



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Adam Jurek

Zwiększenie zasięgu operacyjnego podestu ruchomego pojazdów samochodowych przy zachowaniu masy własnej pojazdu

Increasing the operating range of the mobile platform for motor
vehicles while maintaining the curb weight

Promotor

prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn prof. zw.

Promotor pomocniczy

dr inż. Łukasz Wszółek

Gliwice 2021

Spis treści

1. WPROWADZENIE	4
2. STAN ZAGADNIENIA	7
2.1. Podesty ruchome - charakterystyka	7
2.2. Podział i klasyfikacja podestów ruchomych przejezdnych	11
2.3. Tendencje materiałowe w motoryzacji.....	16
2.4. Stale AHSS – właściwości i zastosowanie	25
2.5. Spawalność stali	27
2.5.1. Obliczeniowy sposób oceny spawalności stali	30
2.6. DOCOL M - zimnowalcowana stal martenzytyczna	35
2.7. Spawanie z chłodzeniem mikro-jetowym	39
3. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY	43
4. CEL, ZAŁOŻENIA I ZAKRES PRACY	45
5. BADANIA ROZPOZNAWCZE	46
5.1. Dobór parametrów technologicznych spawania MAG wysokowytrzymałych elementów podestu ruchomego	48
5.2. Dobór parametrów spawania z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego	49
5.3. Badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złączy	57
5.4. Podsumowanie badań wstępnych.....	60
6. TEZA	62
7. BADANIA ZASADNICZE	64
7.1. Możliwość wykonania podestu ruchomego poprzez spawanie zmodyfikowanym procesem spawalniczym.....	64
7.2. Spawanie elementów podestu ruchomego- wykonanie próbek.....	65
Podkładka miedziana	66
7.3. Spawanie podestu ruchomego z wykorzystaniem miedzianych podkładek składających z równoczesnym zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego	71
7.4. Badania zmęczeniowe	78
7.5. Badania mikrostruktury	83

7.6. Wykonanie badań twardości.....	84
7.7. Próba zginania.....	86
7.8. Badania radiograficzne.....	88
7.9. Wykonanie testowego podestu ruchomego	90
7.10. Badania tolerancji wymiarowej	92
8. OBLICZENIA MATEMATYCZNE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH ZŁĄCZY PRZY ZASTOSOWANIU CHŁODZENIA MIKRO-JETOWEGO.....	94
8.1. Określanie wartości granicy plastyczności.....	94
8.2. Określanie wartości wytrzymałości na rozciąganie	101
8.3. Określanie wartości wydłużenia względnego.....	106
8.4. Wartości funkcji dopasowania wytrzymałości złącza względem ciśnienia mikrostrugi oraz zastosowanego gazu mikro-jetowego.....	110
9. APLIKACJA WYNIKÓW BADAŃ DO PROCESU PRODUKCYJNEGO	118
9.1. Wykonanie konstrukcji spawanej nowo opracowana metodą – etap 1.....	120
9.2. Uznanie Technologii Spawania (WPQR).....	122
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	127
SPIS LITERATURY	148
SPIS TABLIC.....	157
SPIS RYSUNKÓW	158
Streszczenie pracy	160
Summary	163

1. WPROWADZENIE

Przemysł samochodowy jest gałęzią gospodarki, w której prace spawalnicze mają ogromny udział. W budowie środków transportu najczęściej stosuje się następujące procesy [1]:

- spawanie łukowe drutem topliwym w osłonie gazów MIG/MAG,
- spawanie łukowe drutem nietopliwym w osłonie gazów TIG,
- spawanie łukiem krytym pod topnikiem SAW,
- spawanie laserowe.

Procesy te używa się do łączenia elementów nadwozi oraz podwozi, takich jak np. [2]:

- zabudowy samowyladowcze (wywrotki),
- zabudowy stałe (cysterny, kontenery),
- szkielety nadwozi samonośnych,
- kabiny,
- wysięgniki żurawi,
- ramy nośne,
- podesty ruchome.

W związku z aktualizacją przepisów, dotyczących emisji spalin w pojazdach samochodowych, producenci są zobowiązani do wprowadzania do pojazdów samochodowych dodatkowych podzespołów takich jak: filtry cząstek stałych, katalizatory spalin, elementy układów wydechowych np. strumienice, czy też wspomagających tłumików, które znacząco zwiększają ich masę całkowitą. W pojazdach ciężarowych różnica może wynosić nawet 200 kg.

W związku z nowymi trendami, producenci stali wytwarzają nowe materiały, o lepszych właściwościach mechanicznych, które są odpowiedzią na zapotrzebowanie między innymi przemysłu motoryzacyjnego. Zastosowanie w środkach transportu wysokowytrzymałych stali nowej generacji pozwoliłoby na sporą redukcję masy pojazdów, zużycia paliwa oraz zmniejszenie emisji szkodliwych gazów do otoczenia [3]. Spawanie tych stali nie jest jeszcze dobrze rozpoznane. Złącza spawane tych stali cechują się dużo gorszą wytrzymałością od materiału rodzimego.

W celu zaspokojenia zapotrzebowania przemysłu motoryzacyjnego oraz transportowego na coraz doskonalsze materiały powstały m.in. stale o wysokiej

wytrzymałości AHSS (*Advanced High-Strength Steel*). Materiały te mogłyby być stosowane w budowie pojazdów ze względu na [4]:

- wysoką wytrzymałość doraźną na rozciąganie, do 1700 MPa,
- wysoką granicę plastyczności, do 1450 MPa.

Istotną zaletą stali AHSS jest stosunkowo łatwa obróbka plastyczna oraz obróbka skrawaniem. Stale wysokowytrzymałe AHSS nadają się do wykorzystania w przemyśle motoryzacyjnym, ponieważ dają możliwość zmniejszenia grubości blach karoseryjnych oraz elementów nośnych karoserii, przy jednoczesnym wzroście własności mechanicznych w zestawieniu ze stalami konwencjonalnymi [3]. Dodatkowym atutem stali AHSS jest stosunkowo niska cena, za sprawą małej ilości dodatków stopowych w stali. Stale z grupy AHSS wciąż są uznawane za trudnospawalne ze względu na dominującą w nich strukturę martenzytyczną [5].

Wzrasta zapotrzebowanie na powstawanie nowych materiałów i technologii spawalniczych w konstrukcjach dla potrzeb nowej dyscypliny naukowej, którą jest inżynieria lądowa i transport. Przykładem tego może być tendencja zwiększenia zasięgu operacyjnego podestu ruchomego montowanego na pojazdach samochodowych przy jednoczesnym zachowaniu masy pojazdu. Najczęściej stosowanym materiałem w produkcji podestów ruchomych są stale AHSS z uwagi na ich dużą wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1400 MPa. Powstałe przy ich wykorzystaniu złącza cechują się jednak dużo niższą wytrzymałością od materiału rodzimego [6].

Biorąc pod uwagę trendy urbanistyczne miast, dążące do coraz to wyższych budowli, zrodziła się potrzeba konstruowania podestów ruchomych przejezdnych o coraz to większych zasięgach i udźwigach, przy jednoczesnym zachowaniu masy konstrukcji. Konieczna jest więc modyfikacja technologii wykonania konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych pod kątem możliwości wydłużenia zasięgu operacyjnego bez podwyższenia masy całkowitej konstrukcji i przy zapewnieniu wszelkich wymagań bezpieczeństwa.

Wysoka wytrzymałość stali z grupy AHSS jest prawie dwukrotnie większa od wytrzymałości złącza spawanego. Wydłużenie względne złączy otrzymywanych dotychczasowymi procesami jest na niskim poziomie, co świadczy o złych własnościach plastycznych złącza. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań, prowadzące do opracowania nowego procesu spawania cienkościennej konstrukcji elementów podestu ruchomego wykonanego ze stali AHSS.

Celem pracy jest opracowanie nowego procesu spawalniczego łączenia stali AHSS. Nowy proces spawalniczy ma na celu umożliwienie wykonania konstrukcji o wydłużonym zasięgu operacyjnym bez podwyższenia masy całkowitej konstrukcji i przy zapewnieniu spełniania wymagań bezpieczeństwa.

Ciągłe dążenie do redukcji wagi wytwarzanych konstrukcji powinno być związane z bezpieczeństwem biernym pojazdów [3].

Celem pracy jest zaprojektowanie nowej konstrukcji spawanej ze stali o podwyższonej wytrzymałości AHSS przy jednoczesnym zwiększeniu jej zasięgu operacyjnego podestu i zachowaniu masy oraz sztywności.

2. STAN ZAGADNIENIA

Podesty ruchome przejezdne są wykorzystywane w coraz szerszym zakresie do wielu prac na wysokościach. Dzięki nim przygotowanie obszaru roboczego jest mniej pracochłonne niż przygotowanie podestów montowanych na tradycyjnych rusztowaniach stałych.

2.1. Podesty ruchome - charakterystyka

Podnośniki koszowe to maszyny przejezdne, z przeznaczeniem do przemieszczania osób na właściwe stanowiska robocze, skąd można wykonywać daną pracę z platformy. Osoby pracujące wchodzą i schodzą z platformy, kiedy znajduje się ona w określonym położeniu, umożliwiającym dostęp do stanowiska roboczego.

Elementami podnośników koszowych są: platforma robocza z elementami sterowniczymi, konstrukcja wsporcza platformy wraz z układem napędowym oraz podwozie. Z uwagi na liczne zalety, podesty ruchome przejezdne stosowane w transporcie osób na określoną wysokość stanowią wśród podestów najliczniejszą grupę. Do zalet tych należą między innymi możliwość bezpośredniego dojazdu do określonego obiektu, znaczna wysokość podnoszenia czy wreszcie łatwość manewrowania ruchami platformy roboczej. Podesty ruchome przejezdne wykorzystywane są w wielu dziedzinach przemysłu i gospodarki, m.in. do prac konserwacyjnych przy elewacjach budynków, napraw i konserwacji oświetleń ulicznych, napraw linii energetycznych, przycinaniu drzew, montażu reklam.

Bardziej zaawansowane podnośniki koszowe używane są również w samochodach specjalnych, do których należą pojazdy straży pożarnej, wykorzystywane do prowadzenia wszelkiego typu akcji ratowniczych – przez ewakuację zagrożonych osób po gaszenie pożarów z wysokości [7].

Do sukcesu w przypadku pożarniczych pojazdów z ratowniczymi podnośnikami koszowymi przyczynia się uzyskanie maksymalnego zakresu ich pracy przy jednoczesnym zachowaniu minimalnego czasu ich przygotowania do działań ratowniczo-gaśniczych.

Zadaniem pojazdu, przystosowanego do przewozu 2 lub 3 strażaków i rozbudowanego o funkcje z zakresu ratownictwa wysokościowego, jest umożliwienie

jednostkom straży pożarnej realizowanie działań z zakresu działań ratowniczo-gaśniczych jak i ratownictwa wysokościowego (rys. 1).

Często wykorzystywane są również jako wsparcie tych działań. Standardowe wysokości ratownicze dla hydraulicznych podnośników koszowych [SHD] na polskim rynku wynoszą 25, 32, 44, 53, 61 oraz 68 m. Światowy lider w produkcji podnośników koszowych kilka lat temu ustanowił rekord świata produkując podnośnik koszowy o zasięgu ratowniczym 112 m wysokości [8].



Rys. 1. Podnośnik koszowy Bronto Skylift F61RPX na podwoziu Volvo [9]

Podesty ruchome przejezdne dla straży pożarnej, z uwagi na rygorystyczne wymogi bezpieczeństwa, wielofunkcyjność oraz możliwość użytkowania na znacznie większych wysokościach, są dużo bardziej zaawansowane technologicznie od zwykłych podnośników koszowych.

Konstrukcja kosza w nowoczesnych podnośnikach oraz jego wymiary pozwalają na swobodne zmieszczenie 5 ratowników wraz z pełnym osprzętem i umundurowaniem czy też ewakuację osób na noszach ratowniczych lub na wózkach inwalidzkich. Standardowy udźwieg kosza takich podnośników wynosi 500 kg (5 osób).

Zabudowa podnośnika hydraulicznego posiada 4 podpory z możliwością ich indywidualnego rozsuwania na wysuwanych belkach poprzecznych (w układzie typu „H”). Dzięki specyfice i możliwościom operacyjnym nowoczesnych podnośników koszowych oraz temu, że poszczególne ramiona można ustawiać pod różnymi kątami w linii łamanej, kosz ratowniczy podnośnika hydraulicznego umożliwia omijanie przeszkód, takich jak konary drzew, linie napowietrzne, energetyczne, telefoniczne, gzymsy, tarasy itp.

Manewrowanie podnośnikiem może się odbywać zarówno z dolnego siedziska operatora przy wieńcu obrotowym, jak też z kosza ratowniczego. Do cech charakterystycznych należą: zasięg, dopuszczalne obciążenie w zależności od szerokości rozstawionych podpór, kąt pochylenia oraz długości wysuwu podnośnika. Udźwig kosza w najkorzystniejszych warunkach w zależności od marki producenta waha się od 250 do 500 kg. W momencie, gdy podnośnik zbliża się do granicznych wartości, jest to sygnalizowane akustycznie i wizualnie.

Dzięki zamontowanej na stałe drabinie ewakuacyjnej, podczas działań ratowniczych możliwe jest wejście do i zejście z kosza ratowniczego w każdej dowolnej pozycji roboczej podnośnika. Ewakuacyjna drabina ratownicza jest zawsze gotowa do użycia, w każdej pozycji roboczej wysięgnika, i nie wymaga uprzedniego sprawiania. Sprawiony podnośnik posiada nieograniczony pełny obrót [8].

Z czasem zwykle technologie stosowane w jednostkach ratowniczych są również implementowane do pojazdów cywilnych, które także muszą spełniać odpowiednie wymagania, określone w normie PN-EN 280+A1:2015-11 „Podesty ruchome przejezdne. Obliczenia projektowe. Kryteria stateczności. Budowa. Bezpieczeństwo. Badania i próby” [10].

Prace, które wykonuje się na wysokości, wymagają przemieszczenia platformy w obu płaszczyznach - horyzontalnej jak i wertykalnej. Z tej przyczyny konstrukcja podestów powinna umożliwiać ruch podnoszenia i opuszczania platformy roboczej oraz jej przemieszczanie w płaszczyźnie poziomej – za pośrednictwem mechanizmu jazdy, obrotu, pochylenia czy teleskopowania wysięgnika [3].

Bez względu na kategorię podestów, wobec wszystkich przewidziano spełnienie określonych wymogów, umożliwiających dopuszczenie urządzenia do użytku. W zakresie ich budowy jest to przede wszystkim określenie warunków jezdnych – jazda w przypadku pozycji transportowej może być sterowana przez operatora opuszczonej platformy roboczej.

Natomiast podczas sterowania z zewnątrz, prędkość maksymalna platformy nie może przekraczać 1,7 m/s. Ponadto podest powinien być wyposażony w zabezpieczenia

uniemożliwiające jazdę w położeniu innym niż transportowe. Stanowisko sterowania przy podwoziu musi być skonstruowane w sposób zapewniający operatorowi kontakt wzrokowy z ruchami sterowanych elementów, a zwłaszcza podporami uruchamianymi po przeciwnej stronie konstrukcji podwozia.

Rura wydechowa podestów zasilanych silnikami spalinowymi nie może być skierowana na stanowisko osoby sterującej, ponieważ mogłoby to spowodować zagrożenie zdrowia operatora.

Zgodnie z wymogami, we wszystkich podnośnikach koszowych należy także zadbać o osłony, których zadaniem jest uniemożliwienie dotknięcia gorących oraz ruchomych części układu napędowego przez operatora lub osoby postronne.

Ponadto punkty napełniania zbiorników płynów palnych i gazów powinny zostać skonstruowane w taki sposób, który uniemożliwia pożar na skutek np. rozlania ich na rurę wydechową silnika. Jeśli w podnośniku przewidziano możliwość zasilania źródłami zewnętrznymi, należy wówczas zapewnić bezpieczny sposób odłączania ich od podestu. Każdy podnośnik musi być także wyposażony w urządzenie uniemożliwiające jego uruchomienie przez osoby niepowołane – najczęściej jest to łącznik kluczykowy [7].

Każde z urządzeń winno być oznakowane, co wynika ze specjalnych wymogów. Zaniedbanie tego obowiązku może skutkować stworzeniem zagrożenia zarówno dla operatora, jak i osób postronnych, znajdujących się w okolicy.

Jest wymagane, by instrukcja sterowania mającego priorytet urządzenia awaryjnego była umieszczona w pobliżu elementów sterowniczych. Kolejny z wymogów dotyczy konieczności stosowania informacji na każdej platformie roboczej o udźwigu nominalnym oraz dopuszczalnej maksymalnej prędkości wiatru w metrach na sekundę.

Na każdym podeście powinna zostać przymocowana skrócona instrukcja obsługi, która w szczególnych przypadkach może powoływać się na ogólną instrukcję użytkowania [105]. Przy podporze lub kole podwozia powinny być naniesione w widocznym miejscu oznaczenia wraz z podanymi maksymalnymi obciążeniami podłoża podczas pracy. W przypadku opon pneumatycznych na podwoziu powinny być również zaznaczone wartości ciśnień w danych oponach.

Jeśli podest ma możliwość zasilania z sieci zewnętrznej prądu 400/230 V powinien być wyposażony w łącznik odcinający zasilanie, a jego stan zamknięcia i otwarcia powinien być oznaczony odpowiednio za pomocą liter „Z” oraz „O”.

Przy stanowiskach sterowniczych – zarówno z kosza jak i podłoża – konieczny jest napis ostrzegawczy, dotyczący konieczności rozstawienia podpór, jeśli te są stosowane. Wszystkie wymienione wymagania dotyczą każdego rodzaju podnośników, a ich spełnienie jest niezbędne do uzyskania świadectwa dopuszczenia do użytkowania [3].

2.2. Podział i klasyfikacja podestów ruchomych przejezdnych

Podziału podestów ruchomych można dokonać biorąc pod uwagę różne kryteria. Jednym z nich jest rodzaj konstrukcji wsporczej podpierającej platformę roboczą, innym typy jazdy podestów czy wymiary platformy roboczej. Wszystkie te kategorie nie określają jednoznacznie typu oraz zastosowanych technologii w podeście, pozwalają jednak znacznie przybliżyć ich charakterystykę i możliwe zastosowania.

Ze względu na rodzaj konstrukcji wsporczej wyróżnia się podesty o ruchu pionowym, platformy, wyposażone w pionowe maszty teleskopowe, lub nożycowy mechanizm podnoszenia (rys. 2).



Rys. 2. Podnośnik nożycowy Genie GS3246 [11]

Podesty nożycowe stanowią bardzo liczną grupę wśród podnośników o pionowym ruchu platformy roboczej. Mechanizm ten jest zbudowany z dwóch równoległych układów kinematycznych nożycowych sprzężonych ze sobą za pomocą sworzni naprzemianległych przegubów nożyc. Końce ramion mechanizmu połączone są z górnej strony z ramą platformy roboczej, natomiast z dolnej strony z ramą podwozia. Jedno z ramion dźwigni łączy się z podwoziem sworzniem, w wyniku czego otrzymano połączenie obrotowe, natomiast drugie ramię współpracuje z suwakiem przemieszczającym się w prowadnicy przymocowanej do podwozia. Rozkładanie i składanie mechanizmu wykonywane jest za pomocą słownika hydraulicznego [7].

Tego typu konstrukcja ma większą platformę niż podnośnik z masztem teleskopowym. Jej dodatkową zaletą jest możliwość wysunięcia pomostu bocznego wraz z balustradą, przez co jednocześnie poza operatorem może na niej przebywać pomocnik lub większa ilość narzędzi. Mimo to podnośnik nożycowy wciąż ma niewielkie wymiary oraz koła skrętne o dużym kącie wychylenia, co jest dużą zaletą podczas manewrowania w halach lub magazynach. Prostokątny kształt zapewnia stabilność podczas przejazdu, nawet przy znacznym obciążeniu.

Zastosowanie w podnośnikach silnika elektrycznego umożliwia im pracę w zamkniętych pomieszczeniach. Dzięki wyposażeniu w akumulatory nie ma konieczności zasilania zewnętrznego – wbudowany prostownik pozwala na podłączenie urządzenia do sieci 230 V i bezpośrednie ładowania akumulatorów.

Wadą podnośników nożycowych jest możliwość ruchu jedynie w pionie, co zdecydowanie utrudnia pracę przy trudnodostępnych miejscach [12]. Ten rodzaj podnośników spotka się również na podwoziach pojazdów samochodowych, w szczególności w służb utrzymywania tramwajowych sieci trakcyjnych. Jest to możliwe z uwagi na brak konieczności manewrowania podestem poziomo, dzięki jego rozmiarom, możliwości jazdy po torowisku oraz zabudowy podwozia przedziałem ładunkowym.

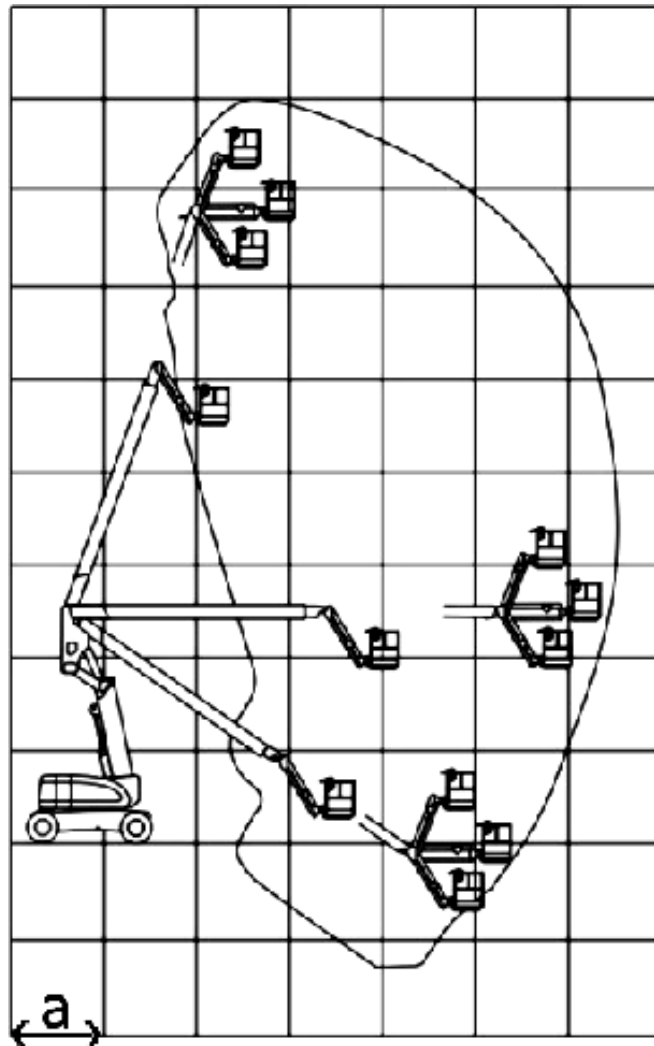


Rys. 3. Podnośnik teleskopowy 400S firmy JLG [11]

W podziale uwzględniającym rodzaj konstrukcji wsporczej kolejną grupę stanowią podesty wysięgnikowe - z wysięgnikiem teleskopowym oraz przegubowym łamanym z elementami teleskopowymi. Te dwa rodzaje podnośników najczęściej montuje się w zabudowie pojazdów samochodowych, z uwagi na łatwość dostępu do newralgicznych miejsc oraz dużą podatność transportową.

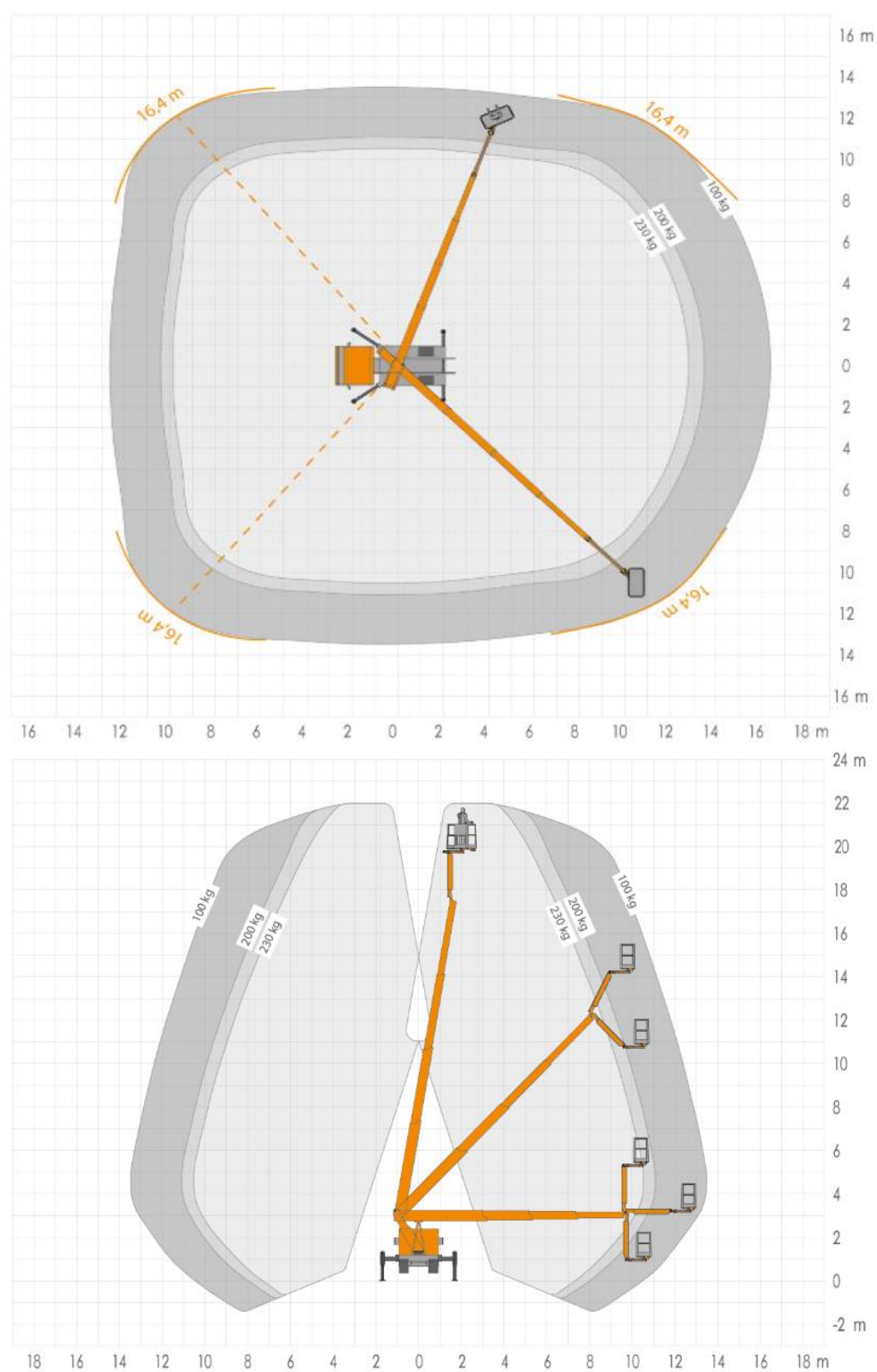
Przykładem wysięgnika przegubowego łamanego z elementem teleskopowym jest podnośnik przedstawiony na rysunku 3. Ramię, zamocowane bezpośrednio do podstawy podnośnika, jest teleskopowe. Ostatnia część, wraz z koszem, w celu ułatwienia dostępu do trudnodostępnych miejsc ma możliwość dodatkowej regulacji na tzw. złamaniu.

Tego rodzaju zawieszenia charakteryzują się znacznie większym zasięgiem roboczym (rys. 4) w kształcie prostokąta w rzucie pionowym oraz kwadratu w rzucie poziomym, co stanowi znaczną przewagę nad podestami z możliwością jedynie ruchu pionowego. Tego typu podnośniki również mają możliwość przemieszczania się z rozłożonym wysięgnikiem przy zachowaniu odpowiednich warunków.



Rys. 4. Obszar roboczy dla podestu ruchomego przejezdnego wysięgnikowego,
gdzie $a = 1 \text{ m}$ [11]

W celu podwyższenia własności użytkowych konstrukcji podestów ruchomych przejezdnym montowanych na pojazdach samochodowych dąży się do obniżenia masy konstrukcji przy jednoczesnym zwiększeniu jej doraźnej wytrzymałości na rozciąganie. Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie przekłada się na udźwig konstrukcji. Na poglądowym rys.5 przedstawiono możliwą różną ilość koszy roboczych umieszczonych na jednym wysięgniku.



Rys. 5. Dążenie do podwyższenia własności użytkowych konstrukcji podestów ruchomych [13]

2.3. Tendencje materiałowe w motoryzacji

Do budowy środków transportu stosuje się nowe gatunki stali o coraz większej wytrzymałości. W literaturze można znaleźć następujący podział stali stosowanych w przemyśle samochodowym [14]:

- a) stale konwencjonalne:
 - stale miękkie (*Mild – Mild steels*),
 - stale tłoczne „bez atomów międzywęzłowych” (*IF – Interstitial Free*),
 - stale tłoczne izotropowe (*IS – Isotropic*),
 - stale typu BH umacniane wydzieleniowo (*BH – Bake Hardenable*),
 - stale CMn (*węglowo-manganowe*),
 - stale wysokowytrzymałe niskostopowe (*HSLA – High Strength Low Alloy*).
- b) nowoczesne stale o wysokiej wytrzymałości (*AHSS – Advanced High Strength Steel*):
 - stale ferrytyczno-martenzytyczne (*DP – Dual Phase*),
 - stale typu CP (*CP – Complex Phase*),
 - stale typu TRIP (*TRIP – Transformation Induced Plasticity*),
 - stale martenzytyczne (*MART – Martensitic*).

W celu dogłębnej analizy tematu dotyczącego budowy środków transportu należy poznać właściwości materiałów, z których są wykonane. Dotyczy to zarówno stali konwencjonalnych, jak i stali nowoczesnych, które coraz powszechniej stosuje się do budowy nadwozi [100]. Związane jest to z faktem, że obecnie ostateczne właściwości mechaniczne elementów konstrukcji nośnej pojazdu uzyskuje się dopiero w ostatniej fazie jego produkcji, czyli podczas łączenia w jeden zespół konstrukcyjny i wypalania lakieru [15, 93]. Przykładowo dopiero po tych operacjach nadwozie spełnia wymagania w zakresie bezpieczeństwa biernego pojazdu.

Stal dwufazowa *DP* składa się z miękkiej fazy ferrytycznej stanowiącej podstawę, w której znajduje się 15 ÷ 70% (objętościowo) martenzytu w postaci „wysepek” [16]. Odszałcenie tych stali lokalizuje się w miękkiej fazie ferrytycznej, powodując szczególnie intensywne umacnianie, co równocześnie z dużym wydłużeniem całkowitym powoduje, że stale *DP* mają znacznie większą wytrzymałość od stali konwencjonalnych o podobnej

granicy plastyczności. Stale *DP* charakteryzują się większą intensywnością umocnienia i wytrzymałością w porównaniu do stali *HSLA*. Stale *DP*, tak jak pozostałe nowoczesne stale na blachy tłoczne wykazują efekt umocnienia starzeniowego, który powoduje przyrost granicy plastyczności po kolejnych etapach wytwarzania nadwozia (tłoczenie, wypalanie lakieru) [101]. Intensywność umocnienia stali dwufazowych jest większa niż dla konwencjonalnych stali. Stale te mogą uzyskać po umocnieniu starzeniowym wytrzymałość dochodzącą do 1000 MPa, a ich zgrzewalność uważa się za dobrą [14].

Stal typu *TRIP* ma ośnowę ferrytyczną, wewnątrz której znajdują się twarde struktury: martenzyt i bainit. W stalach tych można również zaobserwować austenit szczątkowy w ilości większej niż 5% (objętościowo). Są to tak zwane fazy *MAC*: martenzyt, austenit szczątkowy, węgliki [16, 98].

Podczas odkształcenia plastycznego na zimno stali *TRIP*, austenit szczątkowy intensywnie przekształca się w martenzyt, co powoduje wzrost stopnia umocnienia przy większych odkształceniach. Stale typu *TRIP* wykazują większą w stosunku do stali *DP* intensywność umocnienia przy znacznych odkształceniach. Intensywność umocnienia dla stali typu *TRIP* jest istotnie większa niż dla konwencjonalnych stali. Powoduje to, że stale *TRIP* posiadają przewagę nad stalami konwencjonalnymi szczególnie wtedy, gdy przy projektowaniu końcowych właściwości mechanicznych elementu uwzględnia się efekt dużego umocnienia odkształceniowego w całym procesie wytwarzania nadwozia. Stal typu *TRIP* może zatem wykazywać właściwości wymagane dla elementów środków transportu przewidzianych do absorbowania dużej energii zderzenia. Zawarte w stali *TRIP* dodatki stopowe obniżają ich podatność do spawania i zgrzewania [14].

Stale *CP* należą do grupy stali o stosunkowo dobrej odkształcalności przy dużej wytrzymałości na rozciąganie. Mikrostruktura tej stali składa się z bardzo drobnoziarnistego ferrytu z dużą zawartością struktur twardych, które powodują umacnianie wydzieleniowe [16]. Stale *CP* osiągają wytrzymałość na rozciąganie dochodzącą do 800 MPa. Przy odkształceniach i prędkościach odkształcenia, które są charakterystyczne dla warunków panujących podczas zderzenia pojazdów, stale te pochłaniają najwięcej energii i wskazane jest zastosowanie tych stali na takie elementy, których zadaniem jest pochłanianie dużej ilości energii w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych [14-16].

W stalach martenzytycznych austenit występujący w czasie walcowania na gorąco lub wyżarzania ulega szybkiemu chłodzeniu i prawie całkowicie przemienia się w martenzyt. Stal martenzytyczna zawiera głównie martenzyt listwowy. Stal

martenzytyczna wykazuje maksymalną wytrzymałość około 1500 MPa, a dla poprawy ciągliwości jest zwykle poddawana zabiegowi odpuszczania. Po tym zabiegu może wykazywać znaczną odkształcalność, nawet przy ekstremalnie niekorzystnych obciążeniach [14,15].

Stale typu *IF* zawierają w roztworze stałym bardzo małe ilości pierwiastków międzywęzłowych, głównie węgla i azotu. Stale *IF* należą do grupy stali ultraniskowęglowych o zawartości: $C < 0,005\%$, $N < 0,005\%$, $S < 0,005\%$. Stale te zapewniają uzyskanie blach niestarczających się w gatunkach o najwyższej tłoczności. Pierwotnie były one stosowane głównie w przemyśle samochodowym. W trakcie wypalania powłoki lakierowej gotowego wyrobu następuje dodatkowy wzrost właściwości mechanicznych (o około $30 \div 50$ MPa) [14,15].

Stale typu *BH* należą do grupy gatunków stali ultraniskowęglowych i charakteryzują się podobnym do stali typu *IF* składem z nieco wyższym poziomem zawartości C i N. Pozostawienie w roztworze stałym niewielkiej, kontrolowanej ilości węgla ($15 \div 20$ ppm) może powodować dodatkowe umacnianie stali (w tak zwanym procesie „dislocation locking”) podczas operacji termicznego utwardzania lakieru nadwozia. Granica plastyczności w blachach ze stali typu *BH* rośnie od poziomu 200 MPa w stanie surowym, do 250 MPa po odkształceniu plastycznym i do 300 MPa po wypalaniu lakieru [14,15].

Wytrzymałość (500-600 MPa) na rozciąganie stali węglowo-manganowych oraz stali podwyższonej wytrzymałości stosowanych na elementów konstrukcji nośnych pojazdów jest nie wystarczająca. W ostatnim dwudziestoleciu coraz większą rolę w nowoczesnych odpowiedzialnych konstrukcjach odgrywają stale DP, TRIP, CP. Stale te mają wytrzymałość na poziomie od 600 MPa – 900 MPa i więcej, ale nie są uznawane za materiały o ograniczonej spawalności.

Na przestrzeni ostatnich lat w motoryzacji coraz większą rolę odgrywają stale o wysokiej wytrzymałości typu AHSS, HSLA, BH. Ważną rolę w budowie środków transportu zaczynają odgrywać stale AHSS, stosowane na elementy podestów ruchomych [87, 94].

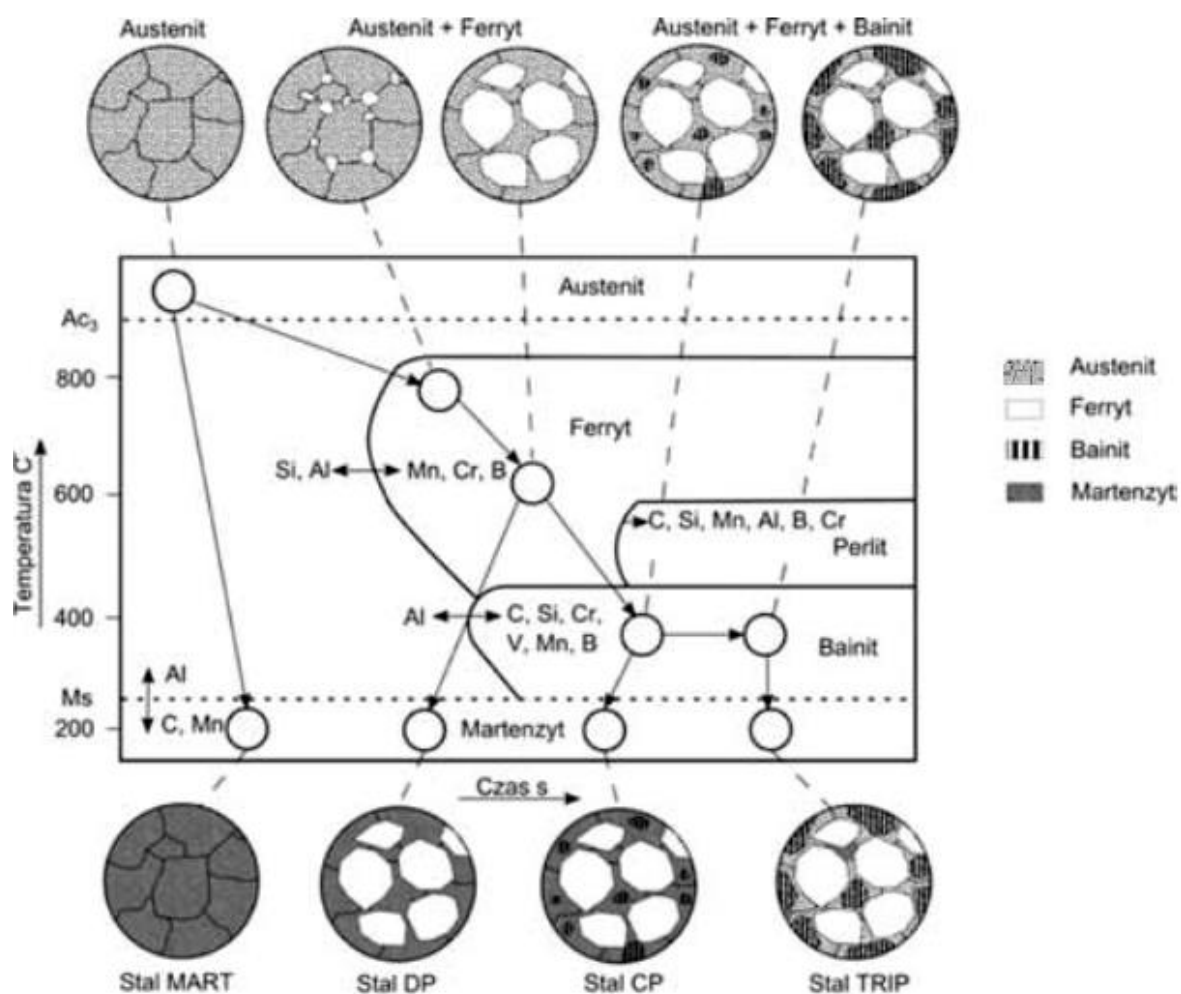
Pierwszym etapem procesu obróbki stali jest odkształcenie plastyczne w wyniku walcowania na gorąco (w przypadku stali CP i MART) w temperaturze trwałości austenitu (850°C) lub walcowanie na zimno (w przypadku stali DP i TRIP). Drugim etapem procesu jest walcowanie z kontrolowanym chłodzeniem. W produkcji stali MART od razu po walcowaniu blach na gorąco przeprowadzane jest hartowanie martenzytyczne. Proces

technologiczny stosowany do obróbki w linii produkcyjnej polega na ciągłym walcowaniu na gorąco stali w zakresie występowania czystego austenitu, a następnie bardzo szybkim chłodzeniu wodą [18, 20].

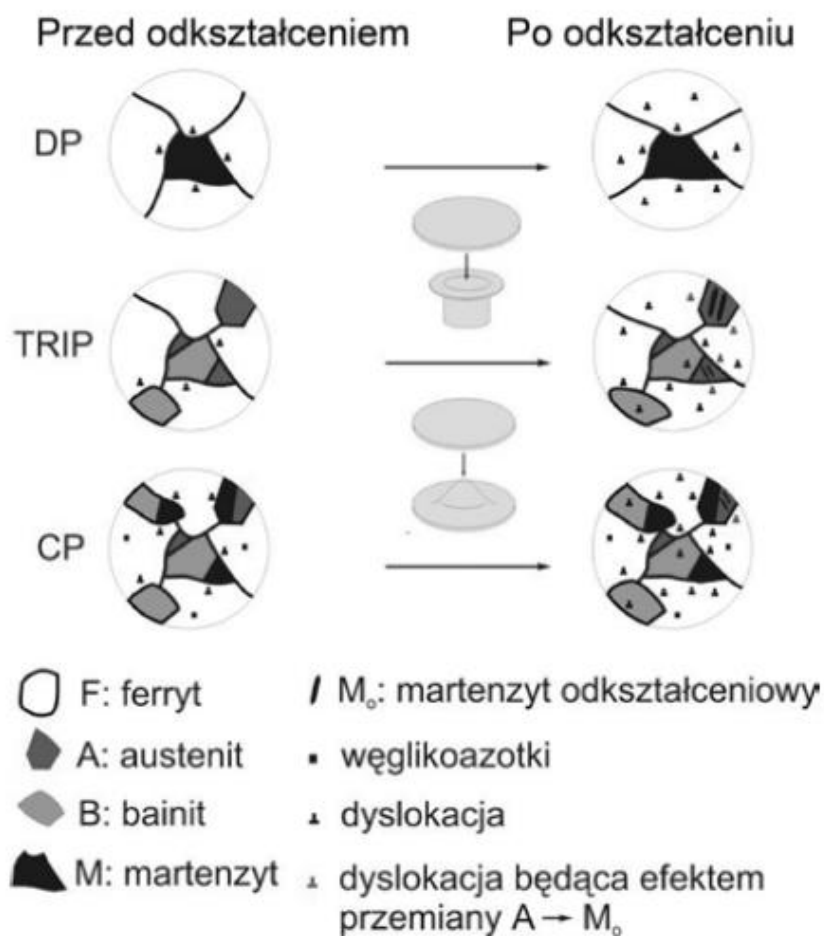
W przypadku dalszego wyżarzania kontrolowany jest stosunek ilości względnej austenitu i ferrytu. W celu otrzymania mikrostruktury stali DP przeprowadzane jest gwałtowne chłodzenie z temperatury austenitizacji, aby nie zaszła dalsza przemiana powodująca pojawienie się bainitu bądź perlitu. Wskutek tego zachodzi przemiana austenitu w martenzyt. Stale te produkowane są przez kontrolowane chłodzenie z fazy austenitu (z wyrobów walcowanych na gorąco) albo ze stali ferrytyczno-austenitycznych (wyżarzanych i walcowanych na zimno, a następnie wysoko odpuszczanych).

W celu uzyskania struktury trójskładnikowej – typowej dla stali CP, wyżarzanie realizowane jest tak, aby z pozostałego austenitu częściowo wytworzyć strukturę bainityczną, a częściowo martenzytyczną. Otrzymana struktura ma lepsze właściwości mechaniczne (większa wartość wydłużenia względnego) [91].

Produkcja stali TRIP przebiega podobnie jak stali CP, lecz podczas ostatniej przemiany zachowane są warunki dla przebiegu przemiany izotermicznej w celu dalszego rozdrobnienia ziarna i stabilizacji austenitu w wyniku wzbogacania go w węgiel. Zapewnia to stabilność mikrostruktury w temperaturze pokojowej. Składniki stopowe: mangan, chrom, aluminium, bor, krzem i molibden mają wpływ na początek przemian austenitu (w ferryt, perlit, martenzyt, bainit) podczas chłodzenia. [18,20]. Wymienione przemiany austenitu przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Schemat przemian fazowych przy chłodzeniu stali [17]



Rys. 7. Przemiany austenitu przy chłodzeniu stali [17]

Stale martenzytyczne MART są stalami konstrukcyjnymi niskostopowymi, walcowanymi na zimno. Charakteryzują się bardzo wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie. Wydłużenie względne jest wystarczające do kształtowania na zimno. Do spajania blach ze stali martenzytycznej można używać tych samych metod łączenia jak dla standardowych blach stalowych, dzięki małej ilości dodatków stopowych przy zachowaniu dużej wytrzymałości [97].

