

Politechnika Śląska
Wspólna Szkoła Doktorska

Rozprawa Doktorska

„Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych
z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie
hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie
oraz występowanie korozji”

mgr inż. Sławomir Topór

Promotor:

dr hab. inż. Santina Topolska, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy:

mgr inż. Witold Rusin

Streszczenie

Celem rozprawy jest opracowanie i wdrożenie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie oraz występowanie korozji. Praca ma bezpośredni związek z realnymi potrzebami przemysłu energetycznego, górniczego oraz spożywczego w zakresie łączenia stalowych rur zawierających wykładki z nowoczesnych materiałów kompozytowych odpornych na korozję i ścieranie. Celem badań jest opracowanie podstaw naukowych i technologicznych dotyczących możliwości spajania metodami spawalniczymi materiałów dotychczas uznawanych za niespawalne. Realizacja tego celu wymaga analizy wpływu ilości wprowadzanego ciepła na proces łączenia, tak aby możliwe było uzyskanie połączeń o stabilnych właściwościach strukturalnych, mechanicznych i chemicznych, w tym odporności na zużycie ścierne oraz korozję. Praca ma na celu nie tylko wypracowanie nowego rozwiązania technologicznego, lecz także poszerzenie wiedzy teoretycznej w zakresie zjawisk zachodzących w strefie spawania materiałów o podwyższonej trudności spawalniczej.

Opracowanie składa się z dwóch części. W pierwszej części dokonano przeglądu literatury, w którym omówiono problemy technologiczne występujące w transporcie pneumatycznym i hydraulicznym, związane z zużyciem ściernym i korozyjnym. Przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat stali trudnościeralnych, materiałów stalowych z wykładkami oraz metod nakładania powłok, w tym powłok kompozytowych o zwiększonej odporności na ścieranie i korozję. Następnie opisano zagadnienia dotyczące spawalności stali trudnościeralnych, technologii łączenia tego typu materiałów oraz problemów spawania stali z wykładkami.

W drugiej części, badawczej, przedstawiono tezę i cele rozprawy, przedstawiając metodykę badań, ich wyniki, wyciągając wnioski z każdego zakończonego etapu badań. Na początkowym etapie badań przeprowadzono proces spawania rur wykonanych ze stali węglowej bez wyładek z przygrzаныmi termoparami laboratoryjnymi od strony grani w celu rejestracji cykli cieplnych nagrzewania i chłodzenia materiału. Do realizacji połączeń zastosowano metodę spawania MMA, gdzie analizowano różne warianty przygotowania krawędzi do spawania, w celu określenia optymalnego sposobu ukosowania.

Dla wybranego sposobu przygotowania rowka spawalniczego przeprowadzono badania technologii przy zastosowaniu łukowych metod spawania, w tym TIG, MMA oraz MAG w pozycji PH, a dodatkowo metodą MAG w pozycji PJ. W badaniach wykorzystano tę

samą aparaturę pomiarową co w poprzednim etapie, w celu określenia metody charakteryzującej się najniższą energią liniową oraz najkorzystniejszym rozkładem temperatur w trakcie procesu spawania. Analizowano czasy nagrzewania i chłodzenia w zakresie od 120°C do maksymalnej temperatury oraz od maksymalnej temperatury do 120°C.

Następnie przeprowadzono porównanie technologii spawania blach ze stali węglowej bez wykładek, wykorzystując metodę łukową wyłonią jako najbardziej optymalną w poprzednim etapie oraz spawanie ręczne metodą LBW. W obu przypadkach zastosowano identyczną aparaturę pomiarową, jak w poprzednich badaniach.

Dla każdego wariantu przeprowadzono badania nieniszczące, obejmujące ocenę wizualną, badania penetracyjne, ultradźwiękowe lub radiograficzne, a także badania niszczące, w tym analizę makro- i mikrostrukturalną oraz pomiary twardości.

Na podstawie uzyskanych wyników poszczególnych etapów badań przeprowadzono proces spawania blach pokrytych wykładkami, wykorzystując metodę spawania ręcznego LBW. Po wykonaniu badań zgodnych z wcześniejszymi etapami eksperymentalnymi, przystąpiono do spawania rur stalowych z wykładkami. W ramach badań opracowano technologię spawania rur z wykładkami, a następnie przeprowadzono szereg testów umożliwiających ocenę ich właściwości mechanicznych oraz odporności na korozję. Przeprowadzone analizy obejmowały badania nieniszczące złączy, testy przyczepności wykładki metodą odrywową oraz badania właściwości mechanicznych, w tym pomiary twardości i próby rozciągania. Wyniki tych badań pozwoliły na jednoznaczną ocenę wpływu zastosowanej technologii spawania na właściwości zarówno samego złącza spawanego, jak i wykładki kompozytowej. Dodatkowo wykonano numeryczną symulację termo-metalurgiczną w środowisku MES, wykorzystując program ESI VisualWeld 2023.5. Celem symulacji było wygenerowanie trójwymiarowego modelu złącza spawanego zawierającego wykładki, co umożliwiło szczegółową analizę parametrów cieplnych oraz strukturalnych zachodzących w procesie spawania.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że proces spawania rur z wykładkami kompozytowymi, umożliwia uzyskanie połączeń o wymaganej jakości spoin oraz zapewnienie odpowiedniej szczelności pomiędzy wykładkami kompozytowymi, bez ryzyka ich uszkodzenia. Opracowana technologia spawania pozwala na spełnienie założonych kryteriów wytrzymałościowych oraz eksploatacyjnych, co potwierdzają przeprowadzone analizy strukturalne i mechaniczne.

Słowa kluczowe: badanie technologii spawania, spawanie rur, spawanie rur z wykładką kompozytową, transport hydrauliczny, transport pneumatyczny, rury

Abstract

The aim of this dissertation is to develop and implement the manufacturing and welding technology of steel pipes with wear-resistant composite liners for applications in hydraulic or pneumatic transport of media that cause abrasion and corrosion. The work directly addresses the real needs of the energy, mining, and food industries in joining steel pipes containing liners made of modern composite materials resistant to corrosion and wear.

The aim of the research is to develop scientific and technological foundations for the welding of materials that have so far been considered unweldable. Achieving this goal requires an analysis of the influence of heat input on the joining process, in order to obtain joints with stable structural, mechanical, and chemical properties, including resistance to wear and corrosion. The dissertation aims not only to provide a new technological solution, but also to broaden theoretical knowledge regarding the phenomena occurring in the welding zone of materials characterized by increased welding difficulty.

The dissertation consists of two parts. The first part presents a literature review describing technological challenges in pneumatic and hydraulic transport related to abrasive and corrosive wear, the current state of knowledge on wear-resistant steels, steel materials with liners, coating application methods, wear-resistant composite coatings resistant to corrosion, weldability of wear-resistant steels, joining of wear-resistant steels and steel materials containing liners, as well as welding challenges of steel materials with liners.

The second, research-focused part presents the thesis and objectives of the dissertation, detailing the research methodology, results, and conclusions drawn from each completed research stage. Initially, welding tests were conducted on carbon steel pipes without liners, with laboratory thermocouples attached on the root side to measure thermal cycles of heating and cooling. The MMA welding method was used to weld pipes with different edge preparations to determine the optimal beveling method before welding. Subsequently, for the selected edge preparation method, arc welding technology tests were conducted using TIG, MMA, and MAG welding in the PH position and additionally MAG in the PJ position, employing the same measuring equipment as before. The goal was to determine the welding method with the lowest heat input and the most favorable temperature distribution, heating,

and cooling times in the range from 120°C to the maximum temperature and from the maximum temperature to 120°C. The next step involved comparing the arc welding method identified as the most favorable in the previous task with manual LBW welding of carbon steel plates without liners, using the same measurement equipment as in previous cases. For each task, non-destructive testing was performed, including visual, penetrant, ultrasonic, or radiographic testing, as well as destructive testing, such as macro and microstructure examination and hardness measurements.

Based on the results of individual research tasks, manual LBW welding of plates with liners was performed. After conducting tests similar to the previous tasks, welding of steel pipes with liners was carried out. A welding technology for lined pipes was developed, followed by a series of tests to evaluate their mechanical properties and corrosion resistance. Non-destructive testing of joints was conducted, along with liner adhesion tests using the pull-off method and mechanical property testing, including hardness measurements and tensile tests. The results of these tests allowed for a clear determination of the impact of welding technology on the properties of the welded joint and the composite liner. Additionally, a transient 3D thermo-metallurgical FEM simulation was performed in ESI VisualWeld 2023.5 to generate a model of the welded joint containing liners.

In conclusion, it was determined that welding of pipes with composite liners, depending on their diameters, can be performed while achieving the required weld quality and ensuring the necessary sealing between the composite liners without causing damage.

Keywords: development of welding technology, pipe welding, welding of pipes with composite lining, hydraulic transport, pneumatic transport, pipes

Spis treści

1. Wstęp	10
2. Transport hydrauliczny	11
3. Transport pneumatyczny	13
4. Problemy występujące w układach transportu pneumatycznego i hydraulicznego	14
5. Materiały trudnościeralne stosowane do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego	15
5.1. Rury ze stali trudnościeralnych	16
5.2. Rury stalowe z natryskiwanymi cieplnie powłokami.....	17
5.3. Rury stalowe z napawanymi powłokami	19
5.4. Rury z materiałów kompozytowych	21
5.5. Rury stalowe z aplikowanymi wykładkami kompozytowymi typu PUGA.....	23
5.5.1. Sposób łączenia powłoki kompozytowej z rurami stalowymi	29
6. Sposoby łączenia rur w systemach transportu pneumatycznego i hydraulicznego zawierającego wykładki kompozytowe	31
6.1. Połączenia kołnierzowe	32
6.2. Połączenia na obejmy	34
6.3. Połączenia poprzez spawanie elementów pośrednich rur typu pierścien i tuleja.....	36
7. Teza i cel pracy	37
8. Metodyka badań	40
9. Koncepcje rozwiązań	43
10. Wybór rozwiązań podlegającym badaniom	46
11. Spawanie rur stalowych bez wykladek	48
11.1. Podsumowanie badań zastosowanych rozwiązań koncepcji „a” oraz „g”	62
12. Optymalizacja rozwiązań spawania blach i rur stalowych bez wykladek	63
12.1. Optymalizacja I – spawanie rur: porównanie łukowych metod spawania.....	63
12.1.1. Spawanie metodą TIG	64
12.1.2. Spawanie metodą MMA	68
12.1.3. Spawanie metodą MAG.....	71
12.1.4. Spawanie metodą MAG – pierwszy ścieg w pozycji PJ	74
12.1.5. Podsumowanie optymalizacji I	78

12.2. Optymalizacja II - spawanie blach: porównanie spawania TIG i LBW	79
12.2.1. Spawanie metodą TIG	82
12.2.2. Spawanie metodą LBW (bez materiału dodatkowego)	86
12.2.3. Spawanie metodą LBW (z materiałem dodatkowym).....	91
12.2.4. Podsumowanie optymalizacji II.....	96
12.3. Optymalizacja III - spawanie blach LBW: spawanie w osłonie różnych gazów osłonowych ..	98
12.3.1. Spawanie metodą LBW w osłonie azotu	101
12.3.2. Spawanie metodą LBW w osłonie argonu	102
12.3.3. Spawanie metodą LBW w osłonie mieszanki M21	104
12.3.4. Podsumowanie optymalizacji III	106
13. Spawanie blach i rur stalowych z wykładkami kompozytowymi metodą LBW	107
13.1. Spawanie blach z wykładkami w pozycji PA – dobór parametrów	107
13.2. Spawanie blach z wykładkami w pozycji PG – weryfikacja parametrów	115
13.3. Spawanie LBW rur z wykładkami.....	117
13.3.1. Spawanie porównawcze LBW + TIG	124
13.3.2. Statyczna próba rozciągania złączy	127
14. Symulacja procesu spawania LBW	129
14.1. Podsumowanie symulacji procesu spawania LBW	136
15. Wykonanie prototypowej rury próbnej – rury stalowej z wykładką kompozytową wraz z implementacją jej do istniejącej instalacji	137
15.1. Obliczenia	139
15.2. Spawanie próbki testowej RT1 wraz z badaniami nieniszczącymi oraz próbą ciśnieniową ...	142
15.3. Implementacja w istniejącą instalację wraz z rozruchem i testami	144
16. Podsumowanie badań	144
17. Wnioski	147
Literatura.....	149
Załączniki.....	159
Spis rysunków	160
Spis tabel.....	168

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

PUGA (PU) – rodzina materiałów kompozytowych na bazie poliuretanu

D – średnica zewnętrzna rury stalowej, [mm]

t – grubość materiału blachy lub rury stalowej, [mm]

t_1 – grubość materiału podkładki stalowej, [mm]

R_m – wytrzymałość na rozciąganie, [MPa]

a_0 – grubość strefy rozciąganej, [mm]

b_0 – szerokość strefy rozciąganej, [mm]

S_0 – pole przekroju (próba rozciągania), [mm]

Symulacja MES – symulacja Metodą Elementów Skończonych

z – współczynnik złącza, [–]

IIW (International Institute of Welding) – Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa

A_s – przekrój spoiny, [mm²]

p_c – ciśnienie obliczeniowe, [MPa]

R_{eHt} – minimalna wartość górnej umownej granicy plastyczności określona w temperaturze obliczeniowej, jeżeli temperatura ta jest większa od temperatury pokojowej, [MPa]

$R_{p0,2t}$ – minimalna umowna granica plastyczności przy wydłużeniu 0,2% w temperaturze rury, [MPa]

e – minimalna grubość ścianki, [mm]

f – naprężenia dopuszczalne, [MPa]

$\sigma_{\perp}$ – naprężenie normalne prostopadłe do przekroju spoiny, [MPa]

$\sigma_{\parallel}$ – naprężenie normalne równoległe do przekroju spoiny, [MPa]

$\tau_{\perp}$ – naprężenie styczne (w płaszczyźnie przekroju) prostopadłe do przekroju spoiny, [MPa]

$\tau_{\parallel}$ – naprężenie styczne (w płaszczyźnie przekroju) równoległe do przekroju spoiny, [MPa]

β_w – odpowiedni współczynnik korelacji w odniesieniu do gatunku stali, [–]

f_u – nominalna wytrzymałość na rozciąganie słabszej z łączonych części, [MPa]

γ_{M2} – współczynnik częściowy dotyczący węzłów (nośność śrub, nitów, sworzni oraz spoin),
[–]

1. Wstęp

W różnych gałęziach przemysłu transport hydrauliczny i pneumatyczny substancji o właściwościach ściernych i korozyjnych stanowi istotne wyzwanie technologiczne. W trakcie ich przesyłu elementy instalacji są narażone na erozję oraz korozję, których całkowite wyeliminowanie jest niemożliwe. Skumulowane efekty tych procesów prowadzą do degradacji materiału, wpływając tym samym na trwałość oraz niezawodność układów transportowych.

Transport medium realizowany jest za pomocą rurociągów przesyłowych, które są narażone na ekstremalne warunki eksploatacyjne oraz oddziaływanie agresywnych środowisk. W związku z tym muszą wykazywać wysoką odporność na korozję i ścieranie, a w wielu przypadkach również neutralność wobec transportowanych substancji. W odpowiedzi na te wymagania w praktyce przemysłowej stosuje się rurociągi stalowe, rurociągi z tworzyw sztucznych oraz rurociągi wykonane z materiałów kompozytowych. Ze względu na rygorystyczne kryteria dotyczące właściwości eksploatacyjnych materiałów stosowanych w rurociągach, żadne z pojedynczych rozwiązań nie jest w stanie spełnić wszystkich stawianych im wymagań. W konsekwencji prowadzone są intensywne prace nad zastosowaniem innowacyjnych materiałów konstrukcyjnych. Jednym z optymalnych rozwiązań w tym zakresie jest wykorzystanie rurociągów stalowych z wykładkami kompozytowymi, które łączą wysoką wytrzymałość konstrukcyjną z wymaganą odpornością na korozję i ścieranie, przy jednoczesnym zachowaniu obojętności chemicznej względem transportowanego medium. Dobór składu chemicznego wykładki kompozytowej jest procesem indywidualnym i uzależnionym od szeregu czynników, takich jak twardość, ziarnistość, kształt transportowanych cząstek, temperatura, skład chemiczny oraz wymagania sanitarne transportowanej substancji. Dodatkowo istotnymi parametrami wpływającymi na skład mieszanki kompozytowej są prędkość przepływu medium, jego charakterystyka dynamiczna oraz całkowita objętość transportowanej substancji.

W przypadku zastosowania niewłaściwego rozwiązania technologicznego instalacji, np. doboru nieodpowiedniego materiału na rury lub niewłaściwego sposobu łączenia poszczególnych odcinków rur, może nastąpić ich uszkodzenie na całej ich wewnętrznej powierzchni, w miejscach łączeń lub na wewnętrznych powierzchniach łuków. Może również dojść do odspojenia poszczególnych warstw rur lub jej powłok, gdzie w przypadku

uszkodzenia warstw ochronnych i odsłonięcia materiału konstrukcyjnego może wystąpić gwałtowna degradacja części stalowej rur, powodując niekontrolowaną awarię systemu transportowego [1÷10].

Trwałe i nierozłączne łączenie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych może być realizowane poprzez proces spawania. Może on być przeprowadzany zarówno z wykorzystaniem metod łukowych, takich jak TIG, MIG, MAG, MMA, jak również z zastosowaniem technik spawania plazmowego, laserowego lub wiązką elektronów. W przypadku spawania materiałów wrażliwych na wysoką temperaturę oraz jej długotrwałe oddziaływanie w trakcie procesu, konieczne jest odpowiednie opracowanie technologii spawania. Należy wówczas uwzględnić takie czynniki jak ilość wprowadzonego ciepła, objętość spoiny, szerokość strefy wpływu ciepła, oraz czasy nagrzewania i chłodzenia w zakresie krytycznych temperatur, które mogą prowadzić do degradacji materiału. W celu ograniczenia niekorzystnych skutków cieplnych, należy dążyć do minimalizacji wpływu ciepła w miejscu spawania, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości precyzyjnego kontrolowania cyklu cieplnego procesu [3÷13].

Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy mają na celu opracowanie technologii wytwarzania i spawania rurociągów stalowych, wyposażonych od wewnętrznej strony w trudnościieralne wykładki kompozytowe odporne na korozję. Tego rodzaju rozwiązania znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, szczególnie w transporcie hydraulicznym i pneumatycznym mediów powodujących intensywne ścieranie oraz korozję. Uzyskane wyniki pozwolą na poszerzenie wiedzy w zakresie możliwości technologicznych związanych z wytwarzaniem i spawaniem stalowych konstrukcji zawierających kompozytowe wykładki wrażliwe na działanie wysokich temperatur.

2. Transport hydrauliczny

Transport hydrauliczny stał się czwartą co do znaczenia metodą transportu, po transporcie drogowym, kolejowym i wodnym. Do jego rozwoju przyczyniły się takie czynniki jak wysoka wydajność, niskie koszty eksploatacji oraz niewielki wpływ na środowisko. Transport hydrauliczny to technika polegająca na wykorzystaniu przepływu cieczy, najczęściej wody, jako nośnika do przemieszczania materiałów stałych. System ten charakteryzuje się dużą elastycznością – może być realizowany zarówno w zamkniętych

rurociągach, jak i w otwartych kanałach, o ile pozwalają na to warunki terenowe. Do jego zalet należy również duża pojemność transportowa, wysoka zdolność adaptacyjna oraz niewielka wrażliwość na czynniki środowiskowe. Za pomocą transportu hydraulicznego przemieszczane są różnorodne materiały, takie jak paliwa (np. hydraty gazu ziemnego, węgiel), surowce (minerały metaliczne i niemetaliczne), materiały budowlane, odpady energetyczne (popioły, pyły), odpady z przemysłu chemicznego i metalurgicznego, a także osady usuwane z rzek i zbiorników wodnych. Technologia ta znajduje szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, m.in. energetycznym, metalurgicznym, wydobywczym, chemicznym, spożywczym oraz w gospodarce wodnej (rys. 1). Transport hydrauliczny stanowi nieodzowny element współczesnej infrastruktury przemysłowej i odgrywa istotną rolę w rozwoju gospodarki i społeczeństwa. Mimo, że rozwijał się później niż inne formy transportu, jego dynamiczny postęp uczynił go obecnie kluczowym elementem nowoczesnych systemów transportowych [14÷16].



Rys. 1. Widok elementów systemu transportu hydraulicznego zastosowanego na terenie kopalni [por. 6]

3. Transport pneumatyczny

Transport pneumatyczny jest podstawową technologią wydajnego i niezawodnego transportu materiałów sypkich, proszków i granulatów wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu, między innymi w przemyśle energetycznym, wydobywczym, spożywczym, chemicznym (rys. 2). Systemy transportu pneumatycznego wykorzystują powietrze lub gaz jako medium transportowe, a materiały są transportowane przez rurociągi lub kanały za pomocą kombinacji ciśnienia i przepływu powietrza. Ten typ transportu realizowany jest najczęściej stalowymi rurociągami o typowych średnicach. Zaletami transportu pneumatycznego są zdolność do przenoszenia materiałów na duże odległości, elastyczność w projektowaniu tras oraz transport w zamkniętym systemie, który minimalizuje zapylenie i inne zagrożenia dla środowiska. Ponadto charakteryzuje się stosunkowo niskim kosztem początkowym i operacyjnym, łatwością automatyzacji i konserwacji. Jednym z najważniejszych osiągnięć w technologii transportu pneumatycznego jest rozwój systemów wysokociśnieniowych, które umożliwiają przemieszczanie materiałów na znacznie większe odległości. Systemy te wykorzystują sprężone powietrze do transportu materiałów przez rurociągi, ograniczając jednocześnie potrzebę stosowania energochłonnych pomp oraz innych urządzeń mechanicznych. Dodatkowo, systemy te mogą być obsługiwane przy niższych prędkościach przepływu, zmniejszając zużycie energii i poprawiając ogólną wydajność. Kolejną niedawną innowacją w dziedzinie transportu pneumatycznego są zaawansowane strategie sterowania, które pozwalają na bardziej precyzyjną kontrolę nad procesem transportu. Strategie te obejmują mechanizmy sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym, umożliwiając operatorom dokonywanie korekt w czasie rzeczywistym i optymalizację procesu w celu uzyskania maksymalnej wydajności. Istotnym faktem jest, że transportowane materiały muszą być sypkie i suche w celu uniknięcia ewentualnemu zarastaniu rurociągów i urządzeń transportujących oraz powstawaniu korków [17÷19].



Rys. 2. Widok elementów systemu transportu pneumatycznego zainstalowanego na elektrociepłowni

4. Problemy występujące w układach transportu pneumatycznego i hydraulicznego

Elementy instalacji transportujących narażone są na niekorzystne, a często niemożliwe do całkowitego wyeliminowania zjawiska. Zarówno w przypadku transportu hydraulicznego, jak i pneumatycznego, obserwuje się oddziaływania erozyjne, a niekiedy również korozyjne. W celu ich minimalizacji stosuje się różne rozwiązania, w tym odpowiednie projektowanie instalacji, dobór właściwych materiałów konstrukcyjnych oraz ochronnych – mających bezpośredni kontakt z transportowanymi substancjami – a także właściwy dobór technologii wykonania. W niektórych przypadkach przepisy branżowe oraz wymogi bezpieczeństwa mogą ograniczać możliwość zastosowania określonych materiałów jako materiałów do budowy rurociągów. Niezależnie jednak od wyboru optymalnych rozwiązań projektowych i technologicznych, kluczowe znaczenie ma właściwa eksploatacja instalacji, prowadzona zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową. Szczególnie istotne jest prowadzenie monitoringu i diagnostyki elementów instalacji, co pozwala na wczesne wykrywanie uszkodzeń i zapobiega nagłym awariom systemu transportowego. W praktyce przemysłowej

ocena stanu technicznego rurociągów transportujących media o właściwościach erozyjnych i korozyjnych bywa znacznie utrudniona, a w niektórych przypadkach wręcz niemożliwa. Wynika to z ograniczonego dostępu do instalacji, wysokiej temperatury pracy, braku możliwości inspekcji wewnątrz rurociągów, cyklonów czy pomp (szczególnie w trakcie eksploatacji), nieprzyjazznych warunków środowiskowych oraz złożonej, wielowarstwowej budowy rurociągów (np. układów stal–beton, stal–ceramika, stal–tworzywo sztuczne, stal–guma czy stal–materiał kompozytowy). Z uwagi na potencjalnie bardzo wysokie straty finansowe związane z nieoczekiwaną awarią, ciągły nadzór nad stanem technicznym instalacji transportowych jest niezwykle istotny (rys. 3) [20÷22].



Rys. 3. Przykładowe uszkodzenia występujące podczas eksploatacji: uszkodzenie wykładek, erozja rur, odkształcenia geometryczne rur, zarastanie rur [por. 6]

5. Materiały trudnościeralne stosowane do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego

Ze względu na stosowanie coraz to nowocześniejszych materiałów podczas budowy maszyn, urządzeń oraz systemów transportu wytwarzane konstrukcje i instalacje stają się elementem postępu cywilizacyjnego. Niezwykle ważnym aspektem są parametry materiałów mających bezpośredni kontakt z transportowanym medium oraz sposób łączenia rurociągów wytworzonych z tych materiałów. Niejednokrotnie zdarza się, że zastosowany materiał nie jest samonośny i wymaga zastosowania dodatkowego materiału konstrukcyjnego lub jest

za drogi do wytworzenia komponentów wyłącznie z tego materiału, dlatego stosuje się go wyłącznie w miejscu styku transportowanego medium z rurami. Najczęściej stosowanymi materiałami w przypadku systemów transportu rurociągowego hydraulicznego lub pneumatycznego są [23, 24]:

- rury ze stali trudnościeralnych,
- rury stalowe z napawanymi lub natryskiwanymi cieplnie powłokami,
- rury z materiałów kompozytowych,
- rury stalowe z aplikowanymi wykładkami kompozytowymi.

5.1. Rury ze stali trudnościeralnych

Stale trudnościeralne charakteryzują się wysoką odpornością na ścieranie oraz na obciążenia udarowe, ich produkcję rozpoczęto pod koniec XX wieku. W Polsce są klasyfikowane jako niskostopowe stale martenzytyczne lub stale konstrukcyjne o podwyższonej odporności na ścieranie. Są to zazwyczaj stopy z dużą zawartością węgla i innych pierwiastków stopowych, takich jak mangan, chrom, krzem, nikiel i miedź. Ich struktura i właściwości użytkowe są kształtowane w procesie ulepszania cieplnego. W zależności od gatunku stali i obróbki cieplnej, stale trudnościeralne mogą osiągać twardość od 400 do 600 HB (twardość Brinnela). Stale trudnościeralne są spawalne, a proces ich łączenia może być prowadzony większością metod spawania. Kluczowe znaczenie podczas spawania ma kontrola parametrów takich jak temperatura podgrzewania, temperatura międzysciegowa, ilość wprowadzonego ciepła oraz kolejność wykonywania ściegów. Ważnym aspektem procesu spawania stali trudnościeralnych jest odpowiednie dopasowanie łączonych elementów jeszcze przed rozpoczęciem procesu, poprzez zastosowanie normatywnych odstępów i szczelin spawalniczych. W celu uzyskania korzystnych właściwości mechanicznych złączy, należy prowadzić spawanie przy możliwie najniższej energii liniowej, ograniczając ilość wprowadzanego ciepła. Wynika to z faktu, że nadmierna ilość energii cieplnej może prowadzić do przegrzania strefy wpływu ciepła (SWC), co skutkuje obniżeniem odporności na ścieranie poprzez powstawanie niekorzystnych struktur metalograficznych. Zastosowanie właściwych parametrów technologicznych – takich jak odpowiednia prędkość spawania, natężenie prądu oraz napięcie łuku – pozwala również na ograniczenie odkształceń spawalniczych oraz na poprawę udarność złączy. Z drugiej strony, zbyt mała ilość wprowadzonego ciepła może skutkować zbyt szybkim chłodzeniem

złącza (krótki czas $t_{8/5}$), co prowadzi do powstawania struktur o dużej twardości i kruchości, a tym samym do spadku uderzalności. Dlatego kluczowe jest precyzyjne zbalansowanie parametrów cieplnych w celu uzyskania struktury o pożądanych właściwościach eksploatacyjnych. Należy również pamiętać, że stale trudnościeralne, mimo swoich zalet w zakresie odporności na ścieranie i obciążenia uderowe, nie wykazują odporności na korozję. Z tego względu nie są przeznaczone do stosowania w środowiskach wymagających właściwości antykorozyjnych, jak np. przemysł spożywczy czy chemiczny, gdzie stosuje się stale nierdzewne lub materiały o podwyższonej odporności chemicznej. Na rynku dostępnych jest kilku producentów stali trudnościeralnych, oferujących wyroby o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych, dostosowanych do konkretnych zastosowań przemysłowych. Do najbardziej rozpoznawalnych należą m.in. wyroby firmy Miilux (serie 400, 450, 500, 600 – oznaczenia odpowiadające minimalnej twardości materiału w skali HB), SSAB – producent stali Hardox (np. Hardox 400, Hardox 500), a także materiały oznaczane jako GB20, wykorzystywane w szczególności do budowy rurociągów podsadzkowych w przemyśle wydobywczym [25÷28, zał. 1]. Przykład fragmentów rurociągów wykonanych ze stali trudnościeralnych przedstawiono na rysunku 4.



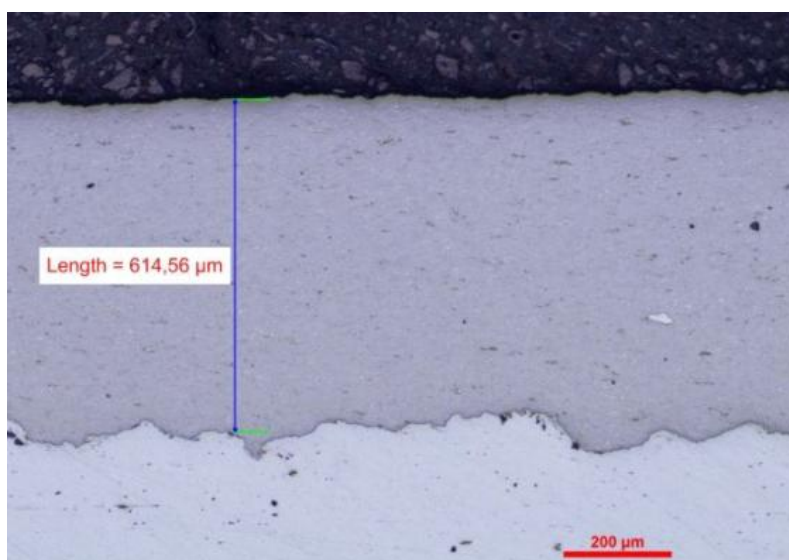
Rys. 4. Widok prefabrykowanych fragmentów rurociągów wykonanych ze stali trudnościeralnych.

5.2. Rury stalowe z natryskiwanyymi cieplnie powłokami

Nowoczesne technologie powlekania, w tym te najbardziej zaawansowane, umożliwiają uzyskiwanie niemal pełnego zakresu właściwości fizyko-mechanicznych i krystalicznych,

wydłużających żywotność produktów przeznaczonych do pracy w środowisku narażonym na ekstremalne obciążenia mechaniczne i termiczne, w tym także erozję i korozję [29, 30].

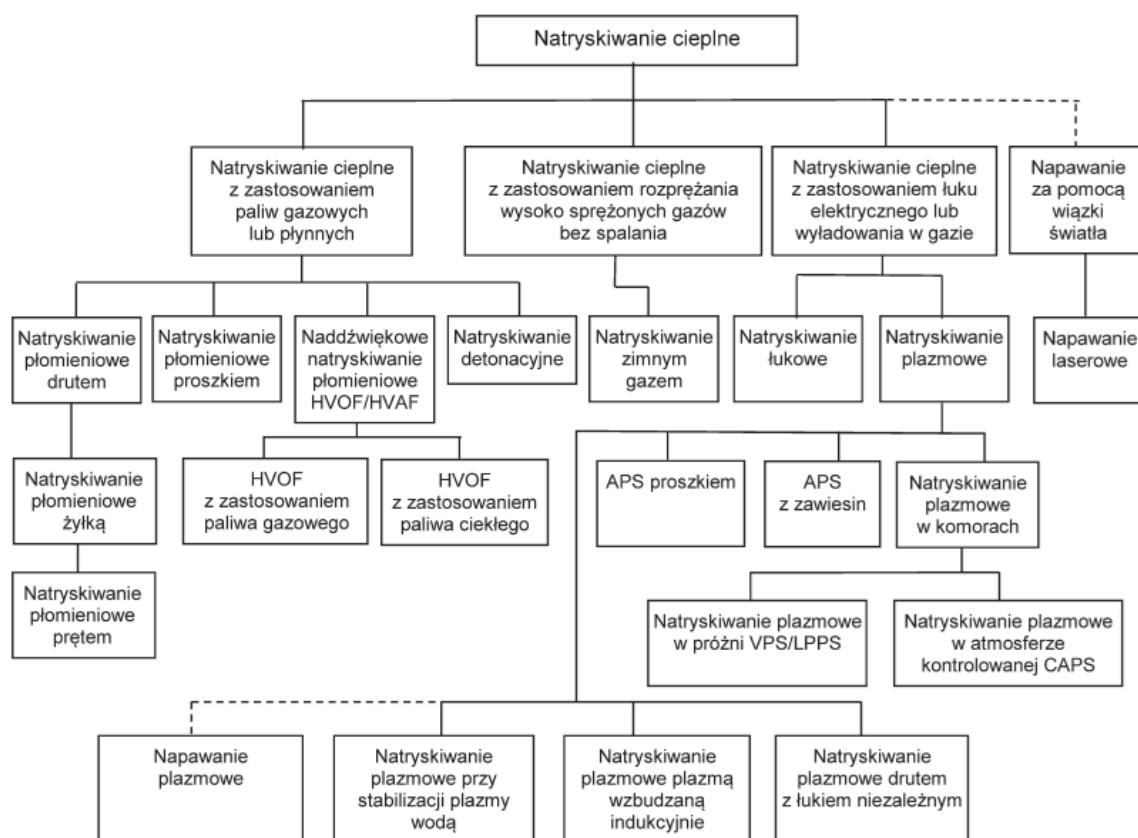
Natryskiwanie cieplne powłok ochronnych stanowi jedną z kluczowych technologii inżynierii powierzchni, umożliwiającą wytwarzanie warstw charakteryzujących się wysokimi właściwościami eksploatacyjnymi, w szczególności odpornością na zużycie ścierne oraz korozję. Metoda ta pozwala na stosowanie szerokiego spektrum materiałów inżynierskich, pod warunkiem, że podczas procesu natryskiwania nie ulegają one dysocjacji lub odparowaniu. W procesie natryskiwania cieplnego nie dochodzi do nadtopienia materiału podłoża, natomiast powłoka łączy się z nim głównie na drodze adhezji, co zilustrowano na rysunku 5.



Rys. 5. Struktura powłoki wytworzonej metodą naddźwiękowego natryskiwania cieplnego [31]

Podstawowy podział metod natryskiwania cieplnego wykształcił się w wyniku rozwoju urządzeń dedykowanych tym procesom i opiera się na rodzaju źródła ciepła wykorzystywanego do stopienia materiału natryskiwanego. W odniesieniu do normy PN-EN ISO 14917 powyższy podział został przedstawiony na rysunku 6. Dobór odpowiedniej metody natryskiwania powinien być uzależniony zarówno od właściwości materiału podłoża, jak i rodzaju stosowanego materiału powłokowego. Ma to szczególne znaczenie w sytuacjach, gdy kluczowe jest uzyskanie jednorodnej i trwałej struktury warstwy ochronnej. Niewłaściwie dobrana technika natryskiwania może prowadzić do powstawania pęknięć, a w skrajnych

przypadkach – do uszkodzeń całych warstw powłoki, skutkując brakiem spełnienia wymaganych właściwości użytkowych finalnego produktu. Proces nakładania powłok powinien być realizowany w kontrolowanych i stabilnych warunkach środowiskowych, ponieważ ich niespełnienie również może negatywnie wpłynąć na trwałość i jakość uzyskanych warstw [30÷33].



Rys. 6. Schemat podziału metod natryskiwania cieplnego

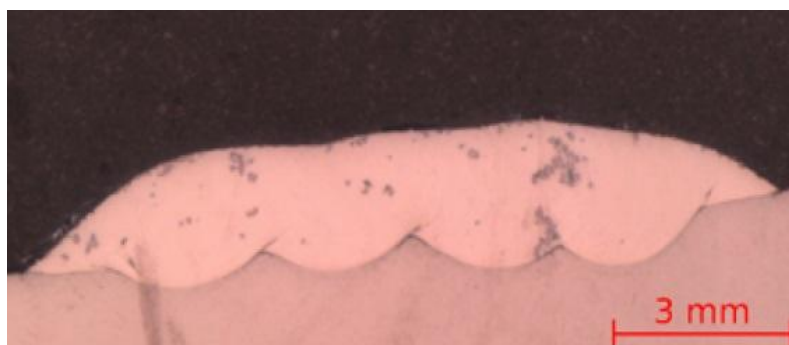
5.3. Rury stalowe z napawanymi powłokami

Technologia napawania stosowana jest w celu wytworzenia na materiale podstawowym warstwy ochronnej charakteryzującej się podwyższoną odpornością na ścieranie i korozję oraz innymi pożądanymi właściwościami eksploatacyjnymi, które nie są właściwe dla materiału rdzenia. W odróżnieniu od natryskiwania cieplnego, proces napawania wiąże się z częściowym stopieniem podłoża, co umożliwia powstanie połączenia dyfuzyjnego pomiędzy warstwą napawaną a podłożem. Zjawisko to może jednak prowadzić do powstania naprężeń własnych zarówno w materiale podłoża, jak i w napoinie, co z kolei może

skutkować ich odkształceniem lub pękaniem. Powłoki napawane cechują się często wysoką twardością, co stanowi jedną z ich kluczowych zalet. W literaturze technicznej wyróżnia się kilka odmian napawania, które można sklasyfikować w następujący sposób [33÷35]:

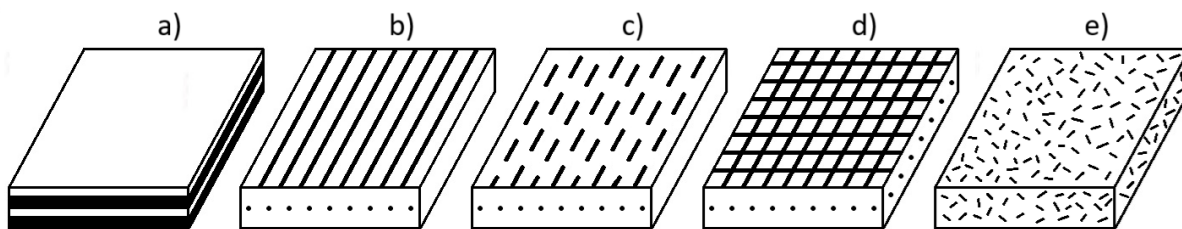
- napawanie łukowe,
- napawanie gazowe,
- napawanie laserowe,
- napawanie plazmowe.

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój materiałów inżynierskich o precyzyjnie zaprojektowanym składzie fazowym i strukturze. Ze względu na wysokie koszty wytwarzania, materiały te są stosowane selektywnie – w najbardziej obciążonych obszarach maszyn, urządzeń i instalacji – co znacząco przyczynia się do zwiększenia ich trwałości eksploatacyjnej. Istotnym aspektem tego podejścia jest zarówno jego ekonomiczny, jak i ekologiczny charakter, wynikający z możliwości prowadzenia procesów regeneracji oraz napraw uszkodzonych powłok. Procesy napawania warstw odpornych na ścieranie i korozję znajdują szerokie zastosowanie w takich sektorach jak przemysł energetyczny, chemiczny, motoryzacyjny, maszynowy, lotniczy oraz w medycynie. Szeroka gama dostępnych materiałów powłokowych – obejmująca metale nisko-, średnio- i wysokotopliwe, a także materiały ceramiczne i ich kombinacje (kompozyty) – umożliwia projektowanie elementów zoptymalizowanych pod względem właściwości materiałowych. Dzięki dużej uniwersalności oraz możliwości pełnej lub częściowej automatyzacji procesów napawania, technologia ta może być z powodzeniem wykorzystywana zarówno w produkcji seryjnej i jednostkowej, jak i w regeneracji zużytych elementów o zróżnicowanych gabarytach. Powyższe cechy potwierdzają, że zarówno nowo wytwarzane, jak i regenerowane części maszyn, urządzeń i instalacji charakteryzują się zwiększoną trwałością oraz wydajnością pracy [33÷35]. Przykład napoiny napawanej laserowo przedstawiono na rysunku 7.



5.4. Rury z materiałów kompozytowych

Współczesny przemysł nieustannie poszukuje nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych o ulepszonych właściwościach, takich jak wytrzymałość mechaniczna, odporność trybologiczna, właściwości cieplne, elektryczne, a także podwyższona trwałość eksploatacyjna przy jednoczesnym obniżeniu masy własnej. Coraz częściej oczekuje się również zdolności tych materiałów do tłumienia drgań. Wśród rozwijających się grup materiałów szczególne znaczenie zyskują kompozyty, które stanowią połączenie co najmniej dwóch komponentów o różnych, lecz wzajemnie uzupełniających się właściwościach. Kompozyty są materiałami monolitycznymi, powstałymi z fazy osnowy oraz fazy zbrojącej, których właściwości są wynikiem synergii zastosowanych komponentów. Znajdują one szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, stale zwiększając swój udział rynkowy. Wynika to z faktu, że właściwości nowoczesnych materiałów kompozytowych znacząco przewyższają parametry klasycznych materiałów konstrukcyjnych – szczególnie w zakresie wytrzymałości mechanicznej, odporności chemicznej oraz trwałości eksploatacyjnej. Kompozyty o niskiej masie właściwej, a jednocześnie wysokiej wytrzymałości, twardości oraz odporności na zużycie i korozję, stają się coraz powszechniej stosowane. Pomimo wyższych kosztów początkowych, w ujęciu długoterminowym wykazują one korzystny bilans ekonomiczny. Klasyfikacja materiałów kompozytowych opiera się najczęściej na rodzaju materiału osnowy. Wyróżnia się trzy podstawowe grupy: kompozyty metalowe, polimerowe oraz ceramiczne. Jeżeli natomiast materiał osnowy traktowany jest jako zbrojenie, można wyróżnić dziewięć możliwych kombinacji kompozytów hybrydowych (powstających poprzez zestawienie trzech głównych typów materiałów osnowy – metal, polimer, ceramika – z trzema typami materiałów zbrojenia – również: metal, polimer, ceramika). Kompozyty różnią się również pod względem morfologii i modelu budowy. W literaturze technicznej wyróżnia się m.in.: kompozyty warstwowe, zbrojone włóknami długimi, krótkimi, siatkami lub tkaninami, a także cząstkami, co przedstawiono na rysunku 8a÷e. [37÷41].



Rys. 8. Podstawowe modele budowy kompozytów: a) warstwowe, b) umacniane włóknami długimi, c) umacniane włóknami krótkimi, d) umacniane siatką lub tkaniną, e) umacniane cząstkami [38]

Obecnie w przemyśle szeroko stosowane są kompozyty nowej generacji, w których rolę osnowy pełnią elementy w postaci blach lub rur wykonanych z metali takich jak aluminium, tytan, miedź, kobalt, nikiel czy stale stopowe. Właściwości funkcjonalne tych materiałów determinowane są głównie przez zastosowane komponenty wzmacniające, do których zaliczają się materiały ceramiczne, związki międzymetaliczne oraz polimery.

Materiały kompozytowe mogą być wytwarzane z wykorzystaniem różnych technologii, których dobór uzależniony jest od kształtu i funkcji projektowanej części, rodzaju użytych materiałów, oczekiwanych właściwości użytkowych oraz przewidywanego zastosowania końcowego. W zależności od tych czynników, proces technologiczny może się istotnie różnić. Klasyfikacja procesów wytwarzania materiałów kompozytowych może być prowadzona w oparciu o charakterystykę zastosowanej metody, wyróżniając między innymi:

- formowanie otwarte kontaktowe (otwarte),
- formowanie metodą prasowania,
- formowanie z transferem żywicy (RTM – Resin Transfer Molding),
- formowanie przez wtrysk (Injection Molding),
- nawijanie włókien (Filament Winding),
- proces pultruzji (Pultrusion),
- wytwarzanie addytywne (drukowanie 3D – Additive Manufacturing).

W celu redukcji kosztów wytwarzania stosuje się odpowiednie techniki wytwarzania i łączenia materiałów kompozytowych. Dla niektórych typów części optymalne jest zautomatyzowanie produkcji, jak na przykład w przypadku elementów obrotowych, takich jak rury. Natomiast sposób łączenia ze sobą gotowych materiałów kompozytowych trudno uzyskać poprzez uzyskanie połączenia nierozłącznego. Rysunek 9 ilustruje przykład

skutecznego połączenia spawanego rur kompozytowych wykonanych z materiału 3R12/4L7, w którym warstwę wewnętrzną stanowi stal P265GH, natomiast warstwę zewnętrzną stal X2CrNi18-10. Rozwiązanie to znajduje zastosowanie w przemysłowych instalacjach do termicznego przekształcania odpadów [39, 40, 42].



Rys. 9. Widok makroskopowy przekroju złącza na rurze kompozytowej Sanicro 3R12/4L7 [40]

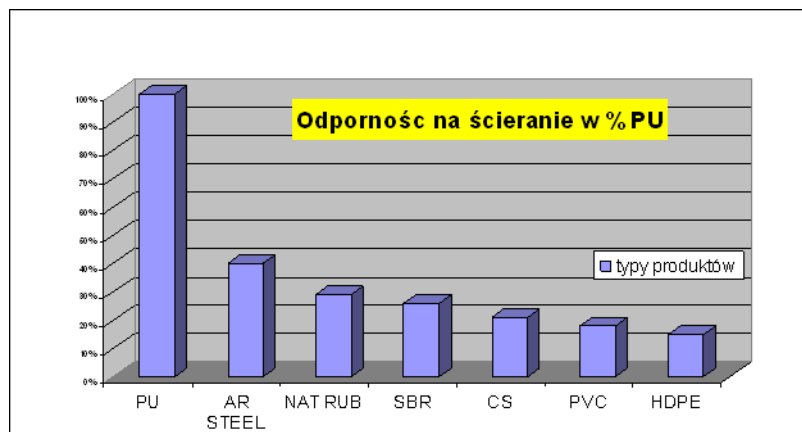
5.5. Rury stalowe z aplikowanymi wykładkami kompozytowymi typu PUGA

Rosnące wymagania klientów, a także coraz bardziej restrykcyjne normy unijne, wymuszają na producentach systemów transportowych ciągle poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań, które zapewnią długotrwałą, bezawaryjną i bezpieczną eksploatację instalacji. Jednym z takich rozwiązań jest stosowanie powłok ochronnych, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, wykonanych z trudnościeralnego i antykorozyjnego kompozytu poliuretanowego typu PUGA, aplikowanego na stalowe elementy konstrukcyjne – blachy i rury. Tego rodzaju zabezpieczenie skutecznie przeciwdziała zużyciu tribologicznemu oraz korozji w systemach transportu pneumatycznego, hydraulicznego i grawitacyjnego mediów o zróżnicowanej agresywności, takich jak: węgiel, minerały, rudy metali, gaz, ropa naftowa i jej pochodne, woda, mieszaniny podsadzkowe, piasek, żwir, zboża oraz pasze (rys. 10). Proces transportu, zwłaszcza w przypadku materiałów sypkich o właściwościach ściernych, prowadzi do intensywnego zużycia powierzchni roboczych stalowych komponentów instalacji. Skutkuje to pogorszeniem parametrów pracy, wzrostem ryzyka awarii oraz generuje znaczne koszty eksploatacyjne. Zastosowanie powłoki poliuretanowej

PUGA wykazuje szereg istotnych zalet w porównaniu do konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych, w tym stali trudnościeralnych. Materiał ten cechuje się znakomitymi właściwościami antykorozyjnymi, osiągającymi poziom klasy C5 według normy PN-EN ISO 12944-2, co wyraźnie przewyższa odporność standardowych stali konstrukcyjnych. Dodatkowo, powłoka ta charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie, istotnie przewyższającą właściwości tribologiczne stali, co potwierdzono w badaniach porównawczych (rys. 11) [6, 7, 43÷47].



Rys. 10. Przykłady zastosowania wykładek z PUGA w przemyśle (zsypy, rynny, rurociągi, kontenery) [43]



Rys. 11. Wykres przedstawiający porównanie odporności na wycieranie materiału PUGA (PU) w stosunku do innych materiałów [43]

Materiał kompozytowy PUGA charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością na uszkodzenia mechaniczne, co wynika z jego znacznej sprężystości. Wykazuje odporność na działanie szerokiego zakresu czynników chemicznych oraz wilgoci, a także promieniowania UV. Ponadto, materiał ten cechuje się dobrą izolacyjnością elektryczną (odporność na przebicia) oraz stabilnością właściwości w czasie, niezależnie od warunków środowiskowych, co oznacza brak efektu starzenia się materiału. Posiada również stosowne dopuszczenia do stosowania w strefach zagrożonych wybuchem. Powłoka PUGA charakteryzuje się dobrą przyczepnością do podłoża rur stalowych, dzięki czemu, pomimo warstwowego charakteru, zachowana jest integralność strukturalna elementu – rurociąg stanowi zwartą, spójną całość podczas eksploatacji. Dodatkową zaletą materiału jest jego elastyczność, która pozwala na skuteczne tłumienie fal uderzeniowych, np. w przypadku wystąpienia zjawiska uderzenia hydraulicznego. PUGA wykazuje również niską przewodność cieplną, co eliminuje konieczność stosowania dodatkowej izolacji termicznej rurociągów. Materiał ten posiada także znakomite właściwości tłumiące dźwięk. Lustrzana gładkość wewnętrznej powierzchni powłoki redukuje opory przepływu medium, co zwiększa wydajność instalacji i jednocześnie ogranicza powstawanie osadów. Ze względu na niski ciężar właściwy – około pięciokrotnie niższy od stali – możliwe jest istotne zmniejszenie masy całkowitej systemów rurociągowych. Zastosowanie powłoki PUGA eliminuje potrzebę konserwacji, m.in. dzięki skutecznej ochronie stalowych elementów przed zjawiskiem kawitacji, co wpływa na znaczące wydłużenie okresu eksploatacji i ograniczenie kosztów utrzymania. W zależności od wymagań aplikacyjnych, skład chemiczny materiału PUGA może być modyfikowany w celu dostosowania go do określonych klas odporności ogniowej

lub uzyskania wymaganych parametrów w zakresie rezystancji skrośnej i powierzchniowej [6, 7, 44÷47].

Skład chemiczny materiału kompozytowego PUGA oraz grubość nanoszonej powłoki są każdorazowo dobierane indywidualnie, w zależności od warunków eksploatacyjnych i wymagań technicznych danego zastosowania. Dokładne receptury materiałowe stanowią tajemnicę przedsiębiorstwa opracowującego technologię. W tabeli 1 zestawiono wybrane właściwości materiałów typu PUGA, istotne z punktu widzenia ich zastosowania w ochronie antykorozyjnej i przeciwzużyciowej elementów instalacji przemysłowych.

Tab. 1. Zestawienie wybranych właściwości Poliuretanów PUGA [48]

Właściwości	Metoda testu	Jednostka	PUGA*	PUGA
Temperatura pracy (tymczasowo)	-	°C	-15 ÷ 90 (120)	-40 ÷ 90 (120)
Odkształcenie trwałe po ściskaniu 22 godz/70°C	ISO 815-1 (część 1)	%	12 ÷ 30 **	15 ÷ 31 **
Odporność na ścieranie	ISO 4649	mm ³	25 ÷ 53 **	40 ÷ 100 **
Wytrzymałość na rozciąganie	ISO 527- Typ 5 (2mm)	MPa	19 ÷ 44 **	11 ÷ 40 **
Wytrzymałość na rozrywanie	ISO 34 - Pt B, Proc A	N/mm	50 ÷ 115 **	38 ÷ 80 **
Wydłużenie przy zerwaniu	ISO 527- Typ 5 (2mm)	%	500 ÷ 760 **	320 ÷ 600 **
Rzeczywistość powierzchniowa	-	Ohm	< 1,5 x 10 ⁸ *	
* system PUGA o właściwościach trudnopalnych i antystatycznych				
** w zależności od twardości				

Na rysunku 12 zaprezentowano przekroje fragmentów rur stosowanych w instalacjach do transportu hydraulicznego materiałów sypkich. Po lewej stronie przedstawiono klasyczne rozwiązanie w postaci rury stalowej wykonanej ze stali trudnościeralnej, zabezpieczonej antykorozyjnie jedynie od strony zewnętrznej. Po prawej stronie zaprezentowano alternatywne rozwiązanie w postaci rury stalowej z wewnętrzną wykładziną kompozytową typu PUGA oraz zabezpieczonej antykorozyjnie od strony zewnętrznej. Obie rury zostały wycięte z eksploatowanej instalacji przemysłowej, gdzie pracowały przez zbliżony okres czasu w porównywalnych warunkach przepływu medium. Porównanie tych elementów umożliwia ocenę skuteczności zastosowanego materiału kompozytowego w kontekście odporności na ścieranie i korozję w warunkach rzeczywistych.



Rys. 12. Widok obrazujący fragmenty rur transportowych wyciętych z pracującej instalacji: po lewej stronie rura stalowa bez wykładki kompozytowej, po prawej stronie rura stalowa z wykładką kompozytową [por. 6]

W wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej wyciętych fragmentów rur eksploatowanych w instalacjach transportu hydraulicznego materiałów sypkich potwierdzono wcześniejsze obserwacje dotyczące wad i zalet obu rozwiązań. W przypadku klasycznego rozwiązania, trudnościeralnej rury stalowej zabezpieczonej powłoką antykorozyjną od strony zewnętrznej, stwierdzono znaczące ubytki grubości ścianek od strony wewnętrznej, co było wynikiem intensywnego zużycia ściernego. Dodatkowo zaobserwowano proces zarastania światła rury, skutkujący zmniejszeniem jej wewnętrznej średnicy oraz wzrostem chropowatości powierzchni. Wyniki pomiarów eksploatacyjnych wykazały wyraźne

pogorszenie parametrów pracy układu transportowego, w szczególności spadek przepływu oraz wzrost strat ciśnienia, co można bezpośrednio powiązać z powyższymi uszkodzeniami i zmianami geometrii wewnętrznej powierzchni rurociągu.

W przypadku rury stalowej z wewnętrzną wykładką kompozytową typu PUGA nie stwierdzono ubytków materiału wykładki ani oznak jej zarastania. Średnica wewnętrzna rury oraz parametry chropowatości powierzchni wewnętrznej pozostały na poziomie zbliżonym do wartości początkowych, zmierzonych po pierwszym uruchomieniu instalacji. Nie zaobserwowano również odspojenia wykładki od podłoża stalowego, jak również uszkodzeń mechanicznych w postaci pęknięć, naderwań czy lokalnych deformacji powierzchni.

Na rysunku 13 przedstawiono zdemonutowane z pracującej instalacji fragmenty rurociągów, w których również nie zauważono negatywnego wpływu czynników eksploatacyjnych. Potwierdza to wysoką trwałość powłoki PUGA oraz jej skuteczność jako zabezpieczenia wewnętrznej powierzchni elementów instalacji transportowych przed zużyciem i korozją. Rury do przeglądu okresowego zostały zdemonutowane podczas przestoju instalacji. Ze względu na brak zgody inwestora nie zostały podane parametry pracy oraz czas eksploatacji, natomiast uzyskano informację, że aktualnie osiągnięto czas użytkowania około 3÷5 krotnie dłuższy (w zależności od instalacji) niż żywotność rur ze stali trudnościeralnych, z których instalacja była wykonana przed przebudową – wymianą zużytych rur ze stali trudnościeralnych.



Rys. 13. Widok zdemonutowanych rur z wykładkami z pracującej instalacji transportu hydraulicznego

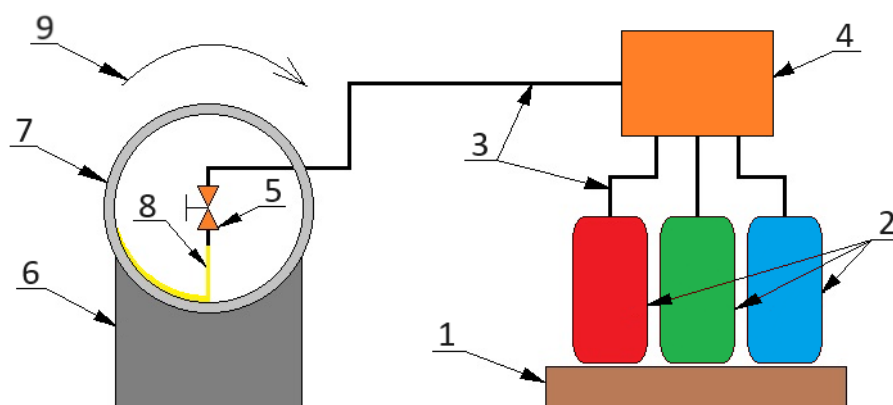
5.5.1. Sposób łączenia powłoki kompozytowej z rurami stalowymi

Niezwykle istotnym aspektem decydującym o trwałości i niezawodności elementów instalacji transportowych jest sposób nakładania oraz łączenia powłoki kompozytowej z rurami stalowymi. Kluczowym rezultatem tego procesu jest uzyskanie produktu wysokiej jakości, spełniającego wymagania użytkowe i eksploatacyjne, który będzie pracować niezawodnie przez zakładany okres żywotności.

Proces nakładania wykładki kompozytowej realizowany jest zgodnie z procedurami technologicznymi opracowanymi przez producenta. Na jakość końcowego wyrobu wpływa zarówno jakość zastosowanych materiałów wsadowych, jak i właściwe przeprowadzenie poszczególnych etapów procesu. Obejmuje to m.in. wytworzenie materiału kompozytowego PUGA, dostosowanie powierzchni rur stalowych do aplikacji, kontrolowaną aplikację kompozytu, jego formowanie, a także czynności pomocnicze, w tym transport i manipulację elementami w trakcie produkcji.

