POLITECHNIKA ŚLĄSKA Wydział Inżynierii Materiałowej KATEDRA METALURGII I RECYKLINGU

Rozprawa doktorska

Wpływ energii liniowej łuku spawalniczego na strukturę i właściwości złączy ze stali DD11 i DD14

Influence of linear energy of the welding arc on the structure and properties of joints DD11 and DD14 steel

mgr inż. Maciej Wojtaszak

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Adamiec Opiekun pomocniczy: Liene Giertmane - Done

Katowice, 2025

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania Promotorowi, Panu Prof. dr hab. inż. Januszowi Adamcowi, za wsparcie, cenne wskazówki oraz przekazaną wiedzę, które były nieocenioną pomocą zarówno w trakcie prowadzonych badań, jak i w procesie przygotowywania niniejszej rozprawy. Szczególne wyrazy wdzięczności za cierpliwość, zrozumienie i wiarę kieruję do Żony Patrycji.

SPIS TREŚCI

1	S	PIS T	REŚCI							
2	W	VPRO	WADZENIE							
3	Р	RZEO	GLAD LITERATURY	10						
	21	Wvi	AGANIA DAWNE I TECHNICZNE STAWIANE EELGOM	10						
	$\frac{2.1}{2.2}$	Мат	TERIAL V STOSOWANE DO PRODUKCIJ FELG	16						
	2.2	TECI	INOLOGIA WYTWARZANIA FELG							
	2.4	Przi	GGLAD METOD ŁACZENIA STOSOWANYCH W PRODUKCJI FELG							
	2.	.4.1	Zerzewanie							
	2.	.4.2	Spawanie metodą MAG							
	2.	.4.3	Spawanie metodą z podwójnym pulsem	40						
	2.	.4.4	Spawanie laserowe	41						
	2.	.4.5	Spawanie metodą hybrydową	44						
	2.5	POD	SUMOWANIE	47						
	2.6	TEZA	A, CEL I ZAKRES PRACY	49						
4	B	BADA	NIA WŁASNE	51						
	4.1	MAT	ERIAŁ DO BADAŃ	51						
	4.2	MET	ODYKA BADAŃ	52						
	4.	.2.1	Badania nieniszczące złączy	52						
	4.	.2.2	Badania metalograficzne złączy	53						
	4.	.2.3	Badania własności mechanicznych	54						
	4.	.2.4	Badania własności użytkowych	56						
	4.3	Sym	ULACJA PROCESÓW SPAWANIA FELG SPECJALNEGO ZASTOSOWANIA	59						
	4.4	Pró	BY TECHNOLOGICZNE SPAWANIA MATERIAŁÓW NA FELGI SPECJALNEGO ZASTOSOWANIA	76						
	4.	.4.1	Dobór parametrów technologicznych spawania i zgrzewania	76						
	4.	.4.2	Określenie cyklu cieplnego	80						
	4.5	WYN	NIKI BADAŃ							
	4.	.5.1	Wyniki badań nieniszczących połączeń spawanych felg specjalnego zastosowania	84						
	4.	.5.2	Wyniki badań metalograficznych połączeń spawanych felg specjalnego zastosowania	84						
	4.	.5.3	Wyniki badań mechanicznych złączy spawanych felg specjalnego zastosowania							
	4.	.5.4	Badania własności użytkowych							
5	A	SPER	TTY EKONOMICZNE ZASTOSOWANIA NOWEJ TECHNOLOGII SPAWANIA F	ELG						
	S	PECJ	ALNEGO ZASTOSOWANIA	111						
6	A	NAL	ZA WYNIKÓW BADAŃ	120						
7	V	VNIO	SKI	154						
8	L	ITER	ATURA	157						
9	S	STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ168								

1 WPROWADZENIE

Zmiany gospodarcze na świecie wymagają nowoczesnych i zaawansowanych procesów produkcyjnych o jak najmniejszej energochłonności oraz o jak największej wydajności. Przedsiębiorcy coraz częściej poza własnymi inicjatywami ograniczającymi energochłonność i poprawiającymi wydajność oczekują podobnych działań od swoich poddostawców [1, 2]. Firma Trelleborg Wheel Systems (po zmianie Yokohama-TWS), która była jedną z dywizji firmy Trelleborg, zajmuje się konstruowaniem i produkcją wysoko wyspecjalizowanych rozwiązań z zakresu opon i felg specjalnych. Felgi takie są stosowane wszędzie tam, gdzie warunki pracy są bardzo wymagające i oczekiwana jest niezawodność wyrobu [3].

Podstawowymi gałęziami przemysłu, które wykorzystują felgi specjalnego zastosowania są:

- przemysł rolniczy opony oraz felgi do kombajnów, traktorów i innych pojazdów rolniczych,
- przemysł leśny opony i felgi do maszyn dla przemysłu leśnego,
- przemysł górniczy opony i felgi pracujące w kopalniach,
- przemysł hutniczy opony i felgi odporne na wysokie temperatury,
- transport materiałów i konstrukcji opony i felgi do wózków widłowych i urządzeń transportowych.

Felgi z uwagi na wykorzystane materiały do ich produkcji, można podzielić na [4-6]:

- felgi ze stopów aluminium,
- felgi ze stopów magnezu,
- felgi ze stali,

oraz ze względu na wykorzystane technologie wytwarzania:

- felgi odlewane grawitacyjnie,
- felgi odlewane niskociśnieniowo,
- felgi kute,
- felgi spawane (wytwarzane w procesie rolowania).

