stali 4L7 miało charakter łagodny. W obrazie BSE pojawiały się jasne wydzielения, powiązane z drobnymi tlenkami i węglkami pochodzącymi z mikrodomieszek obecnych w stali 4L7, jednak ich ilość była znikoma. Z kolei spoiny Sanicro 38 wykazywały bardziej złożony kontrast chemiczny. W osnowie dominował skład zgodny z Alloy 825, natomiast w pasmach międzydendrytycznych zidentyfikowano lokalne wzbogacenia w molibden i niob, interpretowane jako wydzielения faz typu Lavesa oraz węgliki niobowe.

W obszarze przylegającym do 4L7 potwierdzono pas odwęglenia, co świadczy o migracji węgla do warstwy stopu niklu. Istotne jest jednak to, że w żadnym z badanych złączy nie stwierdzono ciągłych faz kruchych, a lokalne wtrącenia nie tworzyły sieci mogących inicjować pęknięcia.

15.1. Podsumowanie oceny struktury złączy spawanych

Podsumowując, zestawienie wyników z badań makroskopowych, mikroskopii świetlnej oraz SEM/EDS pozwala stwierdzić, że złącza 4L7/3R12 i 4L7/Sanicro 38 charakteryzują się wysoką jakością metalurgiczną. Spoiny w złączach 3R12 wykazały drobną, jednorodną mikrostrukturę dendrytyczną oraz wąską SWC, a przejście chemiczne pomiędzy spoiną a materiałem rodzimym miało charakter płynny. Spoiny w złączach Sanicro 38 zachowały osnowę austenityczną zgodną z założonym składem, choć charakteryzowały się grubszymi dendrytami, szerszą SWC oraz lokalnymi wydzieleniami bogatymi w Nb i Mo. W obu przypadkach złącza spełniały wymagania jakościowe – zachowywały ciągłość strukturalną, były wolne od pęknięć i nadmiernej porowatości, a ich mikrostruktura i skład chemiczny potwierdzają przydatność do pracy w warunkach obciążeń eksploatacyjnych oraz w środowiskach korozyjnych.

16. Analiza wyników badań po próbach technologicznych spawania laserowego i napawania hybrydowego

Celem przeprowadzonych badań było określenie, w jakim stopniu zastosowane technologie spawania – laserowa oraz hybrydowa laser + MAG – wpływają na jakość, strukturę i właściwości mechaniczne złączy doczołowych rur kompozytowych. Kompleksowa analiza obejmowała zarówno metody nieniszczące, takie jak badania wizualne, radiograficzne czy prądami wirowymi, jak i metody niszczące, obejmujące pomiary twardości, próby rozciągania i zginania oraz badania metalograficzne, w tym mikroskopię świetlną i skaningową mikroskopię elektronową SEM.

Badania wizualne, przeprowadzone zgodnie z PN-EN ISO 17637:2017 [96], oraz radiograficzne zgodnie z PN-EN ISO 17636-1:2013 [98], wykazały jednoznacznie, że wszystkie analizowane złącza spełniają wymagania poziomu jakości „B” według normy PN-

EN ISO 13919-1:2019 [114] oraz PN-EN ISO 12932:2013[118] . Inspekcja powierzchni nie wykazała niezgodności w postaci pęcherzy, braku ciągłości, nadlewek czy nieregularnego uformowania spoin. Również badania RTG nie ujawniły defektów objętościowych, takich jak braki przetopu, mikropory czy inkluzje żuźla. Uzyskane wyniki potwierdziły, że zastosowanie optymalnych parametrów wiązki laserowej, stabilnych warunków napawania oraz gazu osłonowego (argon) było kluczowe dla uzyskania wysokiej jakości połączeń.

Badania nieniszczące z wykorzystaniem prądów wirowych (PN-EN ISO 15549) umożliwiły ocenę ciągłości materiału w strefach przylegających do powierzchni spoiny. Wyniki potwierdziły jednorodność strukturalną i brak nieciągłości powierzchniowych. Nie stwierdzono lokalnych twardych stref ani defektów gazowych, a stabilność sygnału w badaniach elektromagnetycznych wskazywała na poprawny rozkład ciepła i brak rozwarstwień w obszarze przejściowym.

Kolejnym etapem były pomiary twardości metodą Vickersa (HV10). Materiał rodzimy stali 4L7 wykazywał twardość w zakresie 130÷150 HV dla złączy 3R12/4L7 oraz 145÷170 HV dla Sanicro 38/4L7. W strefach wpływu ciepła odnotowano umiarkowany wzrost twardości (190÷270 HV), będący naturalnym skutkiem cykli cieplnych i rekrytalizacji. Najwyższe wartości, mieszczące się w granicach 300–320 HV, występowały w centralnej części spoin, przy czym nie obserwowano nadmiernej kruchości ani ryzyka inicjacji pęknięć.