W opisywanym produkcie, jako element konstrukcyjny nośny, stosuje się klasyczne rury ze stali węglowej gatunku P235, P265 lub P355. Są to materiały powszechnie dostępne i relatywnie tanie w porównaniu do stali trudnościeralnych, co czyni je ekonomicznie uzasadnionym wyborem dla zastosowań przemysłowych. Od rur wykorzystywanych jako wsad do produkcji rur z wykładkami kompozytowymi wymaga się jednak spełnienia określonych wymagań wymiarowych, w szczególności w zakresie średnicy oraz owalizacji. Choć tolerancje hutnicze są zazwyczaj stosunkowo szerokie, producent nakłada bardziej rygorystyczne kryteria z uwagi na konieczność zapewnienia dokładności grubości nakładanej powłoki oraz precyzji spasowania wyrobów podczas montażu. W przypadku niespełnienia wymagań wymiarowych, rura musi zostać poddana korekcie lub wyeliminowana z procesu produkcyjnego. Jeśli natomiast spełnia wymagania jakościowe, przed nałożeniem powłoki konieczne jest odpowiednie przygotowanie jej powierzchni. Rury poddawane są obróbce strumieniowo-ścierniej do stopnia czystości Sa 2½ zgodnie z normą PN ISO 8501-1, zarówno od strony wewnętrznej, jak i zewnętrznej. Zabieg ten ma na celu zapewnienie odpowiedniej przyczepności powłoki do podłoża. Nakładanie warstwy kompozytowej powinno zostać rozpoczęte nie później niż 24 godziny po zakończeniu procesu obróbki strumieniowo-ścierniej, pod warunkiem pozytywnej oceny jej skuteczności. Wymagane jest również spełnienie dodatkowych kryteriów czystości powierzchni – w szczególności usunięcie tłuszczów, pozostałości ścierniwa oraz pyłu.

Materiał wykładki stosowanej w rurach kompozytowych stanowi kompozyt na bazie poliuretanu, którego skład obejmuje szereg precyzyjnie dobranych komponentów. W zależności od rodzaju transportowanego medium, dobierana jest odpowiednia receptura mieszanki materiału powłokowego, optymalnie dostosowana do specyficznych wymagań klienta oraz warunków eksploatacji. Składniki kompozytu dostarczane są do wytwórcy w oddzielnych opakowaniach, najczęściej w beczkach lub kanistrach. Przed ich połączeniem każdy składnik jest podgrzewany do odpowiedniej temperatury, co umożliwia ich płynny transport do urządzenia mieszającego. Otrzymana mieszanka w stanie ciekłym jest następnie kierowana do strefy aplikacji, gdzie nakładana jest na wewnętrzną powierzchnię przygotowanej rury. Schemat stanowiska roboczego służącego do aplikacji wykładki kompozytowej przedstawiono na rysunku 14 [43, 49÷52].



Rys. 14. Schemat stanowiska do produkcji rur stalowych z wykładką kompozytową: 1 – stanowisko do podgrzewania składników kompozytu; 2 – pojemniki ze składnikami kompozytu, 3 – rurociągowy system transportu składników kompozytu i gotowej mieszanki kompozytu, 4 – układ urządzeń mieszających, 5 – układ dozujący mieszankę kompozytową, 6 – obrotnik, 7 – rura stalowa, 8 – mieszanka kompozytowa, 9 – kierunek obrotu rury

Mieszanka kompozytowa podczas aplikacji jest podgrzewana i nakładana w stanie ciekłym. Transportowana jest systemem przewodów rurowych do wnętrza przygotowanej stalowej rury, która znajduje się w obrotniku i wiruje z odpowiednio dobraną prędkością. Dzięki ruchowi obrotowemu, ciekły kompozyt równomiernie rozprowadza się po wewnętrznej powierzchni rury, co umożliwia uzyskanie wysokiej precyzji wykonania, w szczególności idealnej owalności średnicy wewnętrznej. Do momentu całkowitego

utwardzenia materiału, układ rura–kompozyt pozostaje w ruchu obrotowym. Po zakończeniu procesu utwardzania, rura z wykładką jest transportowana na kolejne stanowisko technologiczne, gdzie aplikowane są zewnętrzne powłoki antykorozyjne, zazwyczaj metodą natryskową. Gotowy wyrób poddawany jest szczegółowej kontroli jakości. Powłoka wewnętrzna nie powinna wykazywać żadnych nieciągłości, pęcherzy, rozwarstwień ani pofałdowań. Wymagana jest jednorodna, gładka i spójna struktura, zapewniająca odpowiednią przyczepność do materiału podłoża, tj. rury stalowej. Widok gotowej rury stalowej z wewnętrzną wykładką kompozytową przedstawiono na rysunku 15 [43, 49÷52].



Rys. 15. Widok gotowej rury stalowej z wykładką kompozytową [43]

6. Sposoby łączenia rur w systemach transportu pneumatycznego i hydraulicznego zawierającego wykładki kompozytowe

W przemyśle ciężkim, w systemach transportu pneumatycznego i hydraulicznego, najczęściej spotykane są następujące sposoby łączenia rur:

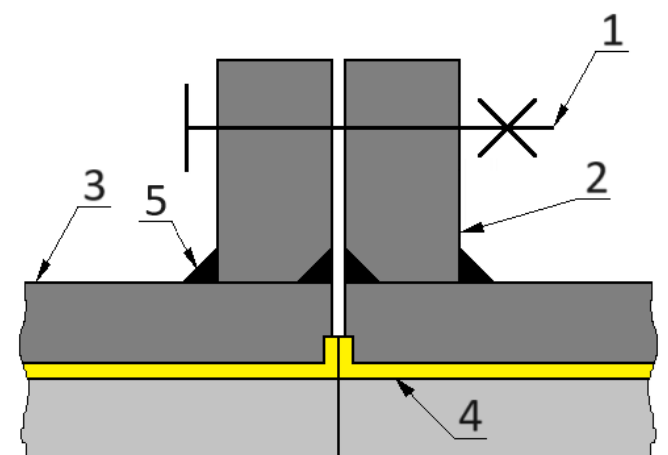
- połączenie kołnierzowe,
- połączenia z wykorzystaniem obejm,
- połączenia poprzez spawanie elementów pośrednich, takich jak pierścienie i tuleje.

6.1. Połączenia kołnierzowe

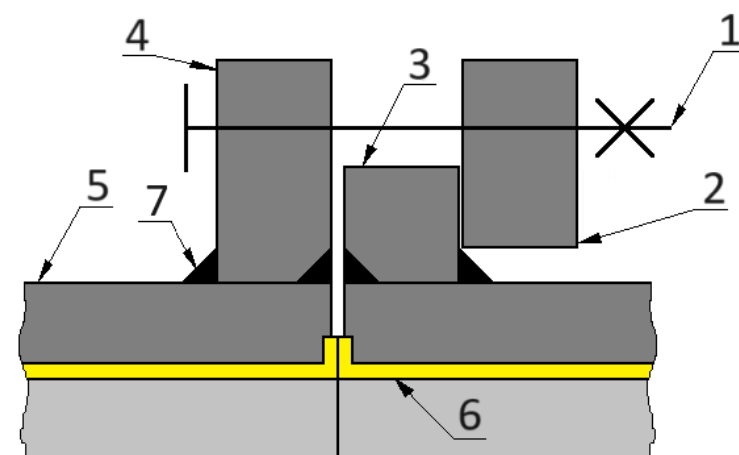
Połączenia kołnierzowe stanowią jeden z najczęściej stosowanych typów połączeń w konstrukcjach rurociągowych. Ich główną zaletą jest łatwość montażu oraz ewentualnego demontażu, co ma istotne znaczenie podczas prac diagnostycznych lub konieczności wymiany fragmentu instalacji. Ze względu na warunki pracy, takie jak ciśnienie robocze i temperatura transportowanych substancji, stosuje się różne typy kołnierzy i uszczelek. Prawidłowo zaprojektowane połączenie powinno zapewniać szczelność instalacji przez cały okres eksploatacji. Podczas projektowania śrubowych połączeń kołnierzowych należy właściwie dobrać typ uszczelnienia, uwzględniając rodzaj medium oraz jego temperaturę. W zależności od ciśnienia roboczego dobiera się odpowiedni typ kołnierza, liczbę oraz rozmiar śrub. Konieczne jest także określenie odpowiedniego naciągu montażowego śrub z uwzględnieniem ewentualnego pełzania uszczelki w warunkach eksploatacyjnych. Potwierdzeniem prawidłowego zaprojektowania połączenia kołnierzowego są obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzane zarówno dla warunków montażowych, jak i eksploatacyjnych [53÷55]. W przypadku rurociągów stalowych lub stalowych z wykładkami kompozytowymi najczęściej stosuje się następujące typy kołnierzy:

- kołnierze płaskie do przyspawania (rys. 16),
- kołnierze płaskie luźne do przyspawania (stosowane w parze z kołnierzami płaskimi do przyspawania – rys. 17),
- kołnierze z szyjką do przyspawania (rys. 18).

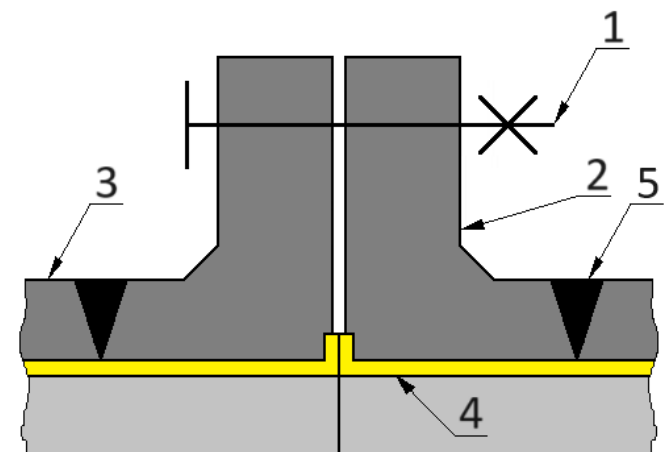
W większości przypadków elementy te wykonywane są zgodnie z normą PN-EN 1092-1, jednak w razie potrzeb dopuszczalne jest również wykonanie kołnierzy na podstawie indywidualnych projektów.



Rys. 16. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzewego z przyspawanymi kołnierzami płaskimi; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz spawany, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna



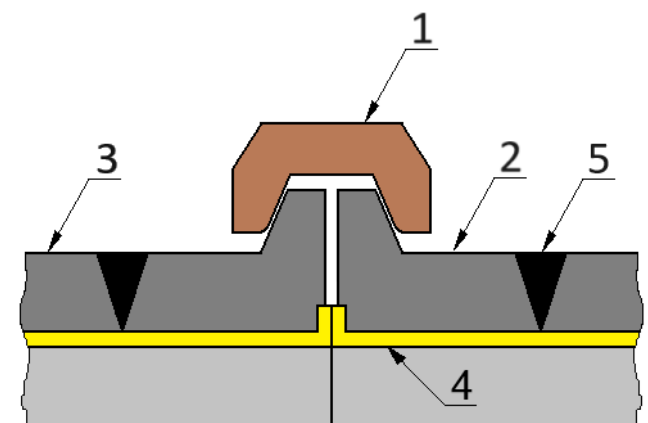
Rys. 17. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzewego z przyspawanym kołnierzem płaskim oraz luźnym; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz luźny, 3 – pierścień spawany, 4 – kołnierz spawany, 5 – rura stalowa, 6 – wykładka, 7 – spoina fabryczna



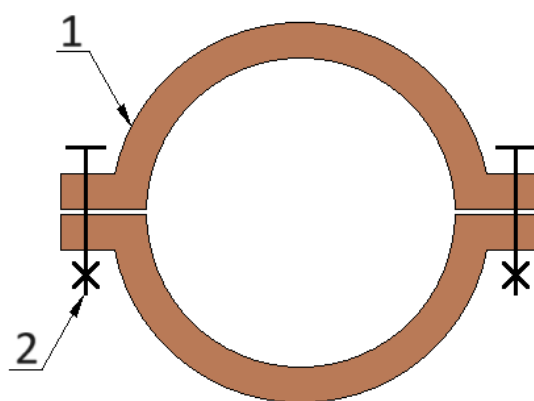
Rys. 18. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzowego z przyspawanymi kołnierzami szyjkowymi; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz szyjkowy, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna

6.2. Połączenia na obejmy

Złącza na obejmy stanowią atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych połączeń kołnierzowych w systemach rurociągowych. W porównaniu z połączeniami kołnierzowymi wyróżniają się znacząco mniejszą masą oraz większą łatwością dokręcania. Dodatkowym atutem tego typu połączeń jest niewielka ilość miejsca potrzebna do ich montażu, co czyni je szczególnie przydatnymi w trudno dostępnych przestrzeniach. Złącza na obejmy składają się zazwyczaj z dwóch stożkowych obszarów piast, przyspawanych do końców rur. Elementy te są następnie łączone za pomocą dwuczęściowej obejmy, pełniącej funkcję zacisku. W trakcie skręcania części obejmy, stożkowe powierzchnie piast są dociskane do siebie, co umożliwia uzyskanie trwałego i szczelnego połączenia. Szczelność złącza zapewnia system uszczelniający, umieszczony pomiędzy zaciskanymi powierzchniami. Dobór odpowiedniego typu uszczelnienia zależy od warunków eksploatacji, takich jak ciśnienie, temperatura oraz rodzaj transportowanego medium [56, 57]. Rozwiązania konstrukcyjne połączeń wykonywanych z zastosowaniem obejm zostały przedstawione na rysunkach 19 i 20.

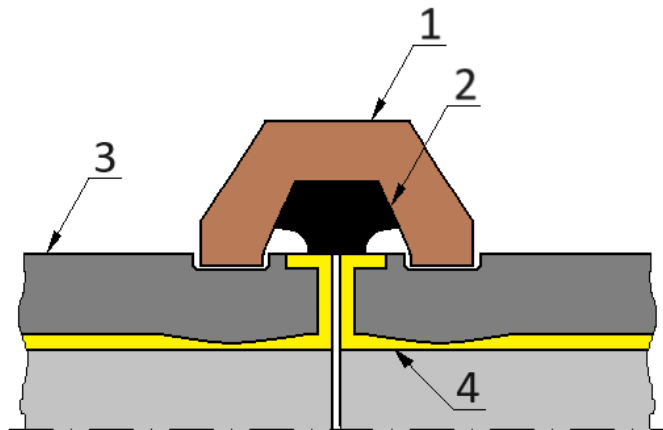


Rys. 19. Schemat połączenia na obejmy [por. 55]: 1 – obejma, 2 – piasta, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna

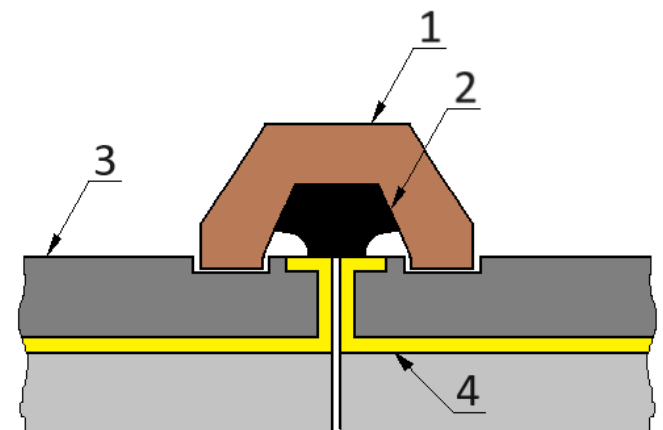


Rys. 20. Widok schematu obejmy montowanej na rurach stalowych z wykładkami kompozytowymi [por. 55]: 1 – obejma, 2 – połączenie śrubowe

Odmianą złącza na obejmy jest metoda łączenia rur rowkowanych poprzez proces walcowania lub poprzez skrawanie. Metoda stosowana jest zarówno dla stali węglowych, stali nierdzewnych, aluminium, miedzi, niklu miedziowanego i PCV [58]. Przykład połączenia na obejmy rur stalowych z wykładkami kompozytowymi z rowkami walcowanymi został przedstawiony na rysunku 21, natomiast z rowkami skrawanymi na rysunku 22.



Rys. 21. Schemat obejmy montowanej na rowkowanych walcowaniem rurach stalowych: 1 – obejma, 2 – uszczelka, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka

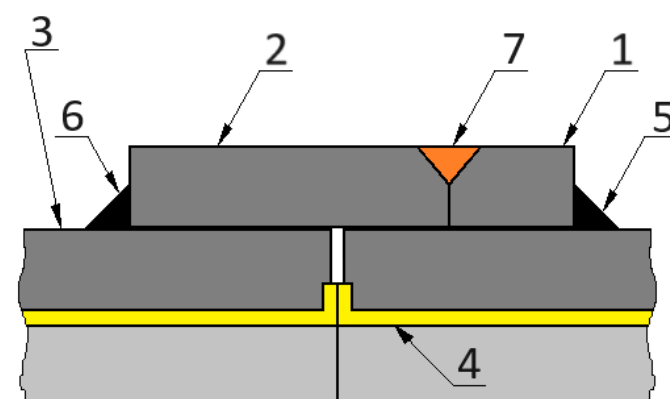


Rys. 22. Schemat obejmy montowanej na rowkowanych skrawaniem rurach stalowych: 1 – obejma, 2 – uszczelka, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka

6.3. Połączenia poprzez spawanie elementów pośrednich rur typu pierścieni i tuleja

Spawanie elementów pośrednich typu pierścieni i tuleja w rurociągach stalowych z wykładkami kompozytowymi umożliwia wykonanie trwałego i nierozłącznego połączenia spawanego, realizowanego bezpośrednio na montażu, pomiędzy tuleją jednej rury a pierścieniem drugiej. Elementy te (tuleja i pierścień) są przyspawane do końców rur na etapie prefabrykacji, czyli przed aplikacją wykładek wewnętrznych. Dzięki temu podczas finalnego spawania na budowie nie dochodzi do uszkodzenia materiału wykładki, co stanowi jedną z najważniejszych zalet tego rozwiązania. Szczelność połączenia zapewniana jest

przez wstępny docisk wykładek lub zastosowanie odpowiednich uszczelek na styku łączonych rur. Odpowiednie przygotowanie powierzchni oraz kontrola osiowości i docisku są kluczowe dla zachowania szczelności oraz trwałości złącza. Schemat połączenia spawanego z użyciem elementów pośrednich przedstawiono na rysunku 23.

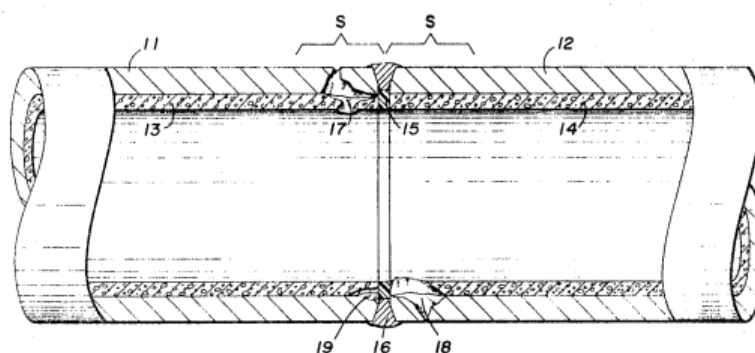


Rys. 23. Schemat połączenia spawanego elementów pośrednich rur typu pierścień i tuleja; 1 – pierścień, 2 – tuleja, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna pierścienia, 6 – spoina fabryczna tulei, 7 – spoina montażowa

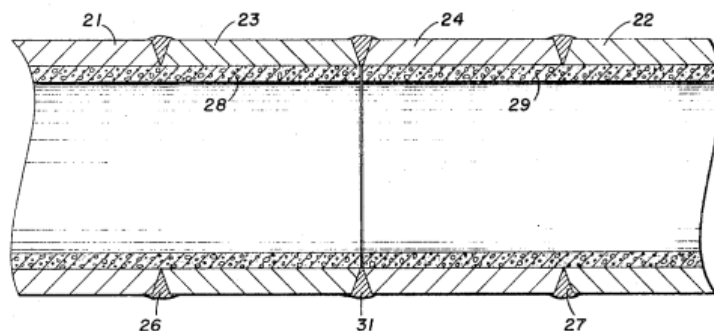
7. Teza i cel pracy

Przedstawiona charakterystyka rurociągów stosowanych do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego, z uwzględnieniem odporności na korozję, potwierdza istnienie wielu czynników wpływających na dobór zarówno materiałów na rurociągi, technologii ich wytwarzania, jak i sposobów ich łączenia. W praktyce przemysłowej najczęściej stosuje się połączenia rozłączne, jednak w niektórych przypadkach konieczne jest zastosowanie połączeń nierozłącznych. W przypadku nowoczesnych materiałów kompozytowych uzyskanie połączeń nierozłącznych metodą spawania jest niezwykle trudne lub wręcz niemożliwe. Dla rurociągów stalowych z kompozytowymi wykładkami typu PUGA dotychczas stosowano rozwiązanie pośrednie, polegające na wykonaniu dodatkowych tulei i pierścieni już na etapie prefabrykacji. Elementy te są następnie spawane ze sobą w miejscu montażu, co pozwala uniknąć spawania samych rur. Szczegóły tego rozwiązania opisano w punkcie 6.3. Zastosowanie takiej metody wiąże się jednak ze zwiększeniem kosztów produkcji, zarówno ze względu na większe zużycie materiału na tuleje i pierścienie, jak i konieczność wykonania dwóch dodatkowych spoin fabrycznych przed aplikacją wykładek na rury.

W dostępnej literaturze nie znaleziono informacji o badaniach ani działaniach zmierzających do opracowania rozwiązania polegającego na doczołowym spawaniu rur stalowych z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi, przeznaczonych do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego mediów powodujących intensywne ścieranie oraz korozję. Jedynym dokumentem poruszającym zagadnienie spawania rur stalowych z wykładkami jest amerykański patent nr 3,467,410 z 1969 roku, dotyczący spawania rur ze stali węglowej pokrytych wykładką, na przykład cementową, stosowanych w przemyśle wydobywczym, gdzie wymagana jest wysoka odporność korozyjna. Zgodnie z opisem patentowym, spawanie rur stalowych pokrytych wykładką cementową lub inną powodowało uszkodzenie materiału wykładki, co prowadziło do penetracji agresywnego medium w rejon spoin, a w konsekwencji do uszkodzeń zarówno rur, jak i samych spoin już w początkowym okresie eksploatacji – nierzadko w ciągu miesiąca od uruchomienia instalacji. Schemat uszkodzeń przedstawiono na rysunku 24. Istotą opatentowanego rozwiązania było zastąpienie fragmentu rur ze stali węglowej rurami wykonanymi ze stali nierdzewnej, dzięki czemu – nawet w przypadku uszkodzenia wykładki – rurociąg nadal zachowywał odporność na korozję, co przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 24. Widok uszkodzeń rurociągu stalowego z wykładką cementową w rejonie połączenia spawanego: 11, 12 – rury ze stali węglowej, 13, 14 – wykładki cementowe, 15 – uszczelka, 16 – spoina, s – strefa uszkodzenia wykładek po spawaniu [59]



Rys. 25. Widok przedstawiający rozwiązanie patentowe z 1969 roku: 21, 22 – rury ze stali węglowej, 23, 24 – fragmenty rur ze stali nierdzewnej, 26, 27 – spoiny, 28, 29 – wykładki cementowe, 31 – spoina ze stali nierdzewnej [59]

Rozwiązanie to zakłada jednak możliwość uszkodzenia wykładki, co w przypadku obecności medium o właściwościach ściernych prowadzi do degradacji stalowego materiału rur. Zastosowanie dodatkowych odcinków rur wykonanych ze stali nierdzewnej wiąże się ponadto z dodatkowymi kosztami, zarówno w zakresie samego materiału rur, jak i materiałów dodatkowych potrzebnych do ich spawania. Dodatkowym obciążeniem jest konieczność wykonania dwóch spoin fabrycznych łączących rury ze stali węglowej z rurami ze stali nierdzewnej.

W przypadku rur stalowych z trudnościeralnymi, odpornymi na korozję wykładkami kompozytowymi, od producentów oczekuje się obniżenia kosztów systemów rurociągowych, zarówno w zakresie kosztów produkcji rur, jak i ich montażu, przy jednoczesnym zachowaniu co najmniej takich właściwości użytkowych, jakie zapewniają obecnie stosowane rozwiązania. Ze względu na specyficzne właściwości materiałów wykładzin kompozytowych, dotychczas nie opracowano skutecznej metody doczołowego spawania rur z tego typu wykładkami na etapie montażu.

Jako tezę pracy przyjęto:

Opracowanie odpowiedniego sposobu wytwarzania oraz spawania montażowego rur ze stali węglowej, wyposażonych w wewnętrzne powłoki z trudnościeralnych, odpornych na korozję wykładek kompozytowych, może stanowić innowacyjne rozwiązanie pozwalające na redukcję kosztów produkcji i montażu systemów rurociągowych. Proponowana technologia może zostać skutecznie wdrożona jako zamiennik dotychczasowych rozwiązań,

zarówno w instalacjach wyeksploatowanych, szybkozużywających się, jak i w nowych systemach rurociągowych.

Podjęta praca ma charakter zarówno użytkowy, jak i poznawczy. Celem praktycznym jest opracowanie sposobu wytwarzania rur oraz ocena przydatności różnych procesów spawania do łączenia rur z wykładkami w miejscu ich docelowego montażu. Doświadczenia zdobyte w trakcie realizacji pracy pozwolą na opracowanie właściwej technologii spawania rur z kompozytowymi wykładkami.

Celem naukowym pracy jest szczegółowa analiza wpływu parametrów oraz warunków prowadzenia procesu spawania rur stalowych z wewnętrznymi wykładkami kompozytowymi na możliwość uzyskania trwałego i szczelnego połączenia spawanego, spełniającego wymagania eksploatacyjne i technologiczne. Badania obejmą ocenę oddziaływania wysokiej temperatury oraz stref wpływu ciepła na strukturę materiałów kompozytowych oraz ich adhezję do podłoża stalowego, a także możliwość zachowania ciągłości, szczelności wykładek w obszarze połączenia typu wykładka–wykładka. Analizowany będzie również wpływ zastosowanych materiałów dodatkowych, technologii przygotowania krawędzi, sposobu prowadzenia spoiny oraz chłodzenia na integralność układu stal–kompozyt. Celem jest wypracowanie takiej konfiguracji technologicznej, która umożliwi uzyskanie połączeń spełniających wymagania normowe w zakresie wytrzymałości mechanicznej oraz szczelności. Ostatecznym efektem będzie zdefiniowanie kryteriów technologicznych umożliwiających praktyczne zastosowanie tej metody w warunkach przemysłowych.

8. Metodyka badań

W ramach realizacji pracy badawczej planowane było przeprowadzenie prób technologicznych spawania blach oraz rur ze stali węglowej bez wykładek kompozytowych, w celu określenia zakresów temperatur występujących podczas spawania, zarówno po stronie grani, jak i lica, oraz określenia czasów nagrzewania i chłodzenia w wymaganych przedziałach temperaturowych. Ze względu na możliwość porównywania wyników do rejestracji temperatury nagrzewania i chłodzenia każdorazowo wykorzystano urządzenie Agilent 39470A. Po stronie grani instalowano termopary typu K (NiCr-Ni), Klasy 1, zgodnie z normą PN-EN 60584-1. Termopary miały wymiary $2 \times 0,20$ mm oraz izolację typu GLGL (włókno szklane/włókno szklane).

Pierwszym etapem było opracowanie koncepcji przygotowania złączy do spawania oraz wybór najbardziej obiecujących rozwiązań technologicznych, które zostały poddane badaniom. Próby zostały przeprowadzone dla różnych: procesów spawania, grubości blach, średnic i grubości ścianek rur oraz sposobów przygotowania krawędzi złączy do spawania.

Po wykonaniu prób spawalniczych przewidziane było przeprowadzenie badań nieniszczących (NDT) złączy spawanych. Obejmowały one obligatoryjnie badania wizualne (VT), a w zależności od potrzeb również badania magnetyczno – proszkowe (MT) i/lub penetracyjne (PT), a w wybranych przypadkach także badania ultradźwiękowe (UT) lub radiograficzne (RT). Jako kryterium odbioru założono uzyskanie poziomu jakości B wg normy PN-EN ISO 5817 dla złączy spawanych łukowymi metodami spawania oraz poziomu jakości B wg normy PN-EN ISO13919-1 dla złączy spawanych wiązką promieniowania laserowego. Po zakończeniu etapu badań nieniszczących zostały przeprowadzone badania niszczące (DT), obejmujące: badania makroskopowe i mikroskopowe (w celu oceny jakości złączy i struktury materiałów), pomiary twardości w strefach spoiny i wpływu ciepła (SWC), badania wytrzymałościowe (np. pomiary twardości, próby rozciągania), zależnie od potrzeb i wymagań w zakresie zgodnym z procedurami klienta.

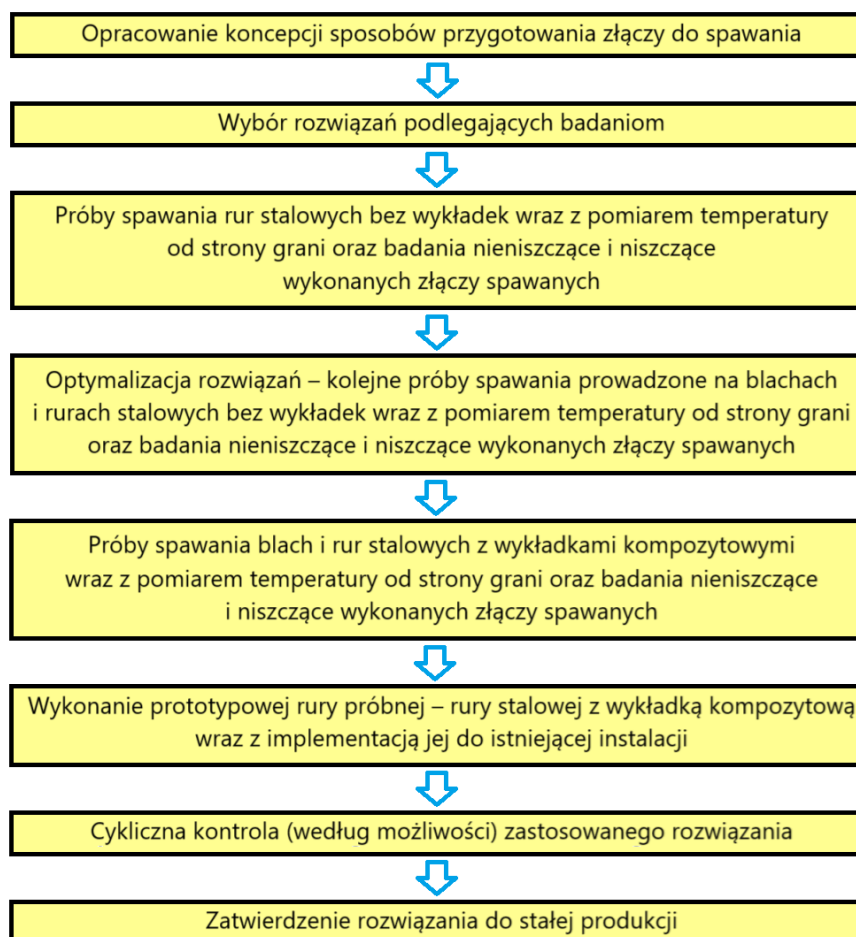
Ze względu na możliwość porównania wyników badań w całej pracy użyto tych samych urządzeń pomiarowych, jedynie dla pierwszych badań zastosowano inne mikroskopy (punkt 11). Obserwacje makroskopowe były przeprowadzane na mikroskopie stereoskopowym Olympus SZX9, obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym Nikon Eclipse MA100. Próbkę do badań były trawione 4% Nitalem. Pomiary twardości zostały przeprowadzone przy obciążeniu HV1 przy użyciu twardościomierza Mikro-Vickers 401 MVD firmy Wilson Wolpert. Wybór tego obciążenia wynikał z ograniczeń aparaturowych dostępnych w laboratoriach jednostki, w której realizowano badania. Należy podkreślić, że zastosowanie obciążenia HV1 umożliwia uzyskanie miarodajnych i powtarzalnych wyników w zakresie mikrotwardości, pozwalając jednocześnie na ocenę charakterystycznych cech strukturalnych badanego materiału.

Na podstawie wyników prób wstępnych oraz ich optymalizacji zostały wykonane próby spawania blach i rur z zastosowaniem wykładek kompozytowych, z wykorzystaniem wcześniej zweryfikowanej technologii. Dla tych złączy ponownie zostały przeprowadzone analogiczne badania nieniszczące i niszczące, w celu oceny poprawności wykonania połączeń oraz skuteczności zaproponowanego rozwiązania, jak również identyfikacji ewentualnych obszarów wymagających optymalizacji technologii. Badania przyczepności powłoki do blach

stalowych metodą pull-off były przeprowadzone przy użyciu urządzenia Positest AT-A firmy DeFelsko. Ze względu na możliwości metody badawczej, badania przyczepności były możliwe do wykonania wyłącznie na wyrobach płaskich, tj. blachach z wykładkami. Wszystkie prace badawcze były realizowane zgodnie z obowiązującymi normami, wymaganiami wewnętrznymi producenta rur z wykładkami kompozytowymi oraz wymaganiami końcowego użytkownika systemów rurowych.

Po pozytywnej weryfikacji rozwiązań w warunkach laboratoryjnych zaplanowano zainstalowanie rury testowej w rzeczywistej instalacji przemysłowej – w ramach istniejącej infrastruktury transportu rurowego. Rozwiązanie testowane było w warunkach eksploatacyjnych, z okresową kontrolą stanu połączenia od strony wewnętrznej rur, w zakresie zgodnym z procedurami klienta.

Schemat metodyki badań został przedstawiony na rysunku 26.

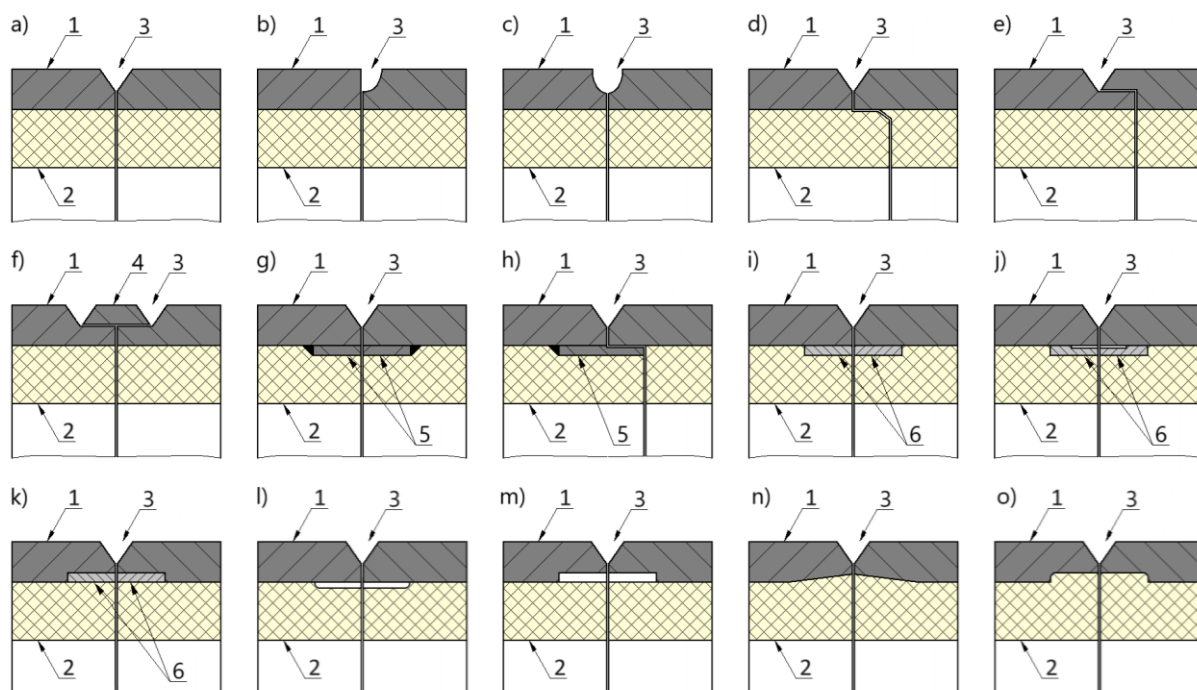


Rys. 26. Schemat metodyki badań

9. Koncepcje rozwiązań

W ramach przygotowań do badań opracowano koncepcje sposobów przygotowania złączy do spawania rur stalowych z wewnętrznymi wykładkami kompozytowymi. Opracowane warianty uwzględniają geometrię fragmentów rur w obszarze planowanego połączenia montażowego wykonanego metodą spawania łukowego. Łącznie zaprojektowano 15 rozwiązań koncepcyjnych, oznaczonych literami od „a” do „o”, które różnią się między sobą sposobem przygotowania krawędzi rur, geometrią wykledek oraz potencjalnymi możliwościami zastosowania różnych metod spawania. Koncepcje te zostały przedstawione graficznie na rysunkach rysunku 27a÷o, natomiast ich szczegółowa ocena porównawcza – z uwzględnieniem kryteriów technicznych i użytkowych – została zawarta w tabeli 2.

Stosując powyższą analizę, do badań przyjęto dwa typy próbek: „a” oraz „g”.



Rys. 27. Koncepcje sposobów przygotowania złączy do spawania o numerach od „a” do „o”,
1 – rura stalowa, 2 – wykładka, 3 – sposób przygotowania do spawania, 4 – pierścień stalowy,
5 – podkładka stała stalowa do spawania, 6 – podkładka ceramiczna

Tab. 2. Ocena całościowa rozwiązań koncepcyjnych sposobów przygotowania do spawania

Nr koncepcji	Złożoność wykonania - prefabrykacja	Cena wykonania prefabrykacji	Warunki technologiczne podczas montażu do spawania	Uwagi	Zasadność rozwiązania	Ocena całościowa
a	Łatwa	Niska	Łatwy montaż	Najtańsze rozwiązanie	Wysoka	Rozwiązanie przyjęto do badań
b	Łatwa	Niska	Łatwy montaż, wyłącznie w jednej pozycji	Rura fazowana z jednej strony, na montażu możliwość scalania wyłącznie w jednej pozycji	Średnia	Rozwiązanie odrzucono
c	Łatwa	Niska	Łatwy montaż	Rozwiązanie dla grubości spoin powyżej 10 mm. Przygotowanie bardziej pracochłonne na prefabrykacji, natomiast bardziej ekonomiczne na montażu	Wysoka	Rozwiązanie możliwe do przyjęcia po pozytywnych badaniach dla koncepcji "a"
d	Trudna	Wysoka	Utrudniony montaż	Brak spójności wysuniętej wykładki z rurą w którą jest wsuwana, duże prawdopodobieństwo uszkodzenia podczas eksploatacji	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
e	Trudna	Wysoka	Utrudniony montaż	Rozwiązanie podobne jak dla koncepcji "a", natomiast dużo bardziej złożone i kosztowne	Średnia	Rozwiązanie możliwe do przyjęcia po pozytywnych badaniach dla koncepcji "a"
f	Trudna	Bardzo wysoka	Trudny montaż, dodatkowy element do montażu, dodatkowa spoina montażowa	Ekonomicznie i technologicznie niezasadne rozwiązanie	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
g	Średnia	Średnia	Łatwy montaż	Zmniejszona grubość wykładki kompozytowej, lepsze	Średnia	Rozwiązanie przyjęto do badań

				odprowadzanie ciepła podczas spawania		
h	Średnia	Bardzo wysoka	Utrudniony montaż	Zmniejszona grubość wykładki kompozytowej, lepsze odprowadzanie ciepła podczas spawania	Średnia	Rozwiązanie możliwe do przyjęcia po pozytywnych badaniach dla koncepcji "g"
i	Trudna	Bardzo wysoka	N/D, patrz: Uwagi	Brak możliwości scalenia podkładki ceramicznej do rury stalowej oraz brak przyczepności wykładki kompozytowej do podkładki ceramicznej	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
j	Trudna	Bardzo wysoka	N/D, patrz: Uwagi	Brak możliwości scalenia podkładki ceramicznej do rury stalowej oraz brak przyczepności wykładki kompozytowej do podkładki ceramicznej	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
k	Trudna	Bardzo wysoka	N/D, patrz: Uwagi	Brak możliwości scalenia podkładki ceramicznej do rury stalowej oraz brak przyczepności wykładki kompozytowej do podkładki ceramicznej	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
l	Trudna	Wysoka	N/D, patrz: Uwagi	Brak spójności wykładek z materiałem rury, duże prawdopodobieństwo uszkodzenia podczas eksploatacji	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono

m	Trudna	Wysoka	N/D, patrz: Uwagi	Brak spójności wykładek z materiałem rury, duże prawdopodobieństwa uszkodzenia podczas eksploatacji	Brak zasadności	Rozwiązanie odrzucono
n	Łatwa	Średnia	Łatwy montaż	Obniżenie grubości ścianki rury kosztem zwiększenia grubości wykładki, większy wpływ ciepła podczas spawania na wykładkę - większa możliwość uszkodzenia wykładki	Średnia	Rozwiązanie odrzucono
o	Łatwa	Średnia	Łatwy montaż	Obniżenie grubości ścianki rury kosztem zwiększenia grubości wykładki, większy wpływ ciepła podczas spawania na wykładkę - większa możliwość uszkodzenia wykładki	Średnia	Rozwiązanie odrzucono

10. Wybór rozwiązań podlegającym badaniom

Po zatwierdzeniu dwóch koncepcji sposobów przygotowania próbek do spawania dokonano ich uszczegółowienia, precyzując geometrię przygotowania krawędzi rur oraz nadając próbkom rzeczywiste wymiary. Próbki zostały przygotowane w taki sposób, aby możliwe było określenie oraz porównanie wpływu wybranych czynników podczas procesu spawania, takich jak:

- grubość ścianki rury,
- średnica rury,
- zastosowanie dodatkowej stałej podkładki stalowej.

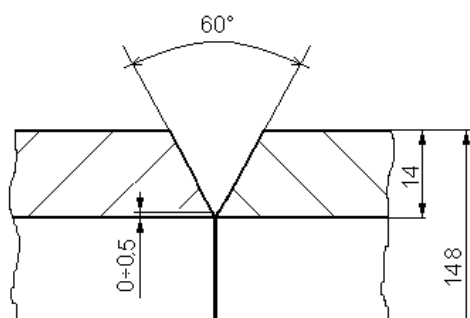
Do pierwszych badań zastosowano dwa typy próbek:

- I. Rury stalowe gatunku P355 o średnicy $D = 148$ mm i grubości ścianki $t = 14$ mm, przygotowane do spawania zgodnie z rysunkiem 28. Dla lepszego odprowadzania ciepła

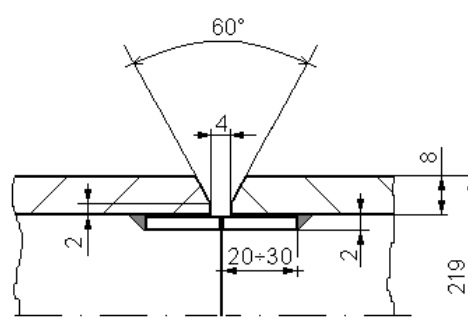
podczas spawania celowo zastosowano rury o większej grubości ścianki niż wymagała tego faktyczna grubość obliczeniowa dla docelowego rurociągu. W tym rozwiązaniu nie zastosowano szczeliny spawalniczej, ponieważ jej obecność mogłaby mieć destrukcyjny wpływ na kompozytowe wykładki wewnętrzne rur. Przyjęto minimalny próg spawalniczy, aby określić możliwie maksymalny zakres temperatur oraz czas nagrzewania i chłodzenia podczas spawania. Kąt ukosowania krawędzi wynosił 60° .

II. Rury stalowe gatunku P355 o średnicy $D = 219$ mm i grubości ścianki $t = 8$ mm z zastosowaniem stałych podkładek stalowych wykonanych z tego samego materiału co rury, o grubości $t_1 = 2$ mm. Podkładki zostały przymocowane do rury punktowymi spoinami pachwinowymi w odstępach 40–60 mm, zgodnie z rysunkiem 29. W tym przypadku zastosowano rury o docelowej grubości ścianki oraz szczelinę spawalniczą o szerokości 4 mm. Buforem oddzielającym łuk spawalniczy od wykładki była stalowa podkładka. Wysokość progu wynosiła 2 mm, a kąt ukosowania krawędzi – 60° .

Celowo dobrano różne grubości ścianek oraz średnice rur, aby porównać wpływ zasięgu ciepła generowanego na przeciwległej stronie spawania oraz jego odprowadzania. Dla rozwiązania „a” zastosowano większe grubości ścianek i większe średnice rur, gdzie zadaniem rur było przyjęcie i odprowadzenie ciepła spawania, natomiast w przypadku rozwiązania „g” zastosowano mniejszej grubości ścianki i mniejszej średnicy rury, gdzie głównie zadaniem podkładki stalowej było przyjęcie i odprowadzenie ciepła spawania. Próby spawania przeprowadzono na rurach, aby badanie technologii było zbliżone do warunków rzeczywistych. Wyniki badań przedstawiono w artykule [6].



Rys. 28. Sposób przygotowania rur do spawania – według rozwiązania „a”



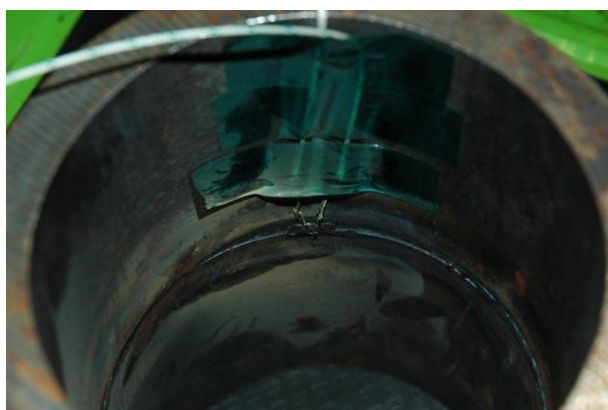
Rys. 29. Sposób przygotowania rur do spawania – według rozwiązania „g”

Ze względu na prawidłowe zamocowanie aparatury pomiarowej i właściwy jej odczyt do badań użyto rur bez wykładek. Założono, że złącze po spawaniu powinno posiadać pełen przetop.

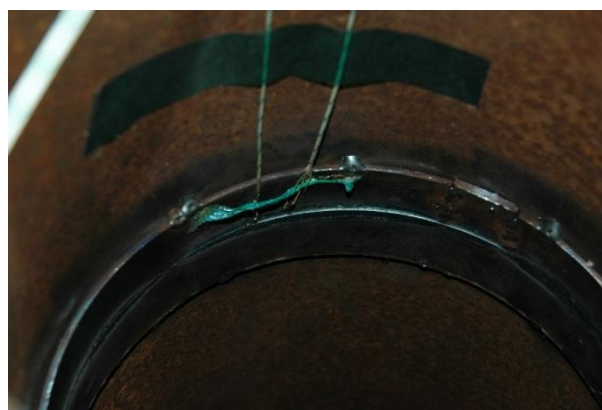
11. Spawanie rur stalowych bez wykładek

Pierwsze badanie porównawcze przeprowadzono dla jednej metody spawania łukowego w celu porównania zastosowanych rozwiązań koncepcji „a” oraz „g”.

Termopary do rejestracji temperatury nagrzewania i chłodzenia zostały zamocowane odpowiednio do rodzaju próbki: dla próbki według rozwiązania „a” – w osi spoiny od strony grani, natomiast dla próbki według rozwiązania „g” – w osi spoiny, umieszczone do podkładki stalowej po wewnętrznej stronie rury. Lokalizację termopar ilustrują rysunki 30 i 31.



Rys. 30. Sposób zainstalowania termopar na próbce według rozwiązania „a”



Rys. 31. Sposób zainstalowania termopar na próbce według rozwiązania „g”

Próby spawania przeprowadzono metodą 111 (MMA) zgodnie z normą PN-EN ISO 4063, wykorzystując urządzenie Lincoln V405-T Pulse. Spawanie odbywało się w pozycji PA zgodnie z normą PN-EN ISO 6947. Prace realizowano w temperaturze otoczenia wynoszącej 20°C, przy maksymalnej temperaturze międzyścigowej 65°C. Do spawania zastosowano elektrody otulone E 42 4 B 32 H5 według normy PN-EN ISO 2560, marki Metalweld Basoweld 50 o średnicy 3,2 mm. Spawanie przeprowadzono na podstawie wstępnych

instrukcji spawania: nr 1/pWPS dla rozwiązania „a” oraz nr 2/pWPS dla rozwiązania „g” [zał. 2÷3]. Szczegółowe parametry spawania przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tab. 3. Parametry spawania dla rozwiązania „a”

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	113÷115	21,6÷24,1	= (+)	8,1	1,45÷1,64
2	120÷122	20,9÷24,5	= (+)	11,2	1,08÷1,28
3-n	118÷122	21,4÷23,4	= (+)	7,9	1,53÷1,73

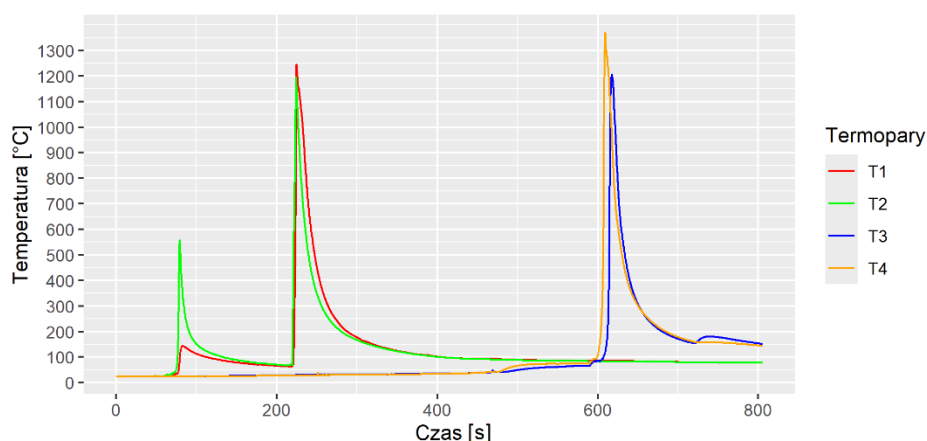
Tab. 4. Parametry spawania dla rozwiązania „g”

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	117÷121	23,2÷22,9	= (+)	11,9	1,08÷1,29
2	119÷120	22,6÷24,9	= (+)	16,4	0,79÷0,87
3	118÷121	23,1÷24,9	= (+)	11,6	1,13÷1,23

Dla materiału rur o większej grubości ścianki (rozwiązanie „a”) zastosowano wyższą energię liniową spawania, co miało na celu uzyskanie lepszego wtopienia w spawane materiały.

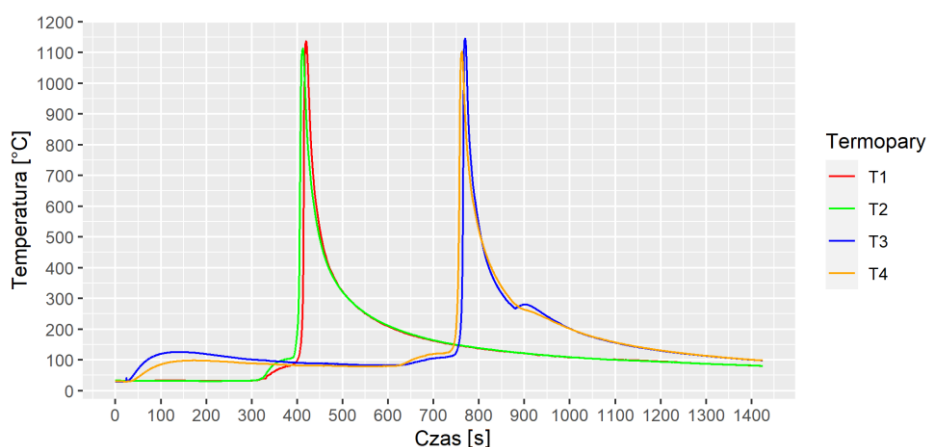
Zgodnie z informacją uzyskaną od producenta rur, firmy Takoni, wykładki ulegają uszkodzeniom w przypadku chwilowej pracy w temperaturze przekraczającej około 120°C. W związku z tym, w przeprowadzonych badaniach zakres rejestrowanych temperatur został skoncentrowany na wartościach od 110°C wzwyż [43, 48].

Dla zestawu próbek według rozwiązania „a” zarejestrowano średni czas nagrzewania wynoszący 8 s w zakresie temperatur od 110°C do wartości powyżej 1354°C. Średni czas chłodzenia do temperatury 110°C wyniósł 7 min 44 s. Wykresy cykli cieplnych spawania przedstawiono na rysunku 32. Ze względu na ograniczenia pomiarowe urządzenia oraz zastosowanych termopar, nie zarejestrowano wyższych wartości temperatury.



Rys. 32. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki rozwiązania „a”

W przypadku próbek wykonanych zgodnie z rozwiązaniem „g” średni czas nagrzewania w zakresie od 110°C do 1146°C wyniósł 21 s, natomiast średni czas chłodzenia do temperatury 110°C wyniósł 9 min 32 s. Wykresy cykli cieplnych spawania przedstawiono na rysunku 33.



Rys. 33. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki rozwiązania „g”

W obu przypadkach zaobserwowano zbyt wysokie temperatury oraz zbyt długie czasy chłodzenia, co mogłoby mieć negatywny wpływ na stan wykładki kompozytowej po procesie spawania. Należy jednak zaznaczyć, że celem przeprowadzonych badań na tym etapie było określenie i porównanie dwóch różnych koncepcji przygotowania złączy do spawania, dlatego dalsze etapy badań były kontynuowane.

Przeprowadzono badania nieniszczące złączy spawanych, obejmujące badania wizualne (VT), penetracyjne (PT) oraz magnetyczno – proszkowe (MT). Na podstawie norm PN-EN ISO 5817 oraz PN-EN ISO 6520-1 dokonano oceny wizualnej wykonanych złączy spawanych:

- w przypadku próbek wykonanych zgodnie z rozwiązaniem „a”, od strony lica i grani,
- w przypadku próbek rozwiązania „g”, wyłącznie od strony lica, z uwagi na brak bezpośredniego dostępu do grani spoiny ze względu na zastosowanie stałej podkładki stalowej.

Dla próbek według rozwiązania „a” stwierdzono występowanie niezgodności spawalniczych, takich jak braki przetopu oraz wklęsnięcia grani. Główną przyczyną tych niezgodności był brak zastosowania odpowiedniej szczeliny spawalniczej, co utrudniło wykonanie prawidłowego przetopu w obszarze grani.

W próbkach wykonanych według rozwiązania „g” nie wykryto niezgodności spawalniczych. Złącza spawane spełniały poziom jakości B.

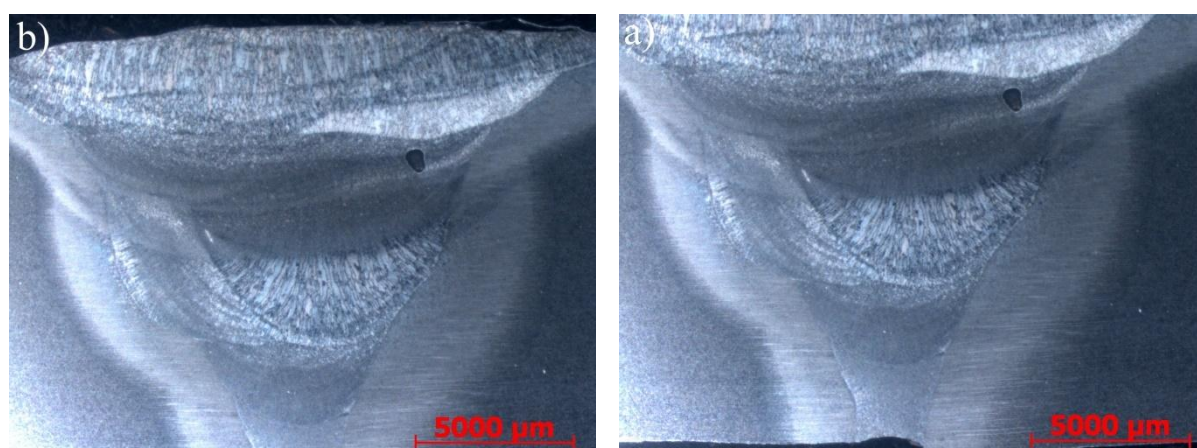
Dodatkowo przeprowadzono również badania; penetracyjne (PT) od strony lica, zgodnie z PN-EN ISO 3452-1, które zakończyły się wynikiem pozytywnym, uzyskano poziom akceptacji 2x według PN-EN ISO 23277. Przeprowadzono również badania magnetyczno – proszkowe (MT) od strony lica, zgodnie z PN-EN ISO 9934-1, które również zakończyły się wynikiem pozytywnym, uzyskano poziom akceptacji 2x według PN-EN ISO 23278.

Przeprowadzono kolejno badania niszczące, obejmujące: badania makroskopowe, mikroskopowe oraz pomiary twardości. Zgodnie z normą PN-EN ISO 17639 przygotowano zglądy metalograficzne.

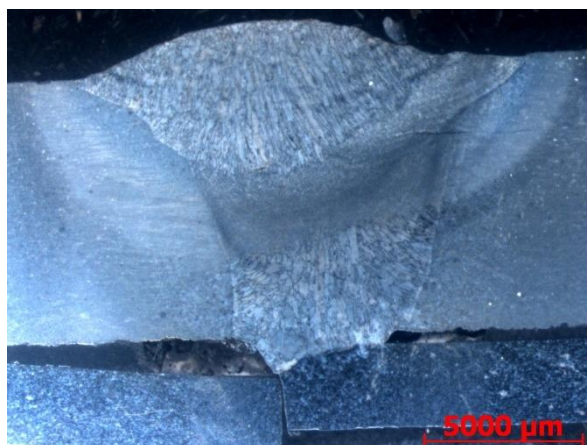
Badania makroskopowe wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego stereoskopowego SteREO Discovery firmy Zeiss, przy powiększeniu 8x. Obserwacje dla rozwiązania „a” przedstawiono na rysunku 34a÷b, natomiast dla rozwiązania „g” – na rysunku 35.

W przypadku próbek rozwiązania „a” stwierdzono brak przetopu od strony grani oraz obecność pęcherza gazowego wewnątrz spoiny. W próbkach rozwiązania „g” nie zaobserwowano niezgodności spawalniczych; zauważono natomiast, że spoina częściowo wtopiła się w stałą podkładkę stalową.

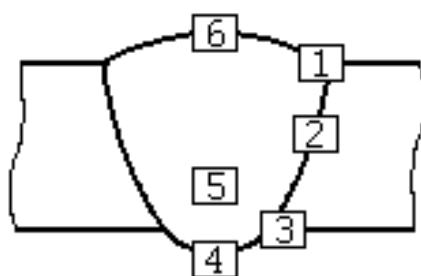
Badania mikroskopowe przeprowadzono przy użyciu metalograficznego mikroskopu świetlnego Axio Observer firmy Zeiss, przy powiększeniach 25x, 50x, 200x i 500x. Schemat rozmieszczenia pól obserwacyjnych przedstawiono na rysunku 36. Mikrostruktury złączy dla rozwiązania „a” przy powiększeniu 25x przedstawiono na rysunku 37a÷f, natomiast dla rozwiązania „g” – na rysunku 38a÷f. Odpowiednie obrazy mikrostruktur przy powiększeniu 50x zamieszczono na rysunku 39a÷f (rozwiązanie „a”) oraz 40a÷f (rozwiązanie „g”).



