

**Politechnika Śląska**

**Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej**

**Katedra Transportu Drogowego**



**ROZPRAWA DOKTORSKA**

***Wpływ chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne spawanych konstrukcji nośnych pojazdów***

Promotor:

*prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn*

Doktorant:

*mgr inż. Tomasz Śliwiński*

## Spis treści

1. Wprowadzenie.....	4
2. Stan zagadnienia.....	6
2.1. Podział i klasyfikacja konstrukcji nośnych pojazdów.....	6
2.2. Warunki eksploatacyjne konstrukcji nośnych pojazdów.....	9
2.3. Dodatkowe wymagania dotyczące spawania konstrukcji nośnych pojazdów.....	11
2.4. Stale wykorzystywane w motoryzacji.....	13
2.5. Spawalność stali.....	18
2.6. Spawalniczy cykl cieplny.....	19
2.7. Naprawy spawalnicze pojazdów.....	22
2.8. Aspekty ekonomiczne napraw.....	23
2.9. Łukowe metody spawalnicze.....	26
2.10. Zastosowanie chłodzenia mikrojetowego w spawalnictwie.....	29
3. Podsumowanie przeglądu literatury.....	33
4. Cel i zakres pracy.....	34
5. Badania wstępne.....	36
5.1. Przygotowanie stanowiska spawalniczego.....	38
5.2. Dobór parametrów technologicznych spawania.....	39
5.3. Dobór parametrów chłodzenia mikrojetowego.....	41
5.4. Plan badań wstępnych.....	46
5.5. Badania nieniszczące.....	48
5.6. Badania metalograficzne.....	50
5.7. Badania twardości.....	55
5.8. Wytrzymałość na rozciąganie.....	57
5.9. Wnioski z badań wstępnych.....	61

6. Podsumowanie badań wstępnych.....	.62
7. TEZA PRACY.....	.65
8. Badania zasadnicze.....	.67
8.1. Plan badań zasadniczych.....	.69
8.2. Badania radiograficzne.....	.71
8.3. Próba zginania.....	.73
8.4. Udarność.....	.75
8.5. Wytrzymałość zmęczeniowa.....	.81
8.6. Badania spoin pod mikroskopem skaningowym.....	.84
9. Podsumowanie.....	.89
10. Wnioski.....	.93
11. Bibliografia.....	.95
12. Streszczenie.....	.104
13. Abstract.....	.106

## 1. Wprowadzenie

Wysokie tempo rozwoju, jakie można zaobserwować w ostatnich latach, przekłada się bezpośrednio na coraz większe wymagania stawiane producentom pojazdów, zarówno w zakresach produkcji, eksploatacji jak i ekologii czy bezpieczeństwa. Rozwój nowych rodzajów napędów, w tym napędów elektrycznych, wymusza nowe podejście do zagadnień związanych z projektowaniem i produkcją konstrukcji nośnych pojazdów ze szczególnym uwzględnieniem zwiększenia nośności przy możliwie znacznym ograniczeniu masy, a jednocześnie zachowaniem wszelkich standardów bezpieczeństwa. Masa całkowita pojazdu ma bezpośredni wpływ na energochłonność podczas jego eksploatacji. W przypadku napędów elektrycznych, gdzie, baterie pojazdu należy ładować prądami o odpowiednich parametrach w określonym czasie, ma to szczególne znaczenie. Brak możliwości zaopatrzenia się w dodatkowe źródła energii w kanistrach czy butlach, jak to ma miejsce w przypadku napędów zasilanych paliwami kopalnymi, dodatkowo uwypukla ten problem. Należy także zwrócić uwagę, że również w klasycznych, napędach spalających paliwa kopalne, wymogi emisji spalin przyczyniły się do rozpoczęcia montażu dodatkowych filtrów i rozwiązań technicznych mających niekorzystny wpływ na zmianę masy pojazdu.

Aby zaspokoić zapotrzebowanie przemysłu motoryzacyjnego na stal do budowy konstrukcji cienkościennych powstały różnorodne stale wysokiej wytrzymałości z rodziny AHSS (*Advanced High-Strength Steel*) a część z nich ma potencjał do wykorzystania w branży automotive. Problemem jest fakt, że dotychczas stosowane metody spawalnicze nie zapewniają złączy o parametrach dorównujących nowoczesnym stalom. Stale o podwyższonej wytrzymałości są już stosowane w samonośnych konstrukcjach nośnych pojazdów, ale ich użycie ogranicza się jedynie do pojedynczych elementów, dzieje się tak głównie ze względu na ograniczenie kosztów produkcji [1-8].

Zmiany klimatyczne i towarzyszące im skoki cen energii sprawiają jednak, że zastosowanie stali z rodziny AHSS w szerszym zakresie staje się uzasadnione, szczególnie w kontekście całościowego cyklu eksploatacyjnego pojazdu. Współcześnie znaczna część elementów konstrukcji samonośnych pojazdów wykonywanych ze stali AHSS łączona jest za pomocą techniki zgrzewania, co jest wynikiem braku odpowiednich metod spawalniczych. Ponadto cykl eksploatacyjny powinien także uwzględniać możliwość naprawy, a ze względu

na charakter uszkodzeń do ich usunięcia najlepiej posłużyć się łukowymi metodami spawalniczymi [26-32].

Naprawy spawalnicze pojazdów, zarówno o konstrukcji klasycznej, ramowej, jak i samonośnej wykonywane są w naszym kraju powszechnie. Jednak nie wszystkie przeprowadzane naprawy wykonywane są zgodnie z zaleceniami producentów pojazdów. Należy zaznaczyć, że o ile część producentów podaje dokładne wytyczne dotyczące napraw wykonywanego przez nich sprzętu to w dalszym ciągu nagminnie jest wykonywanie napraw przy pomocy środków najłatwiej dostępnych, niekoniecznie spełniających określone wymogi. Sytuacja taka jest niedopuszczalna, zwłaszcza biorąc pod uwagę fakt, że część pojazdów mimo poruszania się po drogach publicznych zwolniona jest z obowiązku wykonywania okresowych badań technicznych (przyczepy lekkie, koparko-ładowarki oraz inny sprzęt budowlany) [9-11, 21,24].

Technologia spawania z chłodzeniem mikrojetowym może pozwolić na zastosowanie nowoczesnych stali, co przełoży się bezpośrednio na zwiększenie wytrzymałości konstrukcji nośnych pojazdów bez zwiększenia ich masy. Ponadto opracowanie udoskonalonego procesu spawalniczego będzie miało bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo użytkowania naprawianych konstrukcji nośnych pojazdów, co ma szczególne znaczenie w obliczu zmian klimatycznych i będących ich konsekwencją ekstremów pogodowych [12,16, 17, 22, 23].

## **2. Stan zagadnienia**

Omówiony stan zagadnienia porusza w pierwszej kolejności zagadnienia dotyczące konstrukcji nośnych pojazdów, ich warunków eksploatacyjnych oraz możliwościach naprawy. Dokonano także przeglądu stali stosowanych w branży automotive zwracając uwagę zarówno na tradycyjne stale niestopowe jak i nowoczesne wysoko wytrzymałe stale AHSS. Wyjaśniono także istotę stosowania chłodzenia mikrojetowego w procesie spawania.

### **2.1. Podział i klasyfikacja konstrukcji nośnych pojazdów**

Rodzaje konstrukcji nośnych pojazdów zależą od przeznaczenia. Inne rozwiązania wykorzystywane są w przypadku samochodów osobowych, ciężarowych, maszyn wolnobieżnych czy autobusów. Podstawowy podział dzieli konstrukcje na samonośne i ramowe. Oba typy mają swoje zastosowanie we współczesnej motoryzacji, a badania dotyczące ich rozwoju, ulepszenia i możliwości napraw stanowią szerokie i bardzo ważne zagadnienie dla branży motoryzacyjnej.

Konstrukcje samonośne wykorzystywane są przede wszystkim przy budowie pojazdów osobowych w formie szkieletowej (półniosącej) i autobusów. Do podstawowych zalet nadwozi samonośnych należy zaliczyć przede wszystkim: możliwość najniższego w stosunku do powierzchni podłoża położenia podłogi nadwozia oraz wykonania zmian w kształtach nadwozia jako rezultatu bezpośredniego mocowania wszystkich elementów obłachowania do niosącego nadwozia (błotniki, osłony, fartuchy). Przekrój nowoczesnego nadwozia samonośnego pokazany jest na rys. 1.1. Poszczególnymi kolorami zostały zaznaczone stale o różnych właściwościach zgodnie z opisem pod rysunkiem [21, 24, 35, 38, 39].

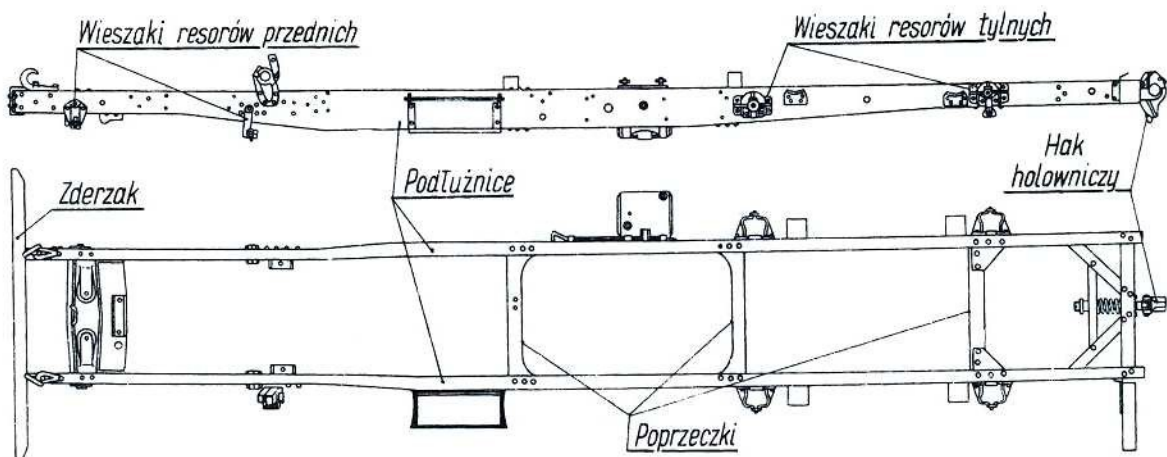


**Rys. 1.1. Konstrukcja samonośna pojazdu. Kolor niebieski – stale o niskiej wytrzymałości, kolor żółty – stale o podwyższonej wytrzymałości, kolor czerwony stale AHSS [11]**

Jak można zauważyć do produkcji nadwozi samonośnych wykorzystywanych jest wiele rodzajów stali o różnych właściwościach. Jest to podyktowane względami zarówno inżynierskimi (m.in. twardość, wytrzymałość) jak i ekonomicznymi. Podstawowy podział blach samochodowych można przedstawić następująco [12]:

1. LSS - stale o niskiej wytrzymałości (ang. – Low Strength Steel),
  - stale miękkie (ang.. Mild Steel),
  - stale tłoczne (ang. IF – Interstitial Free),
2. HSS - stale o podwyższonej wytrzymałości (ang. High Strength Steel) ,
  - stale tłoczne izotropowe (ang. IS – Isotropic),
  - stale typu BH umacniane wydzieleniowo (ang. BH – Bake Hardenable),
  - stale CMn (węglowo – manganowe, SPW),
  - stale wysokowytrzymałe niskostopowe (ang. HSLA – High Steel Low Alloy),
3. AHSS - stale o wysokiej wytrzymałości (ang. Advanced High Strength Steel).
  - stale ferrytyczno-martenzytyczne (ang. DP – Dual Phase),
  - stale typu CP (ang. CP – Complex Phase),
  - stale typu TRIP (ang. TRIP – Transformation Induced Plasticity),
  - stale martenzytyczne (ang. Mart – Martensitic)

Ramy nośne są powszechnie wykorzystywane w pojazdach ciężarowych, wolnobieżnych a także terenowych. W tym przypadku rama jest oddzielnym zespołem konstrukcyjnym na którym zamocowane jest nadwozie nieniosące. Mocowanie jest zwykle elastyczne, a więc jest do pewnego stopnia izolowane od wstrząsów. Przekłada się to na znaczne podwyższenie trwałości nadwozia, dzięki czemu może być wykonane z mniej wytrzymałych i tańszych materiałów. W czasie eksploatacji rama pojazdu podlega zmiennym obciążeniom wywołując naprężenia zginające i skręcające. Złożoność tych obciążeń, chęć zmniejszenia masy pojazdu oraz różnorodność konstrukcji nadwozi spowodowały, że każdy model pojazdu odznacza się oryginalnym kształtem ramy. Najpopularniejszy rodzaj ram – ramy podłużnicowe składają się z dwóch rozstawionych podłużnych belek powiązanych za pomocą poprzeczek. Ich kształty są różne i zależą od konstrukcji danego pojazdu. Przykładowa rama podłużnicowa przedstawiona została na rys. 1.2. Zadaniem poprzeczek jest zapewnienie sztywności oraz ułatwienie montażu podzespołów do pojazdu. Powszechnie wykorzystywanym do budowy ram nośnych pojazdów jest stal niestopowa. Wynika to z faktu, że ramy powinny być wykonane z materiału łatwo obrabialnego, odpornego na korozję, o wysokiej spawalności. Dodatkowym czynnikiem są względy ekonomiczne. Powszechnie stosowaną do budowy ram pojazdów stalą jest stal EN:S355J2G3 (wg PN: 18G2, 18G2A) [60, 62].



Rys. 1.2. Rama podłużnicowa z zaznaczonymi elementami konstrukcyjnymi [56]



## 2.2. Warunki eksploatacyjne konstrukcji nośnych pojazdów

Konstrukcje nośne pojazdów muszą być zdolne przenosić założone obciążenia niezależnie od panujących warunków atmosferycznych, w szczególności niskich temperatur. Wartości obciążeń dynamicznych, statycznych oraz zmęczeniowych wynikają z warunków ruchu w jakich dany pojazd jest wykorzystywany. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na sytuacje skrajne i awaryjne takie jak: jazda ze znaczną prędkością po wybojach, awaryjne hamowanie czy obciążenia powstałe podczas załadunku czy rozładunku pojazdu.

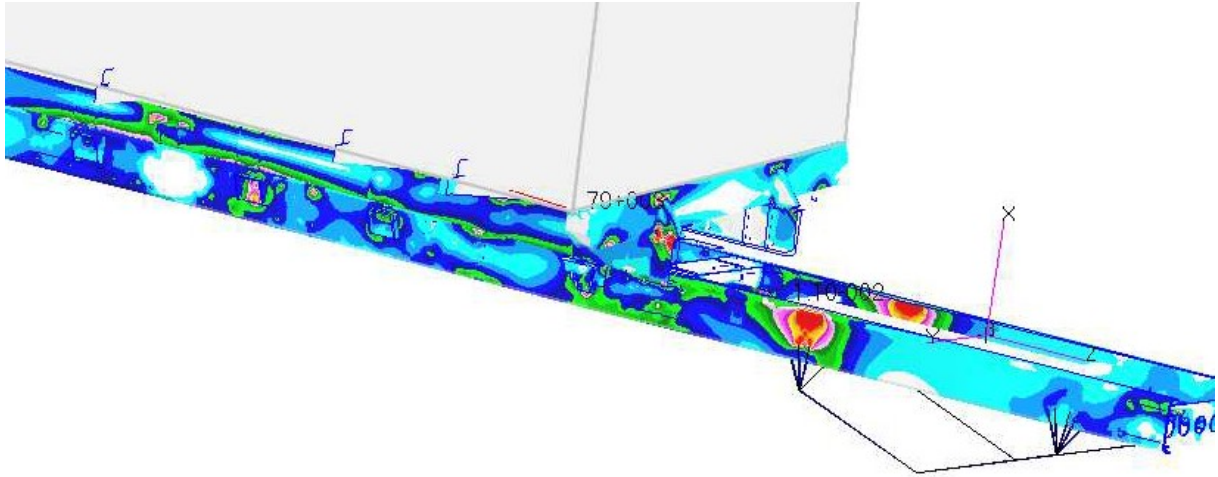
Ostatni wspomniany aspekt jest szczególnie istotny w zabudowach wywrotkowych do przewozu materiałów sypkich. Ze względu na zmianę środka ciężkości podczas opróżniania części towarowej (podnoszenia paki) obciążenia statyczne, którym poddana jest konstrukcja nośna, są zdecydowanie większe niż w trakcie jazdy. Działanie sił zewnętrznych takich jak podmuchy wiatru też jest spotęgowane. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku innych zabudów specjalistycznych, na przykład żurawi czy zwyżek. Kluczowe dla bezpieczeństwa, zarówno konstrukcji jak i osób które przy niej pracują, jest także prawidłowe ustawienie pojazdu, to znaczy na możliwie płaskim, poziomym terenie, co ma na celu wyeliminowanie momentów sił skrętnych na ramę pojazdu. Niestety praktyka pokazuje, że często korzysta się z pojazdów niedbale, nie przykładając większej uwagi na względy bezpieczeństwa co może przełożyć się bezpośrednio na uszkodzenia konstrukcji nośnych pojazdów [9-11, 66-67].

### Naprężenia w konstrukcjach nośnych pojazdów

Aby móc w pełni wykorzystać otrzymane wyniki badań, ważna jest znajomość realnych naprężeń występujących w konstrukcjach nośnych pojazdów. Wiedza ta pozwoli na odniesienie otrzymanych wyników badań do stanu faktycznego, a tym samym przełożyć założenia teoretyczne na wyniki praktyczne. Pozwoli to jednoznacznie ocenić przydatność badanych metod w eksploatacji pojazdów, w szczególności w naprawach i przeróbkach konstrukcji nośnych pojazdów ciężkich.

Przedstawiona analiza naprężeń dotyczy popularnego modelu naczepy samochodowej Bodex KIS 3W-S. Na potrzeby analizy przyjęto obciążenie skrzyni ładunkowej o wartości 184 Mg, co odpowiada obciążeniu ładunku o wartości 15 Mg w skrzyni o wadze 3,4 Mg. W obliczeniach uwzględniona jest także siła skupiona wynikająca z podnośnika hydraulicznego znajdującego się w przedniej części naczepy oraz 7 punktów podparcia (po

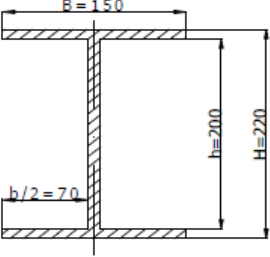
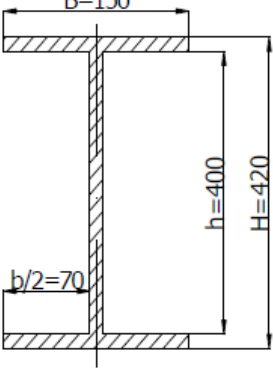
dwa dla każdej osi oraz jeden wynikający z siodła łączącego naczepę z ciągnikiem). Rysunek 1.3 pokazuje rozkład naprężeń [57].



**Rys. 1.3. Model wykorzystany do analitycznego obliczenia momentów gnących w konstrukcji nośnej naczepy [57]**

Otrzymano, największa wartość momentu gnącego wynoszącą  $-47.12$  kNm. Ważnym jest jednak, że w miejscu występowania największego naprężenia przekrój ramy był większy (wysokość belki 420 mm) niż w przedniej części podłużnicy (wysokość belki 240 mm). W związku z powyższym zdecydowano się na analizę porównawczą powyższych punktów, która zawarta jest w tabelicy 1.1. Jak można odczytać maksymalne naprężenia występowały w miejscu I, znajdującym się bliżej siodła naczepy. Przy założonych warunkach wartość tego naprężenia wyniosła 44,7 MPa.

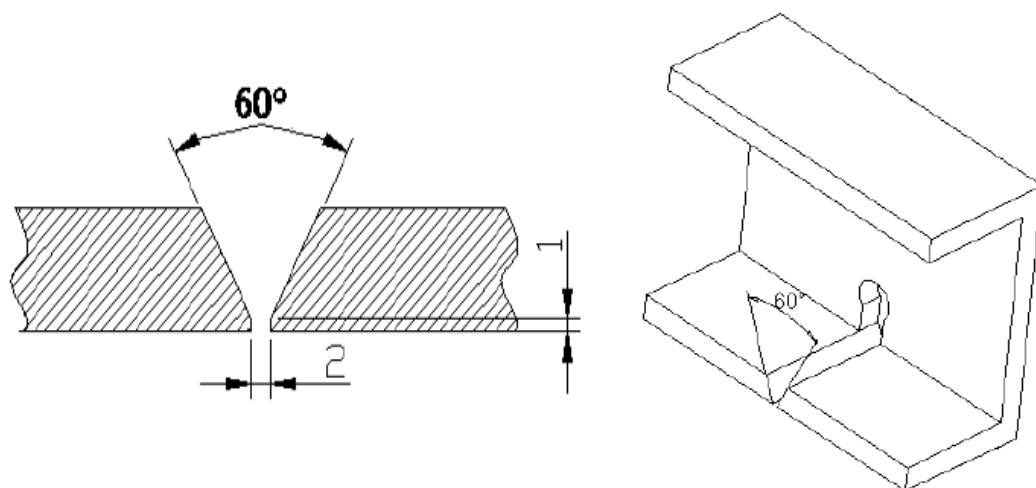
Tabl. 1.1. Obliczanie wartości naprężeń w wyznaczonych miejscach [56]

	3,9 m od tylnej strony podłużnicy -miejsce I	2,5 m od przedniej strony podłużnicy -miejsce II
Przekrój po- dłużnicy		
Wskaźnik wy- trzymałości na zginanie: $W_x = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	$W_x = \frac{150 \cdot 220^3 - 140 \cdot 200^3}{6 \cdot 220} =$ $3615000 \text{ mm}^3$ $= 0,0003615 \text{ m}^3$	$W_x = \frac{150 \cdot 420^3 - 140 \cdot 400^3}{6 \cdot 420} =$ $854444,4 \text{ mm}^3 =$ $0,000854 \text{ m}^3$
Naprężenia: $\sigma_x = \frac{M_{gx}}{2W_x}$	$\sigma_x = \frac{32320 \text{ Nm}}{2 \cdot 0,0003615 \text{ m}^3} = 44,7 \text{ MPa}$	$\sigma_x = \frac{47170 \text{ Nm}}{2 \cdot 0,000854 \text{ m}^3} =$ $27,6 \text{ MPa}$

### 2.3. Dodatkowe wymagania dotyczące spawania konstrukcji nośnych pojazdów

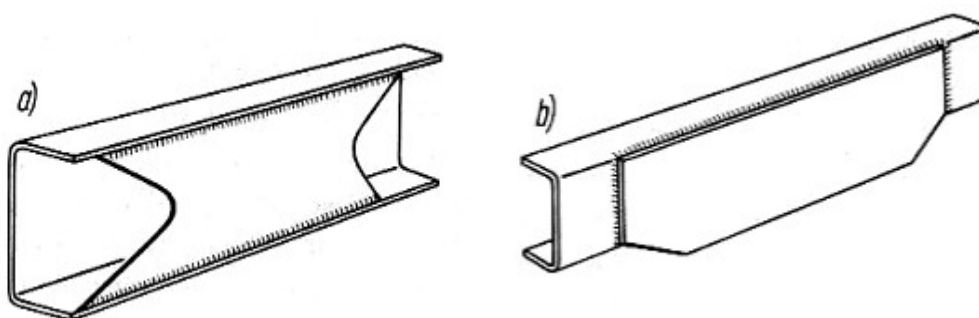
Wytyczne producentów dotyczące napraw spawalniczych konstrukcji nośnych pojazdów w wielu przypadkach nie tylko określają metodę spawania i materiał dodatkowy, ale także w precyzyjny sposób opisują sposób przygotowania spawanych elementów, czy uszkodzenia do naprawy których wymaga się dodatkowe wkładki wzmacniające [56-61].

W przypadku pierwszego zagadnienia podawane są precyzyjne wytyczne dotyczące zapobieganiu dalszemu pękaniu (np. przez wykonanie otworu rozprężającego) czy ukosowania ścianek bocznych spawalnych elementów, co pokazane jest na rysunku 1.4.

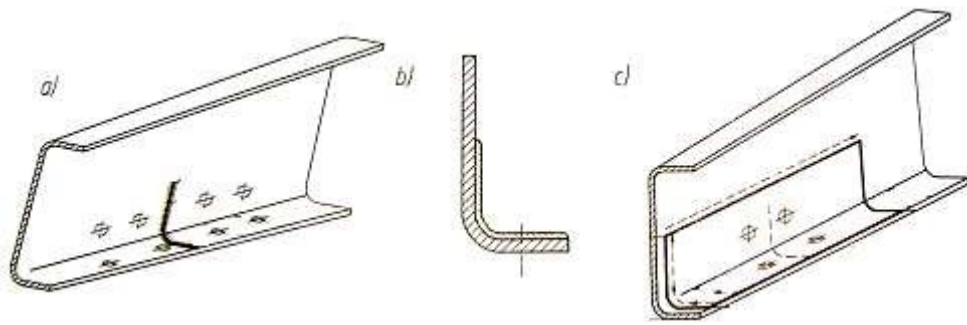


**Rys. 1.4. Szczegółowe wytyczne dotyczące naprawy pęknięć podawane przez producentów pojazdów [60]**

Uszkodzenia podłużnic, szczególnie w obrębie otworów montażowych lub w przypadku dużych odkształceń producenci zalecają stosowanie wkładek wzmacniających. Wkładki takie można podzielić na wkładki: przyległe, znajdujące się bezpośrednio na spawanym elemencie (rys. 1.5a) i wkładki skrzynkowe - wzmacniające całą podłużnicę (rys. 1.5b). Dodatkowo wkładka wzmacniająca powinna pokrywać obszar otworów znajdujących się w pobliżu pęknięcia, co pokazane jest na rysunku 1.6 [60].



**Rys. 1.5. Wkładki wzmacniające: a) skrzynkowe, b) przyległe [61]**

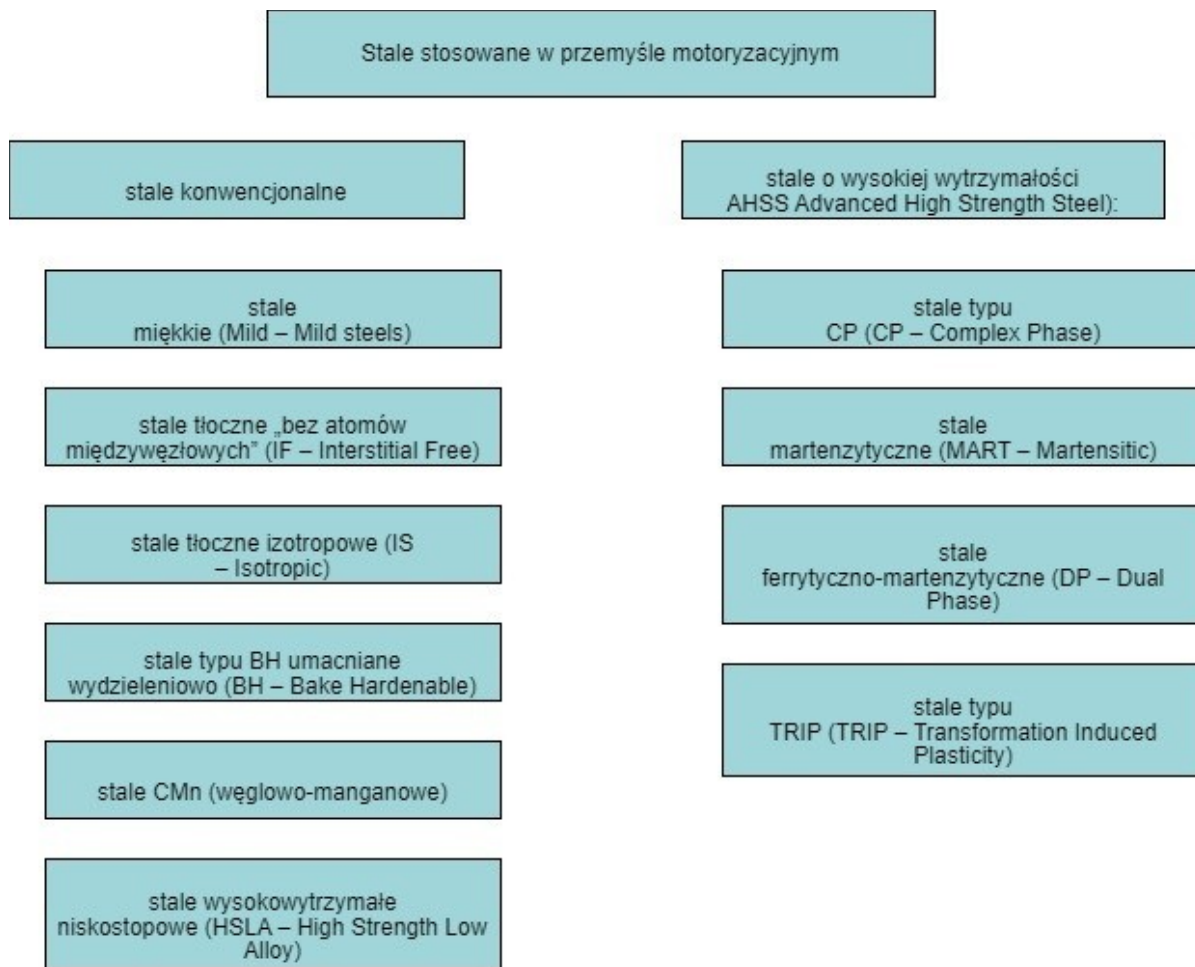


**Rys. 1.6. Nakładka w pobliżu otworów: a) uszkodzenie bez nakładki, b) przekrój naprawionego elementu, c) element po spawaniu nakładki [61]**

Powyższe wytyczne mają na celu zapewnienie odpowiednich właściwości plastycznych i parametrów użytkowych naprawianych elementów, a przez to są gwarantem bezpieczeństwa w dalszym użytkowaniu naprawionych części maszyn.

## **2.4. Stale wykorzystywane w motoryzacji**

Współcześnie obok konwencjonalnych, dobrze spawalnych blach stalowych o niskiej zawartości węgla (poniżej 0,27%) coraz powszechniejsze jest wykorzystywanie stali o zwiększonej wytrzymałości oraz stopów aluminium i innych metali lekkich. Zmiany te mają na celu obniżenie masy pojazdu, co przekłada się bezpośrednio na zużycie paliwa oraz podzespołów takich jak hamulce i zawieszenie. Jednak ze względu na koszty i odporność na warunki eksploatacyjne, w pojazdach ciężarowych oraz innych maszynach roboczych poddawanych dużym obciążeniom dalej stosuje się klasyczne konstrukcje ramowe wykonywane ze niestopowych (tańszych) gatunków stali. Na rys.1.7 pokazano podział stali stosowanych w branży automotive [40, 43, 62, 63].



Rys. 1.7. Stale wykorzystywane do budowy pojazdów [30]

Ponieważ ramy pojazdów narażone są na obciążenia statyczne, dynamiczne oraz na zmienne warunki pracy (temperatura, wilgotność etc.), materiały z których są wykonane muszą zapewnić odpowiednią wytrzymałość. Dodatkowo powinny być łatwe w obróbce, odporne na korozję oraz łatwo spawalne.