Stale o wysokiej wytrzymałości stosuje się na tarcze sprzęgła, narzędzia tnące, podpory podestów ruchomych, sprzęt wojskowy opancerzony oraz elementy zwiększające bezpieczeństwo w pojazdach samochodowych [18].

W tabelicy 1 przedstawiono skład chemiczny, a w tabelicy 2 właściwości mechaniczne stali martenzytycznych różnych producentów.

Tabl. 1. Skład chemiczny wybranych stali martenzytycznych MART [18]

stal	skład chemiczny %											
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Al.	Nb	B	Ni	Mo
DOCOL 900M	0,05	0,20	2,00	0,010	0,002	0	0	0,04	0	0	0	0
DOCOL 1000DPZE	0,15	0,50	1,50	0,010	0,002	0	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 1100M	0,09	0,20	1,70	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 1200M	0,11	0,20	1,70	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 1300M	0,20	0,20	1,50	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 1400M	0,17	0,20	1,40	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 1500M	0,21	0,20	1,10	0,010	0,002	0,025	0	0,04	0,015	0	0	0
DOCOL 900MZE	0,05	0,20	1,90	0,010	0,002	0,000	0	0,04	0	0	0	0
DOCOL 1200MZE	0,11	0,20	1,70	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
DOCOL 1400MZE	0,17	0,20	1,40	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
DOCOL 1500MZE	0,21	0,20	1,10	0,010	0,002	0,035	0	0,04	0	0,002	0	0
MS-W 1200	0,18	0,80	2,00	0,020	0,010	0,050	1	0	0,1	0	0	0
Optim 900 QC	0,10	0,25	1,15	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Optim 960 QC	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Optim 1100 QC	0,15	0,30	1,25	0,020	0,010	0,070	0	0	0	0	0	0
Raex 300	0,18	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1,5	0	0	0,005	0,4	0,5
Raex 400	0,25	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1,5	0,06	0	0,005	0,7	0,5
Raex 450	0,26	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1	0,06	0	0,005	0,7	0,5
Raex 500	0,30	0,70	1,70	0,025	0,015	0	1	0,06	0	0,005	0,8	0,5
Ramor 400	0,24	0,70	1,50	0,020	0,015	0	1	0	0	0,005	1	0,7
Ramor 500	0,32	0,70	1,50	0,020	0,015	0	1	0	0	0,005	2	0,7
SZMS1200	0,18	0,15	2,00	0,020	0,010	0	0,6	0,02	0	0	0	0

Stale dwufazowe DP (Dual-Phase Steel) mają ośnowę ferrytyczną z wtrąceniami martenzytu, jednakże po obróbce cieplnej zostaje ok. 5÷10% austenitu szcążkowego, który jest metastabilny. Nadaje on stali skłonność do umocnienia podczas pracy (ruchy dyslokacji w krystalicznej strukturze metalu). W jednej fazie ferryt zapewnia formowalność, a w drugiej fazie martenzyt (20÷70%) zwiększa wytrzymałość. Stale dwufazowe mają umowną granicę plastyczności sięgającą 800 MPa [99]. Na początku procesu formowania umacniają się najbardziej i granica ta może osiągnąć 1000 MPa. W miejscach odkształceń rozszerzają się obszary występowania martenzytu, polepszając właściwości stali. Prędkość odkształcenia i duże wydłużenie względne nadaje stali DP większą wytrzymałość niż konwencjonalnym stalom o podobnej plastyczności [17, 18].

Tabl. 2. Właściwości mechaniczne wybranych stali martenzytycznych [18]

stal	właściwości mechaniczne				
	$R_{e \min}$ [MPa]	$R_{e \max}$ [MPa]	$R_{m \min}$ [MPa]	$R_{m \max}$ [MPa]	A_{80} [%]
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
MS-W 1200	900	-	1200	1400	5
Optim 900 QC	900	1000	1050	1150	11
Optim 960 QC	960	1060	1080	1180	10
Optim 1100 QC	1100	1200	1280	1380	8
Optim 1500 QC	1460	-	1650	1850	5
Raex 300	900	-	1000	-	11
Raex 400	1000	-	1250	-	10
Raex 450	1200	-	1450	-	8
Raex 500	1250	-	1600	-	8
Ramor 400	1100	-	1300	-	8
Ramor 500	1450	-	1700	-	7
SZMS1200	900	1050	1200	1450	5

Napężenia wewnętrzne niwelowane są przez umacnianie drugiej fazy w martenzyt, co powoduje niższy stosunek R_e/R_m . Podczas zderzenia energia jest lepiej pochłaniana przez materiał i są mniejsze skutki odkształceń. Stale DP wskutek ubogiej zawartości pierwiastków stopowych charakteryzują się ograniczoną spawalnością, są dobrze formowalne na zimno; podczas walcowania czy operacji gięcia zaleca się przeprowadzać je poprzecznie do kierunku walcowania.

Stale te znajdują zastosowanie jako rury w wózkach dziecięcych lub ramach od rowerów, zwiększają także bezpieczeństwo w samochodach, gdzie wykonywane z nich są wzmocnienia zderzaków i prowadnice foteli, fotelików dziecięcych, słupki drzwiowe i koła. Dzięki wysokiej wytrzymałości oraz dużej twardości wpływającej na odporność na ścieranie, wykonywane są z nich również: tarcze sprzęgła, maszyny do cięcia żywopłotów, noże, łańcuchy na piły [17, 18].

W stalach DP stosuje się dodatki stopowe takie jak: mangan, chrom, molibden i nikiel, które zwiększają hartowność stali. Zwiększając udział węgla, zwiększa się ilość martenzytu. od zawartości krzemu i fosforu zależy podatność stali na zgrzewanie oporowe i spawalność – brak pęknięć. Stale DP o najwyższych właściwościach mechanicznych mogą wymagać zmiany technologii spajania termicznego.

Stale complex CP (Complex-Phase Steel), których granica na rozciąganie wynosi do 1000 MPa, są integralną częścią nowej generacji zaawansowanych stali o wysokiej wytrzymałości używanych w przemyśle motoryzacyjnym [102]. Absorbują więcej energii niż już omówione, są mniej podatne na odkształcenia, wykazują się wytrzymałością resztkową po obciążeniu udarowym. Mikrostruktura podobna jest do mikrostruktury stali TRIP z wyjątkiem występowania austenitu.

Stale CP składają się z drobnoziarnistych ziaren ferrytu, umacnianych przez bainit i martenzyt. Stale te mają mniejsze ilości dodatków stopowych takich jak niob, tytan i wolfram. Stal może być dodatkowo utwardzana wydzieleniowo. Stale te są stosowane do budowy zderzaków jako wzmocnienie właściwe, na którym są osadzone przekładki styropianowe i okładziny z tworzywa sztucznego. Dzięki wytrzymałości resztkowej stali i elastycznych tworzyw sztucznych doskonale absorbują energię kolizji [17, 18].

Struktura stali TRIP opiera się na osnowie ferrytu z niestabilnym austenitem szczątkowym (> 5%) oraz kompozycji twardych struktur bainitu i martenzytu w różnych ilościach. Struktura wielofazowa stali TRIP zapewnia równowagę właściwości wytrzymałościowych plastycznych. Ilość austenitu szczątkowego w końcowej mikrostrukturze można regulować zawartością manganu, aluminium i węgla.

Efektem TRIP jest umocnienie ferrytu martenzytem tworzącym się z austenitu szczątkowego pod wpływem energii powodującej odkształcenie plastyczne. Umocnienie się stali ma charakter długofalowy w całym zakresie odkształceń plastycznych. Efekt TRIP zależy od stabilności austenitu szczątkowego. Jeśli zawartość węgla jest niska, to przemiana następuje natychmiast, bez dużych odkształceń podczas formowania.

W przemyśle motoryzacyjnym potrzebne są materiały na detale podatne na tłoczenie, jednocześnie dobrze spawalne i zgrzewalne. Stale TRIP mogą być zaprojektowane z myślą o konkretnym elemencie, który będzie formowany z arkusza, bądź taśmy stalowej. Taki element jest podatny na formowanie metodą obróbki plastycznej (dzięki większej zawartości węgla stal jest stabilna podczas tłoczenia), co umożliwia otrzymanie skomplikowanych kształtów bez ubytku możliwości do późniejszej TRIP (Transformacji Indukowanej Plastycznością) [17, 18].

2.4. Stale AHSS – właściwości i zastosowanie

Wyjątkowe właściwości mechaniczne stali o wysokiej wytrzymałości AHSS (AHSS – Advanced High-Strength Steel) są efektem umocnienia w wyniku przemian fazowych w zakresie temperatur współistnienia ferrytu i przechłodzonego austenitu w warunkach odkształcenia plastycznego lub szybkiego chłodzenia z austenitu w celu utworzenia struktury martenzytycznej [18].

Stale AHSS stały się szczególnie atrakcyjne w produkcji podestów ruchomych z trzech ważnych powodów [18]:

- dużej wytrzymałości na rozciąganie, do 1700 MPa,
- dużej granicy plastyczności, do 1450 MPa,
- wydłużenia A_{80} , do 10%.

Stale o wysokiej wytrzymałości stosunkowo łatwo poddają się obróbce plastycznej i obróbce skrawaniem. Wzrost zastosowania nowoczesnych stali AHSS w przemyśle motoryzacyjnym wynika z możliwości zmniejszenia grubości blach karoseryjnych z jednoczesnym polepszeniem właściwości mechanicznych konstrukcji w porównaniu z zastosowaniem konwencjonalnych stali. Zastosowanie stali AHSS powoduje zmniejszenie masy konstrukcji oraz mniejsze zużycie energii na jej wytworzenie.

Stale o wysokiej wytrzymałości znajdują zastosowanie nie tylko w produkcji pojazdów, ale także urządzeń dźwigowych, wysięgników maszyn, urządzeń przeładunkowych do transportu morskiego, maszyn budowlanych i ram wózków kolejowych. Istotną zaletą tej grupy stali jest również ich umiarkowana cena wynikająca z małej liczby dodatków stopowych, możliwość zmniejszenia przekrojów konstrukcji oraz dobre właściwości technologiczne, w tym skrawalność oraz ograniczona spawalność [18].

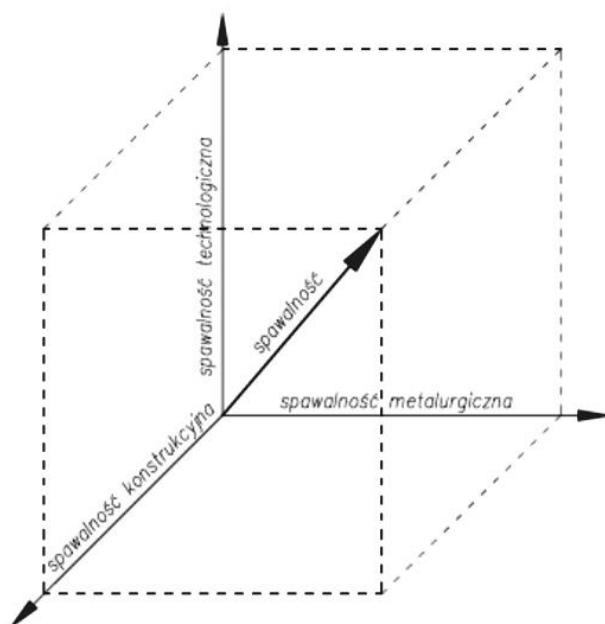
Geneza rozwoju badań prowadzonych nad stalami AHSS wynika z konieczności zwiększenia wytrzymałości i sztywności kluczowych elementów pojazdu mających wpływ na bezpieczeństwo pasażera. Przemiana austenitu szczątkowego w martenzyt podczas odkształcania stali powoduje pochłanianie energii kinetycznej, co ma znaczenie w przypadku kolizji drogowych [13, 19-21].

Stale AHSS swoją wytrzymałość zawdzięczają połączeniu zróżnicowanych struktur, takich jak bainit, ferryt, martenzyt i austenit szczątkowy. Stale AHSS pozostają plastyczne pomimo obecności w nich martenzytu i bainitu.

2.5. Spawalność stali

Spawalność można zaliczyć do pojęć technicznych trudnych do zdefiniowania. Pojęcie spawalności obejmuje zespół czynników, których wypadkowa decyduje o przydatności danego materiału do wykonania określonej konstrukcji spawanej. Czynniki wpływające na spawalność stali można podzielić na trzy grupy.

Do pierwszej zalicza się problemy dotyczące spawalności metalurgicznej – m.in. skład chemiczny, stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi, sposób prowadzenia i wykańczania wytopu oraz struktury wynikające z obróbki plastycznej lub cieplnej. Druga grupa to problemy dotyczące spawalności konstrukcyjnej, a więc sztywność konstrukcji, grubość elementów, rozmieszczenie i grubość spoin, koncentracja naprężeń. Trzecia grupa to czynniki technologiczne – np. metoda spawania, energia źródła ciepła lub prędkość spawania [22-14]. Graficzną interpretacją spawalności jest wektor, będący wypadkową tych trzech spawalności (rys. 8).

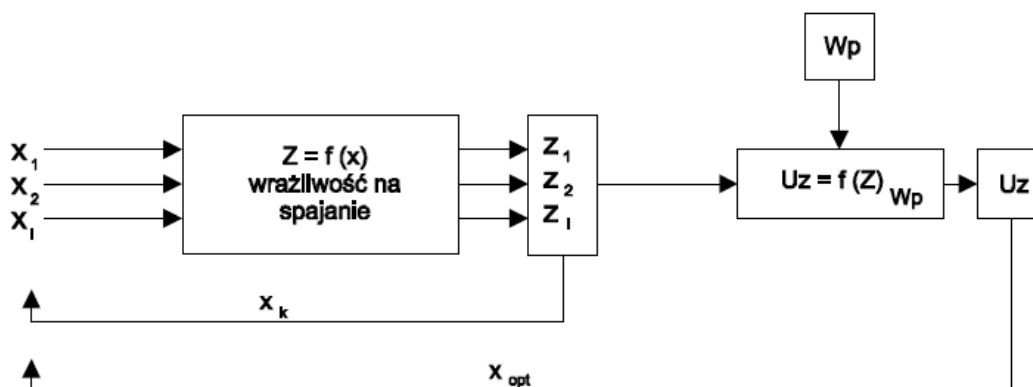


Rys. 8. Graficzna interpretacja spawalności jako wypadkowej ze spawalności metalurgicznej, konstrukcyjnej i technologicznej [25]

Spawalność można zdefiniować jako zdolność stali do tworzenia w określonych warunkach złączy spawanych o właściwościach zbliżonych do takich, jakie ma materiał rodzimy [24]. W latach 60. XX w Międzynarodowym Instytucie Spawalnictwa opracowano definicję spawalności przyjętą przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO). Zgodnie z jej brzmieniem uważa się, że materiał metaliczny jest spawalny w żądanym stopniu za pomocą określonej metody i dla danego rodzaju konstrukcji, jeśli nadaje się, przy zastosowaniu środków ostrożności, odpowiadających temu stopniowi - do wykonania połączeń między dwoma elementami. Połączenia te mają zapewnić ciągłość metaliczną, a więc utworzyć złącze spawane, które przez swoje cechy lokalne i następnie ogólne spełniają żądane wymagania będące podstawą ich oceny [26].

Wśród krajowych definicji spawalności można wymienić dwie najważniejsze. Jedna z nich spawalność pojmuje jako zdolność do tworzenia za pomocą spawania złączy o wymaganych właściwościach fizycznych, zdolnych do przenoszenia obciążeń przewidzianych dla danego rodzaju konstrukcji, do wykonania której dana stal ma być użyta [27]. Druga pod pojęciem spawalności rozumie prawdopodobieństwo zdarzenia, polegającego na tym, że złącza spawane wykonane z danego metalu, za pomocą określonego procesu technologicznego spawania, będą pracowały w sposób niezawodny w wymaganych warunkach eksploatacyjnych przez zadany okres [28].

Zgodnie z normą PN-84/M-69005 *Spawalnictwo. Spajanie metali. Terminologia* [29], spajalność (pojęcie nadrzędne, obejmujące: spawalność, zgrzewalność i lutowność) wyraża przydatność metalu o danej wrażliwości na spajanie, do utworzenia w określonych warunkach spajania złącza metalicznie ciągłego o wymaganej użyteczności. Z kolei wrażliwość na spajanie wyraża reakcję metalu na procesy wywołane określonymi warunkami spajania. Warunki spajania obejmują zespół czynników technologicznych i konstrukcyjnych oddziałujących na spajane złącze w czasie jego wykonywania. Użyteczność jest wynikiem własności złącza i określa możliwości jego wykorzystania w danych warunkach pracy. Na rys. 9 przedstawiono powyższą definicję w sposób graficzny.



Rys. 9. Graficzne przedstawienie spawalności wg [29], gdzie: x_i – warunki spawania, z_i – właściwości złącza, W_p – warunki pracy, U_z – użyteczność złącza

Stal przeznaczona na konstrukcje spawane, oprócz podstawowych właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie R_m , granica plastyczności R_e , wydłużenie procentowe po rozerwaniu A , przewężenie procentowe przekroju Z oraz uderność KC) musi zapewnić możliwość uzyskania połączeń spawanych bez pęknięć i o wymaganych właściwościach.

Jednym z podstawowych wskaźników charakteryzujących spawalność metalurgiczną stali jest równoważnik chemiczny węgla CEV, charakteryzujący skłonność stali do hartowania się i tworzenia pęknięć. Natomiast spawalność technologiczną i konstrukcyjną ocenia się na podstawie odpowiednich wskaźników lub prób pękania gorącego i zimnego [22-24].

Jedną z głównych przyczyn pęknięć spoin, obok wad materiałowych metalu spoiny i wad metalu rodzimego, są niekorzystne zmiany w strefie wpływu ciepła (SWC). Zmiany te powodują niejednorodność właściwości mechanicznych złącza spawanego, a ocena jakościowa i ilościowa tych zmian jest niezbędna, aby w sposób poprawny dobrać parametry wykonania połączenia, a w efekcie zmniejszyć wrażliwość na naprężenia własne materiału i szybkie zmiany temperatury.

Znane są różne rodzaje technologicznych i eksperymentalnych prób jakościowych umożliwiających ocenę skłonności stali do pękania jako objawu niedostatecznej spawalności. Należą do nich badania eksperymentalne rzeczywistych połączeń spawanych, badania symulacyjne, badania dylatometryczne, a także testy spawalności [22].

Badania eksperymentalne umożliwiają odzwierciedlenie warunków panujących w połączeniach spawanych. Jednakże większość z nich jedynie w sposób przybliżony odtwarza warunki rzeczywiste i zmusza do prowadzenia badań na modelowych połączeniach spawanych [103]. Wymagają one odpowiedniego wyposażenia badawczego, dużej pracochłonności, co w połączeniu z niewielkimi wymiarami próbek sprawia, że stają się trudne i kłopotliwe do przeprowadzania.

Zaproponowano system wskaźników spawalności stali, w którym wyróżnia się trzy grupy wskaźników. Pierwsza z grup obejmuje wskaźniki wyznaczone analitycznie na podstawie składu chemicznego stali, a druga i trzecia grupa wskaźników wyznaczana jest doświadczalnie. W skład grupy drugiej wchodzi wskaźniki określające skłonność do powstawania pęknięć. Grupa trzecia zawiera wskaźniki właściwości SWC, takie jak kruchość w wyniku zachodzących przemian w procesie spawania oraz kruchość w wyniku starzenia [22].

2.5.1. Obliczeniowy sposób oceny spawalności stali

Pierwsza grupa wskaźników spawalności określana jest na podstawie składu chemicznego stali. Znajomość składu chemicznego pozwala określić równoważnik węgla CEV. Obrazuje on intensywność oddziaływania składników stopowych na tworzenie kruchych, utwardzających struktur (martensyt i bainit) w SWC. Wyznacza się go z zależności (1), opracowanej przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa [22]:

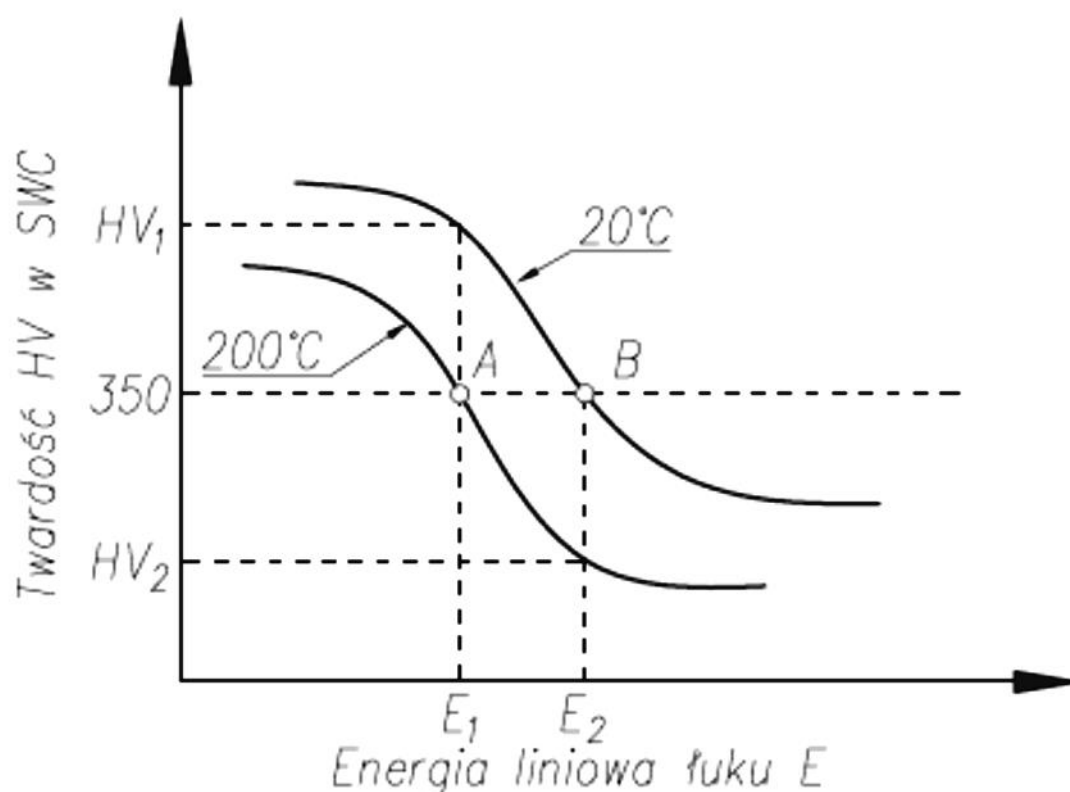
$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (1)$$

Przy użyciu równoważnika węgla CEV dla danej stali można wstępnie rozeznaczyć jej spawalność [24]. Kiedy obliczona wartość CEV na podstawie wzoru (1) nie przekracza 0,42%, to stal uważa się za łatwo spawalną, a uzyskanie złącza bez zanieczyszczeń i pęknięć nie wymaga stosowania specjalnych środków ostrożności (dla stali łatwo spawalnych dodatkowo procentowa zawartość węgla nie powinna być większa niż 0,25%). Gdy współczynnik CEV zawiera się w przedziale 0,42–0,6%, wówczas stal zalicza się do grupy stali średnio spawalnych. Wymagane jest wtedy stosowanie środków ostrożności, takich jak: zmniejszenie szybkości spawania czy podgrzanie materiału przed spawaniem. Dotyczy to

jednak elementów o grubościach ścianek powyżej 20 mm (elementy o grubości do 20 mm nie wymagają ww. zabiegów). Przy wartościach współczynnika CEV większych od 0,6% stal uznaje się za trudno spawalną, a więc wymagającą stosowania dodatkowych zabiegów niezależnie od grubości łączonych elementów (takich jak dla stali średnio spawalnych, a także dodatkowo obróbki cieplnej po spawaniu) [104].

Jednym z najczęściej stosowanych czynników poprawiających spawalność jest podgrzanie materiału przed spawaniem. Im większa szybkość chłodzenia połączenia spawanego, tym większe prawdopodobieństwo zahartowania się materiału w SWC. Wpływ większej energii liniowej łuku (ilości ciepła potrzebnego do wykonania spoiny) i podgrzania wstępnego na twardość w SWC pokazano na rys. 10.

Jeżeli za maksymalną dopuszczalną twardość przyjmiemy 350 HV, to prosta BE_2 w przypadku niepodgrzewania materiału dzieli zakres energii liniowych łuków na zakres, w którym podgrzewanie nie jest wymagane (na prawo od BE_2). Natomiast na lewo od BE_2 określa się, że podgrzewanie wstępne jest wymagane [22].



Rys. 10. Schemat wpływu energii liniowej łuku E i podgrzewania przed spawaniem na twardość w SWC [22]

Jeżeli materiał zostanie wstępnie podgrzany do temperatury 200° C, to minimalna energia liniowa łuku, dla której twardość nie przekracza 350 HV spada – obrazuje to linia AE₁. Temperaturę, do której należy podgrzać elementy przed spawaniem, wyznacza się z zależności (2):

$$T = 350 \cdot \sqrt{\text{CEV} \cdot (1 + 0,005 \cdot g) - 0,25} \quad (2)$$

gdzie:

g – grubość blachy [mm].

Na podstawie równoważnika węgla CEV można obliczyć również twardość w SWC w jednostkach twardości Vickersa z zależności:

- dla spoin nie poddanych obróbce – cieplnej po spawaniu:

$$\text{HV}_{\min} = 1200 \cdot \text{CEV} - 260 \quad (3)$$

- dla spoin poddanych obróbce cieplnej po spawaniu:

$$\text{HV}_{\max} = 1200 \cdot \text{CEV} - 200 \quad (4)$$

Maksymalna twardość HV_{max} w SWC nie powinna przekraczać 250 HV dla materiału łatwo spawalnego, a dla materiału średnio spawalnego powinna zawierać się w granicach 250–450 HV. Gdy HV_{max} przekroczy 450 HV, materiał uznaje się za niespawalny [25].

Oprócz przedstawionych wyżej znanych jest wiele innych zależności matematycznych umożliwiających obliczeniowe wyznaczenie wskaźników oceny skłonności do pękania: gorącego, zimnego, lamelarnego oraz wyżarzeniowego (relaksacyjnego) [22, 30]

Większość wskaźników opisana jest dwustopniową skalą (skłonna, odporna) lub trójstopniową skalą (skłonna, częściowo odporna, odporna), przez co stanowią mało

precyzyjną i szacunkową ocenę teoretyczną spawalności. Mimo to podkreśla się, że są tanim, chętnie wykorzystywanym i przydatnym narzędziem do oceny spawalności stali, gdyż pozwalają one przewidywać wyniki prób technologicznych i wstępnie dobierać warunki spawania [25].

Metody obliczeniowe używane są głównie do określania spawalności stali niestopowych, drobnoziarnistych i niskostopowych. W przypadku stali średnio i wysokostopowych konieczne jest wykorzystanie eksperymentalnych metod badania spawalności stali. Z punktu widzenia problematyki spawalności wyróżnia się próby badania spawalności metalurgicznej, konstrukcyjnej i technologicznej [23].

Przemiany fazowe zachodzące w materiale rodzimym na skutek cyklu cieplnego spawania sprawdzane są w próbach spawalności metalurgicznej. Do przykładowych prób oceny spawalności w tym zakresie należą m.in.: próby mechaniczne, statyczne lub dynamiczne prowadzone na złączach doczołowych (np. próba rozciągania, zginania, udarności), próby napawania w warunkach zmieniającej się mocy liniowej łuku, a także próby pomiaru twardości SWC. W szczególności te ostatnie określają wskaźnik niejednorodności właściwości mechanicznych złącza, jakim jest rozkład twardości w SWC.

Pomiary twardości wykonuje się przeważnie próbą Vickersa przy małej sile obciążającej. Jeżeli złącze wykazuje nadmierną twardość w tej strefie (znaczne zróżnicowanie względem twardości materiału rodzimego – większe niż 20 % wywołuje tzw. karb strukturalny), to stal może wykazywać skłonności do tworzenia pęknięć na skutek dużej hartowności. Próbę tę wykonuje się zgodnie z PN-EN 1043, mierząc twardość w spoinie, SWC i materiale rodzimym [31].

Próby spawalności konstrukcyjnej określające skłonność do pęknięcia w procesie spawania to odpowiednio dla [25]:

- pęknięcia na gorąco, np. próba Varestrainta (próba zmiennego odkształcenia), próba Blancheta (umożliwiająca badanie skłonności do pęknięć przy spawaniu blach cienkich) lub próba kołowa segmentowa (do badania blach grubych),
- pęknięcia zimnego, np. próby złączy utwardzanych (próba CTS – próba regulowanej ostrości cieplnej, próba krzyżowa i inne), próby z regulowanymi naprężeniami (np. próba kołkowa lub próba TRC z kontrolowaną sztywnością złącza),
- pęknięcia lamelarnego (miarą skłonności do pęknięcia jest wartość przewężenia Z próbki pobranej w kierunku grubości blachy), np. próba Z lub okienkowa,
- pęknięcia wyżarzeniowego, np. próba Tanaki lub typu H.

Próby spawalności technologicznej polegają na określeniu wpływu czynników związanych z technologią wykonania i parametrami spawania, tj. rodzaju procesu i szybkości spawania lub średnicy elektrody. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych technologicznych prób jakościowych jest próba teowa, która pozwala na określenie właściwego doboru elektrod na podstawie analizy pęknięć spoin pachwinowych w specjalnie wykonanym złączy teowym [32].

Podczas dobierania elektrod oraz ustalania technologii spawania, wykorzystywana jest również próba Tekken umożliwiająca jakościową ocenę odporności złącza na powstanie pęknięć na zimno [22, 12]. Wspólną cechą wszystkich prób jest stworzenie warunków sprzyjających powstawaniu pęknięć w celu wskazania zabiegów, które mogą zmniejszyć wrażliwość na spawanie.

Najtrudniejsze do spawania ze wszystkich stali AHSS są stale martenzytyczne. Strefa przyległa do strefy wpływu ciepła jest podatna na pęknięcia niezależnie od wstępnego podgrzania [57].

Powierzchnie spawane powinny być czyste i suche, żeby zapobiegać pęknięciom gorącym [57]. Materiały spawalnicze powinny mieć zbliżone właściwości wytrzymałościowe do materiału łączonego oraz zapewniające niską zawartość wodoru w spoinie. Podczas spawania cienkich blach należy zmniejszyć energię liniową spawania. Ponieważ ciepło ze spoiny nie ma przestrzeni, by się rozproszyć, mogą powstać niskowytrzymałe pasma wokół złączy (nie można dopuścić do odpuszczania stali). Czas stygnięcia $t_{8/5}$ nie powinien przekraczać 4 s [18]. Czas $t_{8/5}$ oblicza się na podstawie normy PN-EN ISO 13916:1999.

W przybliżeniu, czas ten wynosi:

- dla stali niestopowych $t_{8/5} = 10$ s,
- dla stali drobnoziarnistych $t_{8/5} = 15 \div 20$ s,
- dla stali o wysokiej wytrzymałości, ulepszonych cieplnie $t_{8/5} = 25$ s.

W tym czasie zachodzą najważniejsze przemiany fazowe w warunkach spawalniczych.

W literaturze zaleca się, by konstrukcje ze stali MART projektować z uwzględnieniem lokalizacji złączy, czyli tam, gdzie występują najmniejsze naprężenia. Głównym problemem jest wysoka twardość stali sięgająca ponad 300 HBV. Z przeprowadzonych testów zderzeniowych wynika, że spoina pochłania występujące siły bez pęknięć (spoina zgrzewana indukcyjnie prądami wysokiej częstotliwości HF-welding).

Elementy konstrukcyjne wykonane ze stali martenzytycznej, pomimo wysokiej wytrzymałości, wykazują również dość dobrą ciągliwość [18].

W spajaniu stali DP, CP stosuje się najczęściej punktowe zgrzewanie oporowe lub spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (GMA), spawanie nietopliwą elektrodą w osłonie gazów obojętnych (TIG), spawanie laserowe, plazmowe oraz ręczne spawanie łukowe elektrodą otuloną (MMA). Spoiny w złączach stali DP, CP mają o wiele większą wytrzymałość niż w złączach innych stali z grupy AHSS [18].

2.6. DOCOL M - zimnowalcowana stal martenzytyczna

W ostatnich 10 latach do budowy podestów ruchomych stosuje się gruboziarnistą stal 700 MC. Wytrzymałość tej stali jest na pograniczu R_m 700 MPa, co w nowoczesnych podestach ruchomych jest wartością niewystarczającą. W śladach grani plastyczność jest na poziomie 600 MPa, natomiast po spawaniu wytrzymałość złączy jest na poziomie 500 MPa [89]. Do produkcji elementów podestów ruchomych coraz częściej próbuje się stosować stale DOCOL. Pomimo faktu, że stale projektowane były z myślą o łączeniu ich poprzez procesy spajania, niektóre z nich wciąż stanowią problem w opracowaniu metody i optymalnych parametrów spawania. Dużym wyzwaniem jest m.in. spawanie wysokowytrzymałych stali DOCOL o strukturze martenzytycznej [5, 96].

Stale DOCOL wytwarzane są przy zastosowaniu specjalnej obróbki cieplnej na linii ciągłego wyżarzania. Ultrawysoka wytrzymałość uzyskiwana jest w procesie nadzwyczaj szybkiego chłodzenia wodą z temperatury podniesionej do zakresu obszaru austenitu [90].

Gatunki stali DOCOL charakteryzują się dość dobrą formowalnością przy tak wysokich poziomach wytrzymałości, przy ograniczonej spawalności. Niektóre z zalet stosowania DOCOL to [33]:

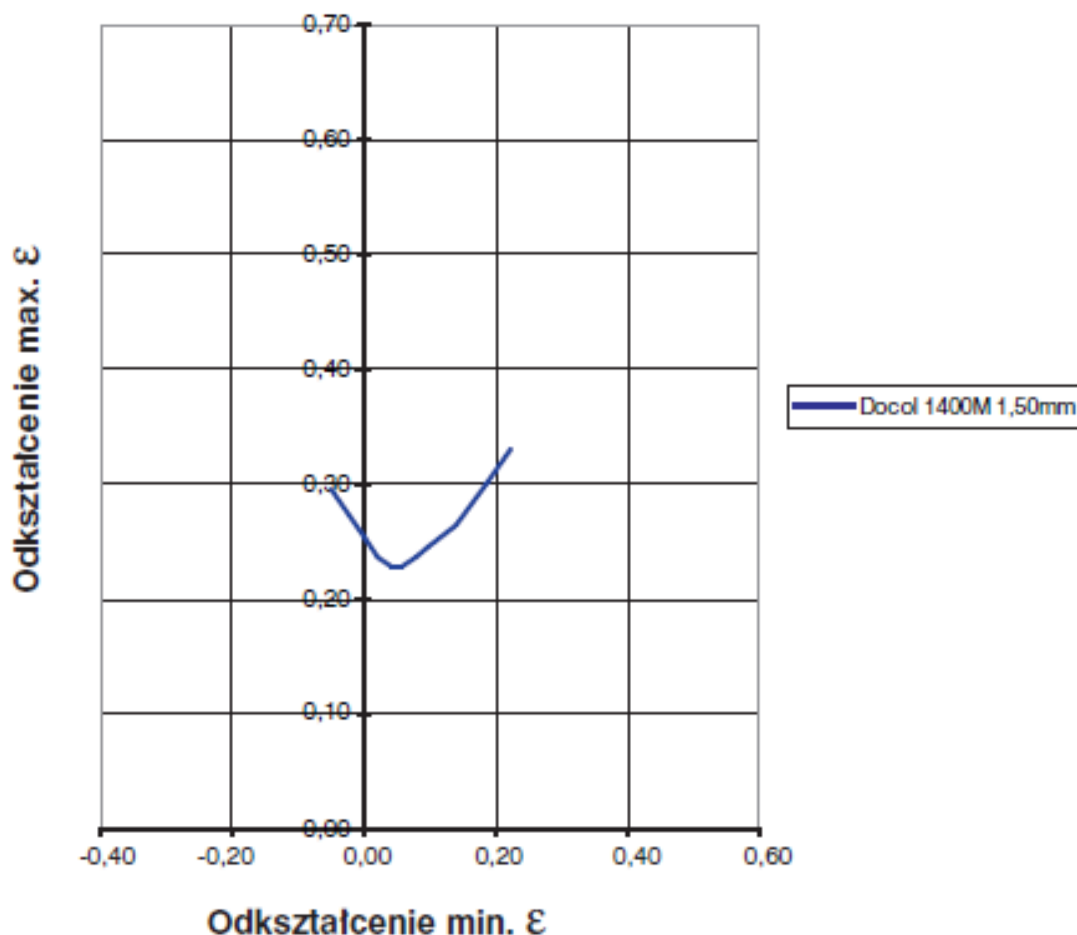
- redukcja masy konstrukcji,
- bardzo wysokie poziomy wytrzymałości,
- uproszczony proces produkcji,
- wydłużony czas cyklu życia,
- wyższe wielkości maksymalnego obciążenia,
- obniżony koszt całkowity.

W budowie środków transportu typowymi zastosowaniami stal DOCOL mogłyby być:

- elementy podestów ruchomych,
- elementy bezpieczeństwa w samochodach,
- słupki drzwiowe,
- wzmocnienia zderzaków,
- tarcze sprzęgła.

DOCOL M produkowana jest w zakresy wymiarów: grubość 0,5 – 2,10 mm, szerokość: 800 - 1500 mm, w zależności od gatunku stali i grubości. Stale DOCOL M dostarczane są w tolerancjach zgodnych z EN 10131. DOCOL M zaprojektowana została z uwzględnieniem konwencjonalnych metod kształtowania takich jak: technologie tłoczenia, profilowania rolkowego, wytwarzania rur. Stale DOCOL M charakteryzują się dobrą podatnością na zginanie [92, 108, 109]. W przypadku małych promieni gięcia ważne jest, o ile to możliwe, aby wykonywać gięcie w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania, gdzie podatność na zginanie jest nieco wyższa niż w kierunku wzdłużnym. Formowanie rolkowe stosowane jest szeroko w przypadku stali M i umożliwia uzyskanie mniejszego promienia gięcia w porównaniu z promieniami uzyskiwanymi podczas gięcia konwencjonalnego [33].

Wysokiej klasy procesy utwardzania stali M skutkują w efekcie dobrą rozciągliwością i tłocznością. Przy projektowaniu detali ze stali DOCOL M należy zwyczajowo wziąć pod uwagę lekko większe promienie gięcia oraz optymalizację kształtu wykoju, aby pomóc materiałowi „płynąć” pod narzędziem. Krzywe granicznego kształtowania dla stali DOCOL M o grubości 1,5 mm przedstawione na rys. 11 pokazują, że materiał może wytrzymać co najmniej 14% odkształcenia przy formowaniu [33, 106, 107].



Rys. 11. DOCOL M – odkształcenie [33]

Przy operacjach cięcia i wykrawania należy zwrócić szczególną uwagę na stosowanie prawidłowych odstępów cięcia. Parametrami, jakimi należy się przy tym kierować są grubość arkusza, wytrzymałość i wymagania co do wyglądu krawędzi cięcia. Dla stali DOCOL M zaleca się stosowanie odstępów cięcia w wymiarze 10-12% grubości. Zdaniem producenta Stal DOCOL M charakteryzuje się ograniczoną spawalnością [66]. Powodem tego jest to, że stale DOCOL M charakteryzują się znacznie podwyższoną zawartością Al i Ti w stosunku do konstrukcyjnych stali niestopowych [58, 110, 69].

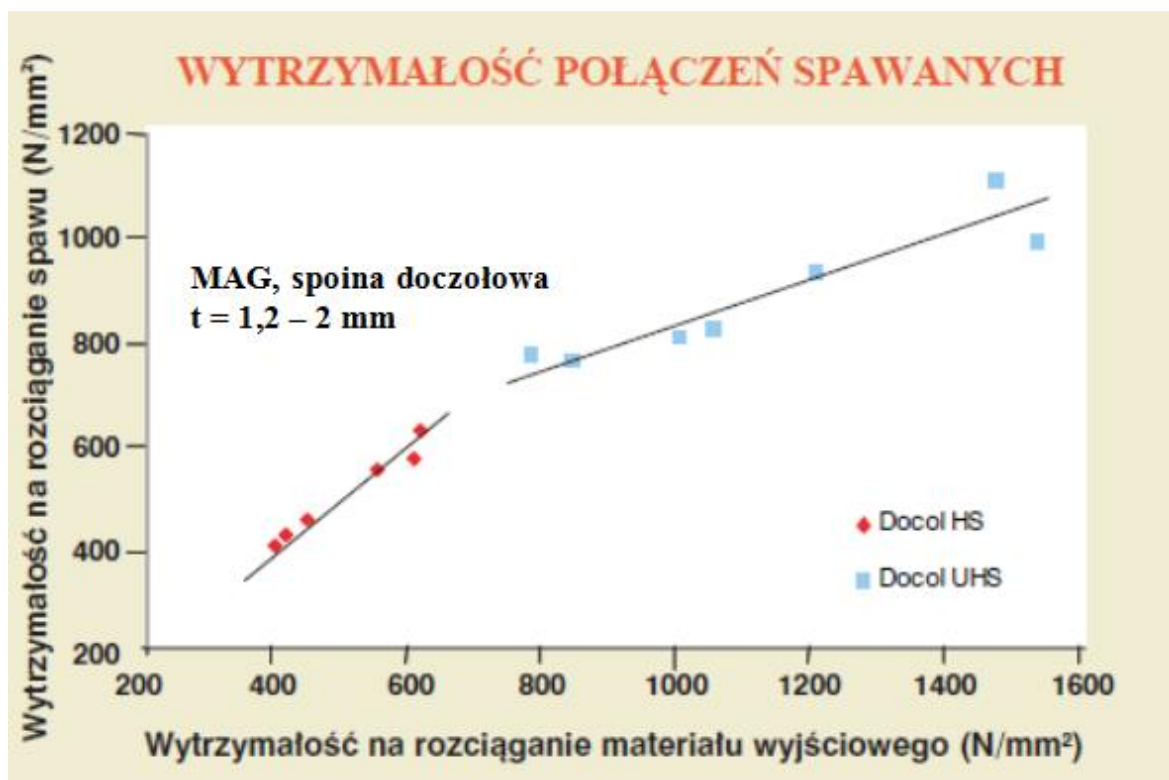
Do spawania stali DOCOL M mogą być próbowane najważniejsze metody spawania, na przykład: spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazu (GMAW), ręczne spawanie łukowe elektrodami otulonymi (MMA), spawanie TIG, spawanie plazmowe

i laserowe. Zalecane spoiwa dla stali DOCOL M (druty elektrodowe i elektrody stalowe) pokazane są w tablicy 3. Jeżeli elementy o złączach spawanych mogą być umieszczane w miejscach o niskim poziomie naprężeń, wówczas można zastosować spoiwa o niższej wytrzymałości niż te podane w tablicy 3 [33, 70, 72].

Tabl. 3. Zalecane spoiwa do stali DOCOL UHS [33]

Druty elektrodowe	Elektrody otulone
AWS: A5.28 ER 10XS-X	AWS: A5.5 E10XSX18
AWS: A5.28 ER 11XS-X	AWS: A5.5 E11XSX18
AWS: A5.28 ER 12XS-X	AWS: A5.5 E12XSX18
UNION X 90	
UNION X96	

Wytrzymałość spoin dla DOCOL M jest wyższa niż przypadku spawania konwencjonalnych stali o wysokiej wytrzymałości, co przedstawiono na rys. 12. Należy zauważyć, że R_m po spawaniu jest prawie dwukrotnie niższa, konieczne jest więc znalezienie procesu, który by to poprawił [57, 74].