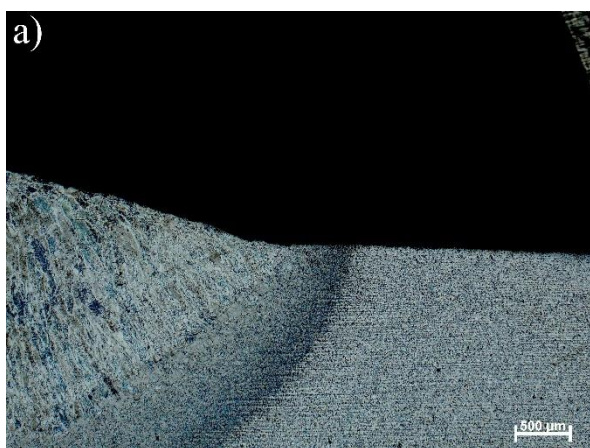
Rys. 34. Widok makroskopowy przekroju złącza dla rozwiązania „a”, pow. 8x: a) widok od strony lica, b) widok od strony grani

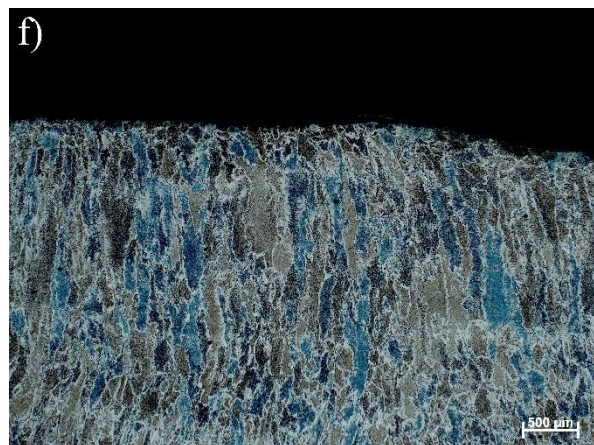
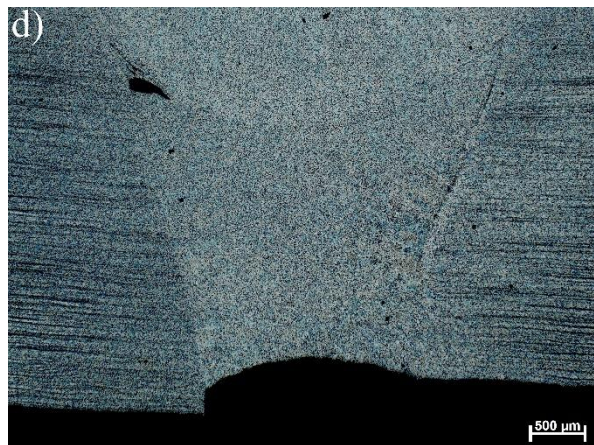


Rys. 35. Widok makroskopowy przekroju złącza dla rozwiązania „g”, pow. 8x

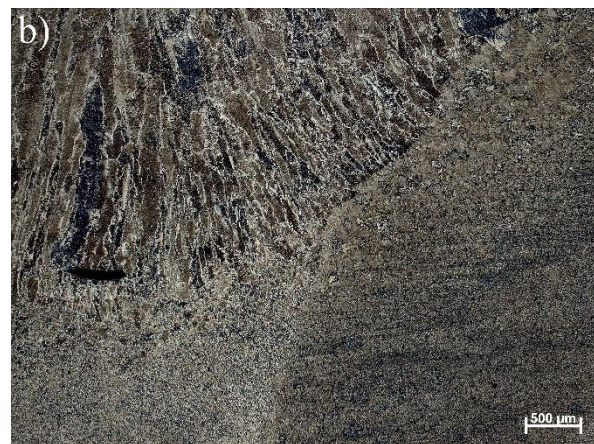
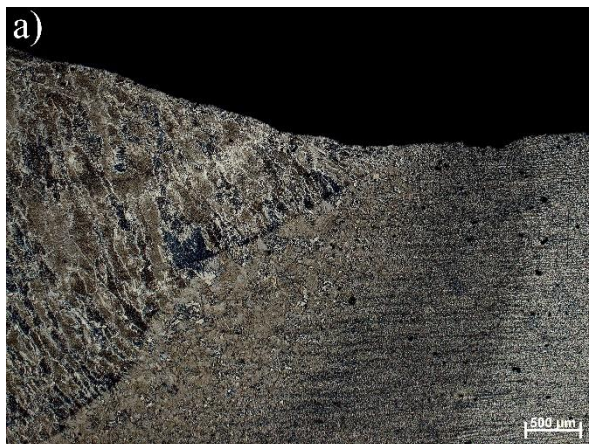


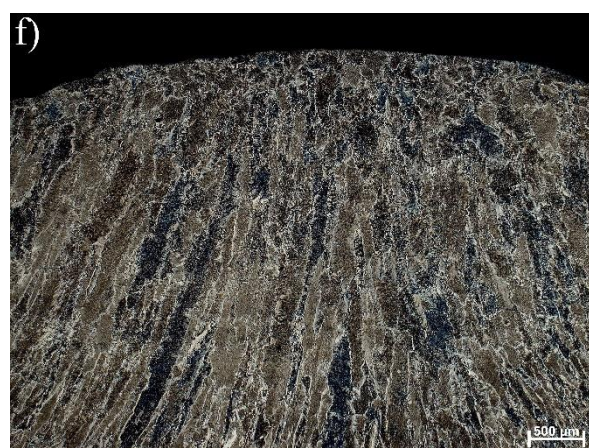
Rys. 36. Schemat rozmieszczenia pól obserwacji mikrostruktur złączy: 1 – linia wtopienia od strony lica spoiny, 2 – linia wtopienia w wewnętrznej części spoiny, 3 – linia wtopienia od strony grani, 4 – grąń spoiny, 5 – wewnętrzna część spoiny, 6 – lico spoiny



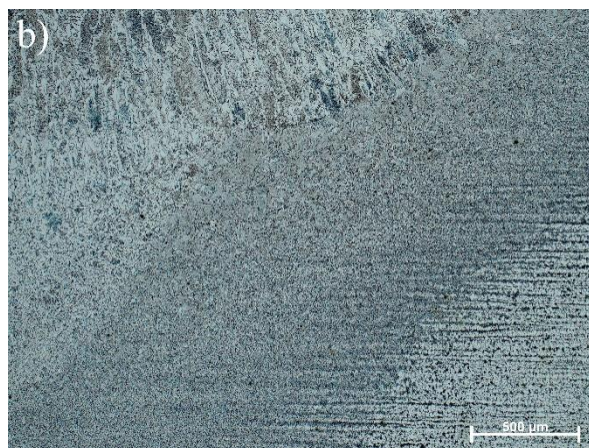
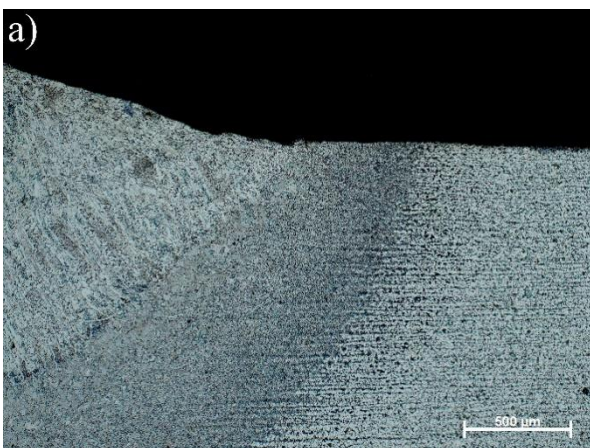


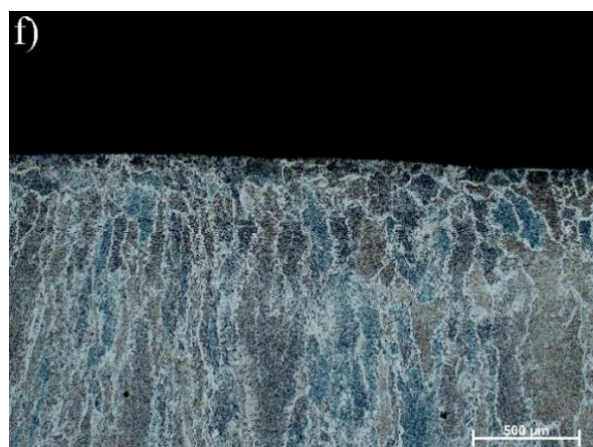
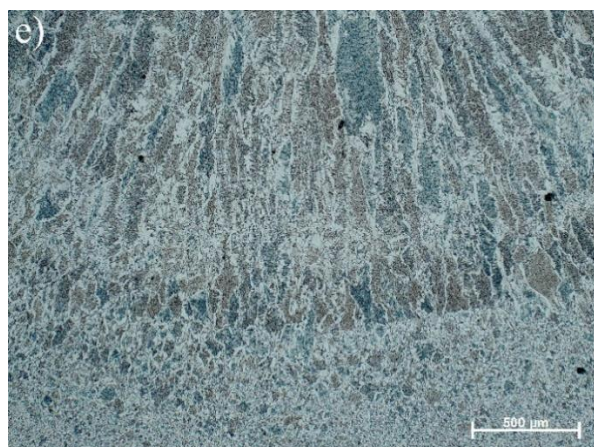
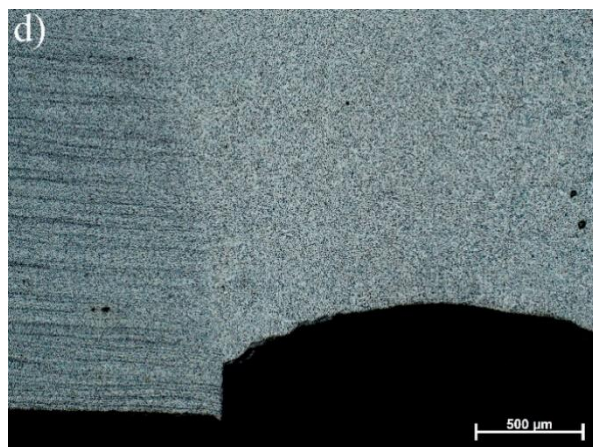
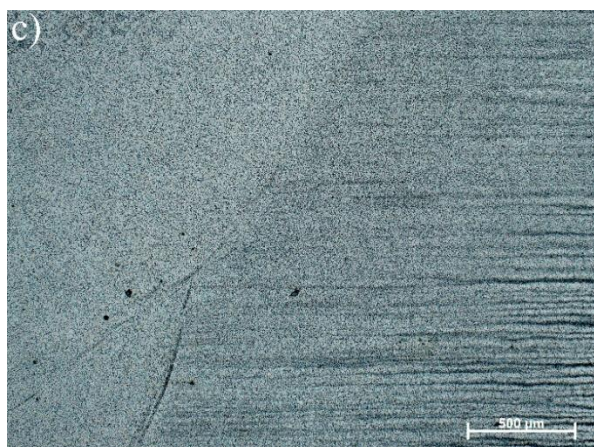
Rys. 37. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 25x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6



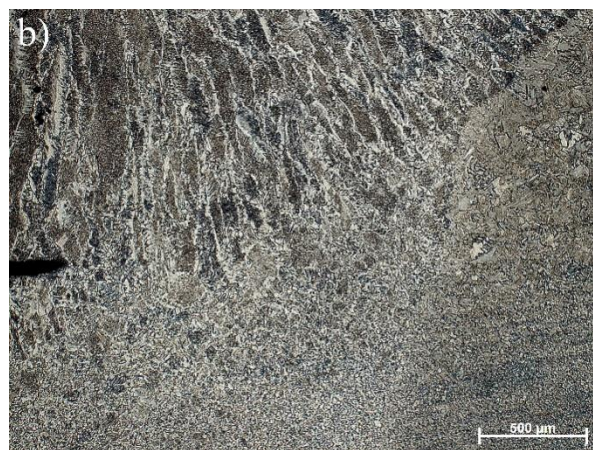
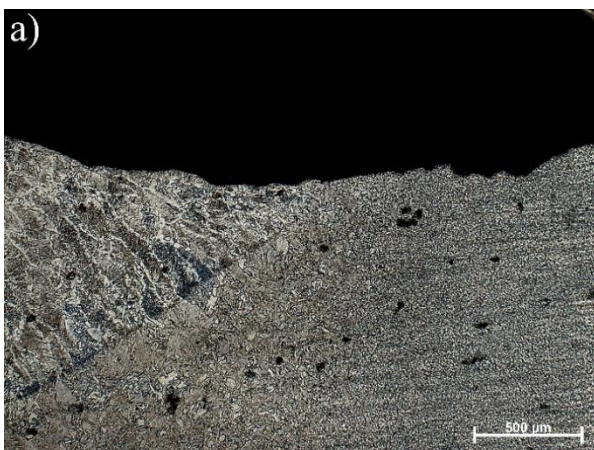


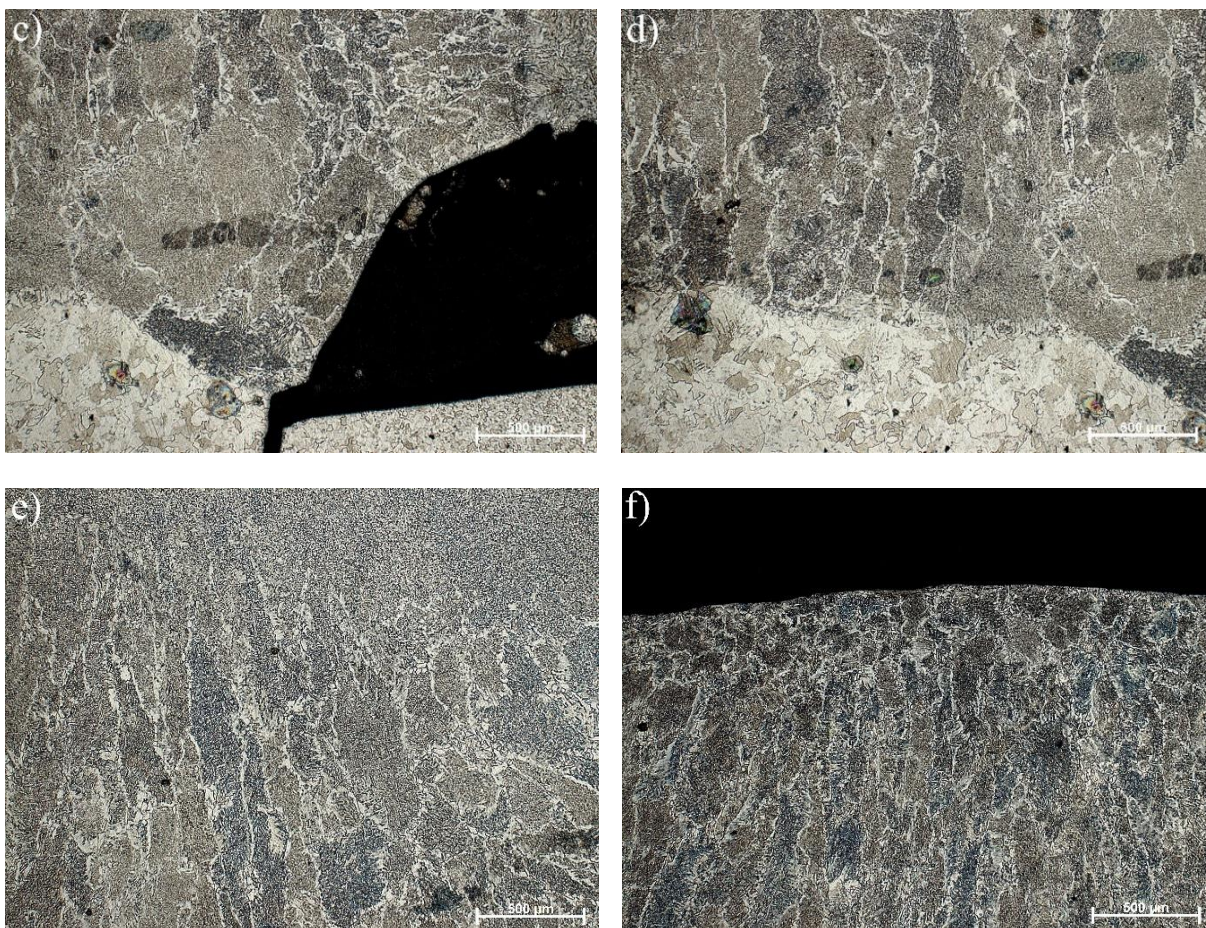
Rys. 38. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „g”, powiększenie 25x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6





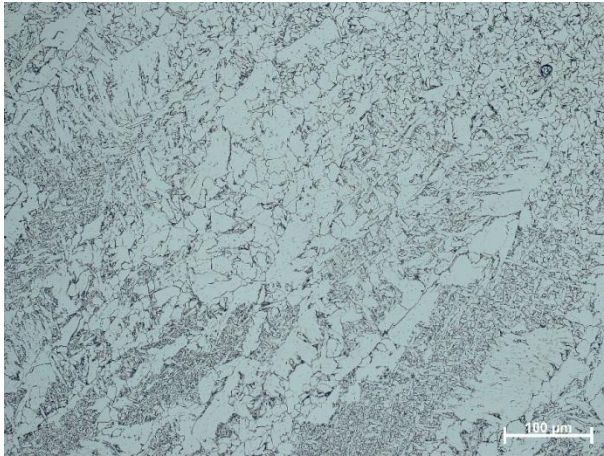
Rys. 39. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 50x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6



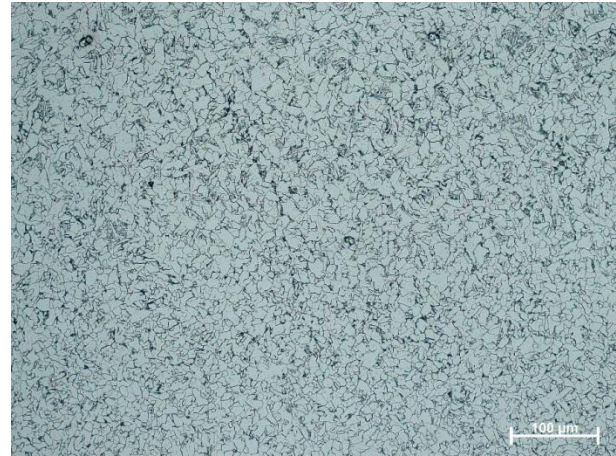


Rys. 40. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 50x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6

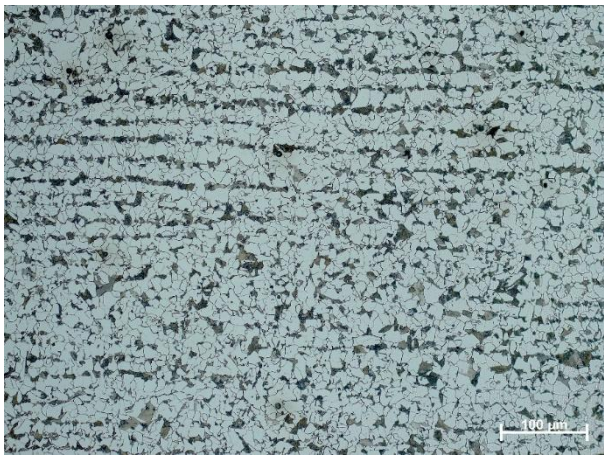
Obserwacje mikrostruktur wykonano na tym samym mikroskopie przy powiększeniach 200x i 500x. Przy powiększeniu 200x widoki mikrostruktur złącza rozwiązania „a” przedstawiono na rysunkach 41÷43, natomiast rozwiązania „g” – na rysunkach 44÷46. Analogicznie, dla powiększenia 500x mikrostruktury złącza rozwiązania „a” pokazano na rysunkach 47÷49, a rozwiązania „g” – na rysunkach 50÷52.



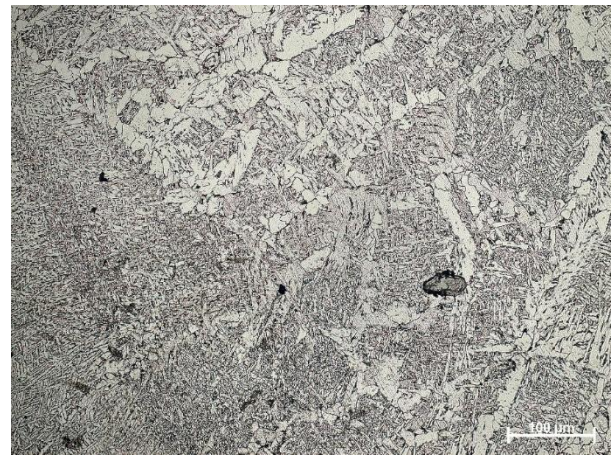
Rys. 41. Mikrostruktura spoiny złącza
rozwiązania „a”, pow. 200x



Rys. 42. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła
złącza rozwiązania „a”, pow. 200x



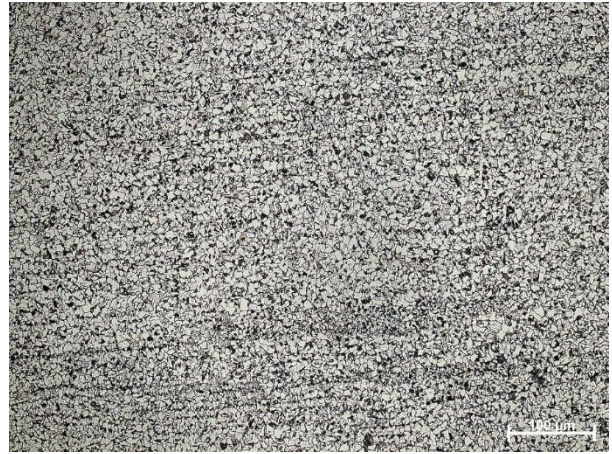
Rys. 43. Mikrostruktura materiału rodzimego
złącza rozwiązania „a”, pow. 200x



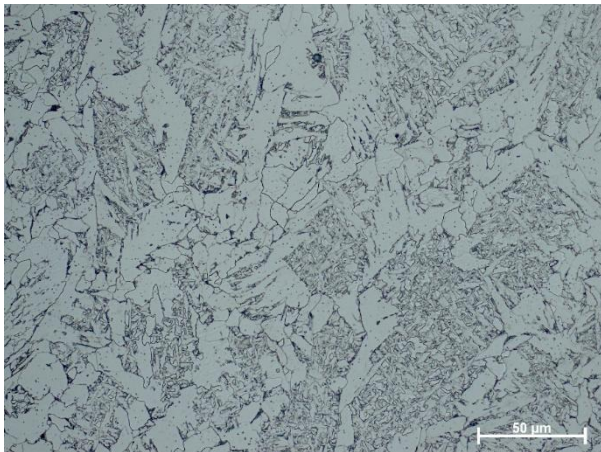
Rys. 44. Mikrostruktura spoiny złącza
rozwiązania „g”, pow. 200x



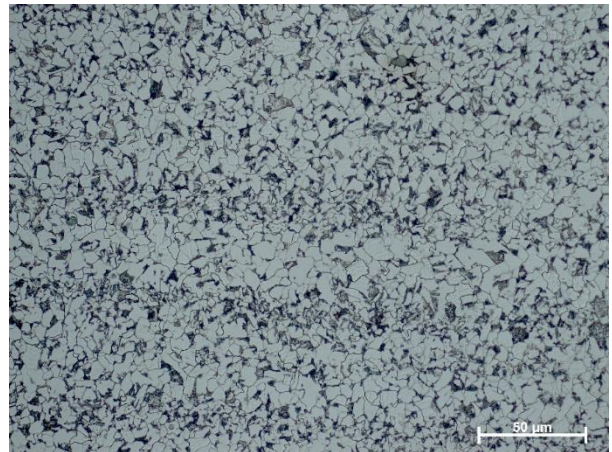
Rys. 45. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „g”, pow. 200x



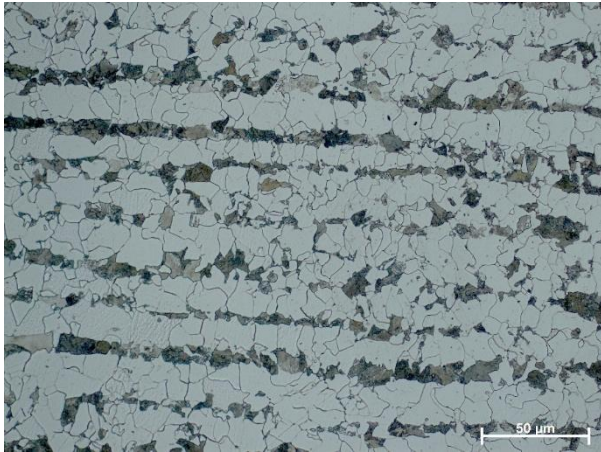
Rys. 46. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „g”, pow. 200x



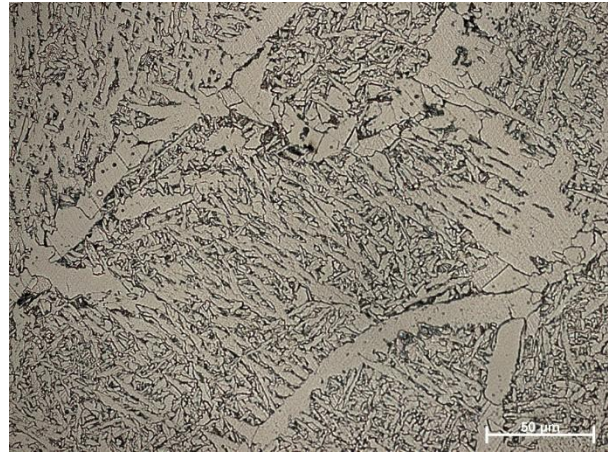
Rys. 47. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „a”, pow. 500x



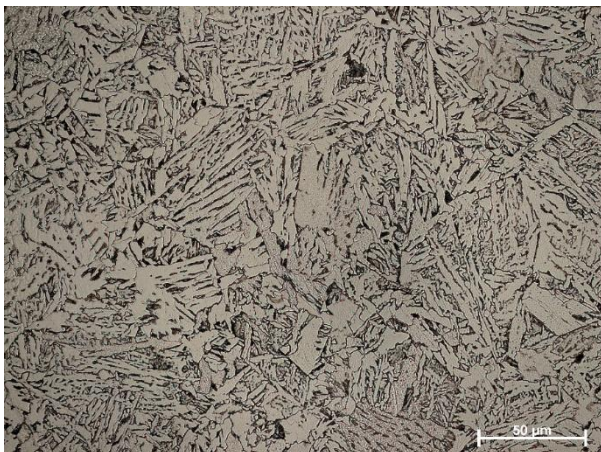
Rys. 48. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „a”, pow. 500x



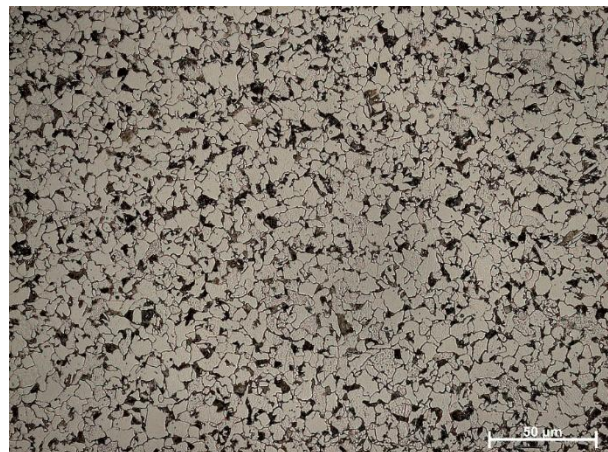
Rys. 49. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „a”, pow. 500x



Rys. 50. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „g”, pow. 500x



Rys. 51. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „g”, pow. 500x



Rys. 52. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „g”, pow. 500x

W obu przypadkach materiał rodzimy wykazywał pasmową strukturę ferrytyczno-perlityczną.

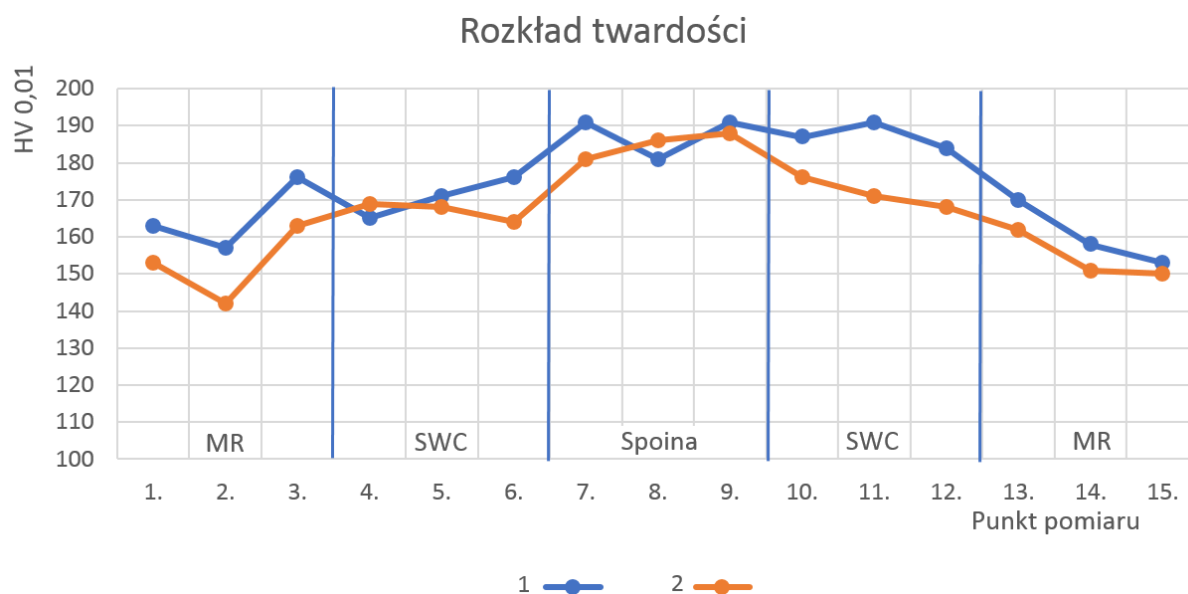
W strefie wpływu ciepła (SWC) próbek rozwiązania „a” zaobserwowano strukturę typową dla obszaru normalizowania, tj. po nagrzaniu powyżej temperatury A_3 i powolnym schłodzeniu. Zaobserwowano również równomierną strukturę ferrytyczno-perlityczną bez wyraźnej pasmowości, z drobnoziarnistym układem w porównaniu do materiału rodzimego, co świadczyło o wystąpieniu procesu rozdrobnienia ziaren.

W przypadku zestawu próbek rozwiązania „g” w strefie wpływu ciepła ujawniono mikrostrukturę charakterystyczną dla obszaru przegrzania. Zaobserwowano gruboziarnistą

strukturę quasiperlit otoczoną siatką ferrytu oraz drobne pasma ferrytu sięgające wgląd ziaren i tworzące układ Widmanstättena z wyraźnie zarysowanymi granicami ziaren, z obecną wewnątrz ziaren strukturą ferrytu płytkowego – tzw. struktura Widmanstättena.

W obu przypadkach, w obrębie spoin, zaobserwowano grubokrystaliczną strukturę, w której krystality ułożone były prostopadle do linii wtopienia. Struktura ta składała się z podziaren ferrytu płytkowego, tworzących również charakterystyczną strukturę Widmanstättena.

Ostatnim etapem badań porównawczych próbek rozwiązań „a” i „g” były pomiary twardości. Pomiary wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-1. Średnie wartości twardości przedstawiono na rysunku 53.



Rys. 53. Średnie wartości pomiarów twardości HV1 dla próbek rozwiązania „a” (1) oraz rozwiązania „g” (2)

Analiza średnich wartości twardości wykazała, że próbki rozwiązania „a” charakteryzowały się nieznacznie wyższą twardością. Niemniej jednak wszystkie wyniki mieściły się w zakresie normy i spełniały kryteria odbioru.

11.1. Podsumowanie badań zastosowanych rozwiązań koncepcji „a” oraz „g”

Podsumowując etap badań porównawczych dwóch typów próbek „a” i „g”, sformułowano następujące wnioski:

- przeprowadzono analizę modelowych próbek rur bez wykladek kompozytowych oraz opracowano metody kontroli temperatury podczas spawania i mocowania termopar,
- dobór parametrów spawania został zoptymalizowany w celu zapewnienia odpowiedniej jakości złączy,
- wykonano badania nieniszczące oraz niszczące w określonym zakresie, umożliwiające kompleksową ocenę jakości próbek,
- w przypadku próbek rozwiązania „a” stwierdzono niezgodności typu brak przetopu oraz wklęsnięcia grani, wynikające z braku szczeliny do spawania oraz specyfiki metody spawania 111, co wpłynęło na obniżenie jakości spoin,
- rury o większej grubości ścianki (rozwiązanie „a”), przy zastosowaniu wyższej energii liniowej podczas spawania pierwszego ściegu od strony grani, nagrzewały się szybciej niż rury cieńsze z podkładką stalową (rozwiązanie „g”),
- próbki rozwiązania „g” wykazywały niższe temperatury nagrzewania od strony podkładki stalowej (średnio o ponad 200°C), jednak charakteryzowały się wolniejszym oddawaniem ciepła ze względu na ograniczoną pojemność cieplną podkładki i brak możliwości jego rozpraszania do rury stalowej. Czas schładzania z temperatury maksymalnej do 110°C był średnio o niemal dwie minuty dłuższy niż w przypadku próbek „a”,
- zarówno próbki rozwiązania „a” jak i rozwiązania „g” nie spełniały wymagań temperaturowych jak i czasowych przebywania w zakresie niedopuszczalnych temperatur powodujących uszkodzenie wykladek,
- porównanie mikrostruktur złączy obu rozwiązań wykazało różnice w strefach wpływu ciepła, natomiast nie wykazywały odchyłeń od standardu dla tego typu stali,
- próbki rozwiązania „a” charakteryzowały się nieznacznie wyższą twardością niż próbki rozwiązania „g”, co jednak nie przekładało się na znaczące różnice w ogólnych właściwościach złączy,

- ze względu na krótsze czasy chłodzenia, mimo chwilowo wyższych temperatur podczas spawania, rekomenduje się optymalizację rozwiązania „a” w celu poprawy jakości i stabilności procesu spawania.

12. Optymalizacja rozwiązań spawania blach i rur stalowych bez wykladek

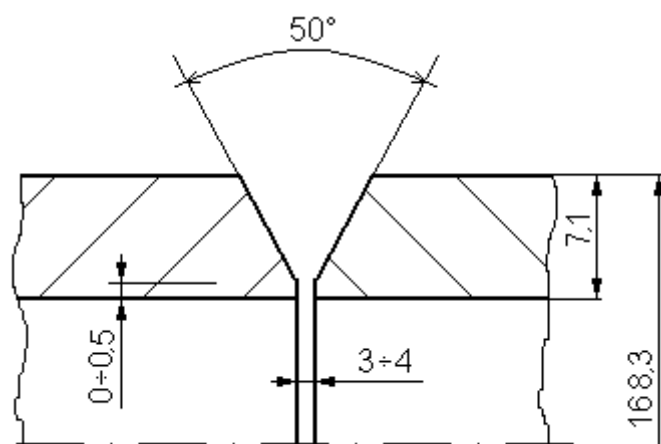
Porównując temperatury uzyskane podczas pomiarów, zaobserwowano, że próbki rozwiązania „a” osiągały wyższe wartości niż próbki rozwiązania „g”. Jednocześnie czasy chłodzenia do temperatury 110°C były istotnie krótsze dla próbek „a”. Jednakże zarówno zbyt wysokie temperatury podczas spawania, jak i zbyt długie czasy nagrzewania oraz stygnięcia uniemożliwiały uzyskanie połączeń spawanych rur bez uszkodzenia wykladek oraz bez utraty ich pierwotnych właściwości.

12.1. Optymalizacja I – spawanie rur: porównanie łukowych metod spawania

Ze względu na krótsze czasy chłodzenia oraz łatwiejsze przygotowanie rur do spawania podjęto decyzję o optymalizacji rozwiązania „a”. Proces optymalizacji rozpoczął się od rozszerzenia zakresu stosowanych metod spawania o inne techniki łukowe: 141 (TIG, próbka I) oraz 135 (MAG, próbka III). Mimo ograniczonej skuteczności spawania metodą 111 (MMA) w poprzednich badaniach, ze względu na analizę rur o odmiennym gatunku stali oraz zmienionej średnicy i grubości ścianki (inny typ szeregu dostępny w portfolio przedsiębiorstwa), podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowych prób spawania tą metodą. Pozwoliło to na uzyskanie materiału porównawczego i ocenę wpływu zmiennych parametrów na jakość połączenia (próbka III). Spawanie przeprowadzono na identycznie przygotowanych próbkach rur, w klasycznej pozycji montażowej rurociągów poziomych, tj. w pozycji PH (z dołu do góry). Dodatkowo wykonano próbkę spawaną metodą 135, realizując ścieg graniowy w pozycji z góry na dół (pozycja PJ), natomiast wypełnienie spoiny wykonano analogicznie jak w pozostałych próbkach (próbka IV).

Do badań wykorzystano próbki z rur wykonanych ze stali P355NH TC2 o średnicy zewnętrznej $D = 168,3$ mm oraz grubości ścianki $t = 7,1$ mm. Złącza przygotowano zgodnie

z rysunkiem 54. Próby spawalnicze przeprowadzono na złączach zukosowanych w kształt litery V, o kącie ukosowania 60° , progu o wymiarze $0 \div 0,5$ mm oraz szczelinie spawalniczej w zakresie $3 \div 4$ mm. W celu zapewnienia prawidłowego mocowania aparatury pomiarowej oraz uzyskania wiarygodnych i powtarzalnych wyników, do badań zastosowano rury bez wyłudek kompozytowych. Wyniki badań przedstawiono w artykule [8] i [9].



Rys. 54. Przygotowanie rur do spawania

Termopary służące do rejestracji przebiegu temperatury nagrzewania oraz chłodzenia umieszczono od wewnętrznej strony rur w rejonie spawanych krawędzi w połowie wysokości rur, po obu stronach (na godzinie 3 i 9), instalując po dwa zestawy termopar na każdą stronę. Ze względu na ograniczenia techniczne termopar oraz urządzenia pomiarowego, temperatury powyżej 1354°C nie zostały zarejestrowane.

Próby spawania przeprowadzono na czterech zestawach próbek, utrzymując zbliżone warunki procesowe: temperaturę otoczenia na poziomie 20°C oraz maksymalną temperaturę międzyścigową wynoszącą 65°C .

Wszystkie złącza poddano szczegółowym badaniom nieniszczącym, obejmującym inspekcję wizualną, badania penetracyjne, magnetyczno – proszkowe oraz ultradźwiękowe. Następnie wykonano badania makroskopowe i mikroskopowe.

12.1.1. Spawanie metodą TIG

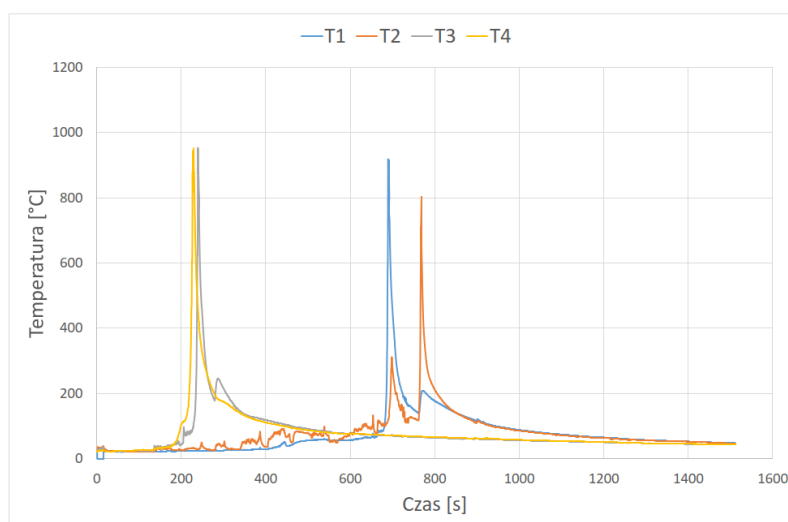
Próbkę I wykonano metodą spawania 141, wykorzystując urządzenie Lincoln V405-T Pulse. Do spawania zastosowano materiał dodatkowy w postaci prętów litych gatunku

W MoSi, zgodnych z normą PN-EN ISO 21952, marki Lincoln LNT 12 o średnicy 2,4 mm. Proces spawania prowadzono zgodnie z wstępną instrukcją spawania nr 3/pWPS [zał. 4]. Parametry spawania zostały przedstawione w tabeli 5.

Tab. 5. Parametry spawania dla próbki I

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	96÷100	11÷13	= (-)	27	0,14÷0,17
2	126÷127	12÷14	= (-)	16	0,34÷0,40
3	127÷131	12÷14	= (-)	13	0,42÷0,50
4-n	128÷132	13÷14,5	= (-)	16	0,37÷0,43

Dla próbki I czas nagrzewania do temperatury maksymalnej mieścił się w przedziale od 13,5 do 24,9 s, natomiast czas chłodzenia od temperatury maksymalnej do 110°C wynosił od 2 min 37 s do 6 min 10 s. Temperatura maksymalna osiągnięta podczas spawania zawierała się w zakresie od 803°C do 962°C, co przedstawia rysunek 55.

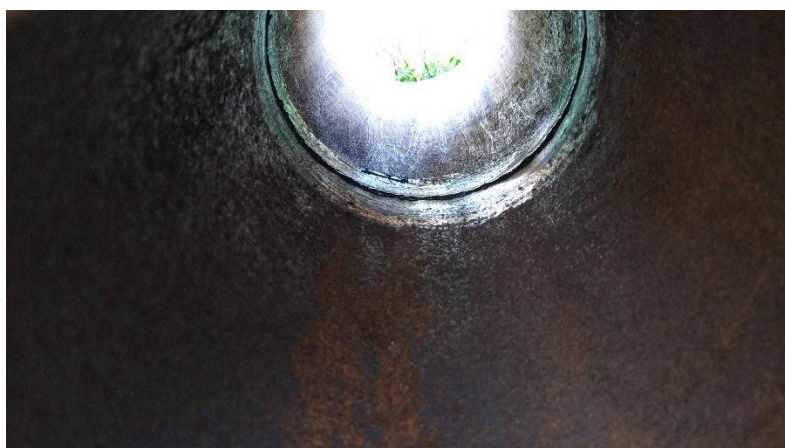


Rys. 55. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki I

Na rysunku 56 przedstawiono widok spoiny od strony lica po badaniu penetracyjnym, natomiast na rysunku 57 – widok od strony grani. Przekrój złącza zilustrowano na rysunku 58.



Rys. 56. Widok złącza I od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym

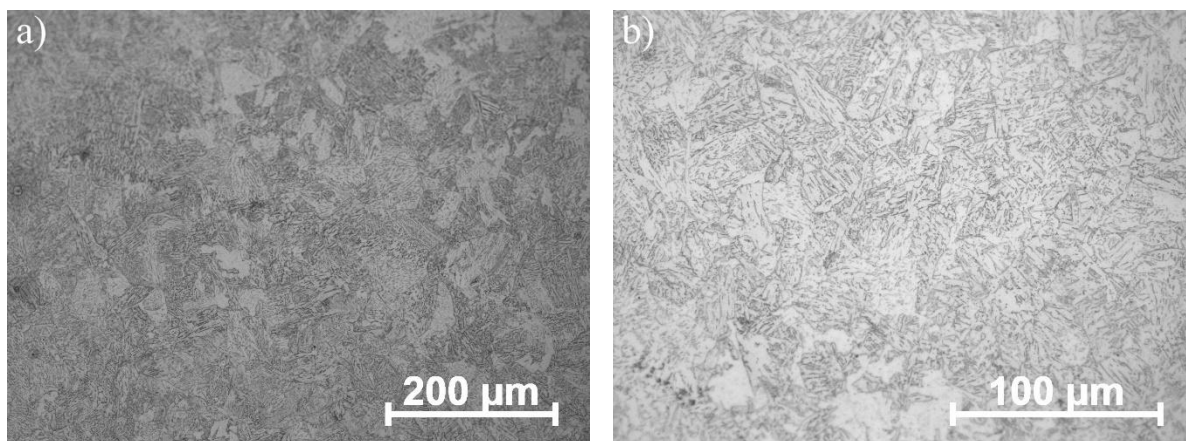


Rys. 57. Widok złącza I od strony grani spoiny

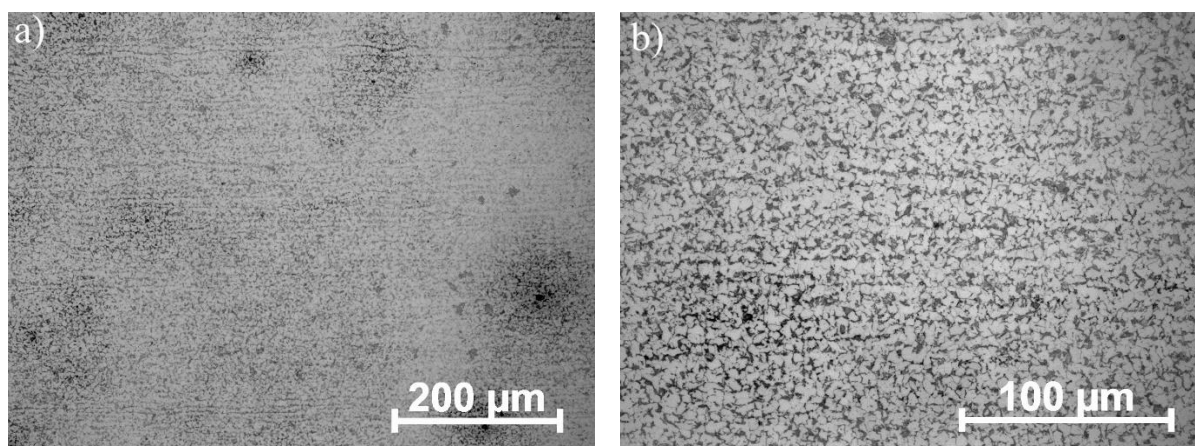


Rys. 58. Widok makroskopowy przekroju złącza I, pow. 8x

Widoki mikrostruktury spoiny przy powiększeniach 200x i 500x zostały przedstawione na rysunkach 59a÷b, natomiast analogiczne widoki stref wpływu ciepła – na rysunkach 60a÷b. W spoinie zaobserwowano strukturę grubokrystaliczną, w której krystality ułożone były prostopadle do linii wtopienia, przy materiale rodzimym zbudowanym z podziaren ferrytu płytkowego, charakterystycznej dla struktury Widmanstättena. W strefie wpływu ciepła, w obszarze normalizowania powyżej temperatury A_3 , zaobserwowano strukturę ferrytyczno-perlityczną z równomiernie rozłożonymi ziarnami, zachowującą częściową pasmowość.



Rys. 59. Mikrostruktura spoiny złącza I: a) pow. 200x, b) pow. 500x



Rys. 60. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza I: a) pow. 200x, b) pow. 500x

12.1.2. Spawanie metodą MMA

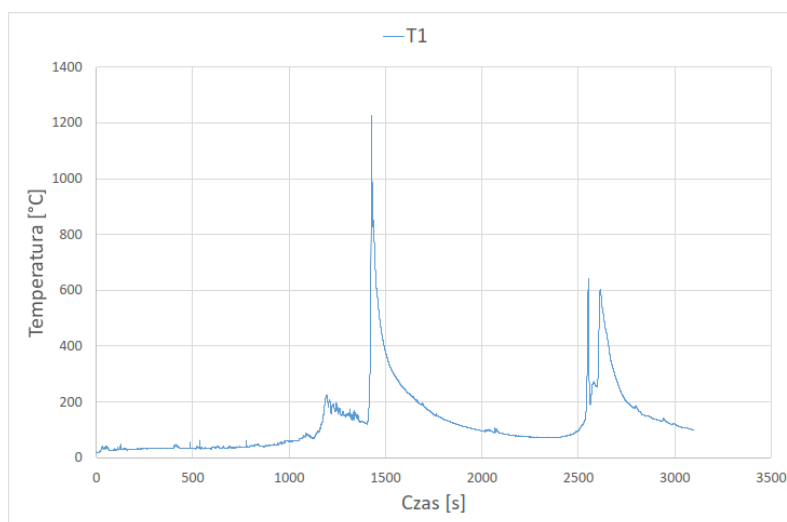
Próbkę II wykonano metodą 111 (MMA) przy użyciu urządzenia Lincoln V405-T Pulse. Materiał dodatkowy stanowiły elektrody otulone klasy E 38 3 B 42 marki ESAB EB 150 o średnicy 2,5 mm. Spawanie przeprowadzono zgodnie z wstępną instrukcją spawania nr 4/pWPS [zał. 5]. Szczegółowe parametry procesu spawania zestawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Parametry spawania dla próbki II

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	81÷82	24÷29	= (+)	13	0,72÷0,88
2	88÷89	26÷30	= (+)	21	0,52÷0,61
3-n	88÷89	26÷30	= (+)	25	0,44÷0,51

Podczas spawania próbki II zaobserwowano uszkodzenia termopar, spowodowane przejściem materiału podstawowego w fazę ciekłą, co skutkowało uszkodzeniem 75% termopar. Wśród zarejestrowanych pomiarów czas nagrzewania do temperatury maksymalnej wahał się od 1 minuty 33 sekund do 4 minut 15 sekund, natomiast czas chłodzenia od temperatury maksymalnej do 110°C mieścił się w zakresie od 6 minut 1 sekundy do 7

minut 25 sekund. Maksymalna temperatura osiągała wartości od 1221°C do powyżej 1354°C. Zarejestrowane przebiegi cykli cieplnych spawania przedstawiono na rysunku 61.



Rys. 61. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki II

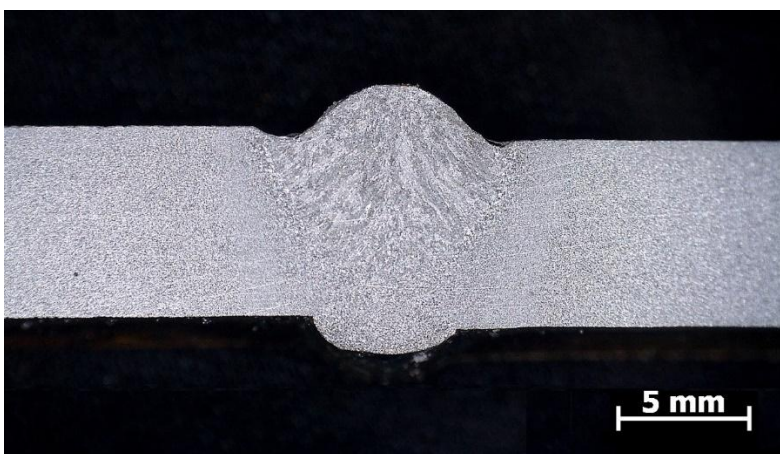
Na rysunku 62 przedstawiono widok spoiny od strony lica po wykonaniu badania penetracyjnego. Widok od strony grani zaprezentowano na rysunku 63, natomiast przekrój złącza został pokazany na rysunku 64.



Rys. 62. Widok złącza II od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym

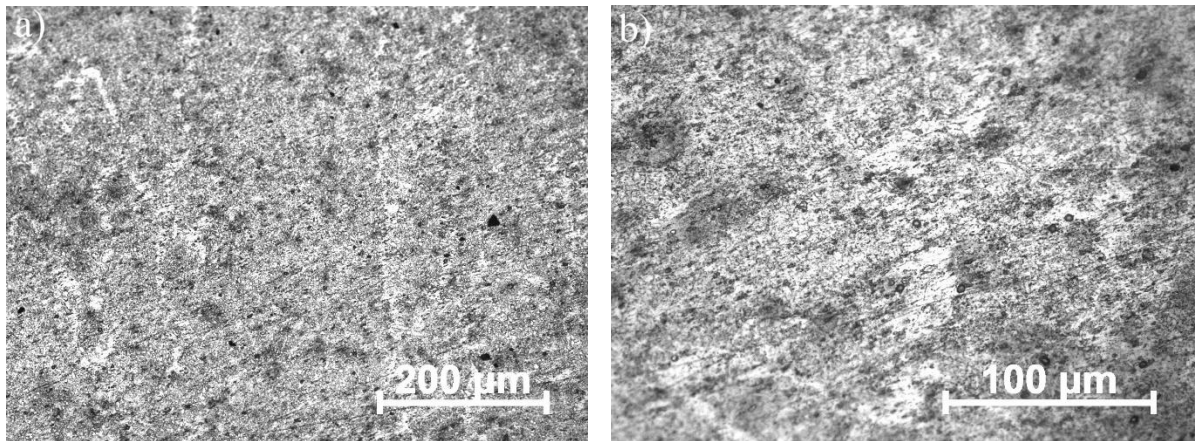


Rys. 63. Widok złącza II od strony grani spoiny

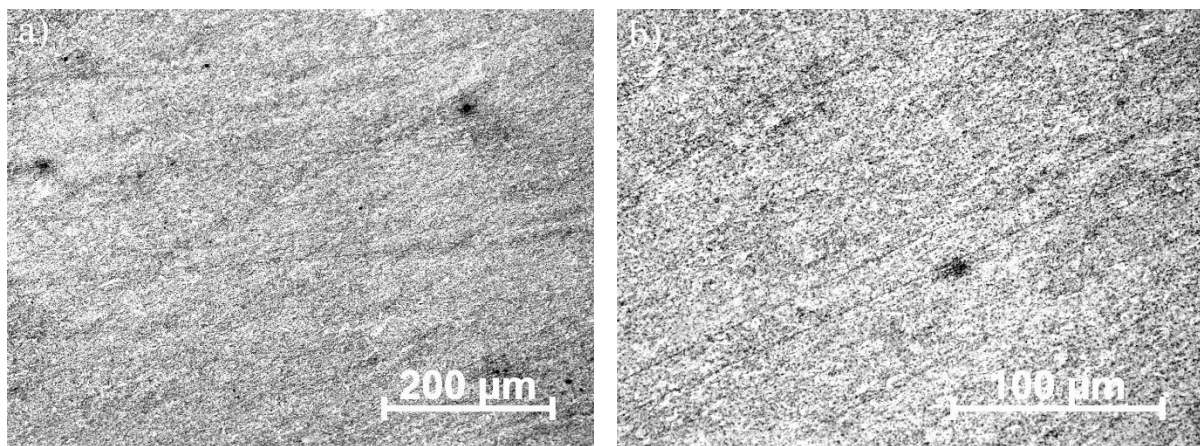


Rys. 64. Widok makroskopowy przekroju złącza II, pow. 8x

Widoki mikrostruktury spoiny w powiększeniach 200x oraz 500x zostały przedstawione na rysunkach 65a÷b, natomiast mikrostruktura strefy wpływu ciepła została zilustrowana na rysunkach 66a÷b. W spoinie zaobserwowano strukturę grubokrystaliczną z krystalitami ułożonymi prostopadle do linii wtopienia, składającymi się z podziaren ferrytu płytkowego, charakterystyczną dla struktury Widmanstättena. W strefie wpływu ciepła mikrostruktura wykazywała cechy przegrzania — występowała gruboziarnista struktura byłego austenitu z wyraźnie zarysowanymi granicami ziaren, wewnątrz której była widoczna struktura ferrytu płytkowego, również typu Widmanstätten.



Rys. 65. Mikrostruktura spoiny złącza II: a) pow. 200x, b) pow. 500x



Rys. 66. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza II: a) pow. 200x, b) pow. 500x

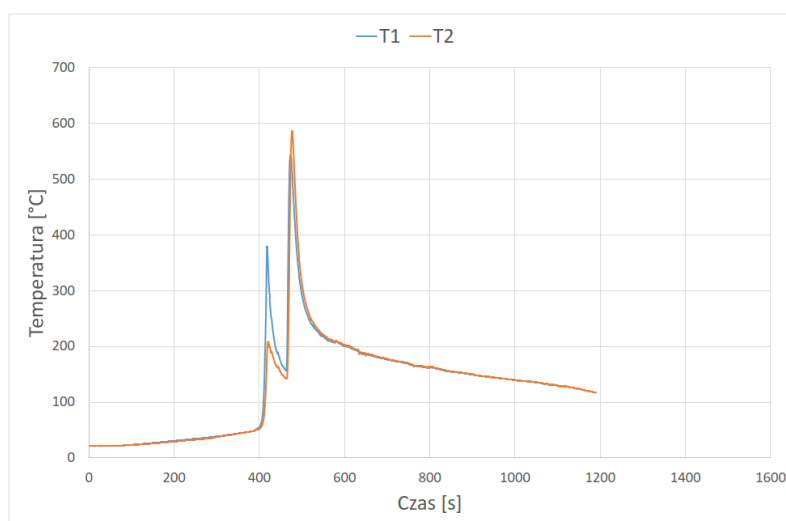
12.1.3. Spawanie metodą MAG

Próbkę III spawano metodą 135 z wykorzystaniem urządzenia Kemppi FastMig X 450. Materiał dodatkowy stanowił drut lity gatunku G 4Si1 zgodny z normą PN-EN ISO 14341, marki OK Autrod 12.64 o średnicy 1,0 mm. Spawanie przeprowadzono zgodnie z wstępną instrukcją spawania nr 5/pWPS [zał. 6], stosując parametry określone w tabeli 7.

Tab. 7. Parametry spawania dla próbki III

Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	88÷103	16,0÷16,5	= (+)	22	0,31÷0,37
2	137÷142	18,9÷19,1	= (+)	24	0,52÷0,54
3-n	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	22	0,59÷0,67

Podczas spawania próbki III odnotowano uszkodzenia termopar, spowodowane przejściem materiału podstawowego w fazę ciekłą, w wyniku czego uszkodzeniu uległo 50% termopar. Analiza zarejestrowanych pomiarów wykazała, że czas nagrzewania do temperatury maksymalnej mieścił się w przedziale od 1 min 3 s do 1 min 10 s, natomiast czas chłodzenia od temperatury maksymalnej do 110°C wynosił od 7 min 57 s do 11 min 30 s. Maksymalna temperatura podczas spawania mieściła się w zakresie od 1220°C do wartości przekraczającej 1354°C. Zarejestrowane przebiegi cykli cieplnych spawania przedstawiono na rysunku 67.



Rys. 67. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki III

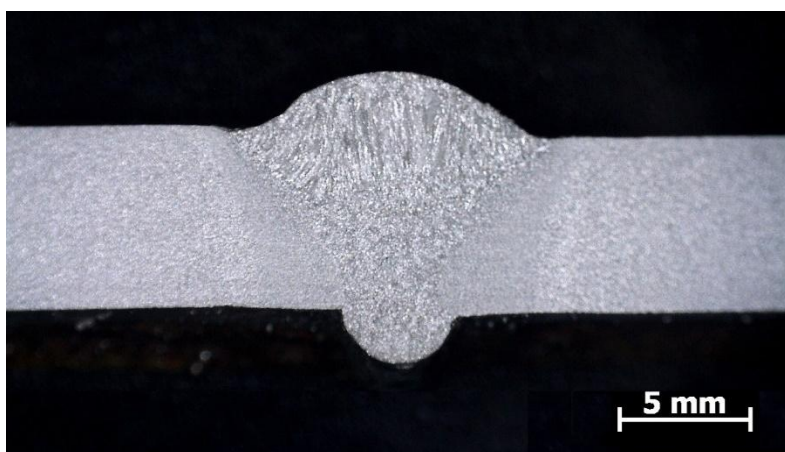
Na rysunku 68 przedstawiono widok od strony lica spoiny po wykonaniu badania penetracyjnego, natomiast na rysunku 69 zaprezentowano widok od strony grani. Przekrój złącza został przedstawiony na rysunku 70.