Powyższe wymagania spełniają stale niestopowe o podwyższonej wytrzymałości (SPW, nazywane także ze względu na skład C-Mn) które w stosunku do stali niskowęglowych (niestopowych) mogą przenosić te same obciążenia przy zachowaniu mniejszych przekrojów a co za tym idzie masy konstrukcji. Stale SPW zaczęto stosować w przemyśle motoryzacyjnym na przełomie lat 40 i 50 XX wieku, wykorzystując jako podstawowe składniki stopowe i węgiel (do 0,18%), mangan (do 2%), krzem (do 0,5%) , co pozwoliło na poprawę wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  do 360 MPa. Wraz z rozwojem przemysłu eksperymentowano z różnymi dodatkami stopowymi mającymi polepszyć właściwości stali, lecz skutkowało to pogorszeniem spawalności, zwiększoną twardością

w strefie wpływu ciepła oraz zwiększonym ryzykiem pęknięcia na zimno. Obecnie stale te osiągają wartość  $R_m$  dochodzącą do 600 MPa (obniżenie zawartości siarki oraz fosforu). W celu ograniczenia utleniania się stali stosuje się także miedź (do 0,5%) [9].

Stale typu C-Mn charakteryzują się one strukturą ferrytyczno-perlityczną. austenit w spoinie łatwo przemienia się podczas szybkiego chłodzenia w martenzyt - fazę powodującą pęknięcia, co jest najistotniejszym problemem spawalności niestopowych stali konstrukcyjnych [21].

Powszechnie stosowaną stalą do produkcji ram pojazdów jest stal gatunku S355J2G3 (wg. EN, oznaczenie krajowe 18G2A). Jej właściwości mechaniczne podane są w tabelicy 1.2. Na uwagę zasługuje wysoka wartość współczynnika  $A_5$  sięgająca 16%.

**Tabl. 1.2. Właściwości mechaniczne stali S355J2G3 [10]**

Stal	$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	$A_5$ [%]
S355J2G3	600	435	16

Skład chemiczny podany jest w tabelicy 1.3. Charakteryzuje się ona się wąskimi granicami zawartości węgla i manganu oraz niewielką zawartością zanieczyszczeń, głównie krzemu (poniżej 0,7%) i fosforu. Zwykle dostarczane są jako stale uspokojone i nadają się do obróbki cieplnej.

**Tabl. 1.3. Skład chemiczny stali S355J2G3 [10]**

Stal	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]
S355J2G3	0,22	0,55	1,6	0,035	0,035	0,3	0,08	0,3	0,02

Stale IF (*Interstitial Free*) oprócz ultra niskiej zawartości węgla charakteryzują się także małą ilością pierwiastków międzywęzłowych takich jak azot wodór czy bor. Dzięki takiemu rozwiązaniu blachy z nich wykonane charakteryzują się odpornością na starzenie oraz wysoką tłocznością. To właśnie te czynniki zdecydowały o szerokim wykorzystaniu stali tego typu w przemyśle samochodowym. Podobnie sytuacja przedstawia się w przypadku stali BH (*Bake Hardenable*), w których składzie można odnaleźć nieco wyższą zawartość węgla i azotu, ale dzięki ścisłej ich kontroli uzyskuje się tzw. efekt „dislocation locking” co

przekłada się na dodatkowe umocnienie stali podczas procesu termicznego utwardzania lakieru. Granice plastyczności kształtują się odpowiednio – do 200MPa dla stanu surowego i 250 MPa po procesie odkształcania plastycznego. Dodatkowe umocnienie rzędu do 50 MPa uzyskuje się w procesie wypalania lakieru.

Dobrą rozciągliwością i dużą wytrzymałością na rozciąganie (dochodzącą do 800 MPa) charakteryzują się stale z CP. Ich mikrostruktura zawiera przede wszystkim drobnoziarnisty ferryt AF (*acicular ferrite*), a duża zawartość struktur twardych (bainit i martenzyt) powoduje nadmierne umacnianie. Ze względu na możliwość pochłaniania znacznej ilości energii stosuje się je powszechnie na elementy mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa biernego pojazdów takie jak kontrolowane strefy zgniotu [35].

Stale DP (*Dual Phase*) składające się z miękkiej fazy ferrytycznej, w której rozsiiane są wtrącenia martenzytyczne w ilości 15-70%, mają zdecydowanie większą wytrzymałość niż stale klasyczne o podobnej granicy plastyczności. Dzieje się tak, ponieważ odkształcenie następuje w miękkiej fazie ferrytycznej. Przekłada się to także na doskonałe warunki umocnienia starzeniowego.

Ważnym z inżynierskiego punktu widzenia aspektem jest zwiększenie udarności złączy spawanych dla stali niestopowych, gdyż przełoży się to na bezpieczeństwo bierne pojazdów szczególnie w niskich temperaturach.

Stalami dopiero wchodzącymi do powszechnego zastosowania w przemyśle samochodowym są nowoczesne stale AHSS (*Advanced High Strength Steel*). Omówienie ich charakterystyki jest bardzo ważne z punktu widzenia dalszego kierunku badań. Ich wytrzymałość dochodzi do 1700 MPa i są uznawane za dobrze zgrzewalne. Wykorzystywane są do produkcji konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych, szczególnie elementów wpływających na bezpieczeństwo takich jak wzmocnienia zderzaków, słupki drzwiowe czy koła. Ponadto dzięki możliwości uzyskania wysokiej twardości, stosuje się je także na tarcze sprzęgła i inne elementy wymagające wysokiej odporności na ścieranie. W tabelicy 1.4 przedstawiono właściwości mechaniczne wybranych stali DOCOL z rodziny AHSS [26 - 33].



**Tabl. 1.4. Właściwości mechaniczne stali z rodziny AHSS [30]**

Stal	właściwości mechaniczne				
	R <sub>e min</sub> [MPa]	R <sub>e max</sub> [MPa]	R <sub>m min</sub> [MPa]	R <sub>m max</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]
DOCOL 900M	700	1000	900	1100	6
DOCOL 1000PZE	700	950	1000	1200	7
DOCOL 1100M	860	1100	1100	-	5
DOCOL 1200M	950	1150	1200	1400	3
DOCOL 1300M	1030	1300	1300	-	3
DOCOL 1400M	1150	1350	1400	1600	3
DOCOL 1500M	1200	1500	1500	1700	3
DOCOL 900MZE	700	-	900	1100	3
DOCOL 1200MZE	950	-	1200	1400	3
DOCOL 1400MZE	1150	-	1400	1600	3
DOCOL 1500MZE	1200	-	1500	1700	3

W tablicy 1.5 przedstawiono skład chemiczny stali typu DOCOL. Jak można zauważyć minimalna wartość wytrzymałości tych stali jest zdecydowanie wyższa niż stali niestopowych. Osiągnięto to przez reżim technologiczny i dbałość o odpowiednie proporcje dodatków stopowych.

**Tabl. 1.5. Skład chemiczny stali wysokostopowych AHSS [30]**

stal	skład chemiczny [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	Nb	B
DOCOL 900M	0,05	0,20	2,00	0,01	0,002	0	0,04	0	0
DOCOL 1000PZE	0,15	0,50	1,50	0,01	0,002	0	0,04	0,015	0
DOCOL 1100M	0,09	0,20	1,70	0,01	0,002	0,025	0,04	0,015	0
DOCOL 1200M	0,11	0,20	1,70	0,01	0,002	0,025	0,04	0,015	0
DOCOL 1300M	0,20	0,20	1,50	0,01	0,002	0,025	0,04	0,015	0
DOCOL 1400M	0,17	0,20	1,40	0,01	0,002	0,025	0,04	0,015	0
DOCOL 1500M	0,21	0,20	1,10	0,01	0,002	0,025	0,04	0,015	0
DOCOL 900MZE	0,05	0,20	1,90	0,01	0,002	0,000	0,04	0	0
DOCOL 1200MZE	0,11	0,20	1,70	0,01	0,002	0,035	0,04	0	0,002
DOCOL 1400MZE	0,17	0,20	1,40	0,01	0,002	0,035	0,04	0	0,002
DOCOL 1500MZE	0,21	0,20	1,10	0,01	0,002	0,035	0,04	0	0,002

Analizując skład chemiczny, można zauważyć zwiększenie zawartości tytanu, w porównaniu z dotychczas opisywanymi gatunkami stali do budowy pojazdów, co wiąże się z wysoką wytrzymałością (tabl. 1.4).

## 2.5. Spawalność stali

Definicja spawalności opracowana przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa i zatwierdzona przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną zakłada, że materiał metaliczny jest spawalny, jeżeli przy użyciu odpowiednich dla danego rodzaju konstrukcji metod, można wykonać połączenia zapewniające ciągłość metaliczną (złącze), a jego właściwości spełniają wymagania będące podstawą ich oceny. Norma PN-84/M-69005 omawiająca pojęcie nadrzędne spawalności (obejmujące spawalność, zgrzewalność i lutowność) definiuje je jako przydatność metalu do wrażliwości na spajanie i utworzenia złącza metalicznie ciągłego o wymaganej użyteczności. Gdzie wrażliwość na spajanie to reakcja metalu na określone warunki spajania [64, 76].

Zbiór czynników konstrukcyjnych i technologicznych oddziałujących na złącze spawane nazywamy warunkami spawania. Czynniki te decydują o jakości otrzymanej spoiny poprzez przebieg procesów cieplnych, dyfuzji gazów, przemian strukturalnych. W szczególnych przypadkach dotyczy także mieszania pierwiastków ze SWC i złącza spawanego i odwrotnie. Równoważnik chemiczny węgla CEV (*carbon equivalent*), opisujący skłonność stali do hartowania i tworzenia pęknięć jest jednym z podstawowych wskaźników charakteryzujących spawalność metalurgiczną stali. Mówiąc o czynnikach konstrukcyjnych wskazano przede wszystkim:

- grubość łączonych elementów,
- długość spoiny,
- warunki utwardzenia,
- kształt złącza,
- sposób ukosowania.

Druga grupa czynników to czynniki technologiczne, będące równie istotne jak czynniki konstrukcyjne. Należą do nich między innymi:

- metoda spawania,
- energia liniowa łuku,
- temperatura podgrzewania przed i po spawaniu,
- obróbka cieplna po spawaniu,
- kolejność spawania,
- pozycja spawania,
- właściwości fizyko-chemiczne materiałów dodatkowych,
- warunki otoczenia (temperatura, wilgotność, nasilenie wiatru).

Jak można zauważyć, jakość spoiny i tym samym efekt finalny procesu spawania jest uzależniony od bardzo wielu czynników, a prawidłowe wykonanie spoiny wymaga zaplecza wiedzy i doświadczenia. W zależności od specyfiki wymagań danego złącza istnieją różne sposoby oceny skłonności stali do pęknięcia, jako objawu niedostatecznej spawalności. Najpopularniejszymi z nich są: badania symulacyjne, badania dylatometryczne, testy spawalności oraz eksperymentalne badania rzeczywistych połączeń spawanych. Te ostatnie są szczególnie istotne ze względu na całościowy charakter otrzymanych wyników oraz mnogość metod pozwalających na określenie przyczyn wpływających na otrzymany wynik. Niestety wykonanie ich jest bardzo skomplikowane, wymaga zaplecza zarówno produkcyjnego jak i badawczego, ponadto są pracochłonne. Stąd też można zaobserwować duże zainteresowanie badaniami modelowymi, przy czym należy zdawać sobie sprawę z niedokładności tej metody. Powszechną metodą poprawy spawalności stali jest wstępne podgrzanie materiału dzięki któremu materiał ma mniejsze tendencje do zahartowania w SWC. Podczas spajania stali CP i DP stosuje się powszechnie oporowe zgrzewanie punktowe oraz spawanie łukowe metodami GMA, TIG oraz MMA. Z punktu widzenia niniejszej pracy najważniejszymi z wyżej wymienionych czynników technologicznych są: metoda spawania oraz pozycja spawania. Ze względu na tematykę pracy, czynniki konstrukcyjne odpowiadają tym, które można zastać w konstrukcjach nośnych pojazdów.

## **2.6. Spawalniczy cykl cieplny**

Spawalniczym cyklem cieplnym nazywa się zmiany temperatur w funkcji czasu w każdym z punktów spawanego materiału, który znajduje się w zasięgu pola temperatur.

Pole temperatur to natomiast rozkład temperatur w spawanym elemencie w dowolnym momencie czasu. Wynika od z nierównomiernego oddziaływania strumienia cieplnego pochodzącego ze spawalniczego źródła ciepła. Na kształt cieplnego cyklu spawania ma wpływ [41 – 44, 54]:

- metoda spawania, rozumiana jako rodzaj i charakterystyka źródła ciepła,
- parametry spawania,
- temperatura początkowa elementów spawanych,
- pojemność i przewodnictwo cieplne materiału spawanego,
- masa, grubość, kształt elementów spawanych,
- miejsca złącza spawanego, w którym analizujemy dany cykl cieplny.

Najistotniejszą wielkością opisującą podstawowe parametry spawania łukowego jest energia liniowa łuku, wiążąca natężenie prądu spawania, napięcie łuku oraz prędkość spawania (wzór 1):

$$E = \frac{U \times I}{v} \times k_e \times n_\eta \quad (1)$$

gdzie:

$U$  – napięcie łuku [V]

$I$  – natężenie prądu spawania [A]

$v$  – prędkość spawania [m/s]

$k_e$  – współczynnik rodzaju prądu:

dla prądu stałego  $k_e = 1$

dla prądu przemiennego  $k_e = 0,7-0,9$

$n_\eta$  – współczynnik spawalności nagrzewania, zależnie od metody spawania:

spawanie elektrodami otulonymi  $n_\eta = 0,7-0,85$

spawanie łukiem krytym  $n_\eta = 0,8-0,95$

spawanie MIG/MAG  $n_\eta = 0,45-0,65$

spawanie TIG  $n_\eta = 0,45-0,60$

Kolejnym istotnym elementem analitycznej oceny jakości złączy spawanych jest opisane pola temperatur w SWC złącza. Przyjmuje się, że proces przepływu ciepła

w dowolnym punkcie analizowanego ciała i określonym momencie czasu spełnia równanie różniczkowe (wzór 2):

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda_0}{c_p q} \times \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $\lambda_0$  – współczynnik przewodzenia ciepła
- $c_p$  – ciepło właściwe
- $q$  – gęstość
- $T$  – temperatura
- $t$  – czas
- $x, y, z$  – współrzędne analizowanego układu

Ze względu na złożoność zachodzących zmian, w praktyce stosuje się szereg założeń uproszczających. Uproszczenia dotyczą zarówno modeli ciał, stałych materiałowych jak i zmiany ciepła (ukryte ciepło krzepnięcia spoiny i przemian, straty ciepła odbitego). Najczęściej przyjmowanymi schematami obliczeniowymi są:

- ciało masywne, spawane ruchomym, punktowym źródłem ciepła,
- ciało masywne, spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła,
- płyta spawana ruchomym, punktowym źródłem ciepła,
- płyta, spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła,
- cienka płyta, spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła,
- cienka płyta, spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła.

Przy czym z punktu widzenia konstrukcji nośnych pojazdów, najlepiej definiującym schematem obliczeniowym jest płyta spawana ruchomym, punktowym źródłem ciepła, czyli w omawianym przypadku łukiem elektrycznym. Dodatkowe założenia, dla których przeprowadza się obliczenia:

a) Stała moc cieplna łuku elektrycznego

b) Rozprzestrzenianie się ciepła w spawanym elemencie można opisać prawem Fouriera (ilość przewodzonego ciepła w czasie przez element powierzchni izotermicznej jest proporcjonalna do gradientu temperatury, korektowanym przez współczynnik proporcjonalności, wzór 3)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda$  – współczynnik proporcjonalności (przewodność cieplna, współczynnik przewodzenia)

$\frac{dT}{dn}$  – gradient temperatury w kierunku prostopadłym do powierzchni izotermicznej

Powyższe uproszczenia pozwalają stworzyć pozwalające na wyznaczenie temperatury w punkcie odległym od źródła ciepła o  $R$  dla interesującego nas schematu obliczeniowego (wzór 4):

$$T_R = \frac{q}{2\pi\lambda R} \quad (4)$$

Sytuacja, w której wartości obliczone odbiegają od wartości zmierzonych, może mieć miejsce, kiedy warunki skrajne nie zostały spełnione, bądź zostały spełnione jedynie częściowo. Błąd ten można skorygować na podstawie pomiarów cykli cieplnych w określonych punktach elementów spawanych.

## 2.7. Naprawy spawalnicze pojazdów

Na chwilę obecną metody spawalnicze są powszechnie stosowane zarówno podczas napraw jak i budowy konstrukcji nośnych pojazdów. Spawanie jest także zalecane przy dozwolonych modyfikacjach ram pojazdów, mających na celu zmienić ich walory praktyczne (np. wydłużenie ramy, montaż żurawia itp. ). Wiodący producenci pojazdów ciężarowych w instrukcjach dotyczących napraw pojazdów także polecają łukowe metody spawalnicze między innymi do usuwania pęknięć czy innych defektów.

Ponieważ złącza powstałe przy użyciu metod spawalniczych są bardzo istotne z punktu wytrzymałości całej konstrukcji, producenci podają w tworzonych przez siebie instrukcjach bardzo dokładne wytyczne dotyczące takich zagadnień jak: przygotowanie

miejsca naprawy (przygotowanie krawędzi elementów), metoda spawania, gatunek materiału dodatkowego oraz uprawnień osób wykonujących naprawę [10, 24, 29, 51-57, 61].

Praktyka warsztatowa pokazuje, że najchętniej i najczęściej podczas napraw pojazdów wykorzystuje się łukowe metody spawalnicze czyli takie, w których źródłem ciepła jest łuk elektryczny mogący osiągnąć temperaturę do 6000° C. W mniejszym stopniu wykorzystywane są także metody spawalnicze, gdzie źródłem ciepła jest inne medium, takie jak gaz czy wiązka elektronów.

Spawanie gazowe, gdzie najczęściej wykorzystywany jest palnik acetylenowo-tlenowy, pozwalający na spawanie w temperaturach do 3100° C. Stosowana jest dla elementów o grubości od 0,4 do 40 mm. Do zalet tej metody należy przede wszystkim wysoka mobilność (mieszanka gazów przechowywana jest w odpowiednich butlach i nie wymaga zewnętrznego zasilania jak w przypadku metod łukowych), duży zakres grubości spawanych elementów oraz stosunkowo prosta technika spawania. Głównymi wadami tej metody są wysokie koszty gazów eksploatacyjnych oraz ograniczenia dotyczące zawartości węgla w spawanych stalach (można spawać jedynie stale niskowęglowe).

Podczas wykonywania złączy precyzyjnych (szerokość spoiny od 0,2 mm) coraz większą popularnością cieszy się także spawanie laserowe, gdzie źródłem ciepła jest wiązka o dużej gęstości energii (około 1 MW/cm<sup>2</sup>, spawanie typu kapilarnego). Niesie to za sobą bardzo dużo zalet – wąska strefa wpływu ciepła minimalizuje odkształcenia metalu, cały proces jest wysokiej czystości oraz prędkości. Bardzo dobrze sprawdza się podczas łączenia materiałów trudno spawalnych. Niestety ze względu na koszty zarówno maszyn jak i wysokie wymagania dotyczące kwalifikacji obsługi metoda ta nie jest mocno upowszechniona.

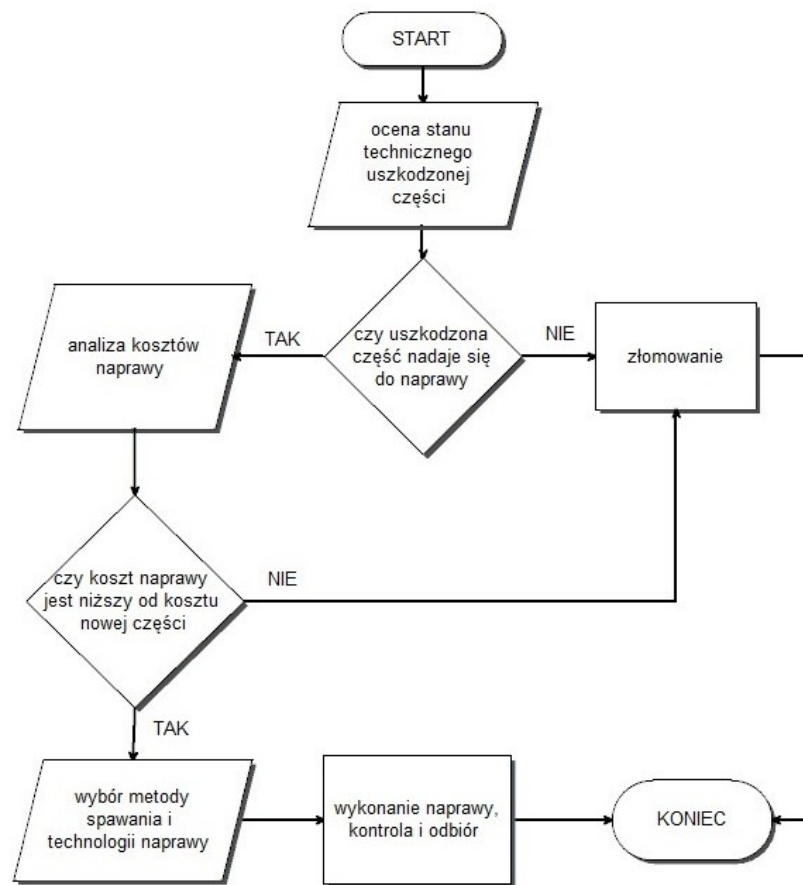
## **2.8. Aspekty ekonomiczne napraw**

Przed przystąpieniem do naprawy konstrukcji nośnej pojazdu, należy przeprowadzić analizę techniczną i ekonomiczną dotyczącą danego uszkodzenia. Po ocenie, jakie czynności należy wykonać aby przywrócić sprawność pojazdu, wykonana powinna zostać kalkulacja kosztów uwzględniająca takie aspekty jak koszt materiałów, koszt pracy osób wykonujących naprawę oraz czas jej trwania.

Do obszaru aspektów technicznych zaliczają się między innymi następujące czynności:

- weryfikacja uszkodzenia i stwierdzenie przydatności elementu do naprawy,
- wybór metody naprawy,
- dobranie materiałów dodatkowych,
- przygotowanie dokumentacji naprawy.

Aspekty ekonomiczne rozumiane są jako ocena kosztów naprawy i porównanie jej z ceną części nowej. Na rysunku 1.8 przedstawiono algorytm ukazujący wyżej opisany proces.



**Rys. 1.8. Algorytm naprawy części uszkodzonej [60]**

Podczas analizy kosztów naprawy stosowany jest także tzw. współczynnik jakości  $z$ , opisujący stosunek jakości części po naprawie do części nowej. W przypadku kiedy jakość części naprawianej odpowiada jakości części nowej współczynnik ten wynosi  $z=1$ . Podsumowując naprawa uszkodzonej części jest celowa w momencie kiedy spełniona jest nierówność wyrażona wzorem 5:



$$K_r \times z \leq K_n \quad (5)$$

gdzie:

$K_r$  – koszt naprawy części,  
 $z$  – współczynnik jakości (gdy jakość naprawy części odpowiada części nowej  $z=1$ ),  
 $K_n$  – koszt zastosowania części nowej,

przy czym koszt naprawy  $K_r$  można wyliczyć za pomocą wzoru 6 i obejmuje:

$$K_r = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (6)$$

gdzie:

$K_1$  – koszt przygotowania naprawianej części,  
 $K_2$  – koszt wykonania naprawy,  
 $K_3$  – koszt obróbki mechanicznej,  
 $K_4$  – koszty ogólne.

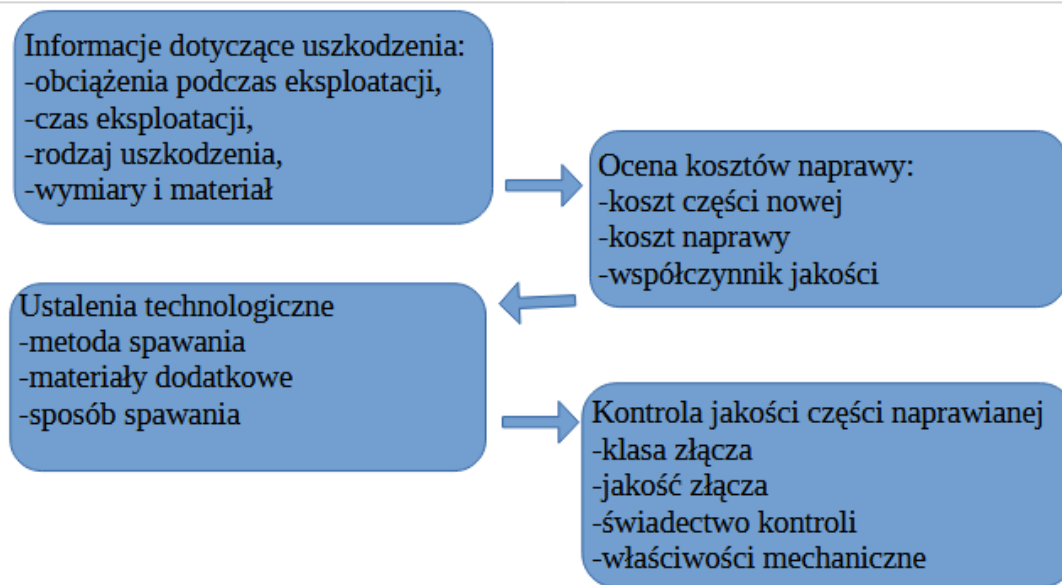
Natomiast koszt zastosowania części  $K_n$  nowej opisuje równanie 7 zawiera:

$$K_n = K_1 + K_2 + K_3 \quad (7)$$

gdzie:

$K_1$  – koszt zakupu części nowej,  
 $K_2$  – koszt wymiany części,  
 $K_3$  – koszty ogólne,

Informacje konieczne do przeprowadzenia naprawy przedstawiono na rys. 1.9. Powyższe analizy pozwalają stwierdzić, czy istnieje ekonomicznie uzasadniona możliwość naprawy danego uszkodzenia konstrukcji nośnej pojazdu, czy też należy decydować się na wymianę danego elementu na nowy.



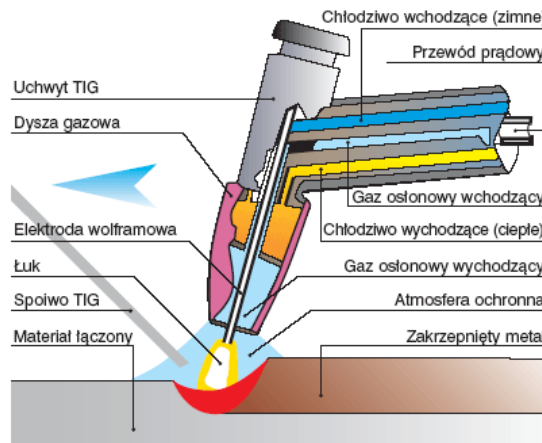
Rys. 1.9. Wymagane informacje podczas naprawy spawalniczej [60]

Reasumując, każdorazowo przed podjęciem decyzji o naprawie spawalniczej należy przeprowadzić analizę kosztów zawierającą wszelkie szczegóły naprawy, wliczając to także współczynnik jakości. Jedynie tak przeprowadzona analiza jest miarodajnym źródłem informacji o opłacalności naprawy.

## 2.9. Łukowe metody spawalnicze

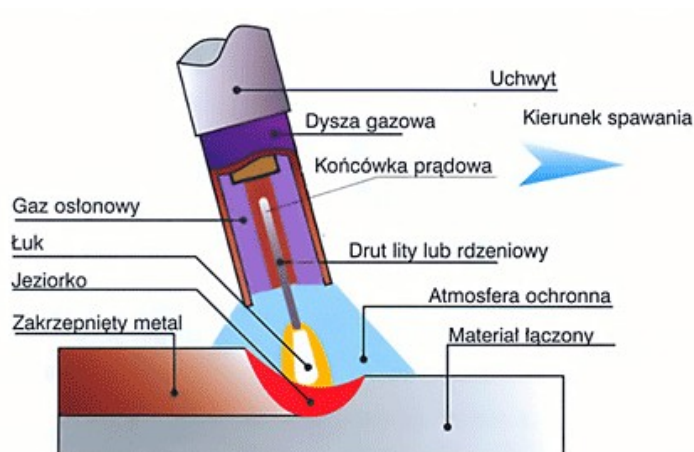
Proces spawania można podzielić ze względu na źródło ciepła potrzebne do stopienia spajanych materiałów. Rozróżnia się wówczas spawanie elektryczne, gazowe i termitowe. Spawanie elektryczne jest najbardziej rozpowszechnione i można je podzielić na spawanie elektrożuźłowe, elektronowe oraz, najpopularniejsze, spawanie łukowe. Ostatnia metoda polega na wytworzeniu między elektrodą spawalniczą, a elementami spawanymi łuku elektrycznego wydzielającego ciepło potrzebne do stopienia łączonych części. Łukowe metody spawalnicze można podzielić ze względu na rodzaj użytej elektrody (topliwa lub nietopliwa) oraz rodzaj stosowanych gazów osłonowych (brak gazów, gazy aktywne, gazy neutralne), przy czym należy zaznaczyć, że każda z nich wykorzystywana jest w naprawach spawalniczych pojazdów. Na rysunku 1.10 pokazana jest metoda spawania łukowego wykorzystująca nietopliwą elektrodę wolframową w osłonie gazu obojętnych (argon, hel, mieszanki) nazywana jest z angielskiego TIG (Tungsten Inert Gas, rzadziej GTAW – Gas Tungsten Arc Welding), nazwa kodowa to natomiast 141. Metoda ta nadaje się do łączenia wszystkich rodzajów stali (zwłaszcza stale wysokostopowe) oraz większości stopów

nieżelaznych stosowanych w motoryzacji. Jakość uzyskanej spoiny jest bardzo wysoka, niestety przekłada się to na małą wydajność w przypadku spawania ręcznego. Do pozostałych zalet tej metody można zaliczyć między innymi możliwość spawania we wszystkich pozycjach oraz możliwość łączenia detali o bardzo małych grubościach (< 1 mm) [41-44].