Rys. 12. Wytrzymałość połączeń spawanych (o grubości od 1,2 do 2 mm) dla DOCOL M [33]

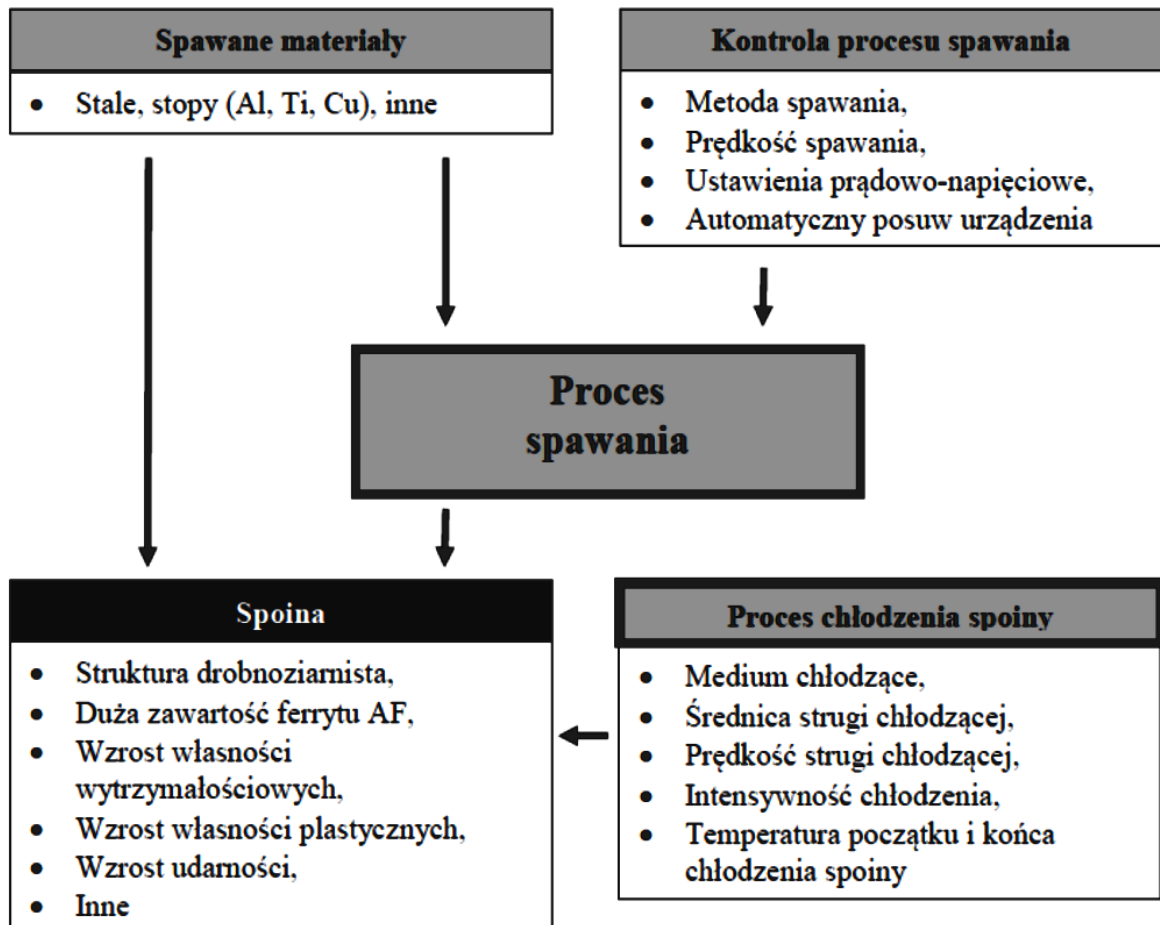
Inną metodą spajania, która może być stosowana dla stali DOCOL M, jest zgrzewanie oporowe. Zgrzewanie punktowe jest najbardziej rozpowszechnioną metodą spawania stali DOCOL M. Przy zgrzewaniu punktowym stali DOCOL M z inną stalą miękką zaleca się stosowanie podwyższenia mocy elektrod o 20-30 %. Aby uzyskać dobre wyniki przy zgrzewaniu stali DOCOL M zaleca się zwiększenie siły nacisku elektrod o 40 – 50%, oraz wówczas wydłużyć się nieco czas spajania [33, 67].

2.7. Spawanie z chłodzeniem mikro-jetowym

Minimalizowanie negatywnych zjawisk towarzyszących procesom spawalniczym, takich jak zmiany właściwości mechanicznych, niekorzystne zmiany mikrostruktury czy nadmierne naprężenia i odkształcenia spawalnicze, stało się podstawą do opracowania innowacyjnej technologii spawania z chłodzeniem mikro strumieniowym [62].

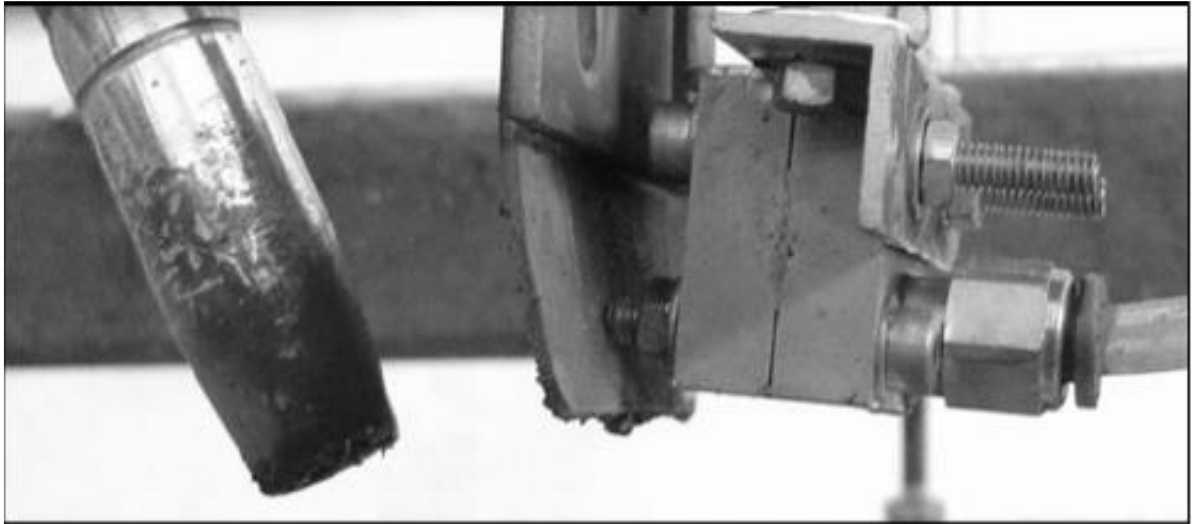
Ten nowy proces został sprawdzony z powodzeniem w warunkach laboratoryjnych, co otwiera nowe możliwości zastosowań w warunkach przemysłowych. Idea procesu oparta jest na wymuszonym, szybkim, selektywnym i precyzyjnym schładzaniu spoiny lub napoiny mikrostrugą gazu lub cieczy (w tym również materiałów kriogenicznych) bezpośrednio po spawaniu czy napawaniu. Chłodzenie mikrostrumieniowe bezpośrednio po spawaniu wpływa korzystnie na podwyższenie własności użytkowych konstrukcji spawanych, ponieważ pozwala na precyzyjne sterowanie strukturą spawanego złącza (rys. 13) [35].

Zaletą opracowywanej technologii jest łatwa możliwość podłączenia inżektora mikro-jetowego do istniejących stanowisk spawalniczych. Pociąga to za sobą automatyczne podwyższenie jakości produktowej jako pochodnej wzrostu jakości procesowej. Nowa technologia daje praktyczną możliwość sterowania strukturą spoin różnych badanych dotychczas materiałów (różne gatunki stali niestopowych, różne stopy aluminium) [36, 64].



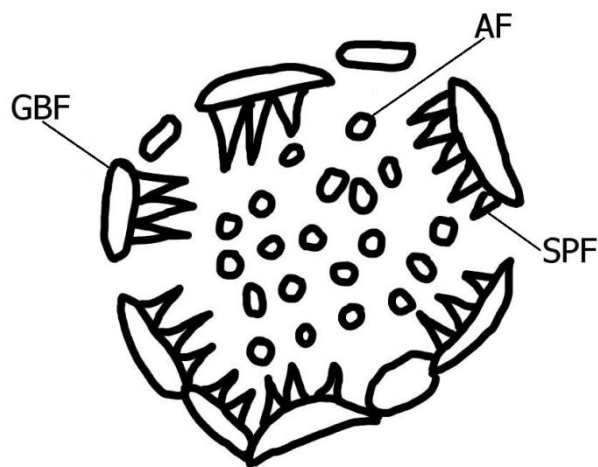
Rys. 13. Idea spawania z przystawką mikro-jetową [34]

W ostatnich latach (2011-2018) opracowano proces schładzania mikro-jetowego, który jest dostosowywany do nowych procesów oraz materiałów stosowanych w budowie pojazdów. Między innym sprawdzany był w procesach spawalniczych, natryskiwaniu cieplnym powłok i w technologiach napawania [35]. Obecnie dąży się do tego, aby w końcowym etapie spawania odpowiedzialne konstrukcje stalowe posiadały równocześnie wysoką wytrzymałość i udurość. Możliwości takie zapewnia innowacyjna technologia spawania z chłodzeniem micro-jetowym (rys. 14).



Rys. 14. Ustawienie iniektora mikro-jetowego względem głowicy spawalniczej [36]

Jakość procesu wywołuje wzrost jakości produktu końcowego (wysoka udarność niskostopowego stalowego złącza w ujemnych temperaturach, redukcję niepożądanych naprężeń, wzrost udziału ferrytu drobnoziarnistego AF w spoinie (rys. 15).



Gdzie:

- AF drobnoziarnisty ferryt (acicular ferrite),
- GBF – gruboziarnisty ferryt (grain boundary ferrite),
- SPF – gruboziarnisty ferryt (side plate ferrite).

Rys. 15. Struktura metalograficzna typowego złącza ze stali niskostopowej [37]

Zachowanie właściwej geometrii konstrukcji i uzyskanie jak najniższego współczynnika odkształcenia na całej długości konstrukcji wielkogabarytowych jest zadaniem niezwykle istotnym, gdyż wiąże się z bezpieczeństwem ich eksploatacji. Zachowanie obostrzonych rygorów, szczególnie dla odpowiedzialnych konstrukcji jest niezwykle trudne do osiągnięcia przy spawaniu konwencjonalnymi procesami spawalniczymi. W tym zakresie nowa technologia umożliwia spełnienie obostrzonych wymagań jakościowych stawianych wyżej wymienionym konstrukcjom stalowym (dodatkowo istotnie podwyższa własności mechaniczne złącza spawanego, w zakresie następujących parametrów: podatności na odkształcenia trwałe, wzrost udarności i odporności na pękanie) [95].

Innowacyjność procesowa polega na włączeniu do istniejących metod spawania precyzyjnego, selektywnego i lokalnego chłodzenia, w wyniku którego możliwe jest sterowanie strukturą spoiny. Przykładowo spawanie stali niestopowej tą technologią pozwala na uzyskanie zwiększonej zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF (acicular ferrite) do poziomu nieosiągalnego w innych procesach spawalniczych [35].

Technologia chłodzenia mikro-jetowego sprawdziła się podczas spawania stali niestopowej, napawania stali do ulepszania cieplnego oraz podczas spawania stopów aluminium [6]. Technologia ta nie była do tej pory sprawdzana przy spawaniu stali martenzytycznych o wysokiej wytrzymałości (AHSS), wykorzystywanych do budowy podestów ruchomych i innych środków transportu [13]. Można przypuszczać, że chłodzenie mikro-jetowe może być wykorzystywane do spawania stali AHSS, co wymaga przeprowadzenia badań [13].

3. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY

Aktualizacja norm emisji spalin w pojazdach samochodowych wymaga wprowadzenia do pojazdu dodatkowych elementów (filtry cząstek stałych, katalizatory spalin, nowe elementy układów wydechowych takie jak strumienice, dodatkowe tłumiki), które zwiększają jego masę własną netto o ok 200 kg przy pojazdach ciężarowych. W związku z tym producenci poszukują nowych rozwiązań podczas konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych, umożliwiających obniżanie masy w stosunku do dotychczasowych rozwiązań i równocześnie zwiększających zasięg pracy i udźwig podestu [37, 78, 79].

Tendencja do zwiększania zakresu działania platformy mobilnej montowanej na pojazdach silnikowych, przy jednoczesnym utrzymaniu masy pojazdu, jest przykładem wzrostu zapotrzebowania na nowe technologie spawania w obszarach inżynierii lądowej i transportu. Proponowanym materiałem do produkcji platform mobilnych są stale AHSS ze względu na ich wysoką wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1200 – 1500 MPa [38, 65].

Stale z grupy AHSS są stosowane głównie do konstrukcji cienkościennych, ponieważ ich wysoka wytrzymałość pozwala zmniejszyć całkowitą masę konstrukcji. Głównym problemem spawalniczym tej grupy stali jest jednak znacznie mniejsza wytrzymałość utworzonego złącza niż materiału rodzimego i gorsze właściwości plastyczne, których miarą jest wydłużenie względne [39]. Autorzy zwracają przy tym uwagę na wytrzymałość złącza dużo niższą od materiału rodzimego. Spawanie stali AHSS wciąż nie pozwala na uzyskiwanie wytrzymałości złącza na poziomie materiału rodzimego, dlatego konieczne jest podejmowanie działań w celu poprawy jej spawalności.

Według obecnego stanu wiedzy stale AHSS powinno się spawać metodą MAG albo procesem TIG. Gorsze efekty daje spawanie laserowe i elektrodami otulonymi. Spawanie stali martenzytycznych stanowi wciąż poważny problem techniczny, gdyż procesy MAG i TIG dla tych stali charakteryzują się brakiem powtarzalności uzyskiwanych wyników, w powstałych złączach występują pęknięcia. Nie ma obecnie prostej technologicznie metody spawania, która pozwalałaby łączyć konstrukcje w prosty sposób. Największym utrudnieniem podczas łączenia materiałów z grupy AHSS stanowi uzyskanie odpowiednich właściwości mechanicznych materiału w strefie wpływu ciepła. Występujący w stali

martenzyt pogarsza spawalność stali i sprzyja powstawaniu pęknięć zimnych [60, 78].

Wyniki badań pokazują, że spawalność stali niestopowych i stopów aluminium została poprawiona dzięki technologii schładzania mikro-jetowego, które z powodzeniem stosowano podczas spawania MIG, MAG, TIG [37]. Do chłodzenia mikro-jetowego przy spawaniu stali były testowane różne gazy (argon, hel, azot, powietrze, ditlenek węgla, mieszanki argonu z helem). Najlepsze efekty uzyskiwano stosując argon i hel jako gazy mikro-jetowe [38]. Technologia chłodzenia mikro-jetowego nie była do tej pory sprawdzana przy spawaniu stali martenzytycznych o wysokiej wytrzymałości.

4. CEL, ZAŁOŻENIA I ZAKRES PRACY

Głównym celem naukowym pracy jest opracowanie nowego sposobu spawania elementów podestu ruchomego pojazdów samochodowych, spełniającego następujące założenia:

- autorska metoda pozwoli na otrzymanie konstrukcji spawanej o zwiększonym zasięgu operacyjnym podestu ruchomego przy jednoczesnym zachowaniu niezmienniej masy pojazdu i sztywności konstrukcji,
- metoda da możliwość wykonania prawidłowych złączy ze stali AHSS o wysokich właściwościach mechanicznych.

Główny cel pracy postanowiono zrealizować na przykładzie stali DOCOL1200M (z grupy AHSS) proponowanego do budowy elementów konstrukcji podestu ruchomego.

Celem użytkowym rozprawy jest opracowanie nowej metody spawania trudno spawalnych stali AHSS, która pozwoli na zwiększenie zasięgu operacyjnego podestu ruchomego przy zachowaniu masy i sztywności konstrukcji oraz zapewnieniu spełnienia wymagań bezpieczeństwa.

Analiza uzyskanych wyników badań wstępnych oraz przegląd literatury stanowiły podstawę do sformułowania tezy (rozdział 6), dla udowodnienia której wykonano badania zasadnicze (rozdział 7).

Wyniki badań oraz ich analiza pozwoliły na udowodnienie zasadności zastosowania do spawania trudno spawalnych stali AHSS chłodzenia mikro-jetowego wraz z wykorzystaniem formującej podkładki miedzianej. Umożliwiło to podwyższenie wytrzymałości złącza podestu ruchomego bez zwiększenia masy pojazdu i przy zachowaniu sztywności konstrukcji.

Technical drawings of a roof structure. The top drawing is a plan view showing a rectangular roof with a central square area. Dimensions include 230, 273, 20, 5, 90, 7500, 220, 150, 110, and 80. The bottom drawing is a side elevation showing the roof profile with a central square area. Dimensions include 124, 125, and 80. Labels include 'Płytki dobiegowa', 'DOCOL1200M', and 'Płytki wybiegowa'.

według dokumentów Niemieckiego Instytut Spawalnictwa (2015) możliwe jest uzyskanie poprawnego złącza ze stali DOCOL 1200M o wytrzymałości na poziomie 650 MPa (wydłużenie względne na poziomie 3%), co odbiega znacznie od wytrzymałości materiału rodzimego [13].

W celu sprawdzenia spawalności stali DOCOL 1200M proponowanej do budowy podestu ruchomego przyjęto następujący plan badań wstępnych:

- dobór parametrów spawania MAG cienkościennych blach ze stali DOCOL 1200M proponowanej do budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych. W tym celu należy dobrać technologię spawania (sposób ukosowania blach, odstęp między dwiema krawędziami blach, druty elektrodowe, gazy osłonowe, parametry spawania napięciowo-prądowe, prędkość spawania),
- dobór podkładki formującej grań spoiny (miedziana, ceramiczna),
- wykonanie doświadczalnego złącza,
- dobór parametrów chłodzenia mikro-jetowego (dobór gazu chłodzącego, natężenie przepływu gazu, średnica mikrostrugi),
- dokonanie oceny wykonanych połączeń do budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych (badania wizualne, badania magnetyczno-proszkowe),
- przeprowadzenie analizy badań doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza występującego w podestach ruchomych.

Trudność w zakresie spawalności podnośników wykonanych ze stali AHSS jest spowodowana strukturą martenzytyczną stali oraz wysoką twardością materiału. W procesie spawania stali AHSS można zaobserwować obniżenie własności mechanicznych w SWC oraz zwiększoną podatnością na pękanie zwłoczne [13].

W związku z tym zalecenia spawalnicze obejmują konieczność ograniczenia energii liniowej podczas spawania blach o niskiej grubości. W celu poprawy spawalności stali należałoby także wprowadzić dodatkowe chłodzenie od stroni grani i lica.

W celu podwyższenia wytrzymałości spoin w stalach AHSS stosowanych na elementy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych postanowiono zastosować w procesie MAG chłodzenie mikro-jetowe od strony lica spoiny z równoczesnym zastosowaniem podkładki miedzianej od strony grani. Założono, że pozwoli to na uzyskanie zwiększonej zawartości drobnoziarnistego martenzytu.

Do badań wytypowano stal martenzytyczną DOCOL 1200M z grupy stali AHSS, gdyż stal ta posiada wysoką wytrzymałość na poziomie 1200 MPa. Spawanie materiałów

przeprowadzono na wpół zautomatyzowanym stanowisku spawalniczym wyposażonym w system chłodzący typu mikro-jet.

5.1. Dobór parametrów technologicznych spawania MAG wysokowytrzymałych elementów podestu ruchomego

Dobór parametrów technologicznych spawania cienkościennej konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych miał na celu otrzymanie optymalnej struktury i właściwości cienkościennej konstrukcji.

Postanowiono dobrać szczelinę zgodnie z zaleceniami literaturowymi [58] pomiędzy dwiema spawanymi blachami w zakresie od 0-2 mm. Do wykonania złączy podnośników ze stali DOCOL 1200M w procesie MAG postanowiono sprawdzić zastosowanie dwóch różnych osłonowych mieszanek gazowych (100% CO₂ oraz 82% Ar + 18% CO₂). Do spawania konstrukcji wytypowano drut elektrodowy [59]: UNION X90 EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo (C 0,10, Si 0,80, Mn 1,80, Cr 0,35, Mo 0,60, Ni 2,30).

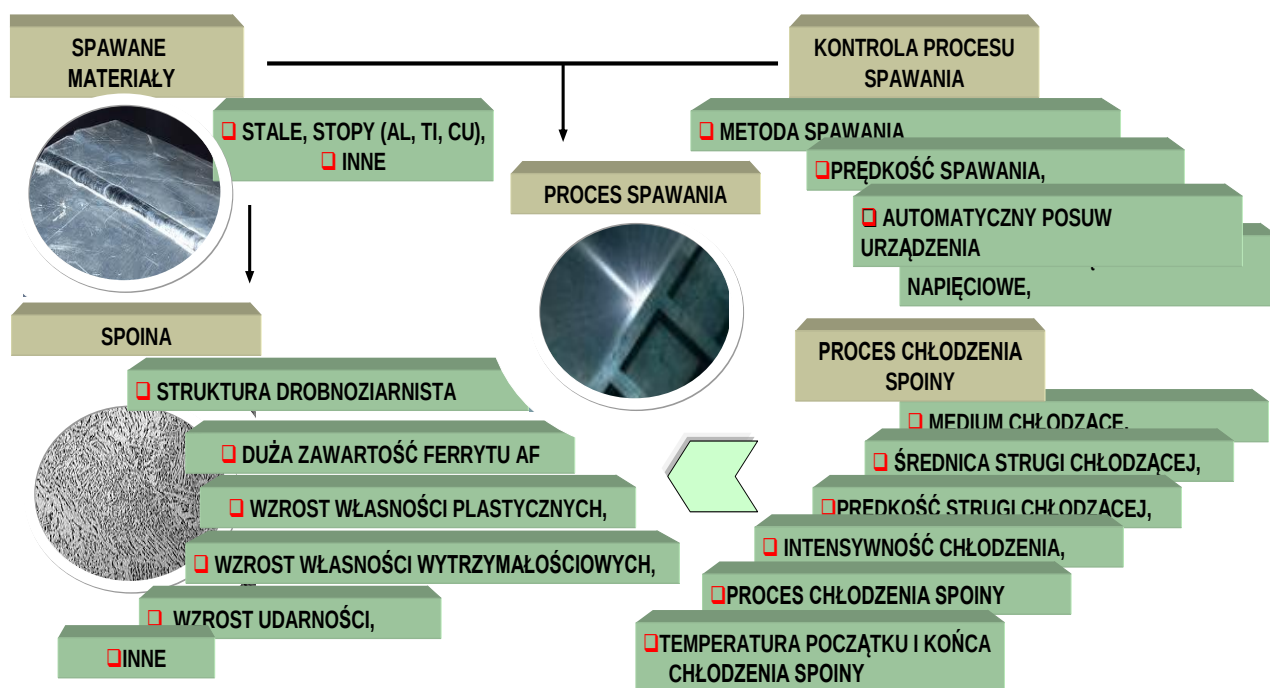
Przyjęto następujące parametry spawania:

- średnica drutu elektrodowego 1,0 mm oraz 1,2 mm,
- napięcie łuku 18-20 V,
- natężenie prądu spawania 110-120 A,
- prędkość spawania 250-350 mm/min,
- źródło prądu stałego (+) na elektrodzie, źródło prądu przemiennego,
- spoina ma charakter jednościgowy.

W procesie spawania MAG stali DOCOL 1200M wprowadzono dodatkowo podkładkę formującą grań spoiny. Przeważnie do formowania grani spoin stosuje się podkładki ceramiczne i miedziane (o różnym współczynniku przewodzenia ciepła). Podkładka miedziana jest korzystniejsza (wyższy współczynnik przewodzenia ciepła), gdyż wraz z zastosowanym dodatkowym schładzaniem spoiny mikrostrugą gazu bezpośrednio po ułożeniu ściegu spawalniczego będzie sprzyjała ona powstawaniu drobnoziarnistej struktury martenzytyczno-ferrytycznej, co z kolei przełoży się na lepsze właściwości mechaniczne otrzymanego złącza.

5.2. Dobór parametrów spawania z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego

Metoda mikro-jet, może być z powodzeniem stosowana dla regulacji parametrów struktury spoiny. Umożliwia bowiem szybkie, precyzyjne zmniejszenie temperatury lica spoiny, wpływa korzystnie na jej strukturę (uzyskanie drobnoziarnistej struktury) i poprawia jej właściwości mechaniczne (w szczególności udarność) [42]. Micro-jet stanowi odpowiednio skonstruowaną dla danego procesu przystawkę spawalniczą, zaopatrzoną w system dysz chodzących, o zadanych średnicach. Ilość dysz i ich średnice (mierzone w μm) są dobierane w zależności od stosowanego procesu spawalniczego, tak, by umożliwić bardzo dokładne regulowanie schładzania złącza. Wymaga to niekonwencjonalnych metod pomiarowych pozwalających na dokładne określenie intensywności wymiany ciepła między spoiną, a mikro-strugą. Chodzenie przy pomocy strugi dobranego medium chłodzącego (płynów, gazów) wychodzącego z dysz jest wyjątkowo precyzyjne [43]. Ideę spawania mikro-jet przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Idea stosowania technologii spawania z przystawką mikro-jetową [44]

Dane literaturowe [44] wskazują, że głównym materiałem dotychczasowych badań była stal niestopowa stosowana w budowie nadwozia pojazdów osobowych i na ramy pojazdów ciężarowych. Argonowe schładzanie mikro-jetowe pozwoliło na uzyskanie drobnoziarnistego ferrytu i uzyskanie wysokiej uderności w niskich temperaturach (IV klasa uderności – min. 47 J w temp. - 40° C).

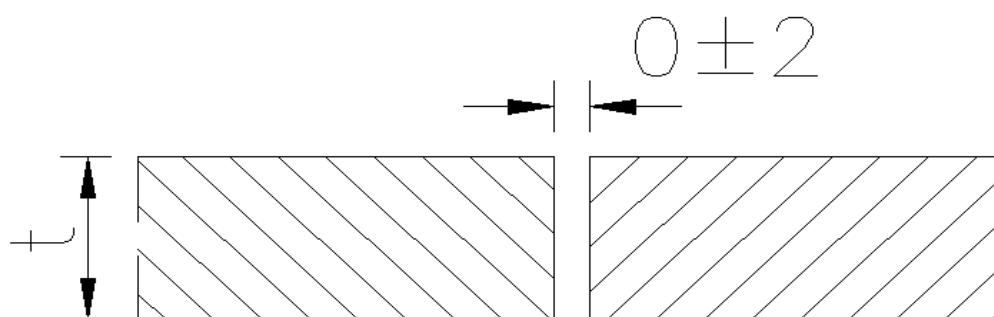
Najważniejsze parametry schładzania mikro-jetowego to:

- liczba dysz chłodzących: 1-9,
- rodzaj medium chłodzącego: Ar, He, N₂, powietrze, mieszanki gazowe,
- ciśnienie medium chłodzącego: 0,4 do 0,7 MPa,
- średnica mikro strugi: 50 - 90 μm,
- odległość dyszy mikro-jetowej od powierzchni spawanej 20-40 mm.

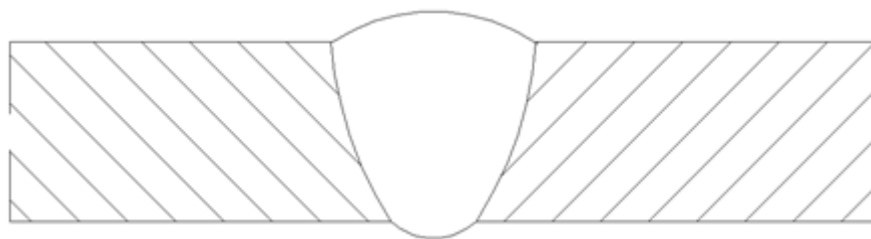
Blachy o grubości 1,8 mm, długości 500 mm i szerokości 200 mm pospawano metodą MAG w trzech wariantach:

- z miedzianą podkładką formującą,
- z ceramiczną podkładką formującą,
- bez podkładki formującej.

Zmieniano odstęp pomiędzy spawanymi blachami we wszystkich trzech wariantach (podkładka formującą lub jej brak). Elementy spawanej cienkościennej konstrukcji podestów ruchomych z dobieraną szczeliną pomiędzy krawędziami (bez użycia podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego) pokazano na rys. 18 i 19. Złącze miało charakter jednościgowy, krawędzie blach nie były ukosowane.



Rys. 18. Sposób przygotowania elementu do spawania ręcznego, $t = 1,8$ mm, rysunek poglądowy



Rys. 19. Sposób wykonania połączenia spawanego, $t = 1,8$ mm, rysunek poglądowy

Kształt spoiny (lico i grań) posiadał zawsze najwłaściwszy wygląd, gdy odstęp pomiędzy łączonymi krawędziami blach wynosił 1 mm przy zastosowaniu dwóch różnych badanych gazów osłonowych. Po ustaleniu szerokości odstępu pomiędzy krawędziami (1 mm) badano wpływ parametrów spawania na jakość spoin.

Przebadano wpływ podstawowych parametrów spawania na jakość złącza. Drut elektrodowy UNION X90 dobrano o średnicy: 1 mm oraz 1,2 mm. Próby z drutem grubszym o średnicy 1,2 mm nie dały dobrych efektów i do dalszych badań stosowano wyłącznie drut o średnicy 1 mm. Napięcie łuku testowano w zakresie 18-20 V. Natężenie prądu spawania regulowano w przedziale 110-120 A. Prędkość spawania była testowana dla trzech różnych wartości: 250, 300, 350 mm/min. Źródło prądu stałego zamieszczono z biegunowością (+) na elektrodzie (według zaleceń producenta drutu) [63]. Postanowiono także sprawdzić możliwość spawania złącza prądem przemiennym. Spoina ma charakter jednościągowy.

Ocenę jakości złącza przeprowadzono badaniami VT (wizualne) oraz MT (magnetyczno-proszkowe).

Badania wizualne płyt próbnych wykonano wg PN-EN ISO 17637:2017 „Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych” – wykonane zostały za pomocą środków pomocniczych, tj. lupy $\times 3$, luksomierza oraz suwmiarki przy oświetleniu obiektu światłem białym 520 Lx, 525 Lx. Spoiny spełniły wymagania dla granicy dopuszczalności „B” wg PN EN ISO 5817:2009.

Badania magnetyczno-proszkowe wykonano wg PN-EN ISO 17638:2017 „Badanie nieniszczące spoin - Badanie magnetyczno-proszkowe” [84] - wykonane zostało przy użyciu metody mokrej, natężeniu pola 2,6-3,7 kA/m (miernik), świetle białym 515 Lx (luksomierz), temperaturze 20° C, środku wykrywającym MR – 76 oraz kontraście MR -72.

Najkorzystniejsze parametry spawalnicze ustalono o następujących wartościach: średnica drutu elektrodowego 1 mm, napięcie łuku 19 V, natężenie prądu 115 A, prędkość

spawania 300 mm/min. Spoina miała charakter jednościgowy przy źródle prądu stałego (+) na elektrodzie. W każdym z testowanych przypadków obserwowano wady i niezgodności spawalnicze (pęknięcia w spoinie i w SWC, brak przetopu, przyklejenia, podtopienia). Rezultaty badań podano w tablicy 4. Zaobserwowano, że największy wpływ na niezgodności (zwłaszcza pęknięcia) ma wpływ zastosowanej mieszanki osłonowej (tablica 4).

Tabl. 4. Wyniki badań użycia różnych gazów osłonowych

gaz osłonowy	wady, niezgodności
CO ₂	pęknięcia w SWC i w spoinie
82% Ar + 18% CO ₂	pęknięcia w SWC

Zdecydowanie najbardziej niekorzystne jest zastosowanie CO₂ jako gazu osłonowego. Charakter lica spoiny wykonanej w osłonie CO₂ ze zbyt dużą szczeliną pomiędzy krawędziami (2 mm) przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20. Stan powierzchni spoin po spawaniu MAG w osłonie CO₂ [źr. wł.]

Na rysunku widoczna jest nierównomierność lica z widocznymi podtopieniami. Następnie wykonano złącza podestu ruchomego z podkładką miedzianą i ceramiczną przy zastosowaniu tych samych parametrów procesu jak w poprzednim badanym przypadku (bez podkładki). Ponownie przebadano wpływ wielkości szczeliny na jakość spoin oraz wpływ obu gazów osłonowych. Wykonano złącza spawane drutem elektrodowym UNION X90 z wykorzystaniem dwóch gazów osłonowych tj. 100% CO₂ oraz 82% Ar + 18% CO₂. Spoina miała charakter jednościgowy. Zastosowano źródło prądu przemiennego i stałego z biegunowością (+) na elektrodzie.

Połączenie spawane nie ulegało pęknięciu tylko w jednym przypadku (tabl. 5) przy założonych parametrach procesu:

- zastosowanie podkładki miedzianej,
- zastosowanie źródła prądu stałego,
- gaz osłonowy; Ar + 18% CO₂,
- prędkość spawania; 300 mm/min,
- napięcie łuku; 19 V,
- szczelina pomiędzy dwiema krawędziami: 1 mm,
- natężenie prądu spawania: 115 A.

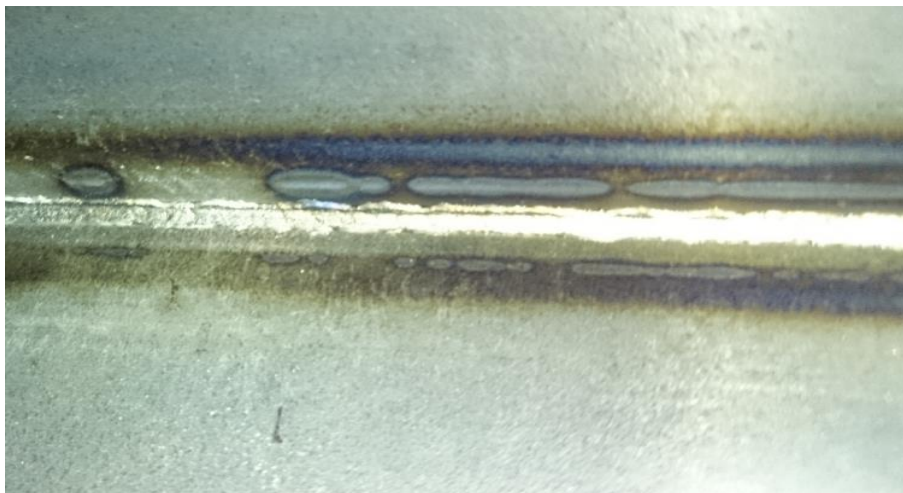
Ocenę jakości złącza podobnie przeprowadzono badaniami VT (wizualne) oraz MT (magnetyczno-proszkowe). Wykonano badanie wizualne płyt próbnych wg PN-EN ISO 17637:2017 „Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych” – wykonane zostały za pomocą środków pomocniczych, tj. lupy $\times 3$, luksomierza oraz suwmiarki przy oświetleniu obiektu światłem białym 520 Lx, 525Lx [112]. Spoiny spełniły wymagania dla granicy dopuszczalności „B” wg PN EN ISO 5817:2014-05 [111].

Badanie magnetyczno-proszkowe wykonano wg PN-EN ISO 17638:2017 „Badanie nieniszczące spoin - Badanie magnetyczno-proszkowe” [84] - wykonane zostało przy użyciu metody mokrej, natężeniu pola 2,6-3,7 kA/m (miernik), świetle białym 515 Lx (luksomierz), temperaturze 20° C, środku wykrywającym MR – 76 oraz kontraście MR -72. Rezultat badań przedstawiono w tablicy 5.

Tabl. 5. Wyniki badań użyciem dwóch różnych podkładek (miedziana, ceramiczna)

gaz / podkładka	wady, niezgodności
CO ₂ podkładka miedziana	pęka w spoinie
CO ₂ podkładka ceramiczna	pęknięcia w SWC i w spoinie
82% Ar + 18% CO ₂ podkładka miedziana	brak pęknięć
82% Ar + 18% CO ₂ podkładka ceramiczna	pęka w SWC

Wyniki badań wizualnych oraz magnetyczno-proszkowych badanych złączy wskazują na to, że najważniejszymi parametrami procesu jest zastosowanie mieszanki 82% Ar + 18% CO₂ wraz zastosowaniem miedzianej podkładki formującej. Przy zastosowaniu podkładki miedzianej z zastosowaniem mieszanki spawalniczej 82%Ar + 18% CO₂ połączenie spawane badanej próby nie pęka. Natomiast przy zastosowaniu gazu osłonowego 100% CO₂ występowały pęknięcia w strefie wpływu ciepła SWC oraz w spoinie. CO₂ jest zbyt utleniającym gazem osłonowym. Zastosowanie CO₂ prowadzi do powstawania pęknięć w złączu. Wykonane złącze z podkładką ceramiczną niewiele wnosi (niewystarczające odprowadzenie ciepła od strony grani) ponieważ występowały pęknięcia w strefie wpływu ciepła SWC (rys. 21).



Rys. 21. Stan powierzchni spoiny po spawaniu MAG z zastosowaniem podkładki ceramicznej [źr. wł.]

Można zauważyć efekt złego odprowadzenia ciepła z zastosowaniem podkładki ceramicznej, która objawia się barwami nalotowymi i wyciekami od strony grani pomimo prawidłowo dobranej szczeliny (1 mm).

Do dalszych badań wybrano podkładkę miedzianą, odrzucono podkładkę ceramiczną. Podobnie zauważono, że prawidłowe złącze można uzyskać stosując źródło prądu stałego z biegunowością dodatnią na elektrodzie. W dalszych badaniach zrezygnowano ze spawania prądem przemiennym. Do dalszej oceny spawalności podestu ruchomego wybrano wyłącznie gazową mieszankę osłonową 82% Ar + 18% CO₂ oraz 100% CO₂ i drut elektrodowy (UNION X90).

Następnie wykonano testowe złącza z podkładką miedzianą i z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego.

Do tej części badań przyjęto parametry procesu, które dały najlepsze własności w dotychczasowej analizie zagadnienia:

- zastosowanie podkładki miedzianej,
- zastosowanie źródła prądu stałego,
- gaz osłonowy; 82% Ar + 18% CO₂, natężenie przepływu gazu: 12 l/min,
- prędkość spawania; 300 mm/min,
- napięcie łuku; 19 V,

- szczelina pomiędzy dwiema krawędziami: 1 mm,
- natężenie prądu spawania: 115 A.

Postanowiono sprawdzić jakość wykonywanych połączeń spawanych przy wykorzystaniu różnej średnicy mikrostrugi oraz przy zastosowaniu różnego ciśnienia argonu jako gazu mikro-jetowego.

W tej części badań przyjęto następujące parametry argonowego chłodzenia mikro-jetowego:

- gaz mikro-jetowy: argon,
- ciśnienie gazu 0,5 i 0,6 MPa,
- średnica mikrostrugi: 60 i 70 μm .

Wykonano badania wizualne oraz magnetyczno-proszkowe podobnie jak dotychczasowo. Spoiny spełniły wymagania dla granicy dopuszczalności „B” wg PN EN ISO 5817:2014-05 [111].

W wykonanym złączu próbnym z wykorzystaniem podkładki miedzianej z zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego przeważnie nie występowały żadne wady i niezgodności spawalnicze (tablica 6).

Tabl. 6. Ocena spawalności złącza

średnica mikrostrugi $\varnothing$ [μm]	ciśnienie [MPa]	wynik
60	0,5	brak pęknięć
70	0,5	brak pęknięć
60	0,6	brak pęknięć
70	0,6	pęka SWC, zbyt intensywne chłodzenie lica

Niezgodności spawalnicze (pęknięcia) pojawiają się tylko przy zbyt intensywnym schładzaniu mikro-jetowym (średnica mikrostrugi 70 μm , ciśnienie gazu 0,6 MPa). Porównanie jakości badanych spoin – ocena wizualna – wykazało, że przy spawaniu blach z zastosowaniem miedzianej podkładki i chłodzenia mikro-jetowego uzyskano dobre efekty. Na rysunku 22 przedstawiono złącze wykonane z równoczesnym zastosowaniem miedzianej podkładki i chłodzenia mikro-jetowego.



Rys. 22. Stan powierzchni spoiny po spawaniu MAG z chłodzeniem mikro-jet [źr. wł.]

5.3. Badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złączy

W dotychczasowych badaniach wykazano, że prawidłowe złącze można wykonać z zastosowaniem podkładki miedzianej oraz z równoczesnym zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego. W tych złączach nie stwierdzono wad spawalniczych. Postanowiono sprawdzić ich własności mechaniczne. Wytrzymałość złączy sprawdzano za pomocą maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 (rys. 23). Wykonano próbki do badań doraźnej wytrzymałości na rozciąganie wg normy PN EN ISO 4136, która zakłada kształt i wymiar próbek wykonanych przy pomocy piły mechanicznej i frezarki. Uzyskane wyniki badań dla przeprowadzonych 3 próbek przedstawiono w tabl. 7.



Rys. 23. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 3369 [źr. wł.]

Tabl. 7. Wytrzymałość złącza wykonanego z zastosowaniem podkładki miedzianej

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
510	671	4,1
514	669	3,9
521	673	4,0
Średnia z pomiarów	Średnia z pomiarów	Średnia z pomiarów
515	671	4,0

W tablicy 7 przedstawiono wyniki połączenia spawanego bez użycia chłodzenia mikro-jetowego, lecz z zastosowaniem podkładki miedzianej. Wydłużenie na rozciąganie R_m wynosi na poziomie 671 MPa, natomiast średnia granica plastyczności R_e na poziomie 515 MPa oraz wydłużenie A_5 na poziomie 4% sugeruje, że złącze nie ma wystarczających własności plastycznych pomimo prawidłowego wyglądu.

Postanowiono również sprawdzić wytrzymałość złącza prawidłowo wykonanego z równoczesnym zastosowaniem formującej podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego z różnymi parametrami procesu (tablica 8).

Tabl. 8. Wytrzymałość złącza wykonanego z podkładką miedzianą i chłodzeniem mikro-jetowym

średnica mikrostrugi [μm]	ciśnienie mikrostrugi, [MPa]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
60	0,5	556	790	5,9
60	0,5	548	793	5,9
60	0,5	552	787	6,0
	średnia	552	790	5,93
70	0,5	559	791	5,9
70	0,5	543	792	5,8
70	0,5	556	781	5,7
	średnia	552	788	5,8
60	0,6	561	799	6,0
60	0,6	563	791	6,1
60	0,6	577	796	6,1
	średnia	567	795	6,06

Z analizy tablicy 8 wynika, że równoczesne zastosowanie formującej podkładki miedzianej i dodatkowego chłodzenia mikro-jetowego pozwala na uzyskanie lepszej wytrzymałości i wyższej wartości wydłużenia względnego, niż w poprzednim przypadku (tablica 7). Najlepsze efekty uzyskano przy średnicy mikrostrugi 60 μm i ciśnieniu 0,6 MPa. Można zaobserwować średnią wartość wytrzymałości na rozciąganie R_m na poziomie 790 MPa natomiast średnią granicę plastyczności R_e na poziomie 550 MPa wydłużenie A_5 6 %. Z analizy tabl. 7 i 8 wynika, że R_e i R_m jest na wysokim poziomie. Wydłużenie względne jest na wymaganym poziomie 6% tylko wówczas, gdy spawanie MAG prowadzi się z równoczesnym zastosowaniem formującej podkładki miedzianej i dodatkowego chłodzenia mikro-jetowego.

5.4. Podsumowanie badań wstępnych

W ramach badań rozpoznawczych analizowano możliwość wykonania prawidłowego złącza z blachy przeznaczonej na elementy podestu ruchomego DOCOL 1200 M. Dobrano najwłaściwsze parametry spawania pozwalające uzyskać złącze bez wad i niezgodności spawalniczych. Sprawdzono możliwości wykorzystania zalecanego drutu elektrodowego UNION X90. Wykorzystano drut elektrodowy o średnicy 1 mm.

Postanowiono sprawdzić do wykonania złącza spawanego użycie różnych podkładek spawalniczych (miedzianej oraz ceramicznej) oraz gazów osłonowych. Zaproponowano mieszankę osłonową 82% Ar + 18% CO₂ oraz CO₂. Zastosowana podkładka miedziana pozwoliła na uzyskanie poprawnego złącza, gdy równocześnie gazem osłonowym była mieszanka 82% Ar + 18% CO₂. Uzyskano złącze o małej wartości wydłużenia względnego na poziomie 4%. Podkładka ceramiczna nie zagwarantowała uzyskania poprawnego złącza bez wad i niezgodności spawalniczych przy równoczesnym stosowaniu obu badanych gazów osłonowych.

Bardzo duży wpływ ma jakość złącza na ukształtowanie rowka spawalniczego. Badano najkorzystniejszy rozstaw pomiędzy łączonymi elementami. Odległość między dwoma łączonymi elementami o grubości 1,8 mm powinna ok 1 mm. Ustalono dokładnie najkorzystniejsze parametry spawalnicze: średnica drutu wynosiła 1 mm, napięcie łuku 19 V, natężenie prądu 115 A, prędkość spawania 300 mm/min). W wykonanych badaniach energia liniowa spawania wynosi 3,4 kJ/cm.

Podczas prób spawalniczych przepływ mieszanki gazu osłonowego w uchwycie spawalniczym wynosił 12 l/min. Podczas spawania stali DOCOL 1200 M zaobserwowano obniżenie własności mechanicznych złącza, a także zwiększoną podatność na pękanie.

W związku z tym, że własności plastyczne złącza były na niskim poziomie (wydłużenie względne około 4%) postanowiono zmodyfikować proces spawalniczy przez dodatkowe zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego podczas spawania MAG.