Najczęściej felgi specjalnego zastosowania z uwagi na rozmiary oraz właściwości użytkowe produkowane są ze stali w procesie rolowania – tak zwanego "roll-formingu". Materiałami stosowanymi do produkcji pierścieni felg są stale niskowęglowe walcowane na gorąco przeznaczona do przeróbki plastycznej na zimno. Stale tego typu charakteryzują się dobrymi własnościami plastycznymi i możliwością łączenia poprzez spawanie lub zgrzewanie [7, 8]. Najczęściej wykorzystywane są stale: w gatunku DD11 lub DD14 – wg PN-EN10111:2009 [7] lub gatunki o podobnych właściwościach projektowane na życzenie klienta.

Konstrukcja felg specjalnego zastosowania wciąż stanowi wyzwanie dla przemysłu i konstruktorów. Stawia się im wysokie wymagania pod kątem:

- właściwości wytrzymałościowych (materiału rodzimego pierścienia felgi zgodne z PN-EN10111:2009 [7] oraz maksymalnego obciążenia felgi podanego w [kg] wg ETRTO - The European Tyre and Rim Technical Organisation),
- odporności na korozję.

Jednym z głównych kryteriów decydujących o konstrukcji felgi jest możliwość jej łączenia technologiami spawalniczymi. Rozwój procesów spajania jest ukierunkowany na wzrost wydajności łączenia, co jest związane ze wzrostem efektywności procesu. Poszukuje się rozwiązań pozwalających łączyć materiały metodami wysokowydajnymi, które znacznie poprawią konkurencyjność przedsiębiorcy na rynku. Procesy łączenia można podzielić na spawanie, zgrzewanie, lutowanie oraz klejenie [9-11]. Technologie spawania są wciąż najważniejszym procesem wytwarzania konstrukcji stalowych. Udział poszczególnych technologii łączenia na rynku globalnym pokazano na rys. 1.1. Nowoczesne metody łączenia takie jak: spawanie metodą MAG (Metal Active Gas) z podwójnym pulsem, spawanie laserowe lub hybrydowe czy też wysokowydajne zgrzewanie oporowe pozwalają nie tylko uzyskać powtarzalność produkowanych wyrobów, ale również zwiększają wydajność produkcji i jakość produktu. Udział tych technologii w rynku stale wzrasta a także ich automatyzacja i mechanizacja [12].



Rys. 1.1. Udział technologii łączenia w rynku globalnym [12]

Złącze spawane jest integralną częścią konstrukcji (felgi) i charakteryzuje się niejednorodną strukturą, tj.:

- obszarem materiału rodzimego, najczęściej o strukturze ferrytyczno-perlitycznej,
- strefą wpływu ciepła, o strukturze wynikającej z cyklu cieplnego procesu spawania,
- spoiny o strukturze powstającej w wyniku szybkiej krystalizacji podczas stygnięcia metalu w jeziorku spawalniczym (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Typowe struktury spoiny w odniesieniu do układu – Fe-C z zaznaczonymi obszarami złącza [9]

Struktura złącza decyduje o właściwościach felg i jest jej krytycznym elementem. Dlatego istnieje konieczność oceny wpływu energii liniowej spawania na strukturę połączenia, a tym samym na jego właściwości użytkowe. Energia liniowa łuku spawalniczego lub energia wiązki laserowej decyduje o wielkości jeziorka spawalniczego, szybkości krystalizacji, warunkach chłodzenia (cykl cieplny spawania), przemianach strukturalnych w spoinie i strefie wpływu ciepła. To są czynniki bezpośrednio wpływające na strukturę i właściwości całego złącza.

Brak jest w literaturze pełnych informacji na temat wpływu energii liniowej łuku oraz energii wiązki laserowej na strukturę i właściwości złączy spawanych wysokowydajnymi technologiami (metodą MAG z podwójnym pulsem, spawanie laserowe, spawanie hybrydowe) oraz oceny wpływu tych technologii na jakość i wydajność procesu wytwarzania felg. Proces produkcji felg specjalnego zastosowania dzieli się na dwa główne etapy:

- produkcja pierścienia felgi,
- produkcja dysku felgi.

Elementy te są w końcowym etapie produkcji łączone ze sobą.

W przypadku felg specjalnego zastosowania procesy te można prowadzić oddzielnie z uwagi na rożne konfiguracje felg oraz możliwość bardziej elastycznego planowania cyklu produkcyjnego.

Proces produkcji pierścienia felgi obejmuje:

- cięcie mechaniczne lub cięcie plazmowe arkuszy stalowych dostarczanych w określonych formatach handlowych,
- formowanie cylindra na numerycznych prasach rolkowych,
- spawanie cylindra metodą MAG (Metal Active Gas spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych),
- formowanie końcowe pierścienia.

Bardzo ważnym etapem produkcji pierścienia, po spawaniu cylindra stalowego, jest jego kalibrowanie na prasie z wykorzystaniem narzędzi stożkowych (rys. 1.3a). Etap ten ma na celu wstępne przygotowanie cylindra do procesu rolowania. Na tym etapie występują pęknięcia materiału pierścienia w obszarze złącza spawanego, co skutkuje jego złomowaniem (rys. 1.3b). Analiza danych produkcyjnych wskazuje, że główną przyczyną pęknięć są niezgodności spawalnicze. Najczęściej są to mikropęknięcia gorące, przyklejenia lub pęcherze, na których inicjuje pęknięcie główne podczas odkształcenia.



Rys. 1.3. Formowanie i kalibrowanie pierścienia felgi: a) prasa do wstępnego formowania cylindra felgi, b) pęknięcie podczas wstępnego formowania, które zainicjowało na niezgodności spawalniczej

Natomiast proces produkcji dysku felgi obejmuje:

- cięcie plazmowe,
- piaskowanie,
- formowanie dysku na prasach nadawanie mu określonego kształtu,
- obróbka numeryczna dysku (wiercenie, frezowanie).