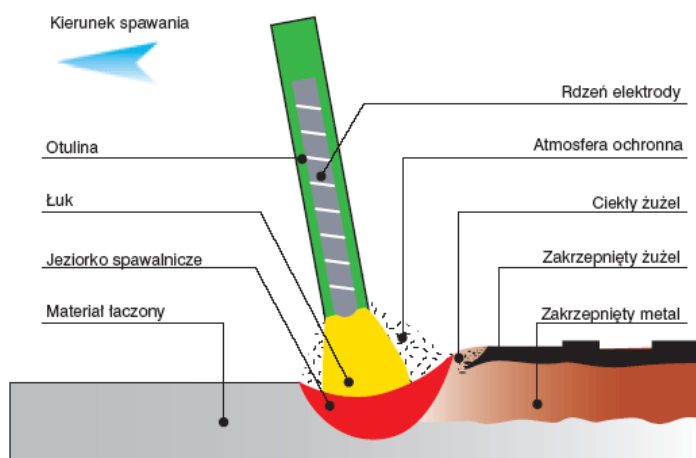
**Rys. 1.10. Schemat ideowy spawania metodą TIG [41]**

Kolejnymi zautomatyzowanymi metodami spawalniczymi są metody spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów, których schemat pokazano na rysunku 1.11. Główną różnicą pomiędzy tymi metodami jest charakter wykorzystywanego gazu. W przypadku metody MIG (Metal Inert Gas) jest to gaz obojętny (najczęściej wykorzystuje się argon lub hel). Dla metody MAG (Metal Active Gas) popularnie stosuje się tlenek węgla IV jako gaz osłonowy oraz jego mieszanki z argonem (tzw. Argomixy). Głównymi zaletami tych metod jest bardzo dobra jakość spoin, duża wydajność oraz możliwość spawania we wszystkich pozycjach. Należy także zaznaczyć, że metody te są podatne na robotyzację. Do wad, podobnie jak w przypadku metody TIG, należy zaliczyć konieczność osłony łuku elektrycznego przed wiatrem i przygotowania brzegów elementów spawanych. Spawanie tymi metodami wymaga dużego doświadczenia ze strony spawacza.



**Rys. 1.11. Schemat ideowy spawania metodami MIG/MAG [41]**

Ostatnią powszechnie stosowaną metodą spawalniczą jest spawanie elektrodą otuloną MMA (Manual Metal Arc) pokazanej na rysunku 1.12. W metodzie tej wykorzystywana jest topliwa elektroda metalowa pokryta otuliną. W czasie spawania elektroda oraz otulina rozkładają się pod wpływem wysokiej temperatury, a powstałe w ten sposób gazy pełnią rolę gazów osłonowych. Podczas tego procesu powstaje także żużel, który pokrywając spoinę, przedłuża tym samym czas jej stygnięcia [13].



**Rys. 1.12. Schemat ideowy spawania metodą MMA [41]**

Ze względu na złożoność zagadnienia i mnogość czynników mogących wpłynąć na wynik badań, zdecydowano się na ograniczenie badanych procesów do metody spawania z użyciem elektrody topliwej i gazów osłonowych MIG/MAG, przy czym jako gaz osłonowy i gaz chłodzący wykorzystano tę samą mieszankę. Dzięki takiemu ograniczeniu został wykluczony problem wypierania gazu osłonowego przez strugi chłodzące, co znacząco wpływało na jakość powstałej spoiny. Ważnym atutem jest unifikacja procesu i brak

konieczności przygotowywania dodatkowych instalacji gazowych. Kolejnym powodem ograniczenia metod spawania do metody MIG/MAG jest fakt, że jest ona bardzo podatna na automatyzację, co pozwoliło całkowicie wyeliminować błąd ludzki, wpływając bezpośrednio na powtarzalność otrzymanych wyników.

## **2.10. Zastosowanie chłodzenia mikrojetowego w spawalnictwie**

Idea chłodzenia poprzez rozprężanie gazów nie jest w świecie nauki pomysłem nowym. Jednak dopiero opracowanie inżektora mikrojetowego umożliwiającego laminarny przepływ medium chłodzącego, przy zachowaniu dużej prędkości przepływu, pozwoliło na zastosowanie tego zjawiska na szeroką skalę. Początkowo dysze mikrojetowe stosowane były do szybkiego chłodzenia żywności, dopiero po pierwszej dekadzie XXI w. zaczęto stosować to rozwiązanie w innych gałęziach przemysłu. Po raz pierwszy na świecie przedstawiono pomysł spawania stali niestopowej z chłodzeniem mikrojetowym na konferencji w Portugalii w 2013 r [11]. Proces ten został opracowany i opatentowany przez pracowników Politechniki Śląskiej. Przez kolejne 10 lat proces był stale modyfikowany, powstawały nowe rozwiązania inżektora mikrojetowego. Chłodzenie mikrojetowe zastosowano do spawania stali niestopowej, stali stopowej, stopów aluminium, stopów niklu, stali wysokowytrzymałych, stali odpornych na zużycie ścierne i różnego rodzaju złączy niepodobnych (dissimilar welding) [13, 18, 41 - 42]

Ze względu na możliwość bardzo precyzyjnego sterowania procesem chłodzenia wynikającego z niewielkiej wielkości strugi oraz laminarnego przepływu medium chłodzącego, inżektor mikrojetowy idealnie nadaje się do zastosowania w procesach sterowania strukturą spoiny, mających zapewnić wysoką jakość spoiny. Dzięki innowacyjnej budowie inżektora możliwe jest nie tylko określenie, jak intensywnie spoina ma być chłodzona, ale także skierowanie medium chłodzącego w wyznaczone miejsce [14-15, 19, 22-23].

Medium chłodzące może mieć stan skupienia ciekły lub gazowy. W warunkach spawalniczych chłodzenia stosuje się między innymi: argon, azot, hel, sprężone powietrze – dobrane odpowiednie medium chłodzące jest bardzo ważne dla osiągnięcia zadowalającego efektu końcowego. Konstrukcja przystawki umożliwia także wykorzystanie wody czy innych cieczy, mających większą pojemność cieplną od gazów. Jednak, ze względu na brak efektu rozprężania, który potęgował chłodzenie, ten kierunek rozwoju został zawieszony. Nie wyklucza się jednak kontynuacji badań w tym kierunku, stosując jako

medium chodzące wodę. Ma to na celu sprawdzenie, czy zastosowanie takiego medium chłodzącego nie spowoduje wzrostu stężenia tlenu oraz wodoru w spoinie [22 - 23].

Technologia spawania z wykorzystaniem chłodzenia metodą mikrojetową w naprawie pojazdów jest na chwilę obecną rozpoznawana. Dotychczas przeprowadzone prace badawcze dotyczące wykorzystania instalacji mikrojetowych podczas napraw i przebudów pojazdów metodami spawalniczymi pokazują jednak, że dalsze prace nad tą metodą są uzasadnione. Podjęte dotychczas próby wykorzystania dodatkowego chłodzenia w spawalnictwie także pokazują, że omawiana metoda może znaleźć szerokie spektrum zastosowań, nie tylko w zakresie łączenia stali, ale także stopów lekkich. Dodatkowo stwierdzono także pozytywny wpływ chłodzenia mikrojetowego przy napawaniu stali – stosując odpowiedni gaz osłonowy zyskano znaczące polepszenie właściwości tribologicznych warstwy wierzchniej badanych stali. Aktualnie zespoły badawcze zajmujące się metodą mikrojetową nieprzerwanie prowadzą prace dotyczące zastosowania przystawki w innych gałęziach przemysłu, inżynierii mechanicznej i transporcie [14 - 17].

Zastosowanie przystawki mikrojetowej do celów spawalniczych ogranicza zakres wykorzystywanych mediów chłodzących oraz parametrów strugi chłodzącej. Ze względu na procesy zachodzące podczas spawania, jako medium chłodzące najszersze zastosowanie mają gazy szlachetne (np. argon), choć w praktyce stosuje się także inne gazy obojętne (np. azot) czy też mieszanki gazów osłonowych używanych w metodzie MAG (np. dwutlenek węgla). Wykorzystanie chłodzenia mikrojetowego w spawalnictwie można podzielić na trzy zasadnicze gałęzie, nad którymi trwają aktualnie badania:

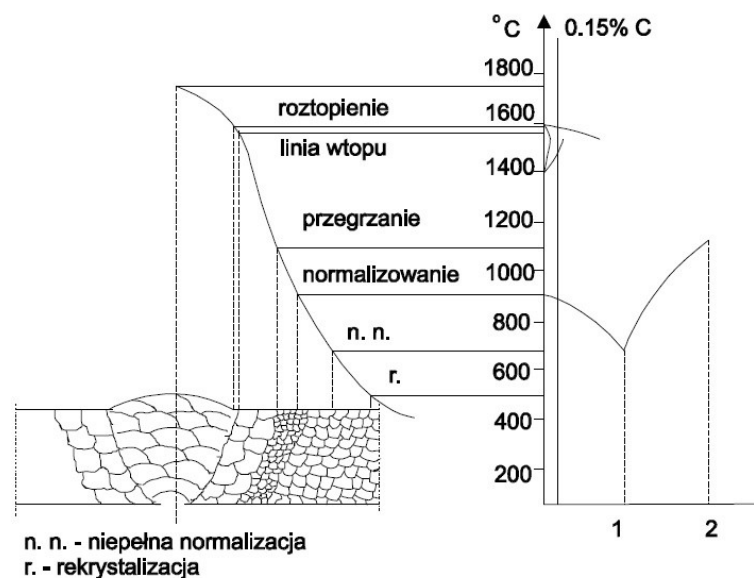
1. Napawanie – gdzie głównym celem stosowania przystawki jest polepszenie odporności na zużycie ścierne [20, 23].
2. Spawanie stali – gdzie celem jest polepszenie właściwości plastycznych spoiny, głównie poprawienie udarności w niskich temperaturach [11-14].
3. Spawanie stopów lekkich, głównie aluminium [13].
4. Spawanie stopów niklu [12]

W powyższych przypadkach jako gazów chłodzących używa się argonu i azotu. Średnica strugi chłodzącej wynosi od 60 do 80  $\mu\text{m}$ , natomiast ciśnienie doprowadzane do przystawki jest z zakresu 0,1 do 0,8 MPa.

Do procesu chłodzenia mikrojetowego podczas spawania stali niskowęglowych został wytypowany argon, jako gaz szlachetny obojętny chemicznie. Do zalet tego chłodziwa należy także zwiększona, w stosunku do powietrza, gęstość (więc rozplywa się po powierzchni spawanej).

## Struktury metalograficzne spoin

W literaturze powszechny jest pogląd stwierdzający, że wysoka zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF w spoinie ma korzystny wpływ na właściwości plastyczne spoiny [12-14]. Należy zaznaczyć, że złącze spawane nie jest jednolite, lecz składa się kilku stref, z których najważniejszymi są strefa wpływu ciepła oraz spoina. Pozostałe strefy to strefy przejściowe pomiędzy wyżej wymienionymi oraz materiał rodzimy, podział ten ilustruje rys. 1.13, który także pokazuje temperatury do których poszczególne strefy są nagrzewane w procesie spawania [11].



Rys. 1.13. Charakterystyczne obszary strefy wpływu ciepła [11]

Formowanie struktury spoiny opisane jest w literaturze w przedstawiony poniżej sposób. Podczas chłodzenia austenitu w pierwszej kolejności zarodkuje gruboziarnisty, przedutekdoidalny ferryt- oznaczony przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa jako GBF (*grain boundary ferrite*). Jako kolejny tworzy się ferryt płytkowy, którego ziarna skierowane są praktycznie prostopadle do wnętrza ziaren byłego austenitu. Ta odmiana ferrytu została na oznaczona jak PF (*primary ferrite*). Ostatnią wydzielającą się fazą jest

ferryt drobnoziarnisty AF (*acicular ferrite*), która wypełnia pozostałą część byłych ziaren austenitu. Należy jednak mieć na uwadze, że obok wyżej wymienionych struktur w spoinie może występować także austenit szczątkowy, a także bainit oraz martenzyt, przy czym ich zawartość procentowa w spoinie nie przekracza zwykle 5%. Reasumując struktura metalograficzna spoin dla stali niestopowych i standardowego drutu spawalniczego składa się głównie z następujących odmian morfologicznych ferrytu:

- GBF – gruboziarnisty ferryt podekteudoidalny (*grain boundary ferrite*),
- SPF – ferryt płytkowy (*side place ferrite*),
- AF – ferryt drobnoziarnisty (*acicular ferrite*).

Ze względu na najbardziej rozdrobnioną strukturę ferrytu AF w literaturze powszechny jest osąd, że jest on najbardziej korzystną odmianą morfologiczną ferrytu pod względem właściwości plastycznych złącza [45-50].

W literaturze można znaleźć liczne teorie opisujące przyczyny formowania się tej fazy. Wśród wspomnianych hipotez można wyróżnić następujące kierunki:

- odpowiednia szybkość chłodzenia [14 - 19]
- obecność wtrąceń niemetalicznych o odpowiednim składzie chemicznym [1, 16-18]
- dopasowanie sieciowe między ferrytem AF a wtręciami [11-14]
- wielkość i gęstość rozmieszczenia wtrąceń [16-17]
- energia powierzchniowa wtrąceń mogąca obniżyć barierę energetyczną zarodkowania ferrytu AF [11]
- układ naprężeń i dyslokacji powodujący obniżenie bariery energetycznej zarodkowania ferrytu AF [35]

O ile hipotezy dotyczące wtrąceń niemetalicznych zostały już dość gruntownie przebadane również w warunkach polskich [12, 22 - 23], o tyle wpływ prędkości chłodzenia w dalszym ciągu nie jest jednoznacznie zdefiniowany. Dzięki instalacji mikrojetowej, pozwalającej w bardzo precyzyjny sposób chłodzić spoinę, powinno udać się w sposób jednoznaczny określić wpływ chłodzenia na strukturę spoiny.



### 3. Podsumowanie przeglądu literatury

Powyższy przegląd wyraźnie pokazuje potrzebę opracowywania nowych metod spawalniczych będących w stanie sprostać coraz bardziej rygorystycznym wymaganiom nowoczesnej motoryzacji. Możliwość obniżenia masy pojazdu korzystnie wpływa na zużycie energii potrzebnej do przemieszczania. Będzie to miało także kluczowe znaczenie ze względu na stosowanie nowoczesnych elektrycznych rozwiązań napędowych, gdzie dodatkowa masa zmniejsza zasięg pojazdu, a ładowanie akumulatora jest zdecydowanie bardziej czasochłonnym procesem niż tradycyjne tankowanie. Metody spawalnicze wykorzystywane podczas napraw pojazdów także przechodzą powolną transformację co tylko potwierdza zasadność szukania nowych materiałów oraz metod spawalniczych odpowiadających współczesnym standardom. Potrzeba podniesienia udarności złączy wykonanych ze stali niestopowych wynika z wymagań związanych z bezpieczeństwem biernym pojazdów. Podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie złączy ze stali wysokostopowych AHSS oraz prawidłowe wykonanie złączy niepodobnych (*dissimilar welding*) z powyższych gatunków stali może być kluczowe dla zmniejszenia emisyjności pojazdów przy zachowaniu ich bezpieczeństwa biernego na najwyższym poziomie.

Zastosowanie przystawki mikrojetowej w zakresie precyzyjnego, selektywnego chłodzenia dającego czynny wpływ na strukturę spoiny, a przez to również na właściwości powstałego złącza, daje szeroki wachlarz możliwości technologicznych i badawczych. Odpowiednie dobranie paramentów pracy zespołu przystawki mikrojetowej wraz z uchwytem spawalniczym przekłada się bezpośrednio na właściwości otrzymanych spoin. Problematyka doboru parametrów jest zagadnieniem bardzo szerokim i wymaga badań eksperymentalnych dla każdego zestawienia wykorzystywanych materiałów rodzimych, spoin, gazów osłonowych i medium chłodzącego.

## 4. Cel i zakres pracy

Ponieważ prawidłowo wykonane złącze spawalnicze ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo użytkownika pojazdu, jego jakość zawsze musi być na najwyższym poziomie. Struktura spoiny bezpośrednio przekłada się na jakość złącza, tak więc istotą jest możliwość kontrolowania tego efektu. W praktyce odnotowuje się przypadki, w których z pozoru prawidłowo wykonana spoina nie wytrzymuje obciążeń z powodu nieprawidłowej struktury złącza. Z racji warunków klimatycznych panujących w Polsce, bardzo istotne jest także, aby naprawa spawalnicza zapewniała bezpieczeństwo zarówno w miesiącach ciepłych, przy dodatnich temperaturach pracy, jak i w zimie, kiedy ujemne temperatury niekorzystnie wpływają na właściwości plastyczne spoiny. Sytuację tę można poprawić przez zmianę struktury spoiny, co polepszy udarność złącza [11].

Głównym celem naukowym pracy jest opracowanie autorskiego procesu spawania konstrukcji nośnych pojazdu z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego, który zapewni:

- zwiększenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza wykonanego ze stali AHSS przy budowie konstrukcji nośnych pojazdów, co przełoży się na zmniejszenie ich masy, dzięki czemu pojazdy będą energooszczędne i co za tym idzie bardziej przyjazne środowisku,
- zwiększenie właściwości plastycznych złącza wykonanego ze stali niestopowej, co jest istotne ze względu na bezpieczeństwo bierne pojazdów w kontekście ekstremum pogodowych, w szczególności niskich temperatur.

Do realizacji głównego celu pracy będą wykorzystane stale: wysokowytrzymała DOCOL 1200 M oraz stal niestopowa S355J2G3 stosowana powszechnie podczas budowy pojazdów, w szczególności pojazdów ciężarowych, wolnobieżnych i akcesoriów do nich.

Główny problem badawczy poruszany w pracy dotyczy wpływu chłodzenia mikrojetowego na właściwości złączy stosowanych w budowie i naprawie pojazdów. Określenie wpływu chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne spawanych konstrukcji nośnych pojazdów poprzez badania metalograficzne oraz wytrzymałościowe. Cel ten można podzielić na cele pośrednie:

- systematyka i analiza zalecanych metod spawalniczych stosowanych podczas napraw i przebudów konstrukcji nośnych pojazdów,
- analiza procesów zachodzących podczas wykonywania połączenia spawalniczego, w tym przebieg spawalniczego cyklu cieplnego oraz formowania struktur spoiny i strefy wpływu ciepła,
- określenie warunków skrajnych prawidłowego funkcjonowania inżektora mikrojetowego,
- badania właściwości plastycznych powstałych spoin oraz ich struktur,
- analiza otrzymanych wyników.

Realizacja każdego z wyżej wymienionych celów pośrednich powinna zapewnić pełne zrozumienie badanego zjawiska, rzetelność otrzymanych wyników oraz podstawę do dalszych prac, mających na celu zgłębienie zagadnień dotyczących regulacji parametrów struktury spoiny.

## 5. Badania wstępne

Pracę rozpoczęto od serii badań wstępnych mających na celu określenie przydatności inżektora mikrojetowego przy budowie i naprawach spawalniczych konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych z niestopowej stali S355J2G3 oraz stali o wysokiej wytrzymałości DOCOL 1200 M. Pozwoliło to na określenie warunków brzegowych dla dalszej części badań. Szczególną uwagę podczas badań wstępnych poświęcono prawidłowemu wykonaniu serii próbek porównawczych, do wykonania których nie wykorzystano chłodzenia mikrojetowego. Pozwoliło to na zoptymalizowanie parametrów prądowo napięciowych i otrzymanie spoiny o najlepszych parametrach możliwych do otrzymania metodami klasycznymi. Ze względu na mnogość wyników próbki nieudane, nie spełniające wymagań wstępnych, bądź w których spoina uległa uszkodzeniu nie zostały ujęte w niniejszym zestawieniu.

Kolejnym etapem było wykonanie próbek przy tych samych parametrach spawalniczych, lecz wykorzystując chłodzenie metodą mikrojetową w różnych konfiguracjach. Pozwoliło to sprawdzić wpływ średnicy oraz ciśnienia gazów chłodzących. Otrzymane w ten sposób próbki poddano badaniom metalograficznym. Próbki, które wykazywały najkorzystniejszą zmianę struktury, poddano badaniom właściwości mechanicznych. Otrzymane wyniki pozwoliły na określenie warunków brzegowych oraz ograniczeń stosowania dyszy mikrojetowej. Aby wyeliminować błąd spawacza, próbki wykonano na specjalnie do tego celu wykonanym stole spawalniczym z elektroniczną regulacją posuwu uchwytu spawalniczego, zapewniającego powtarzalność wyników.

Przydatnym narzędziem podczas omawiania zagadnień związanych ze spawalnością stali jest obliczeniowy sposób oceny spawalności stali. Na podstawie składu chemicznego stali wyznacza się równoważnik węgla CEV (*Carbon Equivalent Value*), który opisuje intensywność oddziaływania składników stopowych na tworzenie różnych struktur w spoinie i SWC. Opracowanej przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa zależności pozwalającej na wstępne wyznaczenie spawalności metalu [77]:

$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (1)$$

W przypadku obliczonej wartości CEV nieprzekraczającej 0,42% stal uważa się za łatwospawalną a uzyskane złącza nie wymagają stosowania przestrzegania reżimu

temperaturowego (przy założeniu, że procentowa zawartość węgla nie będzie wyższa niż 0,25%). Przy współczynniku powyżej 0,6% stal uznawana jest za trudnospawalną, co przekłada się na potrzebę stosowania dodatkowych środków ostrożności takich jak: podgrzanie wstępne materiału rodzimego, obróbka cieplna po spawaniu czy zmniejszenie prędkości spawania. Współczynnik w przedziale 0,42%-0,6% oznacza stale średnospawalne. W tym przypadku stosowanie dodatkowych środków ostrożności zależy od grubości łączonych elementów [

Współczynnik równoważnika węgla CEV pozwala także na wyliczenie twardości w SWC (wyrażoną skali twardości Vickersa HV) według zależności:

-Dla spoin nie poddanych obróbce cieplnej po spawaniu

$$HV = 1200 \times CEV - 260 \quad (2)$$

-Dla spoin poddanych obróbce cieplnej po spawaniu

$$HV = 1200 \times CEV - 200 \quad (3)$$

Maksymalna wartość otrzymanej twardości w SWC dla danej klasyfikacji złącza przedstawia tablica 5.1. Należy zdawać sobie sprawę, że trójstopniowa skala jest mało precyzyjna i stanowi jedynie zgrubną ocenę spawalności, natomiast jej niski koszt i nieznaczna czasochłonność sprawia, że jest chętnie wykorzystywana w praktyce warsztatowej. Trzeba też mieć na uwadze, że dotyczy ona głównie stali niestopowych [65].

**Tabl. 5.1. Klasyfikacja warunków spawalności na podstawie obliczeniowej [65]**

Twardość $HV_{max}$ [HV]	Klasyfikacja
<250	łatwospawalny
250-350	średnospawalny
>350	trudnospawalny

Stale średnio i wysokostopowe wymagają eksperymentalnych metod badawczych, gdzie wyróżnia się próby metalurgiczne, konstrukcyjne i technologiczne. Pierwsza grupa określa przemiany fazowe zachodzące w spoinie i materiale rodzimym na skutek cyklu cieplnego. Ponadto można wymienić także: próby mechaniczne, statyczne oraz dynamiczne. Ważną grupą są także pomiary twardości SWC, które określają wskaźnik niejednorodności właściwości mechanicznych złącza.

## 5.1. Przygotowanie stanowiska spawalniczego

Stanowisko spawalnicze które zostało wykorzystane do wykonania próbek można podzielić na dwa zasadnicze moduły. Pierwszym z nich jest stół spawalniczy (rys. 5.1) umożliwiających pełną kontrolę nad parametrami geometrycznymi oraz posuwem końcówki spawalniczej. Drugi natomiast to półautomat spawalniczy zapewniający stabilność łuku elektrycznego, oraz powtarzalny cykl cieplny. Taka konfiguracja pozwala na powtarzalność w wykonaniu próbek, co z punktu widzenia kolejnych badań jest bardzo istotne.

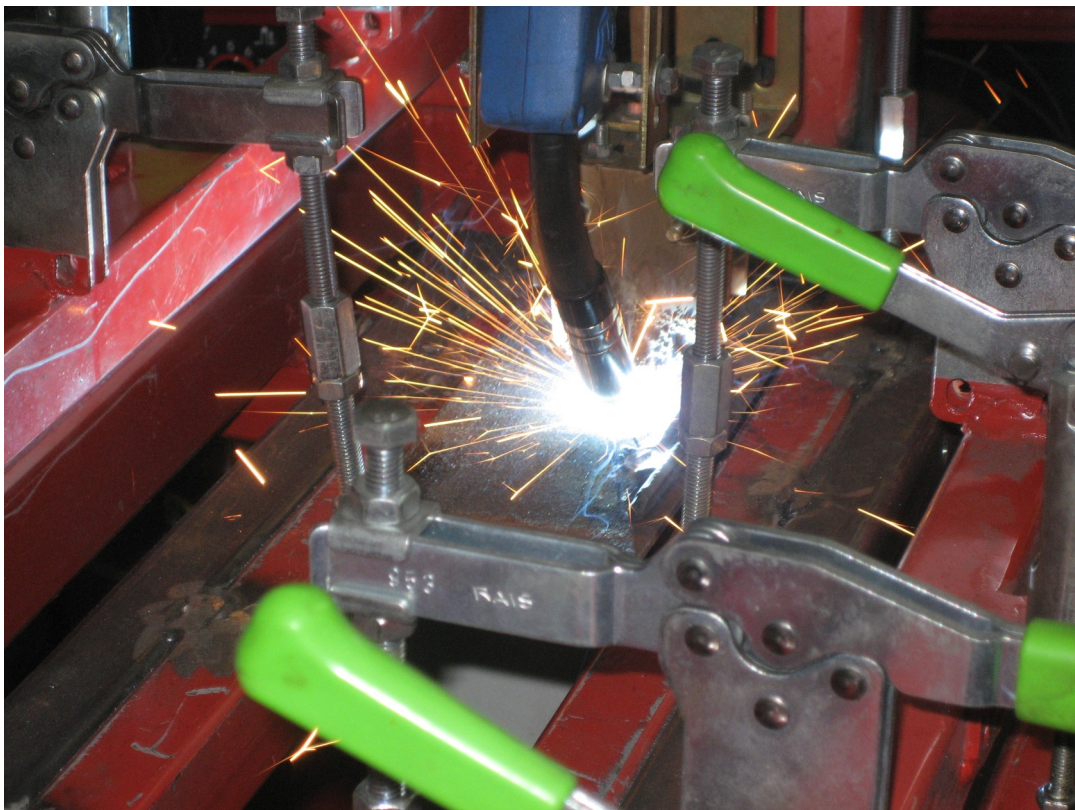


Rys. 5.1. Stół spawalniczy wykorzystany przy wykonywaniu próbek

Stół spawalniczy składa się z blatu do którego mocowane są elementy potrzebne do wykonania próbek. Mocowanie odbywa się przy pomocy regulowanych zacisków, które są rozmieszczone w 4 grupach po 5 zacisków. Regulacja pozwala na stabilny montaż dwóch blach o grubościach 0÷43 mm i wymiarach maksymalnych 20 × 80 cm. Nad blatem spawalniczym znajduje się szyna sterująca pracą wózka końcówki spawalniczej. Parametry geometryczne takie jak: odległość łuski spawalniczej od spawanego materiału, nachylenie końcówki spawalniczej, czy odległości między dyszą chłodzącą a łukiem elektrycznym są regulowane manualnie, w pełnym zakresie odległości i kątów. Za ruch wózka odpowiada silnik krokowy, który napędza śrubę łożyskowaną. Praca silnika kontrolowana jest przez specjalnie zaprojektowany sterownik, pozwalających na płynną regulację prędkości posuwu oraz prędkości powrotu.

## 5.2. Dobór parametrów technologicznych spawania

Do badań wytypowano powszechne metody spawalnicze, które dają możliwość automatyzacji pracy, a tym samym są podatne na stosowanie przystawki mikrojetowej. Tak więc przebadana została procedura MAG. Próbki wykonano stosując się do zaleceń producentów dotyczących doboru drutu spawalniczego, ciśnienia gazu osłonowego oraz parametrów prądowo-napięciowych dla stali niestopowych. Proces wykonywany z użyciem zautomatyzowanego stołu spawalniczego opisywanego w podrozdziale 5.3 ukazany jest na rys. 5.2



Rys. 5.2. Kalibracja warunków spawania na automatycznym stole spawalniczym

W przypadku stali wysokostopowych o podwyższonej wytrzymałości AHSS dobór wstępnych parametrów spawania oparto na dotychczasowych badaniach [33, 34, 36, 37, 44].

### Parametry spawania stali niestopowych

Do badań stali niestopowych wykorzystano stal konstrukcyjną EN S355J2G3. Zgodnie z zaleceniami producentów pojazdów do wykonania złącza wykorzystano drut spawalniczy G3Si1 zgodny z normą DIN EN 440 o grubości 1,2 mm oraz mieszankę

Ar + 10%CO<sub>2</sub>. Przepływ gazu osłonowego ustawiono na 17 dm<sup>3</sup>/min. Warunki geometryczne położenia uchwytu spawalniczego zostały dobrane tak, aby otrzymać najlepszą penetrację oraz średnią szerokość spoiny, tj. kąt pochylenia końcówki spawalniczej wynosił 60° natomiast odległość końcówki spawalniczej od spawanego materiału wyniosła 15 mm. Zapewniło to utrzymywanie drutu spawalniczego w okolicach 10 mm od materiału, co optymalizowało długość łuku i zapewniło minimalną ilość odprysków. Parametry prądowo-napięciowe procesu dobrane zostały w sposób zapewniający najlepsze tworzenie spoiny, bez ryzyka jej niedogrzenia. Napięcie spawania dostosowane samoczynnie przez półautomat spawalniczy; kształtuje się w przedziale 20-27 V w zależności od fazy spawania (najwyższe napięcie występuje tuż po zajarzeniu łuki spawalniczego kiedy odległość między drutem a materiałem ulega gwałtownej zmianie). Natężenie prądu spawania ustalono na 130 A i 140 A. Wartości te są mniejsze niż natężenie krytyczne co zapewnia owalny kształt przetopu. Prędkość posuwu palnika spawalniczego w stosunku do spawanego materiału została dobrana w taki sposób, aby zapewnić najlepszą jakość spoiny i wynosiła odpowiednio 300 mm/min oraz 350 mm/min. Parametry te przedstawione są w tablicy 5.2. Powyższe ustawienia posłużyły do wykonania próbek z dodatkowych chłodzeniem mikrojetowym.

**Tabl. 5.2. Parametry spawania stali niestopowych**

Parametr	Wartość	Jednostka
Rodzaj stali	S355J2G3	-
Drut spawalniczy	G3Si1	-
Średnica drutu spawalniczego	1,2	mm
Prędkość posuwu drutu	0,4	m/s
Gaz osłonowy	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	-
Wydatek gazu osłonowego	17	dm <sup>3</sup> /min
Napięcie łuku spawalniczego	20	V
Natężenie prądu spawania	130 i 140	A
Odległość palnika od elementu	15	mm
Prędkość spawania	300 i 350	mm/min

### Parametry spawania stali wysokowytrzymałych AHSS

Do badań stali wysokowytrzymałych AHSS wykorzystano stal DOCOL 1200 M. Do wykonania złącza wykorzystano drut spawalniczy Union X90 zgodny z EN ISO 16834-A o grubości 1 mm oraz mieszanekę Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gaz osłonowy. Wydatek gazu osłonowego ustawiono na 15 dm<sup>3</sup>/min. Warunki geometryczne położenia uchwytu



spawalniczego zostały dobrane w sposób opisany na stronie 40, z tym wyjątkiem, że odległość końcówki spawalniczej od spawanego materiału wyniosła 14 mm. Zapewniło to utrzymywanie drutu spawalniczego w okolicach 9 mm od materiału, co optymalizowało długość łuku i zapewniło minimalną ilość odprysków. Parametry prądowo-napięciowe procesu dobrane zostały w sposób zapewniający najlepsze tworzenie spoiny, bez ryzyka jej niedogrzenia. Napięcie spawania dostosowane samoczynnie przez półautomat spawalniczy; kształtuje się w przedziale 18-25 V w zależności od fazy spawania (najwyższe napięcie występuje tuż po zajarzeniu łuki spawalniczego kiedy odległość między drutem a materiałem ulega gwałtownej zmianie). W celu zapewnienia owalnego kształtu przetopu natężenie spawania ustalono na 110 A i 120 A. Prędkość posuwu palnika spawalniczego w stosunku do spawanego materiału wynosiła odpowiednio 300 mm/min oraz 350 mm/min. Parametry te przedstawione są w tabelicy 5.3. Powyższe ustawienia posłużyły wykonania próbek z dodatkowych chłodzeniem mikrojetowym.