Rys. 68. Widok złącza III od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym

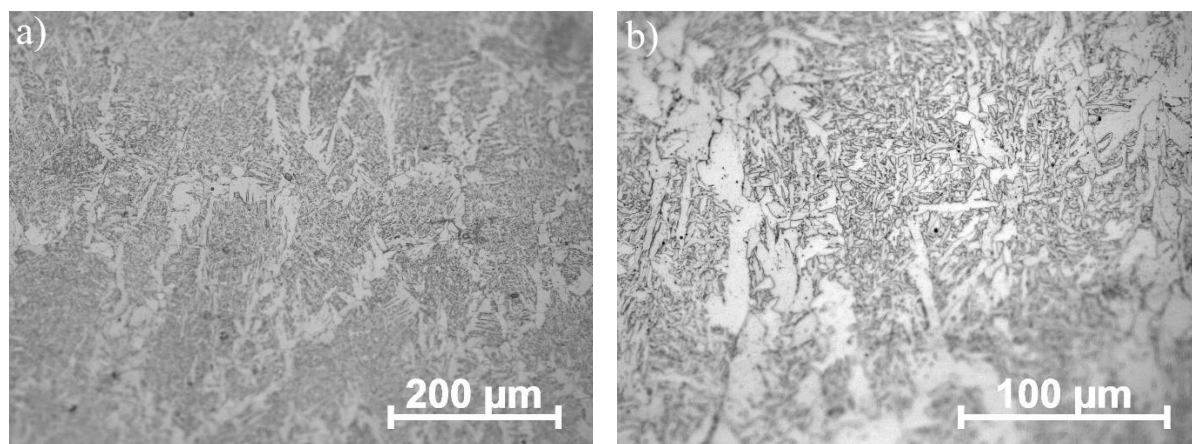


Rys. 69. Widok złącza III od strony grani spoiny

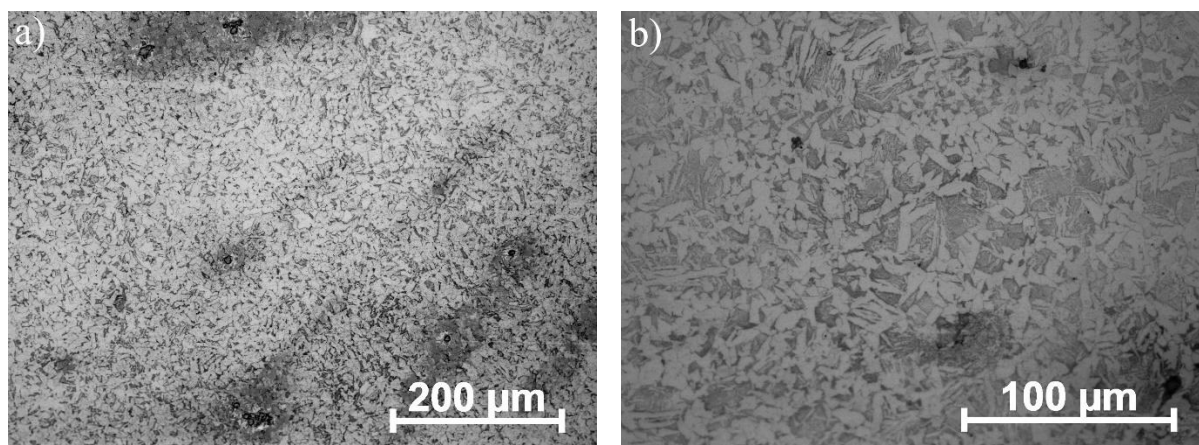


Rys. 70. Widok makroskopowy przekroju złącza III, pow. 8x

Widoki mikrostruktury spoiny przy powiększeniu 200x oraz 500x przedstawiono na rysunku 71a÷b, natomiast strefy wpływu ciepła zobrazowano na rysunku 72a÷b. W spoinie zaobserwowano strukturę grubokrystaliczną, z krystalitami ułożonymi prostopadle do linii wtopienia, w pobliżu materiału rodzimego, złożoną z podziaren ferrytu płytkowego, charakterystyczną dla struktury Widmanstättena. W strefie wpływu ciepła występowała struktura ferrytyczno-perlityczna, w której nie zachowano wyraźnej pasmowości.



Rys. 71. Mikrostruktura spoiny złącza III: a) pow. 200x, b) pow. 500x



Rys. 72. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza III: a) pow. 200x, b) pow. 500x

12.1.4. Spawanie metodą MAG – pierwszy ścieg w pozycji PJ

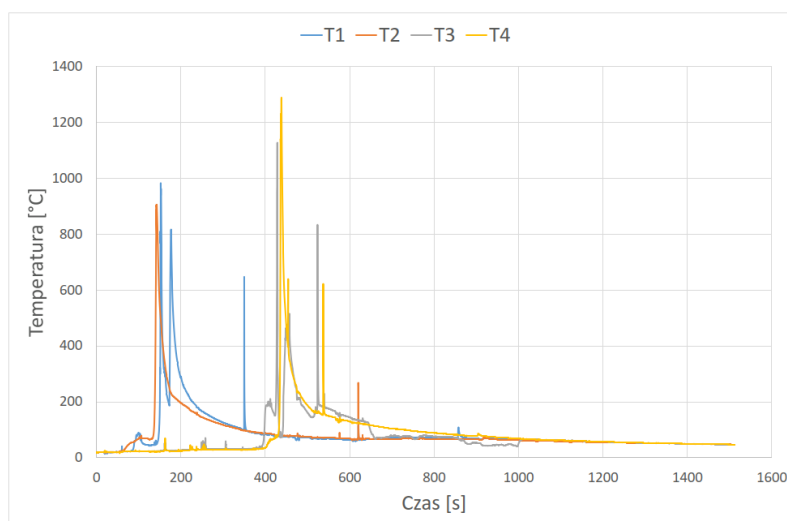
Próbkę IV spawano metodą 135, wykorzystując urządzenie Kemppi FastMig X 450. Jako materiał dodatkowy zastosowano drut lity w gatunku G 4Si1 marki OK Autrod 12.64

o średnicy 1,0 mm, analogicznie jak w przypadku próbek III. Proces spawania prowadzono na podstawie wstępnej instrukcji spawania nr 6/pWPS [zał. 7]. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 8. Istotną różnicą względem próbek nr III było wykonanie pierwszego ściegu w pozycji spawania PJ, podczas gdy pozostałe ściegi realizowano w pozycji PH.

Tab. 8. Parametry spawania dla próbki IV

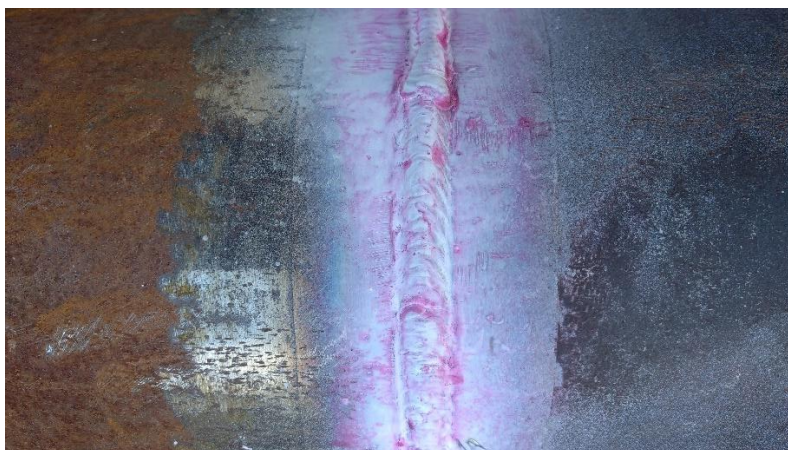
Nr ściegu	Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła, [kJ/mm]
1	88÷110	15,3÷16,3	= (+)	27	0,24÷0,32
2	140÷158	19,0÷19,3	= (+)	22	0,58÷0,67
3-n	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	22	0,59÷0,67

Dla próbki IV czas nagrzewania do temperatury maksymalnej wynosił od 3,3 do 30 sekund, natomiast czas chłodzenia od temperatury maksymalnej do 110°C mieścił się w zakresie od 2 minut 32 sekund do 3 minut 36 sekund. Temperatura maksymalna osiągała wartości w przedziale od 910°C do ponad 1290°C, co zostało przedstawione na rysunku 73.



Rys. 73. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki IV

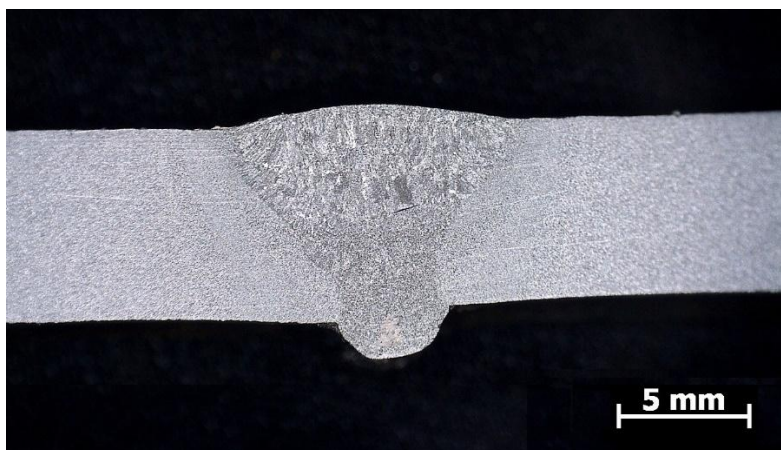
Na rysunku 74 przedstawiono widok od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym, natomiast na rysunku 75 – widok od strony grani. Przekrój złącza zaprezentowano na rysunku 76.



Rys. 74. Widok złącza IV od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym

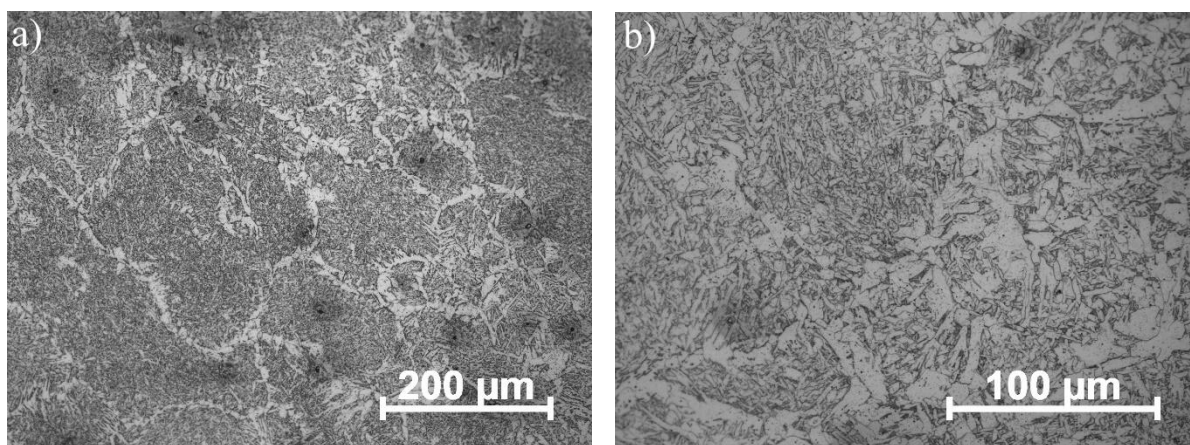


Rys. 75. Widok złącza IV od strony grani spoiny

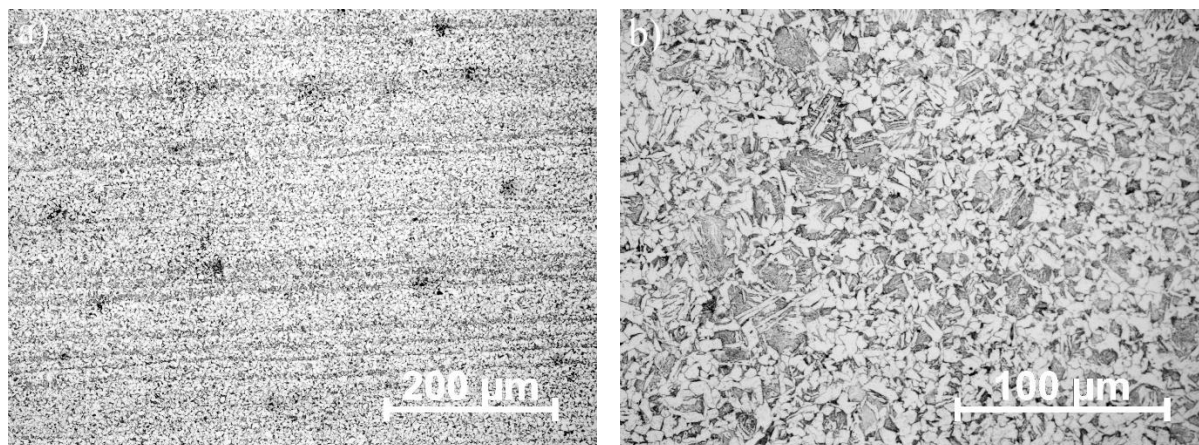


Rys. 76. Widok makroskopowy przekroju złącza IV, pow. 8x

Widoki mikrostruktury spoiny przy powiększeniach 200x oraz 500x zostały przedstawione na rysunkach 77a÷b, natomiast strefy wpływu ciepła zobrazowano na rysunkach 78a÷b. W spoinie zaobserwowano strukturę grubokrystaliczną z krystalitami ułożonymi prostopadłe do linii wtopienia, przy materiale rodzimym złożoną z podziaren ferrytu płytkowego, charakterystyczną dla struktury Widmanstättena. W strefie wpływu ciepła dominowała mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna pozbawiona wyraźnej pasmowości, co było zgodne z obserwacjami dotyczącymi złącza III.



Rys. 77. Mikrostruktura spoiny złącza IV: a) pow. 200x, b) pow. 500x



Rys. 78. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza IV: a) pow. 200x, b) pow. 500x

12.1.5. Podsumowanie optymalizacji I

Podsumowując etap badań porównawczych trzech łukowych metod spawania: TIG, MMA i MAG w pozycji PH, a także przeprowadzając dodatkowe badanie dla metody MAG, w której pierwszy ścieg wykonano w pozycji PJ, a kolejne w pozycji PH, sformułowano następujące wnioski:

- dokonano doboru parametrów technologicznych dla każdej z metod spawania,
- przeprowadzono pomiary cykli cieplnych procesu spawania,
- analiza zarejestrowanych cykli cieplnych wykazała, że najbardziej optymalne rezultaty osiągnięto podczas spawania metodą TIG – odnotowano najniższe temperatury maksymalne oraz najkrótszy czas przebywania w zakresie temperatur powyżej 110°C, co zostało przedstawione w tabeli 9.

Tab. 9. Czasy nagrzewania i chłodzenia próbek I÷IV

Nr próbki	Czas nagrzewania od 110°C do t max, [s]	Czas chłodzenia od t max do 110°C, [s]	Temperatura maksymalna, [°C]	Ilość uszkodzonych termopar
I	13,5÷24,9	97÷370	803÷962	0 z 4
II	93÷255	361÷445	1221÷1354	3 z 4
III	63÷70	477÷690	1220÷1354	2 z 4
IV	3,3÷30	92÷216	910÷1290	0 z 4

- potwierdzono zaletę metody TIG polegającą na możliwości przerywania procesu spawania w dowolnym momencie i jego kontynuacji bez konieczności przygotowania zakończeń ściegu (np. przez szlifowanie). W przypadku pozostałych metod spawania byłoby to znacznie bardziej problematyczne. Należy jednak zaznaczyć, że wszystkie złącza wykonano w sposób ciągły, zgodnie z założoną technologią,
- przeprowadzono badania wizualne, penetracyjne, magnetyczno – proszkowe, ultradźwiękowe oraz makroskopowe, które potwierdziły uzyskanie poziomu jakości B,
- porównując mikrostruktury wykonanych złączy stwierdzono różnice w strefach wpływu ciepła, charakterystyczne dla poszczególnych metod spawania,
- na podstawie rejestrowanych cykli cieplnych wykazano, że w przypadku spawania rur z wykładką kompozytową będzie dochodziło do jej zniszczenia,
- pomimo że proces spawania TIG okazał się najkorzystniejszy spośród analizowanych, nie uzyskano w pełni satysfakcjonujących rezultatów, co skłoniło do podjęcia dalszych prac nad optymalizacją procesu.

12.2. Optymalizacja II - spawanie blach: porównanie spawania TIG i LBW

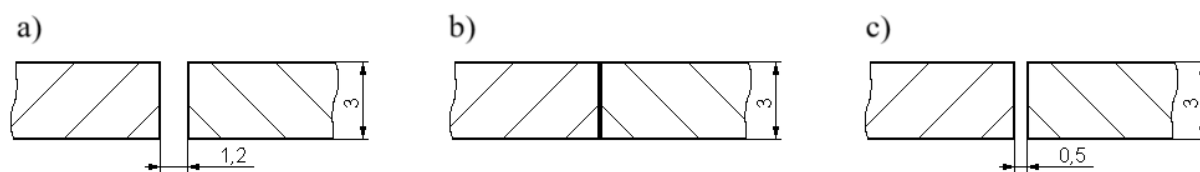
Ze względu na niesatysfakcjonujące wyniki dotyczące czasów nagrzewania i chłodzenia oraz osiąganych maksymalnych temperatur, z dalszych etapów optymalizacji wyeliminowano łukowe metody spawania. Podjęto decyzję o przetestowaniu ręcznego spawania laserowego (proces 521 według normy PN-EN ISO 4063), wykorzystującego silnie skupioną wiązkę promieniowania laserowego do miejscowego stopienia łączonych materiałów. Założono uzyskanie spoin charakteryzujących się wąskim, głębokim kształtem i wysoką jakością. Należało jednak podkreślić, że było to pionierskie badanie, gdyż ze względu na swoją charakterystykę spawanie laserowe ręczne nie było do tej pory stosowane w spawaniu montażowym w warunkach terenowych, do tej pory znajdowało zastosowanie w warunkach przemysłowych na specjalistycznych stanowiskach, tzw. celach spawalniczych. Mimo tego, że ta technologia nie będąc jeszcze przebadaną w wielu obszarach, podjęto decyzję o przeprowadzeniu prób jej zastosowania również w kontekście optymalizacji procesów spawalniczych wymagających precyzji i ograniczenia oddziaływania cieplnego.

Przeprowadzono próby spawania dla trzech wariantów technologicznych: spawania metodą TIG z użyciem materiału dodatkowego (rozwiązanie referencyjne uznane

za najbardziej korzystne spośród metod łukowych), ręcznego spawania laserowego (LBW) bez materiału dodatkowego oraz ręcznego spawania laserowego z zastosowaniem materiału dodatkowego. Celem badań było porównanie technologii spawania TIG z ręcznym spawaniem laserowym w dwóch wariantach.

Ze względu na trudności technologiczne związane z przygotowaniem rur do spawania laserowego ręcznego – w tym precyzyjną obróbkę krawędzi, owalizację rur oraz brak możliwości dokładnego spasowania łączonych elementów – utrzymanie stałego kąta palnika i prędkości spawania było utrudnione. W celu uzyskania jednorodnego wtopienia spoin, skrócenia czasu eksperymentów oraz ograniczenia zużycia materiałów, kolejne próby spawania przeprowadzono na blachach stalowych S355J2 o zmienionej grubości. Zmiana kształtu i materiału pozwoliła na kontrolowane warunki eksperymentalne, choć ogranicza możliwość bezpośredniego porównania z wcześniejszymi badaniami na rurach.

W celu zapewnienia porównywalności wyników oraz dokładniejszej analizy procesu ręcznego spawania laserowego (obydwa warianty), przygotowano zestawy próbek składające się z blach stalowych gatunku S355J2+N o wymiarach 200×70 mm i grubości $t = 3$ mm. Wszystkie próbki zostały przygotowane zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 9692-1 poprzez ukosowanie brzegów na kształt typu I metodą frezowania. Dla zapewnienia prawidłowego zamocowania oraz precyzyjnego odczytu danych z aparatury pomiarowej, do badań zastosowano blachy niewyposażone w wykładki. Wykonano odpowiednio złącza z pełnym przetopem dla metody TIG: złącze A, gdzie szczelina wynosiła 1,2 mm, metody LBW bez materiału dodatkowego: złącze B, bez szczeliny oraz dla metody LBW z materiałem dodatkowym: złącze C, ze szczeliną 0,5 mm. Szkice przedstawiające przygotowanie złączy do spawania zaprezentowano na rysunku 79a÷c. Wszystkie próby spawania wykonano w pozycji podolnej PA [10, 60, 61]. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w artykułach [10, 60, 62].

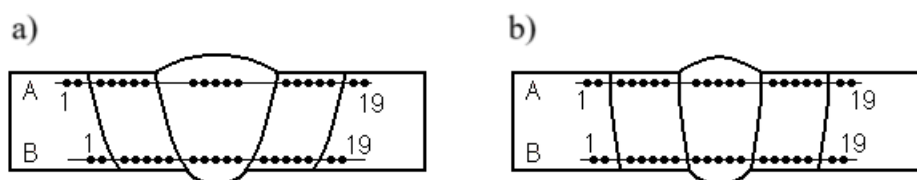


Rys. 79. Przygotowanie blach do spawania: a) dla metody TIG, b) dla metody LBW bez materiału dodatkowego, c) dla metody LBW z materiałem dodatkowym

Ze względu na specyfikę ukosowania brzegów blach oraz ryzyko uszkodzenia termopar w przypadku ich montażu bezpośrednio w osi spoiny, czujniki temperatury rozmieszczono w odległości 2 mm oraz 4 mm od osi spoiny, po przeciwnej stronie źródła spawania. Na każdej próbce zamontowano po trzy termopary. W celu zapewnienia poprawnego montażu układu pomiarowego oraz zagwarantowania wiarygodności pomiarów temperatury w trakcie procesu spawania, wszystkie próby wykonano na próbkach pozbawionych wykładek kompozytowych.

Badania przeprowadzono dla trzech zestawów próbek, przy zachowaniu stałych warunków otoczenia. Dla każdej z prób określono wartość energii liniowej spawania, bez uwzględnienia współczynnika metody kompensującego straty charakterystyczne dla danej metody spawania.

Wykonane złącza poddano badaniom nieniszczącym, obejmującym badania wizualne (VT), penetracyjne (PT) oraz magnetyczno – proszkowe (MT). Następnie przeprowadzono badania makroskopowe i mikroskopowe. Obserwacje makroskopowe wykonano przy powiększeniu 8x, natomiast obserwacje mikroskopowe przeprowadzono przy powiększeniu 50x. Dodatkowo wykonano pomiary twardości metodą Vickersa (HV1). Pomiary prowadzono wzdłuż dwóch linii pomiarowych, oznaczonych jako A i B, rozmieszczonych równoległe do powierzchni próbki w odległości 0,5 mm, z kolejnymi punktami pomiarowymi rozmieszczonymi co 0,5 mm. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 80a÷b.



Rys. 80. Schemat pomiarów twardości HV1: a) dla złącza A, b) dla złącza B i C

Dodatkowo, dla złączy wykonanych metodą spawania laserowego (LBW), przeprowadzono badania radiograficzne (RT) w celu oceny ciągłości objętościowej spoin oraz wykrycia ewentualnych nieciągłości wewnętrznych na całej ich długości.

12.2.1. Spawanie metodą TIG

Złącze A wykonano metodą 141 (spawanie TIG) z wykorzystaniem urządzenia Castotig 2002 AC/DC. Jako materiał dodatkowy zastosowano pręty lite w gatunku W 4Si1, zgodnie z normą PN-EN ISO 636-A, marki ESAB OK Tigrod 12.64 o średnicy 2 mm. Proces spawania przeprowadzono na podstawie wstępnej instrukcji technologicznej nr 7/pWPS [zał. 8], przy parametrach spawania zestawionych w tabeli 10.

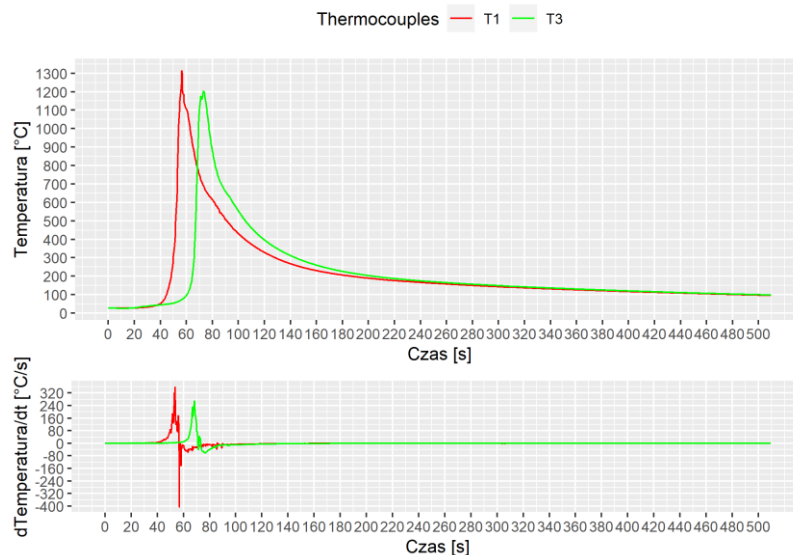
Tab. 10. Parametry spawania dla złącza A

Natężenie prądu, [A]	Napięcie łuku, [V]	Rodzaj prądu / biegunowość	Prędkość spawania, [cm/min]	Energia Liniowa, [kJ/mm]
110	10,9	= (-)	15	0,48

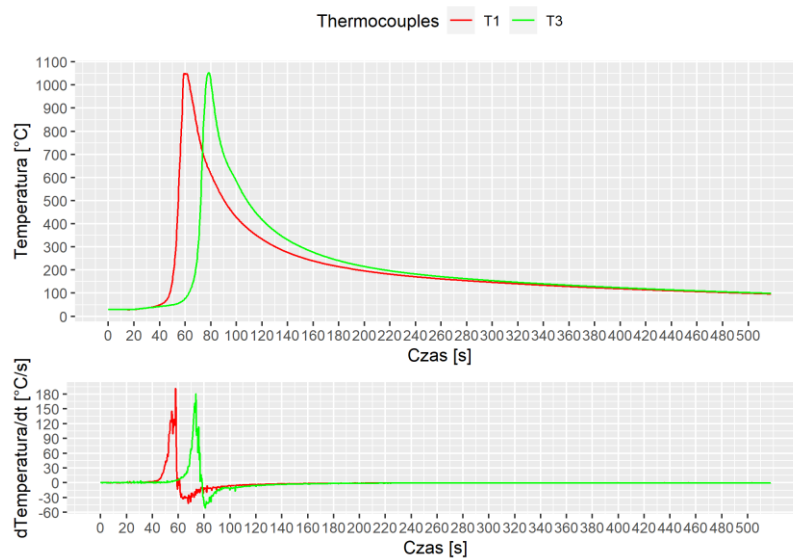
W tabeli 11 przedstawiono zestawienie czasów nagrzewania od temperatury 120°C do temperatury maksymalnej oraz czasów chłodzenia od temperatury maksymalnej do 120°C. Na rysunku 81 zaprezentowano wykres spawalniczego cyklu cieplnego rejestrowanego przez termopary zainstalowane w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spoiny, natomiast na rysunku 82 – termopary umieszczone w odległości 4 mm od tej krawędzi. Podczas spawania uszkodzeniu uległa jedna termopara zainstalowana w odległości 2 mm oraz jedna z termopar zlokalizowanych 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy.

Tab. 11. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza A

Odległość termopary od osi spoiny, [mm]	Nr termopary	Czas nagrzewania od 120°C do t max, [s]	Czas chłodzenia od t max do 120°C, [s]	Suma czasów nagrzewania i chłodzenia, [s]	Czas chłodzenia od 800 do 500°C t _{8/5} , [s]
2	T1	10,75	328	338,75	23
	T2	-	-	-	-
	T3	11,25	323,25	334,5	23,25
4	T1	11,25	334,75	346	21
	T2	-	-	-	-
	T3	14,25	323,25	337,5	22,75



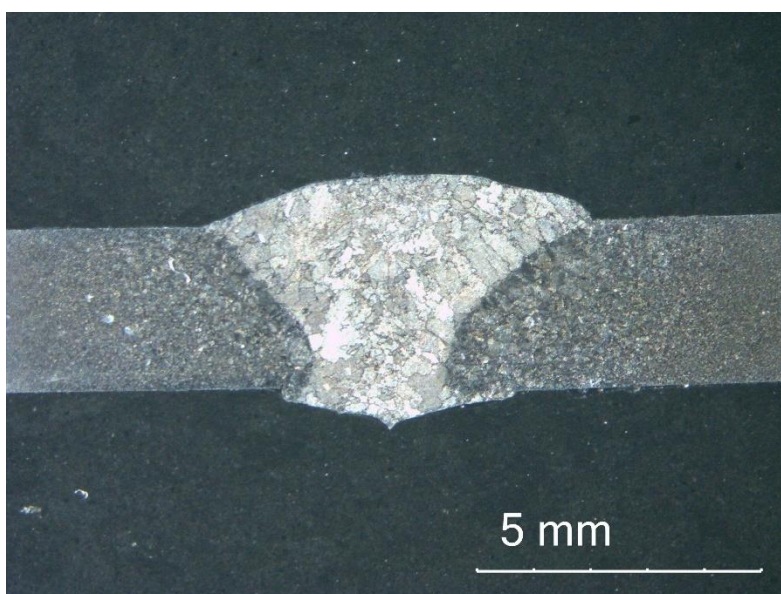
Rys. 81. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza A dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury



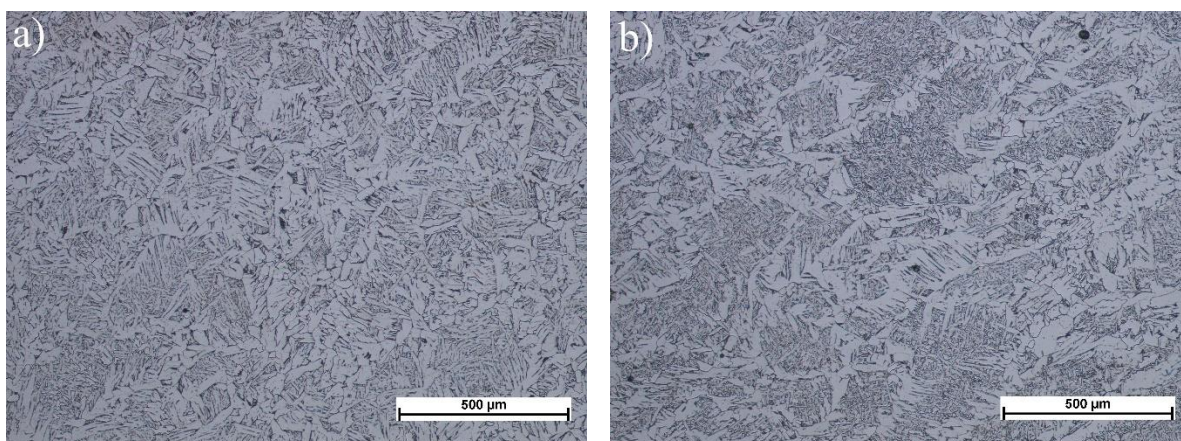
Rys. 82. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza A dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury

Na rysunku 83 przedstawiono przekrój złącza. Powierzchnia spoiny wynosiła 16,42 mm², natomiast strefy wpływu ciepła – 24,03 mm². Widoki mikrostruktury spoiny

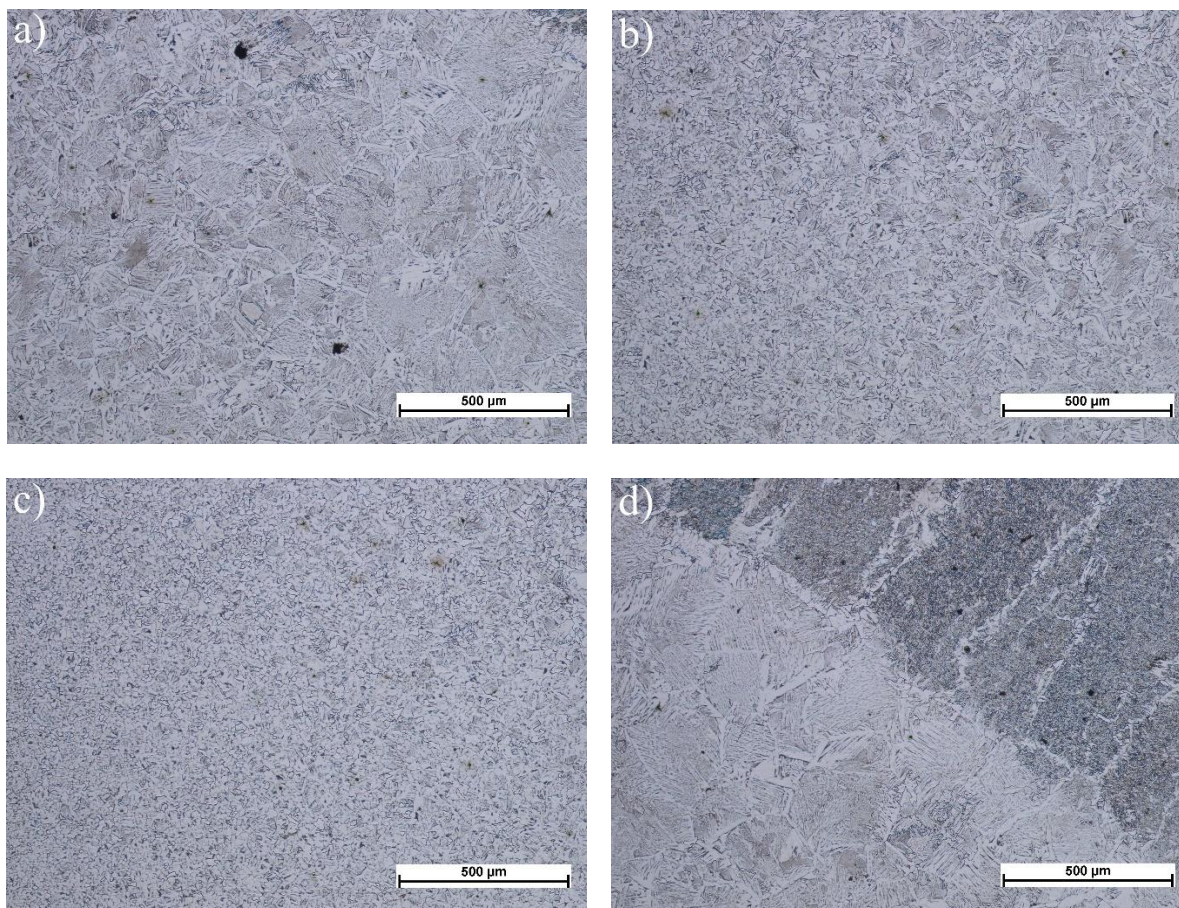
zaprezentowano na rysunku 84a÷b, natomiast mikrostrukturę strefy wpływu ciepła oraz linii wtopienia na rysunku 85a÷d. W strefie wpływu ciepła złącza A zaobserwowano strukturę ferrytyczno-perlityczną o zróżnicowanej wielkości ziaren, w skład której wchodziły ferryt ziarnisty oraz płytkowy. W miarę zbliżania się do materiału rodzimego obserwowano wzrost udziału ferrytu ziarnistego.



Rys. 83. Widok makroskopowy przekroju złącza A, pow. 8x



Rys. 84. Mikrostruktura spoiny złącza A, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny

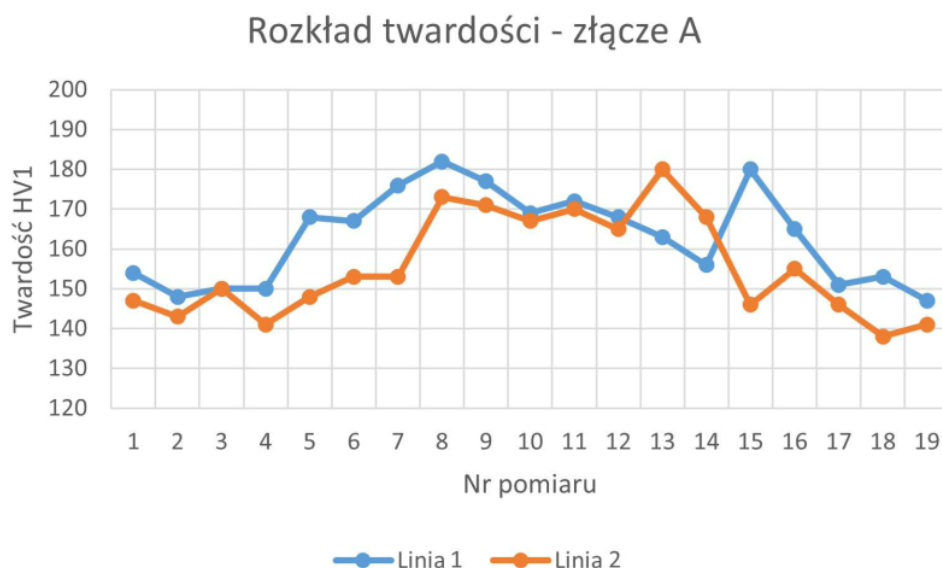


Rys. 85. Mikrostruktura złącza A, pow. 50x: a÷c) strefa wpływu ciepła, d) obszar linii wtopienia

Wartości pomiarów twardości HV1 zestawiono w tabeli 12, natomiast wykres rozkładu twardości przedstawiono na rysunku 86. Średnia twardość spoiny wzdłuż linii pomiarowej 1 wyniosła 176 HV, wzdłuż linii 2 – 173 HV. Dla strefy wpływu ciepła wartości te wyniosły odpowiednio 152 HV oraz 159 HV.

Tab. 12. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza A

Linia	MR		SWC					Spoina					SWC					MR	
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	131	134	150	154	148	167	176	182	177	169	172	168	163	156	180	153	147	134	133
2	147	143	150	141	148	153	153	173	171	167	170	165	180	168	146	155	146	138	141



Rys. 86. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza A

12.2.2. Spawanie metodą LBW (bez materiału dodatkowego)

Złącze B wykonano metodą 521, wykorzystując urządzenie LightWELD 1500 XC, bez stosowania materiału dodatkowego. Spawanie przeprowadzono zgodnie z wstępną instrukcją spawania nr 8/pWPS [zał. 9]. Parametry spawania zestawiono w tabeli 13.

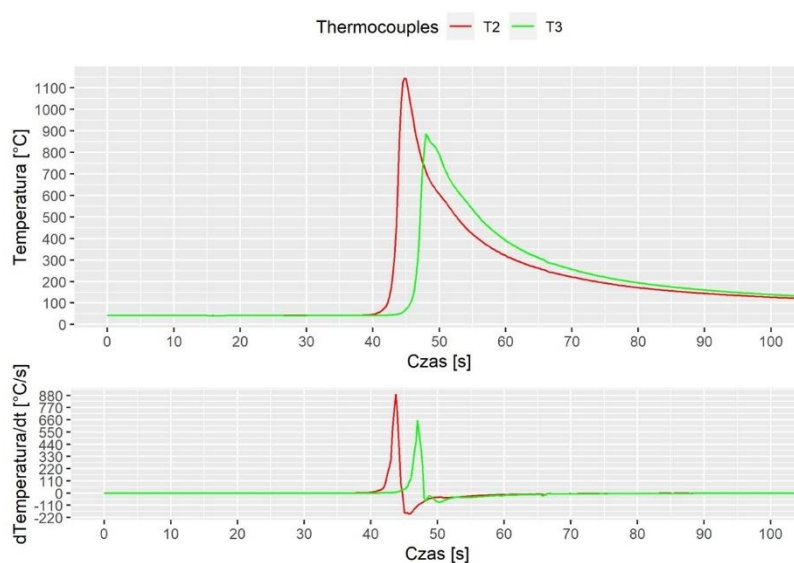
Tab. 13. Parametry spawania dla złącza B

Moc spawania, [W]	Prędkość podawania druetu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/min]	Energia liniowa, [kJ/mm]
1200	-	25	0,29

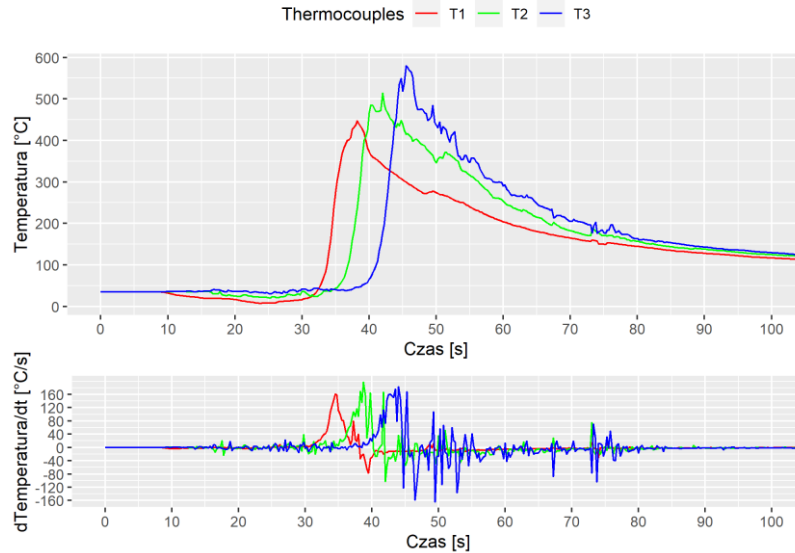
W tabeli 14 przedstawiono zestawienie czasów nagrzewania od temperatury 120°C do temperatury maksymalnej oraz czasów chłodzenia od temperatury maksymalnej do 120°C. Na rysunku 87 zaprezentowano wykres spawalniczego cyklu cieplnego dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spoiny, natomiast na rysunku 88 – dla termopar umieszczonych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spoiny. Podczas spawania uszkodzeniu uległa jedna termopara zamontowana w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy.

Tab. 14. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza B

Odległość termopary od osi spoiny, [mm]	Nr termopary	Czas nagrzewania od 120°C do t max, [s]	Czas chłodzenia od t max do 120°C, [s]	Suma czasów nagrzewania i chłodzenia, [s]	Czas chłodzenia od 800 do 500°C $t_{8/5}$, [s]
2	T1	-	-	-	-
	T2	2,75	60,75	63,5	5,5
	T3	2,25	66,5	68,75	6
4	T1	4,5	58,25	62,75	-
	T2	3,25	60,75	64	-
	T3	4	62,75	66,75	-

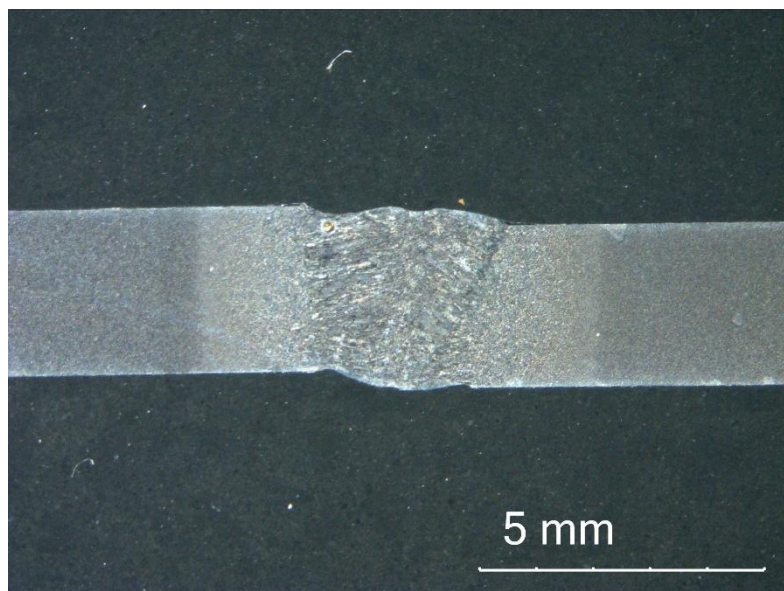


Rys. 87. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza B dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury

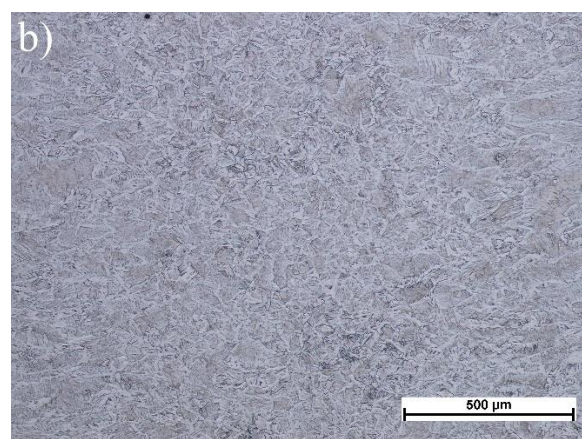
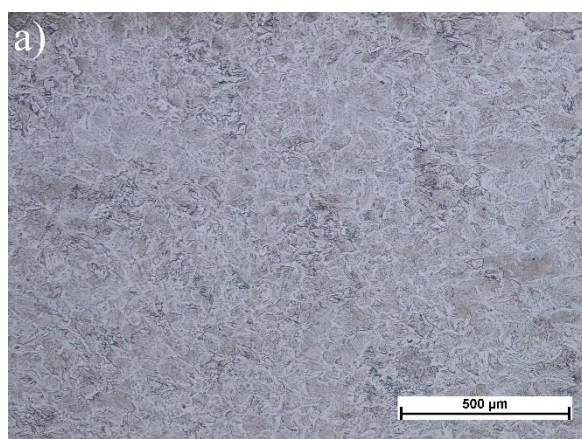


Rys. 88. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza B dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury

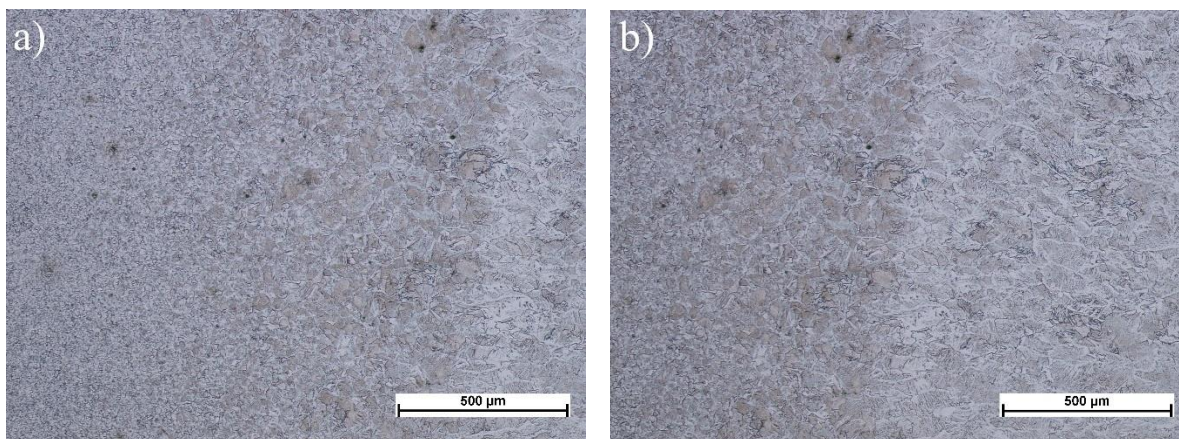
Na rysunku 89 przedstawiono przekrój złącza. Powierzchnia spoiny wynosiła $8,63 \text{ mm}^2$ natomiast powierzchnia strefy wpływu ciepła wynosiła $13,70 \text{ mm}^2$. Widoki mikrostruktury spoiny zaprezentowano na rysunku 90a÷b, natomiast mikrostrukturę strefy wpływu ciepła oraz linii wtopienia na rysunku 91a÷b. W strefie wpływu ciepła złącza B występuje struktura bainityczno-ferrytyczna o zróżnicowanej wielkości, przy czym największy rozrost ziaren zaobserwowano w rejonie linii wtopienia. Dodatkowo przeprowadzono badania radiograficzne, których wyniki przedstawiono na radiogramie zamieszczonym na rysunku 92. Na radiogramie zaobserwowano liczne pory w rejonie linii wtopienia po obu stronach spoiny.



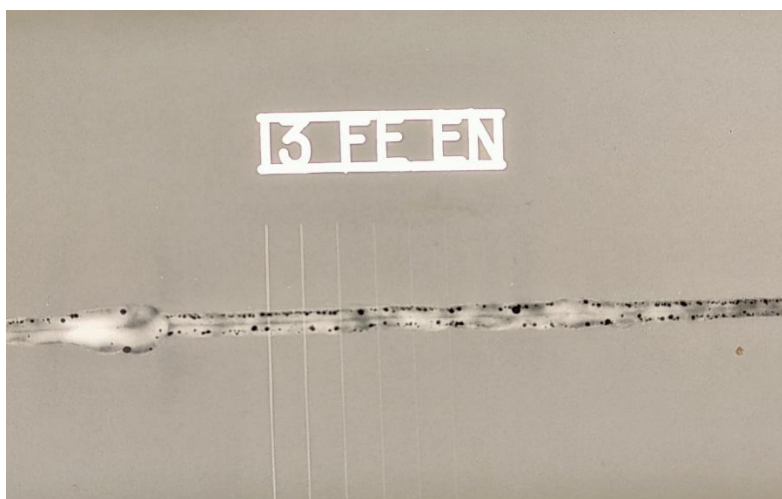
Rys. 89. Widok makroskopowy przekroju złącza B, pow. 8x



Rys. 90. Mikrostruktura spoiny złącza B, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny



Rys. 91. Mikrostruktura złącza B, pow. 50x: a) strefa wpływu ciepła, b) obszar linii wtopienia

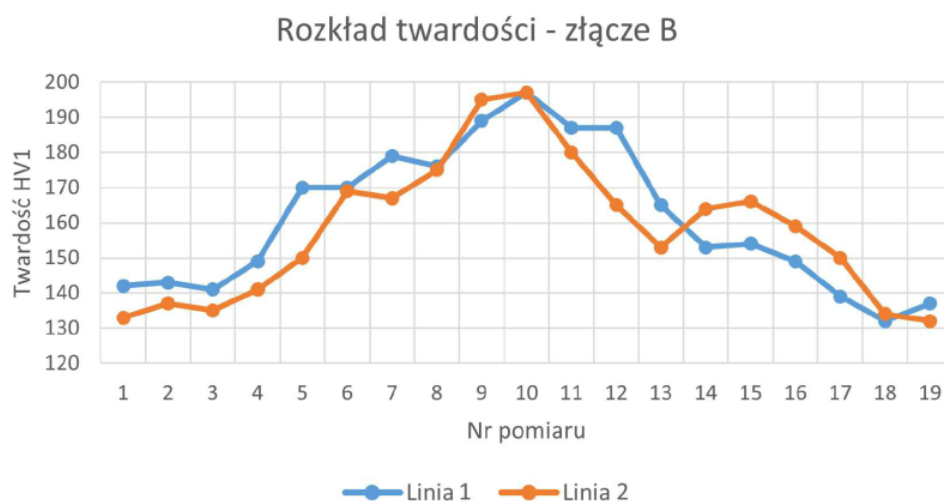


Rys. 92. Widok radiogramu złącza B

Wartości pomiarów twardości HV1 zestawiono w tabeli 15, natomiast wykres rozkładu twardości przedstawiono na rysunku 93. Średnia twardość spoiny wyniosła 171 HV w linii pomiarowej 1 oraz 182 HV w linii 2. W strefie wpływu ciepła średnie wartości twardości wyniosły odpowiednio 157 HV i 155 HV [62].

Tab. 15. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza B

Linia	MR		SWC					Spoina					SWC					MR	
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	142	143	141	149	170	170	179	176	189	197	187	187	165	153	154	149	139	132	137
2	140	147	148	149	152	153	184	180	176	173	170	167	168	163	157	151	147	145	136



Rys. 93. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza B

12.2.3. Spawanie metodą LBW (z materiałem dodatkowym)

Złącze C spawano metodą 521, wykorzystując urządzenie LightWELD 1500 XC. Do spawania zastosowano materiał dodatkowy w postaci drutu litego, gatunku G 3Si1 zgodnego z normą PN-EN ISO 14341, marki T20 Tysweld, o średnicy 1,2 mm. Proces spawania prowadzono zgodnie z wstępną instrukcją spawania nr 9/pWPS [zał. 10]. Parametry spawania przedstawiono w tabeli 16.

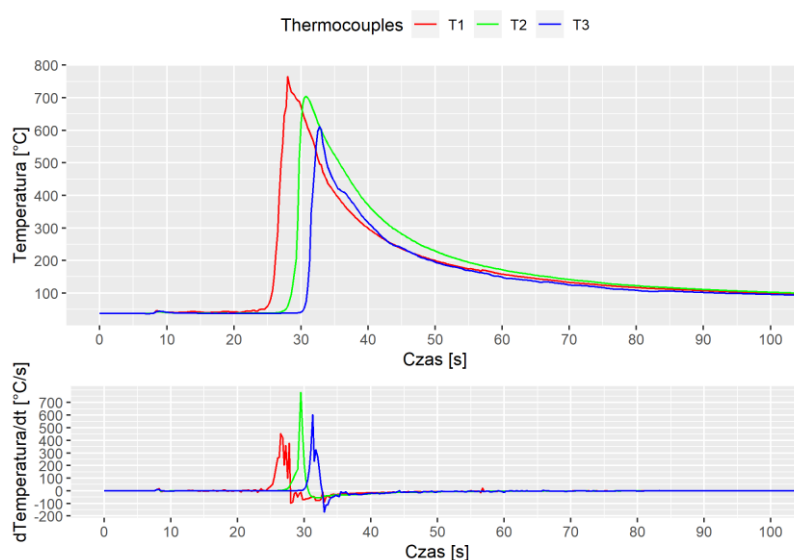
Tab. 16. Parametry spawania dla złącza C

Moc spawania, [W]	Prędkość podawania drutu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/min]	Energia Liniowa, [kJ/mm]
1200	40	30	0,24

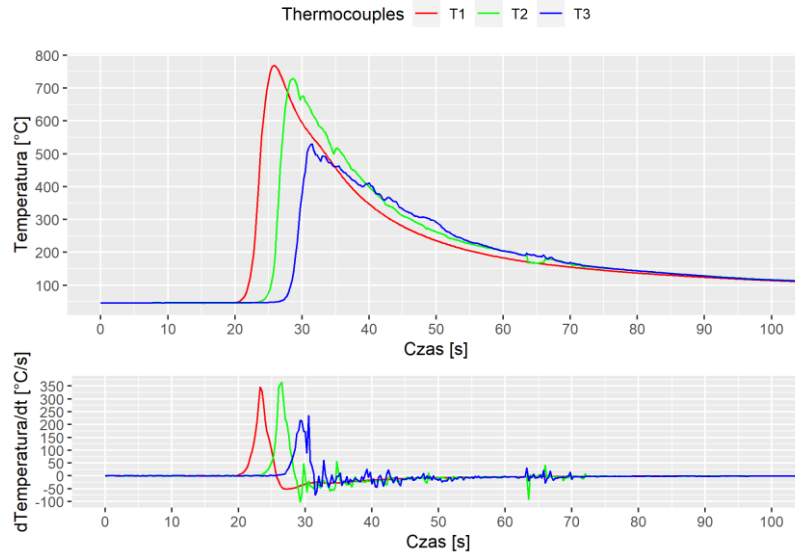
W tabeli 17 zestawiono czasy nagrzewania od temperatury 120°C do temperatury maksymalnej oraz czasy chłodzenia od temperatury maksymalnej do 120°C. Na rysunku 94 przedstawiono wykres spawalniczego cyklu cieplnego dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spoiny, natomiast na rysunku 95 – dla termopar umieszczonych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spoiny.