Postanowiono sprawdzić jakość wykonywanych połączeń spawanych ustalając różne parametry chłodzenia mikro-jetowego. Zmieniano średnicę mikrostrugi (60 μm oraz 70 μm) oraz ciśnienie argonu jako gazu mikro-jetowego (0,5 MPa i 0,6 MPa). Uzyskano znacznie lepsze własności mechaniczne złącza po zastosowaniu chłodzenia mikro-jetowego. Na uwagę zasługuje przede wszystkim uzyskanie wydłużenia względnego na poziomie 6%, podczas gdy bez chłodzenia mikro-jetowego wartość wydłużenia względnego złącza wynosiła ok 4%. Równocześnie uzyskano lepszą doraźną wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne. Najlepszą wytrzymałość spoiny uzyskano przy ciśnieniu 0,5 MPa. W części badań rozpoznawczych nie wykonywano połączeń na elementach podestu, tylko na blachach zaproponowanych na tego typu konstrukcję. Nie sprawdzano też innego gazu mikro-jetowego zalecanego do spawania stali jakim jest hel. Wpływ helowego chłodzenia mikro-jetowego postanowiono sprawdzić w części badań zasadniczych, które są zostały rozszerzone w stosunku do badań rozpoznawczych. Jednak wyniki badań rozpoznawczych są zadowalające i pozwoliły na zaproponowanie tezy pracy.

6. TEZA

Na podstawie dokonanego, interdyscyplinarnego przeglądu literatury i przeprowadzonych badań wstępnych można stwierdzić, że równoczesne zastosowanie podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego pozwoliło na zwiększenie wytrzymałości i jakości złącza stosowanego do podestu ruchomego z dużo większą powtarzalnością (brak pęknięć) niż w klasycznym procesie MAG. Na tej podstawie przeglądu literatury i rezultatów badań wstępnych zaproponowano tezę rozprawy, która zakłada, że:

Modyfikacja procesu spawania wysokowytrzymałej stali z grupy AHSS w konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych, poprzez zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego i podkładki miedzianej, pozwoli na uzyskanie lepszych własności mechanicznych złącza, a przez to umożliwi wydłużenie zasięgu operacyjnego podestu, bez podwyższania masy całkowitej konstrukcji i przy zachowaniu spełniania wymagań bezpieczeństwa.

Dla udowodnienia tak postawionej tezy przeprowadzono badania zasadnicze, które objęły:

- wykonanie konstrukcji spawanej podestu ruchomego o podwyższonym zasięgu pracy ze stali AHSS – zwiększenie o 20 % zasięgu,
- dobór parametrów spawania MAG i chłodzenia mikro-jetowego z zastosowaniem podkładki miedzianej, formującej grań spoiny i odprowadzających ciepło,
- przeprowadzenie analizy własności mechanicznych podestu ruchomego o podwyższonym zasięgu pracy:
 - sprawdzenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza elementów podestu ruchomego,
 - sprawdzenie wytrzymałości zmęczeniowej złącza,
 - sprawdzenie twardości złącza elementów podestu ruchomego,
 - sprawdzenie mikro struktury złącza podestu ruchomego,
 - przeprowadzanie próby zginania złącza elementów podestu ruchomego,
 - badanie wizualne, magnetyczno-proszkowe, radiograficzne złącza spawanego,
 - sprawdzenie strzałki ugięcia konstrukcji,

- wykonanie elementu rzeczywistego podestu,
- sprawdzenie spełnienia wymagań wg normy EN ISO 15613 „Uznania Technologii Spawania” [86],
- złożenie wniosku patentowego (nr P.429818).

7. BADANIA ZASADNICZE

7.1. Możliwość wykonania podestu ruchomego poprzez spawanie zmodyfikowanym procesem spawalniczym

W części rozpoznawczej badań dobierane były najwłaściwsze parametry do wykonania złączy próbnych z blachy DOCOL 1200M.

Do tej pory nie przeprowadzono badań na obiekcie rzeczywistym (elementy podestu ruchomego wykonanego ze stali DOCOL 1200M).

Celem przeprowadzonych badań był wybór najwłaściwszych parametrów do spawania elementów podestu ruchomego z trudno-spawalnej stali AHSS. Postanowiono wykonać prototypowe ramię podestu ruchomego z zastosowaniem opracowanej metody MAG z równoczesnym zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego. Zaproponowano sprawdzenie możliwości wykorzystania dwóch drutów elektrodowych UNION X90 (który był częściowo wykorzystany w badaniach rozpoznawczych do spawania blach ze stali DOCOL 1200M).

Postanowiono zastosować miedzianą podkładkę formującą. W badaniach rozpoznawczych stwierdzono, że podkładka ceramiczna nie daje pozytywnych rezultatów. Do spawania elementów podestu zaproponowano mieszankę osłonową 82% Ar + 18% CO₂, której zastosowanie korzystniej wpływało na własności wykonanych złączy próbnych ze stali DOCOL 1200M niż stosując CO₂.

Rozstaw pomiędzy elementami podestu postanowiono ustawić na odległość 1 mm (wykorzystując dane z badań rozpoznawczych). Konsekwentnie nie zmieniano parametrów napięciowo prądowych i prędkości spawania (19 V, 115 A, 300 mm/min.). Średnica drutu elektrodowego wynosiła 1 mm (zgodnie z wynikami badań rozpoznawczych).

Natężenie przepływu mieszanki gazów osłonowych wynosiła 12 l/min. (zgodnie z wynikami z badań rozpoznawczych). Wyniki badań rozpoznawczych dotyczących spawania stali AHSS wskazywały na obniżenie własności mechanicznych złącza, a także zwiększoną podatność na pękanie zwłoczne. Zalecane jest zatem ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania do poziomu 5 kJ/cm [45-48].

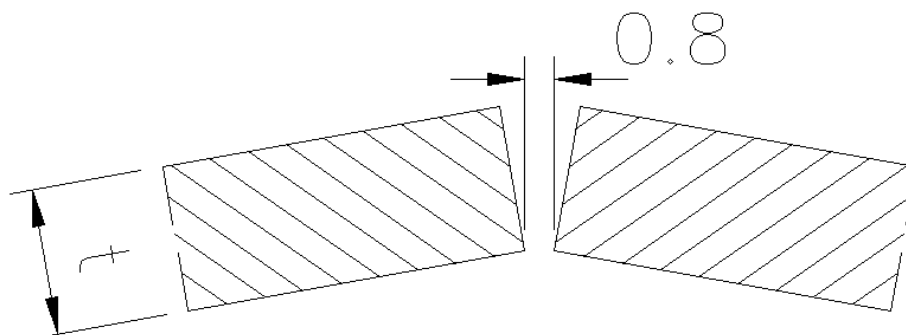
W badaniach rozpoznawczych i zasadniczych energia liniowa spawania wynosiła ok. 3,4 kJ/cm.

W celu poprawy spawalności stali proponuje się wprowadzenie dodatkowego chłodzenia, które sprzyja przemianie martenzytycznej [49-51].

Zasadniczym problemem spawalniczym tej grupy stali jest dużo niższa wytrzymałość powstałego złącza od materiału rodzimego i gorsze własności plastyczne, których miarą jest wydłużenie względne [76-77].

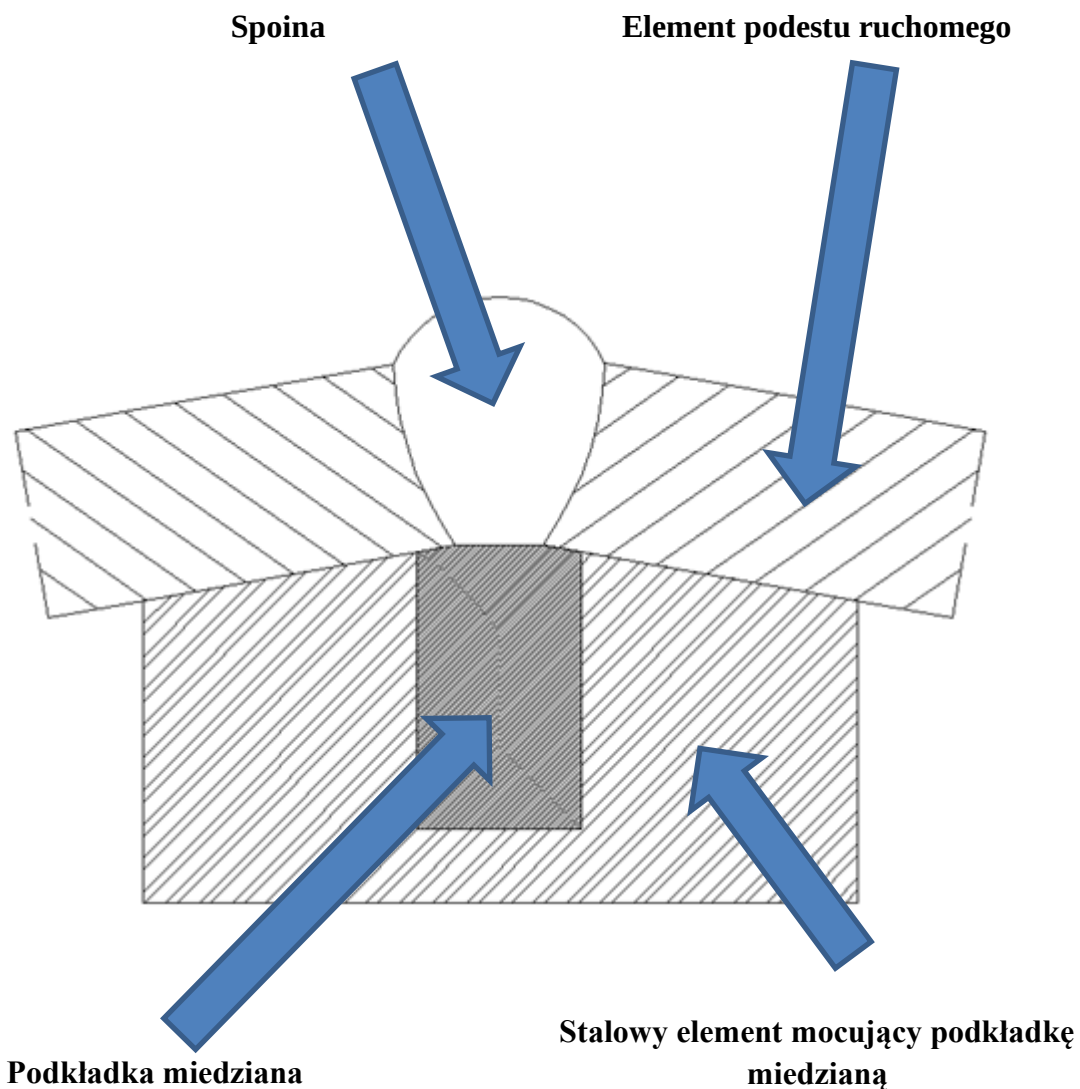
7.2. Spawanie elementów podestu ruchomego- wykonanie próbek

Podobnie jak w części rozpoznawczej postanowiono dobrać odpowiednią szczelinę pomiędzy spawanymi równoległymi elementami podestu (wykorzystując informację, że szczelina pomiędzy testowanymi blachami powinna być na poziomie 1 mm). Elementy podestu są ustawione względem siebie pod kątem 120°. Sprawdzano rozstaw elementów podestu w przedziale od 0.6 mm do 1,2 mm dla złącza wykonanego z podkładka miedzianą. Najlepsze efekty dała szczelina dobrana na poziomie 0,8 mm. Sposób przygotowania złącza elementów podestu ruchomego o grubości 1,8 mm pokazano na rys. 24.



Rys. 24. Sposób przygotowania elementu do spawania MAG z podkładką miedzianą-
rysunek poglądowy

Na rysunku 25 przedstawiono jednościgowy sposób wykonania połączenia spawanego i sposób wykonania formującej podkładki miedzianej.



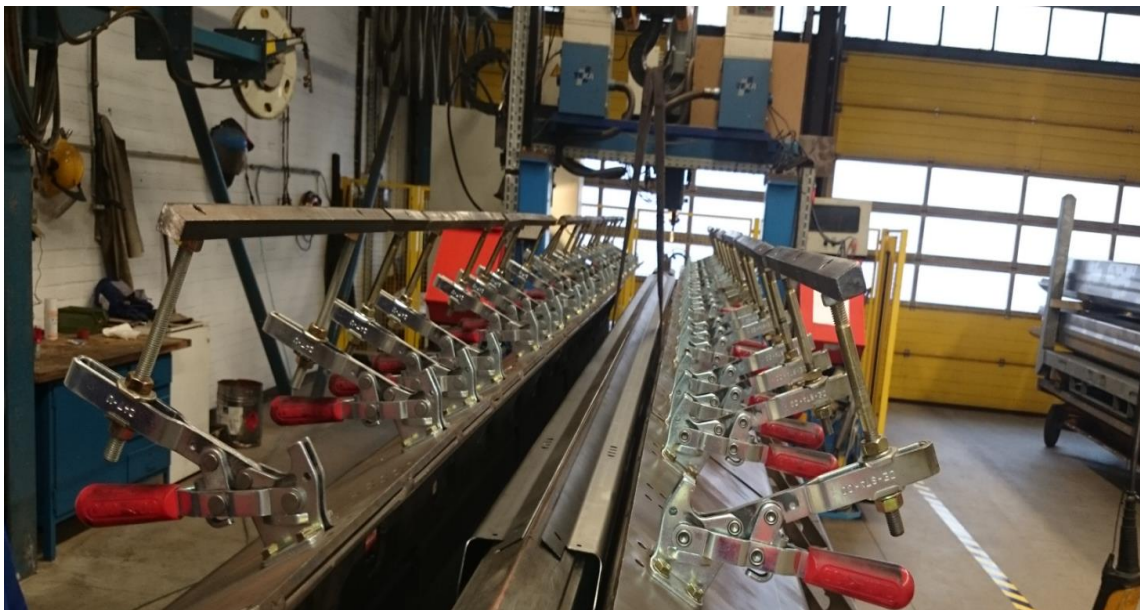
Rys. 25. Sposób wykonania połączenia spawanego MAG z podkładką miedzianą

Zastosowano źródło prądu stałego z biegunowością (+) na elektrodzie (na co wskazywały badania rozpoznawcze). Na rys. 26 przedstawiono kształt formującej podkładki miedzianej (wciśniętej w stalowy element mocujący).



Rys. 26. Podkładka miedziana formująca lico spoiny podestu ruchomego [źr. wł.]

Zbudowano stanowisko, na którym zastosowano podkładkę formującą (rys. 27.) Stanowisko podzielone jest na dwa główne obszary – pierwszy stanowi obszar stabilizacji i mocowania, drugi to półautomat spawalniczy z układem sterującym.



Rys. 27. Stanowisko do spawania elementów budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych [źr. wł.]

Po spawaniu elementów podestu przeprowadzono badania nieniszczące (NDT) w celu oceny jakości złącza:

- badanie wizualne (VT) wykonanych złączy spawanych wykonano okiem uzbrojonym w lupę przy powiększeniu $3\times$ – badania wykonano wg wymagań normy PN-EN ISO 17638 kryteria oceny wg EN ISO 5817 [111],
- badanie magnetyczno-proszkowe (MT) - badania wykonano wg normy PN-EN ISO 17638, ocenę badań dokonano wg EN ISO 5817 [111], urządzeniem do badań defektoskopem magnetycznym typu REM – 230.

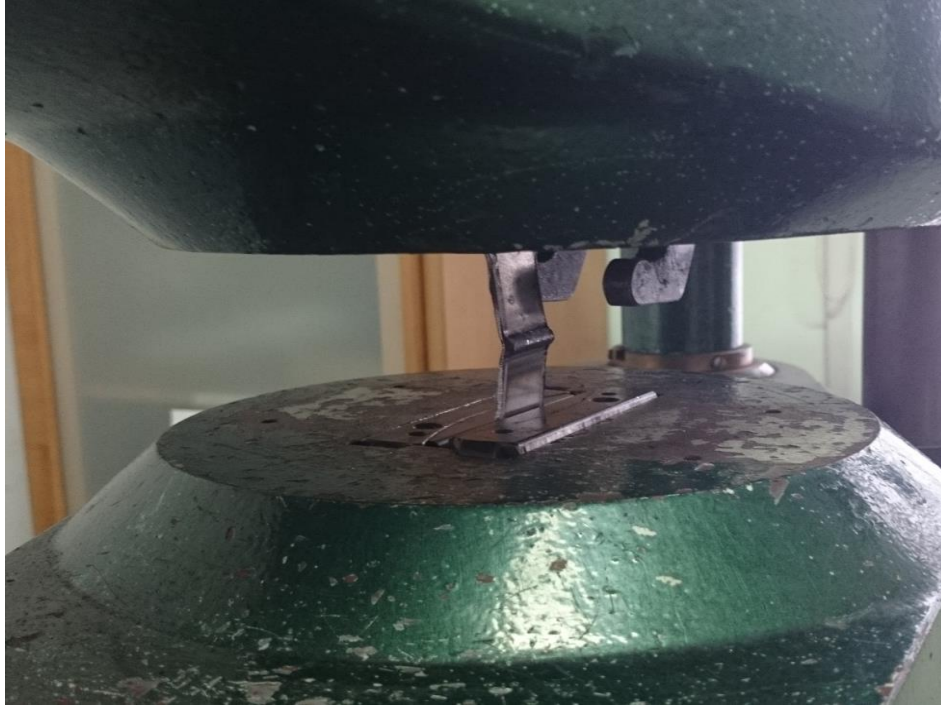
Ocena powstałych połączeń podestu ruchomego była pozytywna, nie stwierdzono wad i niezgodności spawalniczych. Prawidłowy stan powierzchni złącza elementów podestu ruchomego od strony grani pokazano na rysunku 28.



Rys. 28. Stan powierzchni złącza elementów podestu ruchomego od strony grani po spawaniu MAG w osłonie $82\% \text{ Ar} + 18\% \text{ CO}_2$, zastosowana miedziana podkładka formująca [źr. wł.]

Rysunek 28 przedstawia wygląd spoiny od strony grani wykonanego w mieszance spawalniczej w składzie $82\% \text{ Ar}$ i $18\% \text{ CO}_2$ oraz przy zastosowaniu podkładki formującej wykonanej z miedzi. Podkładka miedziana zastosowana od strony grani spoiny w bardzo dobry sposób odprowadza ciepło od dolnej części połączenia spawanego, dodatkowo formuje grani spoiny. Analiza wyników badań wizualnych pozwala stwierdzić, że nie występują żadne wady oraz niezgodności spawalnicze (rys. 28). Po ocenie złączy badaniami nieniszczącymi postanowiono wykonać badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie

pospawanych elementów podestu. Wytrzymałość wykonanych połączeń przetestowana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 (rys. 29.)



Rys. 29. Wykonywanie badań wytrzymałościowych (widoczne wzajemne pochylenie elementów podestu) [źr. wł.]

W pierwszym etapie badań sprawdzono wytrzymałość złącza wykonanego klasycznym procesem MAG z wykorzystaniem ceramicznej podkładki formującej, ale bez chłodzenia mikro-jetowego. Przeprowadzono analizę wytrzymałości złącza podestu ruchomego (kąt pomiędzy elementami podestu wynosił 120°). Wyznaczono średnią z 3 pomiarów (próbki 1, 2, 3). Rezultaty testów wytrzymałościowych zaprezentowano w tabl. 9.

Tabl. 9. Rezultaty testów wytrzymałościowych elementów podestu ruchomego

próbka	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5
1	547	694	3,6
2	541	689	3,5
3	542	702	3,4
średnia	543,3	695	3,5

Z analizy tablicy 9 wynika, że można wyliczyć średnią wartość wydłużenia na rozciąganie R_m na poziomie 695 MPa natomiast średnią granicę plastyczności R_e na poziomie 543 MPa wydłużenie A_5 jest na poziomie 3,5. Z analizy tablicy wynika, że R_e i R_m jest na dość wysokim poziomie. Wydłużenie względne ma wartość na poziomie poniżej 4%, zatem postanowiono sprawdzić struktury i własności złącza utworzonego w procesie z odprowadzonym dodatkowo ciepłem.

7.3. Spawanie podestu ruchomego z wykorzystaniem miedzianych podkładek schładzających z równoczesnym zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego

Wykonano testowe złącza z podkładką miedzianą, która znacznie intensywniej odprowadza ciepło od podkładki ceramicznej i z równoczesnym wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego. Do tej części badań przyjęto parametry procesu, które dały najlepsze własności w dotychczasowej analizie zagadnienia:

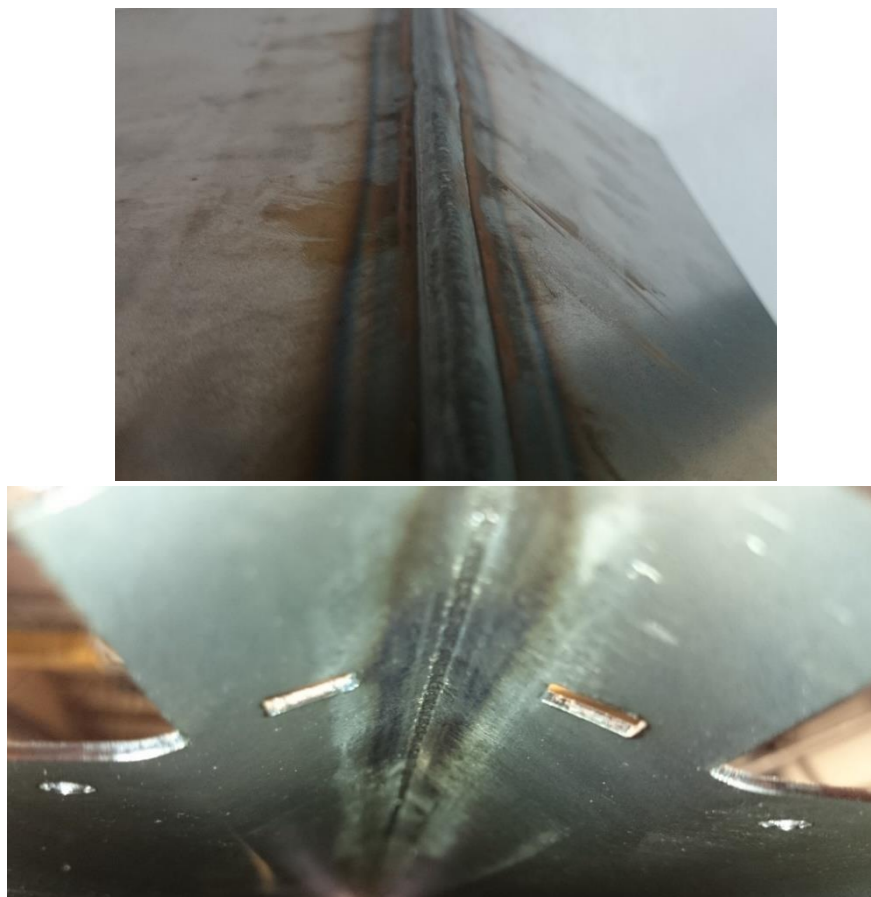
- natężenie prądu spawania: 115 A,
- napięcie łuku; 19 V,
- prędkość spawania; 300 mm/min,
- zastosowanie podkładki miedzianej,
- zastosowanie źródła prądu stałego,
- gaz osłonowy; 82 % Ar + 18 % CO₂,
- natężenie przepływu gazu: 12 l/min,
- szczelina pomiędzy dwiema krawędziami: 0,8 mm.

Postanowiono sprawdzić jakość wykonywanych połączeń spawanych przy wykorzystaniu różnej średnicy mikrostrugi oraz przy zastosowaniu różnego ciśnienia argonu i helu jako gazu mikro-jetowego.

W tej części badań przyjęto następujące parametry argonowego chłodzenia mikro-jetowego:

- gaz mikro-jetowy: argon albo hel,
- ciśnienie gazów mikro-jetowych zmieniano od 0,1 do 0,7 MPa,
- średnica mikrostrugi: 60 μm .

Pospawane elementy podestu z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego (argonowego i helowego) przedstawiono na rysunku 30 i 31.



Rys. 30. Stan powierzchni spoin po spawaniu z argonowym schładzaniem mikro-jetowym i z zastosowaniem podkładki miedzianej. Złącza wykonane są prawidłowo, bez niezgodności i wad spawalniczych [źr. wł.]



Rys. 31. Stan powierzchni spoin po spawaniu z helowym schładzaniem mikro-jetowym i zastosowaniem podkładki miedzianej [źr. wł.]

Badania wizualne makroskopowe wskazują, że w obu przypadkach stan powierzchni spoin po spawaniu z argonowym i helowym schładzaniem mikro-jetowym i z zastosowaniem podkładki miedzianej od strony grani spoiny nie wykazuje wad oraz niezgodności spawalniczych.

Wykonano badania wizualne oraz magnetyczno-proszkowe zgodnie z metodyką przedstawioną na początku rozdziału 7. Spoiny spełniły wymagania dla granicy dopuszczalności „B” wg PN EN ISO 5817 [111]. Po ocenie złączy badaniami nieniszczącymi postanowiono wykonać badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie pospawanych elementów podestu. Wytrzymałość wykonanych połączeń przetestowana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 (tabl. 10).

Na podstawie badań rozpoznawczych (tabl. 6) zauważono, że najlepsze efekty można uzyskać przy użyciu mikrodyszy o średnicy 60 μm . Schładzanie mikrostrugą o średnicy 70 μm było zbyt intensywne i prowadziło do powstawania wad i niezgodności spawalniczych. Injektory mikro-jetowe z mikrodyszą wyłącznie o średnicy 60 μm użyto w badaniach zasadniczych [68].

Tabl. 10. Rezultaty testów wytrzymałościowych stali DOCOL 1200M po spawaniu z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego

gaz mikro-jet	ciśnienie mikrostrugi, [MPa]	średnica mikrostrugi, [μm]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
hel	0,1	60	451	707	4,5
hel	0,1	60	449	709	4,6
hel	0,1	60	453	711	4,5
hel	0,1	60	452	704	4,4
hel	0,1	60	449	703	4,4
hel	0,2	60	456	726	4,5
hel	0,2	60	455	726	4,7
hel	0,2	60	458	724	4,5
hel	0,2	60	453	727	4,4
hel	0,2	60	456	727	4,6
hel	0,3	60	471	742	5
hel	0,3	60	468	746	4,9
hel	0,3	60	473	745	4,8
hel	0,3	60	475	746	5
hel	0,3	60	478	748	5,2
hel	0,4	60	515	773	6,4
hel	0,4	60	515	771	6,3

c.d. tabl. 10					
gaz mikro-jet	ciśnienie mikrostrugi, [MPa]	średnica mikrostrugi, [μm]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
hel	0,4	60	516	772	6,7
hel	0,4	60	515	774	6,5
hel	0,4	60	513	779	6,4
hel	0,5	60	527	801	6,5
hel	0,5	60	526	807	6,7
hel	0,5	60	527	803	6,7
hel	0,5	60	525	804	6,5
hel	0,5	60	524	805	6,6
hel	0,6	60	566	765	6,3
hel	0,6	60	560	760	6,3
hel	0,6	60	559	767	6,4
hel	0,6	60	569	763	6,1
hel	0,6	60	568	762	6,2
argon	0,1	60	452	711	4,5
argon	0,1	60	450	714	4,6
argon	0,1	60	452	712	4,4
argon	0,1	60	453	717	4,3
argon	0,1	60	452	716	4,4

c.d. tabl. 10					
gaz mikro-jet	ciśnienie mikrostrugi, [MPa]	średnica mikrostrugi, [μm]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
argon	0,2	60	454	721	4,5
argon	0,2	60	453	724	4,8
argon	0,2	60	454	722	4,7
argon	0,2	60	458	720	4,6
argon	0,2	60	454	721	4,5
argon	0,3	60	471	733	5
argon	0,3	60	475	738	4,9
argon	0,3	60	463	737	4,8
argon	0,3	60	467	732	5,1
argon	0,3	60	469	731	5,2
argon	0,4	60	524	766	6
argon	0,4	60	525	760	5,8
argon	0,4	60	530	761	5,9
argon	0,4	60	535	764	6
argon	0,4	60	537	769	6,1
argon	0,5	60	561	792	6,3
argon	0,5	60	562	799	6,2
argon	0,5	60	569	797	6,4
argon	0,5	60	564	791	6,1

c.d. tabl. 10					
gaz mikro-jet	ciśnienie mikrostrugi, [MPa]	średnica mikrostrugi, [μm]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
argon	0,5	60	560	793	6,0
argon	0,6	60	548	755	6,1
argon	0,6	60	541	750	6,2
argon	0,6	60	543	753	6,0
argon	0,6	60	546	757	6,2
	0,6	60	557	751	6,3
argon	0,7	60	niezgodności spawalnicze		
hel	0,7	60	niezgodności spawalnicze		

W tablicy nr 10 zostały przedstawione testy wytrzymałościowe dla stali DOCOL 1200M po spawaniu z wykorzystaniem gazów do chłodzenia mikro-jetowego (helu i argonu). Podczas testu zmieniane było ciśnienie mikrostrugi, której wartości wzrastały od 0 do 0,6 MPa przy niezmienniej średnicy. Pomiarów dokonano dla 5 próbek do każdej wartości ciśnienia. Po wyciągnięciu średnich wartości dla granicy plastyczności R_e dla helu zauważa się, że jej wartość wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia. Podobnie sytuacja wygląda z próbami na rozciąganie R_m i wydłużenie A_5 . Powyższe wyniki jednoznacznie świadczą, że najlepszą wytrzymałość spoiny można uzyskać przy ciśnieniu 0,5 mikrostrugi chłodzącej MPa dla helu i argonu. Następnie przebadano złącze próbne wykonane przy spawaniu z chłodzeniem jetowym, przy ciśnieniu 0,7 MPa. Wykonane próbki wykazują wady i niezgodności spawalnicze w postaci przyklejenia od stroni grani spoiny oraz podtopienia od strony lica. Z analizy tablicy 10 wynika, że przy wzrastającym ciśnieniu helu średnia granica plastyczności R_m spoiny, jej wartość na rozciąganie R_m i wydłużenie A_5 wzrasta. Powyższe wyniki świadczą jednoznacznie o lepszej wytrzymałości spoiny dzięki zastosowaniu gazu mikro-jetowego jakim jest He niż Ar. Helowe chłodzenie mikro-jetowe

pozwała na uzyskanie wartości powyżej 800 MPa, natomiast argonowe chłodzenie mikro-jetowe pozwala na uzyskanie wytrzymałości złącza nieznacznie poniżej 800 MPa. Bez chłodzenia mikro-jetowego wytrzymałość R_m złącza jest na poziomie 700 MPa.

W wykonanym złączu próbnym z wykorzystaniem podkładki miedzianej oraz z zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego nie występowały żadne wady i niezgodności spawalnicze (dla obu gazów mikro-jetowych: Ar, He). Niezgodności spawalnicze (pęknięcia) pojawiają się tylko przy zbyt intensywnym schładzaniu mikro-jetowym, gdy ciśnienie gazu mikro-jetowego (Ar lub He) było powyżej 0,6 MPa. Porównanie jakości badanych spoin – ocena wizualna – wykazało, że przy spawaniu blach z zastosowaniem miedzianej podkładki i chłodzenia mikro-jetowego uzyskano dobre efekty.

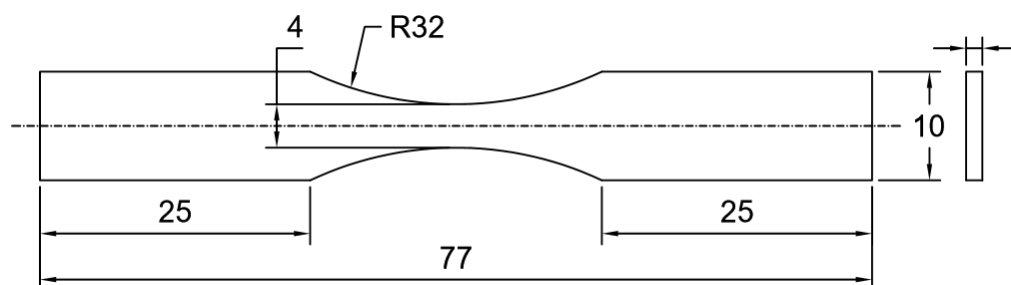
Jak wynika z tabl. 10, wytrzymałość na rozciąganie połączeń podestu ruchomego wynosiła przy właściwie dobranych parametrach chłodzenia mikro-jetowego ponad 800 MPa (podczas gdy bez chłodzenia mikro-jetowego maksymalna wytrzymałość była na poziomie 670 MPa) tablica 7. Helowe chłodzenie mikro-jetowe jest korzystniejsze od schładzania mikro-jetowego argonem.

Postanowiono sprawdzić wytrzymałość zmęczeniową złącza dla helowego chłodzenia mikro-jetowego.

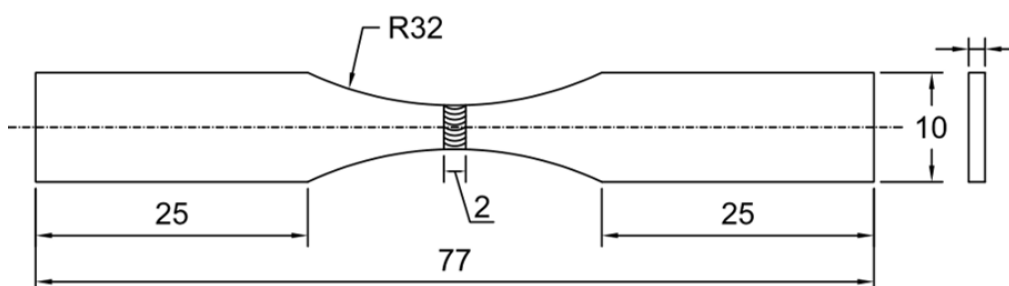
7.4. Badania zmęczeniowe

Jakość połączenia spawanego wytworzonego przy użyciu podkładki miedzianej i helowego chłodzenia mikro-jetowego określono w teście statycznego rozciągania i próbie zmęczeniowej, we współpracy z Zakładem Homologacji i Badań Pojazdów Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie. W obu rodzajach badań wykorzystywano próbki klepsydryczne (rys. 32) stosując cięcie laserowe. Ten rodzaj próbek został wytypowany ze względu na umiejscowienie spoiny w najmniejszym przekroju bazy pomiarowej, będącym fizyczną płaszczyzną zniszczenia, niezależnie od rodzaju próby mechanicznej.

(a)



(b)



Rys. 32. Próbkki klepsydryczne: (a) do badania właściwości mechanicznych materiału rodzimego spoiny, (b) nominalna grubość próbki w strefie pomiarowej wynosiła 1,8 mm, natomiast szerokość nominalna przyjmowała wartość 4 mm [71].

Badanie statyczne i zmęczeniowe przeprowadzono z użyciem maszyny wytrzymałościowej 8874 INSTRON o zakresie siły osiowej ± 25 kN i momentu skręcającego ± 225 Nm. Wszystkie testy zrealizowano w temperaturze pokojowej.

Próby rozciągania zrealizowano przy sterowaniu prędkością przemieszczenia o wartości 1 mm/min. Do pomiaru odkształcenia wzdłużnego wykorzystano ekstensometr osiowy 2620-602 o bazie pomiarowej 12,5 mm i zakresie pomiarowym, wynoszącym $\pm 2,5$ mm [73].

Próbę zmęczeniową przeprowadzono z użyciem sygnału naprężenia zmiennego cyklicznie o przebiegu sinusoidalnym. W badaniu zmęczeniowym stosowano następujące parametry sygnału sterującego:

- a) współczynnik asymetrii cyklu $R = 0$,
- b) amplituda naprężenia = 250 MPa,
- c) wartość średnia naprężenia = 250 MPa,

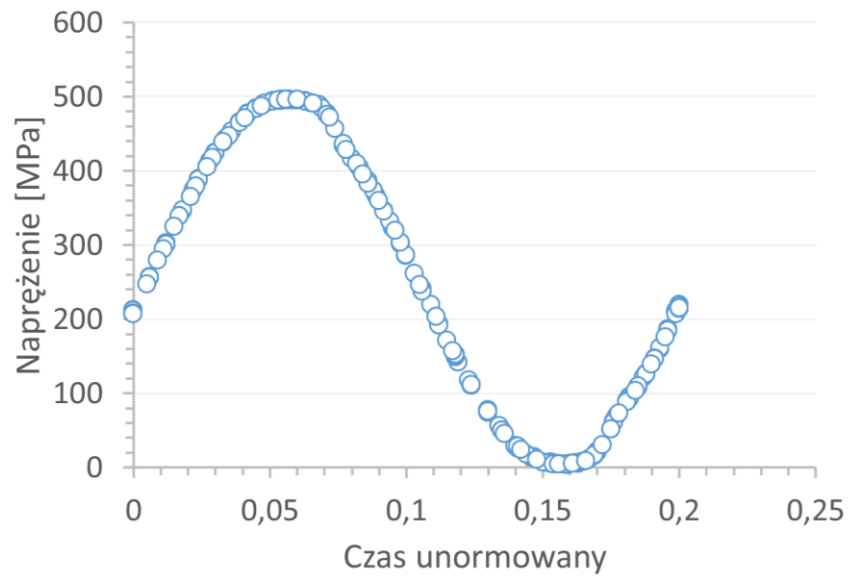
- d) wartość minimalna naprężenia = 0 MPa,
- e) wartość maksymalna naprężenia = 500 MPa,
- f) częstotliwość 5 Hz.

Wybrane parametry próby zmęczeniowej dla złącza ze stali DOCOL 1200M po spawaniu MAG z zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego przedstawiono w tablicy 11.

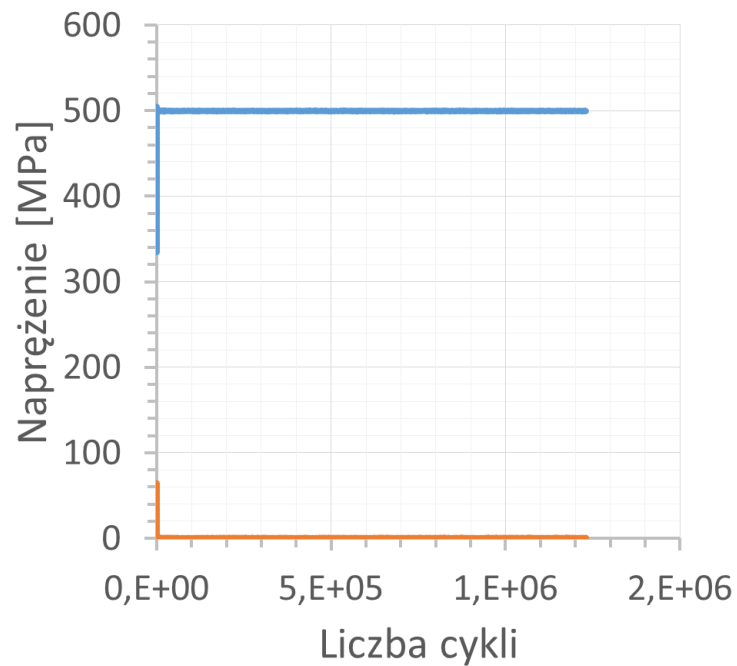
Tabl. 11. Wybrane parametry próby zmęczeniowej oraz wynik końcowy

wartość maksymalna naprężenia [MPa]	zrealizowana liczba cykli na poszczególnych etapach próby zmęczeniowej	wynik końcowy
500 MPa	1 etap: 611 734	pozytywny
	2 etap: 1 230 023	pozytywny
całkowita liczba cykli	1 841 757	pęknięcie próbki w środku strefy pomiarowej

Przyjęta wartość naprężenia maksymalnego odpowiada granicy sprężystości materiału spoiny wytworzonej z techniką micro-jet. Przykładowy fragment przebiegu sygnału naprężenia zamieszczono na rys. 33, natomiast jego maksymalne i minimalne wartości zawarto na rys. 34.

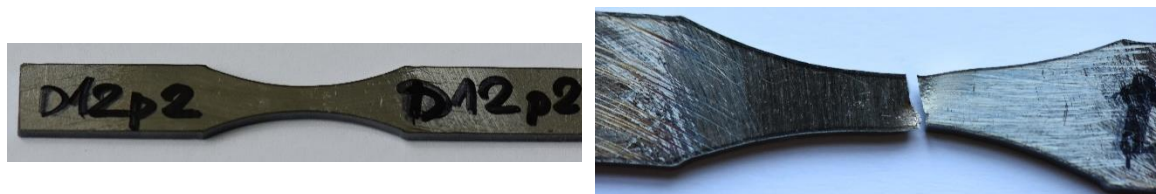


Rys. 33. Fragment przebiegu sygnału napężenia (czas unormowany w sekundach)



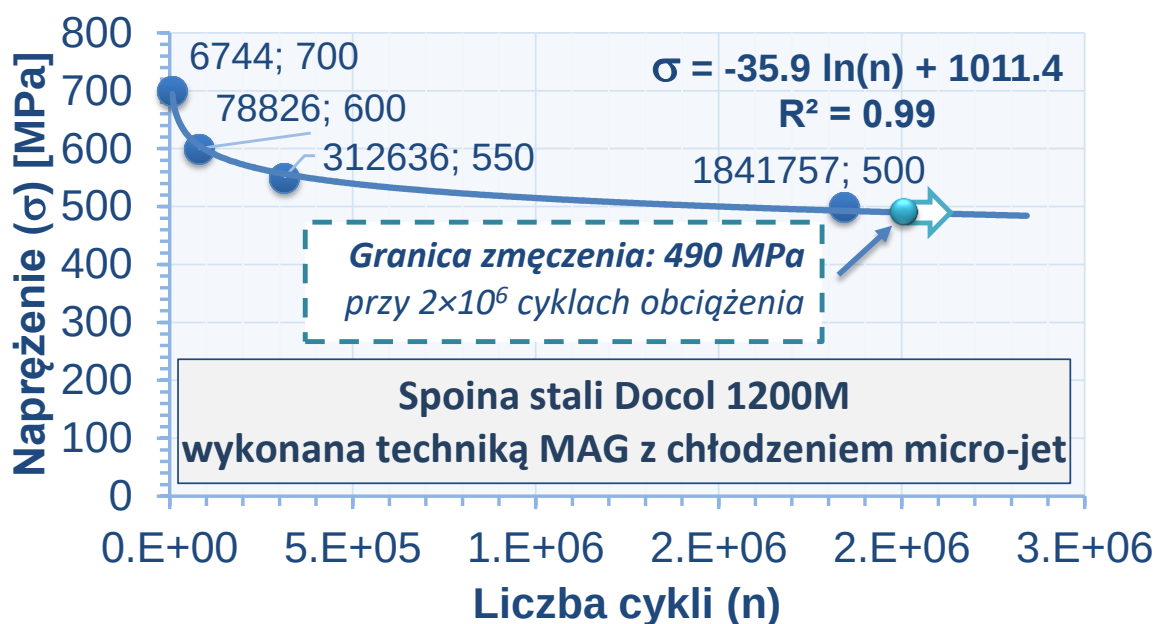
Rys. 33. Przebieg minimalnych i maksymalnych wartości sygnału napężenia wykorzystanego w próbie zmęczeniowej dla liczby cykli obciążenia na II etapie prowadzonego testu do 1 230 023 cykli obciążenia.

Widok zerwanej próbki po badaniach zmęczeniowych przedstawiono na rysunku 34b.



Rys. 34. Próbką klepsydryczna: (a) i (b) odpowiednio: przed i po badaniu zmęczeniowym

Badanie zmęczeniowe przy wartości naprężenia zastosowanego, wykazało wystąpienie pęknięcia (rys. 34) przy liczbie cykli obciążenia 1 841 757 (tab. 11) - biskiej oczekiwanej wartości dla granicy zmęczenia stali tj.: 2×10^6 . Na podstawie tego wyniku można stwierdzić, że przy wartości naprężenia nieznacznie poniżej 500 MPa materiał będzie posiadał nieskończoną trwałością zmęczeniową (rys. 35). Sporządzając wykres Wöhlera (rys. 35) oszacowano granicę zmęczenia badanego połączenia spawanego micro-jest na poziom 490 MPa.



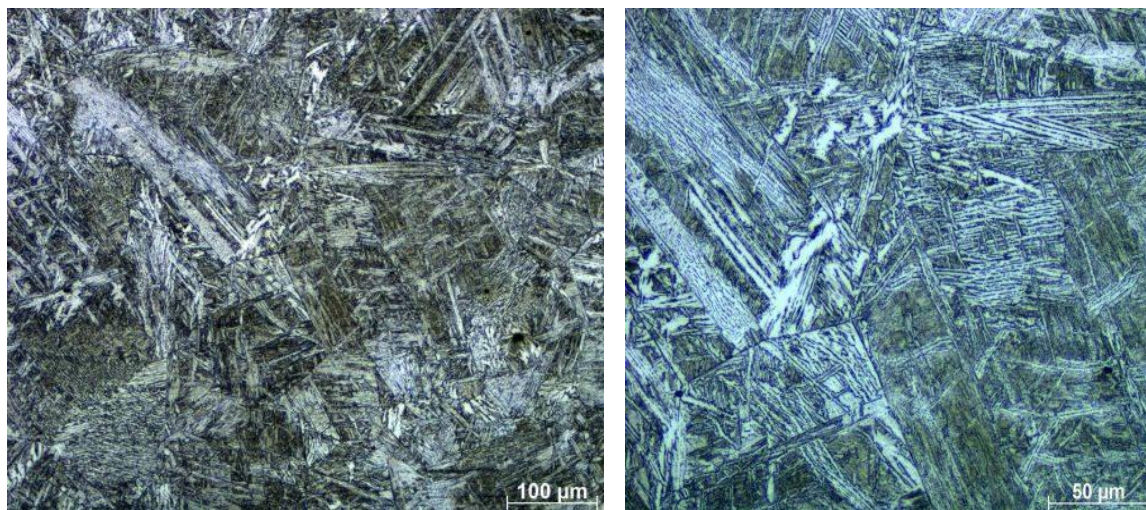
Rys. 35. Wykres Wöhlera - wykres zależności pomiędzy wartością naprężeń niszczących próbkę danego materiału i ilością cykli zmian obciążenia tej próbki przy użyciu chłodzenia mikro-jetowego.