**Tabl. 5.3. Parametry spawania stali AHSS**

Parametr	Wartość	Jednostka
Rodzaj stali	DOCOL 1200 M	-
Drut spawalniczy	Union X90	-
Średnica drutu spawalniczego	1	mm
Prędkość posuwu drutu	0,4	m/s
Gaz osłonowy	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	-
Wydatek gazu osłonowego	15	dm <sup>3</sup> /min
Napięcie łuku spawalniczego	18	V
Natężenie prądu spawania	110 i 120	A
Odległość palnika od elementu	14	mm
Prędkość spawania	300 i 350	mm/min

### **5.3. Dobór parametrów chłodzenia mikrojetowego**

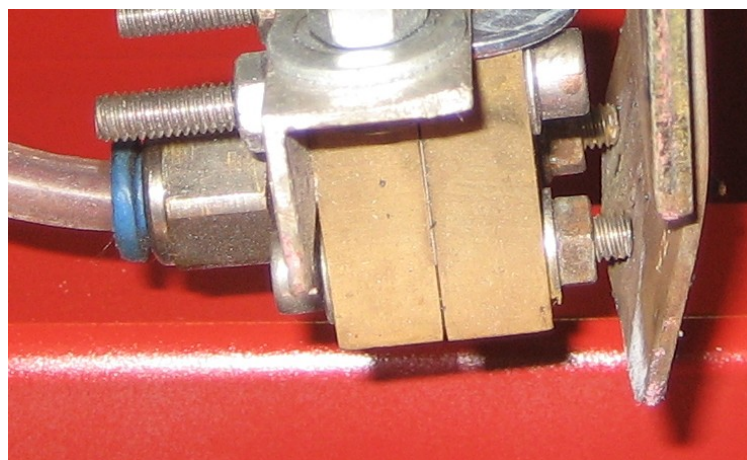
Pierwsze próby spawalnicze z wykorzystaniem różnych gazów chłodzących pokazały, że dobre efekty otrzymano stosując gaz chłodzący tożsamy z gazem osłonowym. W związku z powyższym do dalszych badań postanowiono zastosować jako gaz chłodzący mieszaninę Ar + 10% CO<sub>2</sub>, który także był wykorzystywany jako gaz osłonowy.

W związku ze sposobem wykonywania złączy, w szczególności z faktem, że ruch palnika spawalniczego odbywał się po linii prostej zdecydowano zastosować końcówkę mikrojetową z jedną dyszą chłodzącą skierowaną na lico spoiny. Struga medium chłodzącego była ustawiona tak, aby zaczynać chłodzenie lica spoiny podążając za łukiem spawalniczym.

W trakcie badań wstępnych wykorzystano trzy średnice dysz mikrojetowych, co pozwoliło na sprawdzenie zależności między średnicą strugi chłodzącej a jakością powstałej spoiny. Dostępne były przystawki mikrojetowe o średnicach 60, 70, 80  $\mu\text{m}$ . Ponieważ wykonanie pełnej serii badań dla każdej ze średnic wiązałyby się z wysokimi kosztami, zdecydowano się zastosować jedynie trzy ciśnienia gazów chłodzących: niskie (0,3 MPa), wysokie (0,7 MPa) oraz pośrednie (0,5 MPa).

### Przygotowanie instalacji mikrojetowej

Instalacja mikrojetowa jest określeniem zawierającym zbiór urządzeń i akcesoriów pozwalających na wykorzystanie chłodzenia mikrojetowego w praktyce. Głównym i najważniejszym elementem instalacji jest inżektor mikrojetowy (rys. 5.3), który za pomocą węży ciśnieniowych połączony jest z reduktorem ciśnienia nakręconym na butlę gazową.



**Rys. 5.3. Inżektor mikrojetowy widziany z boku. Po lewej widać przyłączy medium chłodzącego, z prawej osłonę przed łukiem**

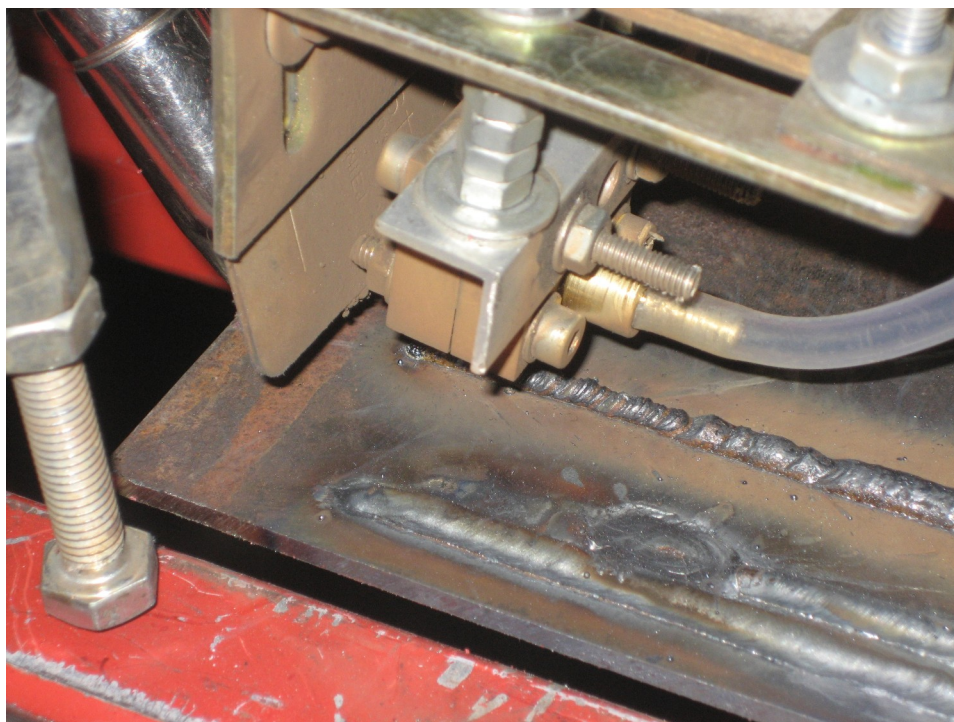
Inżektor mikrojetowy połączony jest w sposób sztywny z palnikiem spawalniczym przy pomocy flansz metalowych pozwalających na swobodną regulację parametrów geometrycznych między akcesoriami (rys. 5.4).



**Rys. 5.4. Flansze regulujące położenie palnika i dyszy**

Między reduktorem a dyszą mikrojetową zamontowany jest także zawór sprzężony z zaworem gazu osłonowego, co pozwala na uruchamianie dodatkowego chłodzenia w sposób automatyczny. Należy zaznaczyć, że aby móc schłodzić spoinę na całej długości należało zastosować pewne opóźnienie w rozpoczęciu oraz zakończeniu podawania gazu chłodzącego do dyszy.

Przystawka mikrojetowa ma formę kostki i wykonana jest z mosiądzu. Rozmiar w zależności od ilości i średnicy mikrodyz wynosi od kilku centymetrów dla jednej dyszy do kilkudziesięciu dla dużych zespołów dysz (np. takich jak używane są w przemyśle spożywczym). Budowę dyszy mikrojetowej można podzielić na budowę zewnętrzną oraz wewnętrzną. Najważniejszymi elementami zewnętrznymi przystawki jest przyłącze medium chłodzącego oraz płaszczyzna dysz chłodzących. W zastosowaniach spawalniczych, ze względu na trudne warunki (wysoka temperatura, możliwe odpryski metalu) przyłącze dodatkowo zabezpieczone jest ekranem ochronnym mającym na celu przedłużyć jego żywotność. Ekran ochronny ukazany jest na rysunku 5.5.



**Rys. 5.5. Testy ekranu ochronnego**

Wewnętrzna konstrukcja przystawki, w zależności od konfiguracji, może generować od jednej do nawet kilkunastu strug chłodziwa, przy czym wszystkie uwalniane są z jednej płaszczyzny przystawki i mogą być realizowane w różnym rozkładzie przestrzennym. Należy zauważyć, że średnice dysz w danej przystawce nie muszą być jednakowe. W zależności od oczekiwanego efektu, chłodzenie może odbywać się na przykład przy pomocy jednej strugi głównej o większej średnicy, za którą prowadzone są mniejsze strugi chłodzące, precyzyjnie obniżające temperaturę w wybranych miejscach. Niezależnie jednak od ilości dysz i ich wzajemnego ułożenia geometrycznego, wszystkie dysze w jednej przystawce muszą wykorzystywać ten sam gaz chłodzący. Kolejną cechą przystawki jest średnica strugi – praktyczny zakres wykorzystywanych średnic mieści się w przedziale 50 – 80  $\mu\text{m}$ . Poza tym obszarem działanie efektu mikrojetowego, a zarazem zdolność chłodzenia, znacząco maleje, co czyni je bezużytecznym.

### Parametry inżektora mikrojetowego

Z punktu widzenia spawalnictwa najważniejszymi parametrami inżektora mikrojet są:

- ciśnienie medium chłodzącego,
- średnica dyszy chłodzącej,

- rodzaj zastosowanego gazu,
- ilość dysz chłodzących.

Zmiany wyżej wymienionych parametrów przekładają się bezpośrednio na jakość złącza, przez co bardzo istotny jest ich odpowiedni dobór. Należy mieć na uwadze także fakt, że nawet niewielka zmiana jednego z nich może przełożyć się na rozregulowanie procesu spawalniczego, co w rezultacie może doprowadzić do powstania złącza bardzo niskiej jakości. Dlatego też tak istotnym jest dogłębne przebadanie wpływu dodatkowego chłodzenia mikrojetowego przed wprowadzeniem tej metody do powszechnego zastosowania.

Zakres regulacji ciśnienia medium chłodzącego został ograniczony do wartości otrzymywanych z butli, w których dany gaz jest dostarczany i mniejszych. Dzięki takiemu uproszczeniu zastosowanie powszechnie dostępnych gazów nie wymaga angażowania żadnych dodatkowych środków postaci sprężarek czy pomp, a do regulacji ciśnienia wykorzystywany jest klasyczny regulator standardowo wykorzystywany przy danego typu butlach. Na potrzeby badań wartość ciśnienia gazu chłodzącego ustalono w przedziale 0,3 MPa do 0,7 MPa.

Ze względu na konstrukcję dyszy, regulacja średnicy strugi medium chłodzącego nie jest możliwa. Aby zapewnić laminarny przepływ substancji, każdorazowa zmiana średnicy strugi wiąże się z zastosowaniem innego inżektora mikrojetowego. Wymusiło to każdorazową zmianę przystawki, co wiązało się z ponowną regulacją parametrów geometrycznych zestawu. By utrzymać przepływ laminarny należy dążyć do zmniejszenia wartości bezwymiarowej liczby Reynoldsa  $Re$  poniżej 2300. Liczbę otrzymuje się ze wzoru 10:

$$Re = \frac{2v r \rho}{\eta} \quad (10)$$

gdzie:

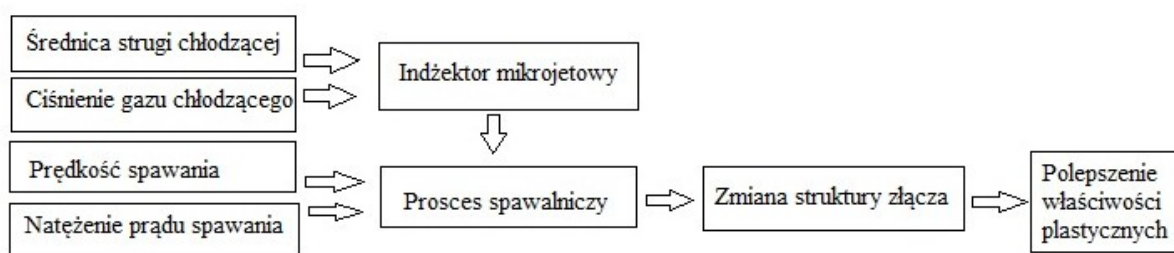
- $v$  – średnia prędkość płynu,
- $r$  – promień światła przewodu przez który płynie medium,
- $\rho$  – gęstość medium,
- $\eta$  – lepkość medium.

Konstrukcja dyszy pozwala na zastosowanie dowolnego medium chłodzącego w postaci gazowej. Ze względu na efekt rozprężania gazów, inżektor najskuteczniej działa właśnie z tym rodzajem medium. W zawiązku z czym do badań stosuje się powszechnie dostępne gazy techniczne takie jak argon, hel, dwutlenek węgla, powietrze, azot, oraz mieszaniny tych gazów. Ilość dysz chłodzących jest kolejnym parametrem wynikającym bezpośrednio z budowy dyszy i co za tym idzie, jego zmiana wymaga ingerencji w jej konstrukcję, czego konsekwencją jest fakt, że każdorazowa zmiana ilości strumieni medium chłodzącego wymaga zmiany przystawki mikrojetowej.

Powyższe informacje pokazują, że mimo bardzo szerokiej możliwości, jakie daje metoda chłodzenia mikrostrugami medium chłodzącego, dobranie odpowiednich parametrów chłodzenia jest zadaniem trudnym, wymagającym długich i żmudnych badań wynikających z mnogości możliwych do regulacji czynników. Do badań wytypowano inżektory o średnicach 60, 70, 80  $\mu\text{m}$ .

#### **5.4. Plan badań wstępnych**

Dysponując danymi, dotyczącymi najlepszych parametrów spawania bez użycia dodatkowego chłodzenia, w szczególności parametrów geometrycznych, prędkości posuwu oraz parametrów prądowo-napięciowych, wybrano czynniki sterowane podlegające badaniu. Na rys. 5.6 przedstawiono schematycznie plan badań wstępnych. Jak można zauważyć, na pierwszym etapie prac jako czynniki zmienne wytypowano prędkość i natężenie prądu spawania oraz ciśnienie gazu chłodzącego i średnicę dyszy chłodzącej. Oprócz tych parametrów na wynik eksperymentu niewielki wpływ miały także zakłócenia, takie jak np. zmienne napięcie spawania, lecz nie wpłynęły one na powtarzalność otrzymanych wyników.



**Rys. 5.6. Schemat badań wstępnych**

Na podstawie planu badań wykonana została matryca eksperymentu dla każdej z prędkości oraz prądu spawania ukazana w tabelicy 5.4. Podobny sposób chłodzenia mikrojetowego podczas spawania zaproponowano dla obu grup materiałowych (stali niestopowej oraz AHSS). W praktyce oznaczało to wykonanie 120 próbek dla każdej z badanych stali – 3 próbki dla każdej z 10 możliwych kombinacji średnicy dyszy mikrojetowej w stosunku do ciśnienia gazu chłodzącego w funkcji posuwu uchwytu spawalniczego oraz natężenia prądu. W sumie otrzymano 240 próbek, z których na podstawie badań nieniszczących, wytypowano próbki do dalszych prac, które obejmowały zglądy metalograficzne oraz badania właściwości plastycznych.

**Tabl. 5.4. Matryca eksperymentu dla badań wstępnych**

Proces	Ciśnienie gazu chłodzącego [MPa]	Średnica dyszy chłodzącej [ $\mu\text{m}$ ]
P <sub>w1</sub>	0 (grupa kontrolna)	Nie dotyczy
P <sub>w2</sub>	0,3	60
P <sub>w3</sub>	0,5	60
P <sub>w4</sub>	0,7	60
P <sub>w5</sub>	0,3	70
P <sub>w6</sub>	0,5	70
P <sub>w7</sub>	0,7	70
P <sub>w8</sub>	0,3	80
P <sub>w9</sub>	0,5	80
P <sub>w10</sub>	0,7	80

## 5.5. Badania nieniszczące

Na badania nieniszczące składały się badania wizualne VT oraz badania magnetyczno-proszkowe MT. Zgodnie z normą PN-EN ISO 17637 do badań wizualnych wykorzystane zostały środki pomocnicze w postaci lupy o powiększeniu  $\times 3$ , luksomierza oraz suwmiarki. Oświetlenie obiektu stanowiło światło neutralne białe o natężeniu 525 Lx. Otrzymane spoiny spełniły warunki zawarte w normie PN-EN ISO 5817 dla poziomu jakości „B”. W przypadku badań MT zastosowano metodę mokrą, przy natężeniu pola 2,6-3,7 kA/m, świetle neutralnym białym 515 Lx, temperaturze 20° C. Jako środek wykrywający wykorzystany został MR-76 a kontrast MR-72 [69, 70, 73 - 74].

W wyniku powyższych badań wyselekcjonowano próbki z wadami spawalniczymi takimi jak pęknięcia czy rysy. Powyższe wady wpłynęłyby na wynik dalszych prac i uczyniłyby je niemiernymi. Wyselekcjonowano parametry procesu przestwiono w tablicy 5.5. W przypadku stali niestopowych najlepsze natężenie prądu spawania wyniosło 140 A przy prędkości 300 mm/min. Dla stali wysokowytrzymałej najlepsze wartości procesu spawania ustalono na 110 A i prędkość posuwu 300 mm/min.

**Tabl. 5.5. Zastosowane wartości procesu spawania**

Badana stal	Prędkość spawania [mm/min]	Prąd spawania [A]	Średnie napięcie procesu [V]
S355J2G3	350	140	20
DOCOL 1200 M	300	110	18

Wyniki badań VT i MT dla omówionych parametrów przedstawione są w tablicach 5.6 i 5.7



**Tabl. 5.6. Wyniki badań VT i MT dla stali S355J2G3 (P – ocena pozytywna, N – ocena negatywna)**

Numer procesu S355J2G3	Wynik badań VT	Wynik badań MT	Ocena
P <sub>w</sub> 1	P	P	P
P <sub>w</sub> 2	P	P	P
P <sub>w</sub> 3	P	P	P
P <sub>w</sub> 4	P	P	P
P <sub>w</sub> 5	P	P	P
P <sub>w</sub> 6	P	P	P
P <sub>w</sub> 7	P	P	P
P <sub>w</sub> 8	P	P	P
P <sub>w</sub> 9	P	P	P
P <sub>w</sub> 10	P	P	P

**Tabl. 5.7. Wyniki badań VT i MT dla stali DOCOL 1200 M (P – ocena pozytywna, N – ocena negatywna)**

Numer procesu S355J2G3	Wynik badań VT	Wynik badań MT	Ocena
P <sub>w</sub> 1	P	P	P
P <sub>w</sub> 2	P	P	P
P <sub>w</sub> 3	P	P	P
P <sub>w</sub> 4	P	P	P
P <sub>w</sub> 5	P	P	P
P <sub>w</sub> 6	P	P	P
P <sub>w</sub> 7	P	P	P
P <sub>w</sub> 8	P	P	P
P <sub>w</sub> 9	P	P	P
P <sub>w</sub> 10	P	P	P

Wyniki badań wizualnych oraz magnetyczno-proszkowych pokazują, że zastosowany gaz Corgon 10 (90% Ar + 10 % CO<sub>2</sub>), użyty zarówno jako gaz osłonowy, jak i medium chłodzące, wykazuje równe dobre efekty, a jego zastosowanie nie wpływa na tworzenie się wad spawalniczych, jak ma to miejsce przy zastosowaniu czystego tlenu węgla IV. Zastosowany gaz pozwolił także na zwiększenie prędkości spawania, bez negatywnego

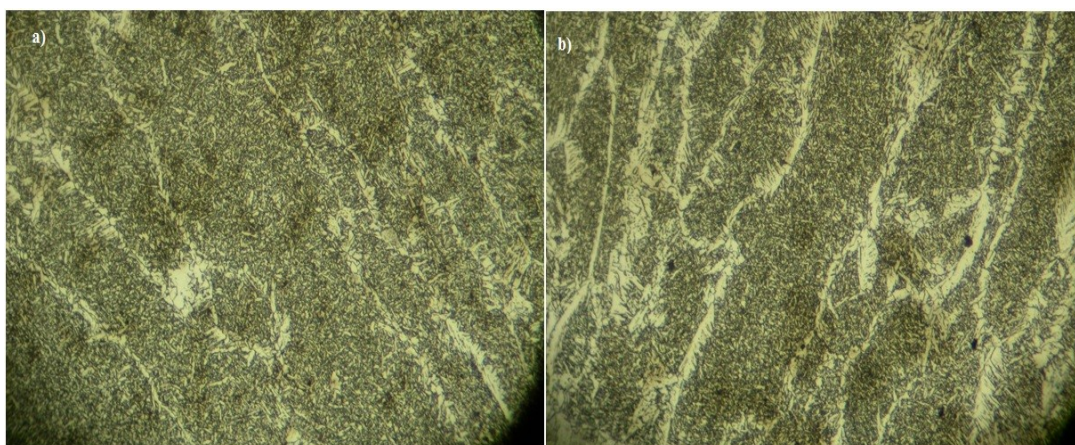
wpływu na jakość złącza, w obu badanych przypadkach. Do dalszych badań wytypowano próbki, do których wykonania użyto wyżej wymienionych parametrów.

## 5.6. Badania metalograficzne

W celu odpowiedzi na pytanie, jaki wpływ na strukturę spoiny ma ciśnienie gazu chłodzącego oraz średnica strugi chłodzącej, powstałe próbki poddano badaniom metalograficznym ustalającym udział procentowy poszczególnych faz w strukturze metalograficznej spoiny. Z otrzymanych próbek wykonano zglądy poprzeczne zgodne z PN-ENISO 9015, które następnie zostały wytrawione nitałem i poddane mikroskopii świetlnej przy powiększeniu  $\times 200$ . Do obserwacji wykorzystano mikroskop Neophot 32. Tak otrzymany materiał obrobiony został w programie MET-ILO zgodnie z wytycznymi MSI-IX-1323-84 wydanymi przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa. Powyższe działania powinny w sposób jednoznaczny pokazać zależność między intensywnością chłodzenia mikrojetowego, a strukturą spoiny [66, 71].

### Struktura złączy spawanych stali S355J2G3

Na rysunku 5.7 przedstawiono zdjęcie zglądów metalograficznych próbek ze stali S355J2G3 o największej (proces  $P_w3$ ) ilości ferrytu AF oraz próbki kontrolnej (proces  $P_w1$ ). Jak można zauważyć, zarodkowanie ferrytu AF w znaczący sposób wpłynęło na ograniczenie rozrostu innych faz, głównie ferrytu płytkowego SPF i w ograniczonym stopniu ferrytu gruboziarnistego GBF.



Rys. 5.7. Zglądy metalograficzne badanych próbek: a) zgląd dla procesu  $P_w6$ , b) zgląd dla procesu  $P_w1$  (próbka kontrolna). Powiększenie  $\times 200$

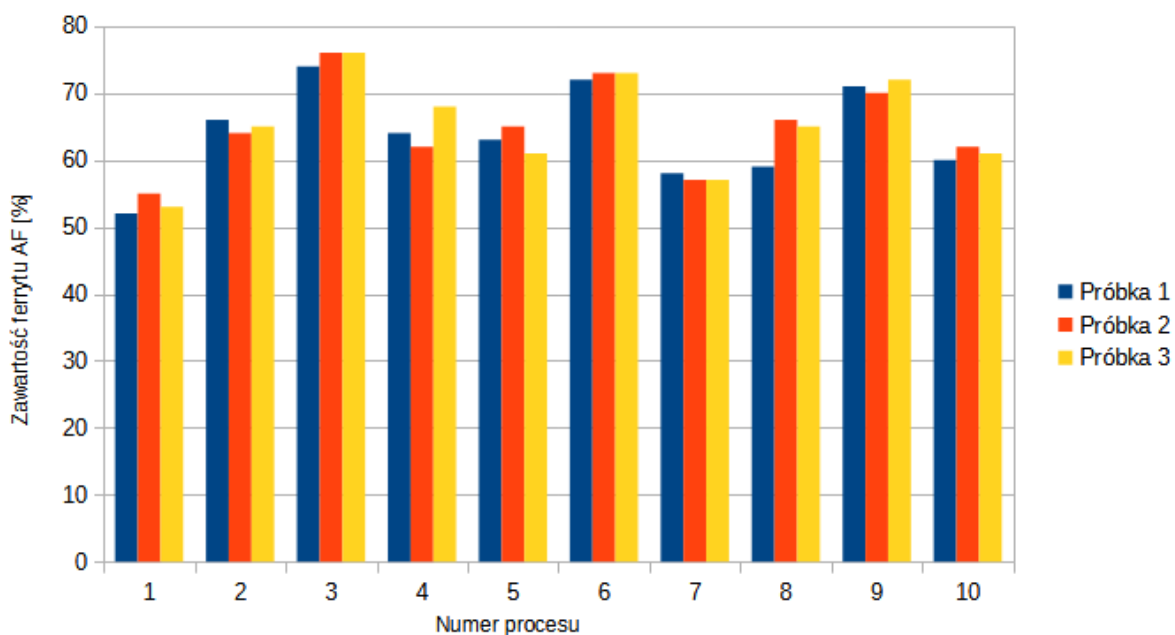
Z obserwacji obu rysunków, widać różnicę w ilości drobnoziarnistego ferrytu AF. W celu określenia struktury złączy otrzymanych próbek, wykorzystano metody metalografii optycznej oraz program komputerowy MET-ILO w wersji 9.07. Program służy do ilościowego opisu obrazu, w szczególności do metalografii ilościowej.

Materiał przeznaczony do badań metalograficznych przygotowany następująco: cięcie odbywało się w poprzek spoiny, następnie otrzymane w ten sposób próbki zostały zainkludowane i poddane procesowi szlifowania i polerowania. Po ostatnim etapie polerowania, tuż przed badaniami mikroskopowymi, próbki poddano trawieniu, wykorzystując do tego nital. Pozwoliło to na wydobycie struktury w stopniu wystarczającym do jednoznacznego zidentyfikowania jej przez program komputerowy. W tabelicy 5.6 przedstawiono wyniki pomiarów procentowej zawartości ferrytu AF dla danych procesów.

**Tabl. 5.8. Wyniki pomiaru zawartości procentowej ferrytu AF dla poszczególnych procesów**

Numer procesu	Procentowa zawartość ferrytu AF [%]			
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>w</sub> 1	52	55	53	53,3
P <sub>w</sub> 2	66	64	65	65,0
P <sub>w</sub> 3	74	76	76	75,3
P <sub>w</sub> 4	64	62	68	64,7
P <sub>w</sub> 5	63	65	61	63,0
P <sub>w</sub> 6	72	73	73	72,7
P <sub>w</sub> 7	58	57	57	57,3
P <sub>w</sub> 8	59	66	65	63,3
P <sub>w</sub> 9	71	70	72	71,0
P <sub>w</sub> 10	60	62	61	61,0

Na rysunku 5.8 pokazany jest wykres obrazujący zmianę ferrytu AF dla poszczególnych procesów. Jak można zauważyć, każdy z procesów wykorzystujących dodatkowe chłodzenie mikrojetowe, niezależnie od wykorzystanego ciśnienia i średnicy dyszy, wykazuje zwiększoną procentową zawartość ferrytu AF w stosunku do próbki kontrolnej (proces P<sub>w</sub>1).



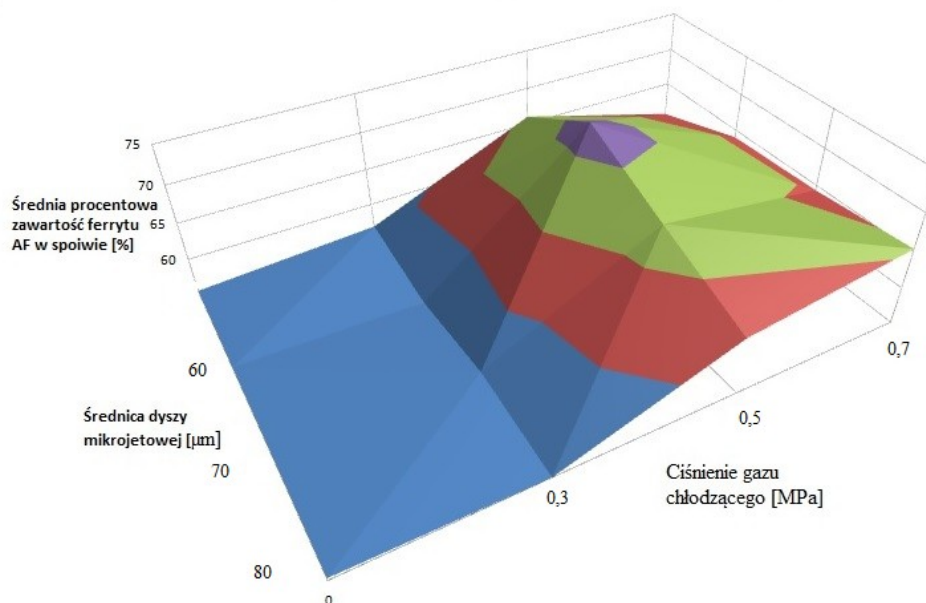
Rys. 5.8. Procentowa zawartość ferrytu AF dla poszczególnych procesów

Powyższe wyniki badań wyraźnie pokazują, że chłodzenie mikrojetowe ma wpływ na zarodkowanie ferrytu drobnoziarnistego AF i tym samym wpływa na strukturę spoiny. Przebadane próbki dowodzą, że dodatkowe chłodzenie mikrojetowe wykonywane inżektorami o średnicach 60, 70, 80  $\mu\text{m}$  przy ciśnieniach 0,3-0,7 MPa skutkuje zwiększeniem fazy ferrytu AF w stosunku do próbki kontrolnej. Najkorzystniejszym, pod kątem zawartości procentowej ferrytu AF, jest proces P<sub>w3</sub>, podczas którego zastosowano ciśnienie gazu chłodzącego P=0,5 MPa i średnicę dyszy iniektorowej 60  $\mu\text{m}$ , co pozwoliło na osiągnięcie 75% ferrytu AF w spoinie, co w porównaniu z wynikiem ok. 55%, otrzymanym przy korzystaniu z metody klasycznej, jest przyrostem znaczącym. Zgodnie z przypuszczeniami teoretycznymi, badania wstępne potwierdziły wpływ chłodzenia mikrojetowego na strukturę spoiny. Cel zastosowania chłodzenia w przypadku stali niestopowych, czyli zwiększenie udziału najbardziej pożądanej fazy ferrytu drobnoziarnistego AF, został osiągnięty. W tabelicy 5.7 przedstawiono średnie wyniki pomiarów procentowej zawartości ferrytu drobnoziarnistego AF dla danych parametrów chłodzenia (oraz próbki porównawczej) w formie siatki zależności. Na jej podstawie przygotowano wykres płaszczyznowy wizualizujący wyniki badań.