Tab. 17. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza C

Odległość termopary od osi spoiny, [mm]	Nr termopary	Czas nagrzewania od 120°C do t max, [s]	Czas chłodzenia od t max do 120°C, [s]	Suma czasów nagrzewania i chłodzenia, [s]	Czas chłodzenia od 800 do 500°C t _{8/5} , [s]
2	T1	2,25	49,25	51,5	-
	T2	2	50,75	52,75	-
	T3	1,75	40,75	42,5	-
4	T1	3,5	67,75	71,25	-
	T2	4,5	66,25	70,75	-
	T3	3	58	61	-

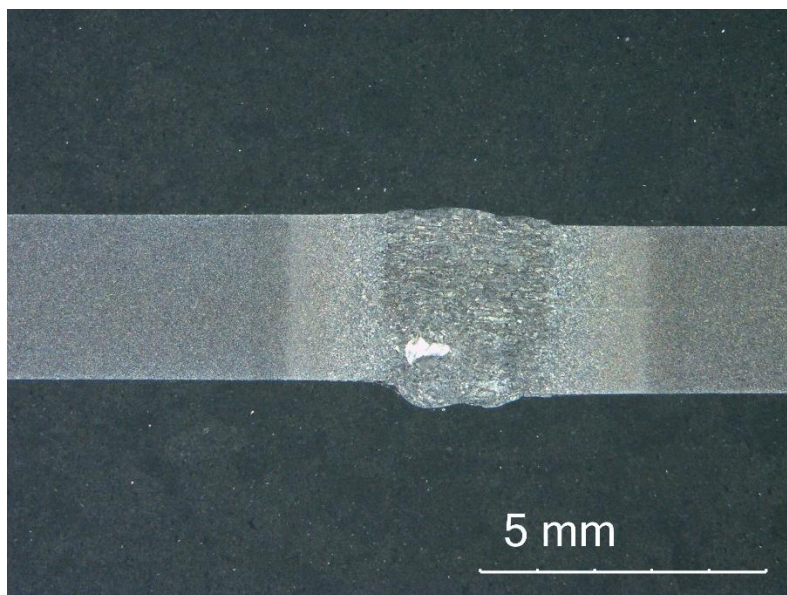


Rys. 94. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza C dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury

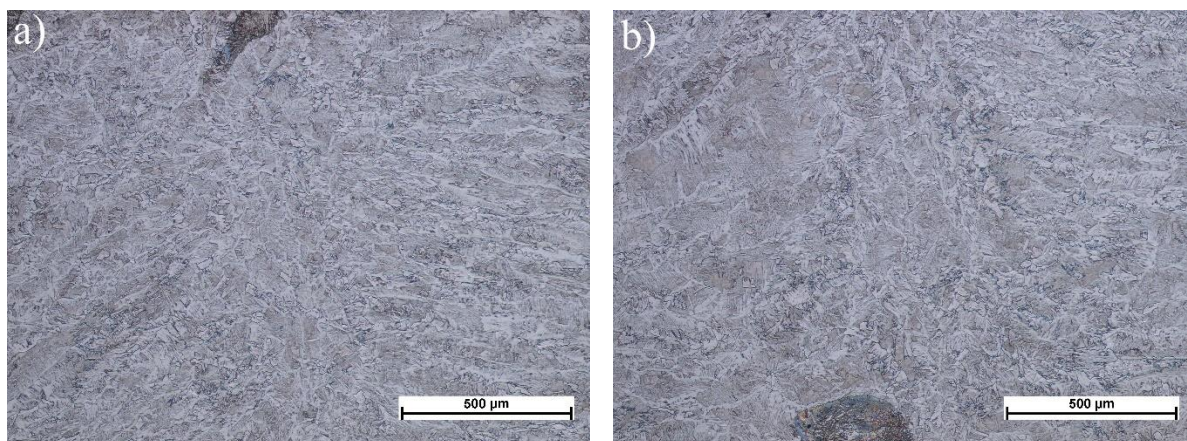


Rys. 95. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza C dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury

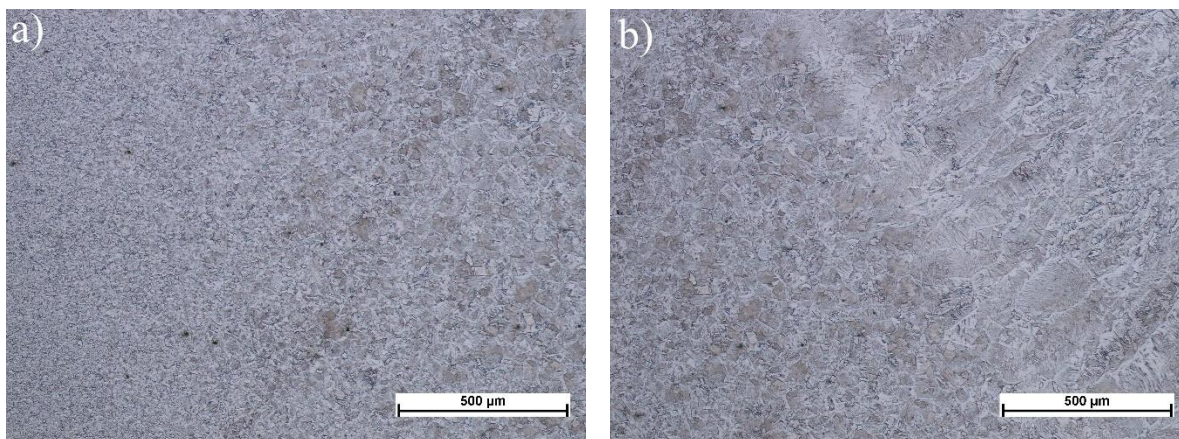
Na rysunku 96 przedstawiono widok przekroju złącza. Powierzchnia spoiny wynosiła $9,56 \text{ mm}^2$, natomiast strefy wpływu ciepła – $12,33 \text{ mm}^2$. Widoki mikrostruktury spoiny zilustrowano na rysunkach 97a÷b, a strefy wpływu ciepła oraz linii wtopienia na rysunkach 98a÷b. W strefie wpływu ciepła złącza C zaobserwowano strukturę bainityczno-ferrytyczną o zróżnicowanej wielkości ziaren, z największym rozrostem ziarna w rejonie linii wtopienia. Dodatkowo wykonano badania radiograficzne, których wyniki przedstawiono na radiogramie (rysunek 99). Stwierdzono liczne pory w rejonie linii wtopienia po obu stronach spoiny.



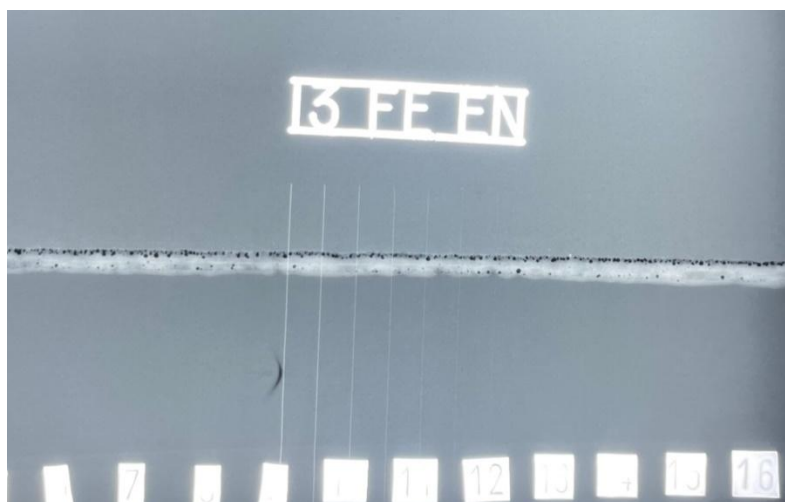
Rys. 96. Widok makroskopowy przekroju złącza C, pow. 8x



Rys. 97. Mikrostruktura spoiny złącza C, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny



Rys. 98. Mikrostruktura złącza C, pow. 50x: a) strefa wpływu ciepła, b) obszar linii wtopienia

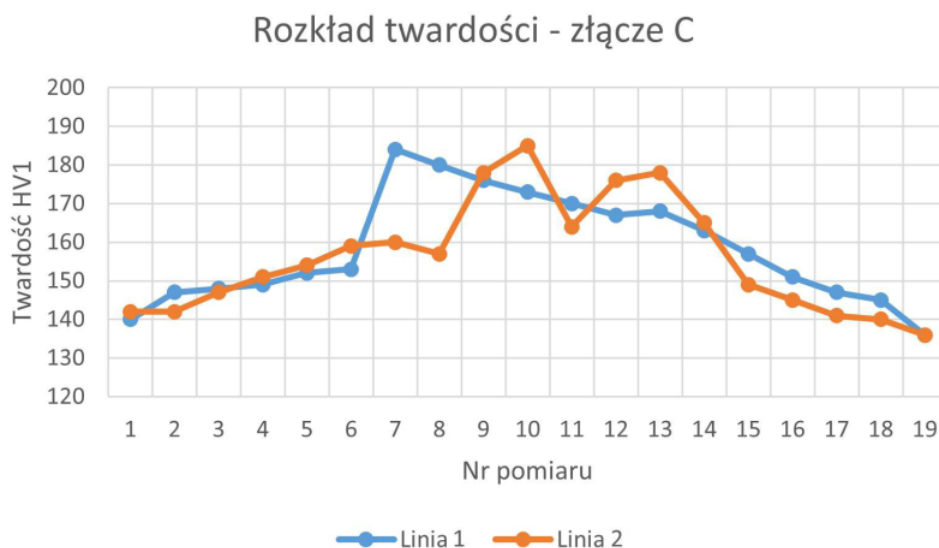


Rys. 99. Widok radiogramu złącza C

Wartości pomiarów twardości HV1 przedstawiono w tabeli 18, natomiast wykres twardości na rysunku 100. Średnia twardość spoiny w linii 1 wynosiła 182 HV, a w linii 2 – 173 HV. Analogicznie, w strefie wpływu ciepła wartości twardości wynosiły odpowiednio 134 HV oraz 142 HV.

Tab. 18. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza C

Linia	MR		SWC					Spoina					SWC					MR	
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	140	147	148	149	152	153	184	180	176	173	170	167	168	163	157	151	147	145	136
2	142	147	151	154	159	160	157	178	185	164	176	178	165	149	145	141	140	136	136



Rys. 100. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza C

12.2.4. Podsumowanie optymalizacji II

Na podstawie przeprowadzonych badań porównawczych spawania metodą TIG oraz ręcznego spawania laserowego (LBW), zarówno z zastosowaniem materiału dodatkowego, jak i bez, sformułowano następujące wnioski:

- dokonano właściwego doboru parametrów technologicznych dla każdej z metod spawania,
- zarejestrowano i przeanalizowano przebiegi cykli cieplnych w procesie spawania,
- wyniki pomiarów jednoznacznie wykazały, że spawanie metodą LBW wiąże się z istotnie niższymi temperaturami nagrzewania spawanych elementów w porównaniu do metody TIG. Ponadto odnotowano krótsze czasy nagrzewania i chłodzenia w zakresie temperatur powyżej 120° C,
- najkorzystniejsze parametry cieplne uzyskano dla spawania metodą LBW z zastosowaniem materiału dodatkowego. W tej konfiguracji zarejestrowano najniższe

temperatury procesu oraz najkrótszy czas przebywania w zakresie temperatur powyżej 110°C. Efekt ten wynikał z faktu, że ciepło generowane przez źródło energii w pierwszej kolejności nagrzewało materiał dodatkowy, który następnie nadtapiał krawędzie złącza. W przypadku spawania bez materiału dodatkowego bezpośredniemu nagrzewaniu były poddawane krawędzie łączonych blachy,

- powierzchnia przekroju poprzecznego spoiny w złączu B stanowiła 53% powierzchni spoiny złącza A, natomiast w złączu C – 58%,
- w odniesieniu do strefy wpływu ciepła (SWC), powierzchnia jej przekroju w złączu B wynosiła 57% powierzchni SWC złącza A, natomiast w złączu C – 51%,
- przeprowadzone badania nieniszczące (wizualne, penetracyjne, magnetyczno – proszkowe) oraz badania makroskopowe potwierdziły uzyskanie poziomu jakości B dla wszystkich złączy spawanych,
- dodatkowe badania radiograficzne złączy spawanych metodą LBW ujawniły obecność porowatości wzdłuż linii wtopienia, co świadczy o konieczności dalszej optymalizacji procesu,
- analiza mikrostruktury złączy wykazała różnice w strukturze stref wpływu ciepła, jednak nie miały one istotnego wpływu na właściwości eksploatacyjne złączy,
- metoda LBW wykazała ponad dwukrotnie wyższą prędkość spawania w porównaniu do spawania metodą TIG,
- spawanie LBW bez materiału dodatkowego wymagało znacznie większej precyzji przygotowania krawędzi oraz dokładniejszego dopasowania elementów oraz precyzji podczas samego procesu spawania – w przeciwieństwie do metod TIG i LBW z materiałem dodatkowym, które są bardziej tolerancyjne względem przygotowania złączy,
- analiza rozkładu ciepła i szerokości SWC potwierdziła, że spawanie metodą LBW wprowadzało mniejszą ilość energii cieplnej w porównaniu do metody TIG,
- niższe energie liniowe oraz mniejsze objętości spoin przy spawaniu metodą LBW (szczególnie z pionową linią wtopienia) skutkowały zmniejszeniem odkształceń spawalniczych względem metody TIG,
- główne niezgodności wykryte w spoinach LBW były wynikiem dużych gradientów temperatur w rejonie linii wtopienia. Ze względu na małą objętość jeziora ciekłego metalu, proces jego krzepnięcia przebiegał bardzo szybko, uniemożliwiając skuteczne odgazowanie. Zjawisko to nie występowało przy metodzie TIG. Możliwym

czynnikiem wpływającym na porowatość mógł być również niewłaściwy dobór gazu osłonowego,

- Pomimo osiągnięcia najkorzystniejszych wyników badań w przypadku spawania LBW z materiałem dodatkowym, osiągane temperatury w dalszym ciągu były za wysokie. Przeprowadzono dodatkowe badania wykładki kompozytowej PUGA – analizę TGA (analizę termogravimetryczną). $T(\text{onset})$, czyli ekstrapolowana temperatura degradacji oscylowała w zakresie $290\div 302^{\circ}\text{C}$, co świadczy o fakcie, że wykładki kompozytowe posiadają wyższą wytrzymałość temperaturową, niż pierwotnie została ona określona przez producenta rur [43].
- w dalszym etapie zaplanowano optymalizację procesu spawania ręcznego LBW z zastosowaniem materiału dodatkowego, który umożliwia spawanie przy mniejszej dokładności przygotowania krawędzi oraz pozwala na spawanie grubszych materiałów z ukosowaniem innym niż typu I,
- zaplanowano również optymalizację jakości wykonywanych złączy poprzez eksperymentalną ocenę wpływu różnych gazów osłonowych na proces spawania.

12.3. Optymalizacja III - spawanie blach LBW: spawanie w osłonie różnych gazów osłonowych

Producenci urządzeń do ręcznego spawania laserowego (LBW), w zależności od mocy lasera, określają maksymalne grubości materiałów, które mogą być skutecznie spawane przy zastosowaniu pojedynczego ściegu. Dotyczy to zarówno złączy doczołowych, ukosowanych na I, jak i złączy teowych. W praktyce wiele urządzeń posiada fabrycznie zaprogramowane tryby pracy dla określonych grup materiałowych, takich jak stale węglowe, stale nierdzewne czy aluminium. Programy te często ograniczają maksymalną grubość elementów spawanych do zakresu 3–4 mm i nie przewidują możliwości realizacji spawania wielościegowego. Ponadto, producenci sprzętu określają zalecane gazy osłonowe odpowiednie dla danego rodzaju materiału oraz warunków procesu. Przykładowe wytyczne dotyczące doboru gazu osłonowego oraz parametrów technologicznych dla różnych typów materiałów przedstawiono w karcie trybów spawania firmy IPG Photonics [zał. 11].

Proces ręcznego spawania laserowego (LBW) charakteryzuje się tym, że oscylacja wiązki laserowej nie jest realizowana przez operatora, lecz stanowi parametr programowalny, sterowany bezpośrednio przez urządzenie. W trakcie spawania spawacz wykonuje wyłącznie

ruch wzdłużny w osi spoiny, natomiast oscylacja (np. liniowa, wahadłowa) realizowana jest automatycznie przez układ sterowania urządzenia. W konstrukcji pierwszych generacji urządzeń do ręcznego spawania LBW, moc wiązki laserowej była utrzymywana na stałym poziomie – 100% zaprogramowanej wartości – niezależnie od aktualnego położenia oscylacji, zarówno w centralnym punkcie (na osi spoiny), jak i w położeniach skrajnych. Tego typu rozwiązanie technologiczne może prowadzić do powstawania niezgodności spawalniczych, w szczególności porowatości rozmieszczonej wzdłuż linii wtopienia. Zjawisko to wynika z charakterystycznych warunków cieplnych procesu LBW: zastosowanie punktowego źródła ciepła oraz mała objętość jeziora ciekłego metalu skutkują znacznie wyższymi prędkościami chłodzenia w porównaniu do konwencjonalnych procesów spawania łukowego (np. TIG). Szybkie odprowadzanie ciepła uniemożliwia pełne odgazowanie ciekłego metalu przed jego krzepnięciem, co sprzyja uwięzieniu pęcherzy gazowych w spoinie – najczęściej w obszarze linii wtopienia. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku spawania materiałów o większej grubości, które cechują się wyższą przewodnością cieplną i szybszym odprowadzeniem ciepła z obszaru spoiny. W nowszych konstrukcjach urządzeń do ręcznego LBW wprowadzono możliwość programowania zmiennej mocy wiązki laserowej w zależności od aktualnego położenia oscylacji. Funkcjonalność ta, określana najczęściej jako kompensacja mocy, pozwala na redukcję mocy wiązki w punktach krańcowych oscylacji (tj. najbardziej oddalonych od osi spoiny), co może skutecznie ograniczyć przegrzewanie brzegów spoiny oraz zmniejszyć ryzyko powstawania porowatości. Parametr kompensacji mocy wyrażany jest zwykle w procentach wartości referencyjnej (bazowej) mocy spawania.

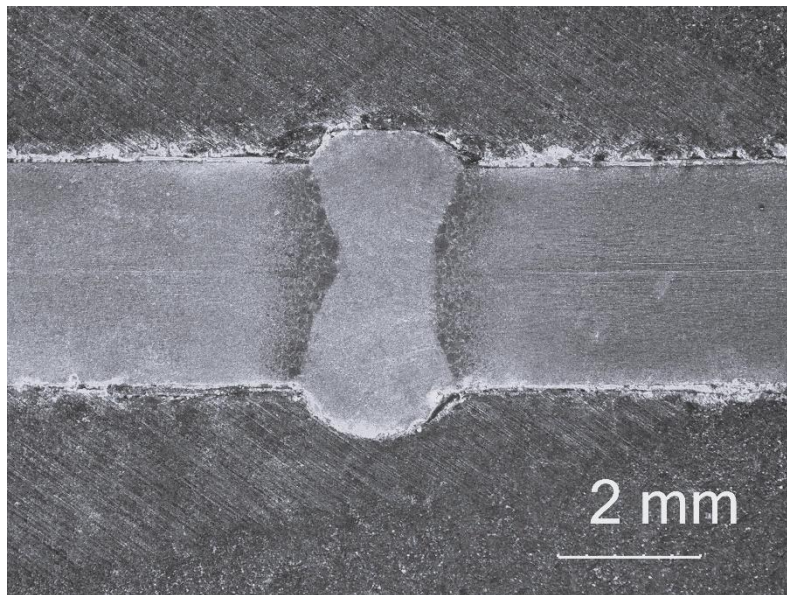
Ze względu na niezadowalające wyniki w zakresie występowania niezgodności spawalniczych, podjęto decyzję o modyfikacji parametru kompensacji, ustalono ją na wartość 50%. Oznaczało to, że w skrajnych punktach oscylacji moc wiązki lasera wynosiła 50% mocy spawania. Założono, że taka zmiana wpłynie na obniżenie temperatury w rejonie linii wtopienia, co z kolei miało wywołać łagodniejsze warunki chłodzenia, charakteryzujące się niższymi prędkościami.

Przeprowadzono próby spawania metodą LBW z użyciem materiału dodatkowego oraz z zastosowaniem różnych gazów osłonowych: azotu, argonu oraz mieszanki M21 (82% Argonu, 18% CO₂). Odpowiednio oznaczono próbki jako N1, A1 i M1. Celem badań było uzyskanie złączy spawanych spełniających wymagania poziomu jakości B oraz ocena struktur metalograficznych i objętości spoin.

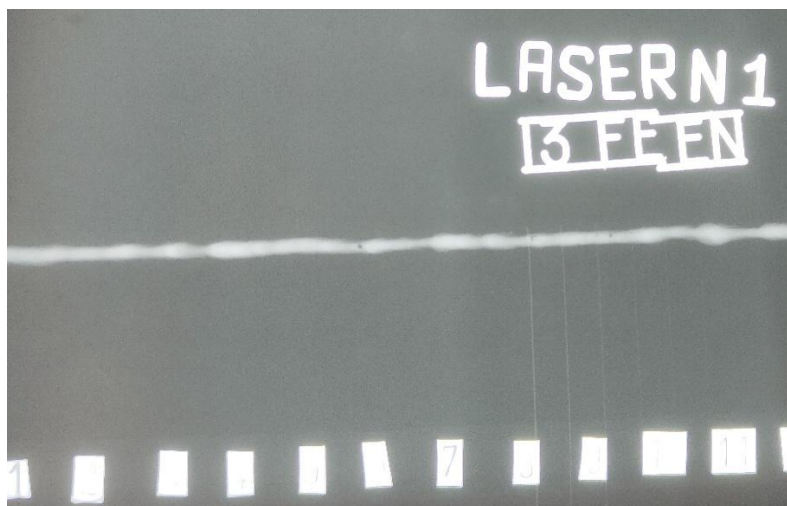
--	--	--	--	--	--	--	--

12.3.1. Spawanie metodą LBW w osłonie azotu

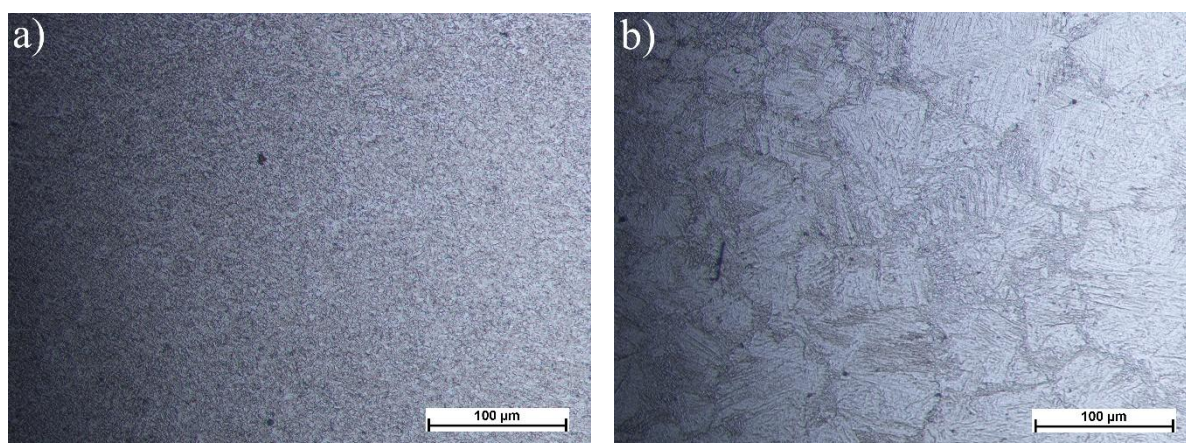
Na rysunku 102 przedstawiono przekrój złącza N1, na którym zaobserwowano prawidłowo uformowaną spoinę bez występowania niezgodności spawalniczych. Na rysunku 103 zaprezentowano radiogram, na którym zaobserwowano pojedyncze pory w obrębie spoiny, niemające istotnego wpływu na jej jakość. Widoczne są również lokalne obszary braku przetopu, które przypisano niedostatecznemu doświadczeniu spawacza wykonującego spoinę; tego rodzaju niezgodności nie uwzględniano w ocenie jakości połączenia. Widoki mikrostruktury spoiny i strefy wpływu ciepła przedstawiono na rysunku 104a÷b. Mikrostruktura spoiny charakteryzowała się strukturą bainityczną, a strefa wpływu ciepła strukturą bainityczną z ferrytem płytkowym Widmanstättena z wyraźnie zaznaczonymi granicami byłego austenitu.



Rys. 102. Widok makroskopowy przekroju złącza N1, pow. 8x



Rys. 103. Widok radiogramu złącza N1

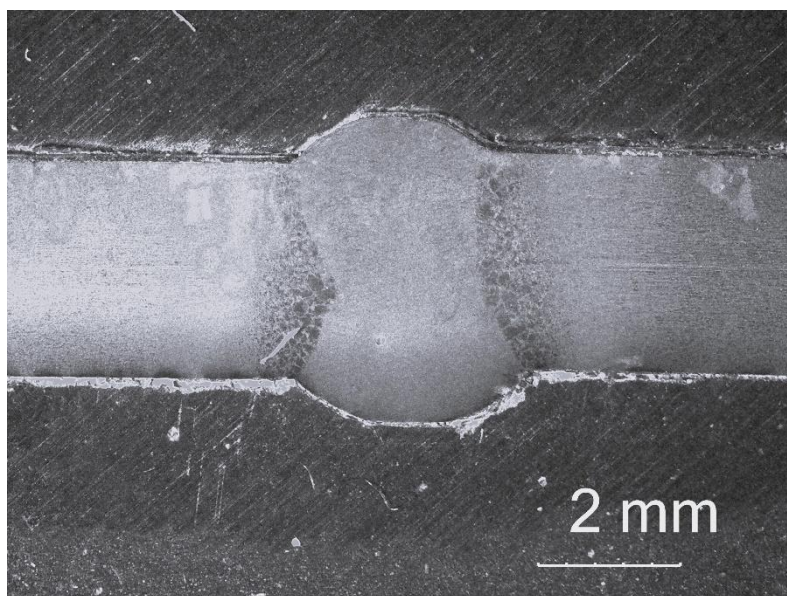


Rys. 104. Mikrostruktura złącza N1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu ciepła

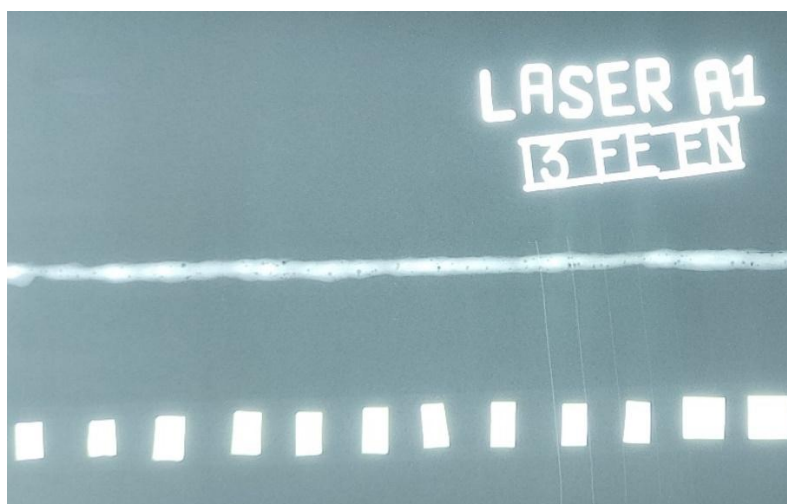
12.3.2. Spawanie metodą LBW w osłonie argonu

Na rysunku 105 przedstawiono przekrój złącza A1. Spoina charakteryzowała się prawidłowym kształtem geometrycznym i nie wykazywała niezgodności. Radiogram zamieszczony na rysunku 106 ujawnia jednak liczne pory, które zdyskwalifikowały złącze A1 z punktu widzenia wymagań jakościowych. Dodatkowo zidentyfikowano lokalne braki przetopu, które przypisano niewystarczającemu doświadczeniu spawacza — tego rodzaju niezgodności nie uwzględniono w analizie. Mikrostruktury spoiny i strefy wpływu ciepła przedstawiono na rysunku 107a÷b. Spoina charakteryzowała się strukturą bainityczną, o mniejszym stopniu rozdrobnienia w porównaniu do złącza N1. Strefa wpływu ciepła

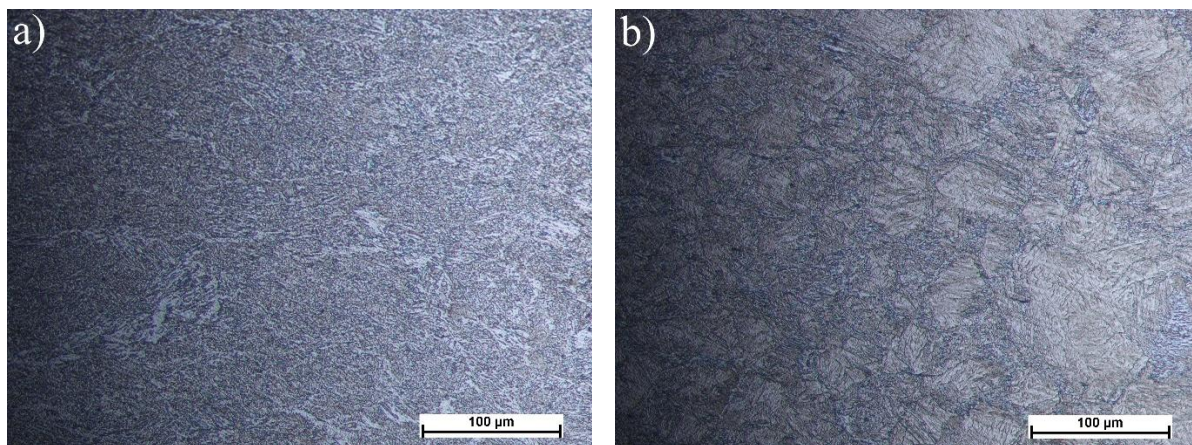
cechowała się strukturą porównywalną do tej obserwowanej w przypadku spawania w osłonie azotu.



Rys. 105. Widok makroskopowy przekroju złącza A1, pow. 8x



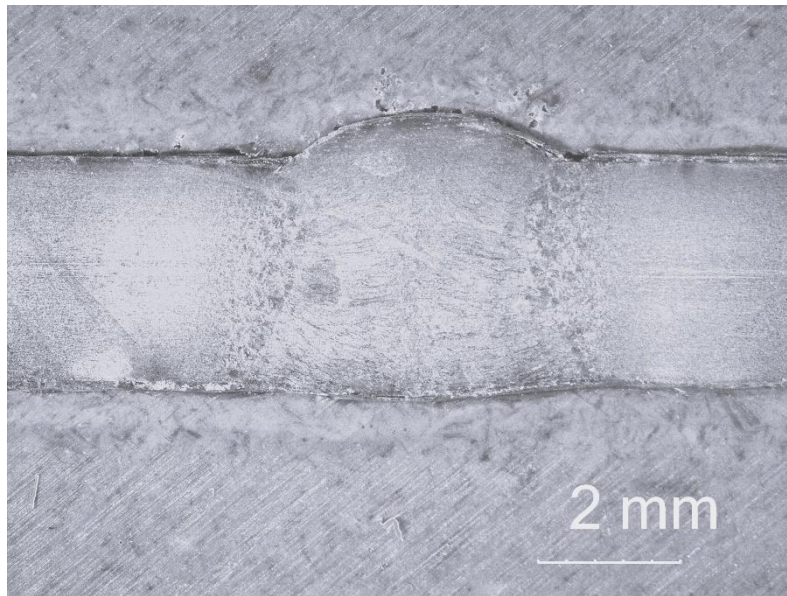
Rys. 106. Widok radiogramu złącza A1



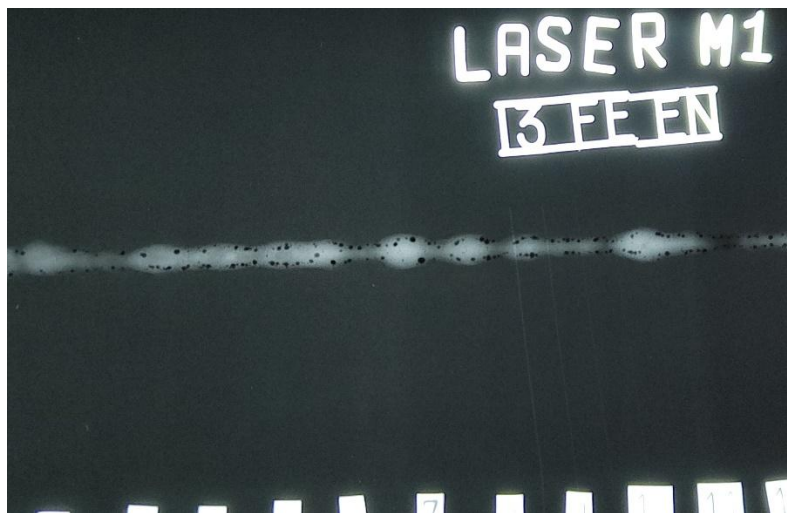
Rys. 107. Mikrostruktura złącza A1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu ciepła

12.3.3. Spawanie metodą LBW w osłonie mieszanki M21

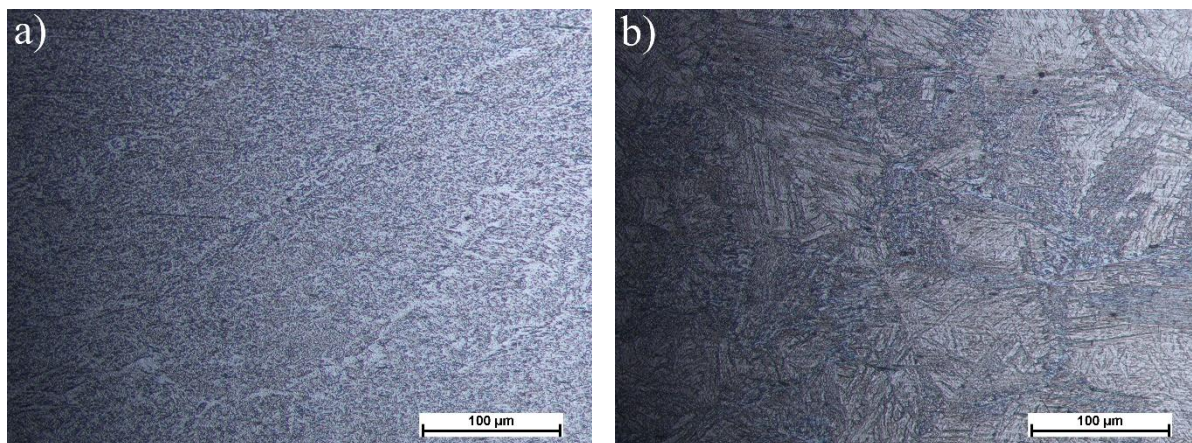
Na rysunku 108 przedstawiono przekrój złącza M1. Spoina cechowała się prawidłowym kształtem oraz brakiem niezgodności powierzchniowych. Radiogram zamieszczony na rysunku 109 ujawnił jednak liczne pory, które zdyskwalifikowały złącze M1 z punktu widzenia wymagań jakościowych. Dodatkowo zidentyfikowano lokalne braki przetopu, będące wynikiem ograniczonych umiejętności spawacza, tego rodzaju niezgodności nie zostały uwzględnione w analizie. Mikrostruktury spoiny i strefy wpływu ciepła zaprezentowano na rysunku 110a÷b. W spoinie występowała struktura bainityczna, mniej rozdrobniona niż w przypadku złącza N1. Strefa wpływu ciepła wykazywała podobną charakterystykę mikrostrukturalną, jak w dwóch poprzednich przypadkach.



Rys. 108. Widok makroskopowy przekroju złącza M1, pow. 8x



Rys. 109. Widok radiogramu złącza M1



Rys. 110. Mikrostruktura złącza M1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu

12.3.4. Podsumowanie optymalizacji III

W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych dokonano porównania wpływu rodzaju gazu osłonowego (azotu, argonu oraz mieszanki M21) na jakość oraz właściwości złączy spawanych metodą ręcznego spawania laserowego (LBW) z użyciem materiału dodatkowego w postaci drutu litego. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

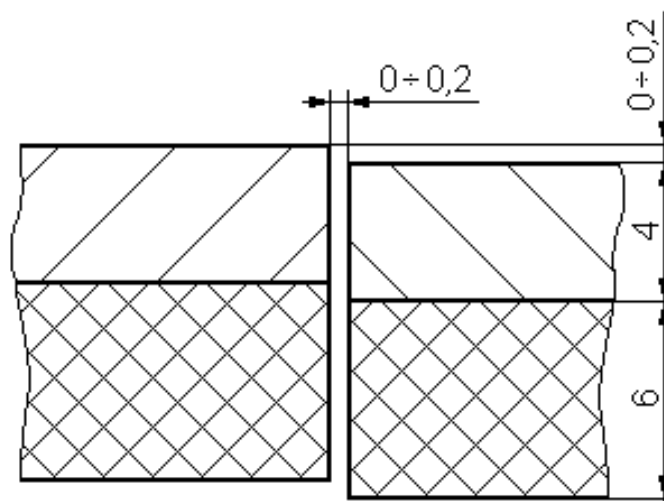
- przeprowadzono próby spawania ręcznego LBW z zastosowaniem materiału dodatkowego do spawania w postaci drutu litego w osłonie trzech gazów osłonowych: azotu, argonu i mieszanki M21,
- wszystkie wykonane próbki pozytywnie przeszły badania wizualne,
- badania radiograficzne zakończyły się wynikiem pozytywnym jedynie dla złącza N1; złącza A1 i M1 zawierały liczne pory skutkujące negatywnym wynikiem oceny,
- złącze N1 charakteryzowało się najmniejszą objętością spoiny, natomiast największą objętość wykazywało złącze M1,
- we wszystkich przypadkach obserwowano charakterystyczny dla spawania laserowego pionowy profil przekroju spoiny,
- wszystkie złącza wykazywały prawidłową strukturę po spawaniu, zgodną z oczekiwaniami dla danej technologii spawania,
- prawidłową jakość złącza uzyskano w przypadku spawania w osłonie azotu, co potwierdziły przeprowadzone badania nieniszczące i niszczące.

13. Spawanie blach i rur stalowych z wykładkami kompozytowymi metodą LBW

Po pozytywnym zakończeniu prób ręcznego spawania laserowego (LBW) w osłonie azotu oraz uzyskaniu wyników badań analizy TGA, kolejny etap badań obejmował dobór parametrów procesu dla połączeń spawanych blach stalowych z wykładkami kompozytowymi. Próby przeprowadzono w podstawowej pozycji spawania – podolnej (PA), a następnie w pozycji przymusowej – z góry na dół (PG). Badania przeprowadzono na standardowym produkcie dostawcy, tj. na blachach ze stali S355J2+N o grubości 4 mm, wyposażonych w wykładki kompozytowe o grubości 6 mm, trwale połączonych z podłożem stalowym siłami adhezji. Do tej pory nie osiągnięto zadowalających wyników dla złączy z pełnym przetopem, dlatego dalsze próby przeprowadzono spawając próbki bez pełnego przetopu. Celem przeprowadzonych prób było zbadanie wpływu spawania LBW na zachowanie się wykładki kompozytowej (uszkodzenie lub odspojenie) oraz określenie głębokości wtopienia spoiny. Ponadto, jedynie na płaskiej powierzchni można wykonać badania przyczepności pull-off, które zostały opisane w punkcie 13.1. pracy. Wymaganiem poziomem jakości wykonanych złączy był poziom B. Do spawania zastosowano materiał dodatkowy w postaci drutu litego G 3Si1 marki T20 Tysweld, o średnicy 1,2 mm. Wyniki badań zostały przedstawione w artykule [64].

13.1. Spawanie blach z wykładkami w pozycji PA – dobór parametrów

Podczas prób spawania w pozycji podolnej celowo zainicjowano niezgodności początkowe, polegające na wprowadzeniu szczeliny oraz przesunięć liniowych blach, co zostało przedstawione na rysunku 111. Spawanie realizowano na podstawie wstępnej instrukcji spawania nr 13/pWPS [zał. 15]. Parametry spawania oraz szczegóły dotyczące wprowadzonych niezgodności zostały zawarte w tabeli 20, w której dodatkowo podano zmierzone głębokości wtopienia.

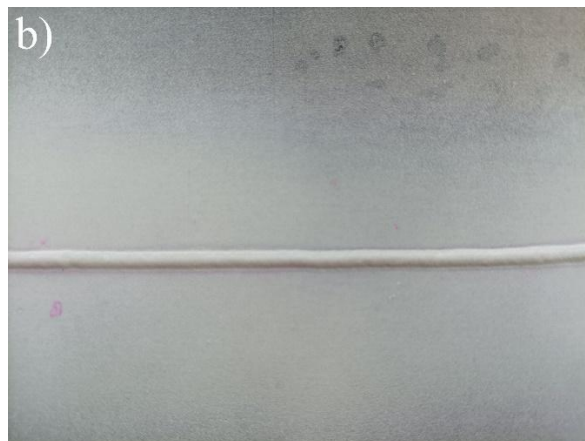


Rys. 111. Szkic schematu przygotowania blach z wykładkami do spawania

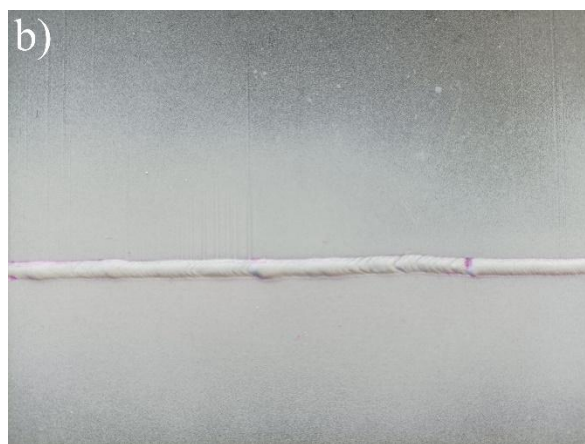
Tab. 20. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności

Nr próbki	Szczelina, [mm]	Przesunięcie osiowe, [mm]	Moc wiązki, [W]	Prędkość podawania drutu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/m]	Energia liniowa bez współczynnika metody, [kJ/mm]	Głębokość wtopienia, [mm]
1A	0,2	0	1050	65	52,5	0,12	0,63
2A	0,1	0,1	1200	65	58,5	0,12	0,63
3A	0,1	0,1	1300	65	57,4	0,13	0,97
4A	0	0,2	1500	65	59,4	0,15	0,73
5A	0	0,1	1500	60	59,2	0,15	0,81
6A	0	0,1	1500	55	49,4	0,18	1,03
7A	0	0	1500	50	52,5	0,21	1,29

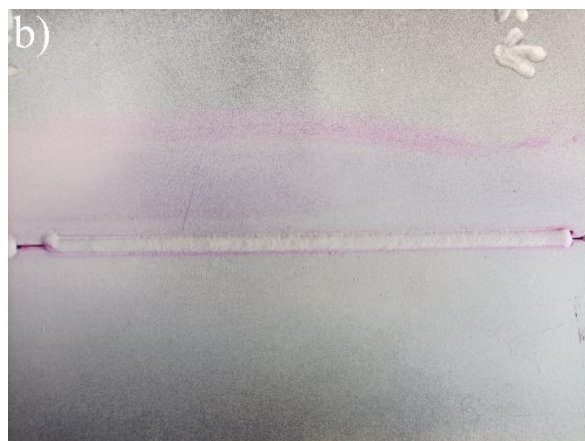
Próbki poddano badaniom wizualnym oraz penetracyjnym od strony lica spoin, których wyniki zilustrowano na rysunkach 112÷118. Pomimo zainicjowanych niezgodności, wszystkie przeprowadzone badania zakończyły się wynikiem pozytywnym. Na rysunku 119 przedstawiono widok próbki spawanej z najwyższą energią liniową (próbka 7A) od strony wykładek kompozytowych, gdzie nie zaobserwowano widocznych uszkodzeń materiału wykładki.



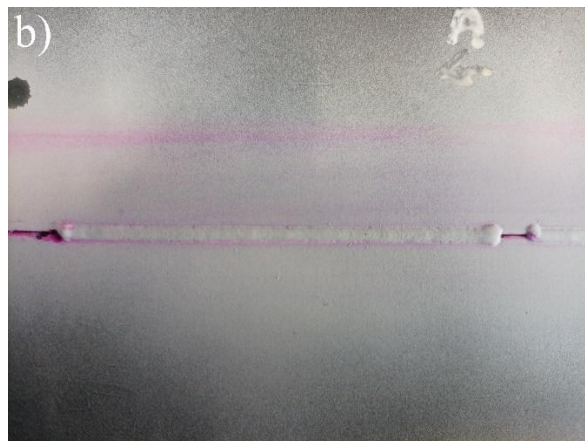
Rys. 112. Widok lica złącza 1A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 113. Widok lica złącza 2A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 114. Widok lica złącza 3A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



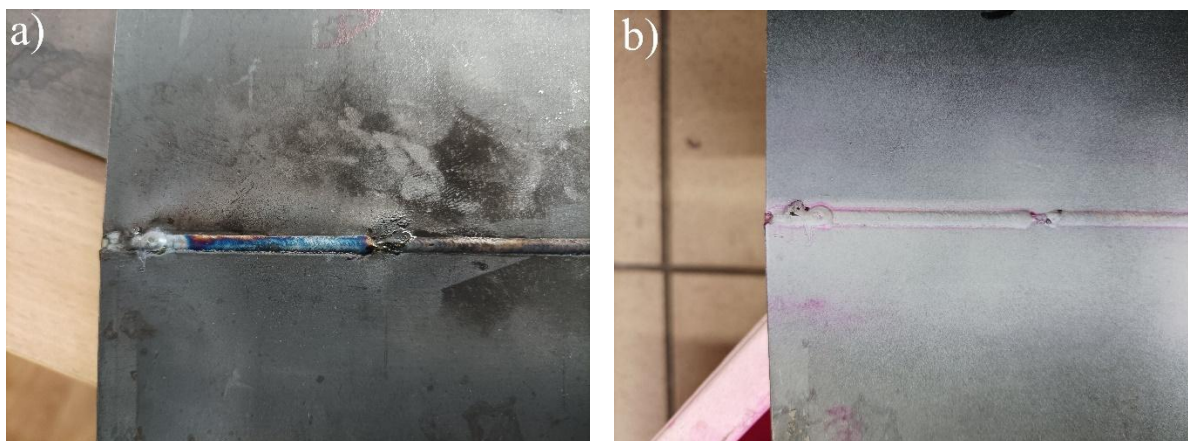
Rys. 115. Widok lica złącza 4A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 116. Widok lica złącza 5A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 117. Widok lica złącza 6A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 118. Widok lica złącza 7A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



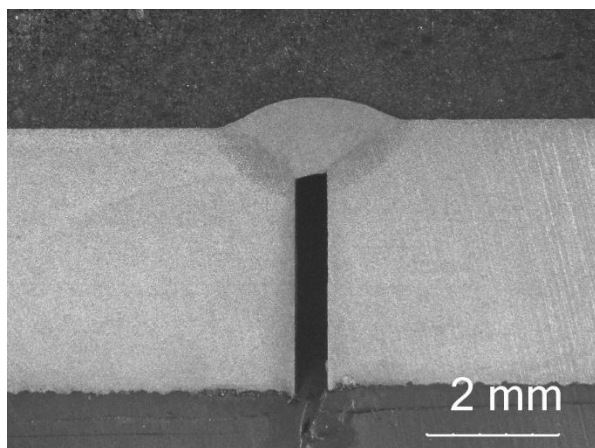
Rys. 119. Widok złącza 7A od strony wykładki kompozytowej (od strony grani)

Kolejnym etapem badań były badania makroskopowe, mające na celu dokonanie pomiaru głębokości wtopienia oraz ocenę jakości przekrojów złączy. Przekroje poprzeczne złączy przedstawiono na rysunkach 120÷126. Pomimo zainicjowanych niezgodności, jakość wykonanych złączy spełniała kryteria odbioru, osiągając poziom jakości B. Zaobserwowano wyraźną zależność głębokości wtopienia od energii liniowej spawania – wraz ze wzrostem energii liniowej zwiększała się głębokość wtopienia. Jednocześnie stwierdzono częściowe odspojenie wykledek kompozytowych naprzeciwko spoiny, w miejscu styku z blachami. Należy jednak zauważyć, że pomiar odspojenia może nie w pełni odzwierciedlać rzeczywisty stan materiału, gdyż odspojenie mogło powstać lub się pogłębić podczas przygotowywania próbek do badań makroskopowych, zwłaszcza podczas szlifowania zglądów metalograficznych.

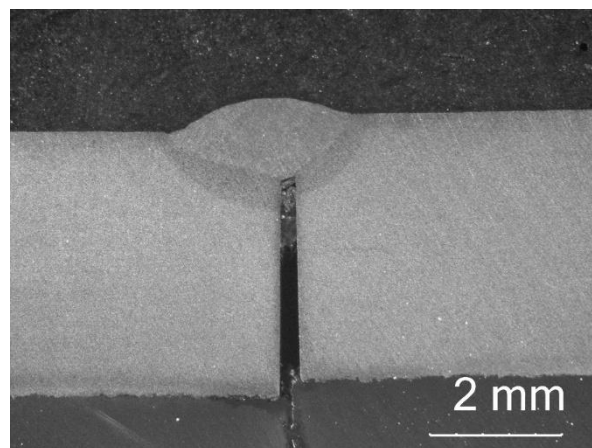
Do weryfikacji przyczepności wykładek po spawaniu zastosowano metodę odrywania (pull-off) zgodnie z normą PN-EN ISO 16276-1. Badania przeprowadzono na próbkach 1A, 7A oraz na materiale w stanie dostawy (bez spoiny). Ze względu na specyfikę badanego materiału, próby wykonano w sposób niestandardowy: norma przewiduje test na litym i ciągłym materiale powłokowym, natomiast w omawianym przypadku stempel testowy został zamocowany centralnie na osi styku wykładek. Kolejną specyfiką badania było zastosowanie metody pull-off dla wykładki kompozytowej o grubości 6 mm. W literaturze przedmiotu metodę tą opisuje się głównie dla powłok cienkowarstwowych (do kilku milimetrów), jednak sama norma nie wprowadza formalnych ograniczeń dotyczących grubości badanej powłoki. Jako kryterium odbioru przyjęto wartość siły odrywania równą 2,5 MPa lub, w przypadku oderwania pomiędzy materiałem wykładki a podłożem stalowym, 5 MPa. W próbkach uzyskano następujące wyniki:

- Próbką 1A: oderwanie przy sile 4,88 MPa, lokalizacja: pomiędzy warstwą kleju a wykładką (BY),
- Próbką 7A: oderwanie przy sile 2,47 MPa, lokalizacja: pomiędzy wykładką a blachą stalową (AB); zaobserwowano pas odspojenia wykładki o szerokości do 3,1 mm w jednym kierunku oraz do 4,9 mm w drugim kierunku od osi spoiny,
- Materiał w stanie dostawy (bez spoiny): siła odrywania 5,26 MPa, lokalizacja oderwania: pomiędzy warstwą kleju a wykładką (BY).

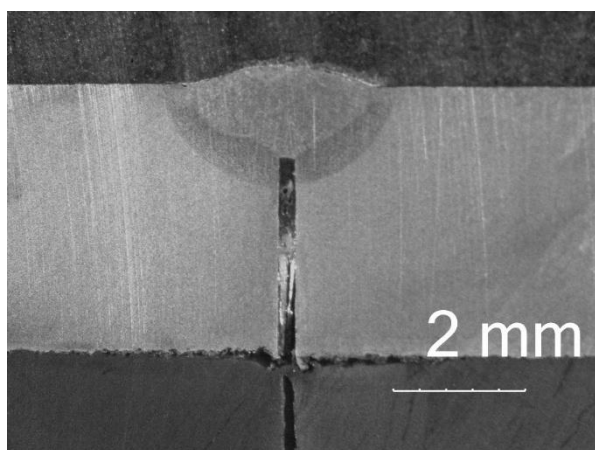
Analiza wyników wykazała, że próbka 1A oraz materiał w stanie dostawy spełniały przyjęte kryteria normy, natomiast próbka 7A nie osiągnęła wymaganej wartości siły odrywania. Należy zaznaczyć, że średnica stempli wynosiła normatywne 20 mm, co w przypadku próbki 7A oznaczało, że ponad połowa odrywanego fragmentu wykładki nie była spójna z podłożem stalowym. Dodatkowo, po badaniu odłączono wykładki z próbek, w których oderwanie nastąpiło pomiędzy wykładką a warstwą kleju. Potwierdzono, że w próbkach 1A oraz materiale w stanie dostawy wykładka nie uległa odspojeniu, co wskazuje na stabilną przyczepność do podłoża. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 127÷129.



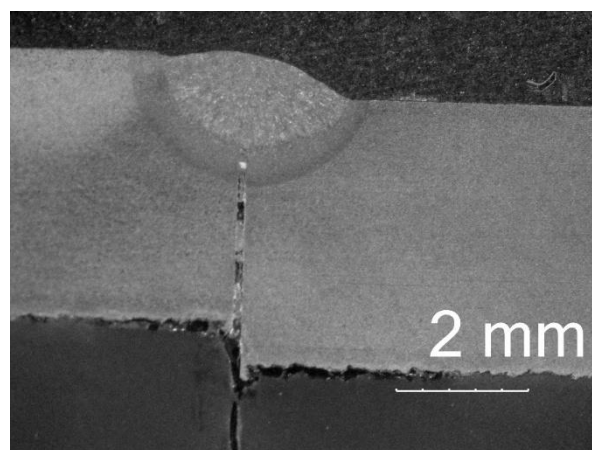
Rys. 120. Makrostruktura złącza 1A



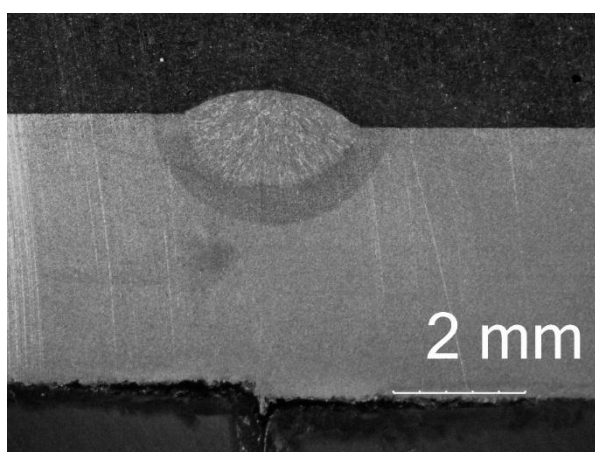
Rys. 121. Makrostruktura złącza 2A



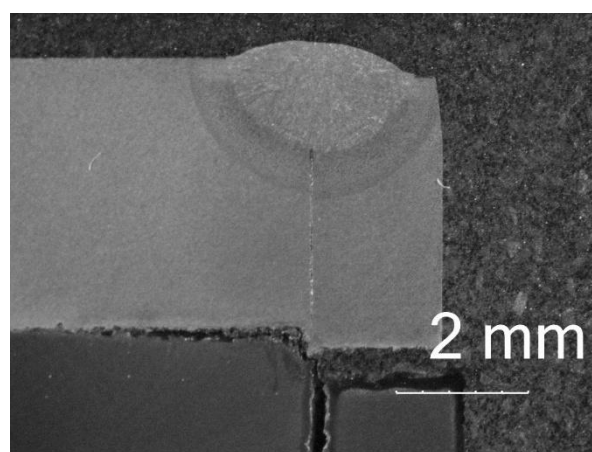
Rys. 122. Makrostruktura złącza 3A



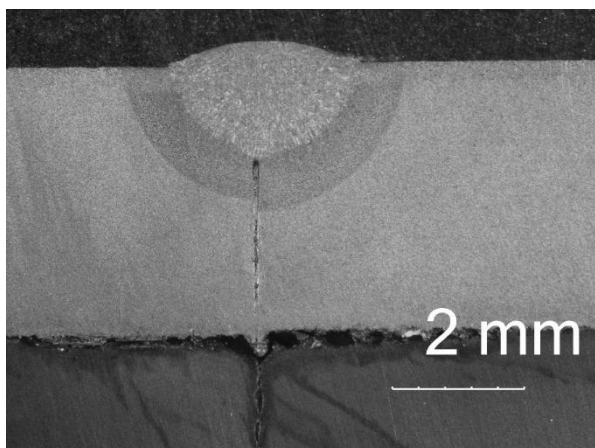
Rys. 123. Makrostruktura złącza 4A



Rys. 124. Makrostruktura złącza 5A



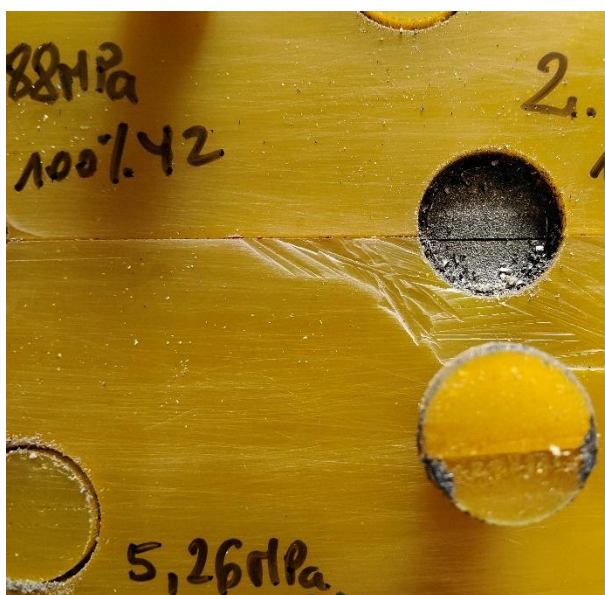
Rys. 125. Makrostruktura złącza 6A



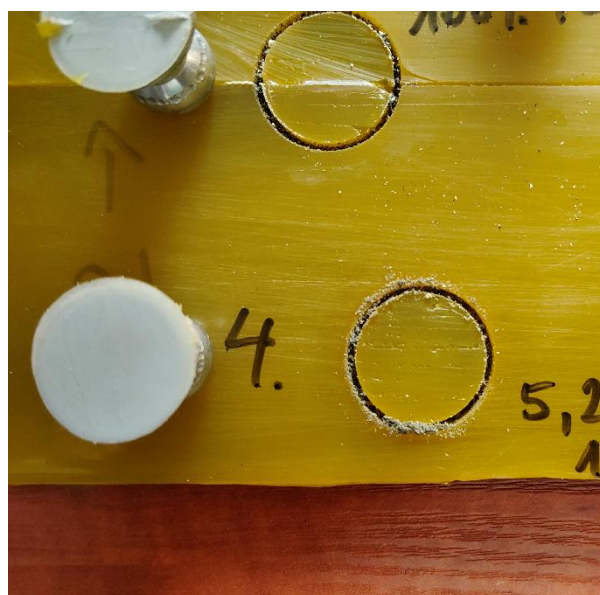
Rys. 126. Makrostruktura złącza 7A



Rys. 127. Widok po badaniu pull-off złącza 1A wraz ze stemplem



Rys. 128. Widok po badaniu pull-off złącza 7A wraz ze stemplem



Rys. 129. Widok po badaniu pull-off materiału w stanie dostawy (bez spoiny) wraz ze stemplem

Podczas prób spawania ręcznego metodą LBW blach z wykładkami w pozycji podolnej dokonano doboru optymalnych parametrów spawania, za najkorzystniejsze uznano złącza oznaczone jako 4A, 5A oraz 6A. Biorąc pod uwagę, że w warunkach eksploatacji spawanie będzie realizowane również w różnych pozycjach, w tym w pozycjach wymuszonych, kolejnym etapem badań było wykonanie spawania w wymuszonej pozycji spawania.

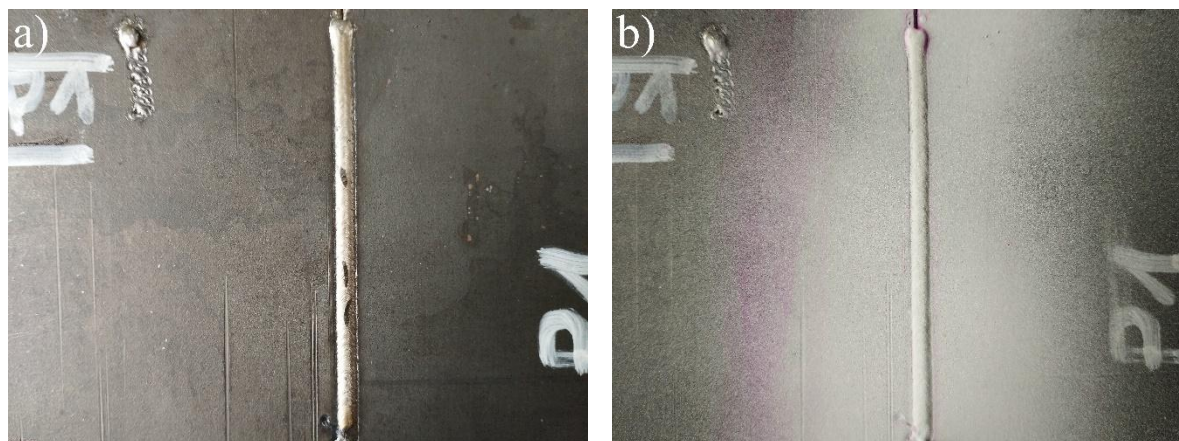
13.2. Spawanie blach z wykładkami w pozycji PG – weryfikacja parametrów

Przeprowadzono spawanie w pozycji wymuszonej PG, spawanie wykonano z zastosowaniem parametrów zbliżonych do tych, które zostały wykorzystane w próbkach 4A, 5A oraz 6A. Proces spawania prowadzono na podstawie wstępnej instrukcji spawania nr 14/pWPS [zał. 16]. Parametry spawania oraz zainicjowane niezgodności przedstawiono w tabeli 21, gdzie dodatkowo podano zmierzone głębokości wtopienia. Wyniki badań zostały przedstawione w artykule [65].