Próby rozciągania, przeprowadzone zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2019 [107], potwierdziły wysoką integralność połączeń. Średnia wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 506 MPa dla złączy 3R12/4L7 i 522 MPa dla Sanicro 38/4L7, przy wydłużeniu odpowiednio 18,5% i 22,3%. Wszystkie próbki zerwały się poza spoiną, co jednoznacznie wskazuje, że strefa połączenia nie stanowiła miejsca osłabienia konstrukcji.

Równie korzystne wyniki uzyskano w próbach zginania zgodnie z PN-EN ISO 5173:2010 [108]. Zarówno złącza laserowe, jak i hybrydowe, wykazały wysoką ciągliwość i odporność na inicjację pęknięć. Brak niezgodności powierzchniowych oraz jednorodny charakter odkształceń potwierdziły poprawne warunki cieplne i zachowanie ciągłości struktury.

Analizy metalograficzne stanowiły istotny element badań. Obserwacje makroskopowe wykazały prawidłowe ukształtowanie spoin, ich równomierną szerokość i pełny przetop ścianek, bez deformacji czy wad geometrycznych. Mikroskopowe obserwacje potwierdziły droбноziarnistą strukturę w SWC oraz jednofazowy charakter austenityczny spoin w złączu 3R12/4L7, z regularnymi dendrytami kolumnowymi i jedynie śladową zawartością ferrytu

delta. W złączu Sanicro 38/4L7 struktura austenityczna była bardziej złożona – dendryty charakteryzowały się większą grubością i lokalną segregacją pierwiastków. Analizy SEM i EDS wykazały obecność wydzielen bogatych w niob i molibden na granicach dendrytów, a w strefie stali 4L7 zaobserwowano pas odwęglenia, co potwierdza migrację węgla w kierunku warstwy stopu niklu. Sporadyczne mikropory nie miały wpływu na ciągłość złączy.

16.1. Synteza wyników analizy

Przeprowadzone badania jednoznacznie potwierdzają, że technologie spawania laserowego i hybrydowego zapewniają uzyskanie złączy o wysokiej jakości metalurgicznej i mechanicznej. W każdym z przypadków złącza charakteryzowały się brakiem istotnych defektów, prawidłową geometrią, stabilnością strukturalną oraz jednorodnością w strefach przejściowych. Zastosowane parametry procesowe, w tym dobór mocy wiązki laserowej, stabilne warunki napawania łukowego i obecność gazu osłonowego, odegrały kluczową rolę w osiągnięciu pozytywnych rezultatów.

Uzyskane wartości właściwości mechanicznych mieściły się w wymaganiach normatywnych, a złącza wykazywały wysoką ciągliwość, odporność na obciążenia eksploatacyjne oraz potencjał do długotrwałej pracy w warunkach wysokich temperatur i środowiska korozyjnego. Analizy mikrostrukturalne i SEM potwierdziły, że mimo występowania lokalnych różnic morfologicznych czy pojedynczych mikroporów, połączenia zachowują ciągłość strukturalną i nie wykazują podatności na inicjację pęknięć.

W konsekwencji obie technologie mogą zostać uznane za w pełni przydatne do zastosowań przemysłowych w sektorze energetycznym i chemicznym, w szczególności w obszarach wymagających wysokiej niezawodności oraz odporności na ekstremalne warunki eksploatacyjne.

17. Wnioski końcowe z wykonanych badań oraz perspektywy badawcze

Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie wniosków w dwóch głównych płaszczyznach: naukowej, obejmującej charakterystykę mikro- i makrostruktury, właściwości mechanicznych oraz procesów zachodzących w złączach, oraz wdrożeniowej, dotyczącej

praktycznego zastosowania opracowanej technologii w przemyśle. Dodatkowo wyodrębniono znaczenie uzyskanych wyników dla gospodarki oraz perspektywy dalszych prac badawczych.

17.1. Wnioski naukowe

1. W warstwie rdzeniowej 4L7 powstała strefa przejściowa, w której obserwowano rozdrobnienie ziaren oraz lokalne struktury Widmanstättena, typowe dla szybkiego chłodzenia.
2. Spoina laserowa stali 4L7 charakteryzowała się kolumnowymi dendrytami i pełną ciągłością metalurgiczną, bez pęknięć i porowatości.
3. Warstwa 3R12 (304L) wykazała stabilną strukturę austenityczną z niewielką zawartością δ -ferrytytu, mieszczącą się w granicach dopuszczalnych norm.
4. Napoiny Sanicro 38 zachowały charakter austenityczny, przy czym występowały grubsze dendryty oraz lokalne wydzielения Nb i Mo na granicach krystalitów.
5. Badania SEM/EDS potwierdziły zgodność składu chemicznego spoin z materiałami bazowymi; w złączu Sanicro 38/4L7 zidentyfikowano strefę odwęglenia oraz fazy Lavesa w obszarach międzydendrytycznych.
6. Próby niszczące i nieniszczące potwierdziły, że złącza zachowują wytrzymałość, plastyczność i twardość na poziomie porównywalnym do materiałów rodzimych, bez ryzyka inicjacji pęknięć ani istotnej porowatości.