**Tabl. 5.9. Wyniki badań średniej procentowej zawartości ferrytu AF [%]**

Stal S355J2G3	Średnica dyszy [ $\mu\text{m}$ ]		
Ciśnienie gazu [MPa]	60	70	80
0,3	65	64,7	63,3
0,5	75,3	72,7	71
0,7	64,7	57,3	61

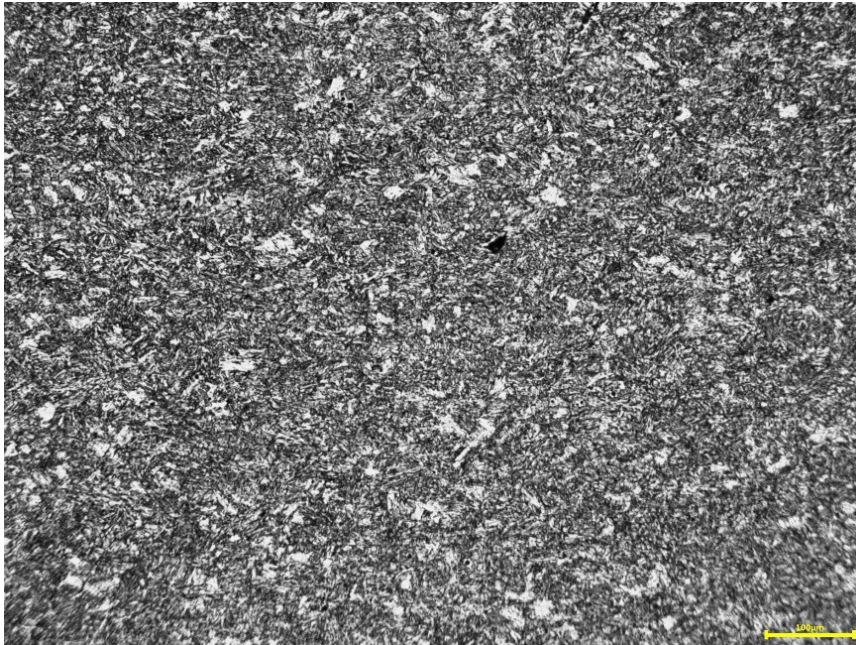
Wykres przedstawiony na rysunku 5.9 pokazuje rozkład średnich procentowych zawartości ferrytu AF w spoinie w funkcji ciśnienia gazu chłodzącego i średnicy dyszy mikrojetowej. Jak można zauważyć, najkorzystniejszym pod względem procentowego udziału ferrytu AF złożeniem jest chłodzenie dyszą o średnicy 60  $\mu\text{m}$ , do której dostarczone jest ciśnienie wynoszące 0,5 MPa.



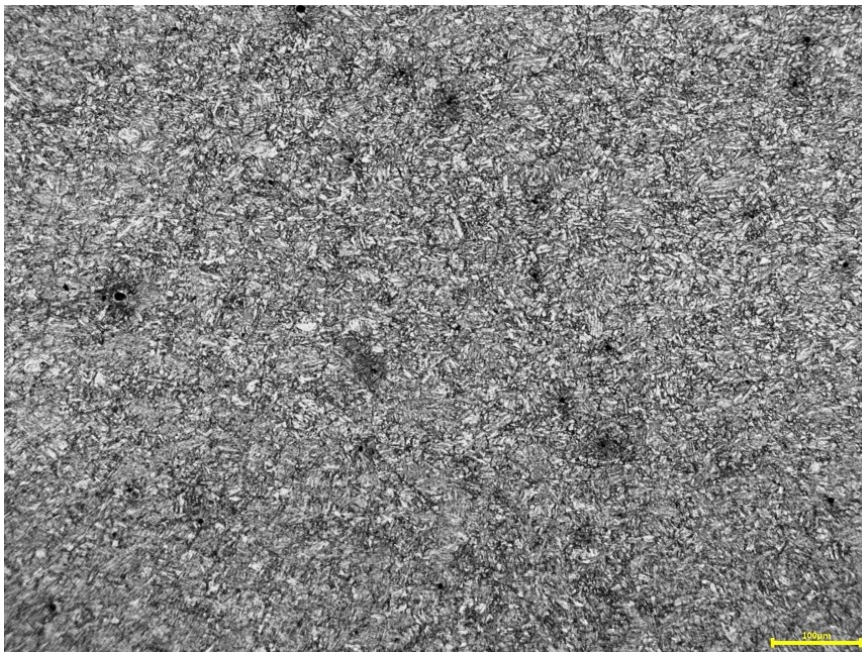
**Rys. 5.9 Wykres zależności średniej procentowej zawartości ferrytu AF w funkcji średnicy dyszy chłodzącej oraz zastosowanego ciśnienia**

## Struktura złączy spawanych stali DOCOL 1200 M

Rysunki 5.10 i 5.11 przedstawiają zdjęcia zglądów metalograficznych wykonanych dla stali DOCOL 1200 M. Zdjęcia zostały wykonane dla procesów P<sub>w1</sub> (próbka kontrolna) oraz P<sub>w6</sub> (ciśnienie 0,5 MPa, średnica inżektora 70 μm).



Rys. 5.10. Zgląd metalograficzny procesu P<sub>w1</sub> (żółta podziałka = 100 μm)



Rys. 5.11. Zgląd metalograficzny procesu P<sub>w6</sub> (żółta podziałka = 100 μm)

Na zdjęciu bez chłodzenia mikrojetowego widoczne są następujące fazy: martenzyt, bainit, ferryt gruboziarnisty GBF. Struktura taka jest niekorzystna ze względu na słabe umocnienie, a rozrośnięte ziarno wpływa negatywnie na powstawanie pęknięć zarówno w spoinie jak i w strefie wpływu ciepła. W przypadku zastosowania chłodzenia mikrojetowego można rozróżnić martenzyt, drobnoziarnisty ferryt AF oraz ferryt SPF. Struktura taka gwarantuje dobre właściwości plastyczne, w szczególności polepszenie wydłużenia względnego. Przekłada się także na eliminację pęknięć w spoinie i SWC.

## **5.7. Badania twardości**

Wykonanie badań twardości zgodnie z normą PN-EN 1043 zakłada pomiar twardości w pełnym przekroju, mierząc wartość w materiale rodzimym, SWC oraz spoinie. Do pomiaru wykorzystano próbę Vickersa. Zaznaczyć należy, że jeżeli złącze jest zróżnicowane względem twardości materiału rodzimego (powyżej 30%), wywołuje to tzw. karb strukturalny, przekładający się na tendencję stali do pęknięć. Wyniki pomiarów zgodnych z normą PN EN ISO 9015-1, wykonanych przy użyciu twardościomierza HPO250, metodą Vickersa HV10 (temperatura 20° C, obciążenie 98 N), wykonanych dla stali S355J2G3 przedstawione są w tablicy 5.10. Ze względu na cienkościenny materiał, wykonano jedną linię pomiarową w pełnym zakresie połączenia spawanego (materiał rodzimy – SWC – spoina – SWC - materiał rodzimy), co jest zgodne z metodykom badań [65, 78].

**Tabl. 5.10. Wyniki pomiarów twardości dla stali S355J2G3**

S355J2G3	Twardość HV					
	Numer procesu	Materiał rodzimy	SWC	Spoina	SWC	Materiał rodzimy
	P <sub>w</sub> 1	159	214	202	214	166
	P <sub>w</sub> 2	162	210	205	211	162
	P <sub>w</sub> 3	162	214	208	212	161
	P <sub>w</sub> 4	165	212	207	215	160
	P <sub>w</sub> 5	161	208	207	214	167
	P <sub>w</sub> 6	165	208	207	213	161
	P <sub>w</sub> 7	160	212	207	213	166
	P <sub>w</sub> 8	165	213	206	213	162
	P <sub>w</sub> 9	163	209	206	212	165
	P <sub>w</sub> 10	164	210	202	212	164

Średnia twardość badanego złącza dla procesu kontrolnego (proces P<sub>w</sub>1) wynosiła 159 HV dla materiału rodzimego, 214 HV w strefie wpływu ciepła oraz 202 HV w spoinie. Dla procesu P<sub>w</sub>3, gdzie odnotowano największy wpływ na strukturę spoiny, średnia twardość w SWC wynosiła 213 HV, a w spoinie 208 HV. Różnice twardości w poszczególnych strefach nie wykraczają poza przyjętą granicę karbu strukturalnego.

Wyniki pomiarów, zgodnych z normą PN EN ISO 9015-1, wykonanych przy użyciu twardościomierza HPO250, metodą Vickersa HV10 (temperatura 20° C, obciążenie 98N), wykonanych dla stali DOCOL 1200 M, przedstawione są w tablicy 5.9. Ze względu na cienkościenny materiał, wykonano jedną linię pomiarową w pełnym zakresie połączenia spawanego (materiał rodzimy – SWC – spoina – SWC - materiał rodzimy), co jest zgodne z metodykom badań.



**Tabl. 5.11. Wyniki pomiarów twardości dla stali DOCOL 1200 M**

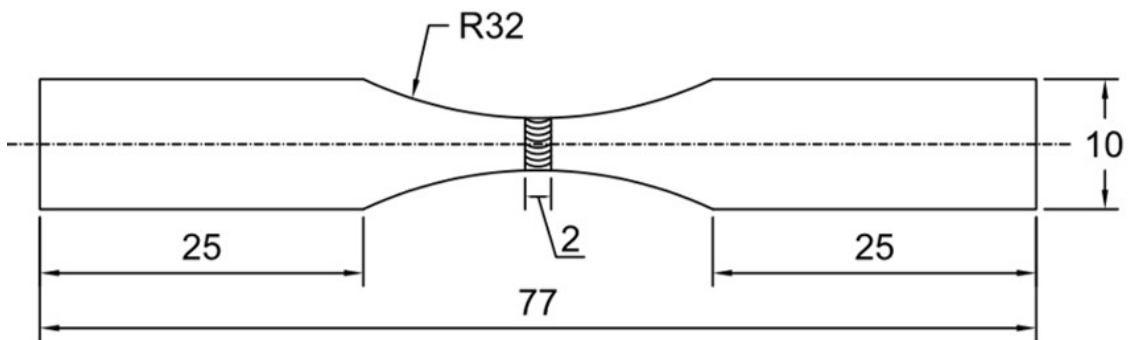
DOCOL 1200 M	Twardość HV				
	Materiał rodzimy	SWC	Spoina	SWC	Materiał rodzimy
P <sub>w</sub> 1	389	352	325	357	390
P <sub>w</sub> 2	382	352	311	354	383
P <sub>w</sub> 3	385	355	312	352	382
P <sub>w</sub> 4	382	352	313	348	387
P <sub>w</sub> 5	387	352	311	350	390
P <sub>w</sub> 6	386	351	318	352	387
P <sub>w</sub> 7	383	349	314	349	380
P <sub>w</sub> 8	385	354	315	346	380
P <sub>w</sub> 9	383	355	312	348	382
P <sub>w</sub> 10	385	346	319	354	388

Średnia twardość badanego złącza dla procesu kontrolnego (proces P<sub>w</sub>1) wynosiła 389 HV dla materiału rodzimego, 353 HV w strefie wpływu ciepła oraz 312 HV w spoinie. Dla procesu P<sub>w</sub>6 gdzie odnotowano najlepszy wpływ na strukturę spoiny średnia twardość w SWC wynosiła 351 HV a w spoinie 318 HV.

Podobnie jak w przypadku stali niestopowej, różnice twardości w poszczególnych strefach mieszczą się w granicy powstania karbu strukturalnego. Analizując powyższe dane można założyć, że zastosowanie chłodzenia mikrojetowego nie ma bezpośredniego wpływu na wyniki badań twardości.

## **5.8. Wytrzymałość na rozciąganie**

Właściwości mechaniczne spoin, dla których nie stwierdzono wad, postanowiono sprawdzić między innymi przez badanie na dwukolumnowej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 3369. Do badań wykonano próbki klepsydryliczne ze względu na umiejscowienie badanej spoiny w najmniejszym przekroju bazy pomiarowej, będącym fizyczną płaszczyzną zniszczenia. Sposób wykonania próbek pokazany jest na rys. 5.12. Rys 5.13 przedstawia przykładową próbkę [75].



Rys. 5.12. Sposób przygotowania próbki klepsydrycznej do badań wytrzymałości na rozciąganie.



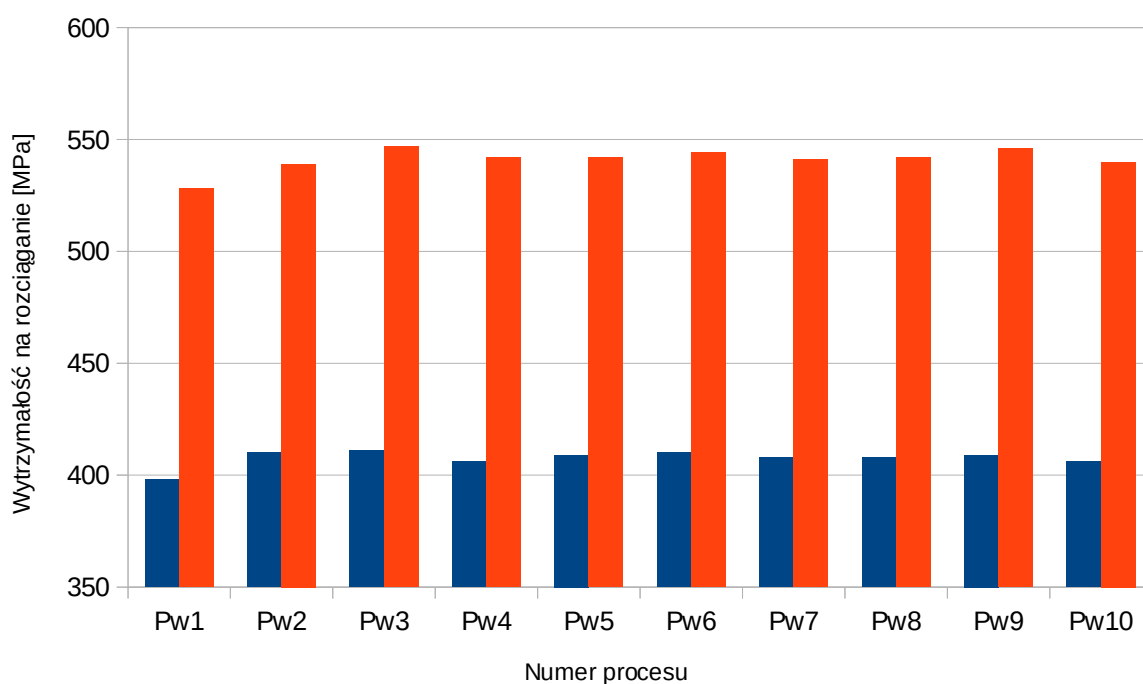
Rys. 5.13. Próbka klepsydryczna przygotowan dla procesu P<sub>w</sub>1

Wyniki badań złączy stali niestopowych S355J2G3 dla każdego z przeprowadzonych procesów przedstawia tablica 5.12.

Tab. 5.12. Wytrzymałość złącza dla stali S355J2G3

Numer procesu S355J2G3	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
P <sub>w</sub> 1	398	528	11,9
P <sub>w</sub> 2	410	539	13,9
P <sub>w</sub> 3	411	547	13,2
P <sub>w</sub> 4	406	542	13,6
P <sub>w</sub> 5	409	542	13,4
P <sub>w</sub> 6	410	544	13,7
P <sub>w</sub> 7	408	541	13,1
P <sub>w</sub> 8	408	542	13,9
P <sub>w</sub> 9	409	546	13,4
P <sub>w</sub> 10	406	540	13

Rys. 5.14. przedstawia wyniki badań w formie wykresu. Najwyższą wartość  $R_e$  osiągnięto dla procesu P<sub>w3</sub>. Należy zaznaczyć, że wyniki dla wszystkich próbek wykonanych z zastosowaniem chłodzenia mikrojetowego osiągnęły wyższą wartość niż próbka porównawcza procesu P<sub>w1</sub>



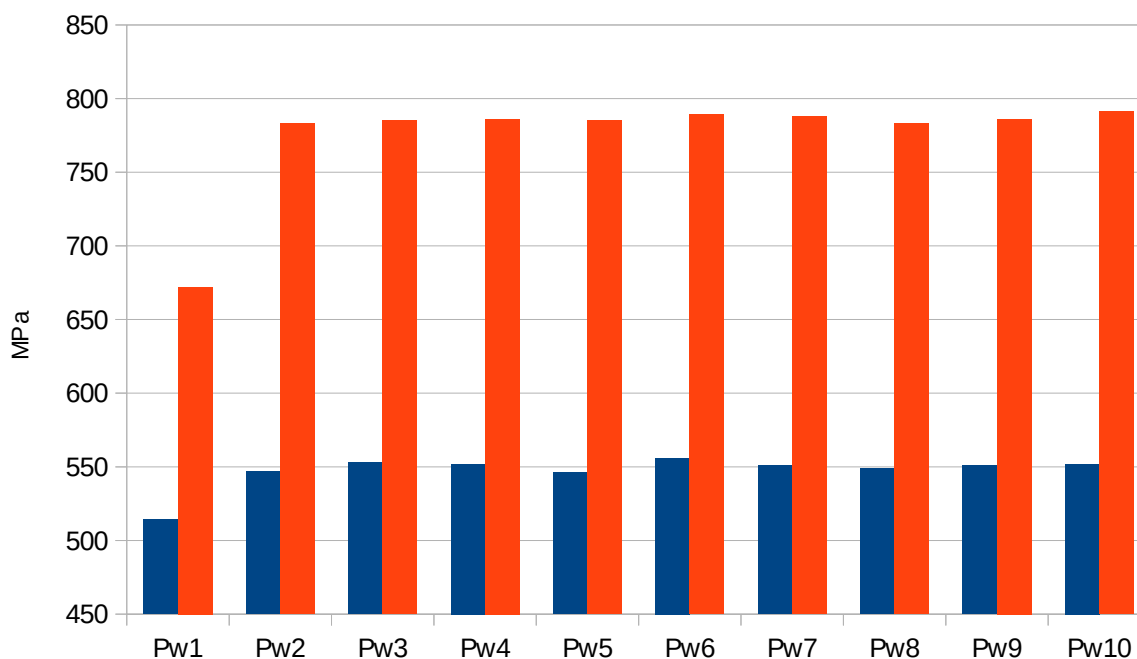
Rys. 5.14. Wykres wyników badań stali S355J2G3 dla poszczególnych procesów. Kolorem niebieskim zaznaczona jest wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , kolorem czerwonym przedstawiono wartość granicy plastyczności  $R_e$ .

W tabelicy 5.11 ukazane są wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla stali DOCOL 1200 M. Mając na uwadze, że proces P<sub>w1</sub> jest procesem porównawczym, w którym gaz chłodzący nie był podawany do dyszy, można zauważyć wzrost wytrzymałości oraz wartości wydłużenia względnego  $A_5$ .

**Tabl. 5.13. Wytrzymałość złącza dla stali DOCOL 1200 M**

Numer procesu DOCOL 1200 M	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
P <sub>w</sub> 1	514	672	4,1
P <sub>w</sub> 2	547	783	5,8
P <sub>w</sub> 3	553	785	6,1
P <sub>w</sub> 4	552	786	5,9
P <sub>w</sub> 5	546	785	6
P <sub>w</sub> 6	556	789	6
P <sub>w</sub> 7	551	788	6
P <sub>w</sub> 8	549	783	6
P <sub>w</sub> 9	551	786	5,8
P <sub>w</sub> 10	552	791	6

Rys. 5.15 przedstawia wyniki badań w formie wykresu. Należy zaznaczyć, że wyniki dla wszystkich próbek wykonanych z zastosowaniem chłodzenia mikrojetowego osiągnęły wyższą wartość niż próbka porównawcza procesu P<sub>w</sub>1



Rys. 5.15. Wykres wyników badań dla stali DOCOL 1200 M dla poszczególnych procesów. Kolorem niebieskim zaznaczona jest wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , kolorem czerwonym przedstawiono wartość granicy plastyczności  $R_e$ .

## 5.9. Wnioski z badań wstępnych

Na podstawie wyników badań wstępnych można sformułować następujące wnioski:

1. Do napraw konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali S355J2G3 można zastosować spawanie metodą MAG z zastosowaniem drutu G3Si1 oraz chłodzenia mikrojetowego z wykorzystaniem mieszanki Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gazu osłonowego oraz chłodzącego (mikrojetowego).
2. Dalsze badania podczas spawania stali S355J2G3 postanowiono wykonywać inżektorem o średnicy 60 μm.
3. Badania metalograficzne złączy dla stali S355J2G3 wykazały wzrost zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF do 75%.
4. Badanie twardości złączy dla stali S355J2G3 wykazało średnią twardość w SWC na poziomie 213 HV oraz 208 HV w spoinie.

5. Badanie wytrzymałości na rozciąganie złączy ze stali S355J2G3 wykazało wzrost wytrzymałości o 3,3%.
6. Do budowy konstrukcji nośnych pojazdów można zastosować stal DOCOL 1200 M, co będzie miało pozytywny wpływ na masę pojazdu.
7. Elementy pojazdu wykonane ze stali DOCOL 1200 M można spawać procesem MAG z zastosowaniem drutu UNION X90, z zastosowaniem chłodzenia mikrojetowego z wykorzystaniem mieszanki Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gazu osłonowego oraz chłodzącego.
8. Podczas spawania stali DOCOL 1200 M z chłodzeniem mikrojetowym można zastosować mieszankę Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gaz osłonowy i chłodzący, stosując średnicę inżektora mikrojetowego 70 μm.
9. Badania metalograficzne złączy dla stali DOCOL 1200 M wykazały polepszenie struktury spoiny, gdzie rozróżnić można martenzyt, drobnoziarnisty ferryt AF oraz ferryt SPF.
10. Badanie twardości złączy dla stali DOCOL 1200 M wykazało średnią twardość w SWC na poziomie 318 HV oraz 353 HV w spoinie.
11. Badanie wytrzymałości na rozciąganie złączy ze stali DOCOL 1200 M wykazało wartość wytrzymałości  $R_e=556$  MPa przy wydłużeniu  $A_5=6$  %.

## 6. Podsumowanie badań wstępnych

Badania wstępne pozwoliły na wyznaczenie warunków brzegowych badanych procesów oraz analizę możliwości wykonania złącza o polepszonych parametrach dla stali nisko i wysokostopowych. W przypadku stali niestopowych potwierdził się pozytywny wpływ dodatkowego chłodzenia z wykorzystaniem inżektora mikrojetowego na zarodkowanie drobnoziarnistego ferrytu AF i związane z tym polepszenie właściwości mechanicznych i plastycznych złącza. Wytypowano także parametry procesu spawania, jak i chłodzenia mikrojetowego dla obu stali, które posłużyły do przygotowania próbek wykorzystywanych do badań zasadniczych. W przypadku stali S355J2G3, spawanej drutem

spawalniczym G3Si1 o grubości 1,2 mm i prędkości wysuwu 0,4 m/s, wraz z gazem osłonowym Ar + 10% CO<sub>2</sub>, przy parametrach prądowo-napięciowych 20 V i 140 A i prędkości spawania 300 mm/min, najlepsze parametry chłodzenia kształtowały się następująco: ciśnienie 0,5 MPa, średnica inżektora 60 μm. Dla stali DOLOC 1200 M, spawanej drutem spawalniczym Union X90 o grubości 1 mm, o prędkości wysuwu 0,4 m/min, wraz z gazem osłonowym Ar + 10% CO<sub>2</sub>, przy parametrach prądowo-napięciowych 18 V i 110 A i prędkości spawania 300 mm/min, najlepsze parametry chłodzenia kształtowały się następująco: ciśnienie 0,5 MPa a średnica inżektora 70 μm. Na odnotowanie zasługuje także fakt, że bardzo duży wpływ na jakość złącza ma odpowiednie przygotowanie materiału, w szczególności ukształtowanie rowka spawalniczego. Badania wstępne potwierdzają rozważania teoretyczne. Wykorzystanie dodatkowego chłodzenia mikrojetowego ma pozytywny wpływ na strukturę spoiny, a dobór odpowiednich parametrów dyszy i gazu chłodzącego pozwala na polepszenie właściwości spoiny. Przekłada się to na możliwość szerszego zastosowania stali wysokostopowych przy produkcji pojazdów i co za tym idzie zmniejszenie ich masy. Powyższe spostrzeżenia pozwalają na ukierunkowanie dalszych prac w stronę optymalizacji procesu chłodzenia mikrojetowego, w celu dalszej poprawy struktury złącza, co w rezultacie pozwoli na polepszenie właściwości eksploatacyjnych naprawianych konstrukcji nośnych pojazdów. Należy także zbadać, czy zmiany w strukturze spoiny nie wpłyną w negatywny sposób na powstawanie wad i niezgodności spawalniczych mogących osłabić konstrukcje nośną pojazdu.

Badania wstępne potwierdzają rozważania teoretyczne. Wykorzystanie dodatkowego chłodzenia mikrojetowego ma pozytywny wpływ na strukturę spoiny, a dobór odpowiednich parametrów dyszy i gazu chłodzącego pozwala na zwiększenie fazy ferrytu AF w spoinie, co w znaczący sposób polepsza udarność spoiny w niskich temperaturach. Powyższe spostrzeżenia pozwalają na ukierunkowanie dalszych prac w stronę optymalizacji procesu chłodzenia mikrojetowego, w celu dalszego zwiększenia procentowego udziału ferrytu AF, co w rezultacie pozwoli na polepszenie właściwości eksploatacyjnych naprawianych konstrukcji nośnych pojazdów. Należy także zbadać, czy tak drastyczny, w stosunku do metod klasycznych, wzrost procentowej zawartości ferrytu AF w spoinie nie wpłynie negatywnie na jej inne właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość statyczna czy zmęczeniowa.

W trakcie prac natrafiono także na problemy związane z instalacją chłodzenia mikrojetowego. Pierwszy problem można podzielić na dwa niezależne zagadnienia, które

jednak zostały rozwiązane poprzez zastosowanie odpowiednich osłon. Pierwszym problemem było zatykanie precyzyjnego wylotu dyszy mikrojetowej przez odpryski rozgrzanego metalu, drugi problem to nadtapianie delikatnych węży przyłączeniowych wykonanych z tworzywa sztucznego. Oba problemy zostały rozwiązane przez zastosowanie specjalnych ceramicznych osłon, chroniących dyszę przed odpryskami metalu oraz działaniem wysokiej temperatury. Problem stosowanych gazów chłodzących polegał na wydmuchiwaniu gazów osłonowych przez gaz chłodzący. Próbowano różnych rozwiązań – zmianę parametrów geometrycznych, osłony ceramiczne i metalowe. Jednak ze względów praktycznych zdecydowano się na zastosowanie tego samego rodzaju gazu chłodzącego jak gazu osłonowego. W przypadku podjęcia badań zakładających wykorzystanie różnych gazów, należy rozwiązać problem przedmuchów, przy czym najkorzystniejsze wyniki otrzymano podczas rozwarcia kąta, pod którym struga medium chodzącego pada na chłodzony element.

Przy spawaniu stali niestopowych otrzymano zwiększoną zawartość ferrytu AF: z niecałych 54% dla próbki porównawczej do ponad 75%, przy ciśnieniu chłodzenia 0,5 MPa i średnicy inżektora 60  $\mu\text{m}$ . Poprawa ta przełożyła się na polepszenie wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  do 556 MPa przy wydłużeniu  $A_5$  na poziomie 13,2%. W przypadku stali DOCOL 1200 M osiągnięto poprawę wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  z 672 MPa do 789 MPa przy poprawie wydłużenia względnego  $A_5$  z 4,1% do 6,0% stosując średnice inżektora mikrojetowego o średnicy 70  $\mu\text{m}$  oraz ciśnienie gazu na poziomie 0,5 MPa. Otrzymane wyniki są wysoce zadowalające i pozwoliły na zaproponowanie tezy pracy.



## 7. TEZA PRACY

Na podstawie przeglądu literatury zauważono, że do budowy pojazdów samochodowych wciąż stosuje się stale niestopowe, ale coraz częściej zaczyna się je zastępować stalami AHSS. W związku z tym ważne jest poprawienie własności mechanicznych złączy spawanych z obu grup materiałowych. Stale niestopowe stosowane do budowy konstrukcji nośnych pojazdów mają grubości pozwalające na określenie udarności i wytrzymałości zmęczeniowej jako najważniejsze cechy stanowiącej o jakości spoin. Stale AHSS stosowane są do konstrukcji cienkościennych z których nie da się wykonać próbek udarnościowych, zatem głównym kryterium stanowiącym o jakości spoin jest wytrzymałość zmęczeniowa. Na podstawie literatury i wstępnych badań własnych postawiono tezę:

*Chłodzenie mikrojetowe zastosowane w procesie spawania MAG umożliwi uzyskanie podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz zapewni odpowiednio wysokie pozostałe parametry złącza spawanego stosowanego w budowie konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali niestopowej oraz stali AHSS.*

W celu zferyfikowania tezy postanowiono wykonać próbki złączy spawanych przy zastosowaniu chłodzenia mikrojetowego pod ciśnieniem od 0,3 MPa do 0,7 MPa, przy czym próg czułości wyznaczono na 0,1 MPa. Tak otrzymane próbki zostały poddane badaniom właściwości mechanicznych w różnych temperaturach odpowiadających temperaturom eksploatacji pojazdów. Jako istotne z punktu widzenia eksploatacji pojazdów badania właściwości mechanicznych zostały wytypowane udarność (dla stali niestopowych) oraz wytrzymałość zmęczeniowa dla stali niestopowej oraz stali AHSS. Ponadto przeprowadzono badanie radiograficzne i skaningowe spoin wykonano z obu gatunków stali. Aby otrzymane wyniki mogły być miarodajne, należało je porównać z wartościami obciążeń występującymi w pojazdach.

Wyniki badań przeprowadzonych według powyższych założeń powinny w sposób jednoznaczny pokazać prawdziwość przyjętej tezy, a tym samym możliwość optymalizacji struktury spoiny z użyciem metody chłodzenia z wykorzystaniem przystawki mikrojetowej. Na uwagę zasługuje fakt, że badania zostaną także przeprowadzone w ujemnych jak

powszechnie wiadomo, właściwości plastyczne stalowych złączy spawanych ulegają pogorszeniu.

## 8. Badania zasadnicze

W celu stwierdzenia, czy chłodzenie za pomocą przystawki mikrojetowej pozwala na sterowanie strukturą spoiny, a tym samym na polepszenie właściwości mechanicznych złączy spawanych, konieczne było przeprowadzenie szeregu badań. Ważnym obszarem badań zasadniczych było sprawdzenie udarności spoin otrzymanych nową metodą spawalniczą w różnych temperaturach (-40 °C, 0°C, +20 °C). Ponieważ w trakcie eksploatacji na konstrukcje nośne pojazdów oddziałują obciążenia o charakterze statycznym, dynamicznym oraz zmęczeniowym, konieczne było przeprowadzenie badań pozwalających ustalić wytrzymałość doraźną na rozciąganie (badania wstępne), wytrzymałość zmęczeniową oraz udarność.