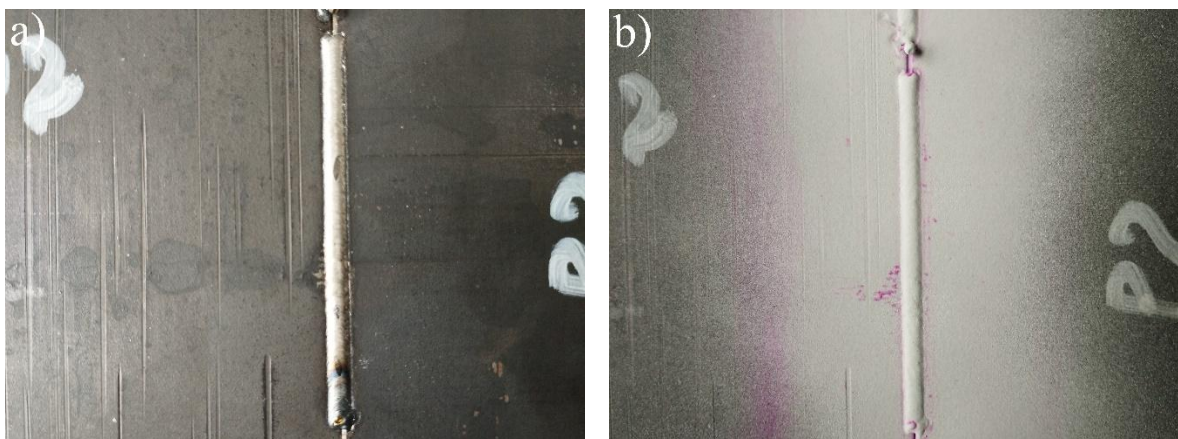
Tab. 21. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności

Nr próbki	Szczelina, [mm]	Przesunięcie osiowe, [mm]	Moc wiązki, [W]	Prędkość podawania drutu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/min]	Energia liniowa bez współczynnika metody, [kJ/mm]	Głębokość wtopienia, [mm]
1P	0	0,1	1500	65	59,4	0,15	0,73
2P	0	0,1	1500	60	59,2	0,15	0,81
3P	0	0,2	1500	55	49,4	0,18	1,03

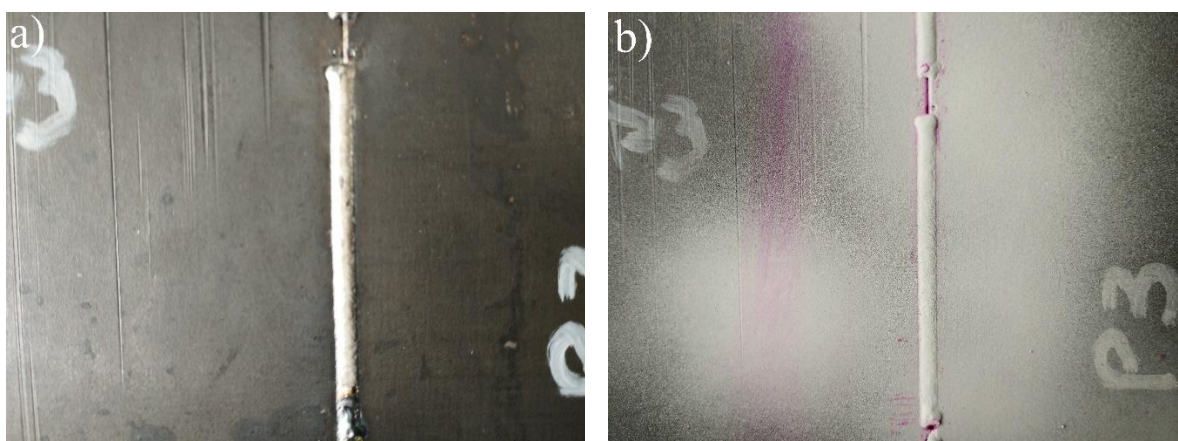
Próbki zostały poddane badaniom wizualnym oraz penetracyjnym od strony lica spoin, których wyniki przedstawiono na rysunkach 130÷132. Pomimo zainicjowanych niezgodności, badania zakończyły się wynikiem pozytywnym. Nie stwierdzono widocznych uszkodzeń wykładek.



Rys. 130. Widok lica złącza 1P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym

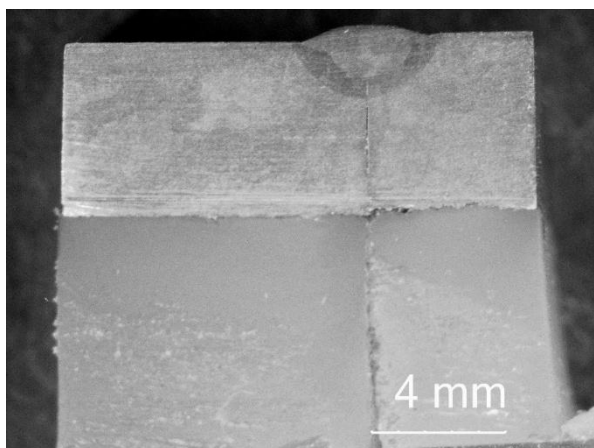


Rys. 131. Widok lica złącza 2P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym

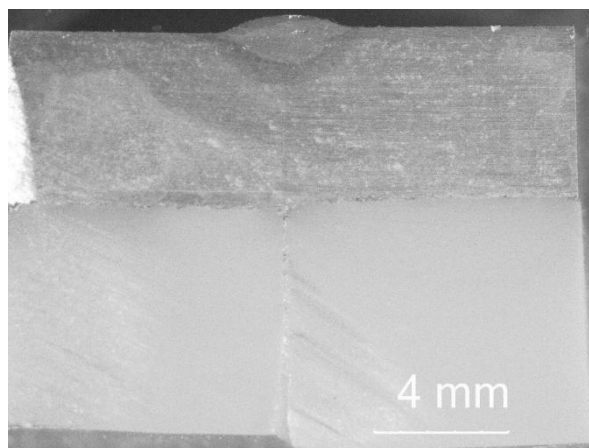


Rys. 132. Widok lica złącza 3P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym

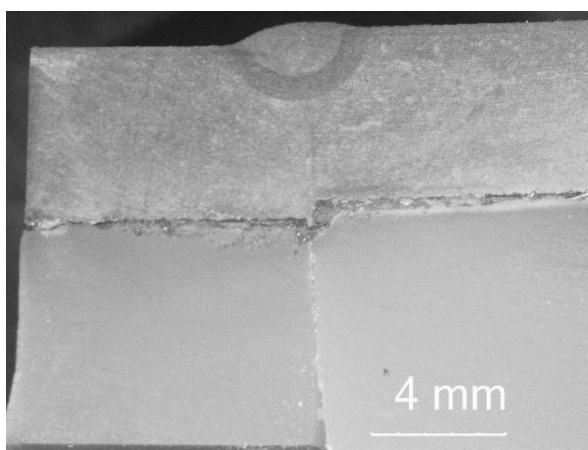
Kolejno przeprowadzono badania makroskopowe w celu dokonania pomiarów głębokości wtopienia oraz oceny jakości przekrojów złączy. Przekroje poprzeczne złączy przedstawiono na rysunkach 133÷135. Pomimo zainicjowanych niezgodności, jakość wykonanych złączy spełniała kryteria odbioru, uzyskując poziom jakości B. Zaobserwowano zależność głębokości wtopienia od energii liniowej spawania, podobną jak w przypadku spawania w pozycji podolnej – im większa energia liniowa, tym większa głębokość wtopienia. Analogicznie do wcześniejszych badań stwierdzono, że pomiędzy spawanymi blachami a wykładkami, naprzeciwko spoiny, może występować częściowe odspojenie wykładek.



Rys. 133. Makrostruktura złącza 1P



Rys. 134. Makrostruktura złącza 2P



Rys. 135. Makrostruktura złącza 3P

Podsumowując, podczas ręcznego spawania LBW blach z wykładkami w pozycji pionowej z góry na dół zaobserwowano, że dla parametrów spawania zbliżonych do tych stosowanych w pozycji podolnej, spoiny charakteryzowały się podobnym kształtem lica, zbliżonymi polami przekrojów oraz porównywalnymi głębokościami wtopienia. Energia liniowa spawania również była na podobnym poziomie. Uzyskano poziom jakości złączy B.

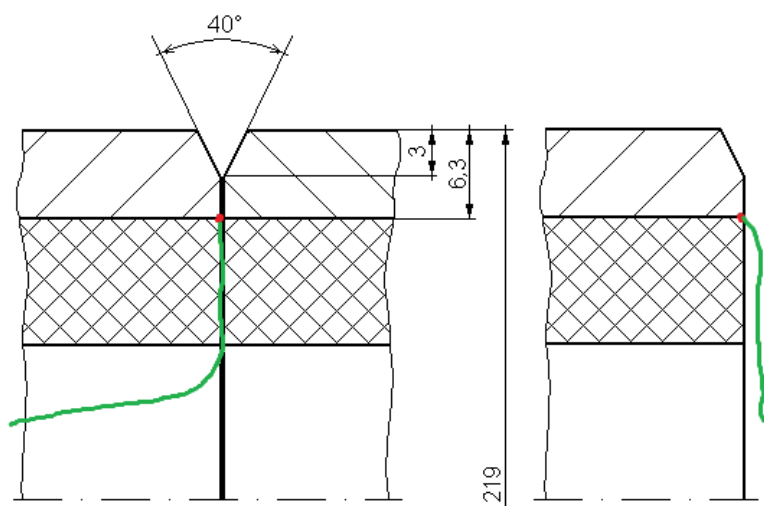
13.3. Spawanie LBW rur z wykładkami

Kolejnym etapem badań było wykonanie spawania rur z wykładkami, wykonano próbkę 1R. W poprzednich badaniach procesu spawania LBW blach z materiałem dodatkowym zaobserwowano, że spawanie z tymi samymi parametrami w pozycjach PA i PG daje podobne

efekty końcowe jeśli chodzi o objętość spoiny, głębokość wtopienia, kształt lica spoiny oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas spawania, co jest znacznie odmienne w przypadku spawania metodami łukowymi.

Badaniu podlegało spawanie rur zawierających wykładki w pozycji PJ. Do prób przygotowano rury ze stali P355 o średnicy $D = 219$ mm oraz grubości ścianki $t = 6,3$ mm. Złącza wykonano zgodnie z rysunkiem 136. Próbkę zostały przygotowane z ukosem V o kącie 40° , z progiem około 3,3 mm. Wysokość progu dobrano na podstawie wcześniejszych badań na blachach o grubości 4 mm jednocześnie zakładając, że większa grubość ścianki rury (objętość materiału rury) będzie lepiej odprowadzać ciepło podczas spawania. Jednocześnie zmieniono ukosowanie, ponieważ nie jest możliwe uzyskanie tak głębokiego wtopienia podczas ukosowania na I. Podczas spawania zastosowano energię liniową spawania na podobnym poziomie jak w przypadku spawania próbki 1A. Cykle cieplne rejestrowano, jak w poprzednich przypadkach przy użyciu tego samego urządzenia i typu termopar.

Spawanie przeprowadzono na podstawie wstępnej instrukcji spawania nr 15/pWPS [zał. 17]. Zastosowano parametry z tabeli 22, wraz z podanymi głębokościami wtopienia. W celu obniżenia temperatury maksymalnej oraz skrócenia czasu nagrzewania i chłodzenia, założono utrzymanie temperatury międzyściegowej na poziomie 30°C . Wyniki badań zostały przedstawione w artykule [66].



Rys. 136. Przygotowanie rur do spawania wraz z zamontowaną termoparą: kolor zielony – termopara, kolor czerwony – miejsce przygrzania termopary

Tab. 22. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności

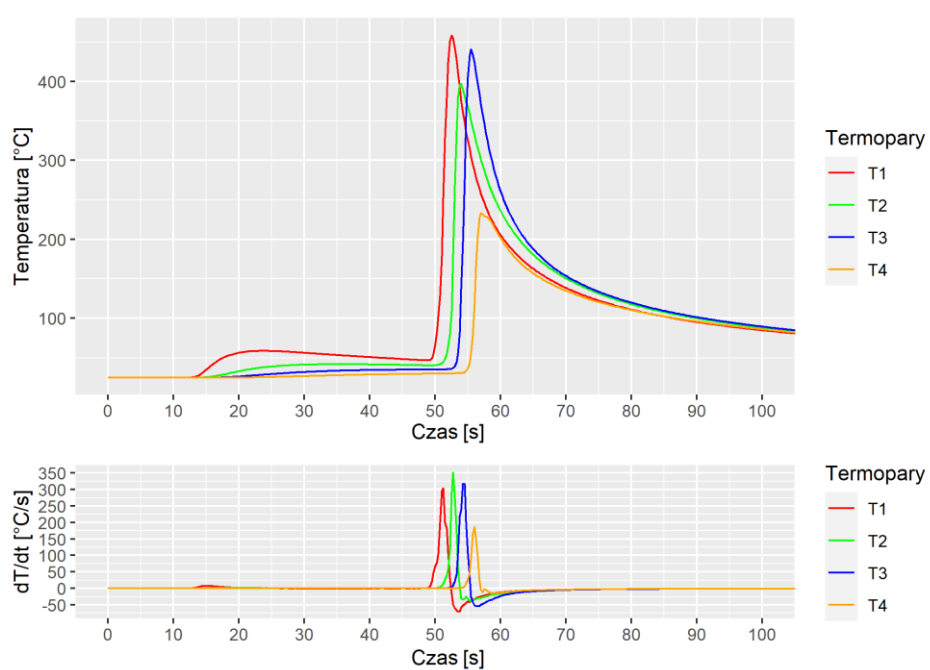
Nr próbki	Szczelina, [mm]	Przesunięcie osiowe, [mm]	Moc wiązki, [W]	Prędkość podawania drutu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/min]	Energia liniowa bez współczynnika metody, [kJ/mm]	Głębokość wtopienia, [mm]
1R	0	0	1500	60	55÷70	0,13÷0,16	4,37

W tabeli 23 zestawiono czasy nagrzewania oraz chłodzenia w zakresie od temperatury 120°C do temperatury maksymalnej. Na rysunkach 137÷140 przedstawiono wykresy cykli cieplnych spawania. W zależności od ściegu zaobserwowano, że temperatury nagrzewania wewnętrznej części rur podczas kolejnych ściegów stopniowo maleją. Wyjątkiem był ścieg nr 3, dla którego odnotowano najwyższą temperaturę spawania. Miało to związek z mniejszą prędkością spawania, a w konsekwencji z większą energią liniową. Maksymalne temperatury zarejestrowano w zakresie: dla pierwszego ściegu – 238÷424°C, dla drugiego – 202÷277°C, dla trzeciego – 205÷285°C oraz dla czwartego – 206÷312°C.

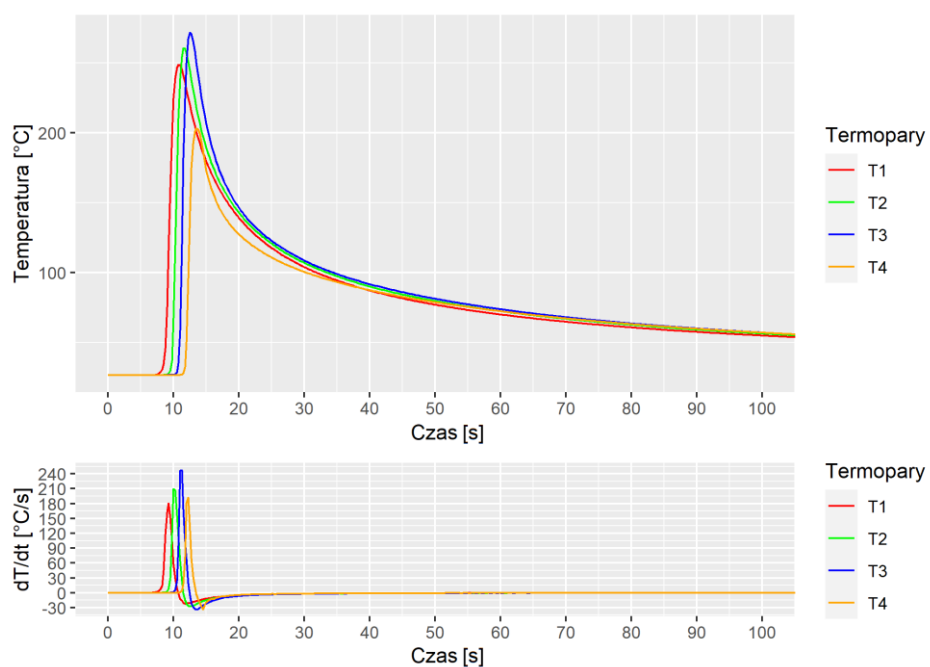
Tab. 23. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza 1R dla poszczególnych ściegów

Nr ściegu	Nr termopary	Czas nagrzewania od 120°C do t max, [s]	Czas chłodzenia od t max do 120°C, [s]	Suma czasów nagrzewania i chłodzenia, [s]	t max, [°C]
1	T1	1,83	21,97	23,8	458,5
	T2	1,46	26,67	28,13	397,1
	T3	1,58	24,46	26,04	440,5
	T4	0,99	19,77	20,76	233,1
2	T1	1,48	12,79	14,27	248,6
	T2	1,25	14,43	15,68	260,6
	T3	1,25	13,32	14,57	271,9
	T4	1,12	9,37	10,49	203,2
3	T1	1,36	13,04	14,4	270,8
	T2	1,35	15,51	16,86	271,7
	T3	1,11	14,87	15,98	280,3
	T4	1,21	12,01	13,22	208,0

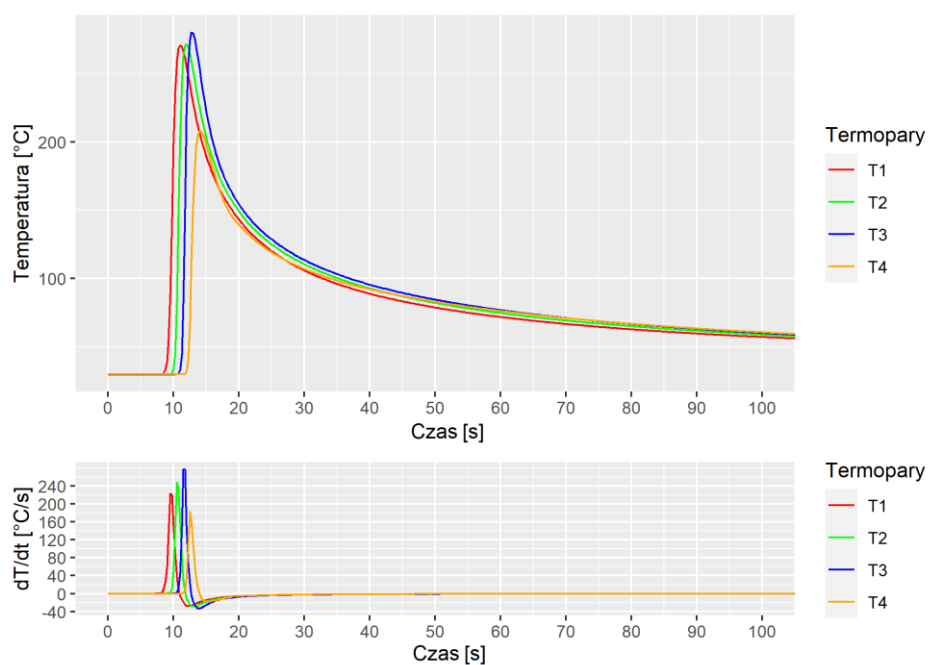
4	T1	2,02	20,34	22,36	290,5
	T2	1,58	22,13	23,71	315,3
	T3	1,43	19,79	21,22	292,4
	T4	1,35	14,85	16,2	210,3
5	T1	1,64	10,36	12	244,2
	T2	1,59	15,01	16,6	282,3
	T3	1,62	15,02	16,64	272,2
	T4	1,57	13,18	14,75	205,5



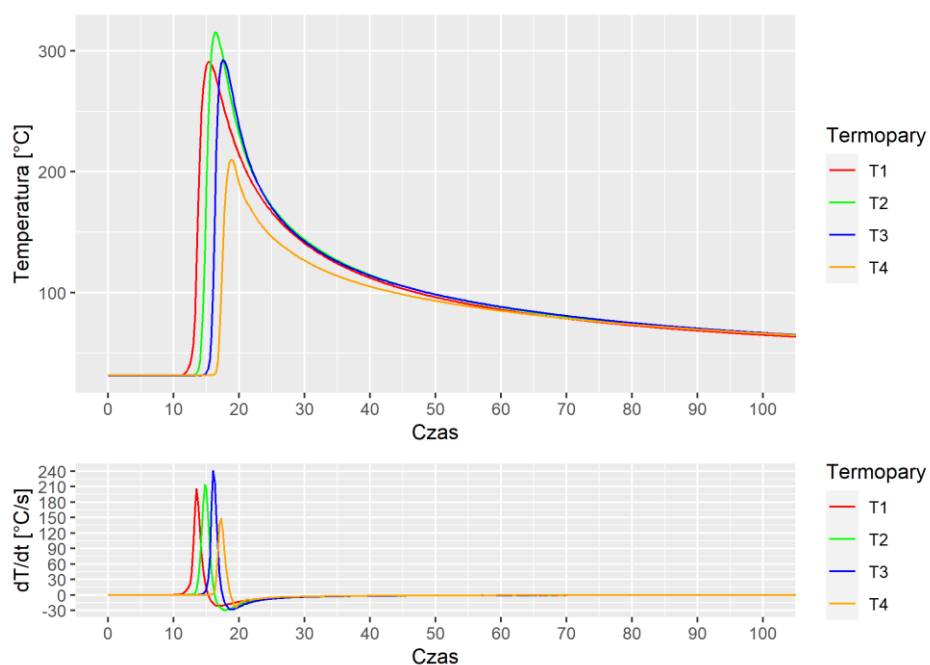
Rys. 137. Spawalniczy cykl cieplny dla pierwszego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury



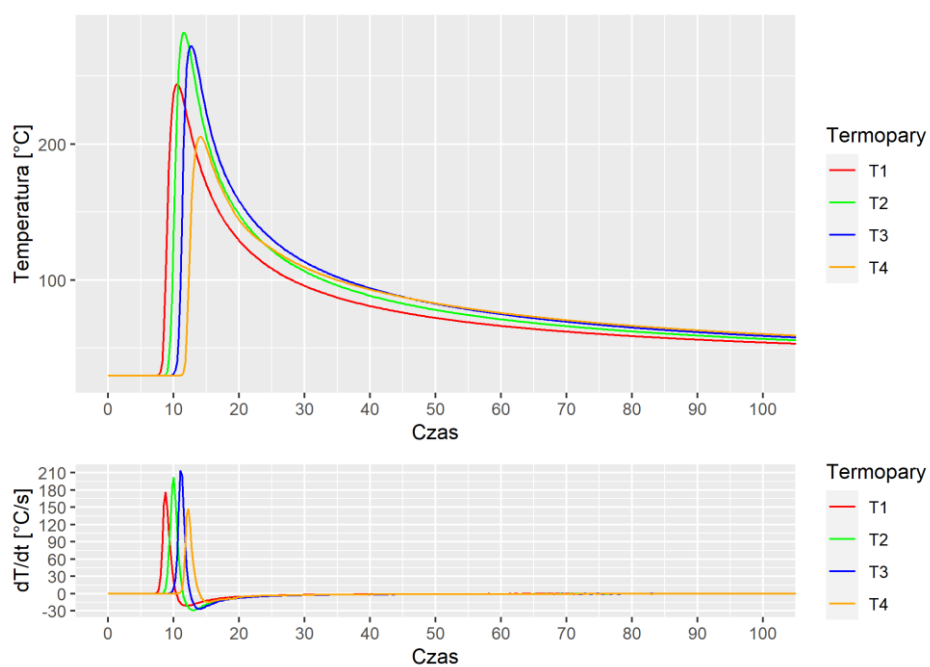
Rys. 138. Spawalniczy cykl cieplny dla drugiego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury



Rys. 139. Spawalniczy cykl cieplny dla trzeciego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury

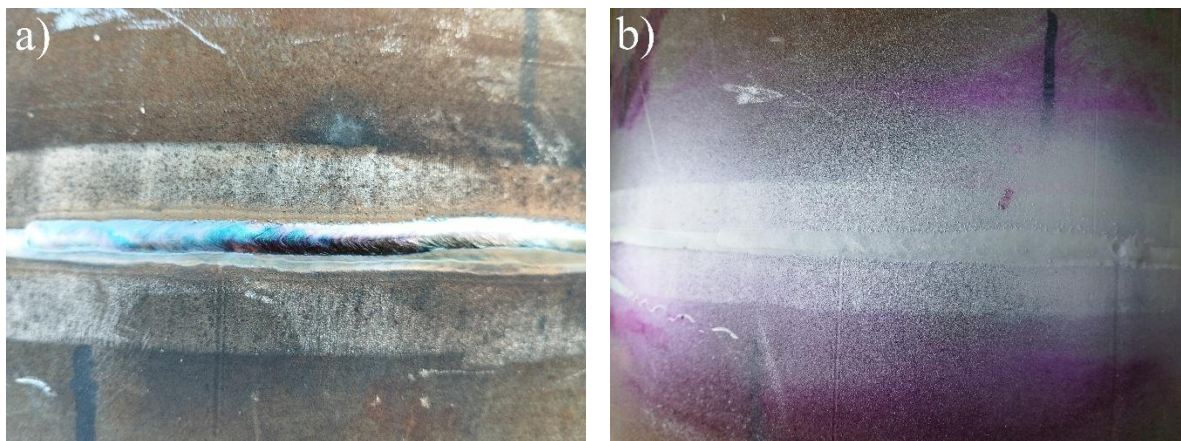


Rys. 140. Spawalniczy cykl cieplny dla czwartego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury

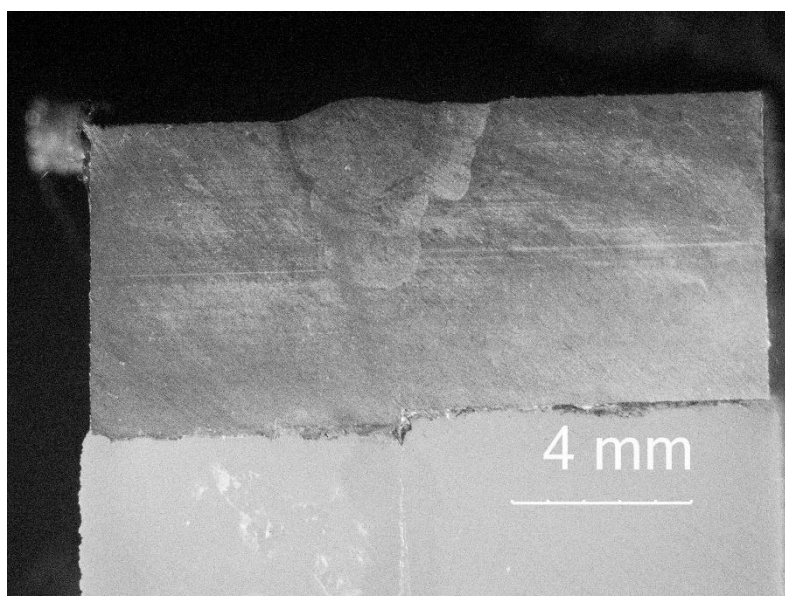


Rys. 141. Spawalniczy cykl cieplny dla piątego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury

Złącze poddano badaniom wizualnym oraz penetracyjnym, które zakończyły się wynikiem pozytywnym, co przedstawiono na rysunkach 142a÷b. Badania makroskopowe przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego stereoskopowego, przykładowy widok zglądu zamieszczono na rysunku 143. Potwierdzono również szczelność pomiędzy wykładkami przy użyciu specjalistycznych narzędzi producenta rur do weryfikacji szczelności połączenia..

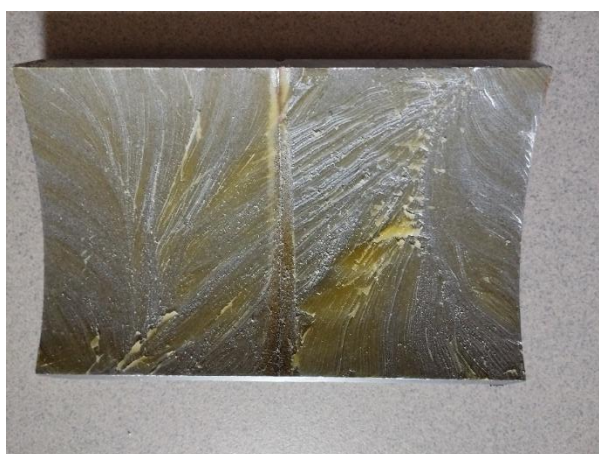


Rys. 142. Widok złącza 1R: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym

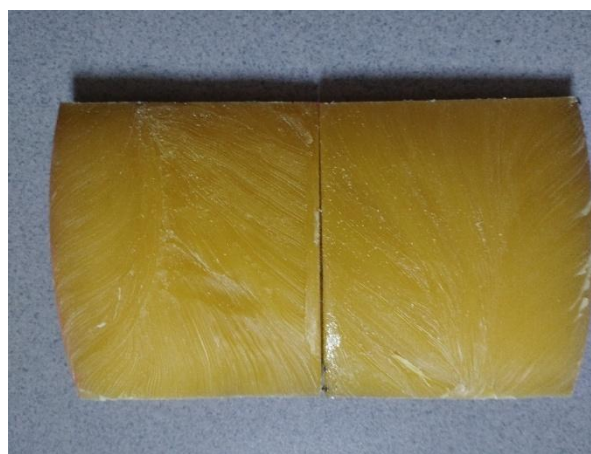


Rys. 143. Makrostruktura złącza 1R

Przeprowadzono badanie przyczepności wykładek do wyspawanej próbki poprzez ich odrywanie. Na rysunkach 144 i 145 pokazano fragment rury po usunięciu wykładki oraz samą usuniętą wykładkę. Usuwanie wykładki odbywało się przy użyciu specjalistycznego noża oraz narzędzi pomocniczych, takich jak kombinerki i szczypce. Na przedstawionych rysunkach zaobserwowano, że wzdłuż osi spoiny nastąpiło odspojenie wykładki od rury stalowej, przy czym sama wykładka pozostała nienaruszona, odspojenie sięgało do 3,1 mm od osi spoiny, a materiał stalowy pokryty był cienkim filmem z materiału wykładki, którego grubości ze względu na chropowatość powierzchni stali oraz owalność rury nie było możliwości zmierzyć. Po badaniu przez producenta rur potwierdzono, że wykładka nie uległa uszkodzeniu, a zakres odspojenia w odniesieniu do powierzchni całkowitej wykładki na rurach oraz uzyskaniu szczelności połączenia pomiędzy wykładkami spełnia kryteria odbioru klienta. Kolejne badania procesu spawania LBW będą zakładały obniżenie energii liniowej spawania w celu minimalizacji stopnia odspojenia wykładki.



Rys. 144. Widok złącza 1R od strony grani po oderwaniu wykładki



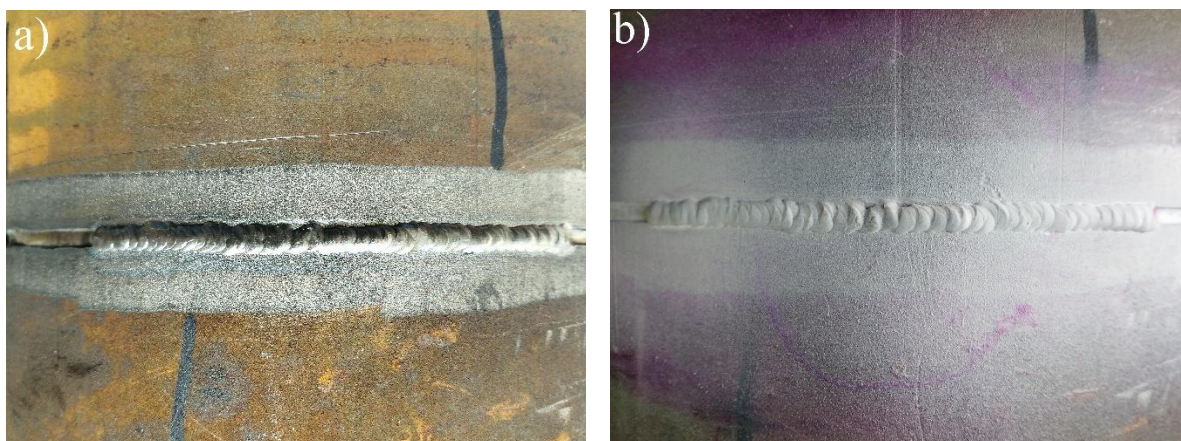
Rys. 1455. Widok oderwanej wykładki ze złącza 1R

13.3.1. Spawanie porównawcze LBW + TIG

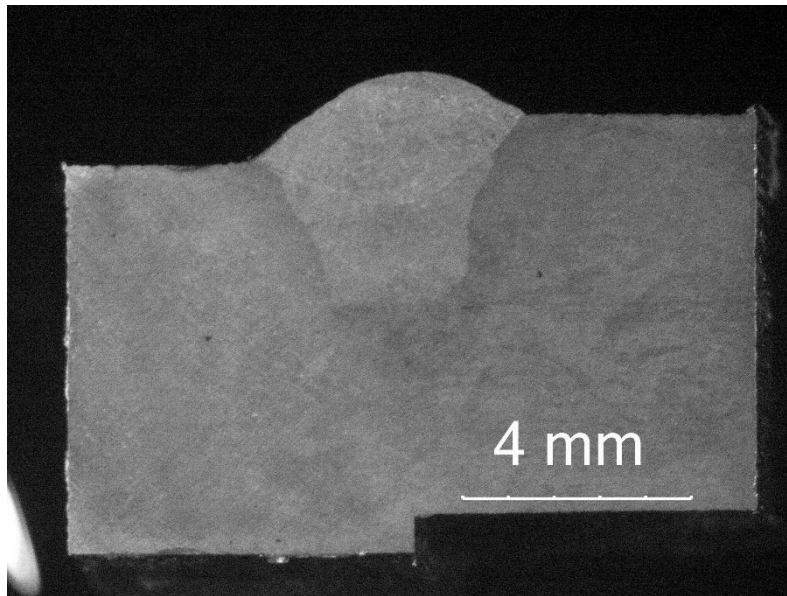
We wcześniejszych badaniach wyeliminowano metody spawania łukowego ze względu na nadmiernie wysokie, długotrwale utrzymujące się temperatury podczas i po spawaniu, które powodowały znaczne odspojenie oraz uszkodzenie wykładek kompozytowych. Analiza lokalizacji uszkodzeń wykazała, że największy wpływ na degradację materiału miały

początkowe ściegi spoiny, natomiast w miarę oddalania się od wyładek ich oddziaływanie malało.

Wykonano dodatkową próbkę 2R celem porównania zachowania się wykładki podczas spawania, gdzie cztery pierwsze ściegi spawano ręcznie metodą LBW, analogicznie jak w próbce 1R, natomiast ostatni ścieg wykonano metodą TIG, stosując parametry ze wstępnej instrukcji spawania 16/pWPS [zał. 18]. Badanie miało na celu potwierdzenie, że nawet wykonanie tylko ostatniego ściegu najkorzystniejszą metodą spawania łukowego nie daje możliwości uzyskania zadowalającego wyniku w przypadku wymaganej przyczepności próbki. Przed przystąpieniem do spawania metodą TIG próbkę ostudzono do temperatury otoczenia równej 21°C. Widok od strony lica spoiny oraz wyniki badania penetracyjnego przedstawiono na rysunku 146a÷b, badania zakończyły się wynikiem pozytywnym. Widok przekroju złącza przedstawiono na rysunku 147.



Rys. 146. Widok złącza 2R: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym



Rys. 147. Widok makroskopowy przekroju złącza 2R

Na rysunkach 148÷149 przedstawiono fragment rury po usunięciu wykładki oraz samą usuniętą wykładkę. Zaobserwowano, że wykładka jest odspojona od rury stalowej na obszarze około czterokrotnie większym niż w przypadku próbki 1R, co w warunkach eksploatacyjnych mogłoby prowadzić do uszkodzeń zarówno wykledek, jak i samej rury, wykładka w miejscu odspojenia była wypalona z powierzchni rury.



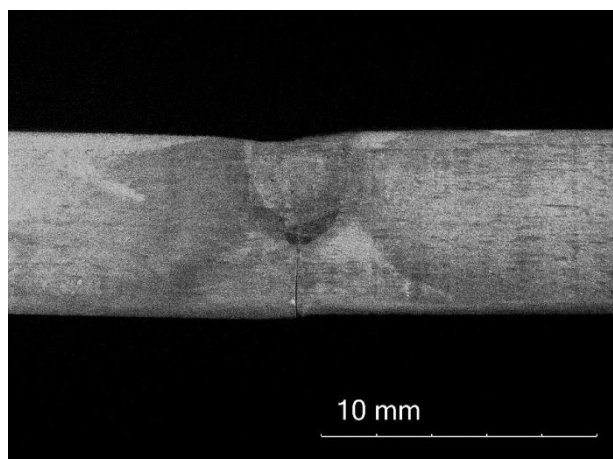
Rys. 148. Widok złącza 2R od strony grani po oderwaniu wykładki



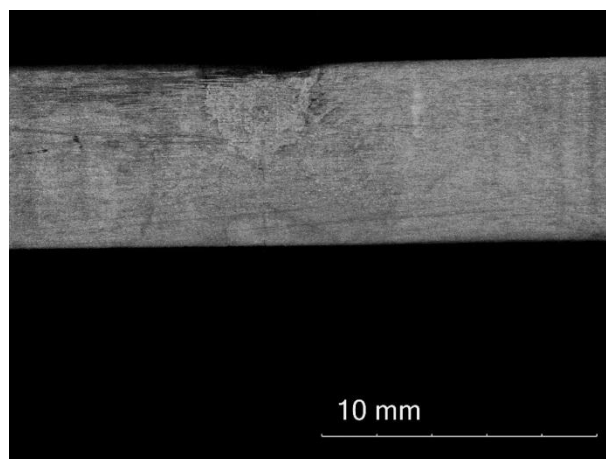
Rys. 149. Widok oderwanej wykładki ze złącza 2R

13.3.2. Statyczna próba rozciągania złączy

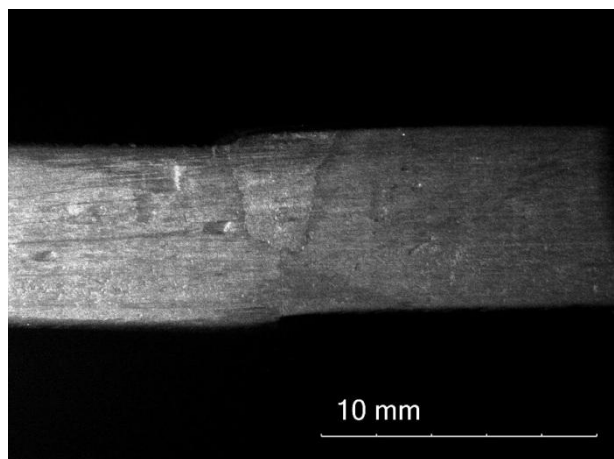
Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na urządzeniu Zwick/Roell z100. Próbę przeprowadzono dla złączy 1R oraz 2R, gdzie dla każdego złącza przygotowano po dwie próbki na rozciąganie. Zostały one przygotowane w oparciu o normę PN-EN ISO 4136, natomiast odstępstwem od tej normy był brak pełnej ciągłości przekroju materiału – ze względu na brak pełnego przetopu. Kolejnym odstępstwem była szerokość próbek, która ze względu na geometrię próbek wynosiła 16 mm, gdzie standardowo zakłada się szerokość równą 25 mm. W związku z powyższym, dla każdej przygotowanej próbki na rozciąganie wykonano zgląd metalograficzny w celu dokonania pomiaru głębokości wtopienia i obliczenia średniego pola przekroju próbek w miejscu ciągłości metalicznej, widoki przekrojów poprzecznych złączy zostały przedstawione na rysunkach 150÷153. Głębokości wtopienia a_0 , szerokości próbki b_0 , pola przekroju S_0 oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m dla obliczonych przekrojów, zostały przedstawione w tabeli 24. Wszystkie próbki zostały zerwane w rejonie linii wtopienia, przykładowy widok zerwanej próbki został przedstawiony na rysunku 154, natomiast wykres próby rozciągania zobrazowano na rysunku 155. Wytrzymałość na rozciąganie R_m materiału rodzimego zgodnie z informacją dostawcy rury potwierdzonej świadectwem odbioru wynosiła 612 MPa.



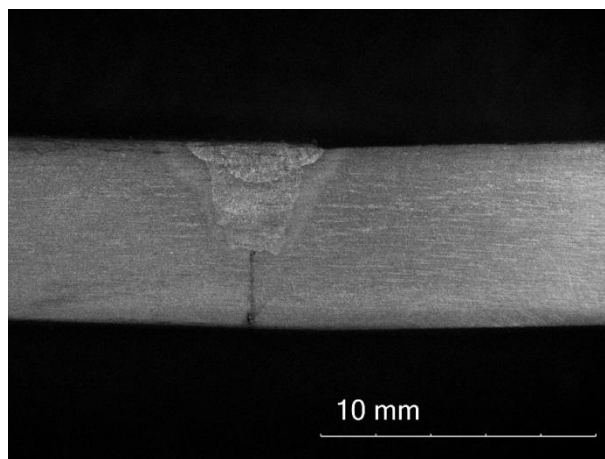
Rys. 150. Przekrój poprzeczny złącza 1R
nr R1.1



Rys. 151. Przekrój poprzeczny złącza 1R
nr R1.2



Rys. 152. Przekrój poprzeczny złącza 2R
nr R2.1



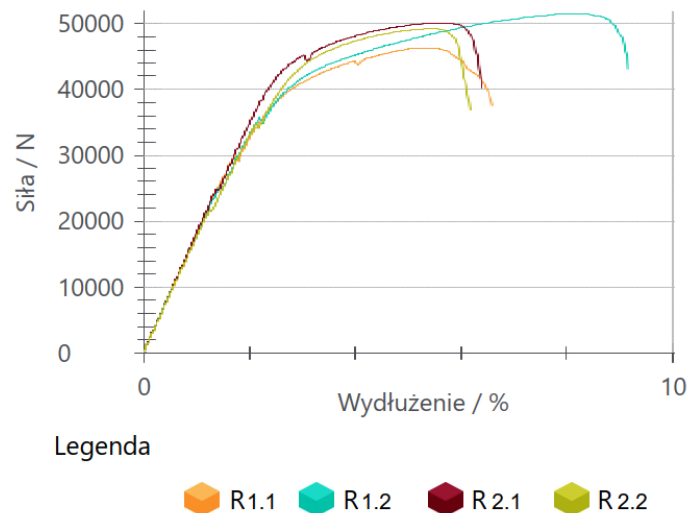
Rys. 153. Przekrój poprzeczny złącza 2R
nr R2.2

Tab. 24. Wyniki prób rozciągania złączy spawanych

Nr próbki	a_0 , [mm]	b_0 , [mm]	S_0 , [mm ²]	R_m , [MPa]
R1.1	3,73	16	59,68	775
R1.2	3,53	16	56,48	911
R2.1	4,07	16	65,12	769
R2.2	3,87	16	61,92	796
Uwagi: a_0 – grubość strefy rozciąganej; b_0 – szerokość strefy rozciąganej; S_0 – pole przekroju; R_m – wytrzymałość na rozciąganie				



Rys. 154. Próbka R1.1 po statycznej próbie rozciągania



Rys. 155. Wykres statycznej próby rozciągania

Wartości wytrzymałości na rozciąganie złączy przewyższają wartości wytrzymałości materiału rodzimego, co potwierdziło, że złącza zostały wykonane we właściwy sposób, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 spełniły kryteria wytrzymałościowe dla tego gatunku stali.

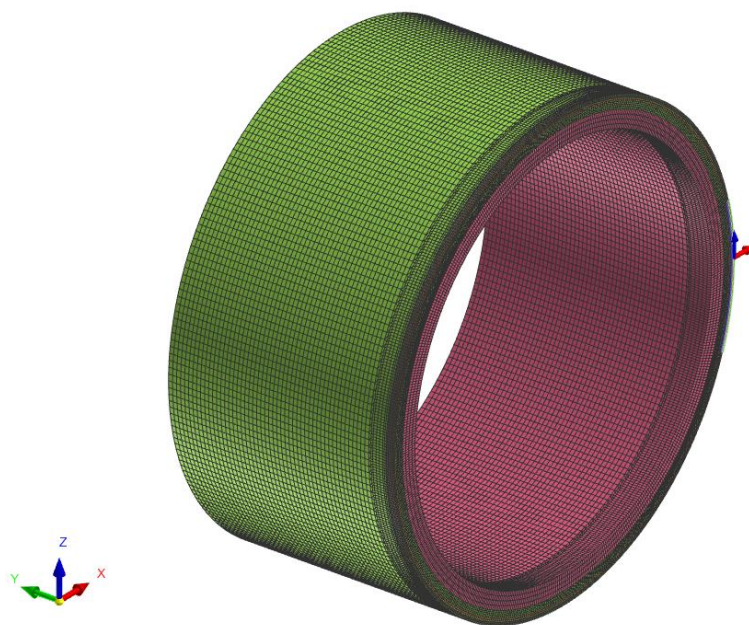
14. Symulacja procesu spawania LBW

Na podstawie przeprowadzonej próby spawania wraz z pomiarem temperatur spawania oraz przeprowadzonych badaniach makroskopowych, przeprowadzono symulację w programie ESI VisualWeld 2023.5, modelując zagadnienie jako symulację MES termometalurgiczną przejściową 3D. Zważając na fakt, że złącze jest symetryczne, zasymulowano połowę złącza, to uproszczenie modelu spowodowało zmniejszenie trudności obliczeniowej.

Część stalową rury zasymulowano według standardowej bazy stali S355. Część kompozytową zasymulowano według następujących parametrów: przewodność cieplna = 0,19 W/mK, ciepło właściwe = 1760 J/kgK, temperatura rozpadu = 330°C. Wzięto również pod uwagę fakt, że w temperaturze rozpadu kompozytu znacznie spadała przewodność cieplna, która spowodowana była wydzielaniem się gazów.

W przypadku symulowania procesu spawania laserowego ręcznego LBW, gdzie występują intensywne ruchy poprzeczne wiązki zapewniane przez urządzenie,

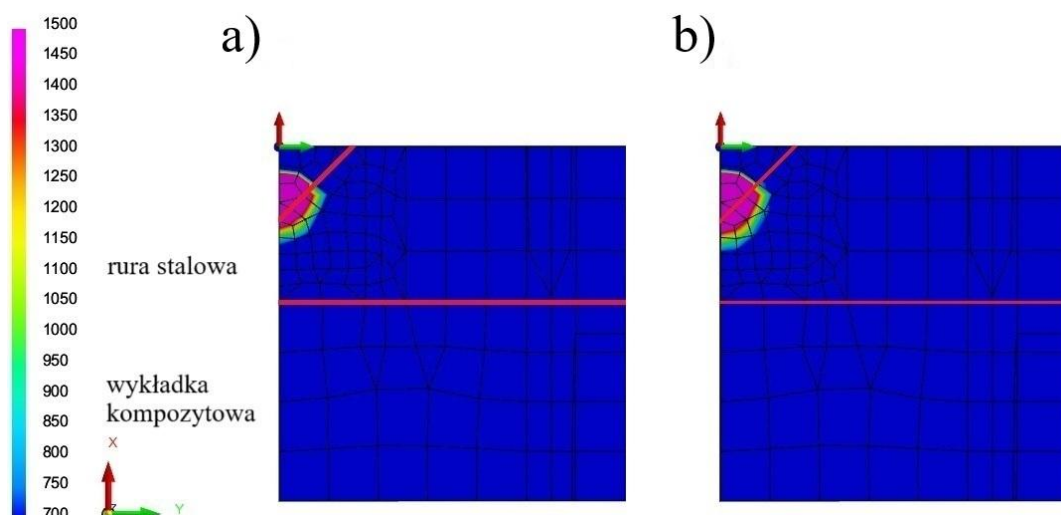
zastosowano źródło Goldaka jako model źródła ciepła, czyli podwójną elipsoidę, o wymiarach charakterystycznych: 3 x 2 x 2 mm (szerokość/długość/głębokość), gdzie wartość energii liniowej wynosiła 66,7 J/mm, co odpowiadało 0,1334 kJ/mm dla pełnego złącza. Ze względu na występowanie ślepego kanału gazodynamicznego w procesie ręcznego spawania laserowego przyjęto sprawność na poziomie 0,9. Model składał się z 175456 elementów oraz 149585 węzłów, jego wizualizacja została przedstawiona na rysunku 156.



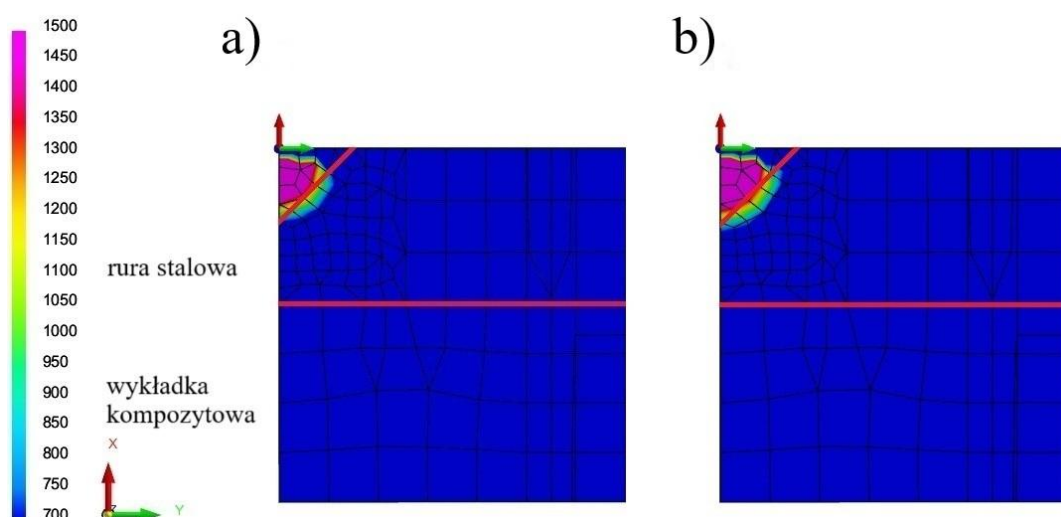
Rys. 156. Wizualizacja siatki MES modelu rury z wykładką

Na podstawie wykonanych badań przeprowadzono symulację procesu spawania, dodatkowo dla porównania przeprowadzono symulację spawania dla temperatury międzyścigowej nie przekraczającej 50°C.

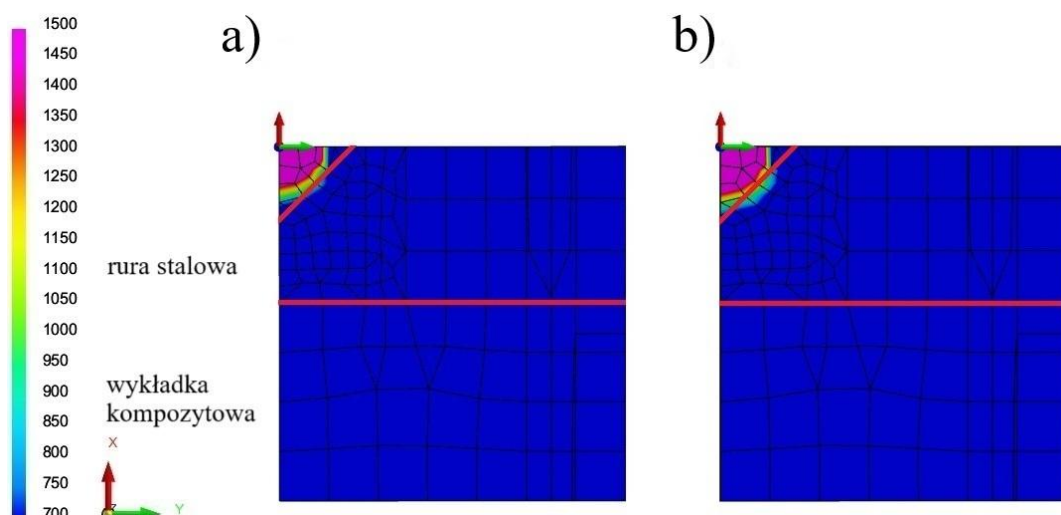
Dla obu przypadków temperatury międzyścigowej analizowano proces spawania dla czterech ściegów spoiny w dwóch zakresach temperaturowych. Pierwszy zakres obejmował temperatury od 700 do 1500°C i przedstawiał rozkład ciepła istotny ze względu na metalurgię złącza spawanego stali S355, zostało to zobrazowane na rysunkach 157÷160. Drugi zakres mieścił się w granicach od 0 do 350°C i skupiał się na degradacji wykładki kompozytowej, zostało to przedstawione na rysunkach 161÷164.



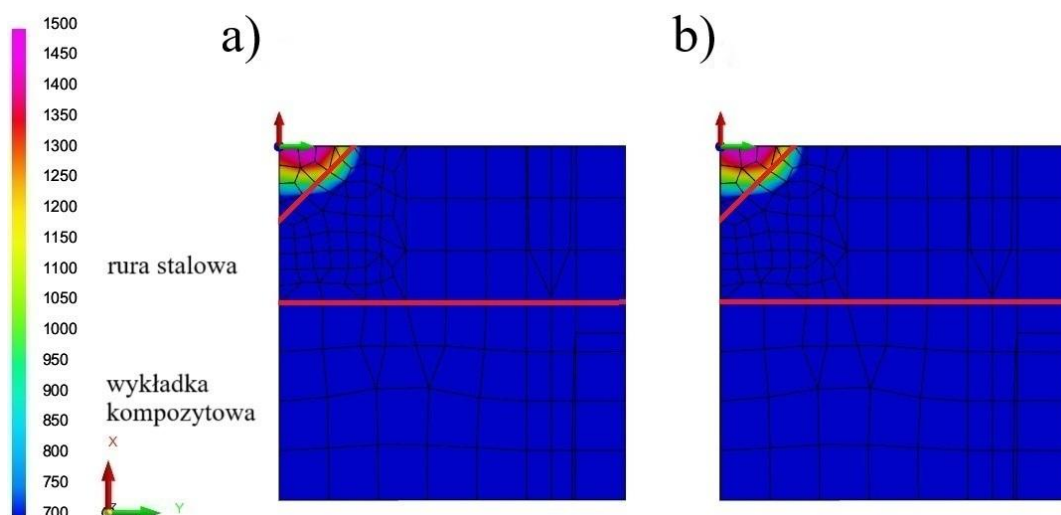
Rys. 157. Symulacja spawania pierwszego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



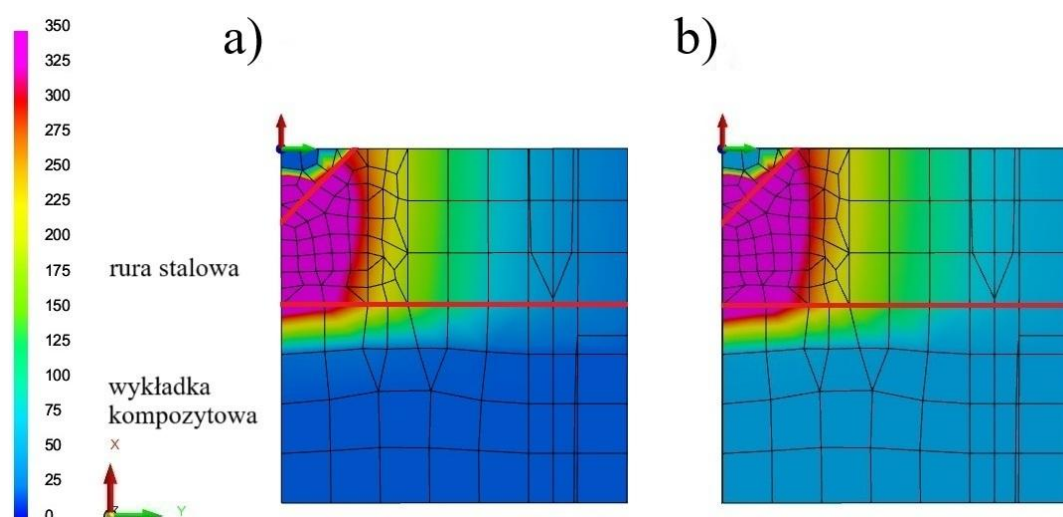
Rys. 158. Symulacja spawania drugiego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



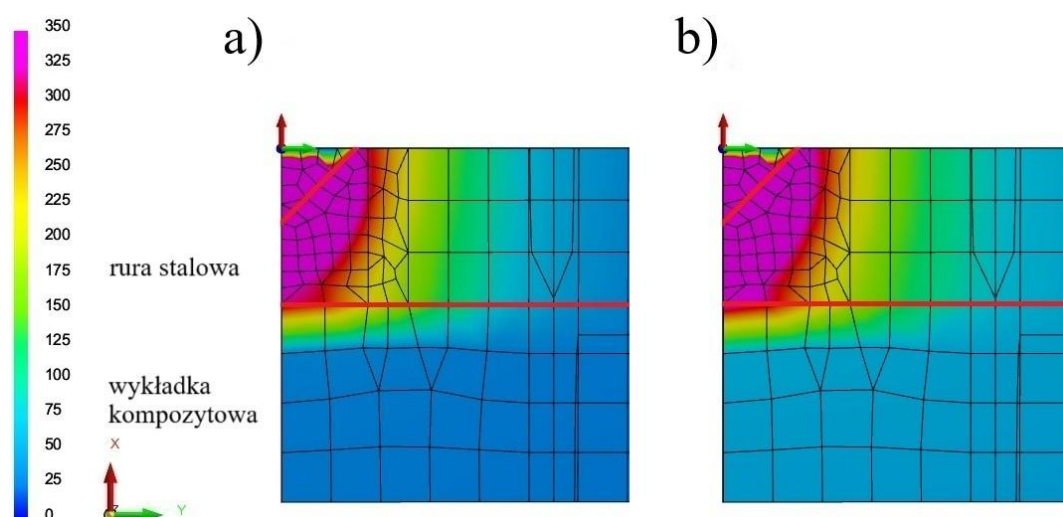
Rys. 159. Symulacja spawania trzeciego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



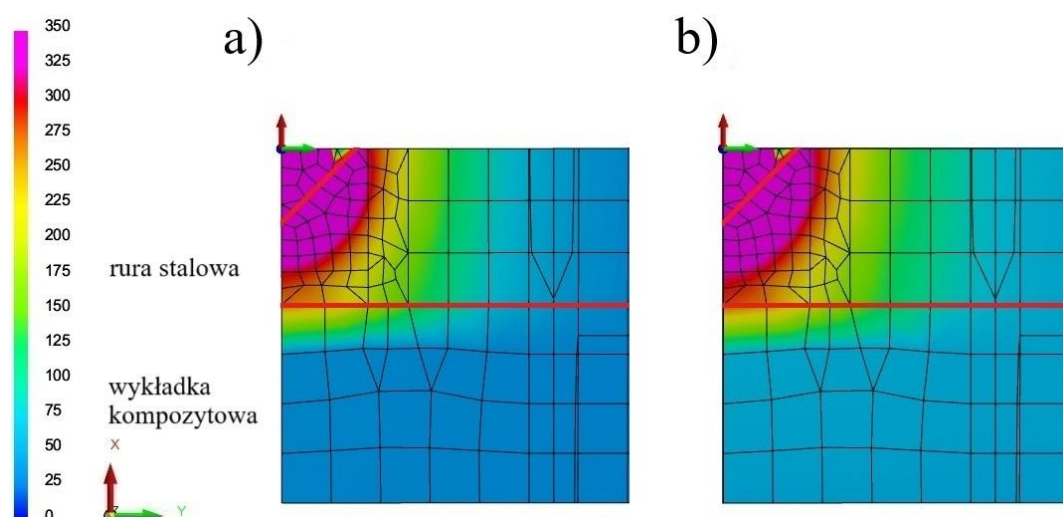
Rys. 160. Symulacja spawania czwartego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze temperatury międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



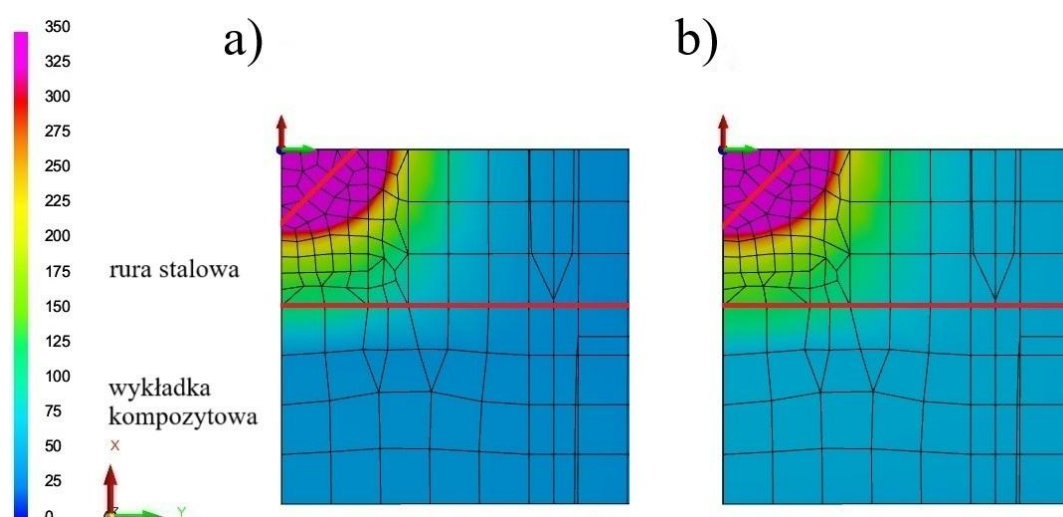
Rys. 161. Symulacja spawania pierwszego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



Rys. 162. Symulacja spawania drugiego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C

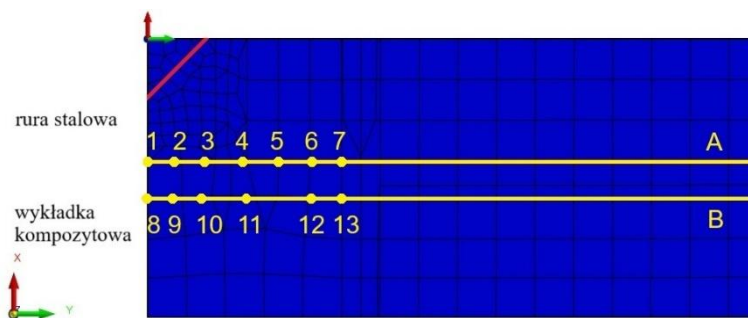


Rys. 163. Symulacja spawania trzeciego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C



Rys. 164. Symulacja spawania czwartego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C

Bazując na przeprowadzonych obserwacjach degradacji wykładek przyjęto dwie linie, dla których wygenerowano cykle cieplne spawania. Pierwsza linia o oznaczeniu A pokrywała się z granicą rura – wykładka, druga linia o oznaczeniu B znajdowała się 2 mm w głąb wykładki. Punkty symulacji temperatur przyjęto zgodnie z oznaczeniem na rysunku 165. Wartości maksymalnych temperatur dla wygenerowanych cykli cieplnych zostały przedstawione w tabelach 25÷28.