17.2. Wnioski wdrożeniowe

1. Opracowana metoda łączenia rur kompozytowych – spawanie laserowe rdzenia 4L7 i napawanie hybrydowe (laser+MAG) warstw 3R12 i Sanicro 38 – jest powtarzalna i zgodna z wymaganiami norm PN-EN ISO 15614-11[110] oraz PN-EN ISO 15614-14[111].
2. Konfiguracja 3R12/4L7 zapewnia spoiny o niewielkiej strefie wpływu ciepła, korzystne w zastosowaniach wymagających wysokiej odporności na pękanie.
3. Napoiny Sanicro 38 zwiększają odporność korozyjną w środowiskach agresywnych, choć wymagają szczególnej kontroli jakości w zakresie odwęglenia i wydzielen Nb/Mo.
4. Wdrożenie technologii w przemyśle energetycznym i chemicznym pozwala na znaczące zwiększenie trwałości eksploatacyjnej rur kompozytowych.

5. Opracowane rozwiązanie objęte zgłoszeniem patentowym P.435026 ma wysoki potencjał komercyjny i może być podstawą do wdrożeń przemysłowych.

17.3. Znaczenie dla przemysłu

Wyniki badań wskazują jednoznacznie, że połączenie technologii spawania laserowego oraz napawania hybrydowego otwiera nowe możliwości w projektowaniu i wytwarzaniu rur kompozytowych dla sektora energetyki, przemysłu chemicznego i instalacji wysokotemperaturowych. Opracowana technologia pozwala na wydłużenie żywotności elementów pracujących w warunkach agresywnego środowiska, zmniejszenie ryzyka awarii instalacji oraz obniżenie kosztów utrzymania. Szczególnie istotne jest uzyskanie spoin o wysokiej jednorodności strukturalnej i ograniczonej strefie wpływu ciepła, co minimalizuje naprężenia resztkowe i podnosi bezpieczeństwo eksploatacji. Wprowadzenie rozwiązania chronionego zgłoszeniem patentowym dodatkowo wzmacnia jego znaczenie w kontekście innowacyjności i konkurencyjności przemysłu.

17.4. Perspektywy dalszych badań

Dalsze prace badawcze powinny koncentrować się na:

1. ocenie długoterminowej trwałości złączy, w tym odporności zmęczeniowej i korozyjnej w warunkach eksploatacyjnych,
2. modyfikacji składów stopiw w celu ograniczenia segregacji Nb i Mo oraz powstawania faz wtórnych,
3. analizie wpływu różnych mieszanek gazów osłonowych na mikrostrukturę i jakość spoin,
4. wdrażaniu adaptacyjnych systemów sterowania wiązką laserową i łukiem w celu dalszej automatyzacji i stabilizacji procesu,
5. przeprowadzeniu testów przemysłowych, które pozwolą zweryfikować efektywność technologii w rzeczywistych warunkach pracy instalacji.

Bibliografia

1. Urbańczyk, P., Ciokan, R., Adamiec, J., & Topolska, S. (2024). The Welding of Two-Layer (Composite) Tubes with the Use of Laser Technology. *Materials Proceedings*, 108(1), 4.
2. Costanza, G., Sili, A., Tosto, S., Campana, G., & Frisullo, P. (2025). An Overview of the Working Conditions of Laser–Arc Hybrid Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(8), 248.
3. He, S., Zeng, Z., Wang, H., & Li, X. (2025). Research and Development Progress of Laser–Arc Hybrid Welding Technology. *Metals*, 15(3), 326.
4. Klimpel, A., Banaś, J., Łabanowski, J., & Miklaszewski, A. (2024). Review and Analysis of Modern Laser Beam Welding and Hybrid Welding Technologies for Advanced Materials. *Materials*, 17(18), 4657.
5. Sun, J., Li, Z., Wang, Y., Zhou, L., & Zhang, Y. (2022). Optimization of Laser-MAG Hybrid Welding Parameters of 10CrNi3MoV Ship Steel Using Response Surface Methodology. *Materials*, 15(14), 4952.
6. Cao, Y., Chen, X., Liu, X., & Wu, C. (2024). Single-pass high-power laser-arc hybrid welding of thick stainless steel clad plates: Influence of welding parameters on microstructure and properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 389–402.
7. Ebrahimi, H., Shalchi, B., & Ma, L. (2023). Revealing the effects of laser beam shaping on melt pool behaviour and microstructure evolution in laser welding. *ArXiv preprint*.
8. Bevilacqua, M., Di Schino, A., & Forcellese, A. (2025). Large-scale Thermo-Mechanical Simulation and Experimental Validation of High-Power Laser Beam Welding. *ArXiv preprint*.
9. Alleima (Sandvik Materials Technology). (2023). Sanicro® 38 Composite Tubes for Recovery Boilers and Other Boiler Applications. Technical data sheet. Alleima.
10. Ciokan, R., Urbańczyk, M., & Lisiecki, A. (2021). The Development of a Technology of the Laser-Based Welding of Butt Joints in Composite Tubes. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 65(1), 23-31