Do badań stali niestopowych zastosowano parametry wypracowane w badaniach wstępnych, które są przedstawione w tabelicy 8.1, a także te same warunki geometryczne:

- kąt pochylenia końcówki spawalniczej 60°,
- odległość końcówki spawalniczej od spawanego materiału 15 mm.

Zapewniło to utrzymywanie drutu spawalniczego w okolicach 10 mm od materiału, co optymalizowało długość łuku i zapewniło minimalną ilość odprysków. Zgodnie z wynikami badań wstępnych natężenie prądu spawania ustalono na 140 A. Wartości te są mniejsze niż natężenie krytyczne, co zapewnia owalny kształt przetopu. Prędkość posuwu palnika spawalniczego, wynosiła 300 mm/min. Parametry te przedstawione są w tabelicy 8.1. Powyższe ustawienia posłużyły wykonania próbek z dodatkowym chłodzeniem mikrojetowym.

**Tabl. 8.1. Parametry spawania stali niestopowych**

Parametr	Wartość	Jednostka
Gatunek stali	S355J2G3	-
Drut spawalniczy	G3Si1	-
Średnica drutu spawalniczego	1,2	mm
Prędkość posuwu drutu	0,4	m/s
Gaz osłonowy	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	-
Wydatek gazu osłonowego	17	dm <sup>3</sup> /min
Napięcie łuku spawalniczego	20	V
Natężenie prądu spawania	140	A
Odległość palnika od elementu	15	mm
Prędkość spawania	300	mm/min

Badania stali wysokowytrzymałych AHSS wykonano na próbkach przygotowanych zgodnie z wytycznymi osiągniętymi w badaniach wstępnych i przedstawione są w tablicy 8.2. Ponadto kąt pochylenia końcówki spawalniczej wynosił 60°, natomiast odległość końcówki spawalniczej od spawanego materiału wyniosła 14 mm. Napięcie spawania, dostosowane samoczynnie przez półautomat spawalniczy, kształtuje się w przedziale 18-25 V w zależności od fazy spawania (najwyższe napięcie występuje tuż po zajarzeniu łuku, spawalniczego kiedy odległość między drutem, a materiałem ulega gwałtownej zmianie). Natężenie prądu spawania ustalono na 110 A. Wartości te są mniejsze niż natężenie krytyczne, co zapewnia owalny kształt przetopu. Prędkość posuwu palnika spawalniczego, w stosunku do spawanego materiału, została dobrana w taki sposób, aby zapewnić najlepszą jakość spoiny i wynosiła odpowiednio 300 mm/min. Parametry te przedstawione są w tablicy 8.2. Powyższe ustawienia posłużyły do wykonania próbek z dodatkowych chłodzeniem mikrojetowym.

**Tabl. 8.2. Parametry spawania stali AHSS**

Parametr	Wartość	Jednostka
Gatunek stali	DOCOL 1200 M	-
Drut spawalniczy	Union X90	-
Średnica drutu spawalniczego	1	mm
Prędkość posuwu drutu	0,4	m/s
Gaz osłonowy	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	-
Wydatek gazu osłonowego	15	dm <sup>3</sup> /min
Napięcie łuku spawalniczego	18	V
Natężenie prądu spawania	110	A
Odległość palnika od elementu	14	mm
Prędkość spawania	300	mm/min

### Parametry procesu objęte badaniami

Na podstawie badań wstępnych zdecydowano się wykonać próbki stosując inżektor mikrojetowy o średnicy strugi chłodzącej wynoszącej 60 μm dla stali niestopowych oraz 70 μm dla stali AHSS, a regulację procesu chłodzenia przeprowadzić przez zmianę ciśnienia gazu chłodzącego zgodnie z tablicą 8.3. Należy zauważyć, że proces P<sub>z</sub>1 jest procesem porównawczym, gdzie nie zastosowano dodatkowego chłodzenia mikrojetowego.

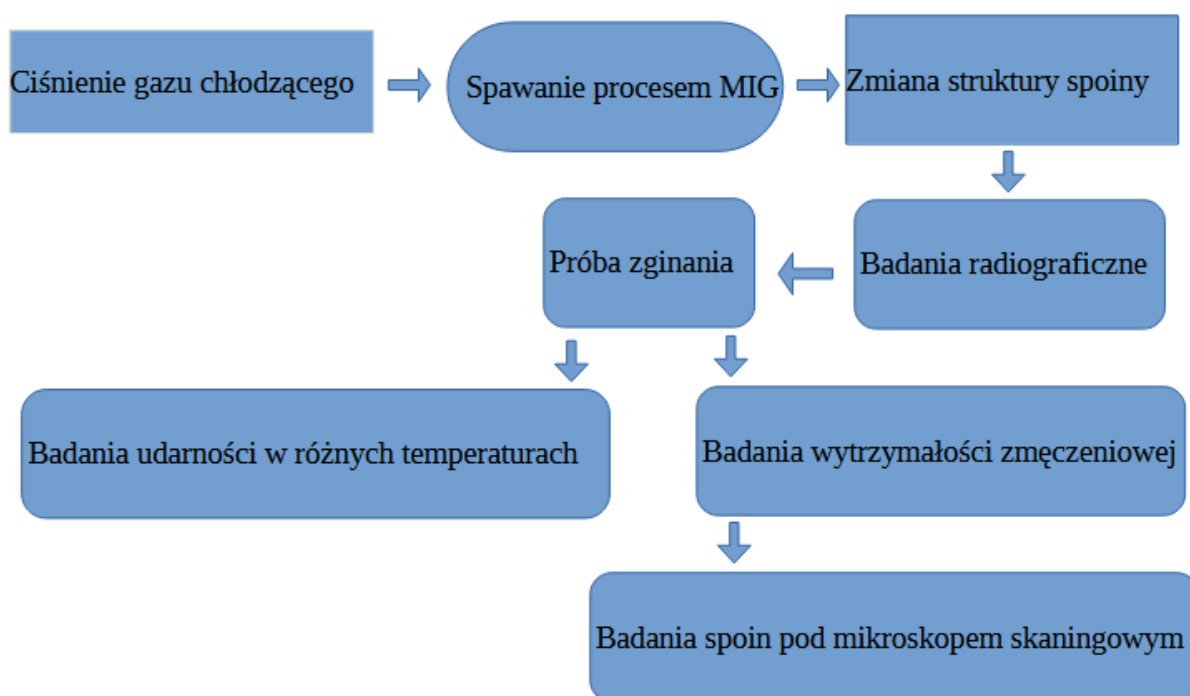
**Tabl. 8.3. Badane ciśnienia gazu chłodzącego w każdym z procesów**

Numer procesu	P <sub>z</sub> 1	P <sub>z</sub> 2	P <sub>z</sub> 3	P <sub>z</sub> 4	P <sub>z</sub> 5	P <sub>z</sub> 6
Ciśnienie gazu chłodzącego [MPa]	0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

### 8.1. Plan badań zasadniczych

Schemat planu badań zasadniczych pokazany jest na rysunku 8.1. Jak można odczytać, poddaną do badania zależnością jest wpływ ciśnienia gazu chłodzącego na właściwości mechaniczne spoiny. Badania pomocnicze mają na celu kontrolę, czy w powstałych spoinach nie powstały wady spawalnicze mogące mieć wpływ na bezpieczeństwo użytkowania

konstrukcji. Ponadto w przypadku stali wysokostopowych, przebadano próbki pod kątem topografii powierzchni i składu próbki.



Rys. 8.1. Schemat badań zasadniczych

Otrzymane w ten sposób próbki poddane zostały próbie udarności KCV, zgodnie z PN-EN 875, przy czym należy zaznaczyć, że badanie to wykonane zostało w trzech zakresach temperaturowych:  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dla każdej kombinacji ciśnienia gazu chłodzącego i temperatury wykonano badania udarności KCV dla 3 próbek.

Następnym krokiem było wykonanie próbek wytrzymałości zmęczeniowej. Badania te wykonano zgodnie z wytycznymi wynikającymi z odpowiednich norm. Badania zmęczeniowe przeprowadzono zgodnie z wytycznymi, a za podstawę zmęczenia przyjęto  $2 \times 10^6$  cykli, co jest zgodne z obowiązującymi standardami [51].

Badania zasadnicze wykonane zostały zgodnie z instrukcjami użytkownika poszczególnych przyrządów oraz odpowiednimi normami regulującymi sposób ich przeprowadzania, co jest przybliżone w podrozdziałach dotyczących poszczególnych badań.

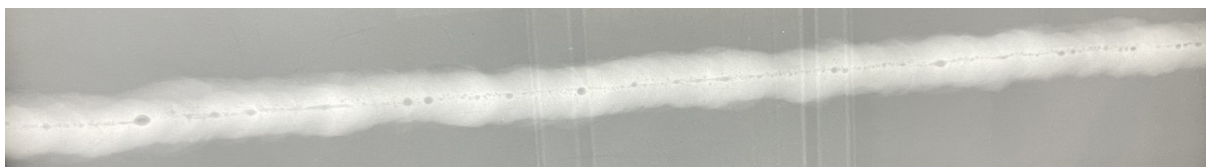
## 8.2. Badania radiograficzne

Celem badań radiograficznych ze względu na ich nieniszczący charakter było sprawdzenie próbek pod kątem niezgodności spawalniczych przed przystąpieniem do dalszych badań. Badania radiograficzne wykonane zostały według normy EN 17636-1 (jakość W18). Sumaryczne wyniki badania dla stali S355J2G3 przedstawiono w tabelicy 8.4. Dla procesów P<sub>z</sub>1-P<sub>z</sub>5 nie wykryto niezgodności spawalniczych, zdjęcia radiograficzne procesu P<sub>z</sub>6 pokazały niezgodności [68].

**Tabl. 8.4. Podsumowanie badań radiograficznych dla stali S355J2G3**

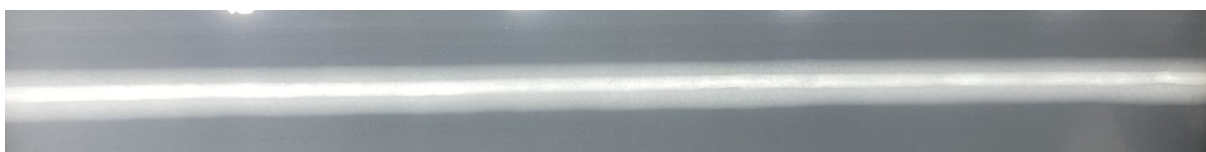
Numer procesu S355J2G3	Niezgodności spawalnicze	Ocena
P <sub>z</sub> 1	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 2	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 3	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 4	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 5	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 6	Pęcherzyki	Negatywna

Rys. 8.2. pokazuje zdjęcie radiograficzne procesu P<sub>z</sub>6. Można zaobserwować pęcherzyki w próbce. W związku z powyższym, ocena próbki jest negatywna. Prawdopodobną przyczyną jest niewłaściwie dobrana odległość między palnikiem spawalniczym, a inżektorem mikrojetowym dla danej intensywności chłodzenia, skutkującą zbyt dużą wymianą ciepła przed pełnym uformowaniem spoiny. Zaznaczyć należy, że opisane niezgodności wystąpiły jedynie przy najwyższym ciśnieniu chłodzenia, wykorzystywanym w tej części badań i nie występują na całej długości spoiny. W związku z powyższym próbki otrzymane w procesie P<sub>z</sub>6 nie wyeliminowano z dalszych badań, ale należy mieć na uwadze, że proces ten wymaga dalszych prac.



**Rys. 8.2. Zdjęcie radiograficzne procesu P<sub>z</sub>6 dla stali S355J2G3**

Pozostałe próbki poddane badaniu nie wykazały niezgodności, przykładowe zdjęcie radiograficzne procesu P<sub>z</sub>4 pokazane jest na rys. 8.3. Warunki spawalnicze procesu P<sub>z</sub>4 wykazały w badaniach wstępnych najkorzystniejsze zmiany w spoinie i SWC.



**Rys. 8.3. Zdjęcie radiograficzne procesu P<sub>z</sub>3 dla stali S355J2G3 – brak wad spawalniczych**

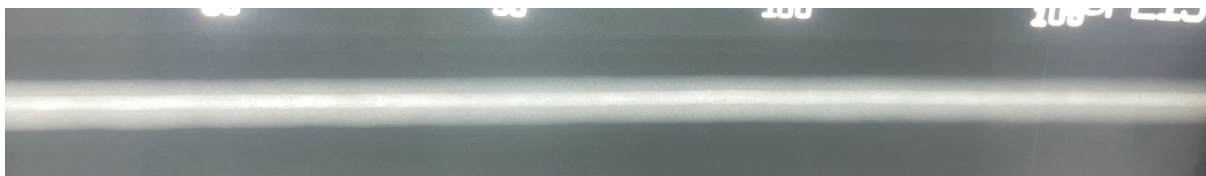
Wyniki badań radiograficznych przeprowadzonych dla stali DOCOL 1200 M zestawione są w tablicy 7.5.

**Tabl. 8.5. Podsumowanie badań radiograficznych dla stali DOCOL 1200 M**

Numer procesu DOCOL 1200 M	Niezgodności spawalnicze	Ocena
P <sub>z</sub> 1	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 2	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 3	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 4	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 5	Brak	Pozytywna
P <sub>z</sub> 6	Brak	Pozytywna

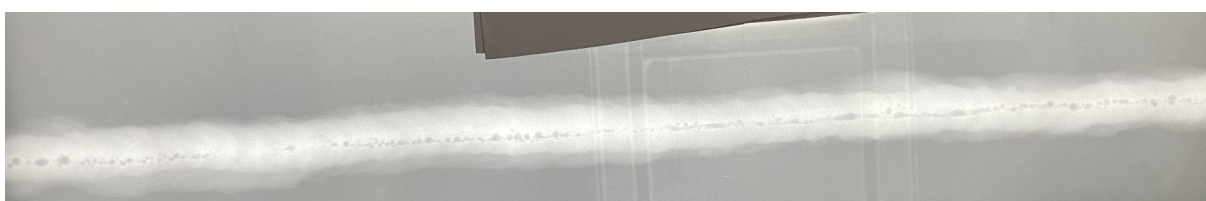
Badania radiograficzne przeprowadzone na próbkach wykonanych ze stali DOCOL 1200 M nie wykazały niezgodności spawalniczych – wszystkie próbki zostały ocenione pozytywnie. Zdjęcie wykonane dla procesu P<sub>z</sub>4 przedstawione jest na rys. 8.4.





Rys. 8.4. Zdjęcie radiograficzne procesu P<sub>2</sub>4 dla stali DOCOL 1200 M

W celu sprawdzenia, czy przy wyższych ciśnieniach medium chłodzącego wada pojawia się również dla stali AHSS przeprowadzono dodatkowo badanie RT dla próbki P<sub>w</sub>8 wykonanej dla stali DOCOL 1200 M. Wyniki badania przedstawia rys. 8.5. Próbka wykazała łańuch pęcherzy, którego wystąpienie prawdopodobnie spowodowane jest zbyt dużą intensywnością chłodzenia.



Rys. 8.5. Widoczny łańuch pęcherzy w próbce P<sub>w</sub>8

### 8.3. Próba zginania

W celu określenia właściwości mechanicznych badanych złączy i sprawdzenia ich podatności do odkształceń plastycznych przeprowadzono próby zginania wykonano zgodnie z EN ISO 5173. Parametry badania podane są w tabelicy 8.6 [67].

Tabl. 8.6. Parametry próby zginania

Parametr	Wartość		Jednostka
	S355J2G3	DOCOL 1200 M	
Szerokość próbki $b$	20	20	mm
Grubość próbki $h$	2	1,8	mm
Średnica trzpienia gnącego	34	34	mm
Rozstaw podpór	40	40	mm
Kąt gięcia	180	180	°

Badanie przeprowadzono dwukrotnie dla grani oraz lica spoiny dla każdej z badanych stali. Zginanie od strony grani oznaczono symbolami G1 i G2, zginanie wykonane od strony

lica oznaczono symbolami L1 i L2. Kąt gięcia dla wszystkich wykonanych próbek wynosił  $\alpha=180^\circ$ . Wyniki badań próbek wykonanych poszczególnymi procesami dla stali S355J2G3 pokazane są w tablicy 8.7.

**Tabl. 8.7. Wyniki próby zginania dla stali S355J2G3 (P wynik pozytywny, N wynik negatywny)**

Numer procesu S355J2G3	G1	G2	L1	L2
P <sub>z1</sub>	P	P	P	P
P <sub>z2</sub>	P	P	P	P
P <sub>z3</sub>	P	P	P	P
P <sub>z4</sub>	P	P	P	P
P <sub>z5</sub>	P	P	P	P
P <sub>z6</sub>	P	N	N	N

Tablica 8.8. pokazuje wyniki próby zginania wykonane poszczególnymi procesami dla stali DOCOL 1200 M.

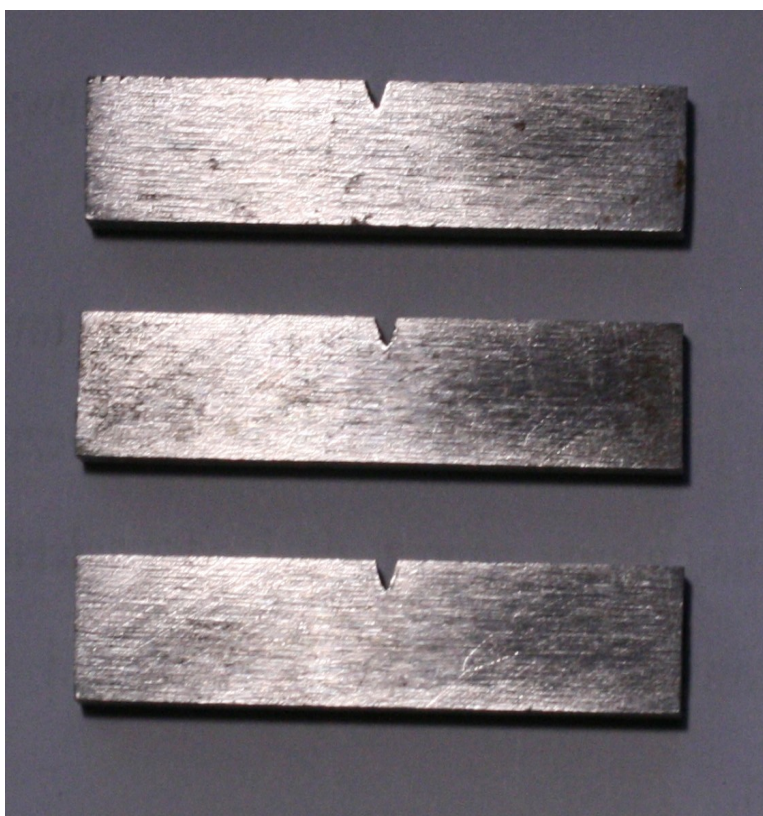
**Tabl. 8.8. Wyniki próby zginania dla stali DOCOL 1200 M (P wynik pozytywny, N wynik negatywny)**

Numer procesu DOCOL 1200 M	G1	G2	L1	L2
P <sub>z1</sub>	P	N	P	N
P <sub>z2</sub>	P	P	P	P
P <sub>z3</sub>	P	P	P	P
P <sub>z4</sub>	P	P	P	P
P <sub>z5</sub>	P	P	P	P
P <sub>z6</sub>	P	P	P	P

Jak można zauważyć, przy wykorzystaniu maksymalnego badanego ciśnienia gazu chłodzącego w przypadku stali S355J2G3 zaobserwowane zostały pęknięcia, zarówno w próbie gięcia wykonanej od strony lica jak i grani. Pęknięcia mogą być spowodowane zbyt szybkim odbiorem ciepła ze spoiny, dokładniejsze przyczyny ich powstania wymagają dalszych badań. W przypadku stali DOCOL 1200 M pęknięcia wystąpiły dla próbki kontrolnej P<sub>z1</sub>, natomiast wszystkie procesy wykorzystujące chłodzenie mikrojetowe nie wykazały rys i naderwań, co wskazuje na lepsze właściwości plastyczne uzyskane dzięki zastosowanemu chłodzeniu.

#### 8.4. Udarność

Aby mieć pełen pogląd dotyczący wpływu chłodzenia miko-jetowego w spoinie na właściwości plastyczne, zdecydowano się na wykonanie badań udarności w różnych temperaturach. Badania udarności przeprowadzono tylko dla stali S355J2G3, gdyż próbki ze stali DOCOL 1200 M miały grubość 1,8 mm co nie pozwala na przeprowadzenie testu udarności. Próby wykonane zostały zgodnie z zaleceniami znajdującymi się w normach PN-EN 79 H-04371 oraz PN EN ISO 148-1:2010 określającymi badania udarności oraz badania udarności w niskich temperaturach. Dla każdego procesu zbadano trzy próbki przygotowane zgodnie z rys. 8.6 [71].



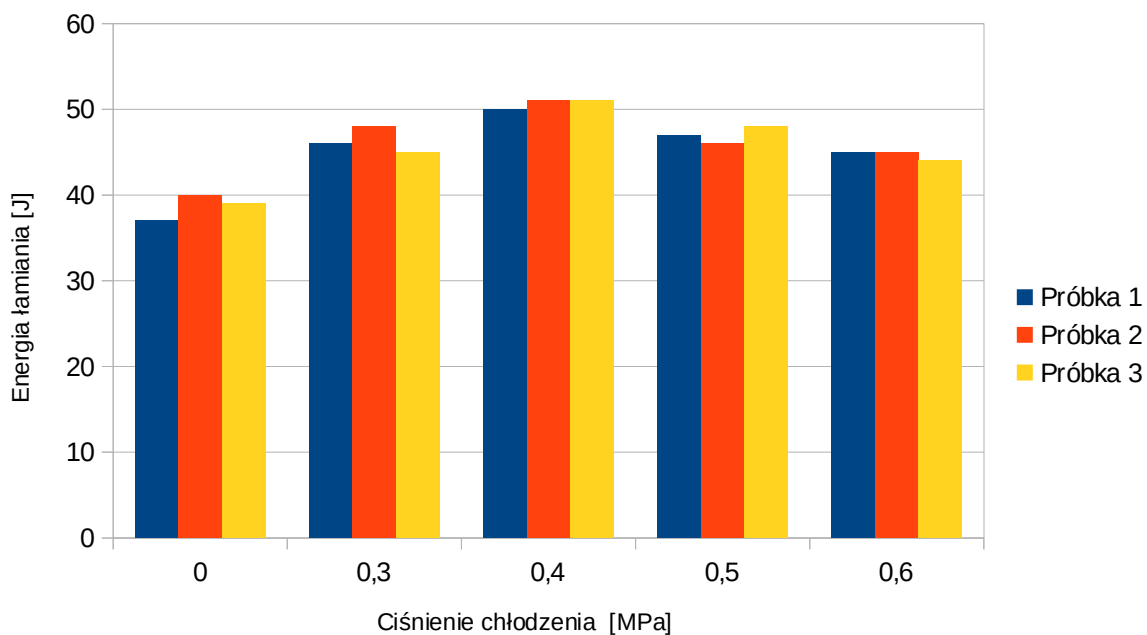
Rys. 8.6. Sposób przygotowania próbek do badań udarności

W tablicach 8.9-8.11 przedstawione zebrane zostały wyniki badań udarnościowych dla poszczególnych temperatur. Jak można zauważyć, najbardziej korzystny wpływ stosowania chłodzenia mikrojetowego podczas procesu spawalniczego występuje w ujemnych temperaturach. Fakt ten jest potwierdzeniem wyników uzyskanych podczas badań wstępnych.

**Tabl. 8.9. Udarność w temperaturze -40° C**

Numer procesu	Udarność w temperaturze -40° C [J]			
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>z</sub> 1	37	40	39	38,7
P <sub>z</sub> 2	46	48	45	46,3
P <sub>z</sub> 3	50	51	51	50,7
P <sub>z</sub> 4	47	46	48	47,0
P <sub>z</sub> 5	45	45	44	44,7

W przypadku badań udarności w temperaturze -40° C na szczególną uwagę zasługuje fakt znaczącego zwiększenia udarności dla próbek, do wykonania których zastosowano dodatkowe chłodzenie mikrojetowe. Bardzo dobrze widoczne jest to na wykresie rys.8.7. Wzrost udarności w ujemnych temperaturach dla najlepszego otrzymanego wyniku (ciśnienie gazu 0,4 MPa) w stosunku do próbki kontrolnej wynosi 31%. Uzyskano wartość udarności powyżej 47 J (w temp. -40° C) co świadczy o doskonałych własnościach plastycznych na poziomie 4 klasy udarności.



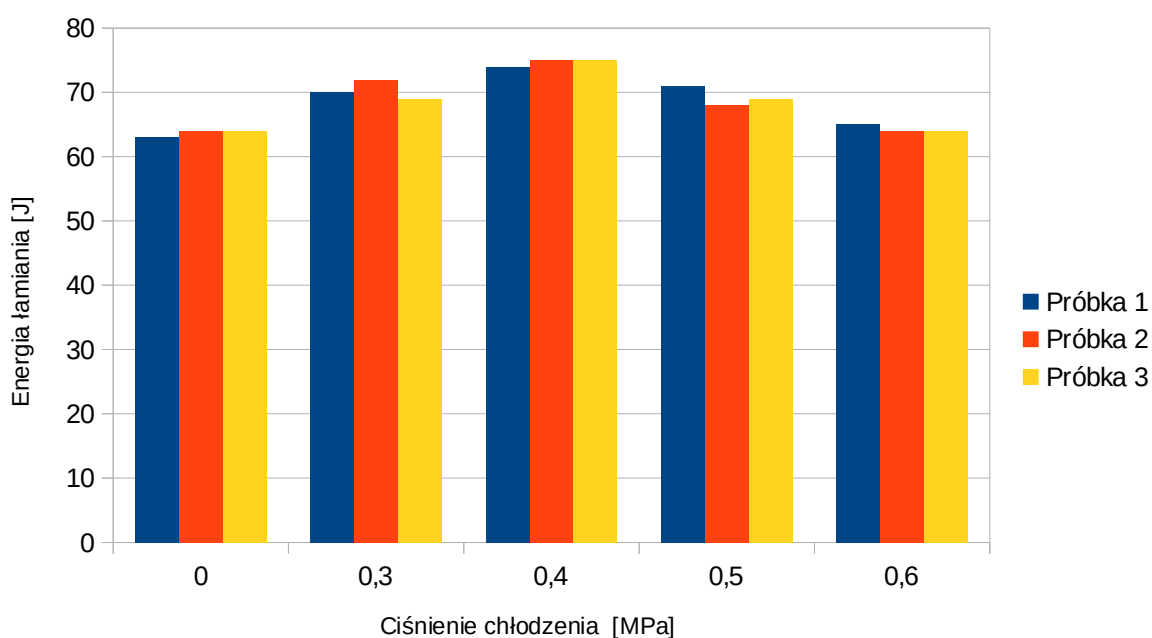
**Rys. 8.7. Wykres zależności udarności od ciśnienia gazu chłodzącego dla badania wykonanego w temp. -40° C**

Rysunek 8.8 pokazuje wykres zmian udarności, w zależności od wykorzystanego ciśnienia, dla badań wykonanych w temperaturze 0° C. Wykres powstał na podstawie wyników znajdujących się w tabelicy 8.10.

**Tabl. 8.10. Udarność w temperaturze 0° C**

Numer procesu	Udarność w temperaturze 0° C [J]			
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>z</sub> 1	63	64	64	63,7
P <sub>z</sub> 2	70	72	69	70,3
P <sub>z</sub> 3	74	75	75	74,7
P <sub>z</sub> 4	71	68	69	69,3
P <sub>z</sub> 5	65	64	64	64,3

Podobnie jak w przypadku badania przy temperaturze  $-40^{\circ}\text{C}$ , największy wzrost udarności odnotowano dla ciśnienia chłodzącego wynoszącego  $0,4\text{ MPa}$ , natomiast zmiana procentowa nie jest w tym przypadku aż taka duża i wynosi ok. 17%. Na uwagę zasługuje także fakt, że przy wyższych ciśnieniach chłodzenia, udarność otrzymanej próbki w stosunku do próbki kontrolnej jest niższa. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być zwiększona zawartość fazy MAC (martenzyt, austenit szczytkowy, węgliki) w strukturze spoiny. Wszystkie z wymaganych próbek posiadały udarność powyżej wymaganego progu  $47\text{ J}$ .



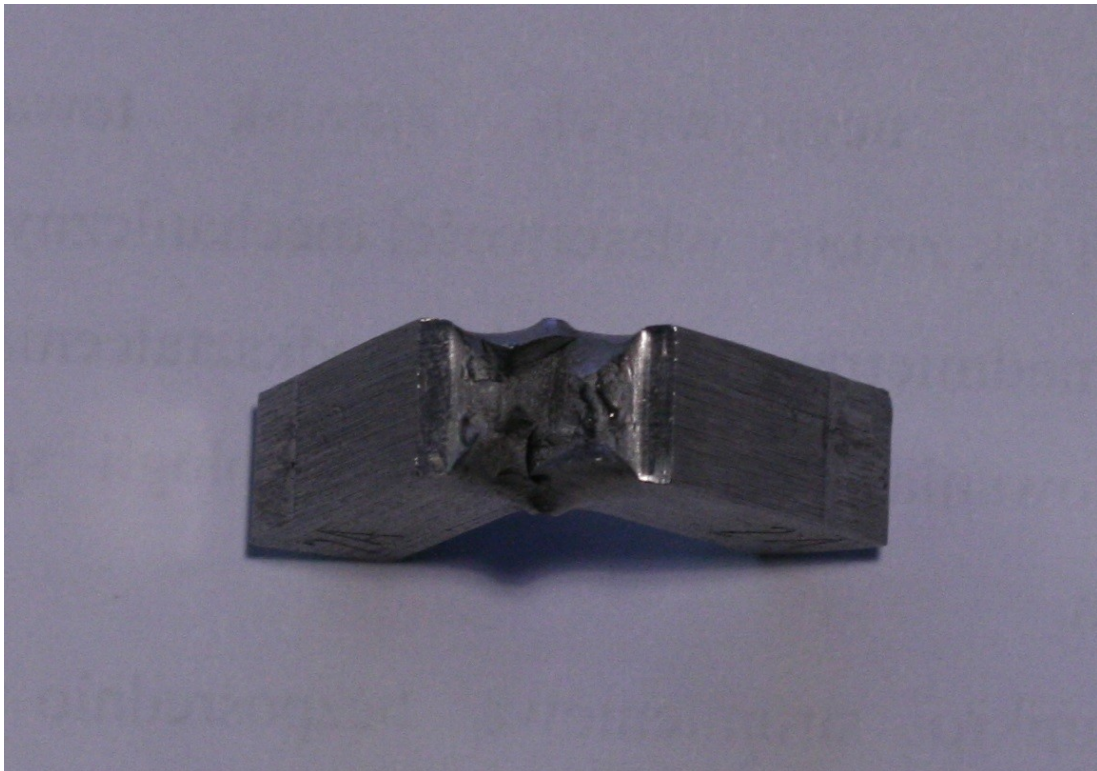
**Rys. 8.8.** Wykres zależności udarności od ciśnienia gazu chłodzącego dla badania wykonanego w temp.  $0^{\circ}\text{C}$

Ostatnia przeprowadzona próba udarności odbywała się w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ . W tym przypadku poprawa udarności jest minimalna i wynosi 2,9%. Wyniki pomiarów przedstawione są w tabelicy 8.11.