Pozytywne wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej złącza pozwalają na stwierdzenie, że konstrukcja będzie spełniała warunki bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

7.5. Badania mikrostruktury

Badania mikrostruktury przeprowadzono na zglądach poprzecznych wg normy PN-EN ISO 9015 na mikroskopie Neophot 32 [81].

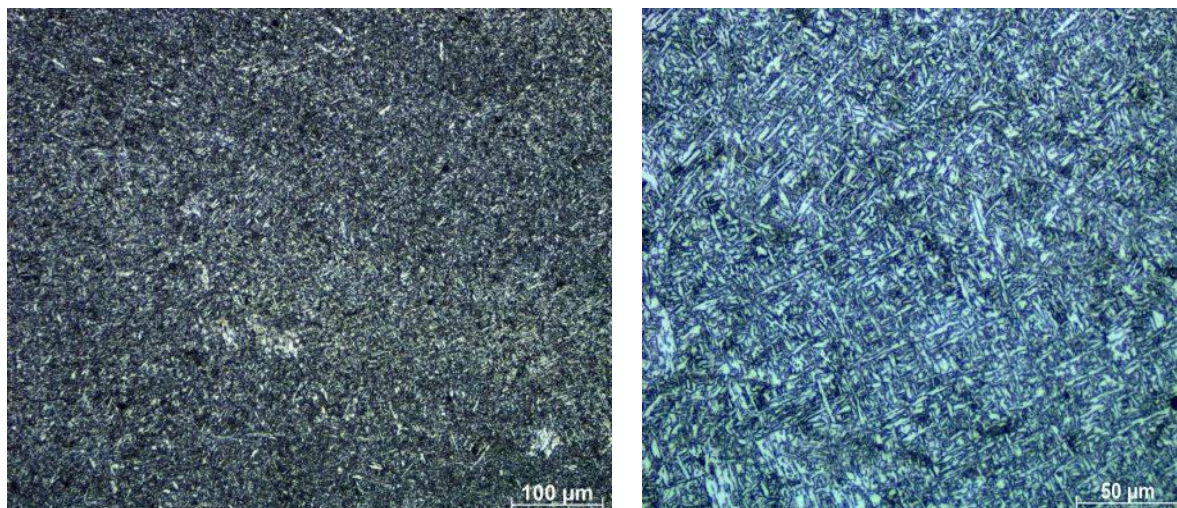
Następnie przeprowadzono analizę mikrostruktury złącza wykonanego z zastosowaniem podkładki miedzianej (rys. 36) oraz z równoczesnym zastosowaniem miedzianej podkładki i chłodzenia mikro-jetowego (rys. 36).



Rys. 36. Mikrostruktura złącza podestu ruchomego bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej, traw. nital

Na rysunku widoczny jest martenzyt, bainit, gruboziarnisty ferryt GBF. Złącze posiada strukturę korespondującą z niskim wydłużeniem względnym A_5 na poziomie około 4%.

Zbadano także strukturę złącza podestu ruchomego z chłodzeniem mikro-jetowym (hel i argon) i z równoczesnym zastosowaniem podkładki miedzianej (rys. 37). Struktura złącza (w obu warunkach chłodzenia mikro-jetowego argon i hel): stanowi martenzyt i drobnoziarnisty ferryt AF i ferryt SPF. Obserwowano strukturę gwarantującą dobre własności plastyczne ($A_5 = 6,2\%$).



Rys. 37. Mikrostruktura złącza podestu ruchomego z helowym chłodzeniem mikro-jetowym i z zastosowaniem podkładki miedzianej, traw. nital

Na rysunku 37 widoczny jest martenzyt i drobnziarnisty ferryt. Struktura ta ma wpływ na poprawę własności plastycznych, co w efekcie daje wyeliminowanie pęknięcia w spoinie i strefie wpływu ciepła (złącza próbne w badaniach rozpoznawczych miały wady i niezgodności spawalnicze, gdy nie zastosowano równocześnie podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego). Zastosowanie podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego pozwoliło na zwiększenie jakości połączeń podestu ruchomego (wyższa R_m , R_e , A_5) niż w procesie MAG bez chłodzenia.

7.6. Wykonanie badań twardości

Następnym etapem badań było wykonanie badań twardości. W tablicy 9 przedstawiono wyniki badań twardości wg normy PN EN ISO 9015-1 przy pomocy twardościomierza HPO250, metodą Vickersa HV10, temperatura badania wynosiła 20° C przy obciążeniu 98 N (10 kG). Wykonano jedną linię pomiarową (wynika to z cienkościennego materiału) na całej długości połączenia spawanego tzn. materiał rodzimy > SWC > spoina > SWC > materiał rodzimy.

W tablicy 12 pokazano twardość złącza podestu ruchomego wykonanego bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej, natomiast w tabl. 13 twardość złącza wykonanego z chłodzeniem mikro-jetowym i z podkładką miedzianą.

Tabl. 12. Twardość złącza bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej

rodzaj gazu micro- jetowego	materiał rodzimym			SWC			spoina			SWC			materiał rodzimym		
brak	391	391	387	351	343	362	323	324	312	354	335	364	386	385	383
wymagania twardości elementów podestów ruchomych: 250÷450 HV															

Z danych tablicowych wynika, iż średnia twardość badanego złącza w materiale rodzimym wynosi 388 HV, w strefie wpływu ciepła SWC jest na poziomie średniej wartości 351,5 HV, natomiast w spoinie 319,66 HV.

W tablicy 13 przedstawiono wyniki badań twardości wg normy PN EN ISO 9015-1 przy pomocy twardościomierza HPO250, metodą Vickersa HV10, temperatura badania 20 °C przy obciążeniu 98 N (10 kG) [80]. Wykonano jedną linię pomiarową zgodnie z metodyką dla cienkościennego materiału na całej długości połączenia spawanego tzn. materiał rodzimym › SWC › spoina › SWC › materiał rodzimym.

Tabl. 13. Twardość materiału DOCOL 1200M z chłodzeniem mikro-jetowym i z podkładką miedzianą

rodzaj gazu micro- jetowego	materiał rodzimym			SWC			spoina			SWC		
He	390	393	390	349	340	359	321	321	310	351	352	359
Ar	380	395	377	288	298	290	304	299	291	298	277	282
wymagania twardości elementów podestów ruchomych: 250÷450 HV												

Z danych tablicowych wynika, iż średnia twardość badanego złącza w materiale rodzimym wynosi 385 HV, w strefie wpływu ciepła SWC waha się na poziomie średniej wartości 288 HV, natomiast w spoinie 298 HV dla mikro-jetowego chłodzenia argonem, natomiast dla chłodzenia helem: w materiale rodzimym wynosi 390 HV, w strefie wpływu ciepła SWC waha się a poziomie średniej wartości 351 HV, natomiast w spoinie 317 HV.

7.7. Próba zginania

Następnie wykonano próbę zginania wg EN ISO 5173 dla połączenia spawanego podestu ruchomego wykonanego bez użycia podkładki miedzianej i bez użycia chłodzenia mikro-jetowego (tabl. 14). Kształt i wymiar próbek był zgodny z normą wg EN ISO 5173. Próbkę wycięto przy pomocy piły mechanicznej.

Zgodnie z normą EN ISO 5173 przeprowadzono dwukrotnie próbę zginania od strony grani próbki (G1, G2) oraz dwukrotnie od strony lica (L1, L2).

Tabl. 14. Weryfikacja próbek z próby gięcia bez zastosowania podkładki miedzianej oraz bez chłodzenia mikro-jetowego

próbka	G1	L1	G2	L2
kąt gięcia	180	180	180	180
strona rozciągania	grań	lico	grań	lico
ocena ²⁾	e	ne	ne	e
e = wynik pozytywny, ne = wynik negatywny				

W tablicy 14 przedstawiono wyniki badań próby zginania wg normy EN ISO 5173 na grubości badanej próby spawalniczej 1,8 mm wykonanej bez zastosowania podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego. Szerokości próbki $b = 20$ mm, średnicy trzpienia gnącego $d = 34$ mm, rozstawu podpór 40 mm przy wymaganym kącie gięcia 180° . Na podstawie przedstawionych wyników z badań można stwierdzić, iż podczas oceny wykonanych prób złączy spawanych wystąpiły pęknięcia zarówno w próbie gięcia od strony lica jak i grani spoinie.

Następnie wykonano próbę zginania wg EN ISO 5173 dla połączenia podestu ruchomego wykonanego z użyciem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (z zastosowaniem argonu i helu).

Zgodnie z normą EN ISO 5173 przeprowadzono dwukrotnie próbę zginania od strony grani próbki (G3, G4) oraz dwukrotnie od strony lica (L3, L4).

Tabl. 15. Weryfikacja próbek z próby gięcia z zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (argonem i helem)

próbka	G3	L3	G4	L4
kąt gięcia	180	180	180	180
strona rozciągania	grań	lico	grań	lico
ocena ²⁾	e	e	e	e
1) G = materiał rodzimy, S = spoina, U = strefa przejścia				
2) e = wynik pozytywny, ne = wynik negatywny				

W tablicy 15 przedstawiono wyniki badań próby zginania wg normy EN ISO 5173 na grubości badanej próby spawalniczej 1,8 mm wykonanej przy zastosowaniu podkładki miedzianej i chłodzeniu mikro-jetowego. Szerokości próbki $b = 20$ mm, średnicy trzpienia gnącego $d = 34$ mm, rozstawu podpór 40 mm przy wymaganym kącie gięcia 180° . W przedstawionych w/w wynikach z badań, wykonana próba gięcia zarówno od strony lica jak i grani nie wykazała żadnych wad i niezgodności spawalniczych.

Wniosek:

Po zastosowaniu chłodzenia mikro-jetowego próbki charakteryzują się lepszymi własnościami plastycznymi.

7.8. Badania radiograficzne

Następnie postanowiono wykonać badania radiograficzne (jakość W18) według normy EN 17636-1. Tablica 16 przedstawia wyniki badań połączenia spawanego z badań radiograficznych wykonanych wg normy EN 17636-1 na grubości badanej próby spawalniczej 1,8 mm wykonanej bez zastosowania podkładki miedzianej i argonowego chłodzenia mikro-jetowego [83].

Tabl. 16. Wyniki badań radiograficznych bez zastosowania podkładki miedzianej oraz bez chłodzenia mikro-jetowego

oznaczenie radiogramu	jakość radiogramu	niezgodności spawalnicze	ocena
K8	W18	brak przetopu	negatywna

Na przedstawionym zdjęciu badanie rentgenowskie (rys. 38) z wykonanej spoiny bez użycia podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego, widoczne są niezgodności spawalnicze.



Rys. 38. Zdjęcie radiograficzne z niezgodnościami spawalniczymi bez użycia podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego

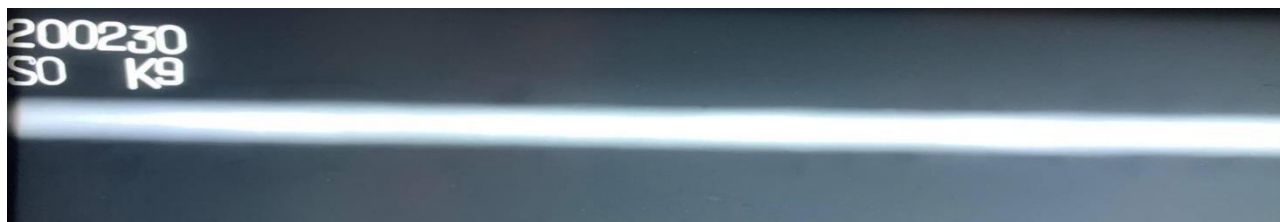
Miejsca obserwacji (poz. 1 oraz poz. 2) przedstawiają wady spawalnicze w postaci braków przetopu w wykonanych złączach spawanych. Wynik przeprowadzonego badania jest negatywny. Następnie wykonano badania radiograficzne próbek wykonywanych MAG z zastosowaniem równoczesnym podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (argonowego i helowego). Tablica 17 przedstawia wyniki badań połączenia spawanego z badań radiograficznych (jakość wykrywalności W18) wykonanych wg normy EN 17636-1 na grubości badanej próby spawalniczej 1,8 mm wykonanej przy zastosowaniu podkładki miedzianej i chłodzenia

mikro-jetowego. Złącze wykonane z argonowym chłodzeniem mikro-jetowym oznaczono K9, złącze z helowym chłodzeniem mikro-jetowym oznaczono K10.

Tabl. 17. Wyniki badań radiograficznych z zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego

oznaczenie radiogramu	jakość radiogramu	niezgodności spawalnicze	ocena
K9 (argon)	W18	brak niezgodności	pozytywna
K10 (hel)	W18	brak niezgodności	pozytywna

Z przedstawionych danych tablicowych wynika, iż nie występują niezgodności spawalnicze na badanym złączu próbnym. Wynik badań radiograficznych jest pozytywny.



Rys. 39. Zdjęcie radiograficzne złącza spawanego wykonanego z użyciem podkładki miedzianej oraz argonowego chłodzenia mikro-jetowego

Radiogram (rys. 39) przedstawia połączenie spawane wykonane z użyciem podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego. Analiza radiogramu pozwala stwierdzić, że nie występują żadne niezgodności spawalnicze.

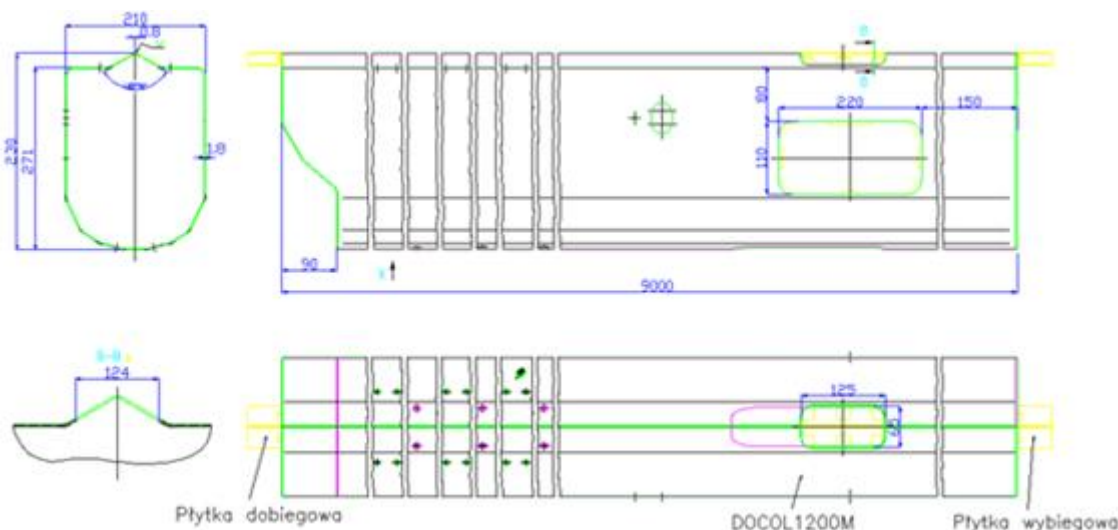
7.9. Wykonanie testowego podestu ruchomego

Z uwzględnieniem parametrów spawania podestu ruchomego, postanowiono wykonać ramię spawane podestu ze stali DOCOL 1200M o 20% dłuższe od dotychczas wykonywanego ze stali S700 MC (rys. 16). Parametry procesu były starannie ustalane ze względu na trudny do wykonania w warunkach spawalniczych element podestu ruchomego ze względu na długość ramiona cienkościennej konstrukcji, która ma skłonność do odkształceń spawalniczych. Naprężenia cieplne, struktura martenzytyczna materiału rodzimego i podwyższona zawartość wodoru sprzyjają pęknięciom w strefie wpływu ciepła i w spoinie [70, 72]. Każda konstrukcja spawana ma swoją specyfikę wynikającą z kształtu i wymiaru złącza, sposobu ukosowania i wielu innych czynników o charakterze geometrycznym i metalurgicznym [69]. Bardzo starannie dobierano parametry spawania, które pozwoliły na uzyskanie złącza o dobrej jakości. Do wykonania wydłużonego ramiona podestu ruchomego ze stali DOCOL 1200 M dobrano następujące podstawowe parametry spawalnicze: natężenie prądu $I = 115$ A, napięcie łuku $U = 19$ V, prędkość spawania $v = 350$ mm/min. Zastosowano drut elektrodowy UNION X90, gaz osłonowy $Ar + 18\% CO_2$, gdyż takie rozwiązanie zostało dokładnie sprawdzone i opisane we wcześniejszych rozdziałach rozprawy, podobnie jak cały opracowany sposób wykonania ramiona podestu ruchomego. Natężenie przepływu gazu wynosiło 12 l/min. Parametry chłodzenia mikro-jetowego, gaz mikro-jetowy: hel, średnica mikro strugi 60 μm , ciśnienie gazu 0,5 MPa są to parametry pozwalające na uzyskanie najlepszych własności mechanicznych w badaniach (tabl. 10). Na uwagę zasługuje fakt, że grubość cienkościennej konstrukcji słupowysięgnika podestu ruchomego ze stali DOCOL 1200M wynosi 1,8 mm podczas gdy dotychczasowe rozwiązania tego samego elementu ze stali S700MC miało grubość ścianki 3 mm. Na rys. 40 przedstawiono ramię słupowysięgnika podestu ruchomego wykonanego innowacyjną technologią łączenia materiałów z wykorzystaniem helowego chłodzenia mikro-jetowego. Zastosowanie stali DOCOL 1200M oraz procesu spawania elementu podestu wraz z chłodzeniem mikro-jetowym pozwoliło wykonać element podestu ruchomego wydłużony ok 20 %. Dotychczas wykonywana konstrukcja słupowysięgnika nie przekraczała 7,5 m, a łączenie za pomocą procesów spawania było wykonywane z zastosowaniem podkładki ceramicznej w klasycznym procesie MAG bez chłodzenia mikro-jetowego.

Obecnie przy zastosowaniu chłodzenia zarówno od strony grani (zastosowanie podkładki miedzianej odprowadzającej ciepło) jak i od strony lica (helowe chłodzenie mikro-jetowe) pozwoliło na wykonanie słupowysięgnika podestu ruchomego o zwiększonej długości do 9 m przy zachowaniu wymaganej wysokiej jakości i wytrzymałości złącza na rozciąganie (powyżej 700 MPa).

Wydłużenie słupowysięgnika ze stali DOCOL 1200M o grubości 1,8 mm pozwala na znaczne obniżenie masy konstrukcji. Masa wykonanego nowego opracowanego słupowysięgnika o grubości ścianki 1,8 mm i długości 9 m wynosi 45 kg. Masa dotychczasowego słupowysięgnika o grubości ścianki 3 mm i długości 7,5 m wynosi 62,5 kg. Zatem możliwe jest równoczesne wykonanie ramiona podestu ruchomego dłuższego o ok 20% i o dodatkowo mniejszej masie niż miało to miejsce w dotychczasowym rozwiązaniu.

Jest to zgodne z wymaganiami konstrukcji podestów ruchomych [56], gdzie zezwala się na wydłużenie elementów środków transportu przy zachowaniu tej samej masy i zachowaniu, zasad bezpieczeństwa [75]. Miernikiem bezpieczeństwa nowoopracowanej konstrukcji są wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej opisanych w rozdziale 7.4 oraz wyniki badań stateczności pojazdu.



Rys. 40. Wykonywanie słupowysięgnika zwiększonego o 20% długości w stosunku do dotychczasowego rozwiązania (porównanie rys. 16) [źr. wł.]

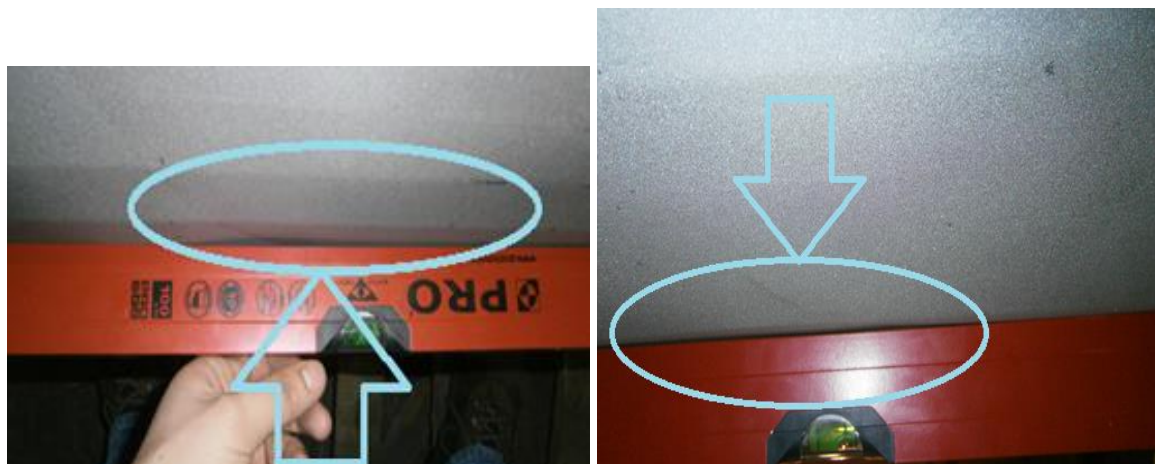
7.10. Badania tolerancji wymiarowej

Następnym etapem badań było sprawdzenie strzałki ugięcia dla wydłużonej konstrukcji podestu z 7,5 m do 9 m. Dopuszczalna deformacja dla konstrukcji o długości 9 m, zgodnie z normą EN ISO 13920 [85], wynosi 6 mm dopuszczalna tolerancja wg w/w normy wynosi $\pm 0,5$ mm w klasie tolerancji wymiarowej „A”. Deformacja elementu podestu ruchomego po spawaniu bez chłodzenia mikro-jetowego i bez użycia podkładki miedzianej (rys. 41) wyniosło 13,2 mm (dopuszczalny 6 mm).



Rys. 41. Deformacja elementu (13,2 mm) podestu ruchomego po spawaniu bez chłodzenia mikro-jetowego i bez użycia podkładki miedzianej [źr. wł.]

Deformacja elementu podestu ruchomego po spawaniu z chłodzeniem mikro-jetowym i z użyciem podkładki miedzianej wyniosła 5,3 mm (dopuszczalny 6 mm), co obrazuje rys. 42.



Rys. 42. Deformacja konstrukcji (5,3 mm) podestu ruchomego po spawaniu z chłodzeniem mikro-jetowym i z użyciem podkładki miedzianej [źr. wł.]

Poprzez zastosowaną modyfikację technologii spawania konstrukcji podestu ruchomego uzyskano znaczne zmniejszenie strzałki ugięcia, ponieważ zmodyfikowana technologia spawania (podkładka miedziana, mikro-jet) spowodowała zwiększoną ilość odprowadzonego ciepła ze spawanego materiału. Dotychczas stosowana technologia spawania nie umożliwiała skutecznego odbioru ciepła z łączenia cienkościennych elementów konstrukcji.

Aby opracowane rozwiązanie można było wdrożyć do produkcji należało wykonać badania stateczności pojazdu z zamontowanym nowym słupowysięgnikiem. Badania takie zlecono firmie. Wyciąg z raportu obejmujący wybrane wyniki badań stateczności przedstawiono w załączniku 1. Zgodnie z zaprezentowanymi w załączniku rezultatami, zastosowanie nowego słupowysięgnika o długości ramienia 9 m w podeście ruchomym przejezdnym typu P-183 zamocowanego na podwoziu pojazdu samochodowego typu MAN 12,224 nr VIN podwozia: WMAL711074Y042224 spełnia warunki stateczności.

Dokonane obliczenia sprawdzające wykazały spełnienie warunków stateczności podestu ruchomego P-183 (zamontowanego na samochodzie MAN 12,224) we wszystkich krawędziach wywrotu.

8. OBLICZENIA MATEMATYCZNE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH ZŁĄCZY PRZY ZASTOSOWANIU CHŁODZENIA MIKRO-JETOWEGO

8.1. Określanie wartości granicy plastyczności

Aby określić wpływ dwóch rodzajów gazów mikro-jetowych na zmiany parametrów górnej granicy plastyczności (R_e), wytrzymałości na rozciąganie (R_m) oraz wydłużenia względnego złącza (A_5), przeprowadzono dwuczynnikowe analizy wariancji w schemacie 2 x 7. Czynniki w modelu były rodzaj gazu (argon vs hel) oraz ciśnienie (0,0 MPa vs 0,1 MPa vs 0,2 MPa vs 0,3 MPa vs 0,4 MPa vs 0,5 MPa vs 0,6 MPa).

Pierwszy model analizy wariancji obliczono dla górnej granicy plastyczności (R_e) (tablica 18).

Tabl. 18. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia mikrostrugi na górną granicę plastyczności (R_e)

		N	M	SD	F	p	η^2	<i>Post-hoc</i>
I	argon	30	497,40	41,83	21,38	0,000	0,004	I < II
II	hel	30	503,30	47,55				
A	ciśnienie 0,1 MPa	10	451,30	1,49	900,63	0,000	0,941	A < C; A < D; A < E; A < F; B < C; B < D; B < E; B < F; C < D; C < E; C < F; D < E; D < F; E < F;
B	ciśnienie 0,2 MPa	10	455,10	1,85				
C	ciśnienie 0,3 MPa	10	471,00	4,45				
D	ciśnienie 0,4 MPa	10	522,50	9,02				
E	ciśnienie 0,5 MPa	10	546,50	23,32				
F	ciśnienie 0,6 MPa	10	555,70	10,52				
I.A	argon ciśnienie 0,1 MPa	5	450,80	1,79	42,23	0,000	0,044	I.D < II.D; I.E < II.E; II.F < I.F; II.A < II.C; II.A < II.D; II.A < II.E; II.A < II.F; II.B < II.C; II.B < II.D; II.B < II.E; II.B < II.F; II.C
I.B	argon ciśnienie 0,2 MPa	5	455,60	1,82				
I.C	argon ciśnienie 0,3 MPa	5	473,00	3,81				
I.D	argon ciśnienie 0,4 MPa	5	514,80	1,10				
I.E	argon ciśnienie 0,5 MPa	5	525,80	1,30				
I.F	argon ciśnienie 0,6 MPa	5	564,40	4,62				

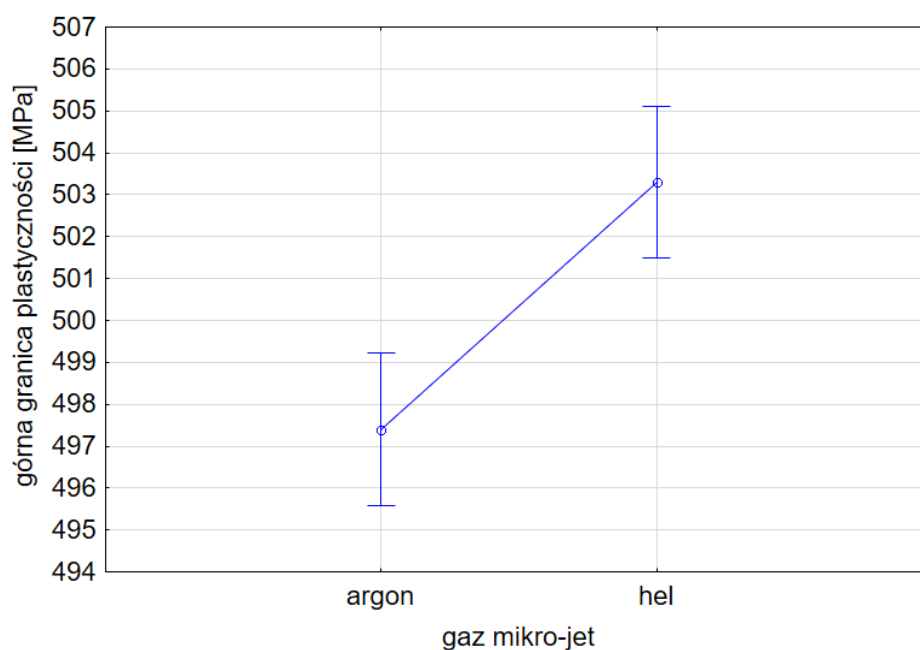
c. d. tabl. 18								
		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
II.A	hel ciśnienie 0,1 MPa	5	451,80	1,10				< II.D; II.C < II.E; II.C < II.F; II.D < II.E; II.D < II.F; II.F < II.E; I.A < I.C; I.A < I.D; I.A < I.E; I.A < I.F; I.B < I.C; I.B < I.D; I.B < I.E; I.B < I.F; I.C < I.D; I.C < I.E; I.C < I.F; I.D < I.E; I.D < I.F; I.E < I.F;
II.B	hel ciśnienie 0,2 MPa	5	454,60	1,95				
II.C	hel ciśnienie 0,3 MPa	5	469,00	4,47				
II.D	hel ciśnienie 0,4 MPa	5	530,20	5,81				
II.E	hel ciśnienie 0,5 MPa	5	567,20	12,28				
II.F	hel ciśnienie 0,6 MPa	5	547,00	6,20				

Gdzie:

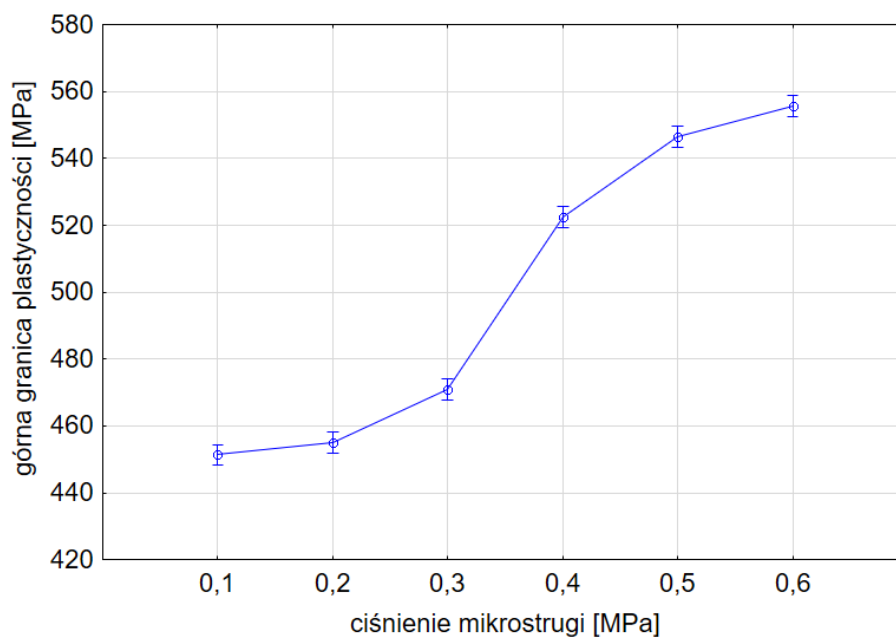
- η^2 – miara siły efektu eta-2,
- F – wynik testu ANOVA,
- Kurt – kurtoza rozkładu,
- M – średnia,
- N – liczebność,
- p – p-value / istotność statystyczna testu,
- R – zakres,
- SD – odchylenie standardowe,
- Sk – skośność rozkładu.

Przeprowadzone porównania wykazały wystąpienie istotnego statystycznie efektu głównego rodzaju zastosowanego gazu ($F(1, 48) = 21,38; p < 0,001; \eta^2 = 0,004$) – okazało się, że w przypadku helu wartość górnej granicy plastyczności (R_e) jest istotnie wyższa, niż w sytuacji oddziaływania argonem (rysunek 43). Wystąpił również istotny statystycznie efekt główny ciśnienia mikrostrugi [$F(5, 48) = 900,63; p < 0,001; \eta^2 = 0,941$], który polegał na tym, że wraz ze wzrostem ciśnienia następował wzrost parametru R_e , przy czym najwyższy jego przyrost następował kiedy ciśnienie mikrostrugi zwiększano od 0,3 do 0,5 MPa. Jedynie pomiędzy działaniem pod ciśnieniem 0,1 i 0,2 MPa nie było istotnej zmiany wartości parametru R_e (rysunek 44).

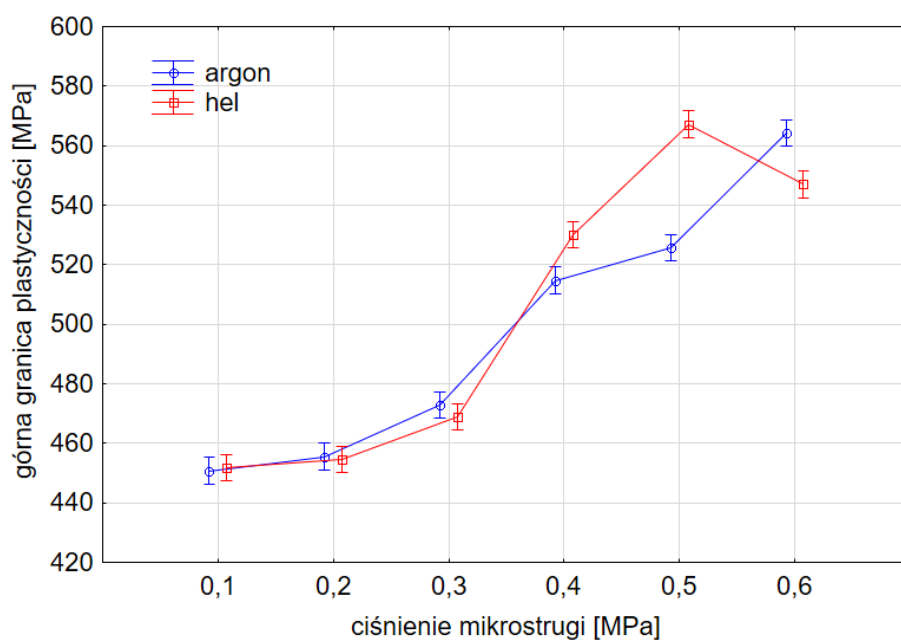
Wystąpił również istotny statystycznie efekt interakcji rodzaju gazu vs zastosowanego ciśnienia: $F(5, 48) = 42,23; p < 0,001; \eta^2 = 0,044$. Porównania post hoc, przeprowadzone testem Bonferroniego wskazują, że różnice pomiędzy zastosowanymi gazami sprowadzają się do tego, że w przypadku oddziaływania helem pod ciśnieniem rzędu 0,4 – 0,5 MPa, zwiększał się poziom parametru plastyczności (R_e), natomiast kiedy oddziaływano helem z ciśnieniem 0,6 MPa następował istotny statystycznie spadek R_e , w stosunku do następstw działania argonem (argon w tym przypadku wpływał na istotnie zwiększenie wartości parametru R_e) (rysunek 45). Pełne wartości p dla testów post hoc przedstawia tablica 19.



Rys. 43. Wpływ rodzaj gazu mikro-jetowego na górną granicą plastyczności



Rys. 44. Poziom ciśnienia gazu a górną granicą plastyczności



Rys. 45. Interakcja rodzaju gazu i poziomu ciśnienia mikrostrugi a parametr górnej granicy plastyczności

Tabl. 19. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: górna granica plastyczności

	rodzaj gazu	ciśnienie [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	argon	ciśnienie 0,1 MPa	--											
2	argon	ciśnienie 0,2 MPa	1,000	--										
3	argon	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,000	--									
4	argon	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	--								
5	argon	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	0,063	--							
6	argon	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--						
7	hel	ciśnienie 0,1 MPa	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--					
8	hel	ciśnienie 0,2 MPa	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	--				
9	hel	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,006	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	--			
10	hel	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	0,001	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--		
11	hel	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--	
12	hel	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--

8.2. Określanie wartości wytrzymałości na rozciąganie

Kolejną analizę przeprowadzono w celu określenia czy pod wpływem rodzaju gazu i zastosowanego ciśnienia zmianie ulega wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie $[R_m]$ (tablica 20).

Tabl. 20. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia na parametr wytrzymałości na rozciągania (R_m)

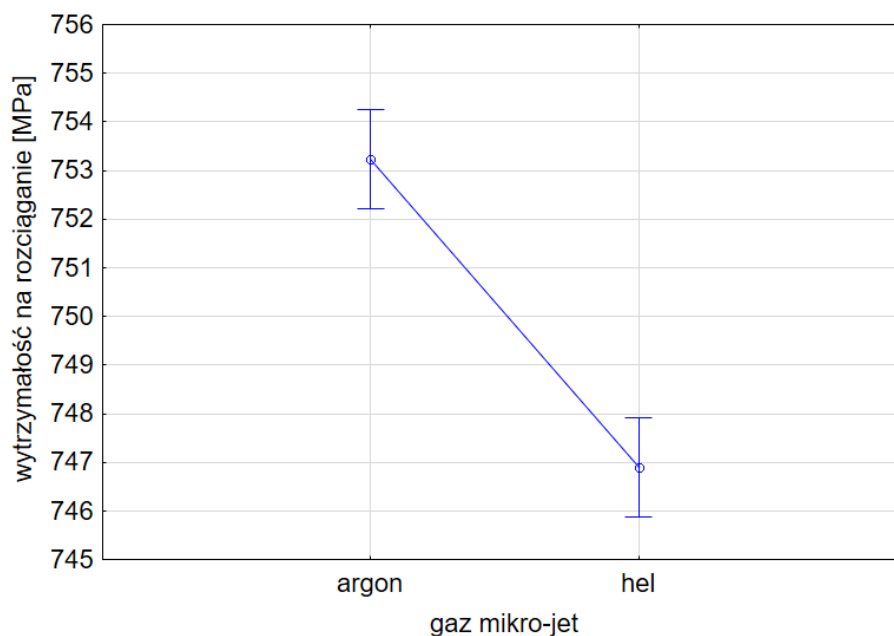
		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I	argon	30	753,23	32,42	78,91	0,001	0,011	II < I
II	hel	30	746,90	27,90	-	-	-	
A	ciśnienie 0,1 MPa	10	710,40	4,72	1365,34	0,000	0,970	A < B; A < C; A < D; A < E; A < F; B < C; B < D; B < E; B < F; C < D; C < E; C < F; D < E; F < D; F < E;
B	ciśnienie 0,2 MPa	10	723,80	2,66	-	-	-	
C	ciśnienie 0,3 MPa	10	739,80	6,43	-	-	-	
D	ciśnienie 0,4 MPa	10	768,90	6,08	-	-	-	
E	ciśnienie 0,5 MPa	10	799,20	5,75	-	-	-	
F	ciśnienie 0,6 MPa	10	758,30	5,98	-	-	-	
I.A	argon ciśnienie 0,1 MPa	5	706,80	3,35	16,28	0,000	0,012	I.A < II.A; II.B < I.B; II.C < I.C; II.D < I.D; II.E < I.E; II.F < I.F; II.A < II.B; II.A < II.C; II.A < II.D; II.A < II.E; II.A < II.F; II.B < II.C; II.B < II.D; II.B
I.B	argon ciśnienie 0,2 MPa	5	726,00	1,22	-	-	-	
I.C	argon ciśnienie 0,3 MPa	5	745,40	2,19	-	-	-	
I.D	argon ciśnienie 0,4 MPa	5	773,80	3,11	-	-	-	
I.E	argon ciśnienie 0,5 MPa	5	804,00	2,24	-	-	-	
I.F	argon ciśnienie 0,6 MPa	5	763,40	2,70	-	-	-	

c.d.tabl.								
-	-	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
II.A	hel ciśnienie 0,1 MPa	5	714,00	2,55	-	-	-	< II.E; II.B < II.F; II.C < II.D; II.C < II.E; II.C < II.F; II.D < II.E; II.F < II.D; II.F < II.E; I.A < I.B; I.A < I.C; I.A < I.D; I.A < I.E; I.A < I.F; I.B < I.C; I.B < I.D; I.B < I.E; I.B < I.F; I.C < I.D; I.C < I.E; I.C < I.F; I.D < I.E; I.F < I.D; I.F < I.E;
II.B	hel ciśnienie 0,2 MPa	5	721,60	1,52	-	-	-	
II.C	hel ciśnienie 0,3 MPa	5	734,20	3,11	-	-	-	
II.D	hel ciśnienie 0,4 MPa	5	764,00	3,67	-	-	-	
II.E	hel ciśnienie 0,5 MPa	5	794,40	3,44	-	-	-	
II.F	hel ciśnienie 0,6 MPa	5	753,20	2,86	-	-	-	

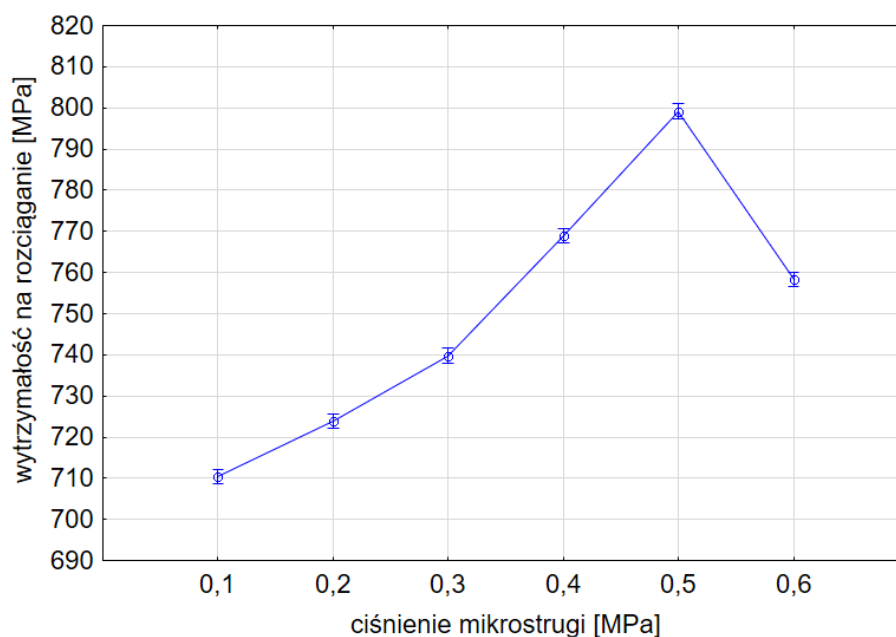
Wszystkie uzyskane efekty główne okazały się istotne statystycznie. W przypadku zastosowania argonu wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie był istotnie statystycznie wyższy w porównaniu do wartości obserwowanych podczas oddziaływania helem: $F(1, 48) = 78,91$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,011$ (rysunek 46). Oprócz tego, wraz z każdorazowym wzrostem ciśnienia następował istotny statystycznie wzrost parametru R_m , przy czym jego istotny spadek następował podczas zwiększenia ciśnienia z 0,5 do 0,6 MPa: $F(5, 48) = 1365,34$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,970$ (rysunek 47).

Wystąpił również efekt interakcji rodzaju gazu mikro-jet vs ciśnienia mikrostrugi: $F(5, 48) = 16,28$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,012$. Oddziaływanie argonem i helem były dość podobne, jeśli chodzi o zmiany wartości wskaźnika wytrzymałość na rozciąganie – podczas oddziaływania ciśnieniem od 0,1 do 0,5 MPa następował wzrost parametru R_m (nieco stromszy w przypadku argonu), po czym następował wyraźny jego spadek, kiedy ciśnienie wzrastało do wartości 0,6 MPa. Testy efektów prostych, uwzględniające poprawkę Bonferroniego wykazały, że podczas działania helem pod ciśnieniem 0,1 MPa wartość wskaźnika wytrzymałość na rozciąganie była wyższa, w stosunku do następstw działania argonem, jednak każdy kolejny wzrost ciśnienia (od 0,2 do 0,6 MPa) sprawiał, że działanie helu

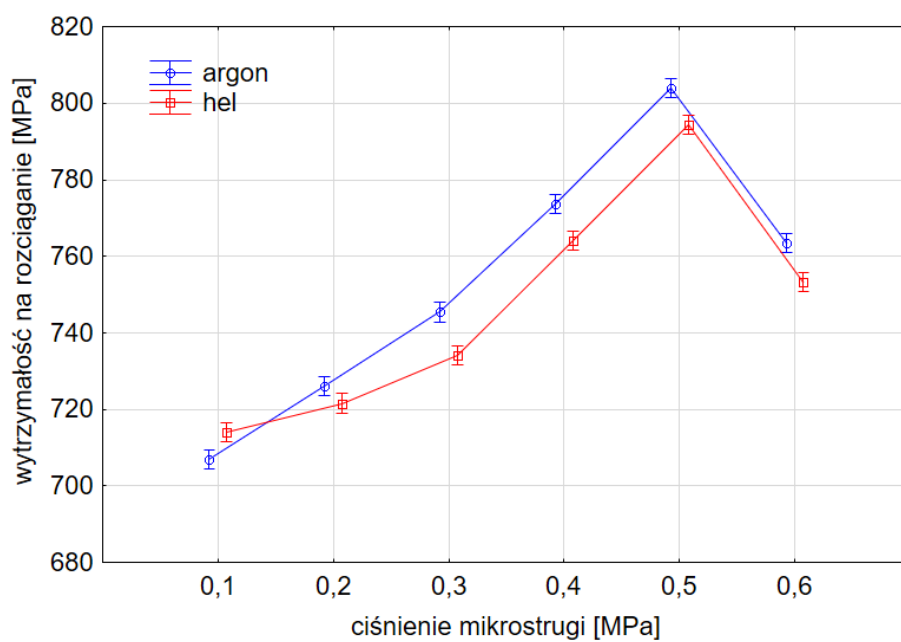
skutkowało niższym parametrem R_m , w porównaniu do argonu (rysunek 48). Wszystkie wartości istotności statystycznej testów post hoc zebrane zostały w tabeli 21.