11. Giudice, F., et al. (2024). A Review on ferritic steel plates clad with austenitic steel: metallurgical aspects and applications.
12. Wang, F., et al. (2025). Experimental and Numerical Investigation on Mechanical Performance of Metallurgical Clad Pipes. *Journal of Marine Engineering & Industrial Materials*, 13(5), 880.
13. Reda, A. (2024). CRA-Clad Pipes: Do Their Benefits Justify Sole Selection? *Materials Review*, S26671433(24)00072.
14. Bunaziv, I., Olden, V., & Akselsen, O.M. (2019). Metallurgical Aspects in the Welding of Clad Pipelines—A Global Outlook. *Applied Sciences*, 9(15), 3118.
15. Giudice, F., Scudino, S., & Eckert, J. (2024). A Review on Metallurgical Issues in the Production and Fusion Welding of Ferritic–Austenitic Clad Steel Plates and Pipes. *Materials*, 17(17).
16. Xu, W., Liu, H., & Zhang, L. (2022). Mechanical Analysis of 20/316L Bimetal Composite Pipe Formed by Internal Spinning. *SN Applied Sciences*, 4, 3211.
17. Yi, Y., Zhao, X., & Chen, J. (2025). Microstructure and Property Evolution during Asynchronous Rolling of Clad Plates. *Materials Characterization*, 184.
18. Swarnkar, R., & Prasad, N.B. (2023). Fabrication of Bimetallic Tubes via Friction Stir Backward Extrusion: A Novel Approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 1089–1099.
19. Li, H., Zhang, Y., & Wang, X. (2024). Advanced Bending and Forming Technologies for Bimetallic Composite Pipes: Challenges and Innovations. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*.
20. General Industry Source. (2025). Bi Metal Clad Pipe Manufacturing Processes: Mechanical and Metallurgical Methods. *Business & Industry Review*.
21. Smith, L., & Jiang, Y. (2025). Metallurgical Investigation into Welding of Clad Pipelines. *Applied Engineering Materials*, 99, 123–140.
22. Zhuang, Z., et al. (2025). Response Characterization on the Microstructure and Properties of New Clad Bimetallic Composite Material. *Journal of Materials Science*, 60(7), 3456–3465.

23. Sun, Y., Li, Z., Chen, X., et al. (2024). Interface Microstructure and Mechanical Properties of Nickel–Steel Bimetal Composite Pipe Fabricated by Explosive Welding. *Metals*, 14(11), 1253.
24. Kosturek, R., et al. (2019). The Influence of the Post Weld Heat Treatment on the Microstructure of Inconel 625/Carbon Steel Bimetal Joint Obtained by Explosive Welding. *Metals*, 9(2), 246.
25. Li, L., et al. (2022). Microstructure and Properties of Laser Cladding Coating at the Ends of L415/316L Bimetal Mechanical Lined Pipe. *Surface and Coatings Technology*, 435.
26. Alleima. (2025). Sanicro® 38 Composite Tubes for Recovery Boilers. Technical Datasheet.
27. Singh, R., et al. (2023). Evaluation of Microstructure and Corrosion Behavior of 304L Stainless Steel after Cold Working. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(2), 891–902.
28. Wang, Q., et al. (2021). Microstructure and Mechanical Properties of Incoloy 825 Clad Steel Plates after Heat Treatment. *Materials Characterization*, 175, 111105.
29. Zhang, L., et al. (2023). Effect of Heat Input on Microstructure and Corrosion Resistance of Incoloy 825/Stainless Steel Clad Plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 319, 117274.
30. De Barros, M., & Tavares, S. (2024). Grain Boundary Engineering of Nickel-Based Superalloys for Petrochemical Applications. *Metals*, 14(3), 650.
31. Gui, H., Chen, D., Liu, H., Zhang, Y., & Zhao, Z. (2024). Research on the Solid–Liquid Composite Casting Process of Incoloy 825/P110 Steel Composite Pipe. *Materials*, 17(9), 1976.
32. Sun, Y., Li, Z., Chen, X., et al. (2024). Interface Microstructure and Mechanical Properties of Nickel–Steel Bimetal Composite Pipe Fabricated by Explosive Welding. *Metals*, 14(11), 1253.
33. Sun, Y., Chen, J., Liu, Y., & Wang, T. (2025). Study on Pitting Behavior of Welding Joint of Bimetal Composite Pipe. *Crystals*, 15(2), 165.
34. Yao, G., Wang, M., & Li, Y. (2024). Hydrogen-Induced Failure Analysis of Bimetallic Clad Pipes (Alloy 825/L360). *International Journal of Hydrogen Energy*.