**Tabl. 8.11. Udarność w temperaturze 20° C**

Numer procesu	Udarność w temperaturze 20° C [J]			
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>z</sub> 1	184	184	184	184,0
P <sub>z</sub> 2	186	186	187	186,3
P <sub>z</sub> 3	189	189	190	189,3
P <sub>z</sub> 4	185	184	185	184,7
P <sub>z</sub> 5	185	185	185	185,0

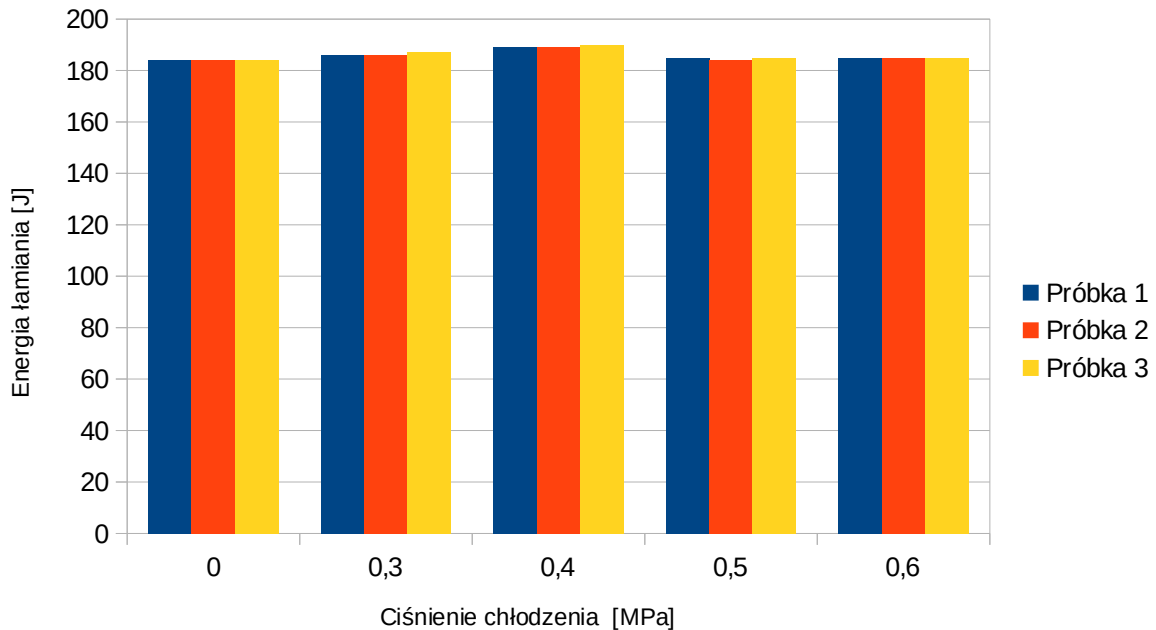
Rys. 8.9 pokazuje próbkę procesu P<sub>z</sub>3, o dobrych właściwościach plastycznych.



**Rys. 8.9. Próbka dla procesu P<sub>z</sub>3**

Rysunek 8.10 ukazuje wykres zmian udarności w zależności od ciśnienia gazu chłodzącego. Jak można zauważyć, pomimo praktycznie niezauważalnego wzrostu udarności

spowodowanej użyciem dodatkowego chłodzenia mikrojetowego, rozkład punktów jest podobny jak w dwóch pierwszych przypadkach.



**Rys. 8.10. Wykres zależności udarności od ciśnienia gazu chłodzącego dla badania wykonanego w temp. 0° C**

Istotną różnicą w rozmieszczeniu wyników jest fakt, że próbka otrzymana przy zastosowaniu najwyższego ciśnienia osiągnęła niższą udarność niż próbka kontrolna. Podobnie jak w przypadku badania w temperaturze 0° C może to być przyczyną zwiększenia fazy MAC w spoinie. Należy także zaznaczyć, że w przypadku procesu wykorzystującego ciśnienie gazu chłodzącego na poziomie 0,7 MPa odchylenie standardowe otrzymanych wyników było dwukrotnie większe niż w pozostałych przypadkach i wynosiło 1,5 J.

Analiza otrzymanych wyników badań udarności pokazuje, że największa poprawa tego parametru ma miejsce w przypadku zastosowania gazu chłodzącego pod ciśnieniem 0,4 MPa, niezależnie od temperatury wykonania badania. Istotnym faktem jest znaczący wzrost udarności w niskich temperaturach, który wynosi odpowiednio 31% (12 J) dla temperatury -40° C oraz 17% (11 J) dla temperatury 0° C. W przypadku badania udarności w temperaturze dodatniej, zmiany są zdecydowanie mniej zauważalne i sięgają niecałych 3 %, co przekłada się na 5 J. Należy także zauważyć, że wykorzystanie zbyt wysokiego ciśnienia gazu chłodzącego w (procesy P<sub>z</sub>5) doprowadziło do zrównania, bądź obniżenia udarności próbki



w stosunku do próbki kontrolnej. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest rozrost niekorzystnej fazy MAC (martenzyt, austenit szczytkowy, węgliki).

Następnie przeprowadzono badania dla próbki kontrolnej (wykonanej bez chłodzenia mikrojetowego), próbki ze średnią procentową zawartością ferrytu AF (ok. 62 %) oraz próbki, w której badania metalograficzne wykryły największą procentową zawartość ferrytu AF, co w praktyce oznaczało próbki wykonane podczas procesu P<sub>z1</sub>, P<sub>z3</sub> oraz P<sub>z5</sub>. Tablica 8.12 zawiera wyniki pomiaru dla temperatury dodatniej, natomiast tablica 8.13 dla badania w niskiej temperaturze.

**Tabl. 8.12. Udarność złączy w temperaturze nominalnej**

Numer procesu	Zawartość ferrytu AF [%]	Udarność +20° C [J]			
		Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>z1</sub>	56	184	184	184	184,0
P <sub>z3</sub>	72,3	187	190	187	188,0
P <sub>z5</sub>	62,7	185	186	184	185,0

**Tabl. 8.13. Udarność złączy w niskiej temperaturze**

Numer procesu	Zawartość ferrytu AF [%]	Udarność -40° C [J]			
		Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Średnia
P <sub>z1</sub>	56	39	40	39	9,3
P <sub>z3</sub>	72,3	46	48	48	47,3
P <sub>z5</sub>	62,7	45	44	45	44,7

Powyższe tabele pokazują, że zwiększona zawartość ferrytu AF w spoinie wpływa korzystnie na udarność złącza. Należy zauważyć, że wraz ze spadkiem temperatury wykonania badania korzystny wpływ drobnoziarnistego ferrytu AF nasila się, co jest bardzo pozytywnym zjawiskiem z punktu widzenia eksploatacji pojazdu naprawianego badanymi metodami.

## 8.5. Wytrzymałość zmęczeniowa

Bardzo ważnym, z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji pojazdów, parametrem złączy spawanych jest granica zmęczenia. Wyznaczenie wartości granicy zmęczenia spoin otrzymanych w rozpatrywanej technologii łączenia wykonano na elektrodynamicznej maszynie wytrzymałościowej Instron Electropius E10000. Umożliwia

ona ustalenie sztywności próbki, w celu przeprowadzenia kalibracji maszyny wytrzymałościowej. W badaniu wykorzystano próbkę klepsydryczną. Jej charakterystyczną cechą geometryczną jest promieniowa baza pomiarowa, dająca w rezultacie w jej środku najmniejszy przekrój poprzeczny. Jest to miejsce o największej wartości naprężenia w próbie zmęczeniowej. Dlatego tę strefę wykorzystano jako obszar dla spoiny. Jako podstawę wystąpienia granicy zmęczenia dla połączeń spawanych przyjęto  $2 \times 10^6$  cykli [79].

W próbie zmęczeniowej określono wartość granicy zmęczenia badanych złączy stali S355J2G3. Posłużono się minimalną wartością naprężenia, przy którym uzyskano wyżej wymienioną wartość liczby cykli bez pęknięć lub rozdzielenia próbki wytrzymałościowej. Wszystkie wykorzystane w próbie zmęczeniowej wartości naprężenia przedstawione są w tab. 8.14.

**Tabl. 8.14. Wartości naprężeń w badaniu zmęczeniowym dla stali S355J2G3**

Wartości maksymalne naprężenia cykli rozciągających [MPa] S355J2G3					
295	330	400	450	500	550

Przy zachowaniu powyższych założeń dla złączy wykonanych dla stali DOCOL 1200 M wykorzystane wartości naprężeń przedstawione są w tablicy 8.15.

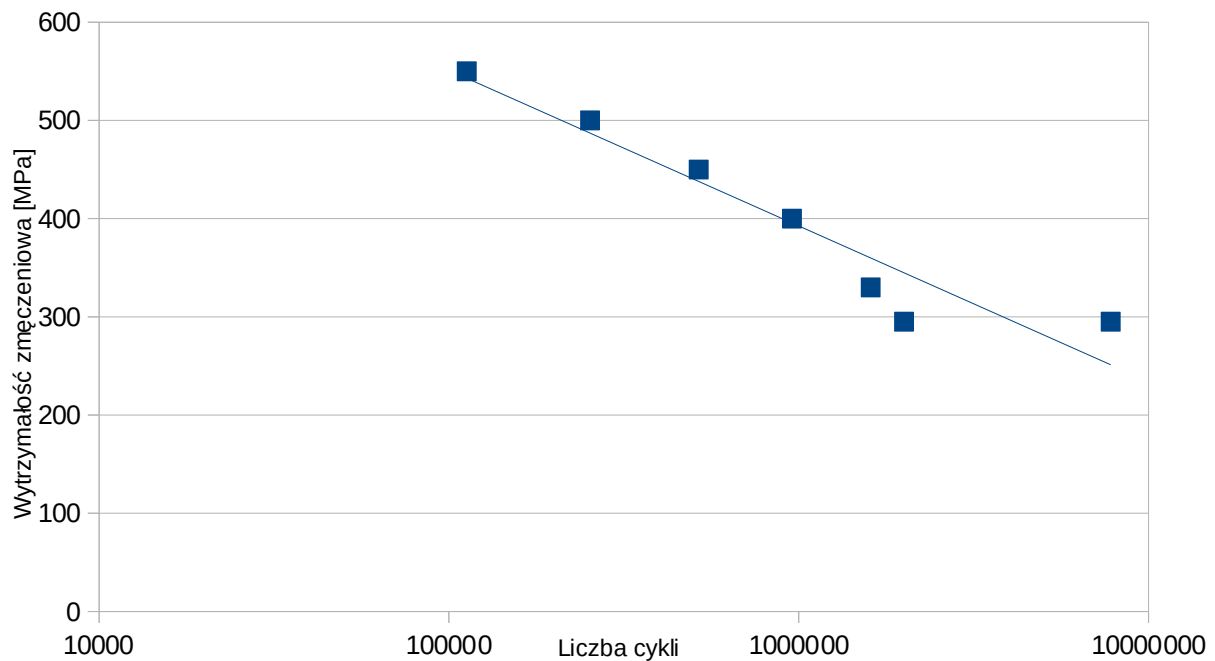
**Tabl. 8.15. Wartości naprężeń w badaniu zmęczeniowym dla stali DOCOL 1200 M**

Wartości maksymalne naprężenia cykli rozciągających [MPa] DOCOL 1200 M					
530	570	600	650	700	750

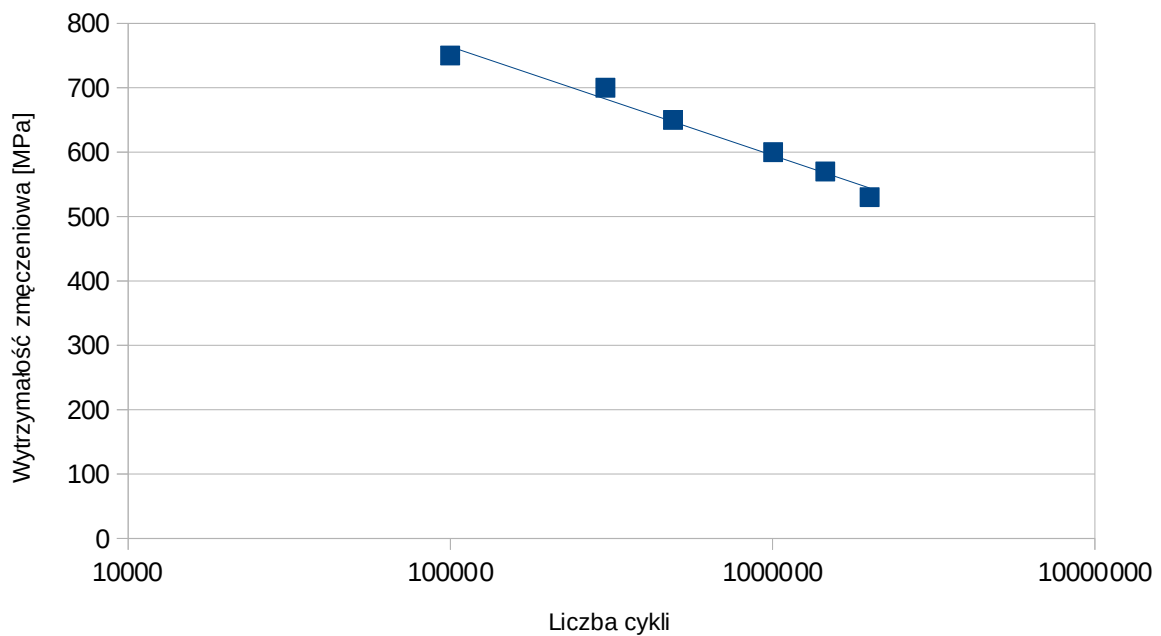
Badania zmęczeniowe przeprowadzono jedynie dla złączy spawanych z procesu spajania (P<sub>z3</sub>) przy którym uzyskano najlepsze rezultaty w próbie udarności. Ze względu na rozmieszczenie wyników badań wzdłuż linii prostej, wskazujące na oczekiwany, poprawny trend dla rezultatów próby zmęczeniowej zrezygnowano z powtórzeń dla wykorzystanych poziomów naprężenia, rys. 8.11 (S355J2G3) i 8.12 (DOCOL 1200M).

W rezultacie wskazano 295 MPa jako wartość granicy zmęczenia przy odzerowotętniacym rozciąganiu stali S355J2G3 i 530 MPa - jako odpowiednik dla stali DOCOL 1200M. Uzyskane wyniki badań posłużyły nie tylko do oszacowania wartości granicy zmęczenia lecz również określania linii ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (wykorzystano metodę regresji liniowej:  $R^2 = 0,952$  (S355J2G3) i  $R^2 = 0,908$  (DOCOL

120M)). Otrzymane wyniki zostały przedstawione w formie wykresu Wöhlera z wykorzystaniem skali logarytmicznej dla osi odciętych.



Rys. 8.11. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla złącza wykonanego procesem P<sub>z</sub>3 dla stali S355J2G3



Rys. 8.12. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla złącza wykonanego procesem P<sub>z</sub>3 dla stali DOCOL 1200 M

Po obróbce statystycznej wyprowadzono równania krzywej regresji, co pozwoliło na wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej. Dane te przedstawione są w tabelicy 8.16.

**Tabl. 8.16. Wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej**

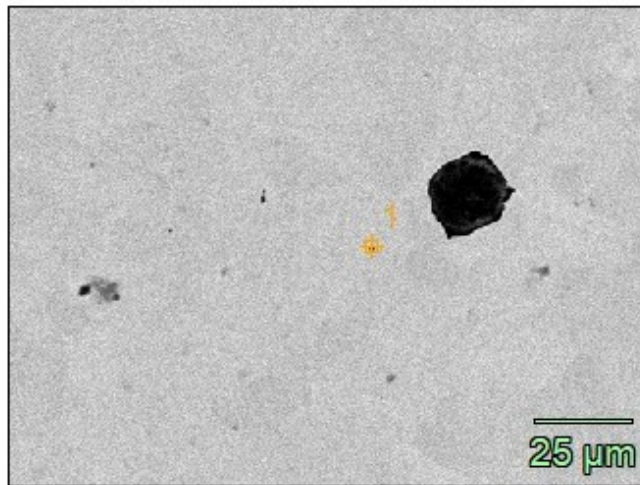
Badana stal	Równanie krzywej regresji	Wytrzymałość zmęczeniowa [MPa]
S355J2G3	$\sigma = -85,56 \ln(n) + 1559,7$	295
DOCOL 1200 M	$\sigma = -73,25 \ln(n) + 1607,1$	530

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość stosowania w praktyce inżynierskiej współczynnika 0,55 dla obliczeń szacunkowej granicy wytrzymałościowej złączy wykonanych z obu badanych gatunków stali.

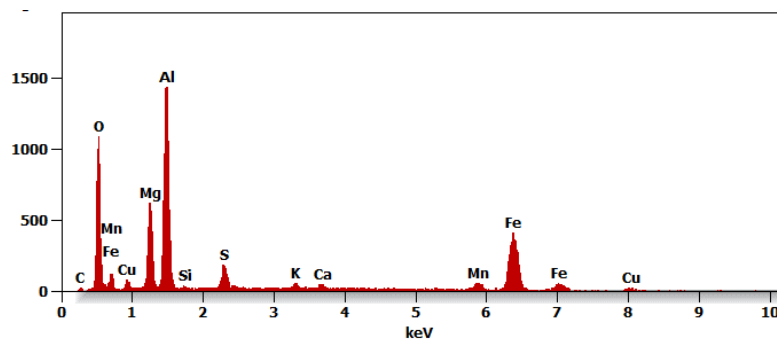
## 8.6. Badania spoin pod mikroskopem skaningowym

Badania w skaningowym mikroskopie elektronowym mikrostruktury spoin obu badanych gatunków stali (S355J2G3 oraz DOCOL 1200 M) miały na celu identyfikację wtrąceń niemetalicznych pod kątem ich wielkości w zależności od zastosowanego procesu spawania (bez zastosowania chłodzenia mikrojetowego lub z zastosowaniem chłodzenia mikrojetowego). Postać wtrąceń niemetalicznych (zwłaszcza ich kształt i charakter) ma wpływ na własności mechaniczne spawanego złącza. Obserwacje strukturalne wykonano przy użyciu wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego Zeiss Supra 35 o napięciu przyspieszającym 20 kV i zakresie powiększeń 500× - 7500×. W badaniach wykorzystano detektor elektronów wtórny SE oraz detektor elektronów wstecznie rozproszonych BSE. Analizy składu chemicznego w mikroobszarach wykonano przy użyciu detektora EDX (Thermo Scientific™) z oprogramowaniem Pathfinder.

W złączy wykonanym w stali niestopowej S355J2G3 bez chłodzenia mikrojetowego stwierdzono występowanie w spoinie wielu wtrąceń niemetalicznych o rozmiarze przekraczającym nawet 20 μm. Przykład dużych wtrąceń przedstawiono na rys. 8.13. i 8.14



Rys. 8.13. Wtrącenie niemetaliczne w spoinie stali S355J2G3, zgląd nietrawiony, SEM

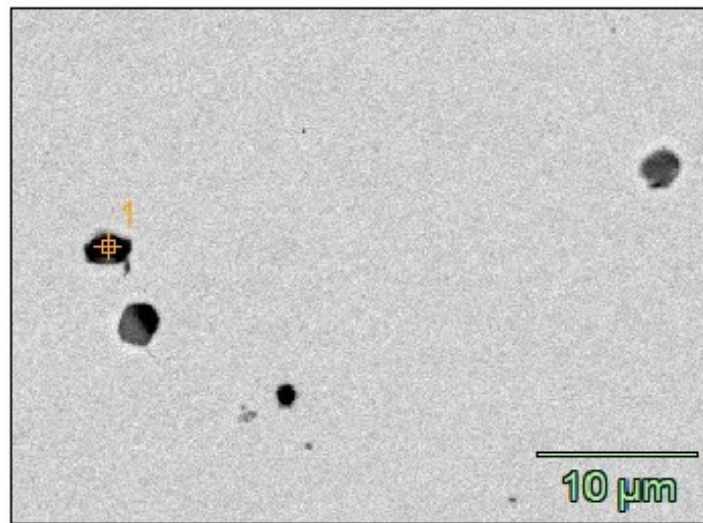


Rys. 8.14. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego dla stali S355J2G3 z obszaru jak na rysunku 8.10

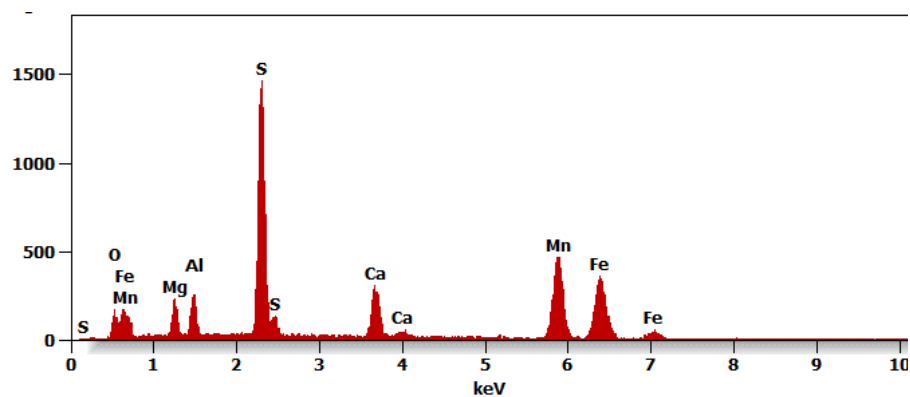
Wtrącenia niemetaliczne tak dużych rozmiarów są niekorzystne dla złączy spawanych ze względu na możliwość inicjowania pęknięć w warunkach eksploatacyjnych, a ponadto mogą sprzyjać powstawaniu pęknięć zwłoczných. Złącze wykonane z chłodzeniem mikrojet charakteryzuje się wyraźne mniejszym rozmiarem wtrąceń niemetalicznych. Jest to korzystne z dwóch powodów:

- ograniczone jest ryzyko wystąpienia pęknięć w złączu,
- oraz zgodnie z mechanizmami opisanymi w [239] inicjuje zarodkowanie ferrytu drobnoziarnistego AF wewnątrz ziarna byłego austenitu.

Typowy charakter wtrąceń niemetalicznych uzyskanych podczas spawania stali niestopowej z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego przedstawiono na rys. 8.15 i 8.16



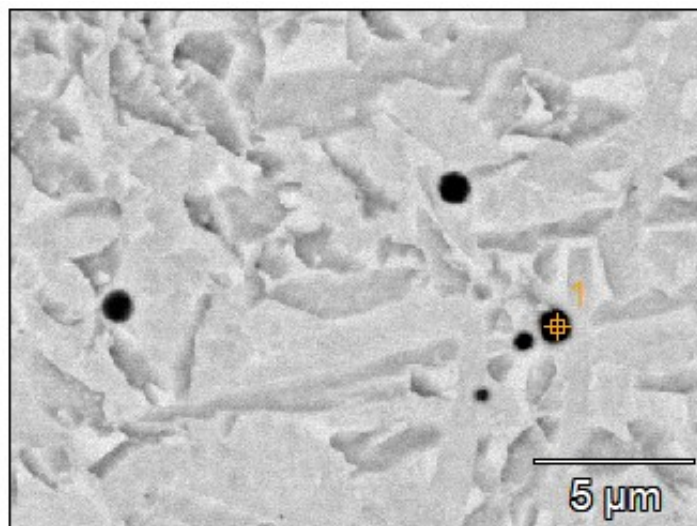
Rys. 8.15. Wtrącenia niemetaliczne uzyskane podczas spawania stali niestopowych z chłodzeniem mikrojetowego, SEM



Rys. 8.16. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego dla stali niestopowej z obszaru jak na rysunku 7.12

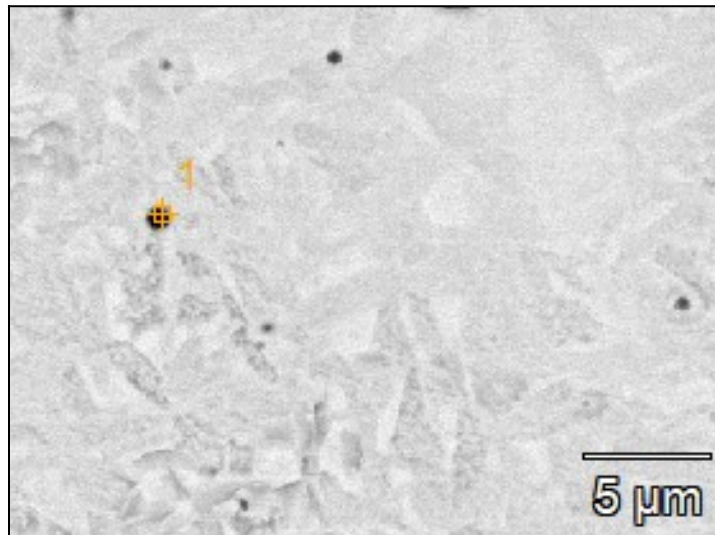
Do istotnych wtrąceń niemetalicznych wpływających na własności stali można zaliczyć tlenki manganu i glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MnAl}_2\text{O}_4$ ) oraz siarczki manganu  $\text{MnS}$ . Najważniejsze z nich i najbardziej pożądanym jest tlenkowe wtrącenie ceramiczne zwane galaksymem ( $\text{MnAl}_2\text{O}_4$ ), które posiada identyczny parametr sieciowy jak ferryt, zatem ułatwia przemianę austenitu w wewnątrz-ziarnowy drobnoziarnisty ferryt AF (acicular ferrite). Wysoka zawartość ferrytu AF w spoinie przekłada się na wysoką udatność złącza w niskiej temperaturze.

W złączy spawanym wykonanym ze stali DOCOL 1200 M występują wtrącenia niemetaliczne innego typu. Rys. 8.17. przedstawia obraz spoiny wykonanej w procesie P<sub>z</sub>1 (próbka kontrolna, brak chłodzenia mikrojetowego). W badaniach zaobserwowano wtrącenia niemetaliczne mające negatywny wpływ na wytrzymałość złącza – mogą np. inicjować pęknięcia w kontakcie z pozostałymi fazami (głównie z martenzytem i gruboziarnistym ferrytem).

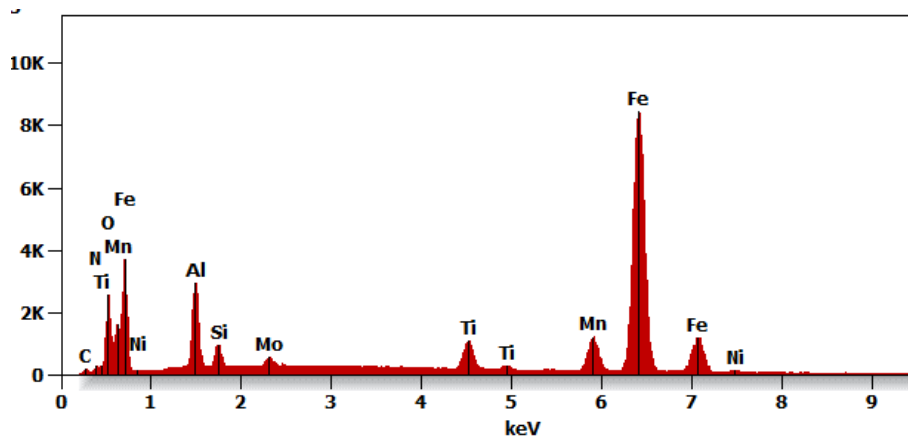


Rys. 8.17. Struktura spoiny wykonanej w procesie P<sub>z</sub>1 (brak chłodzenia mikrojetowego), SEM

Na rys. 8.18. przedstawiono strukturę spoiny wykonanej w procesie P<sub>z3</sub>. Zaobserwowano występowanie wyraźnie drobniejszych wtrąceń niemetalicznych, mających wpływ na wzrost własności wytrzymałościowych złącza (rys. 8.19).



Rys. 8.18. Struktura spoiny wykonanej w procesie P<sub>z3</sub> (ciśnienie 0,5 MPa, średnica dyszy 70 μm), SEM



Rys. 8.19. Widmo energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego dla stali DOCOL 1200 M z obszaru jak na rysunku 8.15

W mikroanalizie składu chemicznego EDS cząstek zaobserwowanych w strukturze złącza stwierdzono występowanie takich pierwiastków jak: C, N, O, Al., Si, Mo, Ti, Mn, Fe, Ni, tworzących prawdopodobnie azotki, węgliki i tlenki tytanu (TiN, TiC, TiO), glinu (AlN) i związki manganu (np. MnO). Najkorzystniejsze dla wzrostu własności wytrzymałościowych umacniających spoinę są azotki TiN i AlN oraz węgliki TiC. Istotne jest, by cząstki te nie



wykazywały dużych rozmiarów (kilkanaście, kilkadziesiąt mikrometrów), bo mogą powodować np. pęknięcia spawalnicze. Zatem chłodzenie mikrojetowe wprowadzone do procesu spawalniczego uzyskane struktury charakteryzującej się korzystniejszymi wtrąceniami niemetalicznymi w stosunku do złącza uzyskanego w procesie klasycznym MAG (bez stosowania chłodzenia mikrojetowego). Struktura ta przekłada się na lepsze własności mechaniczne złącza spawanego.

## 9. Podsumowanie

W pracy podjęto próbę opracowania nowej technologii spawalniczej, mającej na celu poprawienie właściwości użytkowych złączy spawanych, zarówno dla stali niestopowych, tradycyjnie wykorzystywanych jako materiał na konstrukcje nośne pojazdów jak i nowoczesnych stali wysokostopowych AHSS. Jako przedstawiciela pierwszej z tych grup wytypowano powszechną w użyciu stal S355J2G3, co przekłada się na możliwość wdrożenia wyników pracy do praktyki zakładowej. Martenzytyczne stale wysokostopowe reprezentuje stal DOCOL 1200 M uznawana za trudnospawalną. Możliwość jej zastosowania przy konstrukcji nośnych pojazdów pozwoli na zmniejszenie ich masy przy jednoczesnym zachowaniu wszelkich parametrów konstrukcji.

W celu wykonania badań przygotowano stanowisko spawalnicze, którego głównym elementem jest zautomatyzowany stół spawalniczy przystosowany do spawania metodami MIG/MAG. Ma to na celu eliminację błędów ludzkich i zapewnienie powtarzalności wyników. Stół przystosowano do spawania wraz z instalacją odpowiedzialną za chłodzenie mikrojetowe, w której skład wchodzi między innymi inżektor, przewody ciśnieniowe i Podczas prób wstępnych rozwiązano także problemy techniczne i dostosowano instalację chłodzenia do warunków warsztatowych.

Do badań wstępnych parametry początkowe procesu określono na podstawie technologii wykorzystywanych w praktyce warsztatowej, a następnie wykonano próbki z wykorzystaniem różnych prądów oraz prędkości spawania oraz różnych parametrów chłodzenia z uwzględnieniem zarówno zmian ciśnienia, jak i średnicy inżektora mikrojetowego.