Kolejnym etapem produkcji felg specjalnego zastosowania jest ich łączenie w procesie montażu. Do łączenia wykorzystywany jest klasyczny proces spawania MAG. Niestety również na tym etapie pojawiają się niezgodności spawalnicze (głównie przyklejenia i niewłaściwa geometria spoiny), co wymaga naprawy a tym samym znacząco zwiększa koszty i czasochłonność produkcji.

Następnie felgi są znakowane oraz malowane proszkowo. Proces montażu jest procesem manualnym lub automatycznym w zależności od wielkości i specyfikacji zamówienia. Wyroby jednostkowe montowane są ręcznie, co jest spowodowane czasem niezbędnym na przezbrojenie automatycznej linii i przekładałoby się na ostateczny koszty wyrobu.

W procesie produkcji wszystkie etapy są kontrolowane w celu wykazania zgodności w łańcuchy przyczynowo skutkowym zamówienie klienta – wymagania prawne i techniczne – produkcja - jakość wyrobu – czasochłonność i pracochłonność procesu wytwarzania oraz koszt ostateczny wyrobu. Jednym z kierunków poprawienia jakości wyrobu oraz obniżenia czasochłonności i pracochłonności produkcji jest automatyzacja procesu produkcji felg specjalnego zastosowania. Automatyzacja procesu zwiększa także bezpieczeństwo pracy poprzez ograniczenie manipulacji półwyrobami lub wyrobem gotowym o dużej masie i gabarytach (felgi o średnicy do 54"). Dlatego automatyzacja i powtarzalność produkcji, szczególnie w obszarze procesów łączenia są istotnym czynnikiem wpływającym na wskaźniki ekonomiczne produkcji.

Każda modyfikacja procesu wytwarzania, która podnosi jakość wyrobu, polepsza warunki pracy obsługi, obniża energochłonność czy też podnosi wydajność wpływa na niższe koszty produkcji i zwiększenie sprzedaży. Przekłada to się również na wizerunek producenta, zaufanie inwestorów oraz otwartość na dalsze inwestycje.

Głównym wskaźnikiem decydującym o cenie wyrobu jest koszt transformacji (wytwarzania), który określa koszt wyprodukowania 1 tony felg nie uwzględniając kosztów materiału wsadowego.

Częścią składową kosztu transformacji są koszty zmienne, koszty pracownicze oraz koszty energii, na podstawie których oblicza się wskaźniki służące do monitorowania procesów:

- liczbę roboczogodzin,
- liczbę wyrobów niezgodnych,
- jednostkowe zużycie energii.

Wydajność w firmie Yokohama-TWS jest to liczba roboczogodzin obsługi potrzebna na wyprodukowanie 1 tony felg i jest monitorowana dla każdego procesu w sposób ciągły. Sposób monitorowania wydajności pozwala jednoznacznie określić jak dany proces jest prowadzony i gdzie pojawiają się niezgodności. Jednostkowe zużycie energii oznacza liczbę kilowatogodzin potrzebnych do wyprodukowania 1 tony felg. Analiza tych wskaźników wykazała, że istnieje konieczność modyfikacji lub wdrożenia nowych wysokowydajnych, energooszczędnych procesów łączenia zarówno pierścieni felg jak również modyfikacji procesu spawania pierścienia felgi z dyskiem [3].

Liczba wyrobów niezgodnych w firmie Yokohama-TWS jest liczona jako suma braków w odniesieniu do całkowitej masy wyprodukowanych felg oraz jako koszt braków w stosunku to kosztu transformacji i kosztów materiałów wsadowych. Wskaźniki te służą do oceny ekonomicznej procesów i są niezbędnym czynnikiem rozważań inwestycyjnych przedsiębiorcy.

W pracy podjęto próbę oceny możliwości wdrożenia nowoczesnych wysokowydajnych, energooszczędnych metod łączenia (spawanie laserowe, spawanie hybrydowe oraz spawanie metodą MAG z podwójnym pulsem) w procesie produkcji felg specjalnego zastosowania, które zapewnią złącza o prawidłowej strukturze oraz właściwościach mechanicznych i użytkowych spełniających wymagania klienta zgodne z wytycznymi ETRTO (The European Tyre and Rim Technical Organisation).

2 PRZEGLĄD LITERATURY

2.1 Wymagania prawne i techniczne stawiane felgom

Wymagania prawne stawiane felgom i oponom uregulowane są poprzez:

- standard ETRTO [13],
- standard EUWA mówiący o wymaganych badaniach kół pojazdów rolniczych [14],
- rozporządzenie nr 167/2013 Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów rolniczych i leśnych [15],
- artykuł nr 124 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – stanowiący jednolite przepisy dotyczące homologacji do samochodów osobowych i ich przyczep [16],
- wymagania PN-ISO 3911:2007 koła i obręcze do opon pneumatycznych -Terminologia, oznaczenie i cechowanie [17],
- specyficzne wymagania klienta.

Standard ETRTO (European Tire and Rim Technical Organisation) powstał w 1964 roku, a jego głównymi celami są:

- dostosowanie norm krajowych i osiągnięcie wymienności opon pneumatycznych, felg i ich zaworów w Europie w zakresie montażu i ich użytkowania,
- ustalenie wymiarów konstrukcyjnych, charakterystyk obciążenia/ciśnienia oraz wytycznych operacyjnych (maksymalna prędkość, oznaczenia),

• promowanie wymiany informacji technicznych dotyczących opon, felg i ich zaworów.