35. Fu, Y., Zhao, L., & Jiang, H. (2024). Optimization of Welding Process for 825 Bimetallic Composite Pipes Based on Corrosion Testing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2834, 012177.
36. Li, H., Zhang, Y., & Wang, X. (2024). Advanced Bending and Forming Technologies for Bimetallic Composite Pipes. *Materials*, 18(1), 111.
37. He, T., Sun, L., & Xu, C. (2025). Quantitative Study on Magnetic Flux Leakage Internal Defect Detection in Bimetal Composite Pipes. *NDT & E International*, 117, 102647.
38. Yao, G., Li, Y., & Zhang, J. (2025). Effect of Microstructure on the Hydrogen Cracking Behavior of Clad Pipes. *International Journal of Hydrogen Energy*.
39. Zhang, S., Li, Y., & Chen, Q. (2023). Failure Analysis of the Leakage in Girth Weld of Bimetal Composite Pipe. *Corrosion Science*, 213, 110837.
40. Reda, A. (2025). Review of Material Selection for Corrosion-Resistant Alloy Cladded Pipelines. *Engineering Science Publisher*.
41. Kennedy, S. M. (2024). A Comprehensive Overview of Fabrication and Testing Methods for Composite Pipes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(2), 87.
42. Dong, Y., Zhao, H., & Liu, J. (2024). Numerical Simulation and Experimental Study on High-Frequency Induction Heating Preparation of Bimetal Composite Pipe. *Materials Today Communications*, 31, 103205.
43. Wang, B., & Zhong, X. (2020). Non-Destructive Testing and Evaluation of Composite Materials/Structures: A State-of-the-Art Review. *Composite Structures*, 240, 112024.
44. Steel, S. (2024). Breakthrough for Composite Tubes in Waste Incineration. *Applied Composite Materials*, 31(2), 187–200.
45. Collaborative Industry Review. (2024). Main Application of Bimetallic Composite Pipe. *HY-Industry Technical Centre*.
46. Yang, Y., Wang, L., & Lin, S. (2022). Development of advanced joining techniques for multi-metal structures in power and petrochemical industries. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 37–48.
47. Zhou, W., Zhang, Y., & Lu, Y. (2021). Clad pipe welding challenges and solutions in harsh service environments. *Welding Journal*, 100(4), 105–114.

48. Zhang, J., Liu, J., & Zhang, Y. (2020). Study on welding dissimilar metal tubes using TIG and MIG processes. *Materials Today: Proceedings*, 45(1), 1327–1332.
49. Chen, X., et al. (2023). Microstructure and mechanical behavior of TIG welded clad pipes for sour service. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 145(3), 031402.
50. Park, J. H., & Lee, J. H. (2020). Optimization of filler materials in dissimilar metal welding for clad pipes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(9), 6060–6069.
51. Alleima (formerly Sandvik). (2024). Welding guidelines for Sanicro® 38/4L7 composite tubes. Technical datasheet.
52. Kong, F., & Kovacevic, R. (2021). Review of hybrid laser–arc welding of dissimilar metal pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 292, 117069.
53. Liu, J., Yang, Z., & Gao, H. (2021). Preparation of dissimilar metal pipe ends prior to welding: Effects on joint integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117168.
54. Nayak, S. S., & Mahapatra, M. M. (2022). Optimization of edge preparation for bimetallic weld joints: A review and experimental approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 325–336.
55. Alleima (Sandvik). (2023). Welding recommendations for duplex and austenitic clad tubes: Edge preparation and joint design. Technical datasheet.
56. Kim, D. H., et al. (2020). Effect of joint design and surface preparation on weld quality of composite pipes. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125299.
57. Wang, L., & Zhang, Y. (2021). Investigation of beveling strategies and surface conditioning for multi-layer metal tubes. *Materials Today: Proceedings*, 47(6), 1321–1327.
58. Böhler Welding (2023). Product Data Sheet: DMO-IG GTAW Welding Rod. Voestalpine Böhler Welding GmbH.
59. ESAB (2023). Cromarod 309MoL and 383 Welding Electrodes: Technical Specification and Application Guide. ESAB Welding & Cutting Products.
60. Kemppi Oy (2024). MasterTIG MLS 3000 DC TIG Welding Machine – User Manual and Technical Specifications. Kemppi Oy, Finland

61. Silva, A. A., & Gonçalves, P. (2023). Effect of Welding Parameters on the Heat-Affected Zone of Low-Alloy Steel during TIG Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(7),
62. Kumar, A., & Singh, J. (2022). Experimental Investigation of Shielding Gas Flow Rate on Mechanical and Metallurgical Behavior in TIG Welding. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1130–1137.
63. Luo, H., Liu, Q., & Zhang, J. (2023). Study on Heat Input Control and Microstructure of Stainless Steel Clad Plate Welded by TIG and SMAW. *Welding Journal*, 102(2), 76–85.
64. Zhang, H., Wu, C., & Chen, Y. (2023). Hybrid Laser–Arc Welding: Fundamentals, Process Parameters, and Industrial Applications. *Welding Journal*, 102(5), 210–220.
65. Lee, D., & Park, S. (2024). Optimization of Laser-MAG Hybrid Welding Parameters for Dissimilar Metal Joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 88, 457–467.
66. Thomas, R., & Verma, P. (2023). Review of Advanced Hybrid Welding Technologies in High-Pressure Applications. *Materials Review*, 15(3), 324–335.
67. Liu, Y., Zhao, F., & Chen, L. (2025). Development of Hybrid Laser–MAG Welding Techniques for Composite Pipe Applications. *Materials Performance and Characterization*, 14(2), 113–123.
68. Guo, J., Feng, J., & Wang, Z. (2024). Laser Cladding Technology for Surface Protection in Power Equipment: State-of-the-Art and Challenges. *Journal of Surface Engineering*, 40(3), 210–225.
69. Ramesh, M., & Kim, K. (2025). Laser Cladding for Energy Sector Components: Advances and Case Studies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129, 1123–1135.
70. Novak, P., & Singh, A. (2023). Corrosion-Resistant Laser Cladded Layers on Power Plant Components. *Surface and Coatings Technology*, 453, 129012.
71. Zhang, H., Hu, Z., Chen, S., & Song, X. (2021). Recent advances in hybrid laser-arc welding of dissimilar materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1198–1211.
72. Yao, M., Liu, J., Zhou, W., & Fang, F. (2021). Optimization of laser beam welding parameters for thick-walled steels. *Materials Science and Engineering A*, 800, 140396.