Aby określić prawidłowość otrzymanych próbek wykonano badania nieniszczące VT i MT. Pozwoliło to na wybór najlepszych parametrów procesu spawalniczego. Z otrzymanych próbek wykonano zgłady, na których przeprowadzone zostały badania metalograficzne oraz wytrzymałościowe. Na podstawie wyników powyższych badań określono parametry procesu do badań zasadniczych.

Badania zasadnicze miały na celu zoptymalizowanie ciśnienia stosowanego w instalacji chłodzenia mikrojetowego przy wartościach skrajnych, określonych podczas badań wstępnych. Aby wykluczyć występowanie wad spawalniczych, mogących wpłynąć na wyniki, wykonano badania radiograficzne spoin. Otrzymane próbki poddano badaniom wytrzymałości zmęczeniowej i udarności (dla stali niestopowych), a także, badaniom na mikroskopie skaningowym, w celu określenia wielkości i składu chemicznego wtrąceń niemetalicznych.

Wyniki badań zasadniczych potwierdzają zasadność stosowania chłodzenia mikrojetowego, zarówno podczas spawalniczych napraw pojazdów wykonanych z tradycyjnych stali niestopowych, jak i podczas łączenia elementów nośnych pojazdów wykonanych ze stali wysokostopowych AHSS. Najważniejszym aspektem, w przypadku stali niestopowych, jest znaczące zwiększenie udarności w niskich temperaturach wynoszące aż 31% (dla procesu P<sub>23</sub>) w stosunku do złączy wykonanych bez chłodzenia. Należy podkreślić, że zmiana taka została osiągnięta bez negatywnego wpływu na inne właściwości spoiny, takie jak wytrzymałość zmęczeniowa, twardość czy wytrzymałość na rozciąganie.

Badania radiograficzne wykluczyły stosowanie najwyższych ciśnień gazu chłodzącego w postaci Ar +10% CO<sub>2</sub> ze względu na pojawienie się pęcherzyków w spoinie. Zaznaczyć należy jednak, że wykryta wada nie występowała na całej długości wykonanego złącza, a z powstałego materiału udało się przygotować próbki do dalszych badań. Żadna z przebadanych próbek wykonanych przy ciśnieniu gazu chłodzącego do 0,6 MPa nie wykazała nieprawidłowości.

Rezultat badań udarności pokazuje wyraźnie pozytywny wpływ chłodzenia na właściwości spoiny szczególnie w niskich temperaturach. Wzrost udarności przy temperaturze -40° C wyniósł 31%, a w pozostałych badanych temperaturach (0° C i 20° C) odnotowano nieznaczną poprawę.

Zastosowanie procesu chłodzenia mikrojetowego pozwoliło także na poprawę wytrzymałości zmęczeniowej złączy. Ma to szczególne znaczenie przy stalach AHSS, które są uznawane za trudnospawalne. Otrzymane wyniki potwierdzają, że można przyjąć współczynnik obliczeniowy złączy spawanych dla stali DOCOL 1200 M na poziomie 0,55, co jest zgodne z praktyką inżynierską.

Badania skaningowe wykazały zmniejszenie niekorzystnych wtrąceń niemetalicznych (głównie azotków i węglików tytanu), co tłumaczy polepszenie właściwości plastycznych otrzymanych złączy.

Aby zapewnić najlepsze parametry napraw spawalniczych konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali niestopowych z zastosowaniem chłodzenia mikrojetowego należy wykorzystać parametry przedstawione w tabelicy 8.1.

Dla otrzymania najlepszych właściwości złączy spawanych stali DOCOL 1200 M należy posłużyć się technologią spawalniczą opisaną w tabelicy 8.2. Opisanie parametry pozwalają na minimalizowanie negatywnych zjawisk towarzyszących procesom spawalniczym takim jak nadmierne naprężenia czy niekorzystne zmiany struktury spoiny. Zaproponowana technologia z chłodzeniem mikrostrugą medium chłodzącego pozwoli na poszerzenie stosowalności stali z rodziny AHSS w branży automotive.

Uzyskane rezultaty badań laboratoryjnych są zadowalające i dają podstawy do wystąpienia do jednostki notyfikującej o uznanie technologii spawania WPQR (*Welding Procedure Qualification Record*) zgodnej z wymaganiami normy EN-ISO 15613 w celu wdrożenia nowo opracowanych procesów do warunków warsztatowych.

Wyniki badań potwierdzają możliwość uzyskania prawidłowych złączy spawalniczych dla stali DOCOL 1200 M, jest to jednak proces wymagający szczególnej uwagi ze względu na utrudnienia takie jak powstawanie wtrąceń niemetalicznych. Spawanie z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego pozwala na eliminację najistotniejszych mankamentów złączy spawanych stali AHSS, jakimi jest powstawanie pęknięć w SWC i spoinie. Opracowana technologia minimalizuje także ryzyko wystąpienia wad spawalniczych w trakcie wykonywania spoiny. Pozwoli to na zastosowanie wysokowytrzymałych stali AHSS podczas projektowania i budowy konstrukcji nośnych pojazdów, co przełoży się na zmniejszenie ich masy bez osłabiania konstrukcji i tym samym uczyni ich eksploatację mniej energochłonną.

Instalacja mikrojetowa wymaga dodatkowych prac mających na celu dostosowanie jej do wysokich wymagań, jakie stawia praktyka spawalnicza, ale jej zastosowanie jest celowe co potwierdzają wyniki badań zawartych w niniejszej pracy. Zastosowanie mieszanki Ar + 10% CO<sub>2</sub>, zarówno jako gazu osłonowego jak i chłodzącego, nie wpłynęło negatywnie na właściwości uzyskanych spoin, a uzyskana dzięki temu unifikacja pozwoli na łatwiejsze wdrożenie opracowanej technologii do praktyki spawalniczej.

Dobra plastyczność i wysoka wytrzymałość na rozciąganie (w porównaniu ze stalami niestopowymi) jaką oferują stal DOCOL 1200 M czyni z niej perspektywiczny materiał do budowy konstrukcji samonośnych pojazdów, należy mieć jednak na uwadze dotychczas niezadowalającą wytrzymałość na rozciąganie (na poziomie 50-60% materiału rodzimego), oraz wady spawalnicze otrzymywane klasycznymi metodami. Należy mieć na uwadze, że zadowalająco wysoka wytrzymałość złącza wynosi powyżej 700 MPa w wydłużenie A<sub>5</sub> wynosi powyżej 4%. Wyniki niniejszych badań pokazują, że możliwe jest uzyskanie prawidłowych złączy z wykorzystaniem stali DOCOL 1200M i zastosowaniem gazu chłodzącego Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gazu osłonowego i mikrojetowego.

Wyniki badań stali S355J2G3, w szczególności udarność w niskich temperaturach pokazują zasadność wdrożenia opracowanej technologii podczas napraw konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych z tej stali. Jest to szczególnie istotne w kontekście zmian klimatycznych i będących ich konsekwencją ekstremów pogodowych nasilających się na terenie Europy w ostatnich latach.

## 10. Wnioski

Na podstawie zaprezentowanych w rozprawie badań można sformułować następujące wnioski o charakterze poznawczym i aplikacyjnym:

1. Do napraw konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali S355J2G3 można zastosować spawanie metodą MAG z zastosowaniem drutu G3Si1 oraz chłodzenia mikrojetowego z wykorzystaniem mieszanki Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gazu osłonowego oraz chłodzącego.
2. Dodatkowe chłodzenie podczas spawania stali S355J2G3 należy wykonywać inżektorem o średnicy 60 µm i ciśnieniu mieszanki chłodzącej 0,4 MPa.
3. Badanie udarności w różnych temperaturach złączy dla stali S355J2G3 wykazało wzrost udarności w temperaturze -40° C o 31%.
4. Badania metalograficzne złączy dla stali S355J2G3 wykazały wzrost zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF do 75%.
5. Badanie twardości złączy dla stali S355J2G3 wykazało średnią twardość w SWC na poziomie 213 HV oraz 208 w spoinie.
6. Badanie wytrzymałości na rozciąganie złączy ze stali S355J2G3 wykazało wzrost wytrzymałości o 3,3%.
7. Wytrzymałość zmęczeniowa złączy ze stali S355J2G3 jest na poziomie 295 MPa.
8. Obserwacja złączy wykonanych dla stali S355J2G3 pod skaningowym mikroskopem elektronowym wykazała korzystne wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki manganu i glinu.
9. Do budowy konstrukcji nośnych pojazdów można zastosować stal DOCOL 1200 M, co będzie miało pozytywny wpływ na masę pojazdu.
10. Elementy pojazdu wykonane ze stali DOCOL 1200 M można spawać procesem MAG z zastosowaniem drutu UNION X90, z zastosowaniem

chłodzenia mikrojetowego z wykorzystaniem mieszanki Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gazu osłonowego oraz chłodzącego.

11. Podczas spawania stali DOCOL 1200 M z chłodzeniem mikrojetowym można zastosować mieszankę Ar + 10% CO<sub>2</sub> jako gaz osłonowy i chłodzący, stosując średnicę inżektora mikrojetowego 70 μm i ciśnienie 0,5 MPa.
12. Badania metalograficzne złączy dla stali DOCOL 1200 M wykazały polepszenie struktury spoiny, gdzie rozróżnić można martenzyt, drobnoziarnisty ferryt AF oraz ferryt SPF.
13. Badanie twardości złączy dla stali DOCOL 1200 M wykazało średnią twardość w SWC na poziomie 318 HV oraz 353 w spoinie.
14. Badanie wytrzymałości na rozciąganie złączy ze stali DOCOL 1200 M wykazało wartość R<sub>e</sub>=556 MPa przy wydłużeniu A<sub>5</sub>=6 %.
15. Wytrzymałości zmęczeniowa złączy ze stali DOCOL 1200 M jest na poziomie 530 MPa.
16. Obserwacja złączy wykonanych dla stali DOCOL 1200 M pod skaningowym mikroskopem elektronowym wykazała obecność korzystnych wtrąceń niemetalicznych, którymi są głównie związki tytanu (TiN, TiC, TiO).

## 11. Bibliografia

1. Węgrzyn, T., Szczucka-Lasota, B., Piwnik, J., & Jurek, A. (2020). AHSS steel welding with micro-jet cooling in mobile platforms. *Transport Problems*, 15(1). <https://doi.org/10.21307/TP-2020-012>
2. Khusiafan, F. J. (2018). Advance High Strength Steels: The Solution in Lightweighting our Future Automobiles. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 8(04). <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.8.4.15>
3. Lesch, C., Kwiaton, N., & Klose, F. B. (2017). Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications – Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments. In *Steel Research International* (Vol. 88, Issue 10). <https://doi.org/10.1002/srin.201700210>
4. Szczucka-Lasota, B., Węgrzyn, T., Silva, A. P., & Jurek, A. (2023). AHSS—Construction Material Used in Smart Cities. *Smart Cities*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/smartcities6020054>
5. Shome, M., & Tumuluru, M. (2015). Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS). In *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16259-9>
6. Khan, M. I., Kuntz, M. L., Su, P., Gerlich, A., North, T., & Zhou, Y. (2007). Resistance and friction stir spot welding of DP600: A comparative study. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(2). <https://doi.org/10.1179/174329307X159801>
7. Perka, A. K., John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properties, and Challenges. In *Metals* (Vol. 12, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/met12061051>
8. Węgrzyn, T., Szczucka-Lasota, B., Szymczak, T., Łazarz, B., Cybulko, P., & Jurek, A. (2023). Welding of High-Strength Steels for the Automotive Industry (pp. 77–86). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13234-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13234-6_6)

9. Śliwiński Tomasz: Powypadkowe badanie pojazdów, W: VIII Studencka Sesja Naukowa : 40 lat kształcenia na kierunku Transport, Katowice, 7 czerwca 2010 r. [Dokument elektroniczny], 2010, [b.w.], dysk optyczny (CD-ROM) 1-14
10. Śliwiński Tomasz: Naprawy konstrukcji nośnej koparko-ladowarek z zastosowaniem chłodzenia metodą mikrojetową, Zeszyty Naukowe. Transport - Politechnika Śląska, Politechnika Śląska, nr 77, 2012, s. 99-105, 3 punkty, IF(0,5)
11. Węgrzyn Tomasz: Spawanie elementów pojazdów z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego, [Monografia], [Politechnika Śląska], vol. 520, 2014, Politechnika Śląska, ISBN 978-83-7880-200-6, 215 s.
12. Szczucka-Lasota Bożena: Nowe rozwiązania materiałowo-technologiczne przy spawaniu i napawaniu wybranych stalowych elementów środków transportu, Monografia / Politechnika Śląska, vol. 1010, 2023, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-936-4, 152 s.
13. Szczucka-Lasota, B., Węgrzyn, T., & Jurek, A. (2020). Aluminum alloy welding in automotive industry. *Transport Problems*, 15(3). <https://doi.org/10.21307/TP-2020-034>
14. Szczucka-Lasota, B., & Węgrzyn, T. (2018). Filler materials for MAG welding with microjet cooling for truck frame repairs. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 101. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.19>
15. Hadryś, D., & Piwnik, J. (2014). Welding with Microjet Cooling as a Method of Improving the Plastic Properties of Welds. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(5). <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1118-x>
16. Brykov, M. N., Petryshynets, I., Džupon, M., Kalinin, Y. A., Efremenko, V. G., Makarenko, N. A., Pimenov, D. Y., & Kováč, F. (2020). Microstructure and properties of heat affected zone in high-carbon steel after welding with fast cooling in water. *Materials*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/ma13225059>
17. Sayed, A. M., & Alanazi, H. (2022). Performance of steel metal prepared using different welding cooling methods. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00953>



18. Węgrzyn, T., Szymczak, T., Szczucka-Lasota, B., & Łazarz, B. (2021). *Mag welding process with micro-jet cooling as the effective method for manufacturing joints for S700MC steel*. *Metals*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/met11020276>
19. Węgrzyn, T., Szczucka-Lasota, B., Piwnik, J., & Jurek, A. (2020). *AHSS steel welding with micro-jet cooling in mobile platforms*. *Transport Problems*, 15(1). <https://doi.org/10.21307/TP-2020-012>
20. Bąk Łukasz, Śliwiński Tomasz: *Powłoki ochronne - ich zadania i zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym*, *Zeszyty Naukowe. Transport - Politechnika Śląska, Politechnika Śląska*, nr 78, 2013, s. 5-12, 9 punktów, IF(0,5)
21. Węgrzyn Tomasz, Śliwiński Tomasz, Sieteski Dariusz, Hadryś D.: *Metody spawania i zgrzewania nadwozia pojazdu*, *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, Centralny Ośrodek Badawczo Rozwojowy Aparatury Badawczej i Dydaktycznej COBRABiD sp. z o. o.*, vol. 16, nr 3, 2011, s. 53-59, 6 punktów
22. Śliwiński Tomasz, Sieteski Dariusz: *Microjet technology in automotive repair welding*, *W: Transport problems 2012 : I International symposium of young researchers. Symposium proceedings. [Dokument elektroniczny]*, 2012, Politechnika Śląska, dysk optyczny (CD-ROM) 109-115
23. Sieteski Dariusz, Śliwiński Tomasz, Szczucka-Lasota Bożena: *Surfacing weld regeneration with micro-jet cooling of cylindrical elements of machines*, *W: Transport problems 2012 : I International symposium of young researchers. Symposium proceedings. [Dokument elektroniczny]*, 2012, Politechnika Śląska, dysk optyczny (CD-ROM) 104-108
24. Węgrzyn Tomasz, Śliwiński Tomasz, Sieteski Dariusz, Hadryś D.: *Comparison of properties of fusion and pressure welding methods used in repairation of vehicle body*, *W: Transactions on transport systems telematics and safety / Piecha Jan, Węgrzyn Tomasz (red.)*, 2011, Politechnika Śląska, ISBN 978-83-7335-824-9, s. 179-191
25. Chen, P. C., Peng, T. T., Chan, Y. C., Chen, J. M., & Chang, C. P. (2023). *The Effect of Deformation Temperature on the Deformation Mechanism of a Medium-Mn Advanced High-Strength Steel (AHSS)*. *Crystals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/cryst13020328>

26. Fonstein, N. (2015). *Advanced high strength sheet steels: Physical metallurgy, design, processing, and properties*. In *Advanced High Strength Sheet Steels: Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
27. Aydin, H., Essadiqi, E., Jung, I. H., & Yue, S. (2013). *Development of 3rd generation AHSS with medium Mn content alloying compositions*. *Materials Science and Engineering: A*, 564. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.113>
28. Bouaziz, O., Zurob, H., & Huang, M. (2013). *Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications*. *Steel Research International*, 84(10). <https://doi.org/10.1002/srin.201200288>
29. Pouranvari, M., & Marashi, S. P. H. (2013). *Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties*. In *Science and Technology of Welding and Joining (Vol. 18, Issue 5)*. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.00000000120>
30. Kuziak, R., Kawalla, R., & Waengler, S. (2008). *Advanced high strength steels for automotive industry: A review*. In *Archives of Civil and Mechanical Engineering (Vol. 8, Issue 2)*. [https://doi.org/10.1016/s1644-9665\(12\)60197-6](https://doi.org/10.1016/s1644-9665(12)60197-6)
31. Dong, W., Pan, H., Sun, Y., Zhou, J., Lei, M., Ding, K., & Gao, Y. (2023). *The sandwich-structured advanced high strength steel to resist the liquid metal embrittlement*. *Journal of Materials Research and Technology*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.161>
32. Xia, Y., & Blum, H. B. (2023). *Subzero Material Properties of Advanced High-Strength Cold-Formed Steel Alloys*. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020399>
33. Midawi, A. R. H., Patel, M., Shojaee, M., Pearson, K., Sherepenko, O., Ghassemi-Armaki, H., & Biro, E. (2023). *Effect of Liquid Metal Embrittlement Indent Cracks on Zinc Coated 3rd Generation AHSS Mechanical Performance*. *Metals*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/met13030491>
34. Song, S., Shojaee, M., Midawi, A. R. H., Sherepenko, O., Ghassemi-Armaki, H., & Biro, E. (2023). *Influence of expulsion and heat extraction resulting from changes to*

- electrode force on liquid metal embrittlement during resistance spot welding. Journal of Materials Research and Technology, 23. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.093>*
35. Narayana, P. S. R., Prakash, R. v., Gunti, S., & Raghu, K. (2022). *Equivalent Energy Absorption—A Methodology for Improved Automotive Crash Safety Design. ASME Open Journal of Engineering, 1. <https://doi.org/10.1115/1.4056011>*
36. Okada, T., Ueda, H., Miyazaki, Y., Yasuyama, M., & Fujii, H. (2022). *Effect of strength of steel sheets on peel tensile strength and failure mode of dissimilar joint of spot welds. Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 40(4). <https://doi.org/10.2207/QJWS.40.226>*
37. Liu, Y., Carnegie, C., Ascroft, H., Li, W., Han, X., Guo, H., & Hughes, D. J. (2021). *Investigation of adhesive joining strategies for the application of a multi-material light rail vehicle. Materials, 14(22). <https://doi.org/10.3390/ma14226991>*
38. Mallick, P. K.(2020). *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. In Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04153-5>*
39. J. Krawczyk, *Kształtowanie elementów nadwozi samochodowych ze stali AHSS, Wrocław, 2016.*
40. Gola Jakub, Otto Maciej, Górka Jacek, Stano Sebastian: *Struktura i własności złączy doczołowych stali S355 spawanych wiązką laserową, W: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych : Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Brenna, 21-23 czerwca 2022 r. Praca zbiorowa / Górka Jacek (red.), 2022, Polska Akademia Nauk, ISBN 978-83-63605-53-7, s. 171-180, 20 punktów*
41. Górka Jacek, Opiela Marek: *Structure and properties of HSLA steel melted by welding heat sources, W: 6th International Thermal Spraying and Hardfacing Conference, Wrocław, 22-23 September 2022. Book of Abstract , 2022, s. 101-101*
42. Jankowska D., Górka Jacek: *Wpływ parametrów spawania laserowego z materiałem dodatkowym na własności złączy doczołowych ze stali S700MC, W: TalentDetector2022\_Winter: Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa, Gliwice, styczeń, 2022. T. 1 / Bonek Mirosław (red.), Prace Katedry Materiałów*

*Inżynierskich i Biomedycznych, 2022, Politechnika Śląska, ISBN 978-83-65138-30-9, s. 305-317, 20 punktów*

43. Górką, J. *Materials, Assessment of the weldability of T-welded joints in 10 mm Thick TMCP steel using laser beam* 2018, 11(7), 1192,
44. Giacomini, R. C., & Weblar, B. A. (2019). *Effect of silicon on AHSS as-cast microstructure development and properties. ISIJ International, 59(5).* <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-598>
45. Bhargava, M., Chakrabarty, S., Barnwal, V. K., Tewari, A., & Mishra, S. K. (2018). *Effect of microstructure evolution during plastic deformation on the formability of Transformation Induced Plasticity and Quenched & Partitioned AHSS. Materials and Design, 152.* <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.068>
46. Tatsumi, H., Kaneshita, S., Kida, Y., Sato, Y., Tsukamoto, M., & Nishikawa, H. (2022). *Highly efficient soldering of Sn-Ag-Cu solder joints using blue laser. Journal of Manufacturing Processes, 82.* <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.025>
47. Ning, D., Wang, Q., Tian, J., Gong, Y., Du, H., Chen, S., & Hou, J. (2021). *Experimental study on the coating removing characteristics of high-pressure water jet by micro jet flow. Micromachines, 12(2).* <https://doi.org/10.3390/mi12020173>
48. Prochenka, P., & Janiszewski, J. (2020). *Assessment and Comparison of the Mechanical Properties of Laser Welded Joints in Docol 1200M and Strenx S700MC Steel Alloy Grades Under Impact Loads. Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering, 11(1).* <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0282>
49. Górką, J., Kciuk, M., & Stano, S. (2022). *Assessment of the Corrosion Resistance and the Mechanical Properties of Laser Welded Joints Made of Steel DOCOL 1200M. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2.* <https://doi.org/10.17729/ebis.2022.2/1>
50. Hadryś, D. (2018). *Welding with micro-jet cooling as a way to improve the mechanical properties of mode of transportation shaft surface. Transport Problems, 13(4).* <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.4.7>
51. Sun, F. F., Ran, M. M., Li, G. Q., & Wang, Y. B. (2020). *Welded connections. In Behavior and Design of High-Strength Constructional Steel.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102931-2.00012-7>

52. Němeček, S., Mužík, T., & Míšek, M. (2012). Differences between Laser and Arc Welding of HSS Steels. *Physics Procedia*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.015>
53. Ghafouri, M., Ahola, A., Ahn, J., & Björk, T. (2022). Welding-induced stresses and distortion in high-strength steel T-joints: Numerical and experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107088>
54. Sorger, G., Sarikka, T., Vilaça, P., & Santos, T. G. (2018). Effect of processing temperatures on the properties of a high-strength steel welded by FSW. *Welding in the World*, 62(6). <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0612-8>
55. Hance, B. (2018). Advanced High-Strength Steel (AHSS) Performance Level Definitions and Targets. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 11(4). <https://doi.org/10.4271/2018-01-0629>
56. Soboń E.L.: „Bezpieczeństwo pojazdów ciężarowych”, *Auto Expert* 8, 2000.
57. Soboń E.L. : „Bezpieczeństwo ruchu pojazdów ciężarowych”, *Auto Expert* 3, 1998.
58. Orzełowski S.: „Budowa podwozi i nadwozi samochodowych” *Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1995*
59. Rusiński E., Kowalczyk M.: „Zasady przedłużania ram samochodowych” *Samochody Specjalne, tom 6, nr 7, 2003.*
60. Adamiec P., Dziubiński J., Filipczyk J.: „Technologia napraw pojazdów samochodowych”, *Politechnika Śląska 2002.*
61. Dokument Iveco Stralis Trakker: „Body and Chassis Repair Manual”, publication no. 603.93.481, 2005.
62. Orzełowski S.: „Naprawa i obsługa pojazdów samochodowych”, *Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2006.*
63. T. Węgrzyn, B. Szczucka-Lasota, M.Krzysztoforski, T. Śliwiński, MAG dissimilar welding of S355JR with DOCOL 1200 M steel for the structures of car body, [Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie, ISSN 1641-3466, iss. 196, 2024](#)
64. ISO 581:1980 Weldability – Definition. General information.

65. *PN-EN ISO 9015-1:2011 Badania niszczące złączy spawanych metali -- Badanie twardości -- Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo.*
66. *PN-EN ISO 17639:2013-12 Badania niszczące spawanych złączy metali -- Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.*
67. *PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012 Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -- Badanie na zginanie.*
68. *PN-EN ISO 17636-1:2013-06 Badania nieniszczące spoin -- Badanie radiograficzne -- Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną.*
69. *PN-EN ISO 17638:2017-01 Badanie nieniszczące spoin -- Badanie magnetyczno-proszkowe.*
70. *PN-EN ISO 13920:2000/Ap1 Spawalnictwo Tolerancje ogólne dotyczące konstrukcji spawanych Wymiary liniowe i kąty Kształt i położenie.*
71. *PN-EN ISO 15613:2006 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -Kwalifikowanie na podstawie przedprodukcyjnego badania spawania/zgrzewania.*
72. *PN-EN ISO 4136 - Badania niszczące złączy spawanych metali -- Próba rozciągania próbek poprzecznych, 2013-05.*
73. *PN-EN ISO 5817:2014-05 Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) -- Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.*
74. *PN-EN ISO 17637:2017-02 Badania nieniszczące złączy spawanych -- Badania wizualne złączy spawanych.*
75. *PN-EN ISO 4136 - Badania niszczące złączy spawanych metali -- Próba rozciągania próbek poprzecznych, 2013-05.*
76. *PN -84/M-69005 Spawalnictwo. Spajanie metali. Terminologia.*
77. *PN-EN 1011-2:2004+A1:2005 Spawanie – Wytyczne dotyczące spawania metali – Część 2: Spawanie łukowe stali ferrytycznych.*

*78. PN-EN ISO 6507-1:2018-05 Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -- Część  
1: Metoda badania.*

## 12. Streszczenie

W pracy podjęto zagadnienia związane z wykorzystaniem procesów spawalniczych w połączeniu z chłodzeniem mikrojetowym przy budowie i naprawach konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali niestopowych oraz wysokowytrzymałych AHSS.

Dokonano przeglądu literatury, na podstawie którego opisano stan zagadnienia. Przybliżono klasyfikacje konstrukcji nośnych pojazdów, opisane zostały naprężenia w nich występujące oraz wyszczególniono wymagania dotyczące procesów spawalniczych wykorzystywanych w produkcji i naprawach. Dokonano przeglądu stali stosowanych do budowy konstrukcji nośnych pojazdów, z uwzględnieniem stali niestopowej i AHSS. Przedstawiono spawalniczy cykl cieplny oraz zagadnienia związane ze spawalnością stali. Następnie wykonano przegląd metod spawalniczych wykorzystywanych w naprawach i budowie konstrukcji nośnych pojazdów a także przedstawiono aspekty ekonomiczne napraw. Omówione zostało zastosowanie chłodzenia mikrojetowego w spawalnictwie oraz jego wpływ na strukturę i własności mechaniczne otrzymywanych złączy.

Na podstawie przeglądu literatury ustalono parametry procesu spawalniczego oraz wytypowano parametry chłodzenia mikrojetowego wykorzystane do badań wstępnych. Przygotowano stanowisko spawalnicze, na którym zostały wykonane złącza jednorodne ze stali niestopowej oraz złącza jednorodne ze stali DOCOL 1200 należącej do grupy stali AHSS. Otrzymane złącza zostały poddane selekcji na podstawie wyników badań nieniszczących (VT i MT).. Z wyselekcjonowanych złączy wykonano zglądy i próbki umożliwiające badania własności mechanicznych. Określono doraźną wytrzymałość na rozciąganie i rozkład twardości. Zglądy poddano badaniom metalograficznym mającym na celu określenie struktury złączy stali niestopowych i stali AHSS. Powyższe prace pozwoliły określić najlepsze parametry procesu spawalniczego wraz z chłodzeniem mikrojetowym. Ustalone parametry procesu zostały wykorzystane w badaniach zasadniczych.

Na podstawie badań wstępnych i przeglądu literatury zaproponowano tezę pracy, która zakłada, że chłodzenie mikrojetowe poprawi własności mechaniczne złączy spawanych stosowanych w budowie nadwozi pojazdów wykonanych ze stali niestopowej i stali AHSS, a najważniejszym kryterium określającym tę poprawę będą rezultaty badań zmęczeniowych.



Badania zasadnicze rozpoczęto od wykonania badań radiograficznych w celu kontroli prawidłowości złączy. Następnie przeprowadzona została próba zginania, badanie udarności oraz określenie wytrzymałości zmęczeniowej dla obu badanych gatunków stali. Wszystkie badania mechaniczne wypadły bardzo pozytywnie. Złącza wykonane ze stali niestopowej i ze stali AHSS posiadały lepsze własności mechaniczne niż złącza wykonane bez chłodzenia mikrojetowego. W celu dodatkowej kontroli złączy wykonanych z obu badanych materiałów analizowano postać wtrąceń niemetalicznych pod mikroskopem skaningowym. Cel pracy został osiągnięty, a teza została potwierdzona.

### **13. Abstract**

This research paper examines issues related to the use of welding procedures combined with microjet cooling in the construction and repair of vehicle superstructures made of low-alloy steels and high-strength AHSS.

The conducted literature review constituted the basis on which the status of the issue was described. Vehicle superstructure classifications were approximated, the stresses in them were described, and the requirements for welding processes used in fabrication and repair were detailed. Steels used in vehicle superstructures were reviewed, with consideration given to unalloyed steel and AHSS. Also, a presentation of the welding thermal cycle and issues related to the weldability of steels were included. This was followed by a review of welding methods used in repairing and constructing vehicle superstructures and outlining the economic aspects of repairs. Microjet cooling application in welding and its influence on the structure and mechanical properties of the obtained joints were discussed.

Based on a literature review, a selection of welding process parameters were established and microjet cooling parameters used for preliminary tests was conducted, and the welding station, where homogeneous joints of unalloyed steel and homogeneous joints of DOCOL 1200 steel belonging to the AHSS steel group were made, was constructed. The obtained joints were subjected to selection according to the results of non-destructive testing (VT and MT). From the selected connectors, the samples and specimens were prepared to enable testing of mechanical properties. The ad hoc tensile strength and hardness distribution were determined; the casts were subjected to metallographic studies to determine the structure of the joints of non-alloy steels and AHSS. The aforementioned works allowed to determine the best welding process parameters along with microjet cooling. The determined process parameters were then applied in the core research.

Results of preliminary research and literature review constituted the basis for the proposed thesis of this research paper, which assumes that microjet cooling would improve the mechanical properties of welded joints used in the construction of vehicle bodies made of unalloyed steel and AHSS, and the most important criterion for determining this improvement would be the results of fatigue tests.

Fundamental testing started by performing radiographic tests, the aim of which was to check the propriety of the joints. This was followed by a bending test, an impact test and the determination of fatigue strength for both grades of steel under examination. The outcomes of all conducted mechanical tests were very positive. Joints made from unalloyed steel and made from AHSS showed better mechanical properties than joints made without microjet cooling. For additional inspection of the joints made of both tested materials, the form of non-metallic inclusions was analyzed under a scanning microscope. The aim of this research paper was achieved, and the thesis was confirmed.