Ponieważ opony i felgi mają duży wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego organizacja ETRTO aktywnie współpracuje z krajowymi i międzynarodowymi organizacjami oraz organami ustawodawczymi w celu formułowania stosownych rekomendacji. Działalność ETRTO jest ściśle ograniczona do technicznych aspektów opon, felg i zaworów felg w zakresie ich montażu i użytkowania. Rekomendacje ETRTO są wymaganiami o znaczeniu międzynarodowym, zatwierdzonymi zgodnie z Konstytucją i Regulaminem tej Organizacji. Zastosowanie rekomendacji ETRTO nie zwalnia producenta felg z jakiejkolwiek odpowiedzialności za produkt lub zobowiązań prawnych, wymaganych w poszczególnych krajach.

Standard EUWA (Association of European Wheel Manufacturers) określa metody badań laboratoryjnych służących do oceny wymagań charakterystyk wytrzymałościowych felg stalowych z dyskiem stałym lub regulowanym, używanych w pojazdach mechanicznych. Zalecanymi metodami badań są:

- dynamiczny test zmęczeniowy w celu sprawdzenia wytrzymałości dysku,
- dynamiczny test zmęczeniowy promieniowy w celu sprawdzenia wytrzymałości felgi.

Dynamiczny test zmęczeniowy dysku, ma na celu symulację wpływu obciążeń na dysk felgi poprzez przyłożenie stałego momentu zginającego. Przyłożony moment musi być utrzymywany w granicach ±5% zalecanej wartości. Na rysunku 2.1.1 przedstawiono typowy układ maszyny do testów zmęczeniowych felgi z mimośrodowymi masami wirującymi na stałym ramieniu. Koło jest mocowane na dolnym lub górnym kołnierzu stołu.



Rys. 2.1.1. Poglądowy układ maszyny do testów zmęczeniowych [14]

Moment zginający M [Nm] jest określany jako:

$$M = (R_{stat} \cdot \mu + d) \cdot F_V \cdot S$$

gdzie:

*R*_{stat} [*m*] - jest promieniem obciążenia statycznego opony użytej razem z felgą podczas testu

 μ [-] - jest współczynnikiem tarcia opony i podłoża:

- 0.25 dla pojazdów rolniczych poruszających się z prędkością do 40km/h,
- 0.30 dla pojazdów rolniczych poruszających się z prędkością do 50km/h,
- 0.35 dla pojazdów rolniczych poruszających się z prędkością do 65 km/h,
- D [m] jest przesunięciem dysku względem środka felgi może mieć wartość dodatnią lub ujemną, zgodnie z PN-ISO 3911:2007.
- Fv [N] jest siłą znamionową określoną przez producenta felgi lub pojazdu używaną do obliczenia momentu zginającego. Może to być połowa maksymalnego pionowego obciążenia statycznego na oś w stanie obciążonym lub maksymalne obciążenie największej dopuszczonej opony, która może być zastosowana w pojeździe, przy określonej maksymalnej prędkości. W przypadku warunków dużej zmienności obciążenia HLV, jeśli jest to dopuszczalne, obciążenie można zwiększyć maksymalnie o 20% rysunek 2.1.2.

HLV (High Load Variation) to stan, w którym obciążenie kola zmienia się o współczynnik 2 lub więcej między stanem obciążonym i nieobciążonym, gdzie cykl pracy wynosi ≤50% w stanie obciążonym. W każdym innym przypadku nazywa się LLV (Low Load Variation).



Rys. 2.1.2. Charakterystyka zmienności obciążenia [14]

[-] - jest współczynnikiem przyspieszonego testu, który wynosi 1,43. Podany współczynnik dla testu zmęczeniowego na jest ważny tylko dla kół stalowych.

Dla felg i opon produkowanych dla przemysłu rolnego obciążenia są powiązane z różnymi wskaźnikami prędkości. Pod uwagę brane są trzy wskaźniki - 40km/h, 50km/h i 65km/h. W przypadku obciążeń wymaganych przy prędkościach innych niż prędkości odniesienia, obciążenie koła należy przekształcić w oparciu o tabele zmiennego obciążenia ETRTO na obciążenie odpowiadające prędkości odniesienia zgodnie z tabelą 2.1.1.

Tabela 2.1.1. Prędkości odniesienia dla dynamicznych testów zmęczeniowych dysku

Oczekiwana prędkość	<50km/h	50km/h	>50km/h
Referencyjna prędkość	40km/h	50km/h	65km/h

Jeżeli wskaźnik prędkości nie jest zdefiniowany lub nie jest wymagany przez klienta, to obciążenie dla 40 km/h powinno być wykorzystane jako wartość referencyjna testu.

Zakończony test zmęczeniowy dysku felgi określa się jako:

- pozytywny spełniający określoną liczbę cykli obciążeń wg tabeli 2.1.2 zgodnie z metodą oceny pęknięć lub po osiągnięciu 150% wymaganych cykli wg tabeli 2.1.2 zgodnie z metodą analizy wydłużonej liczby cykli,
- negatywny niezdolność felgi do przeniesienia obciążenia,

S

negatywny – niezdolność do osiągnięcia wymaganej liczbie cykli określonych w tabeli
 2.1.2 z powodu pojawienia się pęknięć.

Do oceny wyniku testu stosuje się 2 metody:

Metoda oceny pęknięć - próba jest zatrzymywana po osiągnięciu wymaganej liczby cykli. Felga jest demontowana ze stanowiska badawczego i badana jest obecność pęknięć. Kryterium akceptacji testu jest osiągnięcie wymaganej liczby cykli bez ujawnionych pęknięć lub z pęknięciami o wymiarze zgodnie z EUWA ES 3.25 (definiującego maksymalne wymiary pęknięć) [18].

Metoda oceny wydłużonej liczby cykli – polega na obciążeniu kontynuowanym po przekroczeniu wymaganej liczby cykli. Wynik pozytywny oznacza, że jeśli po przekroczeniu 150% liczby wymaganych cykli wg tabeli 2.1.2, maksymalne ugięcie wału wynosi nie więcej niż 15% w odniesieniu do wartości początkowej. Przynajmniej dwie felgi muszą przejść test pozytywnie, aby były dopuszczone do eksploatacji.