73. Kempen, K., He, P., & Steen, W. M. (2020). Hybrid laser arc welding systems and control: Review and perspectives. *Welding in the World*, 64, 907–918.
74. Mohyla, P., Foldyna, J., & Radaj, D. (2020). Influence of laser and arc torch angles on weld pool formation in hybrid welding. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(3), 117–125.
75. Salminen, A., & Kujanpää, V. (2021). Gas shielding in laser and hybrid welding of stainless and duplex steels. *Journal of Laser Applications*, 33(1), 012009.
76. Liu, S., Cao, J., & Chen, H. (2022). Real-time monitoring and quality assessment in laser welding: Review and perspectives. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 405–422.
77. Liu, J., Zhang, G., & Chen, Z. (2020). Deep penetration laser welding of clad tubes: Effect of beam focus and material mismatch. *Materials & Design*, 191, 108607.
78. Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2020). Influence of welding gap on laser welding quality of thick-walled components. *Welding Journal*, 99(6), 250–257.
79. Shi, Y., & Zhao, J. (2022). Hybrid laser-arc cladding process for steel structures: Challenges and improvements. *Surface and Coatings Technology*, 426, 127727.
80. Wang, Y., Xu, D., & Zhang, S. (2021). Optimization of shielding gas composition in hybrid cladding processes of Ni-based alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117144.
81. Sun, Q., Li, Y., & Guo, Y. (2022). Advanced sensing and data analytics in laser welding process monitoring. *Sensors*, 22(2), 618.
82. Huang, Y., Wu, D., & Lin, X. (2023). Microstructural evolution and mechanical performance of laser-welded clad joints. *Metals*, 13(1), 115.
83. Nguyen, T. T., Pham, H. N., & Nguyen, T. D. (2021). Investigation of energy efficiency in laser cladding of stainless steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(7), 071006.
84. Riveiro, A., Quintero, F., del Val, J., & Lusquinos, F. (2020). Review on laser cladding of Ni-based coatings for wear and corrosion resistance. *Optics & Laser Technology*, 131, 106439.

85. Dhand, D., Grewal, S. G., & Kumar, P. (2021). A review of thermal spray coatings for protection of steels from degradation in coal-fired power plants. *Corrosion Reviews*, 39(3), 223–246.
86. Sadeghi, E., Markocsan, N., & Joshi, S. (2019). Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants: Part II—Effect of environment and outlook. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(12), 1789–1850.
87. Sengupta, V., Havrylov, D., & Mendez, P. F. (2019). Physical phenomena in the weld zone of submerged arc welding—a review. *Welding Journal*, Supplement 98, 283s–307s.
88. Kumar, A., Garg, R. K., & Sachdeva, A. (2023). Performance of thermally sprayed nickel and tungsten-based coatings in slurry erosion conditions: A review. *ASME Journal of Tribology*, 145(9), 090801.
89. Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A., & Hussain, T. (2018). Beyond traditional coatings: A review on thermal sprayed functional and smart coatings. *arXiv preprint*.
91. Shibli, I. A., & Williamson, D. (2005). Life assessment of high-temperature components. ASM International.
92. Dobrzański, L. A., & Dziubińska, A. (2006). Techniki inżynierii powierzchniowej w ochronie przed korozją i zużyciem. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28(4), 227–234.
93. PN-EN ISO 13919-1:2020 – Spawalnictwo – Kryteria akceptacji niezgodności spawalniczych – Część 1: Spoiny wykonane techniką spawania elektronowego i laserowego.
94. PN-EN ISO 14343:2025 – Materiały dodatkowe do spawania – Druty, pręty i materiały rdzeniowe do spawania łukowego stali odpornych na korozję – Klasyfikacja.
95. PN-EN ISO 14175:2009 – Materiały dodatkowe do spawania – Gazy osłonowe do spawania i pokrewnych procesów – Klasyfikacja. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
96. PN-EN ISO 17637:2017 – Badania nieniszczące spoin – Badania wizualne spoin spajanych metali. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.