Rys. 46. Rodzaj gazu a wytrzymałość na rozciąganie



Rys. 47. Poziom ciśnienia gazu a wytrzymałość na rozciąganie



Rys. 48. Interakcja rodzaju gazu i poziomu ciśnienia a parametr wytrzymałość na rozciąganie

Tabl. 21. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: parametr wytrzymałość na rozciąganie

	rodzaj gazu	ciśnienie [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	argon	ciśnienie 0,1 MPa	--											
2	argon	ciśnienie 0,2 MPa	0,000	--										
3	argon	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,000	--									
4	argon	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	--								
5	argon	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	--							
6	argon	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--						
7	hel	ciśnienie 0,1 MPa	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--					
8	hel	ciśnienie 0,2 MPa	0,000	0,999	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	--				
9	hel	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--			
10	hel	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	--		
11	hel	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--	
12	hel	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--

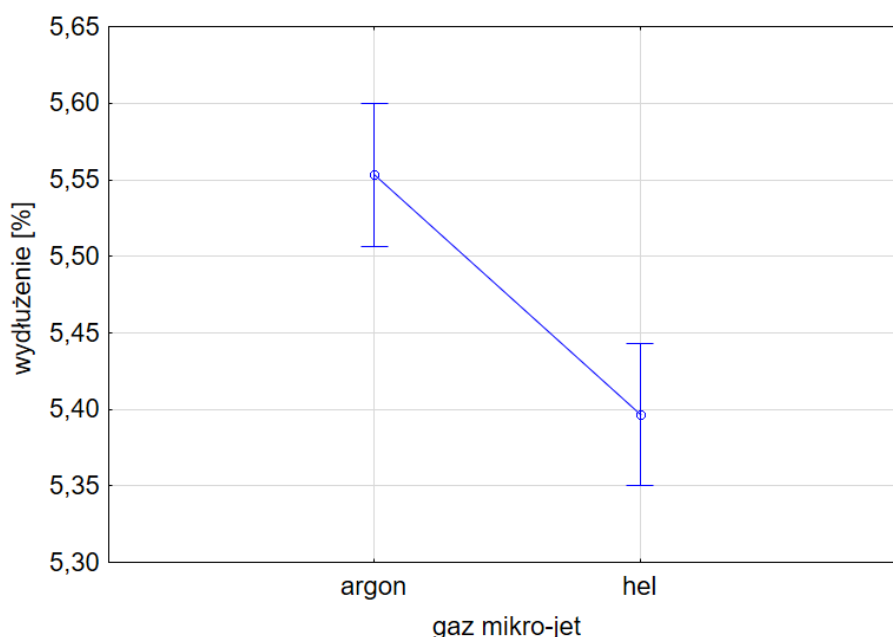
8.3. Określanie wartości wydłużenia względnego

Ostatni model analizy wariancji został obliczony w celu określenia wpływu rodzaju gazu i zastosowanego ciśnienia na parametr wydłużania (A_5) (tablica 22).

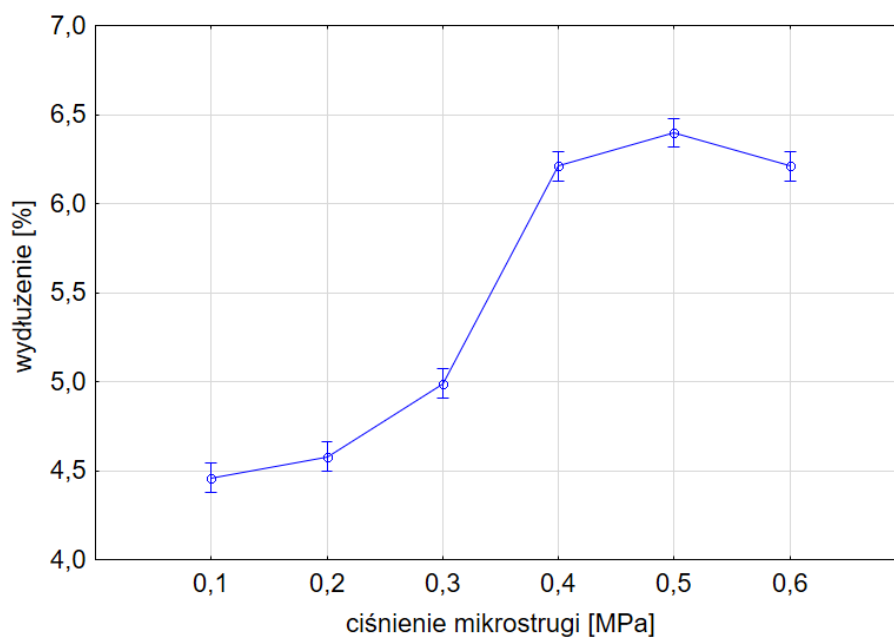
Tabl. 22. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia na parametr wydłużania (A_5)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I	argon	30	5,55	0,93	22,77	0,000	0,009	II < I
II	hel	30	5,40	0,75				
A	ciśnienie 0,1 MPa	10	4,46	0,10	495,16	0,000	0,956	A < C; A < D; A < E; A < F; B < C; B < D; B < E; B < F; C < D; C < E; C < F; D < E; F < E;
B	ciśnienie 0,2 MPa	10	4,58	0,12				
C	ciśnienie 0,3 MPa	10	4,99	0,14				
D	ciśnienie 0,4 MPa	10	6,21	0,29				
E	ciśnienie 0,5 MPa	10	6,40	0,24				
F	ciśnienie 0,6 MPa	10	6,21	0,12				
I.A	argon ciśnienie 0,1 MPa	5	4,48	0,08	8,70	0,000	0,017	II.D < I.D; II.E < I.E; II.A < II.C; II.A < II.D; II.A < II.E; II.A < II.F; II.B < II.C; II.B < II.D; II.B < II.E; II.B < II.F; II.C < II.D; II.C < II.E; II.C < II.F; II.D < II.E; I.A < I.C; I.A < I.D; I.A < I.E; I.A < I.F; I.B < I.C; I.B < I.D; I.B < I.E; I.B < I.F; I.C < I.D; I.C < I.E; I.C < I.F; I.F < I.E;
I.B	argon ciśnienie 0,2 MPa	5	4,54	0,11				
I.C	argon ciśnienie 0,3 MPa	5	4,98	0,15				
I.D	argon ciśnienie 0,4 MPa	5	6,46	0,15				
I.E	argon ciśnienie 0,5 MPa	5	6,60	0,10				
I.F	argon ciśnienie 0,6 MPa	5	6,26	0,11				
II.A	hel ciśnienie 0,1 MPa	5	4,44	0,11				
II.B	hel ciśnienie 0,2 MPa	5	4,62	0,13				
II.C	hel ciśnienie 0,3 MPa	5	5,00	0,16				
II.D	hel ciśnienie 0,4 MPa	5	5,96	0,11				
II.E	hel ciśnienie 0,5 MPa	5	6,20	0,16				
II.F	hel ciśnienie 0,6 MPa	5	6,16	0,11				

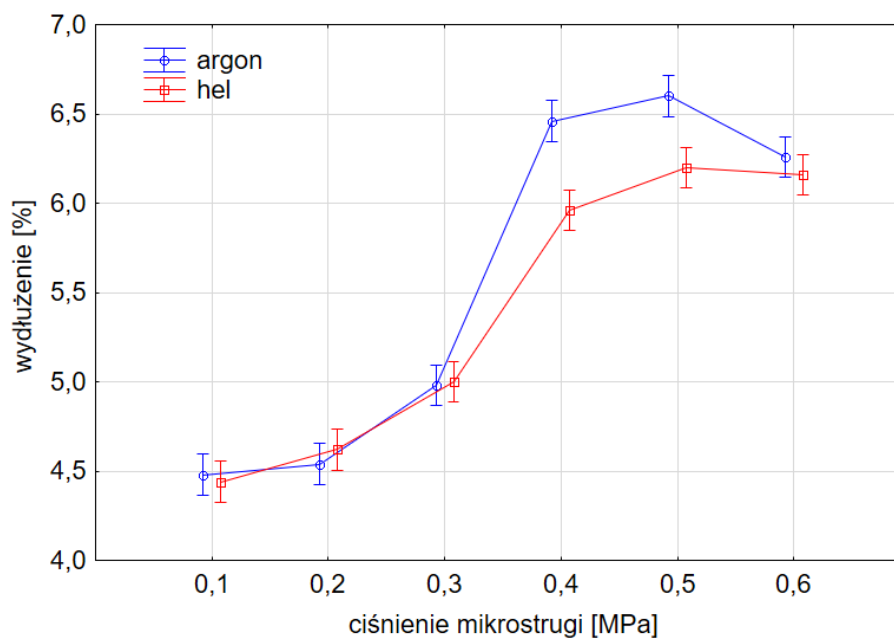
Przeprowadzone analizy wykazały wystąpienie istotnego statystycznie efektu głównego rodzaju gazu: $F(1, 48) = 22,77$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,009$. Efekt polegał na tym, że w przypadku oddziaływania argonem parametr A_5 cechował się wyższym natężeniem, niż w sytuacji oddziaływania helem (rysunek 49). Istotny wpływ na wskaźnik wydłużania wywierał również poziom zastosowanego ciśnienia mikrostrugi: $F(5, 48) = 495,16$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,956$. Wzrost ciśnienia w zakresie 0,1 – 0,2 MPa nie skutkował istotną zmianą parametru A_5 , natomiast kolejne wzrosty ciśnienia mikrostrugi w zakresie 0,2 – 0,5 MPa zwiększały w sposób istotny statystycznie wartość wskaźnika wydłużania, przy czym w następstwie zwiększenia ciśnienia do 0,6 MPa następował istotny spadek wartości parametru A_5 , w stosunku do jego wartości podczas oddziaływania gazem pod ciśnieniem 0,5 MPa (rysunek 50). Istotny statystycznie był również efekt interakcji rodzaju gazu i ciśnienia mikrostrugi: $F(5, 48) = 8,70$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,017$. Porównania parami wykazały, że w przypadku argonu i helu dynamika zmian wskaźnika wydłużania pod wpływem wzrostu ciśnienia mikrostrugi była podobna do opisanego wyżej efektu głównego. Różnice w działaniu argonu i helu polegały na tym, że ten pierwszy działając pod ciśnieniem 0,4 i 0,5 MPa skutkował istotnym zwiększeniem wartości wskaźnika A_5 , w porównaniu do helu oddziałującego pod ciśnieniem 0,4 i 0,5 MPa (rysunek 51). Wszystkie wartości p testów porównań parami dla interakcji przedstawiono w tablica 23.



Rys. 49. Rodzaj gazu a wydłużanie względne



Rys. 50. Poziom ciśnienia gazu a wydłużanie względne



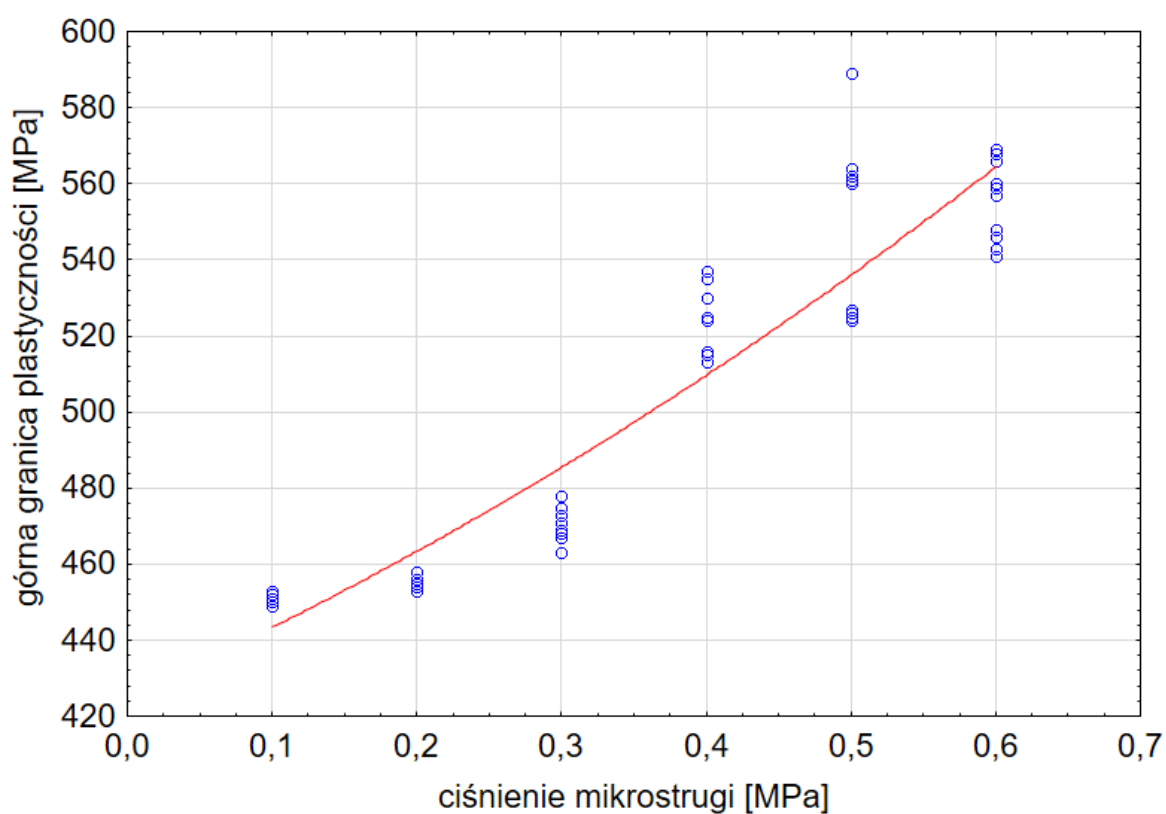
Rys. 51. Interakcja rodzaju gazu i poziomu ciśnienia a parametr wydłużania

Tabl. 23. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: parametr wydłużania

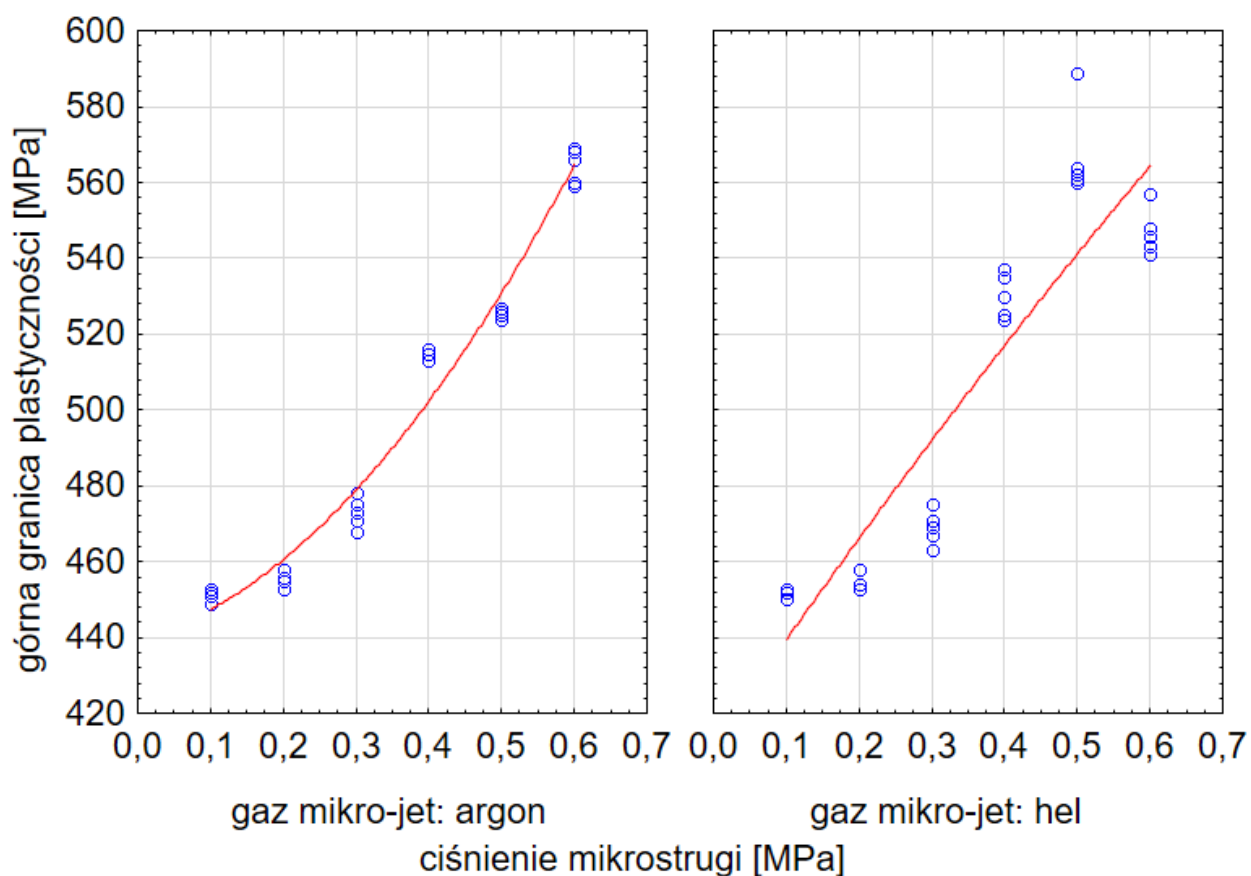
	rodzaj gazu	ciśnienie [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	argon	ciśnienie 0,1 MPa	--											
2	argon	ciśnienie 0,2 MPa	1,000	--										
3	argon	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,000	--									
4	argon	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	--								
5	argon	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	1,000	--							
6	argon	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,000	1,000	0,007	--						
7	hel	ciśnienie 0,1 MPa	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	--					
8	hel	ciśnienie 0,2 MPa	1,000	1,000	0,003	0,000	0,000	0,000	1,000	--				
9	hel	ciśnienie 0,3 MPa	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	--			
10	hel	ciśnienie 0,4 MPa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	--		
11	hel	ciśnienie 0,5 MPa	0,000	0,000	0,000	0,146	0,001	1,000	0,000	0,000	0,000	0,294	--	
12	hel	ciśnienie 0,6 MPa	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	--

8.4. Wartości funkcji dopasowania wytrzymałości złącza względem ciśnienia mikrostrugi oraz zastosowanego gazu mikro-jetowego

W celu określenia przewidywanych wartości współczynników: górna granica plastyczności [MPa] (rys. 52), wytrzymałość na rozciąganie [MPa] (rys. 55), oraz wydłużenie [%] (rys. 56) wykonano analizę estymacji krzywej. Zmienną wyjaśniającą funkcji było ciśnienie mikrostrugi [MPa], zmiennymi wyjaśnianymi odpowiednio GGP i WnR , przy czym dopasowanie przebiegało zarówno dla ogółu obserwacji, jak i w podgrupach ze względu na typ gazu (argon, hel). Wstępne oszacowanie współczynników dopasowania uwzględniało wiele możliwych typów funkcji – w tym także logarytmicznych, transformacyjnych, sklepanych czy wykładniczych, niemniej kształt linii na wykresie, oraz brak różnic między wynikami analizy poziomego dopasowania (wartości ANOVA) wskazywały, iż funkcja ma postać wielomianową. Alternatywą dla tej funkcji jest funkcja liniowa; ponieważ „załamanie” linii dopasowania przebiegało tylko dla najwyższej wartości ciśnienia mikrostrugi przedstawiono dopasowanie zarówno liniowe jak i wielomianowe. W poniższym zestawieniu x dla każdego wzoru to ciśnienie mikrostrugi [MPa] przedstawiono na rysunkach 53, 54, 57.



Rys. 52. Zależność górnej granicy plastyczności [MPa] względem ciśnienia mikro-strugi [MPa]



Rys. 53. Zależność górnej granicy plastyczności [MPa] względem ciśnienia mikrostrugi [MPa] dla różnych gazów mikro-jetowych (argon, hel)

Z użyciem modułu dopasowania krzywej do danych oprogramowaniu w Statistica 12.0 uzyskano wzory wielomianów, które w najwyższym stopniu były zgodne z danymi. Użyto podejścia wielomianowego z uwagi na kształt wykresów zaprezentowanych w przedstawionych wcześniej w pracy analiz wariancji - funkcje wielomianowe powinny być więc najlepszymi możliwymi dopasowaniami do danych, aczkolwiek dla porównania zaprezentowano także funkcje liniowe. Celem było uzyskanie wzorów (głównie wielomianowych) pozwalających na przewidywanie poziomu wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia i granicy plastyczności (będących zmiennymi zależnymi, czyli y we wzorach i na wykresach dopasowania) w zależności od zadanej wartości ciśnienia mikrostrugi (przyjmującego postać x we wzorach i na wykresach dopasowania). Dopasowania linii wykonano zarówno dla ogółu obserwacji, jak i w podziale na gazy (hel i argon) osobno. Na wykresach dopasowania i w podanych wzorach zaprezentowano w ten

sposób przewidywania wartości trzech zmiennych zależnych względem ciśnienia mikrostrugi w podziale na gazy i bez takiego podziału.

Dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie granicy plastyczności y_h złącza po spawaniu z helowym chłodzeniem mikro-jetowym [MPa] wg wzoru 5:

$$y_h \text{ [MPa]} = 439,26 + 55,15 \cdot x + 256,0714 \cdot x^2 \quad (5)$$

gdzie:

x - wartości ciśnienia mikrostrugi [MPa].

Podobnie dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie granicy plastyczności po spawaniu z argonowym chłodzeniem mikro-jetowym y_a złącza [MPa] wg wzoru 6:

$$y_a \text{ [MPa]} = 411,7 + 280,75 \cdot x - 43,9286 \cdot x^2 \quad (6)$$

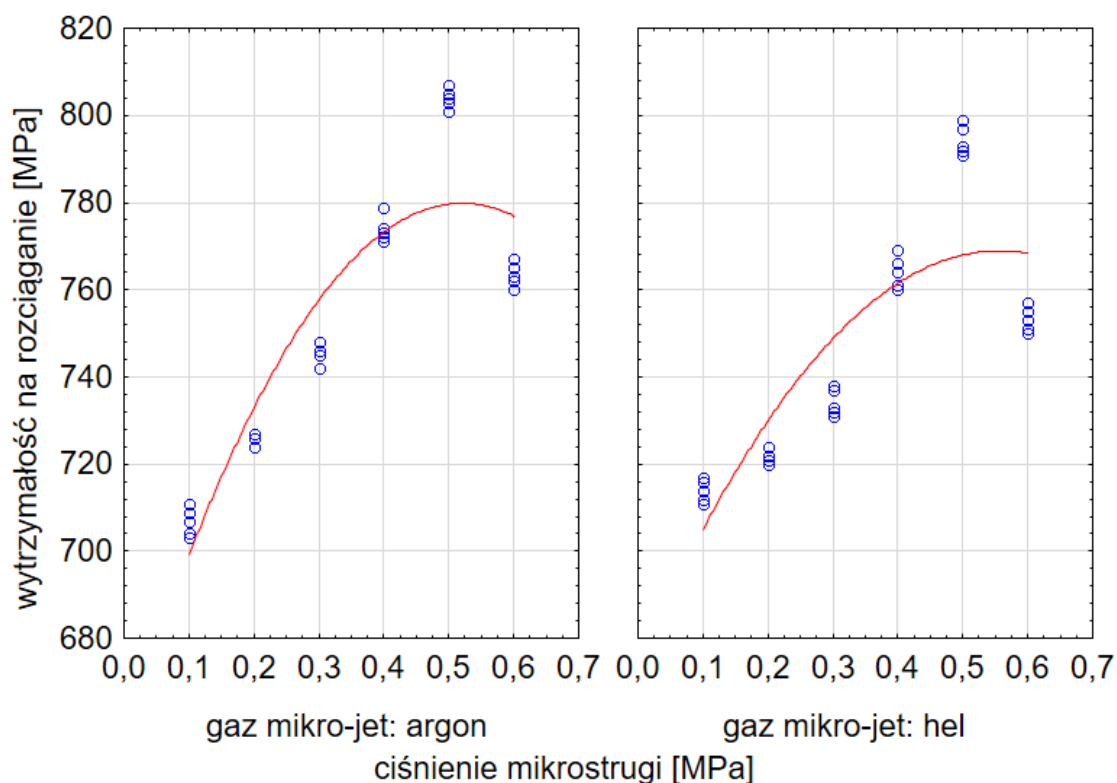
gdzie:

x - wartości ciśnienia helowej mikrostrugi [MPa]

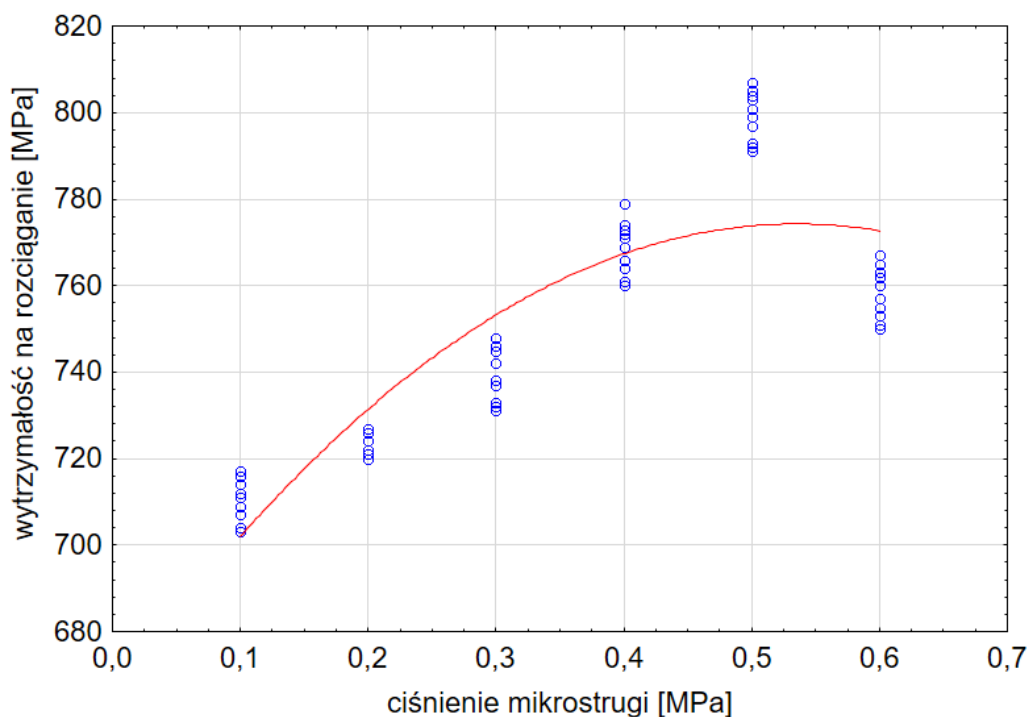
Dopasowanie liniowe pozwala na uzyskanie następujących zależności (wzory 7,8):

$$y_h \text{ [MPa]} = 415,36 + 234,4 \cdot x \quad (7)$$

$$y_a \text{ [MPa]} = 415,8 + 250 \cdot x \quad (8)$$



Rys. 54. Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] względem ciśnienia mikrostrugi [MPa] przy użyciu różnych gazów mikro-jetowych (argon, hel)



Rys. 55. Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] względem ciśnienia mikrostrugi [MPa]

Dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie wytrzymałości na rozciąganie y_h złącza po spawaniu z helowym chłodzeniem mikro-jetowym [MPa] wg wzoru 9:

$$y_h \text{ [MPa]} = 673,68 + 342,9143 \cdot x - 308,5714 \cdot x^2 \quad (9)$$

gdzie:

x - wartości ciśnienia mikrostrugi [MPa].

Podobnie dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie wytrzymałości na rozciąganie y_a złącza po spawaniu z argonowym chłodzeniem mikro-jetowym [MPa] wg wzoru 10:

$$y_a \text{ [MPa]} = 673,68 + 342,9143 \cdot x - 308,5714 \cdot x^2 \quad (10)$$

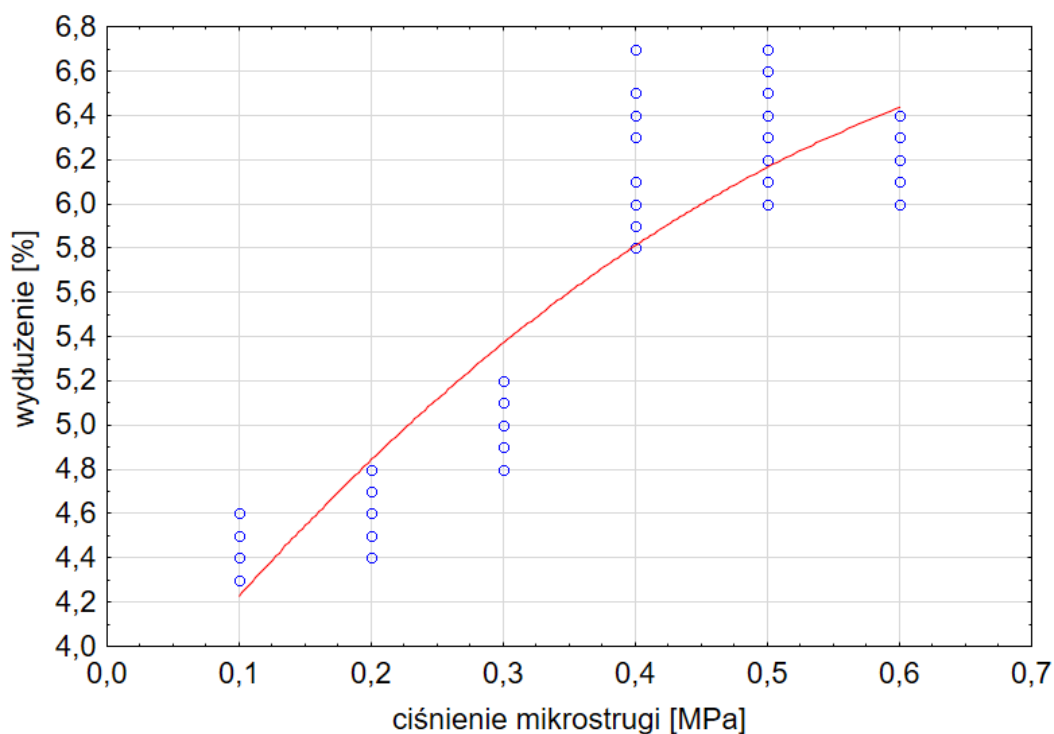
gdzie:

x - wartość ciśnienia mikrostrugi [MPa].

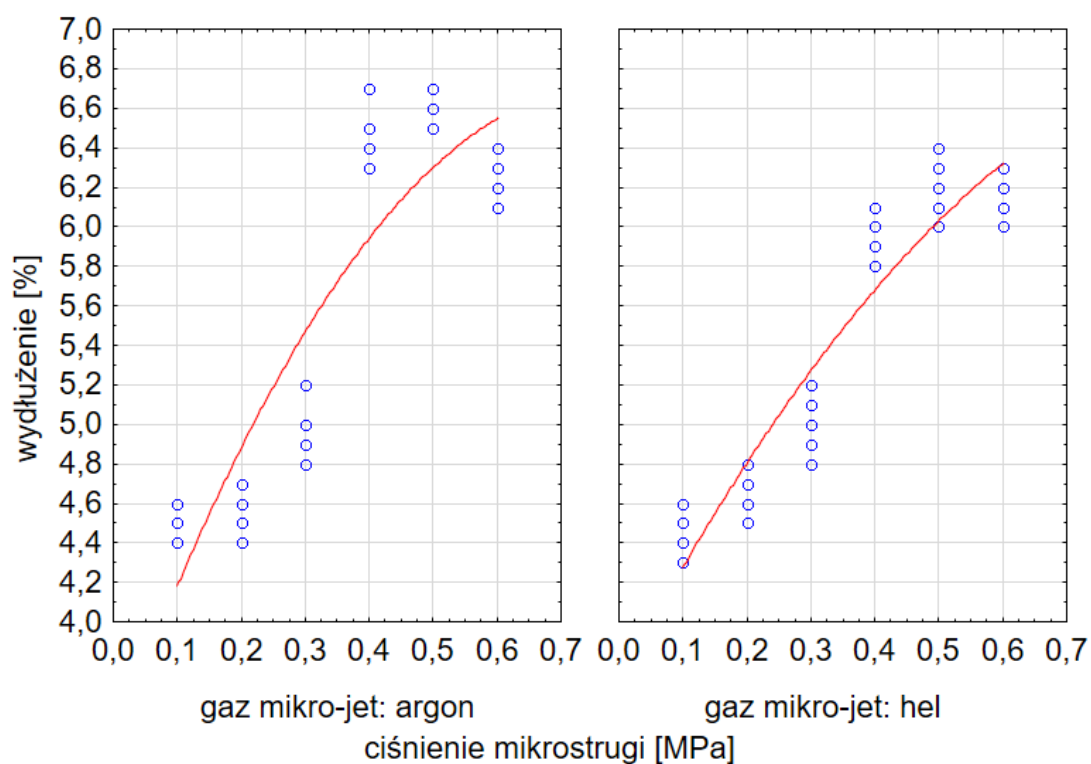
Dopasowanie liniowe pozwala na uzyskanie następujących zależności (wzory 11, 12):

$$y_h \text{ [MPa]} = 698,6933 + 155,8286 \cdot x \quad (11)$$

$$y_a \text{ [MPa]} = 702,48 + 126,9143 \cdot x \quad (12)$$



Rys. 56. Wydłużenie [%] względem ciśnienia mikrostrugi [MPa]



Rys. 57. Wydłużenie [%] względem ciśnienia mikrostrugi MPa przy użyciu różnych gazów mikro-jetowych (argon, hel)

Dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie wydłużenia względnego y_h złącza po spawaniu z helowym chłodzeniem mikro-jetowym [%] wg wzoru 13:

$$y_h [\%] = 3,364 + 8,7314 \cdot x - 5,7143 \cdot x^2 \quad (13)$$

gdzie:

x - wartość ciśnienia mikrostrugi [MPa].

Podobnie dopasowanie wielomianowe pozwala na obliczenie wydłużenia względnego y_a złącza po spawaniu z argonowym chłodzeniem mikro-jetowym [%] wg wzoru 14:

$$y_a [\%] = 3,69 + 6,1607 \cdot x - 2,9643 \cdot x^2 \quad (14)$$

gdzie:

x - wartość ciśnienia mikrostrugi [MPa].

Dopasowanie liniowe pozwala na uzyskanie następujących zależności (wzory 15, 16):

$$y_h [\%] = 3,8973 + 4,7314 \cdot x \quad (15)$$

$$y_a [\%] = 3,9667 + 4,0857 \cdot x \quad (16)$$

9. APLIKACJA WYNIKÓW BADAŃ DO PROCESU PRODUKCYJNEGO

Właściwości stali DOCOL, takie jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1200 – 1500 MPa oraz stosunkowo dobra plastyczność stali w porównaniu ze stalami niskostopowymi sprawia, że stal ta stanowi perspektywiczny gatunek dla zastosowań na konstrukcje cienkościenne o znacznej wytrzymałości, w tym na podesty ruchome pojazdów samochodowych. Spawanie stali martenzytycznych stanowi wciąż poważny problem techniczny, gdyż procesy MAG i TIG dla tych stali charakteryzują się brakiem powtarzalności uzyskiwanych wyników. Jak wykazano w części literaturowej oraz potwierdzono wynikami badań wstępnych – rozpoznawczych najwyższe odnotowywane wartości wytrzymałości na rozciąganie otrzymywanych spoin metodami klasycznymi wynosiły 50%-60% wytrzymałości materiału rodzimego, dodatkowo zauważono, że w części powstałych złączy występowały pęknięcia. Problemem dotychczas nierozwiązanym jest zatem uzyskanie konstrukcji spawanej ze stali z grupy AHSS, w której połączenia spajane będą charakteryzowały się zadawalającą wysoką wytrzymałością R_m na poziomie powyżej 700 MPa i wydłużeniem A_5 na poziomie powyżej 4 %.

Wyniki badań zaprezentowane w rozdziale piątym potwierdzają, że ze stali DOCOL 1200M można uzyskać prawidłowe złącza spawane. Badania przeprowadzone na odpowiednio wykonanych próbkach złączy stali DOCOL 1200M wskazują, że największym utrudnieniem podczas łączenia materiałów z grupy AHSS stanowi uzyskanie odpowiednich właściwości mechanicznych materiału w strefie wpływu ciepła. Stwierdzono, że zbyt wysoka zawartość martenzytu pogarsza spawalność stali i sprzyja powstawaniu pęknięć zimnych, stąd rejestrowane pęknięcia w tej strefie materiału próbek (tabl. 4 - 6).

Wykonane badania zasadnicze wskazują również, że zastosowanie do procesu MAG profilowanych chłodzących podkładek miedzianych o stosunkowo niskiej masie wpływa znacząco na kształtowanie grani spoiny. Ponadto, stwierdzono, że zastosowanie podkładek do wykonania złączy i odpowiednich parametrów procesu MAG umożliwiło wykonanie właściwych połączeń, bez wad spawalniczych.

Pomimo zalet omawianego procesu spawania MAG z podkładkami miedzianymi, którymi są: powtarzalność uzyskiwanych wyników i możliwość wykonania złączy bez wad spawalniczych, proces ten nie uznano za właściwy do wytworzenia konstrukcji spawanej

podestów ruchomych. Połączenia charakteryzowały się, bowiem, niezadawalającą wytrzymałością na rozciąganie, która plasowała się maksymalnie na poziomie do 700 MPa. W toku badań stwierdzono, że znacznym ograniczeniem w uzyskaniu złącza o właściwej wytrzymałości R_e i R_m przy zastosowaniu omawianego procesu spawalniczego, jest jednostronne odprowadzenie ciepła ze złącza. Takie odprowadzenie ciepła jest niewystarczające do uzyskania drobnoziarnistej struktury martenzytyczno-ferrytycznej spoiny, co potwierdziły badania mikrostruktury.

Wyniki badań zaprezentowane w rozdziale siódmym pozwoliły wnioskować, że do procesu spawalniczego MAG stali DOCOL 1200M należy stosować chłodzenie dwustronne. Chłodzenie zostało zrealizowane za pomocą podkładki miedzianej umieszczonej od strony grani oraz wiązki mikrostrug gazów o ciśnieniu 0,1 – 0,7 MPa. Badania próbek spawanych blach o grubości 1,8 pozwoliły jednoznacznie stwierdzić, że najlepsze parametry złączy spawanych można uzyskać przy zastosowaniu:

1. Natężenie prądu spawania $I = 115\text{A}$,
2. Napięcie łuku spawania $U = 19\text{V}$,
3. Prędkość spawania $v = 350\text{ mm/min}$,
4. Drut elektrodowy UNION X90,
5. Gaz osłonowy $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$,
6. Natężenie przepływu gazu 12 l/min ,
7. Gaz mikro-jetowy: hel,
8. Średnica mikro strugi 60μ ,
9. Ciśnienie gazu $0,5\text{ MPa}$

9.1. Wykonanie konstrukcji spawanej nowo opracowana metodą – etap 1

Pozytywne rezultaty badań laboratoryjnych dały podstawę do zaadaptowania nowo opracowanego procesu do warunków rzeczywistych wytworzenia konstrukcji podestów ruchomych. Postanowiono wykonać ramię spawane podestu 20% dłuższe od dotychczas wykonywanego. W tym celu przygotowano odpowiednio wyprofilowane elementy konstrukcji do spawania. Grubość elementów wynosiła 1,8 mm. W dotychczasowych konstrukcjach ze stali niskostopowych grubość elementów łączonych była o ok. 3 mm większa. Przy założeniu porównywalnej gęstości stali dotychczas stosowanych ze stalą DOCOL 1200M, można stwierdzić, że masa nowej konstrukcji jest porównywalna z masą dotychczas produkowanej - 7,5 metrowej konstrukcji spawanej podestu ruchomego. Obliczenia w tym zakresie przedstawiono w rozdziale ósmym.

Ponadto, stwierdzono, że nowo opracowany proces technologiczny, sprawdzający się w warunkach laboratoryjnych, wymaga drobnych modyfikacji, wynikających z parametrów spawanej konstrukcji. W tym celu przygotowano nową podkładkę miedzianą o długości równej długości łączonych elementów, o grubości 1 cm i wysokości 5 cm. Modyfikacja długości podkładki jest związana z wymuszeniem równomiernego odprowadzenia ciepła na całej długości spoiny. Elementy konstrukcji ułożono pod kątem 135° i docisnięto od góry do podkładki miedzianej za pomocą docisków (elementy stanowiska spawalniczego – prezentowanego w rozdziale siódmym). Docisnięcie konstrukcji wielkogabarytowej jest standardowym zabiegiem spawalniczym i nie stanowi modyfikacji opracowanego procesu. W tej pozycji nastąpiło zespawanie metodą MAG z dualnym synchronicznym chłodzeniem konstrukcji podestów ruchomych z materiału gatunku DOCOL1200M z grupy AHSS.

Na rys. 58 przedstawiono ramię otrzymanego słupowysięgnika (elementu podestu ruchomego) wykonanego innowacyjną technologią łączenia materiałów z wykorzystaniem helowego chłodzenia mikro-jetowego.



Rys. 58. Wykonywanie słupowysięgnika o długości 9 m [źr. wł.]

Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że za pomocą nowo opracowanego procesu spawalniczego można wykonywać konstrukcję podestu ruchomego z elementów ze stali DOCOL 1200M wydłużoną o 20 % przy zachowaniu dotychczasowej masy omawianej konstrukcji. Długość całkowita otrzymanego ramienia wynosiła 9 m. Przy pomocy badań nieniszczących nie stwierdzono wad spawalniczych otrzymanych złączy.

Nowo opracowana metoda umożliwiła wykonanie prototypu konstrukcji spawanej podestu ruchomego i nadaje się do wykonania tego typu konstrukcji spawanych.

Zastosowane parametry spawania i modyfikacje (długość podkładki) umożliwiają włączenie nowo opracowanej metody spawalniczej do cyklu produkcyjnego wytwarzania podestów ruchomych ze stali DOCOL 1200M.

Reasumując, należy stwierdzić, że proces spawania wysokowytrzymałej stali z grupy AHSS w konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych, poprzez zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego i podkładki miedzianej umożliwia znaczne wydłużenie zasięgu operacyjnego podestu, bez podwyższania masy całkowitej konstrukcji i przy zachowaniu spełniania wymagań bezpieczeństwa. Tym samym druga część tezy została potwierdzona.

9.2. Uznanie Technologii Spawania (WPQR)

Pozytywne wyniki badań przedstawione we wcześniejszych rozdziałach pracy oraz wykonanie prototypu konstrukcji spawanej ze stali z grupy AHSS, potwierdziły możliwość uzyskania prawidłowych złączy, bez pęknięć w strefie wpływu ciepła i o jednocześnie wysokich właściwości mechanicznych, porównywalnych z materiałem rodzimym, a szczególnie wysokiej granicy wytrzymałości spoiny na rozciąganie na poziomie 70 - 80% wytrzymałości materiału rodzimego. Wprowadzenie dodatkowo kombinowanego dualnego, synchronicznego chłodnienia w procesie MAG spawania stali DOCOL 1200M umożliwiło wytworzenie powtarzalnych połączeń spawanych o porównywalnych charakterystykach. W toku badań stwierdzono, że chłodzenie bezpośrednio po ułożeniu ściegu metodą MAG:

- od strony grani spoiny podkładką miedzianą o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła,
- od strony lica spoiny strugi gazu helu sprzyjało kształtowaniu się drobnoziarnistej struktury martenzytyczno-ferrytycznej w spoinie, przełożyło się na lepsze właściwości mechaniczne otrzymanego złącza, głównie właściwości wytrzymałościowe złącza, takie jak: A_5 na poziomie ok 6% i wyżej oraz R_m na poziomie 800 MPa. Odpowiednio dobrane parametry procesu spajania pozwoliły na uniknięcie pęknięć spawalniczych w strefie wpływu ciepła i wytworzenie prototypu konstrukcji spawanej podestu ruchomego.