Typ felgi	Prędkość referencyjna	Współczynnik tarcia µ	Moment zginający [%]	LLV/HLV	Wymagana liczba cykli
Felga z	40km/h	0.25	100%	-	75000
regulowanym	50km/h	0.30	100%	-	75000
dyskiem	65km/h	0.35	100%	-	75000
Ealaa za stakum	40km/h	0.25	100%	-	100000
reiga ze statym	50km/h	0.30	100%	-	100000
uyskiem	65km/h	0.35	100%	-	100000
	401cm/h	0.25	100%	LLV	200000
	40KIII/II	0.23	100%	HLV	100000
Felga przyczepy	501mm/h	0.20	1000/	LLV	200000
rolniczej	JUKIII/II	0.50	100%	HLV	100000
	651.m./h	0.25	1000/	LLV	200000
	OJKIII/II	0.55	100%	HLV	100000

Tabela 2.1.2. Wymagana ilość cykli w dynamicznych testach zmęczeniowych

Dynamiczny test zmęczeniowy promieniowy ma na celu weryfikacje wytrzymałości felgi, poprzez symulację wpływu obciążenia promieniowego na obracające się koło. Zespół opony i felgi jest obciążony stałą siłą promieniową podczas obracania się ze stałą prędkością. Przyłożona siła promieniowa musi być utrzymywana w granicach $\pm 5\%$ zalecanej wartości. Wymagania dotyczące liczby cykli przedstawiono w tabeli 2.1.3. Rysunek 2.1.3 przedstawia maszynę do testów zmęczeniowych promieniowych, z możliwością wykonania testów dla dwóch kół jednocześnie.



Rys. 2.1.3. Poglądowy układ maszyny do testów zmęczeniowych promieniowych [14]

Stalowy bęben zamontowany jest na wale osadzonym w łożyskach przymocowanych do ramy. Zaleca się, aby średnica bębna była co najmniej 1,4 razy większa od średnicy zewnętrznej obciążonej opony. Optymalny stosunek wynosi 1,75 lub więcej. Szerokość bębna musi być większa niż szerokość zespołu opony i felgi. Bęben jest napędzany silnikiem, podczas gdy felga i opona są dociskane do bębna z wymaganą siłą przez siłownik hydrauliczny. W przypadku montażu koła na stanowisku badawczym, położenie i orientacja dysku felgi nie jest brana pod uwagę. Ciśnienie powietrza w oponie, podczas testu na zimno należy zwiększyć o około 30% w porównaniu z zalecanym ciśnieniem w oponach dla znamionowego obciążenia koła F_v. Należy zastosować odpowiedni system ciągłej kontroli ciśnienia w oponach, aby zagwarantować, że ciśnienie nie spadnie (ryzyko pęknięcia felgi lub uszkodzenia opony) lub zbytnio nie wzrośnie (ryzyko wybuchu).

Obciążenie promieniowe Fr [N] wyznaczane jest w następujący sposób:

$$F_r = F_V \cdot K$$

- F_{v} [N] jest siłą znamionową określoną przez producenta felgi lub pojazdu używaną do obliczenia siły promieniowej. Może to być połowa maksymalnego pionowego obciążenia statycznego na oś w stanie obciążonym lub maksymalne obciążenie największej dopuszczonej opony, która może być zastosowana w pojeździe, przy określonej maksymalnej prędkości. W przypadku warunków dużej zmienności obciążenia, jeśli jest to dopuszczalne, obciążenie można zwiększyć maksymalnie o 20%.
- K [-] jest współczynnikiem przyspieszonego testu, który wynosi 1,43. Podany współczynnik dla testu zmęczeniowego na jest ważny tylko dla kół stalowych.

Podobnie jak w dynamicznym teście zmęczeniowym dysku, w badaniach pod uwagę brane są trzy wskaźniki prędkości, jak również dla obciążeń przy prędkościach innych niż prędkości odniesienia, obciążenie koła jest przekształcane w oparciu o tabelę 2.1.1.

Zakończony dynamiczny test zmęczeniowy, promieniowy określa się jako:

- pozytywny spełniający określoną liczbę cykli wg tabeli 2.1.3 lub po osiągnięciu 150% wymaganej liczby cykli wg tabeli 2.1.3 oraz metody ewaluacyjnej,
- negatywny niezdolność felgi do przeniesienia obciążenia,
- negatywny niezdolność felgi do utrzymania ciśnienia w oponie.

Do oceny wyniku testu stosuje się 2 metody podobnie jak dla dynamicznego testu zmęczeniowego, promieniowego, z uwzględnieniem innej liczby wymaganych cykli podanych w tabeli 2.1.3. Również w tym przypadku przynajmniej dwie felgi muszą przejść test pozytywnie, aby były dopuszczone do eksploatacji.

True falsi	Prędkość	Moment		Wymagana
I yp leigi	referencyjna	zginający [%]	LLV/ILV	liczba cykli
	40km/h	100%	-	400000
Felga z regulowanym dyskiem	50km/h	100%	-	600000
	65km/h	100%	-	800000
	40km/h	100%	-	400000
Felga ze stałym dyskiem	50km/h	100%	-	800000
	65km/h	100%	-	1000000
	401cm/h	100%	LLV	400000
	40KIII/11	100%	HLV	200000
Folgo przyczopy rolniczci	501cm/h	100%	LLV	600000
Feiga przyczepy romiczej	JOKIII/II	100%	HLV	300000
	651rm/h	1000/	LLV	1000000
	OJKIII/II	100%	HLV	500000

Tabela 2.1.3. Wymagana ilość cykli w dynamicznych testach zmęczeniowych promieniowych