Rys. 165. Widok wygenerowanych linii oraz punktów symulowanych temperatur

Tab. 25. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej A pierwszej symulacji

	Temperatura maksymalna, [°C]						
Nr punktu pomiarowego	1	2	3	4	5	6	7
Odległość od osi spiny, [mm]	0	1,75	3,5	5,125	6,75	8,375	10
Ścieg 1	424,68	376,71	282,36	218,15	174,81	145,35	124,77
Ścieg 2	348,85	323,86	266,42	217,66	180,20	152,48	132,51
Ścieg 3	322,76	303,08	256,12	213,85	179,86	154,02	134,59
Ścieg 4	297,82	284,84	250,24	214,13	182,77	157,48	138,51

Tab. 26. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej B pierwszej symulacji

	Temperatura maksymalna, [°C]					
Nr punktu pomiarowego	8	9	10	11	12	13
Odległość od osi spiny, [mm]	0	1,75	3,28	5,54	8,3	10
Ścieg 1	55,90	57,90	59,97	55,88	48,38	44,88
Ścieg 2	66,86	68,44	70,41	66,57	58,86	55,22
Ścieg 3	73,10	74,57	76,43	72,62	65,02	61,41
Ścieg 4	77,12	78,57	80,56	77,13	69,81	66,27

Tab. 27. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej A drugiej symulacji

	Temperatura maksymalna, [°C]						
Nr punktu pomiarowego	1	2	3	4	5	6	7
Odległość od osi spoiny, [mm]	0	1,75	3,5	5,125	6,75	8,375	10
Ścieg 1	450,05	402,20	307,85	243,94	200,82	171,64	151,28
Ścieg 2	371,80	346,85	289,59	241,07	203,89	176,53	156,71
Ścieg 3	337,64	318,40	272,47	231,21	198,14	173,09	154,26
Ścieg 4	314,68	301,77	267,54	231,77	200,77	175,88	157,17

Tab. 28. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej B drugiej symulacji

	Temperatura maksymalna, [°C]					
Nr punktu pomiarowego	8	9	10	11	12	13
Odległość od osi spoiny, [mm]	0	1,75	3,28	5,54	8,3	10
Ścieg 1	84,38	86,55	88,95	84,95	77,45	74,00
Ścieg 2	93,37	94,93	96,82	92,98	85,21	81,63
Ścieg 3	95,41	96,85	98,63	94,95	87,44	83,97
Ścieg 4	96,35	97,86	99,86	96,53	89,17	85,71

14.1. Podsumowanie symulacji procesu spawania LBW

Na podstawie przyjętych parametrów materiałowych stali, kompozytu na bazie poliuretanu oraz procesu spawania ręcznego LBW opracowano model poddany symulacjom numerycznym.

Zobrazowano przekroje poprzeczne spoiny w zakresach temperaturowych 700÷1500°C oraz 0÷350°C. W pierwszym zakresie temperaturowym zaobserwowano, jak źródło ciepła przemieszczało się względem materiału wykładki, natomiast w drugim zakresie skupiono się

na analizie zmian w rozkładzie temperatur wewnątrz poszczególnych materiałów oraz na ich styku.

Symulacje temperatur przeprowadzono w dwóch lokalizacjach: na granicy rura–wykładka (linia A) oraz 2 mm w głąb wykładki (linia B). Na tej podstawie zaobserwowano:

- W obu scenariuszach, wraz z wykonywaniem kolejnych ściegów, temperatura w obrębie wykładki malała, co wiązało się z oddaleniem źródła ciepła. Niemniej jednak, mimo niższych wartości temperatury, nadal istniało ryzyko degradacji wykładki szczególnie w przypadku naturalnych dla spawania ręcznego niedokładności utrzymania parametrów spawania. Podkreśla to znaczenie odpowiedniego wykonania ściegu graniowego oraz konieczność ograniczania wprowadzanej energii liniowej w każdym etapie spawania.
- Przy wyższej temperaturze międzyściegowej odnotowano większe wartości maksymalne temperatury w obszarze wykładki. Choć różnice bezwzględne nie były duże, znacząco wpływały na zwiększenie objętości materiału poddanego degradacji termicznej.
- W bardziej oddalonych punktach od osi spoiny, podczas nakładania kolejnych ściegów, występowały wyższe temperatury – odwrotnie niż w pobliżu osi złącza.

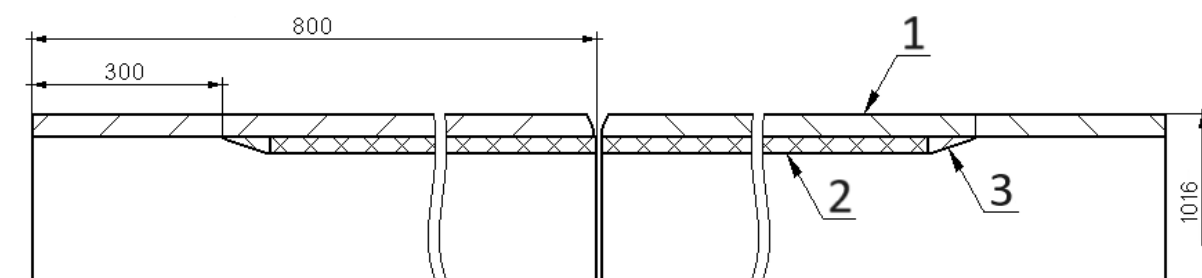
Zastosowanie symulacji MES umożliwiło szczegółową analizę rozkładów temperatur podczas spawania, eliminując konieczność przeprowadzania dodatkowych prób doświadczalnych.

15. Wykonanie prototypowej rury próbnej – rury stalowej z wykładką kompozytową wraz z implementacją jej do istniejącej instalacji

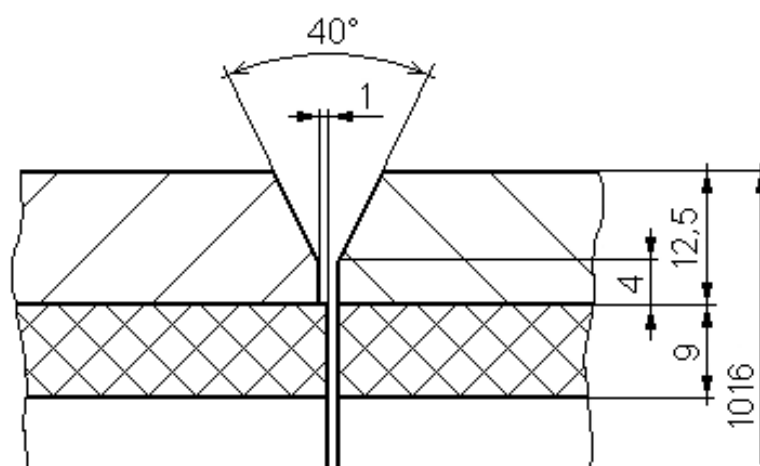
W celu przeprowadzenia kolejnego badania wykonano rurę testową RT1 z wykładką kompozytową, która docelowo miała zostać zaimplementowana do istniejącej instalacji celem przeprowadzenia badań eksploatacyjnych nowo opracowanego rozwiązania. Instalacja była wykonana ze stali węglowej o parametrach: średnica zewnętrzna $D = 1016$ mm, grubość ścianki rury $t = 12,5$ mm, ciśnienie maksymalne 1,6 MPa.

Ze względu na fakt dostosowania rury testowej do instalacji, założono parametry rury: gatunek rury stalowej P265GH o średnicy zewnętrznej rury stalowej równej 1016 mm

(DN 1000), grubości ścianki rury stalowej równej 12,5 mm oraz grubości wykładki PUGA równej 9 mm, gdzie twardość wykładki PUGA wynosiła 85 ShA. Rurę testową należało wykonać złączem docelowym u producenta rur, gdzie po zakończeniu spawania miała podlegać badaniom nieniszczącym: wizualnym, penetracyjnym, magnetyczno – proszkowym, a następnie została zaplanowana fabryczna próba ciśnieniowa o ciśnieniu próby równym 1,5 ciśnienia maksymalnego, czyli 2,4 MPa. Długość każdego z dwóch fragmentów rur przeznaczonych do spawania laserowego ręcznego LBW miała wynosić 800 mm, zgodnie ze szkicem na rysunku 166, natomiast szczegół przygotowania do spawania przedstawiono na rysunku 167.

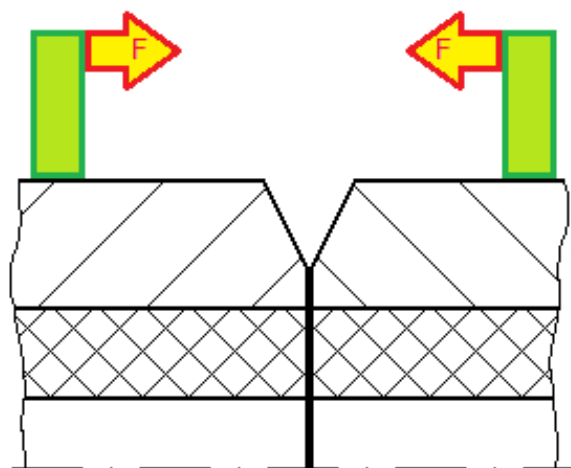


Rys. 166. Widok schematu przygotowania do spawania rury testowej RT1: 1 – rura stalowa, 2 – wykładka kompozytowa, 3 – przyspawany ogranicznik stalowy



Rys. 167. Widok szczegółu spawania połączenia spawanego laserem ręcznym

W celu szepienia ze sobą obu fragmentów rur i ich spawania należało je do siebie docisnąć, aby zniwelować szczelinę do minimum oraz uszczelnić styk pomiędzy wykładkami poprzez docisk mechaniczny. Docisk był zapewniony poprzez specjalistyczne oprzyrządowanie z użyciem odpowiednio dobranej siły, co zostało schematycznie przedstawione na rysunku 168.



Rys. 168. Widok fragmentów rur przygotowanych do szepienia i spawania

W celu weryfikacji wytrzymałości zaprojektowanego połączenia spawanego wykonano obliczenia wytrzymałościowe.

15.1. Obliczenia

W normie dotyczącej projektowania i obliczeń rurociągów przemysłowych PN-EN 13480-3 nie podano schematów obliczeniowych dla spoin z niepełnym przetopem. Z powyższej normy zaczerpnięto poziom naprężeń dla warunków pracy rurociągu oraz poziom naprężeń dopuszczalnych współczynnik złącza $z = 0,85$ dla wyrywkowych badań nieniszczących.

Spoina czołowa z niepełnym przetopem zgodnie z normą PN-EN 1993-1-8 traktowana jest jak spoina pachwinowa, ten schemat obliczeniowy oparty jest o badania IIW (International Institute of Welding). Ze względu jednak na fakt, że umiejscowienie przekroju obliczeniowego jest w innym kierunku – do osi rury, a nie pod kątem 45° , wytrzymałość na zginanie jest wyższa.

Rozwiązanie złączy rur:

Średnica zewnętrzna rury stalowej $x = 1016 \text{ mm}$

Średnica wewnętrzna rury stalowej $y = 997 \text{ mm}$

Pole przekroju rur: $A_r = 0,25\pi(x^2 - y^2) = 30023,9 \text{ mm}^2$

Założona grubość spoiny czołowej $t = 9 \text{ mm}$

Przekrój spoiny $A_s = 28457,82 \text{ mm}^2$

Ciśnienie obliczeniowe $p_c = 1,6 \text{ MPa}$

Dodatkowa siła obciążająca osiowo złącze $F = 1 \text{ MN}$

Według PN-EN 13480-3 naprężenia obliczeniowe w rurociągu nie powinny przekraczać (równanie 1):

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5} \text{ lub } \frac{R_{p0,2t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\} \quad (1)$$

R_{eHt} – minimalna wartość górnej umownej granicy plastyczności określona w temperaturze obliczeniowej, jeżeli temperatura ta jest większa od temperatury pokojowej [MPa]

$R_{p0,2t}$ – minimalna umowna granica plastyczności przy wydłużeniu 0,2% w temperaturze rury [MPa]

R_m – wytrzymałość na rozciąganie [MPa]

Dla stali P265GH $R_{p0,2t}$ dla pracy poniżej 50°C wynosi 265 MPa a $R_m = 410 \text{ MPa}$, więc

$$f = 170 \text{ MPa}$$

Współczynnik złącza $z = 0,85$

Wymagana grubość ścianki według PN-EN 13480-3 (równanie 2)

$$e = \frac{p_c D_0}{2fz + p_c} \quad (2)$$

e – minimalna grubość ścianki [mm]

p_c – ciśnienie obliczeniowe [MPa]

f – naprężenia dopuszczalne [MPa]

z – współczynnik złącza (przyjęto na poziomie 0,85 – dla złączy poddanych wyrywkowym badaniom nieniszczącym) [–]

$$e = 5,593944 \text{ mm}$$

Co daje zastępcze obciążenie do ciśnienia na poziomie $\tau_{\parallel} = e \cdot f / t = 105,66 \text{ MPa}$

Naprężenie od siły osiowej F $\sigma_{\perp} = F / A_s = 35,14 \text{ MPa}$

Wzór dla spoiny pachwinowej z PN-EN 1993-1-8 (równanie 3)

$$\left[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \right]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \text{ oraz } \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

$\sigma_{\perp}$ – naprężenie normalne prostopadłe do przekroju spoiny [MPa]

$\sigma_{\parallel}$ – naprężenie normalne równoległe do przekroju spoiny [MPa]

$\tau_{\perp}$ – naprężenie styczne (w płaszczyźnie przekroju) prostopadłe do przekroju spoiny [MPa]

$\tau_{\parallel}$ – naprężenie styczne (w płaszczyźnie przekroju) równoległe do przekroju spoiny [MPa]

β_w – odpowiedni współczynnik korelacji w odniesieniu do gatunku stali [–]

f_u – nominalna wytrzymałość na rozciąganie słabszej z łączonych części [MPa]

γ_{M2} – współczynnik częściowy dotyczący węzłów (nośność śrub, nitów, sworzni oraz spoin) [–]

Dla naprężeń dopuszczalnych PN-EN 1993-1-8 (równanie 4)

$$f_u = 410 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\beta_w = 0,8$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \text{ oraz } \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4)$$

$$186,36 \text{ MPa} \leq 410 \text{ MPa} \text{ oraz } 35,14 \text{ MPa} < 295 \text{ MPa}$$

Warunki spełnione z wyłączeniem 29,09%

Dla naprężeń dopuszczalnych PN-EN 13480-3 (równanie 5)

$$f = 170 \text{ MPa}$$

$$\beta_w = 0,8$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f}{\beta_w} \text{ oraz } \sigma_{\perp} \leq 0,9f \quad (5)$$

$$186,36 \text{ MPa} \leq 212,5 \text{ MPa} \text{ oraz } 35,14 \text{ MPa} < 153 \text{ MPa}$$

Warunki spełnione z wyłączeniem 89,70%

Spoina doczołowa o niepełnym przetopie i grubości 9 mm spełnia wymagania.

15.2. Spawanie próbki testowej RT1 wraz z badaniami nieniszczącymi oraz próbą ciśnieniową

Ze względu na łagodne tolerancje rur w stanie dostawy jako produktu hutniczego, podczas scalania ze sobą obu fragmentów rur z wykładkami wystąpiły dosyć spore przesadzenia oraz odchylenia geometryczne, które zostały uwzględnione w instrukcji spawania. Z tego też względu występowały dosyć duże rozbieżności w nastawie parametrów spawania w szczególności dla pierwszego ściegu spoiny, stosując również dwie średnice drutu spawalniczego: 1,2 oraz 1,6 mm.

Każda warstwa spoiny była wykonywana ściegami o długościach 100÷250 mm, naprzemianległe do obwodu rur z parametrami zawartymi w instrukcją spawania nr 17/pWPS [zał. 19], które zostały przedstawione w tabeli 29. Każda kolejna warstwa spoiny była przesunięta względem poprzedniej o co najmniej 20 mm, aby nie następowała kumulacja naprężeń w miejscach rozpoczęcia i zakończenia spoin. Kolejne ściegi spoiny były wykonywane z użyciem dwóch drutów stosując dwa niezależne podajniki drutu podawanego w układzie równoległym. Zadaniem zastosowania podwójnego podajnika druty było zwiększenie ilości dodawanego materiału spawanego bez znacznego zwiększania energii liniowej spawania. Rozpoczęcia i zakończenia spoin były przeszlifowywane za pomocą szlifierki kątowej w celu uzyskania łagodnego przejścia spoiny. Temperaturę międzyściegową kontrolowano za pomocą pirometru bezstykowego, nie przekraczano temperatury 30°C. Po wykonaniu złącza przeprowadzono badania nieniszczące: wizualne, magnetyczno – proszkowe, uzyskując wynik pozytywny. Widok próbki testowej podczas spawania został przedstawiony na rysunku 167.

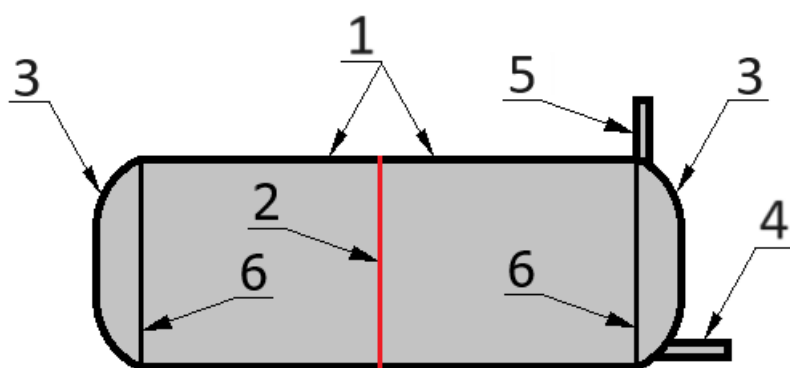
Tab. 29. Parametry spawania próbki RT1

Nr ściegu	Średnica drułu, [mm]	Szerokość wiązki, [mm]	Częstotliwość, [Hz]	Moc wiązki, [W]	Prędkość podawania drułu, [cm/min]	Prędkość spawania, [cm/min]	ENERGIA LINIOWA bez współczynnika metody, [kJ/mm]
LBW ręczny							
1	1,2/1,6	0,5/0,55	100	650/740	35/30	35/32	0,11/0,14
2÷n	2 x 1,6	0,8	100	800	25	25	0,19



Rys. 169. Widok próbki testowej RT1 podczas spawania

Kolejno po zakończonych badaniach nieniszczących przeprowadzono próbę ciśnieniową. W celu przeprowadzenia próby ciśnieniowej zostały przyspawane tymczasowo dennice wraz z króćcami: doprowadzającym medium do próby oraz odpowietrzającym układ. Medium próby była woda sieciowa, a ciśnienie próby, zgodnie z opisanymi w punkcie 15 warunkami, wynosiło 2,4 MPa, czas próby wynosił 30 minut. Próba ciśnieniowa zakończyła się wynikiem pozytywnym, układ podlegający próbie ciśnieniowej został przestawiony na rysunku 168.



Rys. 170. Widok schematu układu podlegającego próbie ciśnieniowej: 1 – rura testowa RT1, 2 – spoina testowa, 3 – dennice, 4 – króciec zasilający, 5 – króciec odpowietrzający, 6 – spoiny tymczasowe do próby ciśnieniowej

15.3. Implementacja w istniejącą instalację wraz z rozruchem i testami

Po pozytywnie zakończonych badaniach nieniszczących oraz próbie ciśnieniowej, dennice zostały odcięte, a próbka testowa została zabudowana w instalacji docelowej na obiekcie przemysłowym. Ze względu, że jednym z warunków umowy z właścicielem instalacji jest poufność, informacje o testach na instalacji są ograniczone, zabronione jest również wykonywanie zdjęć na obiekcie przemysłowym właściciela instalacji.

Próbka testowa przeszła pozytywnie próby rozruchowe na ciśnieniu docelowym instalacji oraz przy użyciu medium docelowego, którym jest medium powodujące korozję oraz ścieranie. Próbka testowa pracuje bezawaryjnie w ramach całej instalacji.

16. Podsumowanie badań

Przeprowadzone próby spawania łukowego metodami TIG, MMA oraz MAG (MAG w dwóch różnych pozycjach spawania) rur stalowych bez wykladek kompozytowych wraz z pomiarem temperatury od strony grani potwierdziły, że można uzyskać złącza spawane o wymaganym poziomie jakości spoin, potwierdziły to badania nieniszczące i niszczące. Ze względu na występowanie wysokich temperatur nagrzewania się rur oraz długie czasy przebywania w krytycznych dla wykladek zakresach temperaturowych (podczas nagrzewania oraz chłodzenia rur w trakcie procesu spawania) powodowałyby uszkodzenie wykladek

kompozytowych. Z tego względu do dalszych badań porównawczych wybrano najkorzystniejszą metodę spawania – spawanie TIG oraz dobrano nową metodę spawania – spawanie laserowe.

Przeprowadzone próby spawania porównawczego TIG i ręcznego LBW (LBW bez i z materiałem dodatkowym do spawania) przeprowadzone na blachach bez wykładek wraz z pomiarem temperatury od strony grani pozwoliły na wyłonienie najkorzystniejszego rozwiązania jeśli chodzi o osiągnięte temperatury maksymalne podczas spawania oraz długości czasu przebywania w krytycznych dla wykładek kompozytowych zakresach temperatur. Proces spawania ręcznego LBW z zastosowaniem materiału dodatkowego do spawania cechował się najlepszymi wynikami w tym zakresie, natomiast badania nieniszczące – radiograficzne, pokazały, że proces należało dopracować ze względu na uzyskanie odpowiedniego poziomu jakości spoin. Dodatkowo, pomimo najlepszych wyników, proces należało poddać dalszej optymalizacji w celu dalszego obniżenia temperatur nagrzewania podczas spawania.

Kolejne próby spawania ręcznego LBW blach potwierdziły, że istnieje odpowiedni gaz osłonowy – azot, gdzie wynikiem spawania jest uzyskanie złączy spawanych o wymaganym poziomie jakości, co zostało potwierdzone badaniami nieniszczącymi i niszczącymi złączy spawanych.

Podczas kolejnych prób spawania spoin doczołowych bez pełnego przetopu potwierdzono, że istnieje pole parametrów spawania i odpowiednich warunków spawania (np. odpowiednie przygotowanie rowka spawalniczego, kontrolowana temperatura międzysciegowa, odpowiednia kolejność spawania), w których jest możliwość uzyskania odpowiedniego poziomu jakości złączy bez uszkodzania materiału wykładki. Poziom jakości został potwierdzony badaniami nieniszczącymi i niszczącymi, przeprowadzono również badania przyczepności materiału kompozytowego, stopnia jego odspojenia oraz oględziny powierzchni wykładki, badania zakończyły się wynikiem pozytywnym. Ze względów technologicznych do dalszych badań stosowano rozwiązanie spoin doczołowych bez pełnego przetopu, w dalszym etapie badań przeprowadzono stosowne obliczenia wytrzymałościowe.

Dodatkowo, w celu usprawnienia procesu spawania, przeprowadzono próbę zamiany metody spawania z ręcznej LBW na metodę TIG dla ostatniego ściegu spoiny. Badania pokazały, że nie ma możliwości zamiany procesu spawania nawet wyłącznie dla jednego – ostatniego ściegu spoiny, gdyż najkorzystniejszy z łukowych procesów spawania generuje

na tyle dużo ciepła, że pomimo znacznej już odległości od materiału wykładki – uszkadzał go w szerokim jego zakresie.

Przeprowadzono symulację procesu spawania ręcznego LBW dla warunków rzeczywistych spawania z temperaturą międzyścięgową na poziomie 30°C oraz dodatkowo dla temperatury międzyścięgowej na poziomie 50°C. Symulację przedstawiono w dwóch zakresach temperatur: 700÷1500°C oraz 0÷350°C. Przedstawiono, jaki wpływ miało zwiększenie temperatury międzyścięgowej zarówno na rozkład temperatur w rejonie źródła ciepła spawania, jak również w całym materiale rury stalowej z wykładką. Potwierdzono, że nawet niewielka zmiana temperatury międzyścięgowej ma znaczny wpływ na sposób rozchodzenia się ciepła oraz możliwość uszkadzania materiału wykładki.

Po pozytywnym zakończeniu badań i przed wdrożeniem technologii do produkcji dokonano obliczeń wytrzymałościowych prototypowej rury testowej. Potwierdzono, że wykonana rura będzie spełniała warunki wytrzymałościowe zgodnie z obowiązującymi przepisami i dyrektywami. Wykonano rurę testową, przeprowadzono badania nieniszczące oraz próbę ciśnieniową, która zakończyła się wynikiem pozytywnym, potwierdzając właściwe jej wykonanie.

Rura testowa została zaimplementowana w istniejącą infrastrukturę na obiekcie przemysłowym ze skutkiem pozytywnym. Przeszła pozytywnie rozruch i testy oraz jest częścią pracującej instalacji układu technologicznego właściciela.

W zależności od gatunku materiału stalowego rury, jej średnicy zewnętrznej, grubości ścianki, rodzaju wykładki kompozytowej oraz parametrów instalacji zabudowy rury (w szczególności ciśnienia obliczeniowego) należy dla każdego typoszeregu produktów dobrać odpowiednią wysokość progu spawalniczego oraz parametrów spawania. Wysokość progu należy potwierdzić przez przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych, a parametry spawania należy zweryfikować poprzez wykonanie symulacji MES. Zaproponowane rozwiązanie przed dopuszczeniem do produkcji należy również przebadать poprzez wykonanie testów spawania, rur z wykładkami zakończonych pozytywnymi badaniami wizualnymi, penetracyjnymi, magnetyczno-proszkowymi oraz próbą ciśnieniową.

17. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski naukowe oraz osiągnięcia wdrożeniowe:

Wnioski naukowe:

1. Dokonano analizy wpływu techniki i parametrów spawania na rozkład temperatur w grani spoiny, określając zależności między maksymalną temperaturą, czasem jej oddziaływania a ryzykiem odspojenia wykładki. Przeprowadzono analizę procesu spawania laserowego ręcznego pod kątem doboru parametrów technologicznych (m.in. mocy lasera, prędkości spawania, oraz strategii prowadzenia wiązki). Wykazano, że parametry te w sposób bezpośredni kształtują rozkład temperatury w obszarze grani spoiny. Ustalono zależności między osiąganą temperaturą maksymalną a czasem jej oddziaływania, które mają kluczowe znaczenie dla oceny ryzyka odspojenia wewnętrznej wykładki kompozytowej. Wyniki badań wskazują, że kontrola parametrów procesu pozwala ograniczyć nadmierne nagrzewanie się materiału wykładki, co przekłada się na jej integralność i trwałość eksploatacyjną.
2. Przeprowadzono analizę metalograficzną oraz badania właściwości mechanicznych złączy powstałych w wyniku ręcznego spawania laserowego rur z wykładkami kompozytowymi. Stwierdzono, że mikrostruktura spoin wykazuje zgodność ze strukturą materiału rodzimego, co świadczy o stabilności procesu i poprawności zastosowanych parametrów. Potwierdzono również, że właściwości wytrzymałościowe wykładki w obszarze sąsiadującym ze spoiną zostały zachowane, a proces spawania nie prowadzi do degradacji ani do utraty jej funkcjonalności.
3. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano nowe rozwiązanie w zakresie ukosowania krawędzi rur stalowych z wykładką kompozytową. Proponowana metoda minimalizuje ilość ciepła przekazywaną do wykładki w trakcie spawania, zmniejszając tym samym ryzyko jej odspojenia lub uszkodzenia. Wypracowane podejście ma charakter nowej wiedzy teoretycznej i praktycznej, stanowiąc istotny wkład w rozwój technologii przygotowania materiałów do spawania rur wielowarstwowych stosowanych w aplikacjach wymagających wysokiej niezawodności, takich jak przemysł chemiczny czy energetyka.

4. Przeprowadzone symulacje MES umożliwiły ilościowe określenie wpływu parametrów spawania na rozkład temperatur w obszarze połączenia spawanego. Szczególną uwagę zwrócono na temperaturę międzyściogową, która okazała się istotnym czynnikiem decydującym o ryzyku odspojenia wykładki. Opracowane modele pozwalają na przewidywanie skutków zmian parametrów procesu i stanowią narzędzie wspierające optymalizację technologii spawania laserowego rur z wykładkami kompozytowymi. Dzięki temu możliwe jest projektowanie procesów o podwyższonej niezawodności, z uwzględnieniem ochrony materiałów wewnętrznych.

Osiągnięcia użyteczne / wdrożenia:

1. Potwierdzono możliwość wytwarzania i spawania rur stalowych z wewnętrznymi wykładkami kompozytowymi bez ich uszkodzenia, co dowodzi, że kontrola parametrów spawania pozwala zachować integralność trudnościeralnych, odpornych na korozję powłok kompozytowych.
2. Zidentyfikowano, że ręczne spawanie laserowe z użyciem materiału dodatkowego jest jedynym procesem umożliwiającym zachowanie integralności wykładki przy akceptowalnym zakresie odspojenia od rury stalowej.
3. Opracowana technologia wytwarzania i spawania rur stalowych z wykładkami kompozytowymi została wdrożona w praktyce przemysłowej – wykonana próbka testowa została zainstalowana w istniejącej instalacji i pomyślnie przeszła testy rozruchowe.
4. Udowodniono możliwość wykonywania doczołowych połączeń spawanych rur z wykładkami kompozytowymi, wcześniej niewykonywanych, co zwiększa zakres możliwości projektowych i wykonawczych w produkcji oraz montażu takich rur.
5. Zastosowanie opracowanego rozwiązania pozwoliło na redukcję masy rur oraz ograniczenie ilości spawania warsztatowego, co ułatwia transport oraz montaż elementów w miejscu docelowym.
6. Potwierdzono, że metody spawania łukowego (TIG, MMA, MAG) prowadzą do uszkodzenia wykładek, co umożliwia świadomy wybór procesu spawania w zastosowaniach praktycznych.

Literatura

- [1] Jamrozik W., Górka J., Kik T., Temperature-Based Prediction of Joint Hardness in TIG Welding of Inconel 600, 625 and 718 Nickel Superalloys. *Materials*, 2021, 14, 442. DOI: 10.3390/ma14020442
- [2] Stanisław D., Machniewicz T., Parzych S., Jeż G., Dvorkin L., Hebda M., Microstructure and Mechanical Properties of Joints Depending on the Process Used. *Materials*, 2022, 15, 5171. DOI: 10.3390/ma15155171
- [3] Wyględacz B., Kik T., Termoelektryczne i termograficzne pomiary wysokotemperaturowych cykli cieplnych, *Spajanie Materiałów Konstrukcyjnych*, 2019, nr 4, s. 30-33. DOI: 10.17729/ebis.2023.4/2
- [4] Lisiecki A., Development of Laser Welding and Surface Treatment of Metals. *Materials*, 2022, 15, 1765. DOI: 10.3390/ma15051765.
- [5] Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A., Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, 2020, t. 98, nr 1, s. 1-9. DOI: 10.5604/01.3001.0014.0815.
- [6] Topór S., Wpływ sposobu spawania na rozkład temperatur spawanych rur stalowych z wykładkami kompozytowymi. [w:] Gwiazda A.: *Interdyscyplinarne badania młodych naukowców*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2022, s. 286-310. ISBN 978-83-7880-857-2
- [7] Topór S., Topolska S., Technologia spawania rur stalowych z wykładkami kompozytowymi na bazie poliuretanu. [w:] Górka J.: *Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk*, Gliwice, 2022, s. 384-392. ISBN 978-83-63605-53-7
- [8] Topór S., Wpływ metody spawania na rozkład temperatur spawanych rur stalowych z wykładkami kompozytowymi. [w:] Gwiazda A.: *Interdyscyplinarne badania młodych naukowców*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2023, s. 410-425. ISBN 978-83-7880-905-0. DOI: 10.34918/86320
- [9] Topór S., Wyględacz B., Topolska S., Wpływ metod spawania łukowego na rozkład temperatur podczas spawania rur stalowych zawierających wykładki kompozytowe. [w:]

Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2023, s. 424-432. ISBN 978-83-63605-55-1

[10] Topór S., Wyględacz B., Topolska S., Wpływ metody spawania na rozkład temperatur w elementach stalowych z wykładkami kompozytowymi, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, No. 4/2023, s. 16-21. ISSN 0867-583X, e-ISSN 2300-1674

[11] Xia C., Wang H., Wu Y., Wang H., Joining of the Laminated Electrical Steels in Motor Manufacturing: A Review. Materials, 2020, t. 13, 4583. DOI:10.3390/ma13204583.

[12] Wyględacz B., Monitorowanie cieplne spawania laserowego stali, [w:] Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, 2021, s. 433-442, ISBN 978-83-63605-50-6.

[13] Gapontsev V., Stukalin F., Pinard A., Shkurikhin O., Grapov Y., Markushov I., Handheld laser welding and cleaning system for typical metal fabrication using 1.5 kW fiber laser source, [in:] Proceedings of the Fiber Lasers XIX: Technology and Systems, San Francisco, 2022. DOI: 10.1117/12.2616585.

[14] Wu Y., Niu W., Zhao T., Li Z., Study on Characteristics of Pipeline Hydraulic Transportation of Coarse Particles Based on LBM-DEM Method, Water, 2023; 15(9):1717. DOI: 10.3390/w15091717.

[15] Chen Q., Xiong T., Zhang X., Jiang P., Study of the hydraulic transport of non-spherical particles in a pipeline based on the CFD-DEM, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14:1, 53-69. DOI: 10.1080/19942060.2019.1683075.

[16] Zhang Z., Sun B., Wang Z., Pan S., Lou W., Tong S., Spatio-Temporal Evolution Model of the Hydraulic Transport Characteristics of Particulate Solids. Front. Earth Sci., 2021, 9:752548. DOI: 10.3389/feart.2021.752548.

[17] Abe M.C., Gelladuga G.A., Mendoza C.J., Natavio J.M., Zabala J.S., Lopez E.C.R., Pneumatic Conveying Technology: Recent Advances and Future Outlook. Engineering Proceedings. 2023; 56(1):205. DOI: 10.3390/ASEC2023-16267.

[18] Xu F., Recent Advancement in Pneumatic Conveying for Application in Feed Industry: A Review. Preprints 2023, 2023101376. DOI: 10.20944/preprints202310.1376.v1.

[19] Jahn C., Madaj M., Klimas W., Sposoby transportu górniczych spoiw mineralnych, Górnictwo i Geologia, 2010, 5(5), s. 47-57.

- [20] Mączka, T., Borkowski, B., Model instalacji do transportu materiałów erozyjnych i korozyjnych. Napędy i Sterowanie, 2018, 20(11), s. 120-123.
- [21] Zolfagharnasab M.H., Salimi M., Zolfagharnasab H., Alimoradi H., Shams M., Aghanajafi C., A novel numerical investigation of erosion wear over various 90-degree elbow duct sections, Powder Technology, 2021, Vol. 380, s. 1-17, ISSN 0032-5910. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.11.059.
- [22] Szewczyk, P. Nowoczesne materiały i technologie do budowy gazociągów wysokiego ciśnienia oraz rurociągów technologicznych na terenach górniczych, Nafta-Gaz, 2017, 73, (10), s. 778–783. DOI: 10.18668/NG.2017.10.07
- [23] Szymański K., Jonda E., Szymański W., Powłoki do ochrony przed zużyciem części maszyn wytwarzane metodami napawania i natryskiwania cieplnego, Ochrona przed Korozją, 2020, vol. 63, nr 5/2020. ISSN 0473-7733, e-ISSN 2449-9501
- [24] Górka J., Poloczek T., Janicki D., Lont A., Topór S., Żuk M., Rzeźnikiewicz A., Microstructure and Erosion Wear of In Situ TiC-Reinforced Co-Cr-W-C (Stellite 6) Laser-Cladded Coatings. Materials. 2024; 17(13):3101. DOI: 10.3390/ma17133101
- [25] Skrzypczyk A., Rutkowski S., Kasińska J., Napawanie warstw trudnościeralnych na stali Hardox metodami OAW i MMA, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 298, Mechanika, z. 90, 2018, s. 213-222. DOI: 10.7862/rm.2018.18
- [26] Bęczkowski R., Wybrane zagadnienia stosowania odpornych na zużycie płyt w przemyśle wydobywczym, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 89, 5/2017, s. 80-84
- [27] Data sheet 2059pl Rudy Hardox® 2020-07-01
- [28] MIILUX® STALE TRUDNOŚCIERALNE KARTA PRODUKTOWA karta_trudnoscieralne_A4_PL_230321 2021-03-23
- [29] Grigoriev S.N., Technologies of Coatings and Surface Hardening: Industrial Applications, Coatings 2023, 13, 511, s. 1-8. <https://doi.org/10.3390/coatings13030511>
- [30] Formanek B., Szymański K., Hernas A. Trwałość eksploatacyjna natrykiwanych cieplnie powłok do ochrony ścian kotłów fluidalnych CFB, Problemy eksploatacji, 2012, 2, s. 57-66.
- [31] Szymański K., Szpak M., Gdesz M. Natryskiwane cieplnie powłoki ochronne stosowane w ochronie przed procesami korozyjnymi, Ochrona przed korozją, 2014, 57, s. 394-396.

- [32] Rusowicz A., Przegląd metod nakładania powłok, Szkło i Ceramika, 2021, nr 1, s. 21-24.
- [33] Szymański K. Jonda E., Szymański W., Powłoki do ochrony przed zużyciem części maszyn wytwarzane metodami napawania i natryskiwania cieplnego, Ochrona przed korozją, 2020, 5, vol. 63, ISSN 0473-7733, e-ISSN 2449-9501
- [34] Bęczkowski R., Gucwa M., Defects Appearing in the Surfacing Layers of Abrasion Resistant, Archives of foundry engineering, 2016, 4, vol. 16, s. 23-28, ISSN 2299-2944. <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0077>
- [35] Shibe V., Chawla V., A Review of Surface Modification Techniques in Enhancing the Erosion Resistance of Engineering Components 1. International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology, 2014, 2, Vol. 4, s. 92-95, , ISSN 2249-5770, e-ISSN 2249-5762.
- [36] Kotarska A., Poloczek T., Janicki D., Characterization of the Structure, Mechanical Properties and Erosive Resistance of the Laser Cladded Inconel 625-Based Coatings Reinforced by TiC Particles, Materials, 2021, 14, 2225. <https://doi.org/10.3390/ma14092225>
- [37] Woźniak D., Kukielka L. Kompozyty w technice w aspektach materiałów nowej generacji, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 2014, R.15, nr 6, s. 292-292
- [38] Błachnio J., Chalimoniuk M., Nidzgorska A., Wybrane zastosowania kompozytów w wojsku, Journal of KONBiN, 2023, 4, Vol. 53, s. 191-210. DOI 10.5604/01.3001.0054.1761
- [39] Ciokan R., Urbańczyk M., The Development of a Technology of the Laser-Based Welding of Butt Joints in Composite Tubes, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, No. 1/2021, s. 23-31.
- [40] Ciokan R., Urbańczyk M., The Development of a Technology for the Conventional Welding of Butt Joints (of Membrane Walls) of Composite Tubes, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, No. 3/2023, s. 51-56.
- [41] Chen L.-Y., Qin P., Zhang L., Zhang L.-Ch. An overview of additively manufactured metal matrix composites: preparation, performance, and challenge, International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, Vol. 6, 052006. DOI: 10.1088/2631-7990/ad54a4
- [42] Sumithra G., Reddy K. R. N., Dheeraj Kumar G., Ojha S., Jayachandra G., Raghavendra G., Review on composite classification, manufacturing, and applications, Materials Today: Proceedings, 2023, ISSN 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.637

- [43] Materiały i badania własne firmy Takoni
- [44] Karta materiałowa: Poliuretan PUGA 5.1.3 z dnia 30.01.2020
- [45] Atest materiałowy: rury fi 168,3 x 8,8 mm ze stali 20 GB – Świadcstwo odbioru nr 168/AHR/17 z dnia 02.03.2017 (w tym deklaracja zgodności nr 27/13/D/2017 z dnia 27.03.2017)
- [46] Karta charakterystyki: Rura Duroxite® 100 z dnia 14.09.2023
- [47] Karta charakterystyki: Rury Hardox® z dnia 01.07.2020
- [48] <https://takoni.com.pl/> dostęp dnia 10.06.2024
- [49] Głogowska K., Rozwiązania konstrukcyjne maszyn do odlewania rotacyjnego tworzyw polimerowych, Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 2017, 7(2), 115–118. DOI: 10.5604/01.3001.0010.4852
- [50] Gupta N., Ramkumar P.L., Sangani V., An approach toward augmenting materials, additives, processability and parameterization in rotational molding: a review, Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35:14, 1539-1556. DOI: 10.1080/10426914.2020.1779934
- [51] Hejna A., Barczewski M., Andrzejewski J., Kosmela P., Piasecki A., Szostak M., Kuang T., Rotational Molding of Linear Low-Density Polyethylene Composites Filled with Wheat Bran, Polymers, 2020, 12(5):1004. DOI: 10.3390/polym12051004
- [52] Ogila K., Shao M., Yang W., Tan J., Rotational molding: A review of the models and materials, Express Polymer Letters, 2017, 11, 778-798. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.75.
- [53] Ryś J., Malara P., Barski N., Analiza numeryczna wpływu sztywności uszczelki na obciążenie śrub w połączeniu kołnierzowym, Mechanika. Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Zeszyt 5, Rok 108, Kraków, 2011, s. 93-112.
- [54] Lu K., Dong J., Zhang A., Gao B., Analysis on the Leakage of the Flange Connection of the Water-Containing Hydrofluoric Acid Pipeline, Processes, 2021, 9, 1986. DOI: 10.3390/pr9111986
- [55] Alves L., Silva C., Martins P., Joining of polymer and metal tubes by cold forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017, 231(6):505-515. DOI: 10.1177/1464420715605660

- [56] Dekker C., Stikvoort W., Improved design rules for pipe clamp connectors. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81, s.141-157. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2003.11.005.
- [57] Milushev V., Azka A., Mittwollen M., Development of Mechanical Pipe-Connection Design for DEMO, *Journal of Nuclear Engineering*, 2023, 4, s. 111–126. DOI: 10.3390/jne4010008
- [58] Instalacje rurowe rowkowane – dane projektowe. Dane techniczne dla rur rowkowanych przez walcowanie. Victaulic. 26.08-POL. 08/2006
- [59] United States Patent Office: 3,467,410, Chandler R. J., Welded joint for lined pipe, 1969
- [60] Wyględacz B., Topór S., Porównanie spawania ręcznego LBW i TIG stali S355. [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2023, s. 150-156
- [61] Murzin, S.P.; Palkowski, H.; Melnikov, A.A.; Blokhin, M.V. Laser Welding of Metal-Polymer-Metal Sandwich Panels. *Metals* 2022, 12, 256. <https://doi.org/10.3390/met12020256>
- [62] Topór S., Wyględacz B., Topolska S., Wpływ metody spawania na struktury metalograficzne i twardość w elementach stalowych z wykładkami kompozytowymi. [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2025, s. 31-40
- [63] Wyględacz B., Topór S., Topolska S., Porównanie spawania ręcznego LBW przy zastosowaniu różnych gazów osłonowych. [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2024, s. 29-36
- [64] Topór S., Wyględacz B., Topolska S., Spawanie ręczne LBW blach stalowych pokrytych wykładkami kompozytowymi. [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2024, s. 71-78
- [65] Topór S., Poloczek T., Lont A., Topolska S., Ręczne spawanie laserowe (LBW) w pozycji przymusowej stalowych blach z wykładkami kompozytowymi. [w:] Górka J.: Nowoczesne

zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2025, s. 183-190

[66] Topór S., Wyględacz B., Topolska S., Optymalizacja procesu spawania ręcznego LBW rur stalowych pokrytych wykładkami kompozytowymi poprzez zastosowanie symulacji MES. [w:] Górka J.: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych: Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa. Komisja Odlewnictwa Polskiej Akademii Nauk, Gliwice, 2025, s. 93-102

Wykaz norm

- PN-EN ISO 14917:2017-05 Natryskiwanie cieplne – Terminologia, klasyfikacja
- PN-EN ISO 12944-2:2018-02 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 2: Klasyfikacja środowisk.
- PN-EN 1092-1:2018-08 Kołnierze i ich połączenia – Kołnierze okrągłe do rur, armatury, kształtek, łączników i osprzętu z oznaczeniem PN – Część 1: Kołnierze stalowe.
- PN-EN ISO 8501-1:2008 Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów – Wzrokowa ocena czystości powierzchni – Część 1: Stopnie skorodowania i stopnie przygotowania niepokrytych podłoży stalowych oraz podłoży stalowych po całkowitym usunięciu wcześniej nałożonych powłok.
- PN-ISO 815:1998 Guma i kauczuk termoplastyczny – Oznaczanie odkształcenia trwałego po ściskaniu w temperaturze otoczenia, podwyższonej lub niskiej.
- PN-ISO 4649:2007 Guma i kauczuk termoplastyczny – Oznaczanie odporności na ścieranie za pomocą aparatu z obracającym się bębniem.
- PN-EN ISO 527-5:2022-06 Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu – Część 5: Warunki badania kompozytów tworzywowych wzmocnionych jednokierunkowo włóknem.
- PN-ISO 34-1:2007 Guma i kauczuk termoplastyczny – Oznaczanie wytrzymałości na rozdzieranie – Część 1: Próbkki do badań prostokątne, kątowe i łukowe.
- PN-EN 60584-1:2014-04 Termoelementy – Część 1: Specyfikacje i tolerancje EMF
- PN-EN ISO 4063:2023-10 Spawanie, zgrzewanie, lutowanie i cięcie – Nazwy procesów i numery referencyjne
- PN-EN ISO 6947:2020-03 Spawanie i procesy pokrewne – Pozycje spawania
- PN-EN ISO 9692-1:2014-02 Spawanie i procesy pokrewne – Rodzaje przygotowania złączy – Część 1: Ręczne spawanie łukowe, spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazów, spawanie gazowe, spawanie metodą TIG i spawanie wiązką stali
- PN-EN ISO 2560:2021-03 Materiały dodatkowe do spawania – Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja

- PN-EN ISO 5817:2023-08 Spawanie – Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) – Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych
- PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie
- PN-EN ISO 3452-1:2021-12 Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne
- PN-EN ISO 9934-1:2017-02 Badania nieniszczące – Badania magnetyczne proszkowe – Część 1: Zasady ogólne
- PN-EN ISO 636:2017-08 Materiały dodatkowe do spawania – Pręty, druty i stopiwa do spawania elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja
- PN-EN ISO 23277:2015-05 Badania nieniszczące spoin – Badania penetracyjne – Poziomy akceptacji
- PN-EN ISO 23278:2015-05 Badania nieniszczące spoin – Badania magnetyczno – proszkowe – Poziomy akceptacji
- PN-EN ISO 17639:2022-07 Badania niszczące spawanych złączy metali – Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych
- PN-EN ISO 9015-1:2011 Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie twardości – Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo
- PN-EN ISO 14341:2021-03 Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe i stopiwo do spawania łukowego elektrodą metalową w osłonie gazu stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja
- PN-EN ISO 21952:2012 Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe, druty, pręty i stopiwa do spawania łukowego w osłonie gazu stali odpornych na pełzanie – Klasyfikacja
- PN-EN ISO 6848:2015-10 Spawanie i cięcie łukowe – Elektrody wolframowe nietopliwe – Klasyfikacja
- PN-EN ISO 14175:2009 Materiały dodatkowe do spawania – Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych
- PN-EN ISO 13919-1:2020-04 Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego – Wymagania i zalecenia do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych – Część 1: Stal, nikiel, tytan i ich stopy

- PN-EN ISO 16276-1:2008 Ochrona konstrukcji stalowych przed korozją za pomocą ochronnych systemów malarskich – Ocena i kryteria przyjęcia adhezji/kohezji (wytrzymałości na odrywanie) powłoki – Część 1: Badanie metodą odrywania
- PN-EN ISO 4136:2022-12 Badania niszczące złączy spawanych metali – Próba rozciągania próbek poprzecznych
- PN-EN ISO 6892-1:2020-05 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej
- PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów
- PN-EN 13480-3:2024-11 Rurociągi przemysłowe metalowe – Część 3: Projektowanie i obliczenia
- PN-EN 1993-1-8:2006/NA:2011 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów

Załączniki

Załącznik 1. Świadectwo odbioru nr 170/AHR/17 rur ze stali 20GB o średnicy 168,8 mm i grubości 10 mm z dnia 02.03.2017

Załącznik 2. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 1/pWPS

Załącznik 3. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 2/pWPS

Załącznik 4. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 3/pWPS

Załącznik 5. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 4/pWPS

Załącznik 6. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 5/pWPS

Załącznik 7. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 6/pWPS

Załącznik 8. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 7/pWPS

Załącznik 9. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 8/pWPS

Załącznik 10. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 9/pWPS

Załącznik 11. DOCCHRDMPSEX0025 R3 Mode table chart

Załącznik 12. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 10/pWPS

Załącznik 13. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 11/pWPS

Załącznik 14. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 12/pWPS

Załącznik 15. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 13/pWPS

Załącznik 16. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 14/pWPS

Załącznik 17. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 15/pWPS

Załącznik 18. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 16/pWPS

Załącznik 19. Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania nr 17/pWPS

Spis rysunków

Rys. 1. Widok elementów systemu transportu hydraulicznego zastosowanego na terenie kopalni [por. 6]	12
Rys. 2. Widok elementów systemu transportu pneumatycznego zainstalowanego na elektrociepłowni	14
Rys. 3. Przykładowe uszkodzenia występujące podczas eksploatacji: uszkodzenie wykładek, erozja rur, odkształcenia geometryczne rur, zarastanie rur [por. 6].....	15
Rys. 4. Widok prefabrykowanych fragmentów rurociągów wykonanych ze stali trudnościeralnych.	17
Rys. 5. Struktura powłoki wytworzonej metodą naddźwiękowego natryskiwania cieplnego [31].....	18
Rys. 6. Schemat podziału metod natryskiwania cieplnego	19
Rys. 7. Struktura powłoki Inconel 625/TiC napawanej laserowo [36]	21
Rys. 8. Podstawowe modele budowy kompozytów: a) warstwowe, b) umacniane włóknami długimi, c) umacniane włóknami krótkimi, d) umacniane siatką lub tkaniną, e) umacniane cząstkami [38]	22
Rys. 9. Widok makroskopowy przekroju złącza na rurze kompozytowej Sanicro 3R12/4L7 [40]	23
Rys. 10. Przykłady zastosowania wykładek z PUGA w przemyśle (zsypy, rynny, rurociągi, kontenery) [43].....	24
Rys. 11. Wykres przedstawiający porównanie odporności na wycieranie materiału PUGA (PU) w stosunku do innych materiałów [43]	25
Rys. 12. Widok obrazujący fragmenty rur transportowych wyciętych z pracującej instalacji: po lewej stronie rura stalowa bez wykładki kompozytowej, po prawej stronie rura stalowa z wykładką kompozytową [por. 6]	27
Rys. 13. Widok zdemontowanych rur z wykładkami z pracującej instalacji transportu hydraulicznego	28
Rys. 14. Schemat stanowiska do produkcji rur stalowych z wykładką kompozytową: 1 – stanowisko do podgrzewania składników kompozytu: 2 – pojemniki ze składnikami kompozytu, 3 – rurociągowy system transportu składników kompozytu i gotowej mieszanki kompozytu, 4 – układ urządzeń mieszających, 5 – układ dozujący mieszankę kompozytową, 6 – obrotnik, 7 – rura stalowa, 8 – mieszanka kompozytowa, 9 – kierunek obrotu rury	30

Rys. 15. Widok gotowej rury stalowej z wykładką kompozytową [43].....	31
Rys. 16. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzewego z przyspawanymi kołnierzami płaskimi; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz spawany, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna	33
Rys. 17. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzewego z przyspawanym kołnierzem płaskim oraz luźnym; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz luźny, 3 – pierścień spawany, 4 – kołnierz spawany, 5 – rura stalowa, 6 – wykładka, 7 – spoina fabryczna.....	33
Rys. 18. Widok schematu połączenia śrubowego kołnierzewego z przyspawanymi kołnierzami sztykowymi; 1 – połączenie skręcane, 2 – kołnierz sztykowy, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna	34
Rys. 19. Schemat połączenia na obejmy [por. 55]: 1 – obejma, 2 – piasta, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna	35
Rys. 20. Widok schematu obejmy montowanej na rurach stalowych z wykładkami kompozytowymi [por. 55]: 1 – obejma, 2 – połączenie śrubowe	35
Rys. 21. Schemat obejmy montowanej na rowkowanych walcowaniem rurach stalowych: 1 – obejma, 2 – uszczelka, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka	36
Rys. 22. Schemat obejmy montowanej na rowkowanych skrawaniem rurach stalowych: 1 – obejma, 2 – uszczelka, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka	36
Rys. 23. Schemat połączenia spawanego elementów pośrednich rur typu pierścienia i tuleja; 1 – pierścień, 2 – tuleja, 3 – rura stalowa, 4 – wykładka, 5 – spoina fabryczna pierścienia, 6 – spoina fabryczna tulei, 7 – spoina montażowa.....	37
Rys. 24. Widok uszkodzeń rurociągu stalowego z wykładką cementową w rejonie połączenia spawanego: 11, 12 – rury ze stali węglowej, 13, 14 – wykładki cementowe, 15 – uszczelka, 16 – spoina, s – strefa uszkodzenia wykładek po spawaniu [59]	38
Rys. 25. Widok przedstawiający rozwiązanie patentowe z 1969 roku: 21, 22 – rury ze stali węglowej, 23, 24 – fragmenty rur ze stali nierdzewnej, 26, 27 – spoiny, 28, 29 – wykładki cementowe, 31 – spoina ze stali nierdzewnej [59]	39
Rys. 26. Schemat metodyki badań	42
Rys. 27. Koncepcje sposobów przygotowania złączy do spawania o numerach od „a” do „o”, 1 – rura stalowa, 2 – wykładka, 3 – sposób przygotowania do spawania, 4 – pierścień stalowy, 5 – podkładka stała stalowa do spawania, 6 – podkładka ceramiczna	43
Rys. 28. Sposób przygotowania rur do spawania – według rozwiązania „a”	47
Rys. 29. Sposób przygotowania rur do spawania – według rozwiązania „g”	47
Rys. 30. Sposób zainstalowania termopar na próbce według rozwiązania „a”	48