Ze względu na innowacyjne rozwiązanie, przed aplikacją wyników do zasadniczej produkcji podestów ruchomych należało wystąpić z dwoma wnioskami:

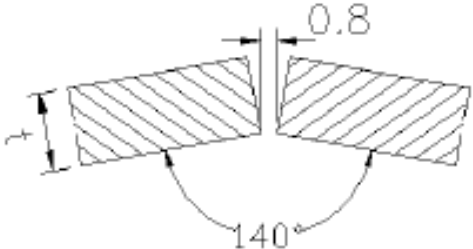
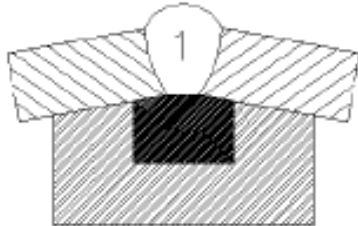
- do biura patentowego, na sposób podwyższenia właściwości mechanicznych złącza spawanego z materiałów z grupy AHSS procesem doczołowego spawania MAG znanym tym, że spawanie prowadzi się przy chłodzeniu do strony grani spoiny podkładką miedzianą a od strony lica spoiny chłodzeniu strugą gazu o średnicy 50-80 μm i ciśnieniu 0,5-0,7 MPa.
- do jednostki notyfikującej o uznanie technologii spawania WPQR Welding Procedure Qualification Record zgodne z wymaganiami normy EN-ISO 15613.

Oba wnioski zostały rozpatrzone pozytywnie:

1. W toku postępowania patentowego zgłoszono w kwietniu 2020 roku patent o numerze P429818. Patent potwierdza innowacyjność nowo opracowanej metody spajania materiału, której celem jest podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie otrzymanych złączy spawanych.
2. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych badań oraz pozytywnych rezultatów związanych z wytworzeniem prototypu konstrukcji spawanej jednostka notyfikowana uznała technologię spawania elementów podestu ruchomego z zastosowaniem chłodzenia mikro-jetowego. Uzyskano certyfikat uznania technologii spawania WPQR *Welding Procedure Qualification Record* zgodne z wymaganiami normy EN-ISO 15613 (rys. 59).

ZERTIFIKAT ◆ CERTIFICADO ◆ ◆ CERTIFIKAT ◆ ◆ 認証証書 ◆ ◆ CERTIFICATE ◆ ◆ ZERTIFIKAT ◆	Notifizierte Stelle nach Druckgeräterichtlinie (PED 2014/68/EU) der TÜV SÜD Industrie Service GmbH		 Industrie Service		
	Zertifikat-/Auftrags-Nr.: 0036/PL/VP-0674/20 Reference No.: Nr certyfikatu:				
	ZERTIFIKAT - QUALIFIZIERUNG VON SCHWEISSVERFAHREN (WPQR) WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORD / PROTOKÓŁ KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII SPAWANIA				
	Zertifizierstelle: Certification Body: Jednostka egzaminacyjna:	TÜV SÜD Industrie Service GmbH Westendstraße 199 D-80686 München	Zeichen: Sign: Znak:	2020-3.00-Z-0000	
	Hersteller / Anschrift: Manufacturer / Address: Wytwórca / Adres:	Adam Jurek ul. Wierzbowa 46/22 40-169 Katowice	Beleg-Nr. des Herstellers: Manufacturer's Reference No.: Nr dokumentu wytwórcy:	pWPS No: MAG+podkładka miedziana+chłodzenie- mikro-jetowe 05.05.2020	
	Vorschrift/Prüfnorm: Code/Testing Standard: Warunki techniczne/Normy:	EN ISO 15613	Datum der Schweißung: Date of Welding: Data spawania:		
	GELTUNGSBEREICH - RANGE OF APPROVAL - ZAKRES KWALIFIKACJI :				
	Schweißprozeß: Welding Process: Proces(y) spawania:	135	Nahtart: Joint Type: Rodzaj łącza i spoiny:	BW – Stumpfstoß (groove welds)	
	Werkstoffgruppe: Parent Metal Group: Grupa materiał(ów) podstawowego(ych):	DOCOL 1200M nach CR ISO 15608	Dicke des Grundwerkstoffs [mm]: Parent Metal Thickness [mm]: Grubość materiału podstawowego [mm]:	0,9 - 3,6 (1,8)	
		Schweißgutdicke [mm] Weld thickness [mm]: Grubość spoiny [mm]:	max. 2s (1,8)	Kehlnahtdicke [mm] Fillet weld thickn. [mm]: Grubość spoiny pachwinowej[mm]:	---
Zusatzwerkstoff/Bezeichn.: Filler Metal Type/Designation: Oznaczenie materiału dodatkowego:	EN ISO 16834-A: G 89 6 M21 (Mn4Ni2CrMo)	Außendurchmesser [mm]: Pipe Outside Diameter [mm]: Zewnętrzna średnica rury [mm]:	---		
Wärmeinbringung [kJ/cm]: Heat Input [kJ/cm]: Wprowadzone ciepło [kJ/cm]:	0,26 ÷ 0,34 (0,34)	Stromart: Type of Welding Current: Rodzaj prądu i biegunowość:	DC (+)		
Schutzgas / Wurzelschutz: Shielding Gas / Backing Gas: Oznaczenie gazu osłonowego / Osłona grani:	EN ISO 14175: M21 /	Tropfenübergang: Transfer Mode: Sposób przenoszenia metalu:	---		
Schweißpositionen: Welding Positions: Pozycje spawania:	PA Schweißpositionen nach Kap./Pozycje wg pkt: 8.4.2 (EN ISO 15614-1)	Pulver: Flux: Topnik:	---		
Betriebstemperatur: Working Temperature: Temperatura pracy:	Wie Grundwerkstoff bzw. Zusatzwerkstoff, jedoch nicht tiefer als: As base material and filler metal respectively, however not lower than:				
Vorwärmung [°C]: Preheat [°C]: Temperatura podgrzewania wstępnego [°C]:	---				
Wärmenachbehandlung: Post Weld Heat Treatment: Obróbka cieplna po spawaniu:	---				
SONSTIGE ANGABEN - OTHER INFORMATION - INNE INFORMACJE: Schweißzusätze auch nach Kap./Materiały dodatkowe też wg pkt: 8.4.4 (EN ISO 15614-1).					
Hiermit wird bestätigt, daß die Prüfungsschweißungen in Übereinstimmung mit den Anforderungen der vorbezeichneten Vorschriften bzw. Prüfnormen zufriedenstellend vorbereitet, geschweißt und geprüft wurden. / Certified that test welds were prepared, welded and tested satisfactorily in accordance with the requirements of the code or the testing standard indicated above. / Poświadczam, że przygotowanie, spawanie i badanie łącza próbnego przeprowadzono zgodnie z wymaganiami wyżej wymienionych przepisów / normy dotyczącej badania i uzyskano zadowalający wynik.					
Ort: Location: Miejscowość:	CHORZÓW	Datum der Ausstellung: Date of issue: Data wystawienia:	01.07.2020	Name und Unterschrift des Zertifizierers: Name and Signature: Nazwisko i podpis rzeczoznawcy:	
Anlagen: Annexes: Załączniki:	9 Seiten / Pages / Stron	 Ing. Robert Wierbowiecki TÜV SÜD Industrie Service GmbH			
TÜV SÜD Polska Sp. z o. o., Podwale 17, PL-00-252 Warszawa, Tel.: (00 48) 22 696 43 96, Fax: (00 48) 22 696 41 04 IS - 36					

Rys. 59. Uznanie Technologii Spawania WPQR wg EN ISO 15613

WSTĘPNA INSTRUKCJA TECHNOLOGICZNA SPAWANIA (pWPS) <i>Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS)</i> Nr/No MAG+podkładka miedziana+chłodzenie mikro-jetowe							
WPQR – Nr : _____ <i>WPQR – No :</i> _____				Rodzaj złącza: <i>Joint type:</i> BW			
Material podstawowy: <i>Base material:</i> DOCOL 1200M w/g CR ISO 15608				Grubość ścianki (mm): <i>Material thickness:</i> t = 1,8			
Metoda (-y) spawania: <i>Welding process (-es):</i> v135 w/g PN-EN ISO 4063				Srednica (mm): <i>Outside diameter:</i> _____			
Norma klasyfikacyjna: <i>Welder's qualification:</i> PN-EN ISO 15614-1				Pozycja spawania: <i>Welding position:</i> PA w/g PN-EN ISO 6947			
Kształt rowka / Joint design				Kolejność spawania / Welding sequences			
							
Szczegóły spawalnicze / Welding details:							
Kolejność warstw <i>Run</i>	Metoda spawania <i>Process</i>	Ø drutu, elektrody <i>Size of filler metal (mm)</i>	Natężenie <i>Current (A)</i>	Napięcie <i>Voltage (V)</i>	Polaryzacja <i>Polarity</i>	Prędkość spawania <i>Travel speed (mm/min)</i>	Wprowadzone ciepło <i>Heat input (kJ/cm)</i>
1	v135	1,0	115	19	DC/EP	300	0,34
Materiały spawalnicze: <i>Filler materials:</i> UNION X90 <i>EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo</i>				Rodzaj podkładki: <i>Backing:</i> podkładka miedziana + chłodzenie mikro-jetowe Szczegóły zlobienia: <i>Details of gouging:</i> _____ Temperatura podgrzewania (°C): <i>Preheat temperature:</i> _____ Temperatura międzyciegorowa (°C): <i>Interpass temperature:</i> _____			
Suszenie: <i>Drying:</i> Topnik (°C): _____ Flux: _____ Elektroda (°C): _____ Elektrode: _____				Obrobka cieplna złącza: <i>Post-weld heat treatment:</i> _____			
Elektrody wolframowe: <i>Tungsten electrode:</i> _____				Przepływ gazu ochronnego (l/min): <i>Gas flow rate- shielding (l/min):</i> 12			
Inne materiały: <i>Other materials:</i> M 21 /82% Ar + 18% CO₂/ w/g PN-EN 14175				Przebieg gazu ochronnego (l/min): <i>Gas flow rate- shielding (l/min):</i> 12			
Badania NDT: <i>Non-destructive:</i>							
Inne informacje: Koordynujący personel spawalniczy jest odpowiedzialny za dostosowanie parametrów do pozycji spawania, natężenia i materiałów spawalniczych. <i>Other informations:</i> The welding coordination personel, is responsible for the correct parameters, between weld position, current and filler materials.							
Data / Date		Opracował / Prepared		Zatwierdził / Approved		mgr inż. Adam Jurek	
05.05.2020		mgr inż. Adam Jurek		mgr inż. Adam Jurek		mgr inż. Adam Jurek	

Rys. 60. Wstępna Instrukcja Technologii Spawania pWPS wg EN ISO 15613

Oznacza to, że opracowana innowacyjna technologia spawania z dualnym synchronicznym chłodzeniem za pomocą podkładki miedzianej i schładzania mikro-jetowego wg. wstępnej instrukcji technologii spawania pWPS *Preliminary Welding Procedure Specification* (rysunek 60) została uznana.

Na obecnym etapie opracowaną metodę spajania można stosować przy produkcji podestów ruchomych ze stali z grupy AHSS.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podesty ruchome przejezdne montowane na pojazdach samochodowych (podesty ruchome) powinny cechować się jak największą wytrzymałością, połączoną ze stosunkowo małą masą, w celu jednoczesnego zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa osób pracujących na wysokości, uzyskania możliwie dużego zasięgu roboczego przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu, który również musi spełniać określone warunki techniczne. W celu zachowania konkurencyjności na rynku, producenci tworząc ramiona podnośników dążą do zwiększenia ich zasięgu i poszerzenia pola manewru. Zwiększanie wytrzymałości stosowanych konstrukcji na zginanie, nie powinno pociągać ze sobą znacznego zwiększenia jej całkowitej masy.

W związku z nowymi trendami w branży motoryzacyjnej, producenci stali wytwarzają coraz to nowsze materiały, o lepszych właściwościach, które są odpowiedzią na zapotrzebowanie między innymi przemysłu motoryzacyjnego. Stal nowej generacji spełnia wysokie wymagania związane z bezpieczeństwem użytkowników oraz ciągle dążenie do redukcji wagi wytwarzanych konstrukcji. Pozwala to na sporą redukcję masy pojazdów, zmniejszenie ich zapotrzebowania na paliwo oraz zmniejszenie emisji szkodliwych gazów do otoczenia.

Materiałami, które spełniają te kryteria, są stale o wysokiej wytrzymałości, zwłaszcza stale DOCOL z grupy AHSS (*Advanced High-Strength Steel*), które stopniowo wprowadzane do konstrukcji stosowanych w Inżynierii lądowej i w środkach transportu. Zaletą stal DOCOL jest duża doraźna wytrzymałość na rozciąganie (do 1700 MPa), wysoka granica plastyczności (do 1450 MPa). W związku z tym stale DOCOL są coraz częściej skutecznie próbowanym materiałem w budowie różnych elementów podestu ruchomego. Powstałe przy ich wykorzystaniu złącza spawane cechują się jednak dużo niższą wytrzymałością od materiału rodzimego.

Naprzeciw tym problemom wychodzi powstawanie nowych technologii spawalniczych.

Minimalizowanie negatywnych zjawisk towarzyszących procesom spawalniczym, takich jak zmiany właściwości mechanicznych, niekorzystne zmiany mikrostruktury czy nadmierne naprężenia i odkształcenia spawalnicze, stało się podstawą do opracowania innowacyjnej technologii spawania z chłodzeniem mikrostrumieniowym.

Chłodzenie mikrostrumieniowe bezpośrednio po spawaniu wpływa korzystnie na podwyższenie własności użytkowych konstrukcji spawanych, ponieważ pozwala na precyzyjne sterowanie strukturą spawanego złącza. Mając to na uwadze, podjęto się zmodyfikowania technologii wykonania konstrukcji podestów ruchomych pod kątem możliwości wydłużenia zasięgu operacyjnego bez podwyższenia masy całkowitej konstrukcji i przy zapewnieniu spełniania wymagań bezpieczeństwa. Technologia chłodzenia mikro-jetowego nie była do tej pory sprawdzana przy spawaniu stali martenzytycznych o wysokiej wytrzymałości.

Głównym celem pracy było opracowanie nowego sposobu spawania elementów podestu ruchomego pojazdów samochodowych, spełniającego następujące założenia:

- użyta metoda pozwoli na zwiększenie zasięgu operacyjnego podestu ruchomego przy jednoczesnym zachowaniu niezmienniej masy pojazdu i sztywności konstrukcji,
- do użytej metody zostaną wykorzystane trudno spawalne stale o podwyższonej wytrzymałości (z grupy AHSS).

Badania rozpoznawcze miały na celu przebadać nowoczesny materiał DOCOL 1200M do zastosowania na elementy budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych.

W celu sprawdzenia spawalności powyższej stali dobrano odpowiednie parametry spawania MAG (natężenie prądu spawania 115 A, napięcie łuku 19 V, prędkość spawania 300 mm/min.). Dobrano odpowiednie ukosowanie łączonych blach i odstęp pomiędzy dwiema krawędziami blach. Sprawdzano możliwość zastosowania dwóch różnych mieszanek gazów osłonowych (CO_2 i 82%; Ar + 18% CO_2). Z badań rozpoznawczych wynikało, że najlepsze efekty uzyskano stosując mieszanekę osłonową Ar + 18% CO_2 .

Dobierano różne podkładki formującej grań cienkościennej spoiny (miedziana, ceramiczna).

Do najważniejszych badań części rozpoznawczej należało:

- wykonanie doświadczalnego złącza na blachach ze stali DOCOL 1200M,
- dobór parametrów chłodzenia mikro-jetowego (dobór gazu chłodzącego, natężenie przepływu gazu, średnica mikrostrugi),
- dokonanie oceny wykonanych połączeń do budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych (badania wizualne, badania magnetyczno-proszkowe),

- przeprowadzenie analizy badań doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza występującego w podestach ruchomych.

Z badań rozpoznawczych wynikało, że równoczesne zastosowanie podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego pozwoliło na zwiększenie jakości złącza stosowanego do podestu ruchomego z dużo większą powtarzalnością (brak pęknięć) niż w klasycznym procesie MAG. Najważniejszym punktem badań rozpoznawczych było stwierdzenie, że prawidłowo dobrane parametry spawania MAG z zastosowaniem podkładki miedzianej (odprowadzającej ciepło od strony grani) i chłodzenia mikro-jetowego (odprowadzającego ciepło głównie od strony lica) pozwala znacznie podwyższyć wytrzymałość złącza spawanego ze stali DOCOL 1200M wzrasta z poziomu 671 MPa do 788 MPa, oraz wydłużenie względne pozwala podnieść z 4% do 6,2%. Na podstawie przeglądu literatury i rezultatów badań wstępnych zaproponowano tezę rozprawy, która zakłada, że:

Modyfikacja procesu spawania wysokowytrzymałej stali z grupy AHSS w konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych, poprzez zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego i podkładki miedzianej, pozwoli na uzyskanie lepszych własności mechanicznych złącza, a przez to umożliwi znaczne wydłużenie zasięgu operacyjnego podestu, bez podwyższania masy całkowitej konstrukcji i przy zachowaniu spełniania wymagań bezpieczeństwa.

Dla udowodnienia tak postawionej tezy przeprowadzono badania zasadnicze na elementach podestu ruchomego, które objęły:

- wykonanie połączenia spawanego podestu ruchomego o podwyższonym zasięgu pracy ze stali AHSS – zwiększenie o 20 % zasięgu,
- dobór parametrów spawania MAG i chłodzenia mikro-jetowego z zastosowaniem podkładki miedzianej, formującej grań spoiny elementów podestu i odprowadzających ciepło,
- przeprowadzenie analizy własności mechanicznych złącza elementów podestu ruchomego o podwyższonym zasięgu pracy:
 - sprawdzenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza elementów podestu ruchomego,
 - sprawdzenie wytrzymałości zmęczeniowej złącza,
 - sprawdzenie twardości złącza elementów podestu ruchomego,

- sprawdzenie mikrostruktury złącza podestu ruchomego,
- przeprowadzanie próby gięcia złącza elementów podestu ruchomego,
- badanie wizualne, magnetyczno-proszkowe, radiograficzne złącza spawanego,
- sprawdzenie strzałki ugięcia konstrukcji,
- wykonanie elementu rzeczywistego ramiona (słupowysięgnika) podestu,
- spełnienie wymagań wg normy EN ISO 15613 „Uznania Technologii Spawania” [86],
- opatentowanie rozwiązania (nr P.429818).

W zakresie badań zasadniczych był wybór najwłaściwszych parametrów do wykonania połączenia spawanego na elementy podestu ruchomego z trudno-spawalnej stali DOCOL 1200M.

Do wykonania złącza spawanego użyto podkładkę miedzianą, formującą złącze od strony grani druga zastosowana podkładka ceramiczna nie dała pozytywnych rezultatów. Zaproponowano mieszanekę osłonową 82% Ar + 18% CO₂ którą zastosowano w badaniach rozpoznawczych, ponieważ korzystniej wpływała na własności wykonanych złączy próbnych niż gaz osłonowy 100 % CO₂.

W badaniach zasadniczych elementy spawane podestu ruchomego ustawiono względem siebie pod kątem 120°. Postanowiono sprawdzić rozstaw elementów podestu w przedziale od 0,6 mm do 1,2 mm dla złącza wykonanego z podkładką miedzianą. Najlepszy efekt dała szczelina dobrana na poziomie 0,8 mm. Zastosowana podkładka miedziana od strony grani spoiny w bardzo dobry sposób odprowadza ciepło od dolnej części połączenia spawanego, dodatkowo umożliwia formowanie grani spoiny. Przy pomocy przeprowadzonych badań wizualnych oraz magnetyczno-proszkowych nie stwierdzono występowania wad oraz niezgodności spawalniczych.

Postanowiono również sprawdzić jakość wykonywanych połączeń spawanych przy zastosowaniu różnych średnic mikrostrugi oraz przy różnego rodzaju ciśnienia argonu i helu jako gazu mikro-jetowego. Injektor mikro-jetowy z mikrodyszą wyłącznie o średnicy 60 µm użyto w badaniach zasadniczych (opierano się na wynikach badań rozpoznawczych, ponieważ uzyskano najlepsze wyniki z badań). Natomiast stwierdzono, że najlepszą wytrzymałość spoiny uzyska się przy ciśnieniu 0,5 MPa dla helu i argonu. Jednoznacznie lepszą wytrzymałość spoiny na rozciąganie uzyskano dzięki zastosowaniu gazu mikro-

jetowego jakim jest He niż Ar. Helowe chłodzenie mikro-jetowe pozwala na uzyskanie wartości powyżej 800 MPa, natomiast argonowe chłodzenie mikro-jetowe pozwala na uzyskanie wytrzymałości złącza nieznacznie poniżej 800 MPa. Bez chłodzenia mikro-jetowego wytrzymałość złącza jest na poziomie 700 MPa.

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie analizy mikrostruktury złącza wykonanego z zastosowaniem podkładki miedzianej oraz z równoczesnym zastosowaniem miedzianej podkładki i chłodzenia mikro-jetowego. Złącze bez użycia chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej posiada strukturę charakteryzującą się niskim wydłużeniem względnym A_5 na poziomie poniżej 4%. Wykonano złącze podestu ruchomego z chłodzeniem mikro-jetowym (hel i argon) i z równoczesnym zastosowaniem podkładki miedzianej. W strukturze złącza (w obu warunkach chłodzenia mikro-jetowego argon i hel) występował martenzyt i drobnoziarnisty ferryt AF i ferryt SPF które sprawiają, że struktura gwarantuje dobre własności plastyczne A_5 na poziomie około 6,2 %.

Następnie postanowiono wykonać badania twardości wg normy PN EN ISO 9015-1 przy pomocy twardościomierza HPO250 dla złączy podestu ruchomego wykonanego bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej. Wynik badania twardości badanego złącza w materiale rodzimym wynosi 388 HV, w strefie wpływu ciepła SWC jest na poziomie średniej wartości 351,5 HV, natomiast w spoinie 319,66 HV.

Przy chłodzeniu argonowym średnia twardość badanego złącza w materiale rodzimym wynosi 385 HV, w strefie wpływu ciepła SWC waha się a poziomie średniej wartości 288 HV, natomiast w spoinie 298 HV, następnie dla chłodzenia helem: w materiale rodzimym wynosi 390 HV, w strefie wpływu ciepła SWC była na poziomie średniej wartości 351 HV, natomiast w spoinie 317 HV. Badanie twardość złącza nie zależy od doboru gazu mikro-jetowego (helowego, argonowego).

Kolejnym etapem badań było wykonanie próby zginania wg EN ISO 5173 [82] dla połączenia spawanego podestu ruchomego wykonanego bez użycia podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego. Analiza wyników badań wskazuje, że wystąpiły pęknięcia zarówno w próbie gięcia od strony lica jak i grani spoiny. Natomiast z użyciem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (argonu i helu), nie występowały wady oraz niezgodności spawalnicze od strony grani spoiny oraz od strony lica.

Badania radiograficzne wykonano według normy EN 17636-1 bez zastosowania podkładki miedzianej i argonowego chłodzenia mikro-jetowego. Wynik przeprowadzonego badania był negatywny, ponieważ występowały braki przetopu w wykonanym złączu.

Następnie wykonano badania radiograficzne przy zastosowaniu podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (argonowego i helowego). Analiza badań pozwoliła stwierdzić, że nie występowały żadne wady oraz niezgodności spawalnicze, wynik badania był pozytywny.

Przy zastosowaniu parametrów spawania podestu ruchomego, postanowiono wykonać ramię słupowysięgnika podestu o 20 % dłuższe od dotychczas wykonywanego. Połączenie spawane wykonano technologią łączenia materiałów z wykorzystaniem helowego chłodzenia mikro-jetowego. Zastosowana technologia pozwoliła wykonywać elementy podestu ruchomego dłuższe o 20 %. Technologia obecnie stosowana nie pozwoliłaby na wykonanie ramiona o długości przekraczającej 7,5 m.

Chłodzenie zarówno od stroni grani (zastosowanie podkładki miedzianej odprowadzającej ciepło) jak i od strony lica (helowe chłodzenie mikro-jetowe) umożliwiło zwiększenie długości wykonywanych elementów do 9 m przy zachowaniu wymaganej wysokiej wartości wytrzymałości złącza (powyżej 700 MPa).

Ponadto postanowiono sprawdzić poprzez zastosowane modyfikację technologii spawania cienkościennej konstrukcji podestu ruchomego (podkładka miedziana, mikro-jet) sprawdzić strzałkę ugięcia wg normy EN ISO 13920 [85]. Wyniku przeprowadzonego badania uzyskano znaczne zmniejszenie strzałki ugięcia, ponieważ zmodyfikowana technologia spawania spowodowała znaczne odprowadzenie ilość doprowadzonego ciepła ze spawanego materiału. Prowadzony proces bez użycia podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego nie umożliwiała skutecznego odbioru ciepła z łączonych elementów konstrukcji. Powyższa teza została udowodniona w toku przeprowadzonych badań.

Uzyskano certyfikat uznania technologii spawania WPQR zgodnie z wymaganiami normy EN-ISO 15613 [86].

W celu sprawdzenia bezpieczeństwa konstrukcji postanowiono sprawdzić wytrzymałość zmęczeniową złącza wykonanego najkorzystniejszymi parametrami procesu (zastosowanie podkładki miedzianej i helowego chłodzenia mikro-jetowego). Na podstawie badań stwierdzono, że przy wartości naprężenia na poziomie 500 MPa materiał wykazuje się nieskończoną trwałością zmęczeniową. Poza tym wyniki badań pozwalają stwierdzić, że konstrukcja jest jednoznacznie bezpieczna.

Wnioski:

1. Do budowy elementów spawanych podestu ruchomego można stosować stal DOCOL 1200M, ponieważ zapewnia wytrzymałość R_m na poziomie 1500 MPa,
2. Istnieje możliwość wydłużenia cienkościennej długości ramion konstrukcji podestu ruchomego nawet o 20 % dzięki zastosowaniu stali DOCOL 1200M w procesie spawania chłodzenia mikro-jetowego wraz z podkładką,
3. Elementy podestu ruchomego ze stali DOCOL 1200M można spawać MAG z zastosowaniem drutu UNION X90, gazu ochronnego Ar-18% CO₂, podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego argonowego i helowego,
4. Micro-jetowe chłodzenie helowe jest bardziej zalecane od argonowego przy spawaniu cienkościennych elementów konstrukcji podestu ruchomego, co potwierdzają wyniki badań nieniszczących oraz niszczących,
5. Zastosowanie argonowego chłodzenia mikro-jetowego pozwoliło na zwiększenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza o 18,3%,
6. Zastosowanie helowego chłodzenia mikro-jetowego pozwoliło na zwiększenie wyraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza o 19,8 %,
7. Próba gięcia wykazała, że równoczesne zastosowanie podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego pozwala na uzyskanie złączy elementów podestu ruchomego o dobrych właściwościach plastycznych (brak pęknięć po próbie gięcia),
8. Badanie mikrostruktury wykazało, że zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej struktury spoiny, co prowadzi do poprawy właściwości plastycznych złącza,
Badanie NDT (RTG + MT + VT) wykazały, że zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego pozwala na wyeliminowanie wad i niezgodności spawalniczych,
9. Badania zmęczeniowe udowadniają, że zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego pozwala na uzyskanie złącza o nieskończonej trwałości zmęczeniowej dla wartości naprężenia poniżej 500 MPa (1 841 757 cykli),
10. Oszacowano granicę zmęczenia badanego złącza spawanego na poziomie 450 MPa,
11. Sprawdzone możliwości zmodyfikowania spawania elementów podestu ze stali DOCOL 1200M.

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 1	Strona 1 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

1. Opis modernizacji

W celu sprawdzenia stateczności pojazdu z zastosowanym nowym słupowysięgnikiem (ramieniem podestu) o długości 9 m należało zdemontować dotychczasowy podest ruchomy przejezdny i zamontować nowo opracowane rozwiązanie. Przedmiotem modernizacji jest podest ruchomy przejezdny typ P-183 charakterystyka pojazdu została przedstawiona w tabl. A)

1.1 Wykonanie prototypu

Celem zadania jest zmiana polegająca na zdemontowaniu podestu ruchomego przejezdnego z przedmiotowego podwozia samochodu i zamontowaniu go na tym samym miejscu na podwoziu samochodu MAN 12,224 nr VIN podwozia: WMAL711074Y042224, Parametry i charakterystykę porównywanych podestów przedstawiono w tablicy A.

Tablica A. Charakterystyka podestu ruchomego przejezdnego

PRZED	PO
Podwozie STAR 28 Nr VIN: 97878 Masa własna: 3350kg	Podwozie MAN 12,224 Nr VIN: WMAL711074Y042224 Masa własna: 4850kg
wytwórca urządzenia: Fabryka Maszyn Budowlanych „BUMAR-KOSZALIN”	wytwórca urządzenia: Fabryka Maszyn Budowlanych „BUMAR-KOSZALIN”
rok budowy: 1984	rok budowy: 1984
typ: P-183	typ: P-183
nr fabryczny: 842571	nr fabryczny: 842571
udźwig: 300 kg	udźwig: 300 kg
długość ramienia 7500 mm	długość ramienia 9000 mm
czas podnoszenia dolnego wysięgnika: 35-90s	czas podnoszenia dolnego wysięgnika: 35-90s
czas podnoszenia górnego wysięgnika: 35-90 s	czas podnoszenia górnego wysięgnika: 35-90 s
czas pełnego obrotu: 35-90 s	czas pełnego obrotu: 35-90 s
czas wysuwu jednej podpory: 10-30s	czas wysuwu jednej podpory: 10-30s
max ciśnienie w układzie: 9 MPa	max ciśnienie w układzie: 9 MPa
liczba siłowników hydraulicznych: 6	liczba siłowników hydraulicznych: 6
ilość oleju hydraulicznego w układzie: 120 l	ilość oleju hydraulicznego w układzie: 120 l

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 2	Strona 2 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

1.2 Technologia modernizacji

Celowość modernizacji urządzenia uzasadniona jest dobrym stanem technicznym przedmiotowego podestu ruchomego przejezdnego „potwierdzonym pozytywnym wynikiem przeglądu i weryfikacji części przez KAMIL-SPED Tomasz Urbańczyk-Mysłowice”,

Podest ruchomy przejezdny j.w. zostanie zamontowany na samochodzie MAN 12,224 nr VIN WMAL711074Y042224, wyposażonym w silnik o pojemności skokowej 6871,00 cm i mocy 162 kW, Zachowane zostaną analogiczne cechy geometryczne i parametry pracy podestu ruchomego jakie posiadał dotychczas,

1.2.1 Zastosowana technologia

W rozpatrywanym przypadku zastosowano przewidzianą przez wytwórcę podestu ruchomego technologię połączeń rozłącznych użyciem śrub klasy 10,9 (traktowanych jako połączenie niesprężane), zakładając wymianę wszystkich śrub na nowe mocujących ramę podestu z podwoziem samochodowym,

Podest zamocowano na 4 wspornikach (rysunek KS 03/2020) zabudowanych po każdej stronie do ramy pojazdu z wykorzystaniem otworów technologicznych pojazdu o przekroju $\varnothing 12$, Do montażu zostaną wykorzystane oryginalne wsporniki podestu ruchomego, zdemonstrowane z poprzedniego pojazdu, Następnie podest zostanie skrecony z ramą pojazdu z pomocą 8 śrub M16x100-10,9, po 4 z każdej strony, Tylne wsporniki podestu ruchomego zostaną zabudowane do tylnej belki (poprzeczki ramy) pojazdu MAN 12,224 na 4 śrubach, Śruba M14x40-10,9,

W toku modernizacji urządzenia spełnione zostaną wymagania zawarte w aktualnych instrukcjach: technologicznej oraz kontroli jakości, stanowiących załączniki do Decyzji nr UD-09-116-P/3-19 z 15,04,2019r.,, uprawniające Kamil-Sped Tomasz Urbańczyk do modernizacji dźwigników, podestów ruchomych i żurawi przenośnych,

Kolejność robót

- Rozłączyć przewody hydrauliki siłowej od pompy
- Zdemontować z samochodu MAN 12,244 skrzynię ładunkową
- Odkręcić wszystkie wsporniki mocujące ramę podestu z podwoziem STAR 28
- Przy pomocy dźwigni o udźwigu co najmniej 5t unieść podest ruchomy i posadowić go na przekładkach gumowych uprzednio umieszczonych na ramie samochodu MAN 12,244
- Zabudować wsporniki montażowe w otwory technologiczne ramy pojazdu w odległościach wynikających z rozstawu otworów wspornikowych zamocowanych do ramy podestu ruchomego

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 3	Strona 3 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

- f) Dokręcić wsporniki śrubami M12x40-10,9 momentem 137,0Nm
- g) Zamocować wsporniki tylne podestu ruchomego do tylnej poprzeczki ramy pojazdu za pomocą śrub M14*40 i dokręcić kluczem momentem 218,0Nm
- h) W otwory wsporników wg rozstawu pokazanego na rysunku zestawieniowym włożyć odpowiednio śruby M16 kl. 10,9 i dokręcić kluczem do pierwszego oporu
- i) Połączyć przewody hydrauliczne z pompą wchodzącą w skład wyposażenia samochodu i uzupełnić olej hydrauliczny
- j) Sprawdzić prawidłowość działania mechanizmów podestu bez obciążenia
- k) Sprawdzić szczelność układu hydrauliki siłowej z obciążeniem nominalnym
- l) Sprawdzić stateczność podestu ruchomego z obciążeniem nominalnym,

1.2.2 Opis elementów bezpieczeństwa podestu

Na rysunku KS-05/202 zostały zaznaczone elementy, które wpływają na bezpieczną pracę z podestem ruchomym,

- Sterowanie podpór znajduje się w przedniej lewej części podestu i są zabezpieczone drzwiczkami zamykanymi na zamek, co uniemożliwia uruchomienie podpór podczas pracy podestu
- Poziomica została umieszczona nad serowaniem obok sterowania podpór w taki sposób, aby operator mógł prawidłowo wypoziomować podest
- Drabinka umożliwiająca wejście na podest znajduje się tylnej lewej części podestu została oznaczona zgodnie z obowiązującymi przepisami w pasy koloru żółto-czarnego,

1.2.3 Dostosowanie do wymogów minimalnych

W celu dostosowania podestu ruchomego do wymogów minimalnych określonych w Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002r, w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie użytkowania maszyn przez pracowników podczas pracy (Dz.U, nr 191, poz. 1596, ze zm.) zostaną zabudowane dwa wyłączniki awaryjne stop, z których pierwszy na podeście ruchomym obok dźwigni sterujących, a drugi na platformie roboczej (koszu) podestu ruchomego, Montaż zostanie wykonany bez ingerencji w konstrukcję barier platformy roboczej oraz podstawy podestu, Do montażu przycisku STOP zostaną wykorzystane wsporniki metalowe w postaci opasek metalowych,

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 4	Strona 4 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

1.2.4 Zasada działania wyłącznika stop zatrzymania awaryjnego

Wyłączniki bezpieczeństwa STOP, które zostaną zamontowane w układzie podestu ruchomego spowodują po naciśnięciu włącznika odłączenie zasilania hydraulicznego podestu ruchomego, Po naciśnięciu przycisku zostanie odłączone napięcie zasilające cewkę sterowania zaworu hydraulicznego trójdrożnego w wyniku czego olej hydrauliczny zostanie skierowany do zbiornika olejowego i nastąpi wyłączenie wszystkich ruchów roboczych podestu, Zawór hydrauliczny trójdrożny zostanie zamontowany pomiędzy pompą oleju hydraulicznego (zabudowanej za pośrednictwem przystawki do skrzyni biegów podwozia) a oryginalnym układem hydraulicznym podestu ruchomego (bez ingerencji w układ hydrauliczny podestu ruchomego), Schemat układu został przedstawiony na rysunku nr KS-09/2020,

Uwaga: obciążenie próbne (Q_n oraz 110% i 125% Q_n nominalnego) należy podwiesić naciągach do konstrukcji platformy roboczej (kosza) tak, aby znajdowało się na wysokości 10-15 cm nad podłożem,

Urządzenie do montażu należy poddać próbie przeciążenia 125% udźwigu nominalnego, podczas tej próby podest ruchomy powinien znajdować się na poziomym podłożu, a wysięgniki powinny być umieszczone w każdym położeniu, które stwarza największe naprężenie w dowolnej części nośnej podestu,

Następnie należy podest poddać próbie działania z obciążeniem 110% udźwigu nominalnego z prędkością nominalną w całym zakresie dopuszczalnych ruchach,

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 5	Strona 5 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

2. Obliczenia stateczności

Ciśnienie naporu wału (* *)	[kG/m ²]	125
Siła wiatru działająca na kosz z ładunkiem (poł, poziome) (* *)	[kG]	15,418
Siła wiatru działająca na kosz z ładunkiem (alfa=85deg) (* *)	[kG]	19,623
Siła wiatru działająca na ramę (poł, poziome) (* *)	[kG]	62,009
Siła wiatru działająca na ramę (alfa=85deg) (* *)	[kG]	105,415
Maksymalna siła naporu manualnego jednej osoby na kosz podestu	[kG]	20,367
Maksymalna siła naporu manualnego dwóch osób na kosz podestu	[kG]	40,775
(*) maksymalna wysokość upadku ładunku na podest	[mm]	300
(*) maksymalne ugięcie podestu podczas upadku ładunku (poł, poziome)	[mm]	150
(*) maks, ugięcie podestu podczas upadku ładunku (alfa=85deg)	[mm]	210
(* *) maksymalna prędkość wiatru	[m/s]	14
(* *) siła naporu wiatru	[kG]	12,742

OBLICZENIA STATECZNOŚCI PODESTU RUCHOMEGO (w odniesieniu do linii przechyłu, alfa`0deg)

PRZÓD

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (tylna oś)	3610	2,6000	9386,00
Masa podpór (przód)	100	0,0000	0,00
Masa podpór (tył)	100	3,8000	380,00
Masa bazy podestu ruchomego	601	2,6000	1562,60
Masa wysięgu podestu ruchomego	1474	0,9050	0,00
Siła dyn, od obrotu ramienia (wysięgnik)	12,7341	0,9050	0,00
Momenty ustalające	SUMA		11328,60
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	600	6,3000	37,80,00
Siła dyn, od obrotu ramienia (podest z ład,)	13,6086	6,3000	85,73
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	15,4179	4,9650	76,55
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	52,009	6,3000	390,66
Siła naporu manualnego na kosz podestu	20,3674	10,0000	203,87
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,3000	4143,00
Momenty wywracające	SUMA		7325,32
Współczynnik stateczności n	11326,6/7325,3=1,55		

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 01.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 6	Strona 6 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

STRONA PRAWA

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,1328	3602,29
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,1841	4274,63
Masa podpór (przód)	100	1,1499	114,99
Masa podpór (tył)	100	1,1999	119,99
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,1841	711,65
Momenty ustalające	SUMA		8323,55
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	600	7,7159	4629,54
Siła dyn. od obrotu ramienia (podest z ład.)	13,6086	7,7159	105,00
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	15,4179	6,3809	98,38
Siła wysięgu podestu ruchomego	1474	0,5109	753,05
Siła dyn. od obrotu ramienia (wysięgnik)	12,7341	0,5109	6,51
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	62,009	7,7159	473,45
Siła naporu manualnego na kosz podestu	30,3674	10,0000	203,57
Momenty wywracające	SUMA		6274,57
Współczynnik stateczności n	6823,6/6274,8=1,41		

TYŁ

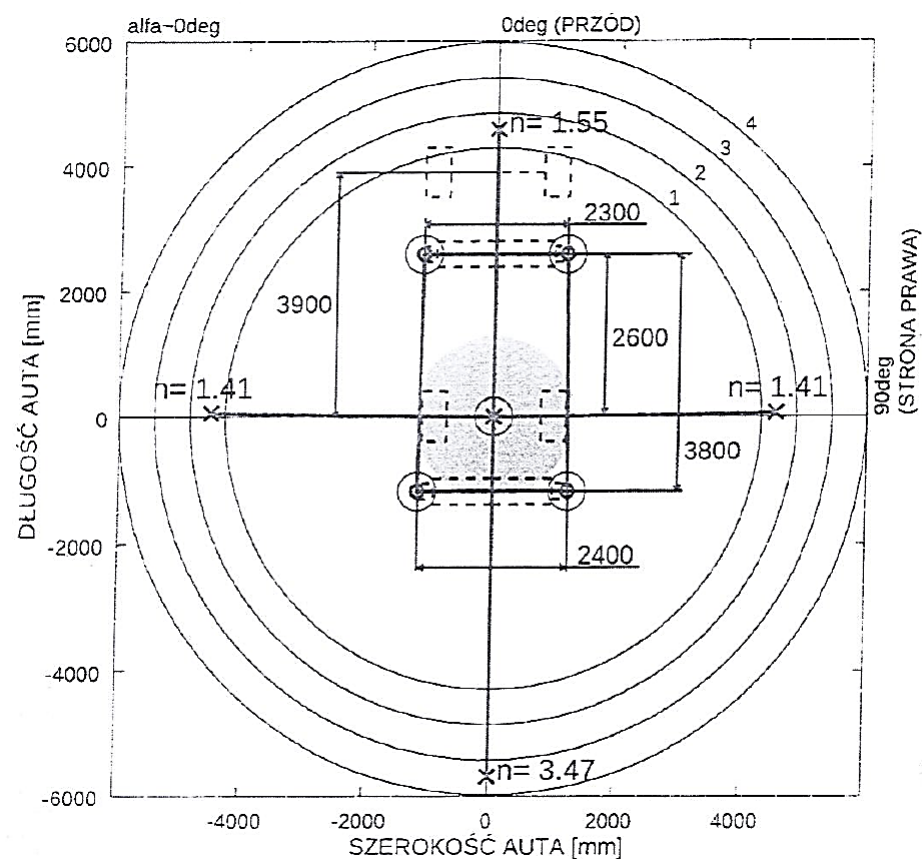
OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	5,1000	16218,00
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,2000	4332,00
Masa podpór (przód)	100	3,8000	380,00
Masa podpór (tył)	100	0,0000	0,00
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,2000	721,20
Momenty ustalające	SUMA		21651,20
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	600	7,7000	4620,00
Siła dyn. od obrotu ramienia (podest z ład.)	13,6086	7,7000	104,79
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	15,4179	6,3650	98,14
Siła wysięgu podestu ruchomego	1474	0,4950	729,63
Siła dyn. od obrotu ramienia (wysięgnik)	12,7341	0,4950	6,30
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	62,009	7,7000	477,47
Siła naporu manualnego na kosz podestu	20,3874	10,0000	203,87
Momenty wywracające	SUMA		6240,20
Współczynnik stateczności n	31651,3/6240,2=3,47		

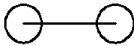
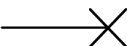
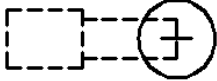
ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 7	Strona 7 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

STRONA LEWA

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,1328	3602,29
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,1841	4274,63
Masa podpór (przód)	100	1,1499	114,99
Masa podpór (tył)	100	1,1999	119,99
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,1841	711,65
Momenty ustalające	SUMA		8823,55
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	600	7,7159	4629,54
Siła dyn. od obrotu ramienia (podest z ład.,)	13,6068	7,7159	105,00
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	15,4179	6,3809	98,38
Siła wysięgu podestu ruchomego	1474	0,5109	753,05
Siła dyn. od obrotu ramienia (wysięgnik)	12,7341	0,5109	6,51
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	62,009	7,7159	478,46
Siła naporu manualnego na kosz podestu	20,3874	10,0000	203,87
Momenty wywracające	SUMA		6274,81
Współczynnik stateczności n	8823,6/6274,8=1,41		

Załącznik nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 8	Strona 8 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

**LEGENDA**

- 
linia przechyłu
- 
wektor współczynnika stateczności n
- 
linia zarysu kół i osi pojazdu
- 
zarys podpory
- 
zakres kąta obrotu kolumny

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 9	Strona 9 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

OBLICZENIA STATECZNOŚCI PODESTU RUCHOMEGO (w odniesieniu do linii przechyłu, $\alpha > 0^\circ$)

PRZÓD

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (tylna oś)	3610	2,6000	9386,00
Masa podpór (przód)	100	0,0000	0,00
Masa podpór (tył)	100	3,8000	380,00
Masa bazy podestu ruchomego	601	2,6000	1562,60
Masa wysięgu podestu ruchomego	1474	2,1360	3148,46
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	0,303817	2,1360	0,65
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	428,571	1,0312	441,94
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	2,39876	1,0312	2,47
Momenty ustalające	SUMA		14922,13
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	19,6228	15,2418	299,09
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	105,415	17,9315	1890,36
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	3,47265	15,2418	52,93
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	27,4182	17,9315	491,65
Siła naporu manualnego na kosz podestu	10,7747	19,0315	776,00
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,3000	4143,00
Momenty wywracające	SUMA		7613,93
Współczynnik stateczności n	14922,1/7643,9=1,95		

STRONA PRAWA

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,1328	3602,29
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,1841	4274,63
Masa podpór (przód)	100	1,1499	114,99
Masa podpór (tył)	100	1,1999	119,99
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,1841	711,65
Masa wysięgu podestu ruchomego	1474	0,7201	1061,44
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	0,303817	0,7201	0,22
Momenty ustalające	SUMA		9885,22
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	428,571	0,3847	164,87

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 10	Strona 10 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	2,39878	0,3874	164,87
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	19,6228	15,2418	299,09
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	105,415	17,9315	1890,26
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	3,47265	15,2418	52,93
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	27,4182	17,9315	491,65
Siła naporu manualnego na kosz podestu	40,7747	19,0315	776,00
Momenty wywracające	SUMA		3675,72
Współczynnik stateczności n	9885,2/3675,7=2,69		

.....