Poza wytycznymi ETRTO oraz standardem EUWA stosowane są bezpośrednio przez producentów felg i opon lub pośrednio poprzez producentów OEM (original equipment manufacturer) artykuły i dyrektywy takie jak:

- rozporządzenie nr 167/2013 Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów rolniczych i leśnych [15] – regulującego sposoby homologacji pojazdów rolniczych i leśnych oraz ich komponentów, w skład których wchodzą felgi i opony,
- artykuł nr 124 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – stanowiący jednolite przepisy dotyczące homologacji do samochodów osobowych i ich przyczep [16] – regulującego sposoby homologacji

pojazdów osobowych i ich przyczep oraz komponentów, w skład których wchodzą felgi i opony,

- wymagania PN-ISO 3911:2007 felgi do opon pneumatycznych Terminologia, oznaczenie i cechowanie [17] – wymagania definiujące sposób znakowania kół oraz obręczy do opon pneumatycznych,
- specyficzne wymagania klienta nie uwzględnione w powyższych standardach, jednak wymagane przez klienta z uwagi na specyfikę pracy felgi lub opony.

Powyższe wymagania, ich ujednolicenie, standaryzacja i rygorystyczne przestrzeganie, pozwalają na uzyskanie wymienności opon i felg różnych producentów dla określonych maszyn i urządzeń specjalnych a przede wszystkim na zapewnienie komfortu pracy oraz bezpieczeństwa użytkowania. Felgi wyprodukowane z uwzględnieniem rekomendacji ETRTO oraz testowane wg standardu EUWA, dla których uzyskano homologację danego wyrobu – zapewniają minimalne parametry techniczne oraz bezpieczeństwa opisane w tych rekomendacjach. Jednakowy system znakowania pozwala na odpowiedni wybór danej felgi lub opony zależnie od oczekiwanych potrzeb oraz uniknięcie pomyłek co do rozmiaru i zastosowania. Dla producentów OEM, standaryzacja jest istotnym aspektem w przypadku doboru opon lub felg dostarczanych w daną maszyną, pozwalając na zastosowanie odpowiedniego komponentu do potrzeb klienta.

2.2 Materiały stosowane do produkcji felg

Felgi można podzielić z uwagi na ich zastosowanie:

- felgi komercyjne dla przemysłu samochodowego,
- felgi specjalnego zastosowania wykorzystywane w aplikacjach, gdzie oczekiwane są specyficzne właściwości użytkowe określone przez klienta np. rozmiar, odporność na korozję lub wytrzymałość uzyskiwana przez zastosowanie odpowiednich wzmocnień,

oraz z uwagi na wykorzystane materiały do ich produkcji:

- felgi stalowe,
- felgi ze stopów aluminium,
- felgi z innych stopów i materiałów specjalnych (ze stopów magnezu, tytanu oraz włókien węglowych).

W przemyśle motoryzacyjnym stosuje się wszystkie te rodzaje materiałów. Wszędzie tam, gdzie redukcja masy jest istotnym czynnikiem, obserwuje się tendencje zwiększania

wykorzystania stopów aluminium, magnezu lub innych stopów specjalnych. Jednak w felgach specjalnego zastosowania ze względu na gabaryty najczęściej wykorzystuje się stal. *Stale* stosowane do produkcji felg specjalnego zastosowania (rys. 2.2.1), można podzielić na:

- stale używane do produkcji dysku felgi,
- stale używane do produkcji pierścienia felgi.



Rys. 2.2.1. Felga stalowa specjalnego zastosowania [19]

Stale wykorzystywane do produkcji dysku to stale o wysokiej granicy plastyczności, walcowane na gorąco, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno takie jak S315MC, S355MC, itp. Stale te są stosowane w budowie maszyn i urządzeń pracujących w zakresie temperatury od ok. -60 do 300°C, w warunkach korozji atmosferycznej. Ich właściwości zależą od zawartości węgla i pierwiastków stopowych. W celu uzyskania najkorzystniejszych właściwości stale te należy stosować w stanie obrobionym cieplnie (zwykle po ulepszaniu cieplnym) lub po innych procesach technologicznych zapewniających umocnienie materiału. Stale konstrukcyjne stopowe przeznaczone do przeróbki plastycznej na zimno wytwarza się w postaci produktów płaskich walcowanych na gorąco o grubości od 1,5 do 20mm. Stale te sklasyfikowano w normach PN-EN 10149-1:2000, PN-EN 10149-2:2000 i PN-EN 10149- 3:2000. Są one dostarczane jako uspokojone, a wielkość ziarna ferrytu nie powinna być większa niż 6 według normy PN-84/H-04507/01. W celu zwiększenia odkształcalności na zimno, wytwórca stali może ograniczyć stężenie S lub zmodyfikować kształt siarczków przez dodatek Ce lub Ca. Stale wyżarzone normalizująco, należące do stali stopowych jakościowych są ujęte w PN-EN 10149-3:2000.

Stale dostarczane są w stanie po walcowaniu, według PN-EN 10149-2:2000, minimalna granica plastyczności wynosi 355 MPa. W procesie walcowania stale te uzyskują wysokie własności

mechaniczne poprzez rozdrobnienie struktury powstającej w warunkach regulowanego odkształcenia plastycznego stali na gorąco i chłodzenia oraz utwardzaniu wydzieleniowemu przez dyspersyjne cząstki azotków, węglikoazotków lub węglików pierwiastków wprowadzonych do stali. Stale te mogą być po końcowym kształtowaniu na zimno i ewentualnym spawaniu wyżarzane odprężająco [20]. Skład chemiczny i właściwości stali przeznaczonych do produkcji dysku felgi przedstawiono w tabeli 2.2.3 [21].