97. PN-EN ISO 5817:2023 – Spawanie – Połączenia spawane metali – Wady spawalnicze – Klasy jakości. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2014.
98. PN-EN ISO 17636-1:2013 – Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania radiograficzne – Część 1: Technika wykorzystująca promieniowanie X i γ z błoną fotograficzną. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.
99. PN-EN ISO 10675-1:2017 – Badania nieniszczące złączy spawanych – Akceptacja obrazów radiograficznych – Część 1: Spawanie łukowe stali. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
100. PN-EN ISO 11699-1:2009 – Badania nieniszczące – Charakterystyka i klasyfikacja błon radiograficznych przemysłowych – Część 1: Błony bez ekranów wzmacniających. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
101. PN-EN ISO 15549:2023 – Badania nieniszczące – Badania prądami wirowymi – Ogólne zasady. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2023.
102. PN-EN ISO 17643:2021 – Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania magnetyczno-proszkowe. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2021.
103. PN-EN ISO 17636-2:2021 – Badania nieniszczące złączy spawanych – Radiograficzne badanie – Część 2: Technika cyfrowa z detektorami radiografii cyfrowej (CR i DR). Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2021.
104. PN-EN ISO 10675-1:2017 – Badania nieniszczące złączy spawanych – Akceptacja niezgodności – Część 1: Badania radiograficzne. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2017.
105. PN-EN ISO 9712:2022 – Badania nieniszczące – Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2022.
106. PN-EN ISO 6507-1:2018 – Metale – Próba twardości Vickersa – Część 1: Metoda badania. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2018.
107. PN-EN ISO 6892-1:2019 – Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2019.
108. PN-EN ISO 5173:2010 – Spawanie – Badania złączy spawanych – Próba zginania. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2010.

109. PN-EN ISO 17639:2013 – Spawanie – Badania złączy spawanych – Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych metali. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.
110. PN-EN ISO 15614-11:2005 – Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Próba kwalifikacyjna technologii spawania – Część 11: Spawanie wiązką elektronów i spawanie laserowe. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2005.
111. PN-EN ISO 15614-14:2013 – Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Próba kwalifikacyjna technologii spawania – Część 14: Spawanie łukowe rurowych elementów stalowych o ścianie cienkiej z osprzętem rurowym. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.
112. PN-EN ISO 3452-1:2013 – Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2013.
113. PN-EN ISO 4136:2022 – Spawanie – Próba rozciągania złączy spawanych metali. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2022.
114. PN-EN ISO 13919-1:2019 – Spawanie elektronowe i laserowe – Wymagania dotyczące jakości spoin w spawanych złączach – Część 1: Spawanie metali techniką wiązki elektronów i laserową. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2019.
115. PN-EN ISO 643:2020 – Mikrografia – Zasady przygotowania próbek metalograficznych i oznaczania struktury ziarnistej w stalach i stopach metali. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2020.
116. PN-EN ISO 14577-1:2015 – Metalowe materiały – Badania mechaniczne przez penetrację instrumentowaną – Część 1: Zasady ogólne. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2015.
117. PN-EN ISO 23277:2015 – Badania nieniszczące złączy spawanych — Badania penetracyjne złączy spawanych — Poziomy akceptacji.
118. PN-EN ISO 12932:2013 — Spawanie łukowe w osłonie gazów aktywnych stali nierdzewnych i niklu oraz jego stopów — Wytyczne
119. PN-EN 1011-1:2009, Wytyczne dotyczące spawania metali – Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego.

Spis rysunków

Rys. 1. Rura kompozytowa Sanicro38/4L7

Rys. 2. Ściana szczelna kotła sodowego wykonana z rur kompozytowych 3R12/4L7

Rys. 3. Sposób wytwarzania rur kompozytowych

Rys. 4. Wyciskanie warstwy zewnętrznej na gorąco

Rys. 5. Makrostruktura rur dwuwarstwowej

Rys. 6. Ściany szczelne kotłów spawane metodą hybrydową w Energoinstal S.A.

Rys. 7. Rury 3R12/4L7 wykorzystane w kotle sodowym w papierni Mondi

Rys. 8. Przygotowanie złączy do spawania – a i b; pozycjonowanie lasera dyskowego – c i d

Rys. 9. Stanowisko zrobotyzowane z laserem dyskowym w GIT-Łukasiewicz Centrum Spawalnictwa

Rys. 10. Stanowisko badawcze do zrobotyzowanego spawania laserowego;

Rys. 11. Stanowisko do spawania HLAW

Rys. 12. Spawanie laserowe warstwy wewnętrznej rury 3R12/4L7, Sanicro 38/4L7

Rys. 13. Napawanie hybrydowe warstwy zewnętrznej rury 3R12/4L7

Rys. 14. Plan badań pracy doktorskiej

Rys. 15. Widok warstwy wewnętrznej podczas badań wizualnych a) Rura 3R12/4L7, b) Rura Sanicro 38/4L7

Rys. 16. Radiogram spoiny 3R12/4L7 – a; radiogram spoiny Sanicro38/4L7 – b

Rys. 17. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru twardości dla badanych złączy: a) spawanych laserowo, b) spawanych laserowo i napawanych hybrydowo

Rys. 18. Schemat rozkładu twardości rury 3R12/4L7 – spawanie warstwy wewnętrznej (4L7)