TYŁ

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	5,1000	16218,00
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,2000	4332,00
Masa podpór (przód)	100	3,8000	380,00
Masa podpór (tył)	100	0,0000	0,00
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,2000	721,20
Masa wysięgu podestu ruchomego	1474	0,7360	1084,86
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	0,303817	0,7360	0,22
Momenty ustalające	SUMA		22736,29
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	423,571	0,3688	156,06
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	2,39878	0,3688	0,88
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	19,6228	15,2418	299,09
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	105,415	17,9315	1890,26
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	3,47265	15,2418	52,93
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	27,4182	17,9315	491,65
Siła naporu manualnego na kosz podestu	40,7747	19,0315	776,00
Momenty wywracające	SUMA		3668,37
Współczynnik stateczności n	22736,3/3668,9=6,20		

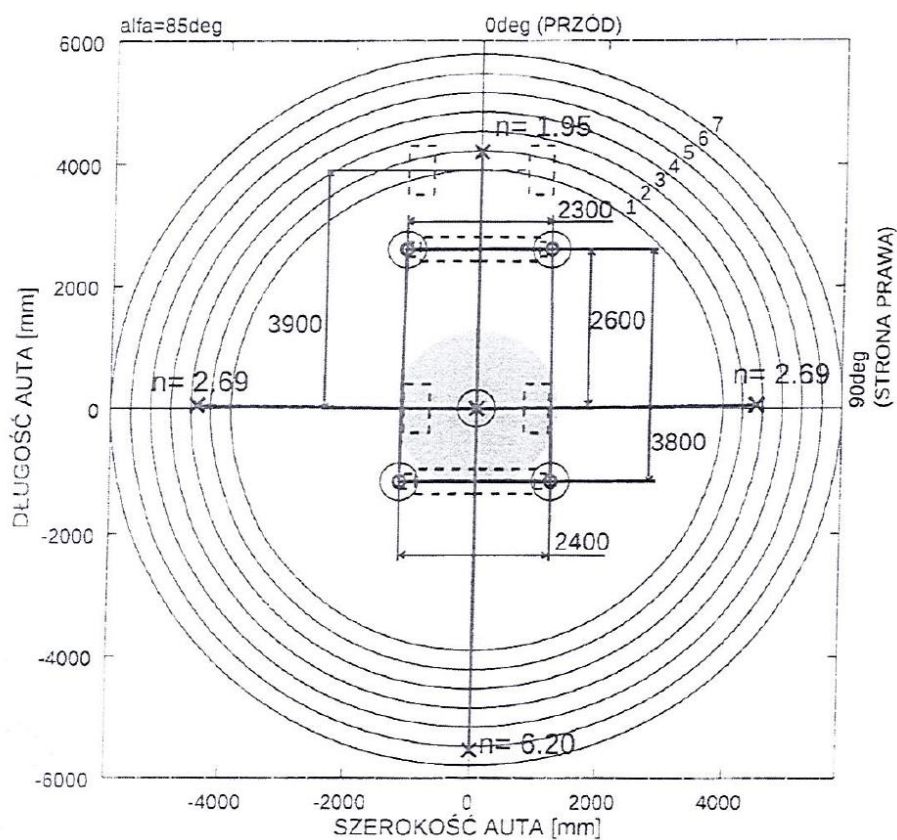
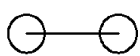
.....

ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 11	Strona 11 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

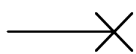
STRONA LEWA

OPIS	MASA [kg]	x RAMIĘ [m]	= MOMENT [kGm]
Masa podwozia (przednia oś)	3180	1,1328	3602,29
Masa podwozia (tylna oś)	3610	1,1841	4274,63
Masa podpór (przód)	100	1,1499	114,99
Masa podpór (tył)	100	1,1999	119,99
Masa bazy podestu ruchomego	601	1,1841	711,65
Masa wysięgu podestu ruchomego	1474	0,7201	1061,44
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	0,303817	0,7201	0,23
Momenty ustalające	SUMA		9885,21
Siła dynamiczna od upadku ładunku na podeście	428,571	0,3847	164,87
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	2,39878	0,3847	0,92
Siła wiatru (podest z ładunkiem)	19,6228	15,2418	299,09
Siła wiatru (ramię wysięgnika)	105,415	17,9315	1890,26
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, wysięg)	3,47265	15,2418	52,93
Siła dyn, od obrotu ramienia (skł, pion, ładunek)	27,4182	17,9315	491,65
Siła naporu manualnego na kosz podestu	40,7747	19,0315	776,00
Momenty wywracające	SUMA		3675,72
Współczynnik stateczności n	9885,2/3675,7=2,69		

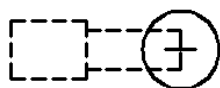
Załącznik nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 12	Strona 12 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

**LEGENDA**

linia przechyłu

wektor współczynnika stateczności n 

linia zarysu kół i osi pojazdu

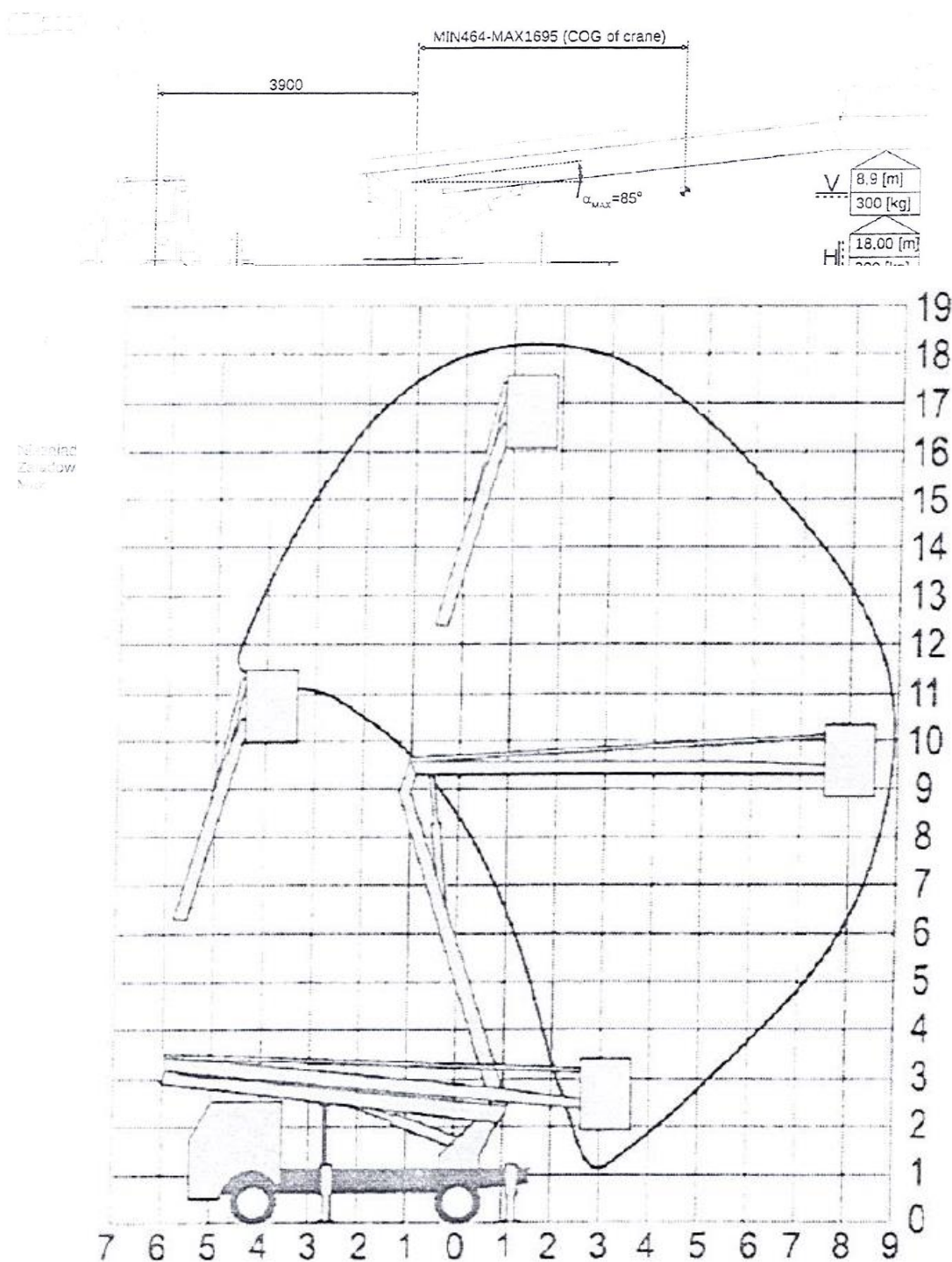


zarys podpory



zakres kąta obrotu kolumny

Załącznik nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 13	Strona 13 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	



ZAŁĄCZNIK nr 1		Data wyciągu: 07.06.2021
Wyciąg ze protokołu badawczego	Nr 14	Strona 14 z 14
Przedmiot badań:	Stateczność pojazdu modernizowanego nr podwozia: MAN 12.224	

W rozpatrywanym modelu obciążenia zostały spełnione warunki stateczności,

WNIOSEK KOŃCOWY:

Dokonane obliczenia sprawdzające wykazały spełnienie warunków stateczności podestu ruchomego P-183 (zamontowanego na samochodzie MAN 12,224) we wszystkich krawędziach wywrotu,

SPIS LITERATURY

- [1] Kosiewicz T.: *Technologia budowy pojazdów samochodowych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984.
- [2] Węgrzyn T., Miros M.: *Wytrzymałość złączy spawanych w ramach samochodów ciężarowych*, *Przegląd Spawalnictwa*, No. 3, 2010.
- [3] Polko W.: *Konserwacja podestów ruchomych przejezdnych*, Kabe, 2015.
- [4] Nishioka K., Ichikawa K.: *Progress in thermomechanical control of steel plater and their commercialization*, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 13, No. 2, 2012.
- [5]. Shin L. H., Park K.: *Evaluation of high strength TMCP steel weld for use in cold regions*, *Journal of Constructional Steel Research*, No. 74, 2012.
- [6] Silva A., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A.: *Welding of mobile elevating work platforms*, *Welding Technology Review*, Vol. 91, No. 6, 2019.
- [7] Skrzymowski W.: *Podesty ruchome i przejezdne budowa i eksploatacja*. Wydawnictwo i Handel Książkami, KaBe, 2011.
- [8] <https://remiza.com.pl/wspolczesne-koszowe-podnosniki-pozarnicze/>, access: 25.06.2021
- [9] https://www.czerwonesamochody.com/details.php?image_id=6729 access: 25.06.2021
- [10] PN-EN 280+A1:2015-11 *Podesty ruchome przejezdne - Obliczenia projektowe - Kryteria stateczności - Budowa -Bezpieczeństwo - Badania i próby*.
- [11] <https://www.jlg.com/pl-pl/equipment/engine-powered-boom-lifts/telescopic/400-series/400s-2015>.
- [12] <http://forum-budowlane.pl/technologie/podesty-nozycowe>, access: 25.06.2021
- [13] Yi H., Lee K., Bhadeshia H.: *Stabilisation of ferrite in hot rolled δ -TRIP steel*, *Materials Science and Technology*, No. 27, 2011.
- [14] Grosman F., Hadasik E.: *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
- [15] Grosman F., Woźniak D.: *Postęp w technologii i produkcji blach dla motoryzacji*, *Hutnik – Wiadomości hutnicze*, No. 5, 2005.
- [16] Węgrzyn T.: *Tlen i azot w stalowym stopiwie wykonanym łukowymi elektrodami*, *Rozprawa habilitacyjna*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [17] Hofmann H., Mattissen D., Schaumann T. W.: *Advanced cold rolled steels for automotive applications*, *Steel Research Int.*, No. 80, 2009.

- [18] Krajewski S., Nowacki J.: *Mikrostryktura i właściwości stali o wysokiej wytrzymałości AHSS*, Przegląd spawalnictwa, No. 7, 2011.
- [19] Chatterjee S., Murugananth M., Bhadeshia H.: k.D.H., δ -TRIP Steel. *Materials Science and Technology*, No. 23, 2007.
- [20] Lis A. K., Gajda B.: *Modelling of the DP and TRIP microstructure in the CMnAlSi automotive steel*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 15, No. 1-2, 2006.
- [21] Senkara J.: *Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania*, Przegląd Spawalnictwa, No. 11, 2009.
- [22] Tasak E., Ziewiec A.: *Spawalność materiałów konstrukcyjnych. No. 1: Spawalność stali*, JAK, 2009.
- [23] Butnicki S.: *Spawalność i kruchość stali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991.
- [24] Gosowski B., Kubica E.: *Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.
- [25] Kozioł P., Organek P.: *Ocena spawalności stali konstrukcyjnych*, Przegląd Budowlany, No. 1, 2015.
- [26] ISO 581:1980 Weldability – Definition. General information.
- [27] Pilarczyk J., Czyrski W.: *Spawanie stali*, Państwowe Wydawnictwo Techniczne 1960.
- [28] Oparty-Mysliwiec D., Mysliwiec M.: *Techniki wytwarzania. Spawalnictwo*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1981.
- [29] PN -84/M-69005 Spawalnictwo. Spajanie metali. Terminologia.
- [30] PN-EN 1011-2:2004+A1:2005 Spawanie – Wytyczne dotyczące spawania metali – Część 2: Spawanie łukowe stali ferrytycznych.
- [31] PN-EN ISO 6507-1:2018-05 Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -- Część 1: Metoda badania.
- [32] PN-EN ISO 5817:2009 Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek) -- Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [33] DOCOL M. Zimnowalcowana stal martenzytyczna. Materiały producenta.
- [34] Judson P., Keown D. Mc: *Advances in the control of weld metal toughness, Offshorewelded structures proceedings*, Vol 2, 1982.

- [35] Węgrzyn T., Piwnik J., Jawor J., Kulak P., Szczucka-Lasota B., Konopka A.: *Innowacyjność procesowa w spawaniu laserowym z wykorzystaniem technologii chłodzenia mikro-jet*. red. Knosala R., *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Tom 1*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2016.
- [36] Węgrzyn, T.; Piwnik, J.; Hadryś, D.: *Oxygen in steel WMD after welding with micro-jet cooling*, *Archives of metallurgy and materials*, Volume: 58 Issue: 4/2013.
- [37] Węgrzyn T., Szczucka-Lasota B., Uściłowska A., Stanik Z., Piwnik J.: *Validation of parameters selection of welding with micro-jet cooling by Rusing Method of Fundamental Solutions*, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, No. 98, 2019.
- [38] Szczucka-Lasota B., Gajdzik B., Węgrzyn T., Wszolek Ł.: *Steel weld metal depo sit measured after immediate micro-jet cooling*, *Matals*, No. 7, 2017.
- [39] Lancaster J.F.: *Physics of Welding*, Pergamon Press, 1986.
- [40] Węgrzyn T.: *Oxygen and nitrogen in low carbon basic electrode weld metal deposits*, *IIW Doc.II-A-1181-92*, 1992.
- [41] Allum C.J.: *Nitrogen absorption from welding arc*, *IIW. Doc. II-1115-88*, 1988.
- [42] Węgrzyn T., Silva A., Piwnik J., Majewski W.: *Mechanical Properties of Welds after Micro-Jet Cooling*, *Proceedings of the Twenty-fourth, International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2014.
- [43] Węgrzyn T., Piwnik J., Hadryś D.: *Acicular ferrite in micro welding Technologies*, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 59, No. 2, 2014.
- [44] Węgrzyn T.: *Spawanie elementów pojazdów z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego*, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, 2014.
- [45] Jaewson L., Kamran A., Jwo P.: *Modeling of failure mode of laser welds in lap-shear specimens of HSLA steel sheets*, *Engineering Fracture Mechanics*, No. 1, 2011.
- [46] Celin R., Burja J.: *Effect of cooling rates on the weld heat affected zone coarse grain microstructure*, *Metallurgical and Materials Engineering*, Vol 24, No. 1.
- [47] Darabi J., Ekula K.: *Development of a chip-integrated micro cooling device*, *Microelectronics Journal*, Vol. 34, No. 11, 2003.
- [48] Hadryś D.: *Impact load of welds after micro-jet cooling*, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 60, No. 4, 2015.
- [49] Muszyński T., Mikielwicz D.: *Structural optimization of microjet array cooling system*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, 2017.

- [50] Celin R., Burja J.: *Effect of cooling rates on the weld heat affected zone coarse grain microstructure*, *Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 24, No. 1, 2018.
- [51] Walsh S. M., Smith J. P., Browne E. A., Hennighausen T. W., Malouin B. A.: *Practical Concerns for Adoption of Microjet Cooling*, *ASME Proceedings 2018 Power Electronics, Energy Conversion, and Storage*.
- [52] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/grobblech_migration/perform/verarbeitung_1/sc_hweissen_1/klassifikation_der_schweisszusaeetze.pdf, access: 25.06.2021
- [53] Śliwiński T.: *Naprawy konstrukcji nośnej koparko-ladowarek z zastosowaniem chłodzenia metodą mikrojetową*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport*, No. 77, 2012.
- [54] Węgrzyn T., Piwnik J., Silva A., Baranowski P., Plata M., Hadryś D.: *Welding whit micro-jet cooling for low-oxygen process. konferencja ICEUBI2011, Covilha, Portugal*.
- [55] Miros M., Hadryś D.: *Naprawa powypadkowych części samochodów osobowych i ciężarowych z wykorzystaniem metod spawalniczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport*, No. 61, 2007.
- [56] Węgrzyn T., Hadryś D., Miros M.: *Połączenia spawane wykonywane podczas napraw powypadkowych pojazdów samochodowych*, *Przegląd Spawalnictwa*, No. 2, 2008.
- [57] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.: *Parametry spawania cienkościennych konstrukcji środków transportu ze stali DOCOL 1400M, Welding parameters for thin-walled structures of means of transport made of DOCOL 1400M steel*, *ABiD 4/2019 Aparatura badawcza i dydaktyczna*, http://abid.cobrabid.pl/?node_id=248&lang=pl&ma_id=4028, access: 25.06.2021
- [58] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.: *Spawanie MIG cienkościennych konstrukcji środków transport ze stali DOCOL 1200M, MIG welding of thin-walled structures of means of transport made of DOCOL 1200M steel*, *ABiD 4/2019 Aparatura badawcza i dydaktyczna*, http://abid.cobrabid.pl/download.php?ma_id=4029&o=1, access: 25.06.2021
- [59] Silva A., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A.: *Welding supports of pin in mobile transport*, *Welding Technology Review*, Vol. 92, No. 4, 2020.

- [60] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.: *Mieszanki gazowe stosowane do spawania podpór podestów ruchomych*, *Gas mixtures used for welding supports of mobile platforms*, ABiD 4/2019 Aparatura badawcza i dydaktyczna, http://abid.cobrabid.pl/?node_id=248&lang=pl&ma_id=4030, access: 25.06.2021
- [61] Węgrzyn T., Szczucka-Lasota B., Piwnik J., Jurek A.: *AHSS steel welding with micro-jet cooling in mobile platforms*, *Transport Problems*, Vol 15, No. 1, 2020.
- [62] Karbasian H., Tekkaya A.E.: *A review on hot stamping*, Elsevier, 2010.
- [63] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Łazarz B., Jurek A.: *Welding of mobile platform elements made of AHSS steel and a non-alloy steel*, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, No. 106, 2020.
- [64] Wszolek Ł., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A.: *Kontrola jakości obręczy kół po naprawach spawalniczych z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego*, *Dozór Techniczny*, Sigma-NOT, No. 1, 2019.
- [65] Silva A., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A.: *MAG welding of S700MC steel used in transport means with the operation of low arc welding method*, *Welding Technology Review*, Vol. 91, No. 3, 2019.
- [66] Silva A., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A.: *Welding of Mobile elevating work platforms*, *Welding Technology Review*, Vol. 91, No. 6, 2019.
- [67] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Bogusław Ł., Jurek A., Wilczyński K. I.: *Spawanie metodą MAG konstrukcji środków transportu ze stali DOCOL 1200M*, *Biul. Inst. Spaw. Gliw.*, Vol 64, No. 4, 2020.
- [68] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Szymczak T., Jurek A., Piwnik J., Wilczyński K.I.: *Fatigue of Docol 1200m Welds to Mobile Platform Structures*, *Transport Problems, XII International Scientific Conference, Silesian University of Technology Katowice – Silesia 2 – 4 December 2020*.
- [69] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *Spawanie złącza mieszanego w budowie podestów ruchomych ze stali S690 QL i S960 MC*, *ABID 2020*.
- [70] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *sSpawanie MAG cienkościennych konstrukcji środków transportu ze stali S690 QL*, *ABID 2020*.
- [71] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *Welding of Pins to Mobile Platforms with Micro-Jet Cooling*, *Transport Problems*, 2020.

- [72] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *Udarność spawanych podpór podestu ruchomego ze stali S690 QL.*, ABID 2020.
- [73] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *Spawanie Mag Konstrukcji Środków Transportu ze Stali Docol 1200m*, No. 62. *Międzynarodowa Konferencja Spawalnicza, Nowoczesne spawalnictwo – nowoczesna przyszłość*, 13-15 października 2020 r., Sosnowiec.
- [74] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Piwnik J., Jurek A., Wilczyński K.I.: *Welding of mobile platform elements made from mixed grades of high-strength steels*. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. No. 107, 2020.
- [75] Bleck W., Larour P., Baeumer A.: *High Strain Tensile Testing of Modern Car Body Steels*, *Material Forum*. No. 29, 2005.
- [76] Shapiro A.: *Using LS-Dyna for Hot Stamping*, *European LS-Dyna Conference*, Livermore, 2009.
- [77] Hairer F., Karelova A., Krempaszky C., Werner E., Hebesberger T.: *Influence of heat treatment on the microstructure and hardness of a low alloyed complex phase steel*, Muenchen, 2009.
- [78] Keeler S., Kimchi M.: *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5*, WorldAutoSteels, 2014.
- [79] PN-EN ISO 9015-1:2011 *Badania niszczące złączy spawanych metali -- Badanie twardości -- Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo*.
- [80] PN-EN ISO 17639:2013-12 *Badania niszczące spawanych złączy metali -- Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych*.
- [81] PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012 *Badania niszczące spoin w materiałach metalowych - - Badanie na zginanie*.
- [82] PN-EN ISO 17636-1:2013-06 *Badania nieniszczące spoin -- Badanie radiograficzne - - Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną*.
- [83] PN-EN ISO 17638:2017-01 *Badanie nieniszczące spoin -- Badanie magnetyczno-proszkowe*.
- [84] PN-EN ISO 13920:2000/Ap1 *Spawalnictwo Tolerancje ogólne dotyczące konstrukcji spawanych Wymiary liniowe i kąty Kształt i położenie*.
- [85] PN-EN ISO 15613:2006 *Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -- Kwalifikowanie na podstawie przedprodukcyjnego badania spawania/zgrzewania*

- [86] Krawczyk J.: *Kształtowanie elementów nadwozi samochodowych ze stali AHSS*, Wrocław, 2016.
- [87] PN-EN ISO 4136 - *Badania niszczące złączy spawanych metali -- Próba rozciągania próbek poprzecznych*, 2013.
- [88] Durrenberger L., Klepaczko J. R. A.: *Constitutive modeling of metals based on the evolution of the strain-hardening rate*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2008.
- [89] Jarvenpaa A., Mäntyjärvi M. K. K., Merklein M., Määttä A., Hietala M., Karjalainen J.: *Mechanical Properties of Laser Heat Treated 6 mm Thick UHSS-Steel*, *AIP Conference Proceedings*, 2011.
- [90] Krauss G.: *Martensitic transformation, structure and properties in hardenable steels.*, *Proceedings of the Symposium Hardenability Concepts with Application to Steel*, 1978.
- [91] Keeler S., Kimchi, M.: *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines V5*. World Auto Steel, 2015.
- [92] Ramezani M., Ripin Z. M., Ahmad, R.: *Modelling of kinetic friction in V-bending of ultra-high-strength steel sheets*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 1-4, 2010.
- [93] Hansen N.: *Hall–Petch relation and boundary strengthening*, *Scripta Materialia*, Vol. 51, No. 8, 2004.
- [94] Vander V.: *G. F. Metallography, Principles and Practice*, McGraw Hill, 1999.
- [95] Nogueira A.L., Silva M.J.: *Da carroça ao ultraleve reduction*, *Metalurgia & Materials*, Vol. 57, No. 511, 2001.
- [96] Kishida K.: *High strength steel sheets for light weight vehicle*, *Nippon steel technical report*, 2000.
- [97] Adamczyk J., Grajcar A.: *Obróbka cieplno-mechaniczna blach ze stali konstrukcyjnej mikrostopowej o strukturze ferrytyczno-martenzytycznej*, *Conference Proceedings 11th International scientific conference: Achievements in mechanical & materials engineering*, Gliwice, 2001.
- [98] Berglund D., Amundsson K., Hellgren L.: *Hot stamped components with soft zones-simulation and validation of material properties and product performance*, *Steel Grips*

- [99] Barnes S. J., Bhatti A. R., Steuwer A., Johnson R., Altenkirch J., Withers P. J.: *Friction stir welding in HSLA-65 steel, Part I. Influence of weld speed and tool material on microstructural development*, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 43, No. 7, 2012.
- [100] Dias E. X.: *Caracterização metalográfica de um aço de fases complexas*, 2014.
- [101] Tumuluru M., Gnade S.: *Clinch Joining of Advanced High Strength Steels*, MS&T Conference, Detroit, 2007.
- [102] Tumuluru M.: *The Effect of Coatings on the Resistance Spot Welding Behavior of 780 MPa Dual Phase Steel*, *Welding Journal*, No. 86, 2007.
- [103] Peer A., Lu Y., Abke T., Kimchi M., Wei Zhang W.: *Deformation Behaviors of Subcritical Heat-affected Zone of Ultra-high Strength Steel Resistance Spot Welds*, 9th International Seminar & Conference on Advances in Resistance Spot Welding, No. 3, 2016.
- [104] Yan B.: *High Strain Rate Behavior of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications*, *Great Designs in Steel*, American Iron and Steel Institute, 2003.
- [105] Szczucka-Lasota B., Wegrzyn T., Szymczak T., Piwnik J., Jurek A., K.I. Wilczyński.: *Fatigue of docol 1200 M welds to mobile platform structures*, XII International Conference Transport Problems, Silesian University of Technology, Katowice, December 2020.
- [106] Wegrzyn T., Szczucka-Lasota B., Szymczak T., Piwnik J., Jurek A., K.I. Wilczyński.: *Welding of pins to mobile platforms with micro-jet cooling*, XII International Conference Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, December 2020.
- [107] Szczucka-Lasota B., Wegrzyn T., Szymczak T., Piwnik J., Jurek A., K.I. Wilczyński.: *Fatigue of docol 1200 M welds to mobile platform structures*, XII International Conference Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, December 2020.
- [108] Szczucka-Lasota B., Tarasiuk W., Cybulko P., Garbala K., Majewski W.: *Comparison of the intensity of abrasive wear of stellit 6 and Fe3Al*, XII International Conference Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, December 2020.

- [109] Węgrzyn T, Szczucka-Lasota B., Szymczak T., Piwnik J., Jurek A., K.I. Wilczyński.: *Welding of pins to mobile platforms with micro-jet cooling*, XII International Conference Transport Problems, Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, December 2020.
- [110] 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.* [111] PN-EN ISO 17637:2017-02 *Badania nieniszczące złączy spawanych -- Badania wizualne złączy spawanych.*
- [111] PN-EN ISO 17637:2017-02 *Badania nieniszczące złączy spawanych -- Badania wizualne złączy spawanych.*
- [112] Szymczak T., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Łazarz B., Jurek A.: *Behavior of weld to S960MC high strength steel from joining process at micro-jet cooling with critical parameters under static and fatigue loading*, Materials, Vol. 14, No. 4, 2021.
- [113] Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Łazarz B., T. Szymczak, Jurek A., Wilczyński K.I., Cybulko P.: *MAG welding process for S700MC steel*, Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures, Editors: Marian A. Gizejowski et al, Taylor and Francis, 2021.

SPIS TABLIC

Tabl. 1. Skład chemiczny wybranych stali martenzytycznych MART	22
Tabl. 2. Właściwości mechaniczne wybranych stali martenzytycznych.....	23
Tabl. 3. Zalecane spoiwa do stali DOCOL UHS.....	38
Tabl. 4. Wyniki badań użycia różnych gazów osłonowych	52
Tabl. 5. Wyniki badań użyciem dwóch różnych podkładek (miedziana, ceramiczna)	54
Tabl. 6. Ocena spawalności złącza	56
Tabl. 7. Wytrzymałość złącza wykonanego z zastosowaniem podkładki miedzianej.....	58
Tabl. 8. Wytrzymałość złącza wykonanego z podkładką miedzianą i chłodzeniem mikro-jetowym	59
Tabl. 9. Rezultaty testów wytrzymałościowych elementów podestu ruchomego.....	71
Tabl. 10. Rezultaty testów wytrzymałościowych stali DOCOL 1200M po spawaniu z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego.....	74
Tabl. 11. Wybrane parametry próby zmęczeniowej oraz wynik końcowy.....	80
Tabl. 12. Twardość złącza bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej	85
Tabl. 13. Twardość materiału DOCOL 1200M z chłodzeniem mikro-jetowym i z podkładką miedzianą.....	85
Tabl. 14. Weryfikacja próbek z próby gięcia bez zastosowania podkładki miedzianej oraz bez chłodzenia mikro-jetowego	86
Tabl. 15. Weryfikacja próbek z próby gięcia z zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego (argonem i helem)	87
Tabl. 16. Wyniki badań radiograficznych bez zastosowania podkładki miedzianej oraz bez chłodzenia mikro-jetowego	88
Tabl. 17. Wyniki badań radiograficznych z zastosowaniem podkładki miedzianej i chłodzenia mikro-jetowego	89
Tabl. 18. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia mikrostrugi a górną granicę plastyczności (R_e).....	95
Tabl. 19. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: górna granica plastyczności.....	100
Tabl. 20. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia na parametr wytrzymałości na rozciągania (R_m).....	101
Tabl. 21. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: parametr wytrzymałość na rozciąganie.....	105
Tabl. 22. Wpływ rodzaju gazu i ciśnienia na parametr wydłużania (A_5).....	106
Tabl. 23. Wartości p-value dla porównań post hoc efektu interakcji: parametr wydłużania.....	109

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Podnośnik koszowy Bronto Skylift F61RPX na podwoziu Volvo.....	8
Rys. 2. Podnośnik nożycowy Genie GS3246	11
Rys. 3. Podnośnik teleskopowy 400S firmy JLG	13
Rys. 4. Obszar roboczy dla podestu ruchomego przejezdnego wysięgnikowego, gdzie $a = 1\text{ m}$	14
Rys. 5. Dążenie do podwyższenia własności użytkowych konstrukcji podestów ruchomych	15
Rys. 6. Schemat przemian fazowych przy chłodzeniu stali.....	20
Rys. 7. Przemiany austenitu przy chłodzeniu stali	21
Rys. 8. Graficzna interpretacja spawalności jako wypadkowej ze spawalności metalurgicznej, konstrukcyjnej i technologicznej	27
Rys. 9. Graficzne przedstawienie spawalności wg, gdzie: x_i – warunki spawania, z_i – właściwości złącza, W_p – warunki pracy, U_z – użyteczność złącza.....	29
Rys. 10. Schemat wpływu energii liniowej łuku E i podgrzewania przed spawaniem na twardość w SWC ..	31
Rys. 11. DOCOL M – odkształcenie	37
Rys. 12. Wytrzymałość połączeń spawanych (o grubości od 1,2 do 2 mm) dla DOCOL M.....	38
Rys. 13. Idea spawania z przystawką mikro-jetową	40
Rys. 14. Ustawienie iniektora mikro-jetowego względem głowicy spawalniczej	41
Rys. 15. Struktura metalograficzna typowego złącza ze stali niskostopowej.....	41
Rys. 16. Przekrój cienkościennego słupowysięgnika podestu ruchomego.....	46
Rys. 17. Idea stosowania technologii spawania z przystawką mikro-jetową	49
Rys. 18. Sposób przygotowania elementu do spawania ręcznego, $t = 1,8\text{ mm}$, rysunek poglądowy	50
Rys. 19. Sposób wykonania połączenia spawanego, $t = 1,8\text{ mm}$, rysunek poglądowy	51
Rys. 20. Stan powierzchni spoin po spawaniu MAG w osłonie CO_2	52
Rys. 21. Stan powierzchni spoiny po spawaniu MAG z zastosowaniem podkładki ceramicznej.....	55
Rys. 22. Stan powierzchni spoin po spawaniu MAG.....	57
Rys. 23. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 3369.....	58
Rys. 24. Sposób przygotowania elementu do spawania MAG z podkładką miedzianą- rysunek poglądowy .	65
Rys. 25. Sposób wykonania połączenia spawanego MAG z podkładką miedzianą.....	66
Rys. 26. Podkładka miedziana formująca lico spoiny podestu ruchomego.....	67
Rys. 27. Stanowisko do spawania elementów budowy podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych.....	68
Rys. 28. Stan powierzchni złącza elementów podestu ruchomego od strony grani po spawaniu MAG w osłonie $82\% \text{ Ar} + 18\% \text{ CO}_2$, zastosowana miedziana podkładka formująca	69
Rys. 29. Wykonywanie badań wytrzymałościowych (widoczne wzajemne pochylenie elementów podestu)	70
Rys. 30. Stan powierzchni spoin po spawaniu z argonowym schładzaniem mikro-jetowym i z zastosowaniem podkładki miedzianej.....	72
Rys. 31. Stan powierzchni spoin po spawaniu z helowym schładzaniem mikro-jetowym i zastosowaniem podkładki miedzianej.....	73

Rys. 32. Próbkki klepsydryczne: (a) i (b) odpowiednio do badania właściwości mechanicznych materiału rodzimego i spoiny, nominalna grubość próbki w strefie pomiarowej wynosiła 1,7 mm, natomiast szerokość nominalna przyjmowała wartość 4 mm.....	79
Rys. 34. Przebieg minimalnych i maksymalnych wartości sygnału naprężenia wykorzystanego w próbie zmęczeniowej dla liczby cykli obciążenia na II etapie prowadzonego testu do tj. do 1 230 023 cykli obciążenia.	81
Rys. 35. Próbkka klepsydryczna: (a) i (b) odpowiednio: przed i po badaniu zmęczeniowym	82
Rys. 37. Mikrostruktura złącza podestu ruchomego bez chłodzenia mikro-jetowego i bez podkładki miedzianej, traw. nital.....	83
Rys. 38. Mikrostruktura złącza podestu ruchomego z helowym chłodzeniem mikro-jetowym i z zastosowaniem podkładki miedzianej, traw. nital	84
Rys. 39. Zdjęcie radiograficzne z niezgodnościami spawalniczymi bez użycia podkładki miedzianej oraz chłodzenia mikro-jetowego	88
Rys. 40. Zdjęcie radiograficzne złącza spawanego wykonanego z użyciem podkładki miedzianej oraz argonowego chłodzenia mikro-jetowego.....	89
Rys. 41. Wykonywanie słupowysięgnika zwiększonego o 20 % długości w stosunku do dotychczasowego rozwiązania (porównanie rys. 16).....	91
Rys. 42. Odkształcenie elementu (13,2 mm) podestu ruchomego po spawaniu bez chłodzenia mikro-jetowego i bez użycia podkładki miedzianej.....	92
Rys. 43. Odkształcenie konstrukcji (5,3 mm) podestu ruchomego po spawaniu z chłodzeniem mikro-jetowym i z użyciem podkładki miedzianej.....	93
Rys. 59. Wykonywanie słupowysięgnika zwiększonego o 20 % długości.....	121
Rys. 60. Uznanie Technologii Spawania WPQR wg EN ISO 15613	124
Rys. 61. Wstępna Instrukcja Technologii Spawania pWPS wg EN ISO 15613	125

Streszczenie pracy

mgr inż. Adam Jurek

„Zwiększenie zasięgu operacyjnego podestu ruchomego pojazdów samochodowych przy zachowaniu masy własnej pojazdu”

Promotor: prof. zw. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Wszolek

Wprowadzenie norm emisji spalin w pojazdach samochodowych wymusiło na producentach i konstruktorach pojazdów znalezienie rozwiązań, umożliwiających spełnienie restrykcji wynikających z wyżej wymienionych standardów. W tym celu w pojazdach samochodowych wprowadzono, m.in. filtry cząstek stałych, katalizatory spalin oraz szereg innych elementów układów wydechowych, wpływających na obniżenie poziomu emisji spalin do atmosfery. W wyniku wprowadzania elementów konstrukcyjnych o nowych funkcjach nastąpiło znaczne zwiększenie masy własnej pojazdów. W rezultacie producenci poszukują obecnie rozwiązań technologicznych, które umożliwiłyby obniżenie masy konstrukcji przy zachowaniu lub zwiększeniu funkcjonalności danego typu pojazdu. W przypadku podestów ruchomych, dąży się do poszerzenia ich zasięgu operacyjnego oraz udźwigu, przy jednoczesnym zapewnieniu spełniania wymagań bezpieczeństwa.

Wzrastające zapotrzebowanie na wysokowytrzymałe materiały doprowadziło do powstania martenzytycznych stali AHSS (Advanced High-Strength Steel), o doraźnej wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 1700 MPa. Stale te charakteryzują się jednak niezadawalającymi własnościami plastycznymi, rejestrowane wydłużenie względne w tych stalach odnotowuje się na poziomie na poziomie 4- 5%. Zespół cech, wynikających z dominującej struktury martenzytycznej tych materiałów sprawia, że stale AHSS uważane są za trudnospawalne. Podczas procesu spawania konstrukcji z tych stali, mimo zastosowania podgrzewania wstępnego, obserwuje się pęknięcia złączy zarówno w strefie

wpływu ciepła jak i w spoinie. Istotną wadą tych stali jest to, że po procesie spawania wytrzymałość złącza jest na poziomie dwukrotnie mniejszym od wytrzymałości materiału rodzimego. Dlatego celem pracy było opracowanie metody wytwarzania konstrukcji spawanej ze stali AHSS, charakteryzującej się odpowiednimi wysokimi własnościami wytrzymałościowymi połączeń. Jako materiał badawczy wybrano stal Docol 1200M. Analiza literatury a także wykonane badania wstępne umożliwiły wybór metody MAG oraz chłodzenia mikro-jetowego jako najbardziej korzystnej, innowacyjnej metody spawania oraz odpowiedni dobór parametrów procesu, umożliwiający wykonanie połączeń bez wad spawalniczych dla tej grupy stali. Analiza uzyskanych wyników umożliwiła sformułowanie tezy, która zakłada że, **„modyfikacja procesu spawania wysokowytrzymałej stali z grupy AHSS w konstrukcji podestów ruchomych przejezdnych montowanych na pojazdach samochodowych, poprzez zastosowanie chłodzenia mikro-jetowego i podkładki miedzianej, pozwoli na uzyskanie lepszych własności mechanicznych złącza, a przez to umożliwi znaczne wydłużenie zasięgu operacyjnego podestu, bez podwyższania masy całkowitej konstrukcji i przy zachowaniu spełniania wymagań bezpieczeństwa”**.

Dla udowodnienia tezy przeprowadzono badania zasadnicze, które obejmowały: modyfikację procesu spawania MAG z chłodzeniem mikro-jetowym poprzez dodatkowe zastosowanie podkładki miedzianej, formującej grań spoiny i umożliwiającej odprowadzenie ciepła od strony grani; dobranie parametrów zmodyfikowanego procesu; wykonanie konstrukcji spawanej ze stali AHSS podestu ruchomego, charakteryzującej się podwyższonym o 20 % zasięgiem pracy; przeprowadzenie badań strukturalnych i wytrzymałościowych połączeń konstrukcji spawanej. Analiza wyników przeprowadzonych testów (wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości zmęczeniowej, twardości, próby zginania) oraz badań nieniszczących (wizualnych, magnetyczno-proszkowych, radiograficznych) a także badań mikrostruktury złącza spawanego pozwoliły udowodnić, że wytworzone złącza charakteryzują się pożądanymi, wysokimi własnościami

mechanicznymi, są bez wad spawalniczych, a uzyskane rezultaty są powtarzalne. Ponadto, uzyskując certyfikat WPQR Welding Procedure Qualification Record udowodniono, że opracowana innowacyjna metoda wytwarzania konstrukcji podestów ruchomych z trudno-spawalnych stali AHSS spełnia wymagania normy EN ISO 15613 „Uznania Technologii Spawania”. Wyniki badań laboratoryjnych oraz na obiekcie rzeczywistym pozwoliły potwierdzić, że opracowana i wdrożona metoda umożliwia wykonanie wytrzymałego złącza podestu ruchomego przy zachowaniu sztywności konstrukcji bez zwiększenia masy pojazdu, a otrzymana konstrukcja spełnia warunki bezpieczeństwa. Teza pracy została udowodniona. Opracowany, zweryfikowany a następnie walidowany proces spawania stanowił podstawę zgłoszenia patentowego o numerze P429818.

Summary

mgr inż. Adam Jurek

„Increasing the operating range of the mobile platform for motor vehicles while maintaining the curb weight”

PhD thesis supervisor: prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn prof. zw.

Auxiliary supervisor: dr inż. Łukasz Wszolek

The introduction of exhaust emission standards in motor vehicles forced vehicle manufacturers and constructors to find solutions that would meet the restrictions resulting from the above-mentioned standards. For this purpose, motor vehicles have been introduced, inter alia, particulate filters, exhaust gas catalysts and a number of other elements of exhaust systems, which reduce the level of exhaust emissions to the atmosphere. As a result of introducing structural elements with new functions, the curb weight of the vehicles increased significantly. As a result, manufacturers are currently looking for technological solutions that would make it possible to reduce the weight of the structure while maintaining or increasing the functionality of a given type of vehicle. In the case of mobile platforms, efforts are made to expand their operational range and load capacity, while ensuring compliance with safety requirements.

The increasing demand for high-strength materials has led to the development of martensitic AHSS (Advanced High-Strength Steel) steels with an immediate tensile strength of 1700 MPa. However, these steels are characterized by unsatisfactory plastic properties, the registered relative elongation in these steels is at the level of 4-5%. A set of features resulting from the dominant martensitic structure of these materials make AHSS steels difficult to weld. During the welding process of structures made of these steels, despite the use of preheating, cracks in the joints are observed both in the heat-affected zone and in the weld. A significant disadvantage of these steels is that after the welding process, the joint strength is at a level twice lower than that of the parent material. Therefore, the aim of the work was to develop a method of manufacturing a welded structure made of AHSS steel, characterized by appropriate high strength properties of joints. Docol 1200M steel was selected as the research material. The analysis of the literature as well as the preliminary tests performed allowed for the selection of the MAG method and micro-jet cooling as the most advantageous, innovative welding method and the appropriate selection of process

parameters, enabling the execution of joints without welding defects for this group of steels. The analysis of the obtained results made it possible to formulate the thesis that "modification of the welding process of high-strength steel from the AHSS group in the construction of mobile mobile platforms mounted on motor vehicles, through the use of micro-jet cooling and a copper pad, will allow for better mechanical properties of the joint, and by this will enable a significant extension of the operating range of the platform, without increasing the total weight of the structure and while maintaining compliance with safety requirements ”.

In order to prove the thesis, basic tests were carried out, which included: modification of the MAG welding process with micro-jet cooling through the additional use of a copper washer, forming the root of the weld and enabling heat dissipation from the side of the root; selecting the parameters of the modified process; execution of a welded structure made of AHSS steel, characterized by a 20 % higher work range; carrying out structural and strength tests of joints of the welded structure. The analysis of the results of the tests (tensile strength, fatigue strength, hardness, bending tests) and non-destructive tests (visual, magnetic-particle, radiographic) as well as the microstructure of the welded joint allowed to prove that the manufactured joints are characterized by the desired, high mechanical properties, are without welding defects, and the obtained results are repeatable. Moreover, by obtaining the WPQR Welding Procedure Qualification Record certificate, it was proved that the developed innovative method of manufacturing mobile landing structures made of non-weldable AHSS steels meets the requirements of EN ISO 15613 "Approval of Welding Technology". The results of laboratory tests and on the real object allowed to confirm that the developed and implemented method enables the production of a durable joint of the mobile landing while maintaining the rigidity of the structure without increasing the weight of the vehicle, and the resulting structure meets the safety conditions. The thesis of the work has been proven. The developed, verified and then validated welding process was the basis for the patent application no. P429818.