Rys. 31. Sposób zainstalowania termopar na próbce według rozwiązania „g”	48
Rys. 32. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki rozwiązania „a”	50
Rys. 33. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki rozwiązania „g”	50
Rys. 34. Widok makroskopowy przekroju złącza dla rozwiązania „a”, pow. 8x: a) widok od strony lica, b) widok od strony grani.....	52
Rys. 35. Widok makroskopowy przekroju złącza dla rozwiązania „g”, pow. 8x.....	53
Rys. 36. Schemat rozmieszczenia pól obserwacji mikrostruktur złączy: 1 – linia wtopienia od strony lica spoiny, 2 – linia wtopienia w wewnętrznej części spoiny, 3 – linia wtopienia od strony grani, 4 – grani spoiny, 5 – wewnętrzna część spoiny, 6 – lico spoiny	53
Rys. 37. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 25x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6	54
Rys. 38. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „g”, powiększenie 25x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6	55
Rys. 39. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 50x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6	56
Rys. 40. Mikrostruktury złącza – rozwiązanie „a”, powiększenie 50x; punkty obserwacji: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6	57
Rys. 41. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „a”, pow. 200x.....	58
Rys. 42. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „a”, pow. 200x.....	58
Rys. 43. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „a”, pow. 200x	58
Rys. 44. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „g”, pow. 200x	58
Rys. 45. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „g”, pow. 200x.....	59
Rys. 46. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „g”, pow. 200x.....	59
Rys. 47. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „a”, pow. 500x.....	59
Rys. 48. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „a”, pow. 500x.....	59
Rys. 49. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „a”, pow. 500x	60
Rys. 50. Mikrostruktura spoiny złącza rozwiązania „g”, pow. 500x	60
Rys. 51. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza rozwiązania „g”, pow. 500x.....	60
Rys. 52. Mikrostruktura materiału rodzimego złącza rozwiązania „g”, pow. 500x.....	60
Rys. 53. Średnie wartości pomiarów twardości HV1 dla próbek rozwiązania „a” (1) oraz rozwiązania „g” (2).....	61
Rys. 54. Przygotowanie rur do spawania	64
Rys. 55. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki I	65
Rys. 56. Widok złącza I od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym	66

Rys. 57. Widok złącza I od strony grani spoiny	66
Rys. 58. Widok makroskopowy przekroju złącza I, pow. 8x	67
Rys. 59. Mikrostruktura spoiny złącza I: a) pow. 200x, b) pow. 500x	67
Rys. 60. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza I: a) pow. 200x, b) pow. 500x	68
Rys. 61. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki II	69
Rys. 62. Widok złącza II od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym	69
Rys. 63. Widok złącza II od strony grani spoiny	70
Rys. 64. Widok makroskopowy przekroju złącza II, pow. 8x	70
Rys. 65. Mikrostruktura spoiny złącza II: a) pow. 200x, b) pow. 500x	71
Rys. 66. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza II: a) pow. 200x, b) pow. 500x	71
Rys. 67. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki III	72
Rys. 68. Widok złącza III od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym	73
Rys. 69. Widok złącza III od strony grani spoiny	73
Rys. 70. Widok makroskopowy przekroju złącza III, pow. 8x	73
Rys. 71. Mikrostruktura spoiny złącza III: a) pow. 200x, b) pow. 500x	74
Rys. 72. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza III: a) pow. 200x, b) pow. 500x	74
Rys. 73. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania próbki IV	75
Rys. 74. Widok złącza IV od strony lica spoiny po badaniu penetracyjnym	76
Rys. 75. Widok złącza IV od strony grani spoiny	76
Rys. 76. Widok makroskopowy przekroju złącza IV, pow. 8x	77
Rys. 77. Mikrostruktura spoiny złącza IV: a) pow. 200x, b) pow. 500x	77
Rys. 78. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza IV: a) pow. 200x, b) pow. 500x	78
Rys. 79. Przygotowanie blach do spawania: a) dla metody TIG, b) dla metody LBW bez materiału dodatkowego, c) dla metody LBW z materiałem dodatkowym	80
Rys. 80. Schemat pomiarów twardości HV1: a) dla złącza A, b) dla złącza B i C	81
Rys. 81. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza A dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury	83
Rys. 82. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza A dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury	83
Rys. 83. Widok makroskopowy przekroju złącza A, pow. 8x	84
Rys. 84. Mikrostruktura spoiny złącza A, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny	84

Rys. 85. Mikrostruktura złącza A, pow. 50x: a÷c) strefa wpływu ciepła, d) obszar linii wtopienia	85
Rys. 86. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza A.....	86
Rys. 87. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza B dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury.....	87
Rys. 88. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza B dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury.....	88
Rys. 89. Widok makroskopowy przekroju złącza B, pow. 8x.....	89
Rys. 90. Mikrostruktura spoiny złącza B, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny	89
Rys. 91. Mikrostruktura złącza B, pow. 50x: a) strefa wpływu ciepła, b) obszar linii wtopienia	90
Rys. 92. Widok radiogramu złącza B	90
Rys. 93. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza B.....	91
Rys. 94. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza C dla termopar zainstalowanych w odległości 2 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury.....	92
Rys. 95. Spawalniczy cykl cieplny podczas spawania złącza C dla termopar zainstalowanych w odległości 4 mm od dolnej krawędzi spawanej blachy oraz wykres szybkości zmian temperatury.....	93
Rys. 96. Widok makroskopowy przekroju złącza C, pow. 8x.....	94
Rys. 97. Mikrostruktura spoiny złącza C, pow. 50x, od strony: a) lica spoiny, b) grani spoiny	94
Rys. 98. Mikrostruktura złącza C, pow. 50x: a) strefa wpływu ciepła, b) obszar linii wtopienia	95
Rys. 99. Widok radiogramu złącza C	95
Rys. 100. Wykres pomiarów twardości HV1 złącza C.....	96
Rys. 101. Przygotowanie blach do spawania	100
Rys. 102. Widok makroskopowy przekroju złącza N1, pow. 8x.....	101
Rys. 103. Widok radiogramu złącza N1	102
Rys. 104. Mikrostruktura złącza N1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu ciepła.....	102
Rys. 105. Widok makroskopowy przekroju złącza A1, pow. 8x.....	103

Rys. 106. Widok radiogramu złącza A1	103
Rys. 107. Mikrostruktura złącza A1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu ciepła	104
Rys. 108. Widok makroskopowy przekroju złącza M1, pow. 8x	105
Rys. 109. Widok radiogramu złącza M1	105
Rys. 110. Mikrostruktura złącza M1, pow. 200x: a) spoina, b) strefa wpływu.....	106
Rys. 111. Szkic schematu przygotowania blach z wykładkami do spawania	108
Rys. 112. Widok lica złącza 1A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	109
Rys. 113. Widok lica złącza 2A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	109
Rys. 114. Widok lica złącza 3A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	109
Rys. 115. Widok lica złącza 4A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	110
Rys. 116. Widok lica złącza 5A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	110
Rys. 117. Widok lica złącza 6A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	110
Rys. 118. Widok lica złącza 7A: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym.....	111
Rys. 119. Widok złącza 7A od strony wykładki kompozytowej (od strony grani)	111
Rys. 120. Makrostruktura złącza 1A	113
Rys. 121. Makrostruktura złącza 2A	113
Rys. 122. Makrostruktura złącza 3A	113
Rys. 123. Makrostruktura złącza 4A	113
Rys. 124. Makrostruktura złącza 5A	113
Rys. 125. Makrostruktura złącza 6A	113
Rys. 126. Makrostruktura złącza 7A	114
Rys. 127. Widok po badaniu pull-off złącza 1A wraz ze stemplem.....	114
Rys. 128. Widok po badaniu pull-off złącza 7A wraz ze stemplem.....	114
Rys. 129. Widok po badaniu pull-off materiału w stanie dostawy (bez spoiny) wraz ze stemplem.....	114
Rys. 130. Widok lica złącza 1P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym	115
Rys. 131. Widok lica złącza 2P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym	116
Rys. 132. Widok lica złącza 3P: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym	116
Rys. 133. Makrostruktura złącza 1P.....	117
Rys. 134. Makrostruktura złącza 2P.....	117
Rys. 135. Makrostruktura złącza 3P.....	117
Rys. 136. Przygotowanie rur do spawania wraz z zamontowaną termoparą: kolor zielony – termopara, kolor czerwony – miejsce przygrzania termopary	118

Rys. 137. Spawalniczy cykl cieplny dla pierwszego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury	120
Rys. 138. Spawalniczy cykl cieplny dla drugiego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury	121
Rys. 139. Spawalniczy cykl cieplny dla trzeciego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury	121
Rys. 140. Spawalniczy cykl cieplny dla czwartego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury	122
Rys. 141. Spawalniczy cykl cieplny dla piątego ściegu złącza 1R oraz wykres szybkości zmian temperatury	122
Rys. 142. Widok złącza 1R: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym	123
Rys. 143. Makrostruktura złącza 1R	123
Rys. 144. Widok złącza 1R od strony grani po oderwaniu wykładki.....	124
Rys. 145. Widok oderwanej wykładki ze złącza 1R	124
Rys. 146. Widok złącza 2R: a) po spawaniu, b) po badaniu penetracyjnym	125
Rys. 147. Widok makroskopowy przekroju złącza 2R.....	126
Rys. 148. Widok złącza 2R od strony grani po oderwaniu wykładki.....	126
Rys. 149. Widok oderwanej wykładki ze złącza 2R	126
Rys. 150. Przekrój poprzeczny złącza 1R	127
Rys. 151. Przekrój poprzeczny złącza 1R	127
Rys. 152. Przekrój poprzeczny złącza 2R	128
Rys. 153. Przekrój poprzeczny złącza 2R	128
Rys. 154. Próbką R1.1 po statycznej próbie rozciągania	128
Rys. 155. Wykres statycznej próby rozciągania	129
Rys. 156. Wizualizacja siatki MES modelu rury z wykładką	130
Rys. 157. Symulacja spawania pierwszego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	131
Rys. 158. Symulacja spawania drugiego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	131
Rys. 159. Symulacja spawania trzeciego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	132
Rys. 160. Symulacja spawania czwartego ściegu w zakresie temperatur od 700 do 1500°C przy temperaturze temperatury międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C	132

Rys. 161. Symulacja spawania pierwszego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	133
Rys. 162. Symulacja spawania drugiego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	133
Rys. 163. Symulacja spawania trzeciego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	134
Rys. 164. Symulacja spawania czwartego ściegu w zakresie temperatur od 0 do 350°C przy temperaturze międzyściegowej: a) <30°C, b) <50°C.....	134
Rys. 165. Widok wygenerowanych linii oraz punktów symulowanych temperatur	135
Rys. 166. Widok schematu przygotowania do spawania rury testowej RT1: 1 – rura stalowa, 2 – wykładka kompozytowa, 3 – przyspawany ogranicznik stalowy	138
Rys. 167. Widok szczegółu spawania połączenia spawanego laserem ręcznym	138
Rys. 168. Widok fragmentów rur przygotowanych do szepiania i spawania	139
Rys. 167. Widok próbki testowej RT1 podczas spawania	143
Rys. 168. Widok schematu układu podlegającego próbie ciśnieniowej: 1 – rura testowa RT1, 2 – spoina testowa, 3 – dennice, 4 – króciec zasilający, 5 – króciec odpowietrzający, 6 – spoiny tymczasowe do próby ciśnieniowej.....	144

Spis tabel

Tab. 1. Zestawienie wybranych właściwości Poliuretanów PUGA [48].....	26
Tab. 2. Ocena całościowa rozwiązań koncepcyjnych sposobów przygotowania do spawania	44
Tab. 3. Parametry spawania dla rozwiązania „a”	49
Tab. 4. Parametry spawania dla rozwiązania „g”	49
Tab. 5. Parametry spawania dla próbki I.....	65
Tab. 6. Parametry spawania dla próbki II.....	68
Tab. 7. Parametry spawania dla próbki III	72
Tab. 8. Parametry spawania dla próbki IV	75
Tab. 9. Czasy nagrzewania i chłodzenia próbek I÷IV	78
Tab. 10. Parametry spawania dla złącza A	82
Tab. 11. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza A	82
Tab. 12. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza A.....	85
Tab. 13. Parametry spawania dla złącza B	86
Tab. 14. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza B	87
Tab. 15. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza B.....	91
Tab. 16. Parametry spawania dla złącza C	91
Tab. 17. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza C	92
Tab. 18. Wartości pomiarów twardości HV1 złącza C.....	96
Tab. 19. Parametry spawania złączy N1, A1 i M1	100
Tab. 20. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności	108
Tab. 21. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności	115
Tab. 22. Parametry spawania oraz wartości zainicjowanych niezgodności	119
Tab. 23. Czasy nagrzewania i chłodzenia złącza 1R dla poszczególnych ściegów	119
Tab. 24. Wyniki prób rozciągania złączy spawanych.....	128
Tab. 25. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej A pierwszej symulacji	135
Tab. 26. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej B pierwszej symulacji	135
Tab. 27. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej A drugiej symulacji	136

Tab. 28. Maksymalne temperatury symulowanych punktów pomiarowych na linii pomiarowej B drugiej symulacji	136
Tab. 29. Parametry spawania próbki RT1	143

ZALĄCZNIK 1

ALCHEMIA S.A.

ODDZIAŁ RUREXPOL
ul. Trochimowskiego 27
43-007 Częstochowa

NOVISTAL S.C.

WOJSKA POLSKIEGO 16 P. 204

41-600 ŚWIĘTOCHŁOWICE

Odbiorca / Customer / Empfänger

ŚWIADECTWO ODBIORU

ATEST / INSPECTION CERTIFICATE / ABNAHMEPRÜFZEUGNIS
wg EN 10204/DIN 50049/3.1

Posiadamy certyfikowane
systemy zarządzania jakością
wg EN ISO 9001:2008
nr cert. 04 100 950250-001
wg PED 2014/68/EU
DGR-0036-QS-W 427/2011/MUC

Strona / Page / Seite:

1/1

Nr: 170/AHR/17

Data: 2.03.2017

Specyfikacja / Specification / Spezifikation Nr.: 221/2/ 03/03

Numer wagonu - samochodu / Wagon - Truck Nr / Wagen Nr.: SL 82739 / SRS 89 XA

Nr potwierdzenia zam. / Our Confirm. No / Unsere Auftrags Nr.: 709-1095

Lot Nr
/Kern Nr/

Produkt / Product / Erzeugnis:

Rury trudnościeralne

Gatunek / Grade / Gate:

20GB

Stan dostawy / State of Delivery / Lieferzust:

Hartowanie

Kontakt / w Order Note / zu Lieferanzuge
ARR/17/00044/GP

Wymiary / Dimensions / Abmessungen

168.3 x 10

Normy / Terms of Delivery / Lieferbedingungen:

PN-80/H-74219

TWT 02.1/55/82

Przep. odb. / wzm. dod. Terms of Deliv. a. / or Official
Regul. Lieferbedingungen u./a. amtliche Vorschriften

D1-CZ-A2

Zakres długości rur / Range of length / Die Rohr Länge

Zgodnie z zamówieniem klienta

Numer wytypu Heat No. Schmelz- Nr.		Numer próby Sample No. Proben Nr.	Kierunek próby Sample orientation Proben Lage *	R003/Rm	Granica plasty. Yield stress Streck- grenze	Granica wytr. Tensile strength Zugfest- igkeit	Wydł. Elong. Br. D.	Przewł. Reduct. of Area Bruchern- dünning	Twardość Hardness Test Härte	Próba uderzeniowa / Impact test / Kerbschlag					Wartość średnia Average Mittel	Temp °C
					Re MPa	Rm MPa	A5 %	Z %	HB	Kierunek próby Sample orientation Proben Lage *	Uderm. Impact value Kerb- schlag 1	Uderm. Impact value Kerb- schlag 2	Uderm. Impact value Kerb- schlag 3			
Wymagania / Requirements / Anforderungen									min. 240	Typ próby / Type of Sample / Type Probe						
1361081	6295								315							

Spójność wytopu stał. / Way of casting / Einschmelzungsverfahren: - EAF - Oxygen Electric Arc Furnace

Numer wytypu Heat No. Schmelz- Nr.	Ilość ształki Pes. Pcs.	Ilość młt C.m. LM	Masa Weight Masse [Mg]	CE	Analiza chemiczna [%] / Chemical Composition [%] / Chemische Zusammensetzung [%]												
					C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Sb	V	Al	N ₂

1361081 2 8.00 0.313 0.35 0.22 0.67 0.21 0.014 0.009 0.05 0.04 0.11 0.012 0.002 0.002 0.039 0.0129 0.0015

Numer rury / Pipes No / Röhre Nr:

Badania / Tests / Prüfung - wynik pozytywny / Positive Results / positiv Ergebnis

Próba hydrostatyczna, ciśnienie MPa: 5 (5s)

Powierzchnia i wymiary skontrolowane

Niniejszym deklaruję, że dostawa została skontrolowana i odpowiada warunkom zamówienia. / We hereby certify, that the material described above has been tested and complies with terms of the order contract./Es wird bestätigt, das die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht.

Rury oznakowano zgodnie z normą/Pipes marked acc. to standard/

Kennzeichnung nach Normen:

Znak producenta Rsp, wymiar, gatunek, nr wytypu, nr rury, stempel SK, nr naty

ALCHEMIA S.A.
Oddział Rurexpól
Dział Kontroli Jakości

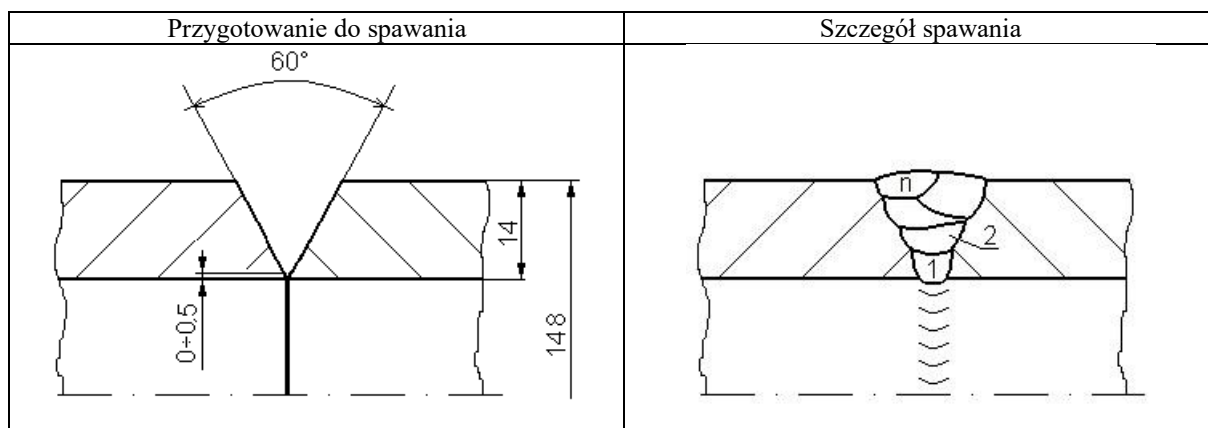
Specjalista
ds. dokumentacji i atestów
Małgorzata Wołoszak

* Q - Poprzeczna / Transverse / Quer L - Wzdłużna / Longitudinal / Länge F - Spójność / Bottom / Fuss K - Górna / Top / Kopf

ZAŁĄCZNIK 2

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	1/pWPS	Materiał podstawowy:	P235/355
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	14
Metoda spaw.: 111		Średnica zewn. [mm]:	148
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	111	Ø 3,2	113÷115	21,6÷24,1	= (+)	-	8,1	1,45÷1,64
2	111	Ø 3,2	120÷122	20,9÷24,5	= (+)	-	11,2	1,08÷1,28
3-n	111	Ø 3,2	118÷122	21,4÷23,4	= (+)	-	7,9	1,53÷1,73

Rodzaj materiału dodatkowego:

E 42 4 B 32 H5
wg PN-EN ISO 2560-A
Basoweld 50

Specjalne prażenie lub suszenie: **350°C/2h**

Gaz osłonowy: -

Zużycie gazu: -

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**
Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

Opracował: **Sławomir Topór**
08.02.2022

ZAŁĄCZNIK 3

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość: **Gliwice**

Nr pWPS: **2/pWPS**

Wykonawca: **ST**

Metoda spaw.: **111**

Rodzaj złącza: **BW**

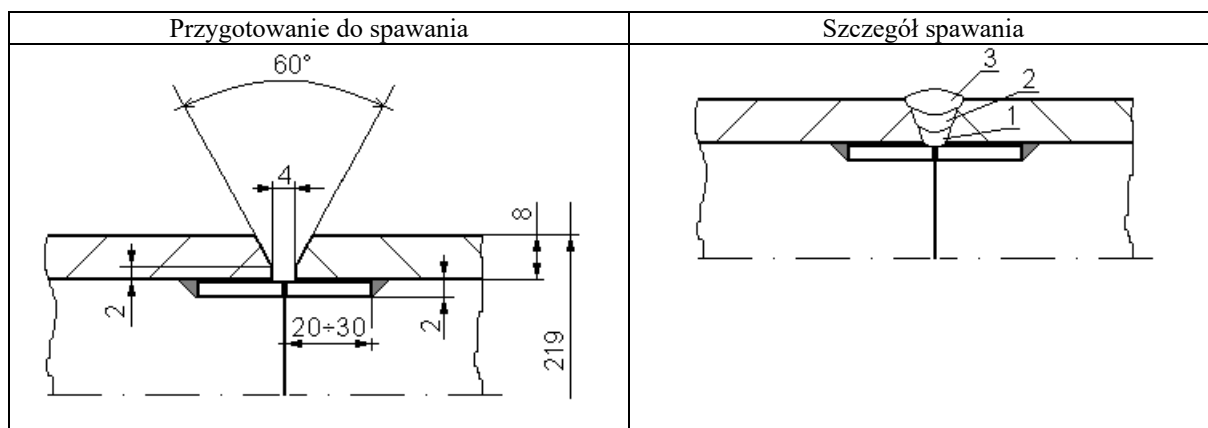
Przygotowanie złącza: **mechaniczne (szlifowanie)**

Materiał podstawowy: **P235/355**

Grubość mat. [mm]: **8**

Średnica zewn. [mm]: **219**

Pozycje spawania: **PA**



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	111	Ø 3,2	117÷121	23,2÷22,9	= (+)	-	11,9	1,08÷1,29
2	111	Ø 3,2	119÷120	22,6÷24,9	= (+)	-	16,4	0,79÷0,87
3	111	Ø 3,2	118÷121	23,1÷24,9	= (+)	-	11,6	1,13÷1,23

Rodzaj materiału dodatkowego:

E 42 4 B 32 H5

wg PN-EN ISO 2560-A

Basoweld 50

Specjalne prażenie lub suszenie: **350°C/2h**

Gaz osłonowy: -

Zużycie gazu: -

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**

Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

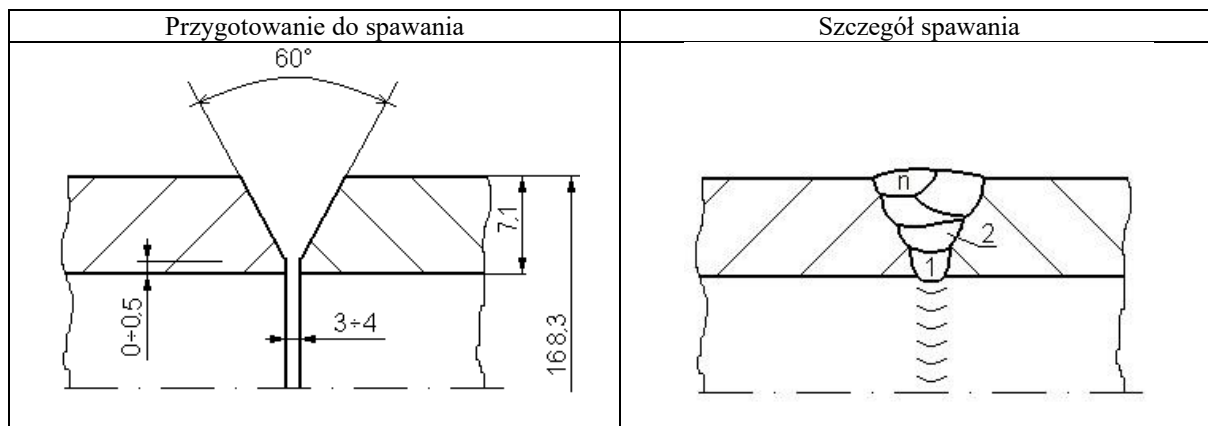
**Zastosowano stałą podkładkę stalową
grubości 2 mm z materiału S355**

Opracował: **Sławomir Topór**
08.02.2022

ZALĄCZNIK 4

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	3/pWPS	Materiał podstawowy:	P355NH TC2
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	7,1
Metoda spaw.: 141		Średnica zewn. [mm]:	168,3
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PH



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	141	Ø 2,4	96÷100	11÷13	= (-)	-	27,0	0,14÷0,17
2	141	Ø 2,4	126÷127	12÷14	= (-)	-	16,0	0,34÷0,4
3	141	Ø 2,4	127÷131	12÷14	= (-)	-	13,0	0,42÷0,50
4-n	141	Ø 2,4	128÷132	13÷14,5	= (-)	-	16,0	0,37÷0,43

Rodzaj materiału dodatkowego:

W MoSi
wg PN-EN ISO 21952-A
LNT 12

Gaz osłonowy: **I1 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **8 ÷ 12 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

WT20 – Ø2,4 (mm) wg PN-EN ISO 6848

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**
Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

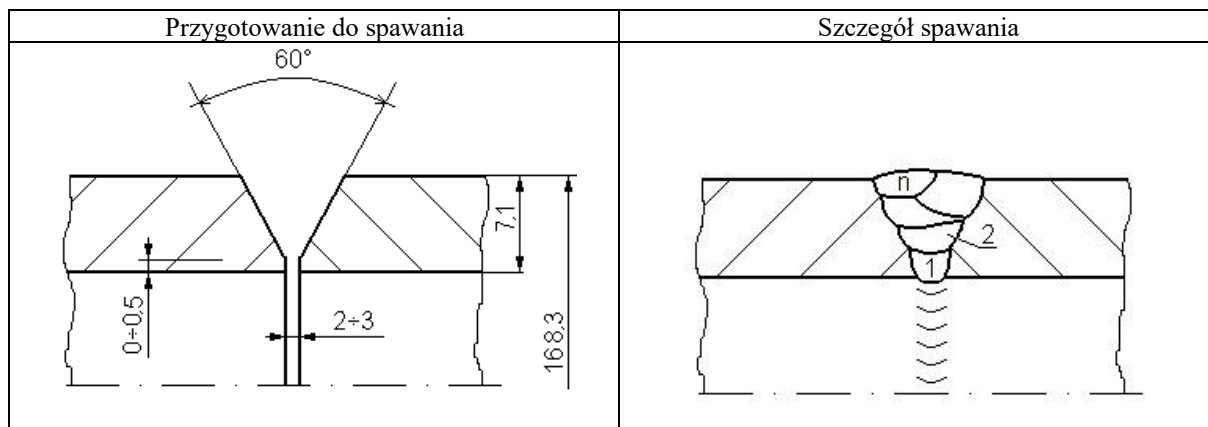
Kąt ustawienia uchwytu: -

Opracował: **Sławomir Topór**
09.09.2022

ZALĄCZNIK 5

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	4/pWPS	Materiał podstawowy:	P355NH TC2
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	7,1
Metoda spaw.:	111	Średnica zewn. [mm]:	168,3
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PH



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	111	Ø 2,5	81÷82	24÷29	= (+)	-	13	0,72÷0,88
2	111	Ø 2,5	88÷89	26÷30	= (+)	-	21	0,52÷0,61
3-n	111	Ø 2,5	88÷89	26÷30	= (+)	-	25	0,44÷0,51

Rodzaj materiału dodatkowego:

E 38 3 B 42
wg PN-EN ISO 2560-A
EB 150

Specjalne prażenie lub suszenie: 350°C/2h

Gaz osłonowy: -

Zużycie gazu: -

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**
Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy:

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

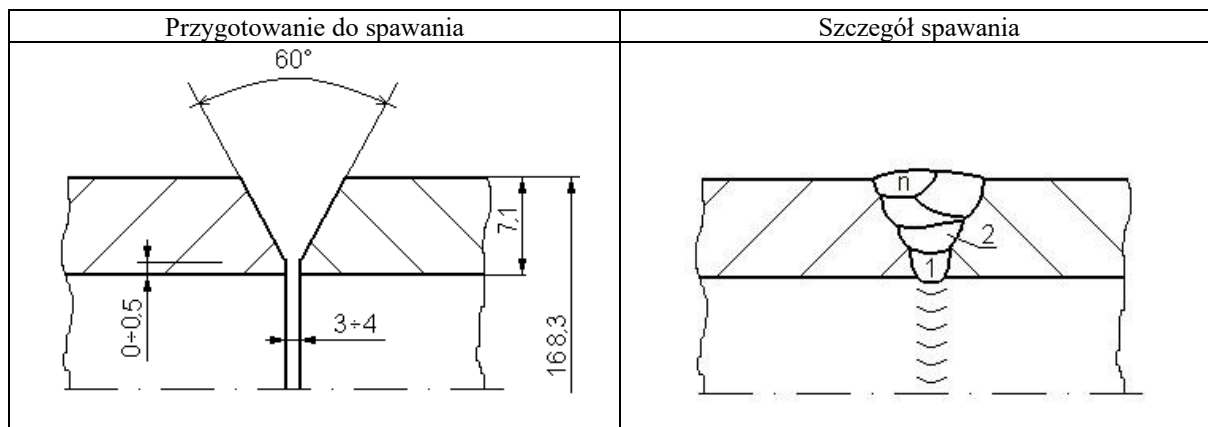
Kąt ustawienia uchwytu: -

Opracował: **Sławomir Topór**
09.09.2022

ZALĄCZNIK 6

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	5/pWPS	Materiał podstawowy:	P355NH TC2
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	7,1
Metoda spaw.: 135		Średnica zewn. [mm]:	168,3
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PH



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	135	Ø 1,0	88÷103	16,0÷16,5	= (+)	-	22	0,31÷0,37
2	135	Ø 1,0	137÷142	18,9÷19,1	= (+)	-	24	0,52÷0,54
3-n	135	Ø 1,0	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	-	22	0,59÷0,67

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 4Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

OK Autrod 12.64

Gaz osłonowy: **M21 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14÷16 l/min**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**

Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

Opracował:

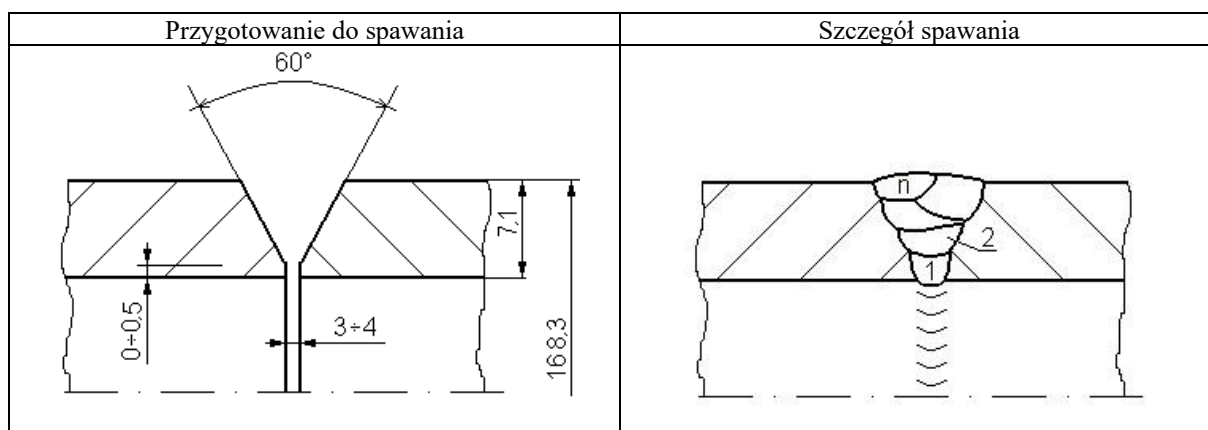
Sławomir Topór

09.09.2022

ZAŁĄCZNIK 7

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	6/pWPS	Materiał podstawowy:	P355NH TC2
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	7,1
Metoda spaw.:	135	Średnica zewn. [mm]:	168,3
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PJ, PH



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/ biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	135 (PJ)	Ø 1,0	88÷110	15,3÷16,3	= (+)	-	27	0,24÷0,32
2	135 (PH)	Ø 1,0	140÷158	19,0÷19,3	= (+)	-	22	0,58÷0,67
3-n	135 (PH)	Ø 1,0	144÷158	18,8÷19,3	= (+)	-	22	0,59÷0,67

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 4Si1

wg PN-EN ISO 14341

OK Autrod 12.64

Gaz osłonowy: **M21 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14÷16 l/min**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

Podgrzewanie przed spawaniem:

20°C

Temperatura międzysciegowa:

max. 65°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **szlifowanie**

Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

Opracował:

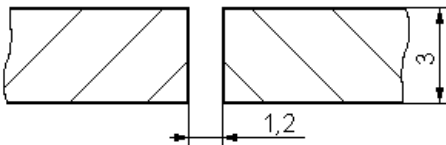
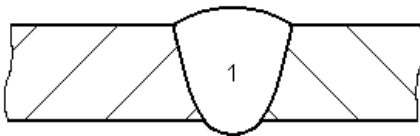
Sławomir Topór

09.09.2022

ZAŁĄCZNIK 8

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	mechaniczne (szlifowanie)
Nr pWPS:	7/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.: 141		Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	141	Ø 2,0	110	10,9÷11	= (-)	-	14÷15	0,48÷0,51

Rodzaj materiału dodatkowego:

W 4Si1

wg PN-EN ISO 636-A
ESAB OK Tigrod 12.64

Gaz osłonowy: **I1 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **10 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

WT20 – Ø2,4 (mm) wg PN-EN ISO 6848

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: -

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -

Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

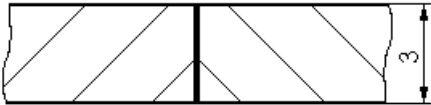
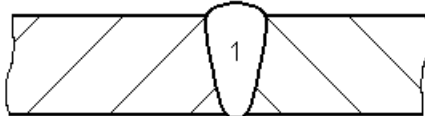
Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)

Opracował: **Sławomir Topór**
26.10.2022

ZALĄCZNIK 9

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	8/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.:	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	-	100	0,5	CW	1200	-	25	0,29

Rodzaj materiału dodatkowego:

-
Gaz osłonowy: **M21 wg PN-EN ISO 14175**
Zużycie gazu: **14 (l/min)**
Gaz formujący: -
Zużycie gazu: -
Rodzaj elektrody wolframowej: -
Podgrzewanie przed spawaniem: **21°C**
Temperatura międzyściegowa: -
Obróbka cieplna: -
Czas, temperatura, metoda: -
Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -
Układanie ściegów: -
Czas przerwy: -
Spawanie łukiem pulsującym: -
Wylot elektrody: -
Szczegół spawania plazmowego: -
Kąt ustawienia uchwytu: -

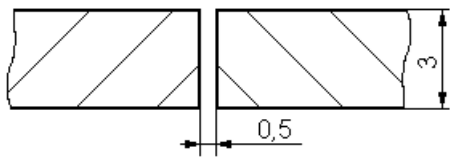
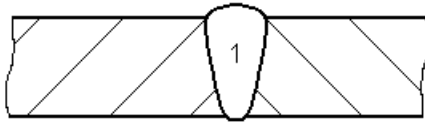
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: Sławomir Topór
26.10.2022

ZAŁĄCZNIK 10

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	9/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.: :	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1200	40	30	0,24

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **M21 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzysciegowa: -

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -

Układanie ściegów: -

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: Sławomir Topór
26.10.2022


LightWELD™
NEED SUPPORT?
1-508-506-2877

LightWELD@ipgphotonics.com

GettingStarted.HandHeldLaserWelder.com



WELDING							CLEANING		
METAL	SHIELDING GAS	MODE	WELD DEPTH				MODE	INTENSITY	
			0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.160" (4.0mm)		Low	High
STAINLESS STEEL	NITROGEN	CW	A1	A2	A3	A4	C	P1	P2
		M	C1	C2	C3	-			
		W	A6	A7	A8	A9			
MILD STEEL	NITROGEN	CW	E1	E2	E3	E4	C	P2	P3
		M	F1	F2	F3	-			
		W	E6	E7	E8	-			
GALVANIZED STEEL	NITROGEN	CW	-	-	-	-	C	P2	P3
		M	J1	J2	J3	-			
		W	-	-	-	-			
ALUMINUM 3XXX	ARGON	CW	-	-	-	-	C	U0	U1
		M	H1	H2	H3	H4			
		W	-	-	-	-			
ALUMINUM 5XXX	ARGON	CW	-	-	-	-	C	U0	U1
		M	L1	L2	L3	L4			
		W	L6	L7	L8	L9			

TACK							
METAL	SHIELDING GAS	MODE	PROGRAM	TACK DEPTH			
				0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.160" (4.0mm)
STAINLESS STEEL	NITROGEN	T	A5	300 W	550 W	800 W	1150 W
MILD STEEL	NITROGEN	T	E5	400 W	650 W	900 W	1250 W
ALUMINUM 5XXX	ARGON	T	L5	700 W	800 W	1100 W	1500 W
1) SELECT THE TACK PROGRAM 2) ADJUST POWER CONTROL TO MATCH DESIRED TACK DEPTH							

Continuous Wave: Maximum penetration & travel speed	Modulation: Reduced energy for slower welding with less heat input	Tack: Small and temporary welds that hold parts together for final welding	Wire Welding: Used when filler material is required to help bridge gaps or produce fillet weld	Cleaning: Pre & post weld joint cleaning to improve weld quality, consistency, & appearance
---	--	--	--	---

 Cleaning Presets & Wire Feeder Programs require optional hardware (LightWELD **XC** & Wire Feeder respectively)

DOCCHRDMP5XX0025 R3



LightWELD®

NEED SUPPORT?

1-508-506-2877

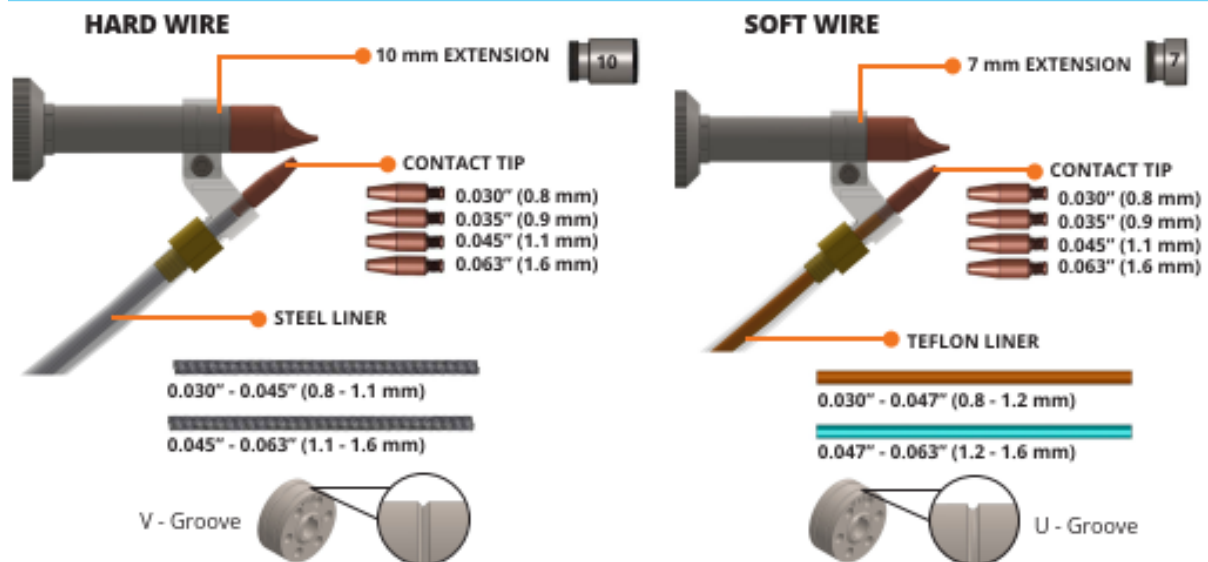
LightWELD@ipgphotonics.com

GettingStarted.HandHeldLaserWelder.com



WELDING NOZZLE SELECTION				
Butt Joint	Corner Joint	Tee Joint	Lap Joint	Edge Joint
CLEANING NOZZLE SELECTION				

WIRE WELDING CONFIGURATIONS & PARAMETERS



RECOMMENDED PARAMETERS

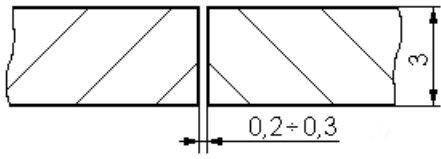
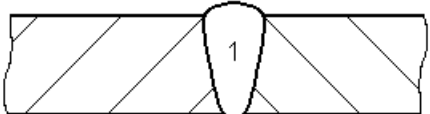
METAL	WIRE ALLOY	WIRE DIAMETER	SHIELDING GAS	WIRE FEED RATE (PROGRAM)			
				0.040" (1.0mm)	0.080" (2.0mm)	0.120" (3.0mm)	0.160" (4.0mm)
STAINLESS STEEL	308LSi	0.045" (1.1 mm)	NITROGEN	70 (A6)	65 (A7)	60 (A8)	50 (A9)
MILD STEEL	ER70S-6	0.045" (1.1 mm)	NITROGEN	70 (E6)	65 (E7)	60 (E8)	-
ALUMINUM 5XXX	ER5356	0.047" (1.2 mm)	ARGON	90 (L6)	80 (L7)	70 (L8)	60 (L9)

Cleaning Presets & Wire Feeder Presets require optional hardware (LightWELD XC & Wire Feeder respectively)

ZAŁĄCZNIK 12

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	10/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.: :	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1200	60	35÷37,5	0,19÷0,20

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **N2 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: **-**

Zużycie gazu: **-**

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: **-**

Obróbka cieplna: **-**

Czas, temperatura, metoda: **-**

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: **-**

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **-**

Układanie ściegów: **-**

Czas przerwy: **-**

Spawanie łukiem pulsującym: **-**

Wylot elektrody: **-**

Szczegół spawania plazmowego: **-**

Kąt ustawienia uchwytu: **-**

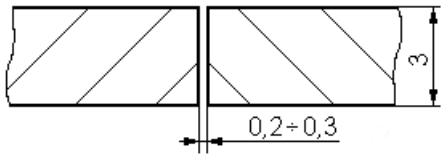
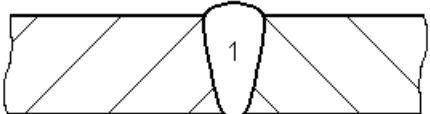
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: **Sławomir Topór**
28.07.2023

ZAŁĄCZNIK 13

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	11/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.: :	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1200	60	35÷37,5	0,19÷0,20

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **I1 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: -

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -

Układanie ściegów: -

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

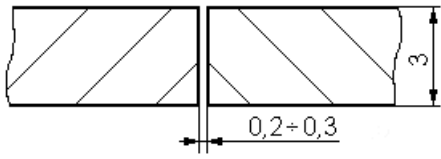
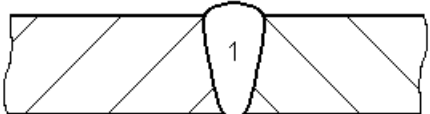
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: Sławomir Topór
28.07.2023

ZAŁĄCZNIK 14

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	12/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.:	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA

Przygotowanie do spawania	Szczegół spawania
	

Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1200	60	35÷37,5	0,19÷0,20

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **M21 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: -

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -

Układanie ściegów: -

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

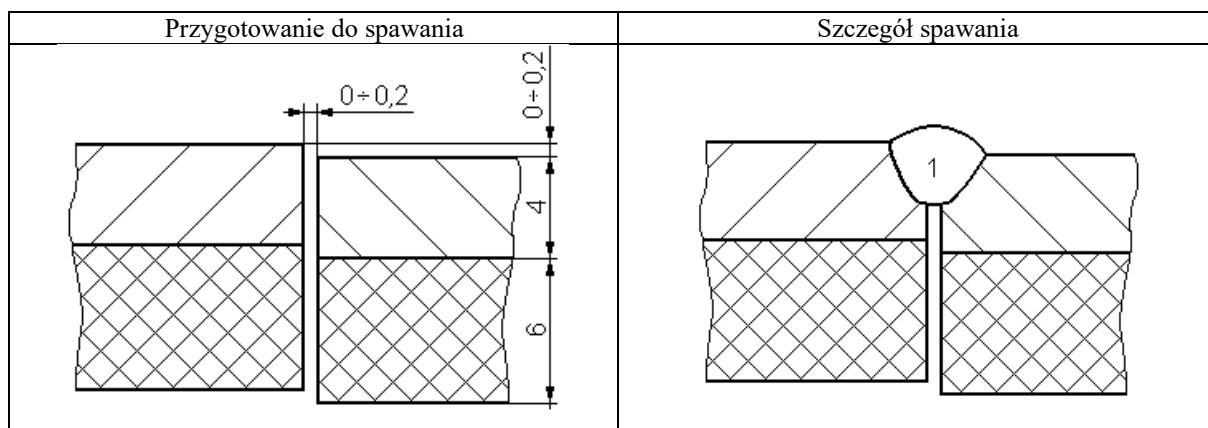
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: Sławomir Topór
28.07.2023

ZALĄCZNIK 15

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	13/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.:	521	Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PA



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drułu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1050÷1500	50÷65	40÷60	0,12÷0,21

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **N2 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: **-**

Zużycie gazu: **-**

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: **-**

Obróbka cieplna: **-**

Czas, temperatura, metoda: **-**

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: **-**

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: **-**

Układanie ściegów: **-**

Czas przerwy: **-**

Spawanie łukiem pulsującym: **-**

Wylot elektrody: **-**

Szczegół spawania plazmowego: **-**

Kąt ustawienia uchwytu: **-**

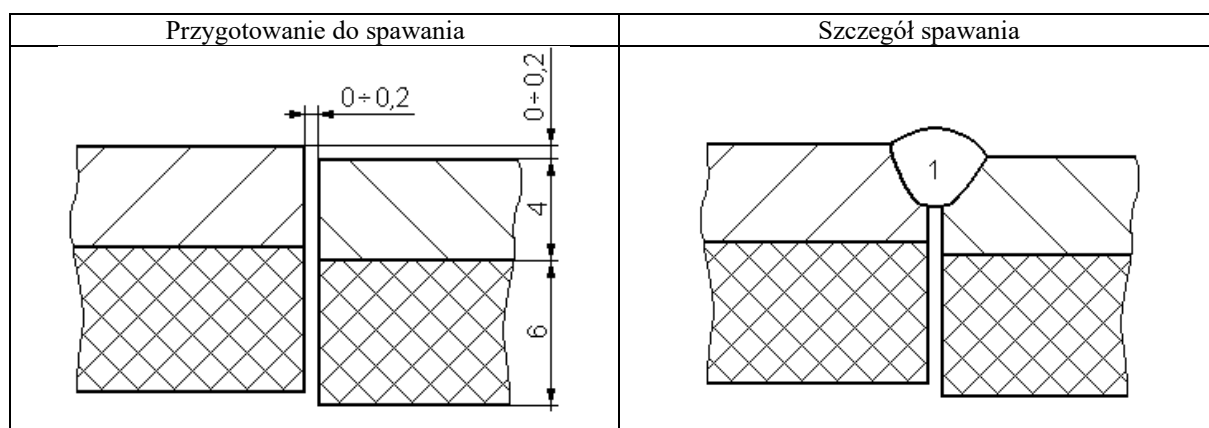
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: **Sławomir Topór**
28.07.2023

ZAŁĄCZNIK 16

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	14/pWPS	Materiał podstawowy:	S355J2+N
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	3
Metoda spaw.: 521		Średnica zewn. [mm]:	-
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PJ



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1500	55÷65	50÷60	0,15÷0,18

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1

wg PN-EN ISO 14341-A

T20 Tysweld

Gaz osłonowy: **N2 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu: **14 (l/min)**

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa: -

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -

Układanie ściegów: -

Czas przerwy: -

Spawanie łukiem pulsującym: -

Wylot elektrody: -

Szczegół spawania plazmowego: -

Kąt ustawienia uchwytu: -

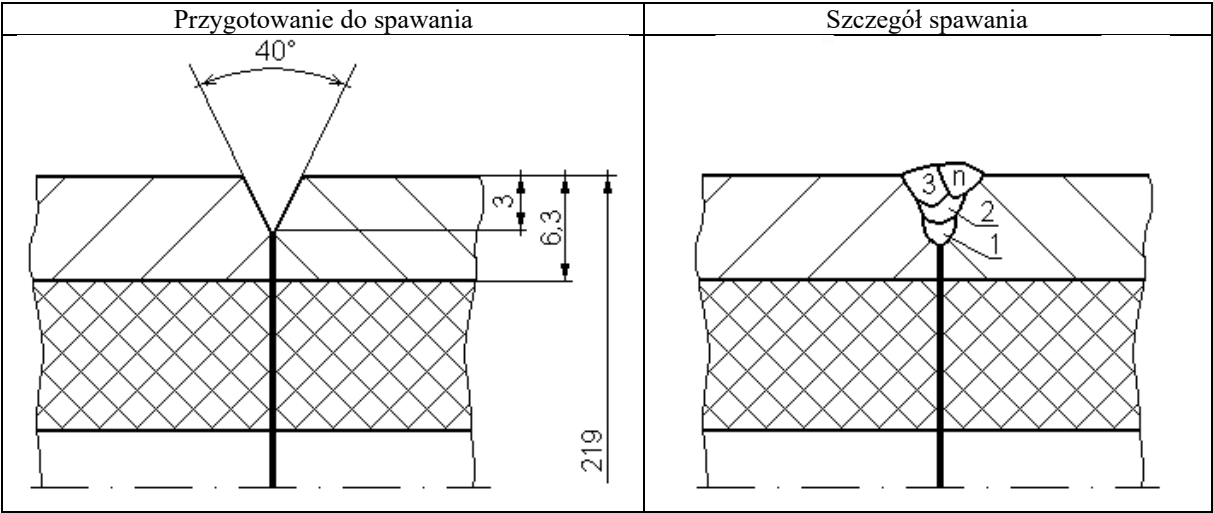
**Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)**

Opracował: Sławomir Topór
19.02.2024

Załącznik 17

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	15/pWPS	Materiał podstawowy:	P355
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	6,3
Metoda spaw.: 521		Średnica zewn. [mm]:	219
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PJ



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania druku [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1÷n	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1500	60	55÷70	0,13÷0,16

Rodzaj materiału dodatkowego:

G 3Si1
wg PN-EN ISO 14341-A
T20 Tysweld

Gaz osłonowy: N2 wg PN-EN ISO 14175

Zużycie gazu: 14 (l/min)

Gaz formujący: -

Zużycie gazu: -

Rodzaj elektrody wolframowej:

-

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 55°C

Obróbka cieplna: -

Czas, temperatura, metoda: -

Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:

- Czyszczenie między warstwami: -
- Układanie ściegów: -
- Czas przerwy: -
- Spawanie łukiem pulsującym: -
- Wylot elektrody: -
- Szczegół spawania plazmowego: -
- Kąt ustawienia uchwytu: -

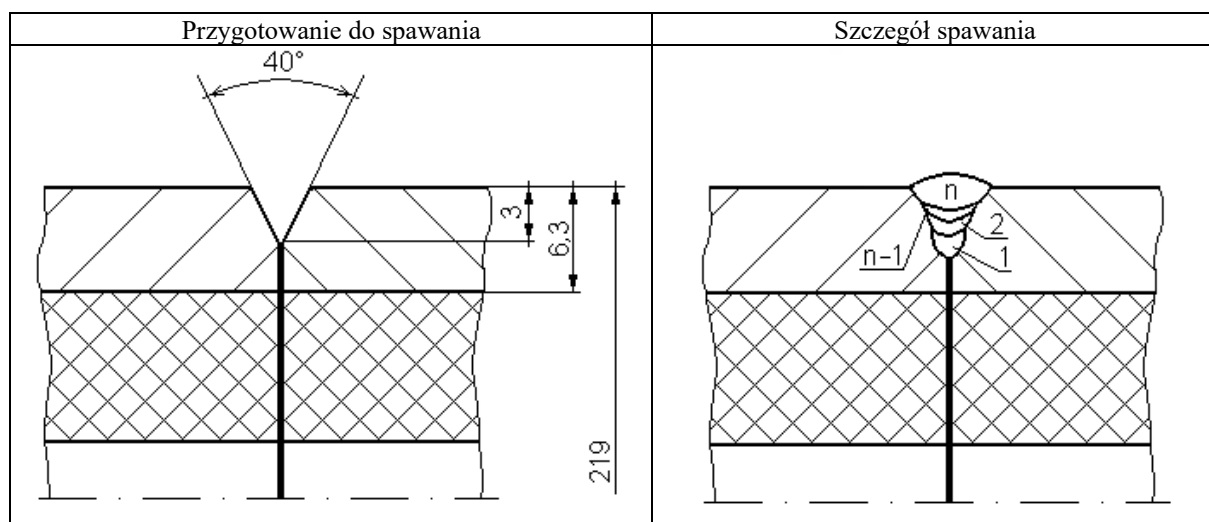
Podano energię liniową spawania
(bez współczynnika metody)

Opracował: Sławomir Topór
30.04.2024

ZALĄCZNIK 18

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	16/pWPS	Materiał podstawowy:	P355
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	6,3
Metoda spaw.:	521 + 141	Średnica zewn. [mm]:	219
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PJ (521) + PH (141)



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1÷(n-1)	521	Ø 1,2	100	0,5	CW	1500	60	55÷70	0,13÷0,16

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica materiału dodatkowego [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
n	141	Ø 2,0	110	10,9÷11	= (-)	-	14÷15	0,48÷0,51

Rodzaj materiału dodatkowego:

521: **G 3Si1 wg PN-EN ISO 14341-A**
T20 Tysweld
141: **W 4Si1 wg PN-EN ISO 636-A**
ESAB OK Tigrod 12.64

Gaz osłonowy:

521: **N2 wg PN-EN ISO 14175**
141: **I1 wg PN-EN ISO 14175**

Zużycie gazu:

521: 14 (l/min); 141: 10 (l/min)

Rodzaj elektrody wolframowej:

WT20 – Ø2,4 (mm) wg PN-EN ISO 6848

Podgrzewanie przed spawaniem:

21°C

Temperatura międzyściegowa:

max. 55°C

Inne informacje:

Czyszczenie między warstwami: -
 Układanie ściegów: **max. 12 (mm)**
 Czas przerwy: -
 Spawanie łukiem pulsującym: -
 Wylot elektrody: -
 Szczegół spawania plazmowego: -
 Kąt ustawienia uchwytu: -
Dla metody 521 podano energię liniową spawania (bez współczynnika metody)

Opracował:

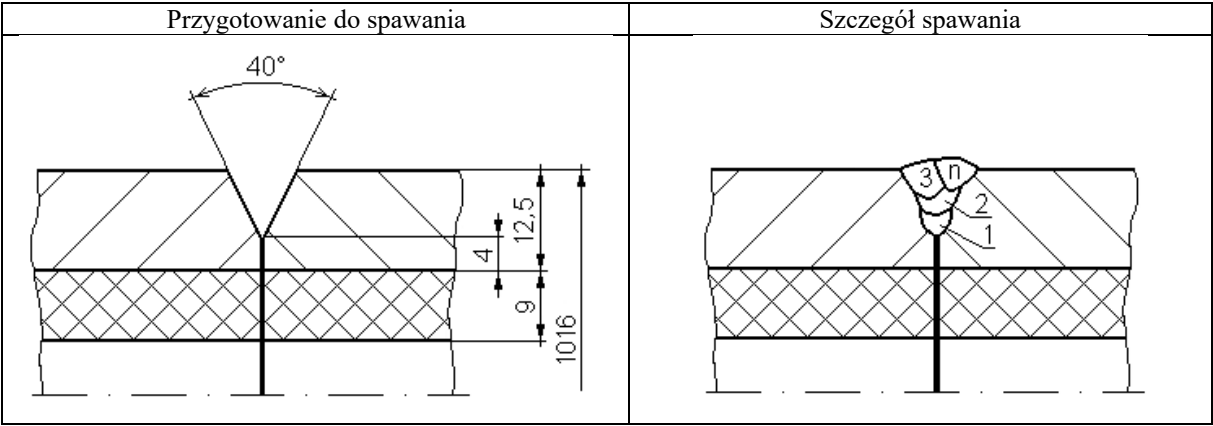
Sławomir Topór

30.04.2024

Załącznik 19

Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS)

Miejscowość:	Gliwice	Przygotowanie złącza:	laserowe (czyszczenie)
Nr pWPS:	17/pWPS	Materiał podstawowy:	P265GH
Wykonawca:	ST	Grubość mat. [mm]:	12,5
Metoda spaw.:	521	Średnica zewn. [mm]:	1016
Rodzaj złącza:	BW	Pozycje spawania:	PJ



Parametry spawania:

Nr ściegu	Metoda spawania	Średnica spoiwa [mm]	Częstotliwość oscylacji [Hz]	Szerokość oscylacji [mm]	Program / Tryb	Moc spawania [W]	Prędkość podawania drutu [cm/min]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/mm]
1	521	Ø 1,2/1,6	100	0,5/0,55	CW	650/740	35/30	35/32	0,11/0,14
2÷n	521	2x Ø 1,6	100	0,8	CW	800	25	25	0,19

Rodzaj materiału dodatkowego:
G 3Si1
wg PN-EN ISO 14341-A
T20 Tysweld
Gaz osłonowy: **N2 wg PN-EN ISO 14175**
Zużycie gazu: **14 (l/min)**
Gaz formujący: -
Zużycie gazu: -
Rodzaj elektrody wolframowej: -
Podgrzewanie przed spawaniem: **21°C**
Temperatura międzyściegowa: **max. 30°C**
Obróbka cieplna: -
Czas, temperatura, metoda: -
Prędkość nagrzewania i chłodzenia: -

Inne informacje:
Czyszczenie między warstwami: -
Układanie ściegów: -
Czas przerwy: -
Spawanie łukiem pulsującym: -
Wylot elektrody: -
Szczegół spawania plazmowego: -
Kąt ustawienia uchwytu: -

Podano energię liniową spawania (bez współczynnika metody)
Kąt ukosowania ze względu na nieprecyzyjną obróbkę może się wahać do 45°

Opracował: Sławomir Topór
30.04.2024