Rys. 19. Rury dwuwarstwowe – spawanie warstwy zewnętrznej - rozkład twardości warstwy zewnętrznej 3R12

Rys. 20. Wykres rozciągania poprzecznego złącza doczołowego 3R12/4L7

Rys. 21. Wykres rozciągania poprzecznego złącza doczołowego Sanicro 38/4L7

Rys. 22. Widok próbek: a) 3R12R1, Sanicro 38/4L7R2 przygotowanych do próby rozciągania poprzecznego widok od strony lica; b) Sanicro 38/4L7R2 przygotowanych do próby rozciągania poprzecznego widok od strony grani, c) 3R12R1, po przeprowadzeniu próby rozciągania poprzecznego, d) Sanicro 38/4L7R2 po przeprowadzeniu próby rozciągania poprzecznego.

Rys. 23. a) Schemat przeprowadzenia poprzecznej próby zginania, b) Widok przygotowanych próbek do próby zginania poprzecznego materiał 3R12/4L7, Sanicro 38/4L7 c) Próba zginania

poprzącznego widok próbek od strony grani, d) Próba zginania poprzcznego widok próbki od strony grani

Rys. 24. Zdjęcie makrograficzne próbki D2 warstwa wewnętrzna rury Sanicro 38/4L7 wykonana laserem dyskowym w osłonie argonu a) kąt 120°, b) kąt 240°

Rys. 25. Zdjęcie makrograficzne próbki D1 warstwa wewnętrzna rury 3R12/4L7 wykonana laserem dyskowym w osłonie argonu a) kąt 120°, b) kąt 240°

Rys. 26. Makrostruktura próbki D1 (2-kąt 120°) materiał rury 3R12/4L7 warstwa zewnętrzna spoiny wykonana laserem dyskowym, warstwa zewnętrzna cladding

Rys. 27. Makrostruktura próbki D2 materiał rury Sanicro 38/4L7 warstwa

Rys. 28. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 500x, linia wtopienia spoiny rury w spoinę rury wewnętrznej

Rys. 29. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 2000x, obszar materiału rodzimego rury wewnętrznej (na dole), obszar o strukturze austenitycznej w SWC rury zewnętrznej (środek próbki), spoina w złączu rury zewnętrznej (na górze próbki)

Rys. 30. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 2000x, obszar spoiny złącza rury zewnętrznej z widocznymi wtrąceniami i wżerami, które powstały podczas trawienia próbki

Rys. 31. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS ujawnionych faz w obszarze spoiny rury zewnętrznej, próbka 12D

Rys. 32. Rozkład liniowy pierwiastków na linii wtopienia spoiny złącza rury zewnętrznej w spoinę złącza rury wewnętrznej, złącze 12D

Rys. 33. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, linia wtopienia spoiny rury w spoinę rury wewnętrznej

Rys. 34. Mikrostruktura złącza – próbka, D2.1 powiększenie 2000x, obszar spoiny złącza rury zewnętrznej z widocznymi wtrąceniami i wżerami, które powstały podczas trawienia próbki

Rys. 35. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS ujawnionych faz w obszarze spoiny

Rys. 36. Rozkład liniowy pierwiastków na linii wtopienia spoiny złącza rury zewnętrznej w spoinę złącza rury wewnętrznej, złącze D2.1

Rys. 37. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 50x rura podstawowa: struktura ferrytyczno-perlityczna

Rys. 38. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: struktura ferrytyczno-perlityczna

Rys. 39. Mikrostruktura spoiny warstwy wewnętrznej – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna w SWC

Rys. 40. Mikrostruktura złącza – próbka 12D, powiększenie 100x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)

Rys. 41. Mikrostruktura spoiny – próbka 12D, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)

Rys. 42. Mikrostruktura spoiny – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej z widocznym pęcherzem w spoinę rury wewnętrznej

Rys. 43. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej materiał rury zewnętrznej

Rys. 44. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka 12D, powiększenie 50x, Spoina: struktura kolumnowa spoiny rury zewnętrznej

Rys. 45. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: pasmowa struktura ferrytyczno-perlityczna

Rys. 46. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna w SWC rury podstawowej

Rys. 47. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: struktura połączenia rura zewnętrzna z rurą wewnętrzną, widoczne odwęglenie od strony rury wewnętrznej

Rys. 48. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)

Rys. 49. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)

Rys. 50. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 500x, Rura podstawowa: gruboziarnista struktura przegrzana w SWC z widocznym układem Widmanstättena (obrobiona cieplnie spoina w złączy rury podstawowej)

Rys. 51. Mikrostruktura złącza – próbka D2.1, powiększenie 100x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej z widocznym pęcherzem w spoinę rury wewnętrznej

Rys. 52. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka D2.1, powiększenie 500x, Spoina: linia wtopienia spoiny rury zewnętrznej w materiał rury zewnętrznej

Rys. 53. Mikrostruktura materiału rodzimego – próbka D2.1, powiększenie 100x, Spoina: struktura kolumnowa spoiny rury zewnętrznej