Tabela 2.2.3. Skład chemiczny i właściwości stali stopowych walcowanych na gorąco, przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno stosowanych do produkcji dysku felgi

Skład Chemiczny [% masowy]											
Materiał	Norma	C	Mn	Si	Р	S	Ti	Nb	V	Mo	В
S315MC	PN-EN 10149:2000	≤ 0.12	≤ 1.3	≤ 0.5	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.15	≤ 0.09	≤ 0.2	-	-
S355MC	PN-EN 10149:2000	≤ 0.12	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 0.025	≤ 0.02	≤ 0.15	≤ 0.09	≤ 0.2	-	-
Właściwości mechaniczne											
Materiał Norma				Re [MPa	ı]	R	m [MPa]		A	\ [%]	
S315MC PN 10149:2000			315 390 - 510			24					
S355MC PN 10149:2000			355		4	30 - 550			23		

Materiały stosowane do produkcji cylindra felgi to stale niskowęglowe walcowane na gorąco, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno, dostarczane są w postaci blach oraz produktów płaskich o grubości od 1,5 do 8 mm. Sklasyfikowano je w normie PN-EN 10111:2009. Zaliczają się do stali jakościowych, a ich oznaczenie składa się z liter DD i dwóch cyfr odróżniających dany gatunek, w kolejności zwiększającej się podatności na odkształcenie plastyczne na zimno. Mają one określone właściwości mechaniczne oraz maksymalne dopuszczalne stężenie C, Mn, P i S, gdzie:

- zawartość węgla jest niższa niż 0.08% dla stali DD14 i 0.12% dla stali DD11,
- zawartość manganu jest niższa niż 0.35% dla stali DD14 i 0.6% dla stali DD11,
- zawartość fosforu jest niższa niż 0.025% dla stali DD14 i 0.045% dla stali DD11,
- zawartość siarki jest niższa niż 0.025% dla stali DD14 i 0.045% dla stali DD11.

Materiały w postaci produktów płaskich walcowanych na zimno, o szerokości powyżej 600 mm i grubości od 0,35 do 3 mm, opisano w normie PN-EN 10130+A1:1999, natomiast taśmy wąskie o szerokości poniżej 600 mm i grubości do 10 mm – podaje norma PN-EN 10139:2001.

Stale tego typu charakteryzują się dobrą formowalnością. Można je stosować do głębokiego tłoczenia i gięcia. Własności mechaniczne poszczególnych gatunków takich stali charakteryzują się niską granicą plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie, a także gwarantowanym minimalnym wydłużeniem przy zerwaniu. Właściwości tej stali sprawiają, że jest to idealny materiał do wytwarzania produktów, takich jak tłoczone i ciągnione części, rury, felgi samochodowe, elementy rolnicze i systemy regałów. Wykończenie powierzchni powinno być wolne od zawalcowań, pęcherzy, pęknięć i zarysowań, które mogą mieć wpływ na ich jakość. Dozwolone są pory, pojedyncze małe rysy, przebarwienia i załamania spowodowane odwijaniem. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne dla stali DD11 oraz DD14 przedstawiono w tabeli 2.2.4.

Tabela 2.2.4. Skład chemiczny i właściwości stali niskowęglowych walcowanych na gorąco, przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno [20]

Skład Chemiczny [% masowy]										
Matarial	Norma	C	C:	Ma	р	C	A 1			
Materiał	Atest	C	51	IVIN	P	2	AI			
DD11	PN-EN 10111	≤ 0.120	-	≤ 0.600	≤ 0.045	≤ 0.045	-			
DD14	PN-EN 10111	≤ 0.080	-	≤ 0.350	≤ 0.025	≤ 0.025	-			
		Właściwo	ści mecha	niczne						
Matarial	Norma	Do D	(Dal	Dm [MDal	Α. ΓΟ/	A [0/]			
Materia	Atest	Ke [MPa]		KIII	viraj	A [%]				
DD11	PN-EN 10111	170 - 340		≤4	40	≥28				
DD14	PN-EN 10111	170 -	290	≤ 3	80	≥ 36				

Stopy aluminium stosowane do produkcji felg aluminiowych można podzielić na stopy odlewnicze i do przeróbki plastycznej [22-24]. Przykładową felgę ze stopów aluminium pokazano na rys. 2.2.2. Odlewa się je grawitacyjnie, niskociśnieniowo zależnie od oczekiwanych właściwości użytkowych oraz technologii do dalszej ich produkcji. Najczęściej stosowanymi stopami odlewniczymi są stopy aluminium z krzemem o zawartości krzemu od 7 do 12% np.:

- AlSi7Mg silumin podeutektyczny,
- AlSi9Mg silumin podeutektyczny,
- AlSi11Mg silumin okołoeutektyczny.



Rys. 2.2.2. Felga samochodowa ze stopów aluminium [25]

Stopy te charakteryzują się dobrymi właściwościami odlewniczymi, niskim skurczem odlewniczym oraz nie wykazują skłonności do pękania na gorąco. Są one opisane w normie PN-EN 1706:2001. Właściwości mechaniczne stopów eutektycznych obniżają wydzielenia kryształów roztworu ß, co występuje w przypadku wolnego chłodzenia z temperatury odlewania. Ich strukturę można polepszyć przez szybkie chłodzenie po odlaniu lub modyfikowanie sodem lub solami sodu, strontu i antymonu [20, 26-27]. Dodatek sodu obniża temperaturę przemiany eutektycznej i powoduje przesunięcie punktu eutektyki do większego stężenia, około 13% Si. Strukturę stopów modyfikowanych stanowi drobnoziarnista eutektyka $\alpha + \beta$ z wydzieleniami fazy α [20]. Siluminy okołoeutektyczne i nadeutektyczne wykazują również dużą żarowytrzymałość, dlatego często stosuje się je do produkcji tłoków silników spalinowych. Ze stopów podeutektycznych wytwarza się elementy silnie obciążone dla przemysłu okrętowego i elektrycznego, pracujące w podwyższonej temperaturze i w wodzie morskiej. Wadą siluminów pod- i okołoeutektycznych jest gruboziarnista eutektyka. Chcąc polepszyć właściwości technologiczne i użytkowe konieczne jest dodanie pierwiastków stopowych. Poprawa właściwości mechanicznych jest wynikiem umocnienia roztworu dodatkiem np. Cu i Cr oraz procesami wydzieleniowymi w trakcie przesycania i starzenia (Mg, Mo, i Cu). Dodatki stopowe mają istotny wpływ na proces krystalizacji eutektyki, co skutkuje zmianami w zakresie temperatury starzenia oraz składu fazowego [28]. W przypadku odlewniczych stopów aluminium, wpływ tych dodatków można opisać w następujący sposób:

- Mn (zależnie od stopu \leq 0.55%) likwiduje szkodliwy wpływ zanieczyszczeń żelazem,
- Cu (zależnie od stopu ≤ 0.35%) zwiększa twardość, polepsza skrawalność, zmniejsza odporność korozyjną,

- Mg (zależnie od stopu ≤ 0.43%) umożliwia obróbkę cieplną przesycanie i starzenie
 przez co powoduje zwiększenie twardości,
- Ni (zależnie od stopu ≤ 0.15%) przeciwdziała pogorszeniu właściwości wytrzymałościowych w podwyższonej temperaturze.

Stopy aluminium do przeróbki plastycznej najczęściej to stopy wieloskładnikowe zawierające magnez, mangan, miedź, krzem i cynk oraz inne dodatki [24]. Najczęściej używanym stopem aluminium do produkcji felg jest stop aluminium z magnezem i miedzią AlMg1SiCu, jednak z uwagi na wysokie koszty produkcji tych felg są wykorzystywane w autach klasy premium oraz autach sportowych. Właściwości stopów aluminium używanych do produkcji felg samochodowych, przedstawiono w tabeli 2.2.5.

Tabela 2.2.5. Skład chemiczny i właściwości stopów aluminium wykorzystywanych do produkcji felg samochodowych

Skład Chemiczny [% masowy]											
Materiał	Materiał Norma Si Cu Mg		Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Ni	Pb	Cr	
AlSi7Mg	PN-EN 1706:2001	6.6 -7.5	≤ 0.20	0.20 - 0.65	$5 \leq 0.35$	≤ 0.55	≤ 0.25	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.15	-
AlSi9Mg	PN-EN 1706:2001	9 - 10	≤ 0.05	0.2-0.45	≤ 0.10	≤ 0.19	≤ 0.15	≤ 0.07	-	-	-
AlSi11Mg	PN-EN 1706:2001	10-11.8	≤ 0.05	≤ 0.45	≤ 0.1	≤ 0.19	≤ 0.15	≤ 0.07	-	-	-
AlMg1SiCu	SiCu PN-EN 573-3: 2019-12 0.4 - 0.8 0.15 - 0.4 0.8 - 1.		0.8 - 1.2	≤ 0.15	≤ 0.7	≤ 0.15	≤ 0.25	-	-	0.04 - 0.35	
			Właściw	wości mecł	aniczne						
Materiał	Norma	R	Re [MPa]		Rm	[MPa]			I	A [%]	
AlSi7Mg	PN-EN 1706:200		180		220			75			
AlSi9Mg	PN-EN 1706:200	190			230		75				
AlSi11Mg	PN-EN 1706:200	70			150			45			
AlMg1SiCu	PN-EN 573-3: 2019-12	55			125			25			

Materiały specjalne stosowane do produkcji felg (rys. 2.2.3) takie jak stopy magnezu, tytanu czy też kompozyty z włókien węglowych stosowane są coraz częściej z uwagi na ich właściwości wytrzymałościowe, niską masę oraz aspekty wizualne [29-31].



Rys. 2.2.3. Felgi samochodowe ze stopów specjalnych a) ze stopu magnezu, b) ze stopu tytanu wykonana drukiem 3D, c) z włókien węglowych [29-31]

Przekłada się to z jednej strony na mniejsze zużycie paliwa, a z drugiej na większe koszty felgi. Przykładowe odlewnicze stopy magnezu wykorzystywane w produkcji felg to AZ91, AM50, AM60 natomiast pośród stopów do przeróbki plastycznej można wyróżnić stopy AZ80, AZ31 oraz ZK60. Zarówno odlewnicze jak i stopy magnezu do przeróbki plastycznej poddawane są obróbce cieplnej [32]. W celu polepszenia właściwości mechanicznych stopów magnezu poddaje się je umacnianiu wydzieleniowemu, wyżarzaniu rekrystalizującemu lub wyżarzaniu odprężającemu. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne przykładowych stopów specjalnych wg norm ASTM – B93 przedstawiono w tabeli 2.2.6 [33].

Tabela 2.2.6. Skład chemiczny i właściwości wybranych stopów specjalnychwykorzystywanych do produkcji felg samochodowych

Skład Chemiczny [% masowy]											
Stop Mg Al			Mn	Si max. Zn max.		Fe max.	Cu max.	Ni max.			
AZ91	Z91 Reszta 8.5 – 9.5		0.17 - 0.40	0.05	0.45 - 0.9	0.004	0.025	0.001			
AM50	60 Reszta 4.5 – 5.3		0.28 - 0.50	0.05	0.20	0.004	0.008	0.001			
AM60	M60 Reszta 5.6 – 6.4		0.26 - 0.50	0.05	0.20	0.004	0.008	0.001			
Właściwości mechaniczne											
	Re [MPa]	I	Rm [MPa]		$A_5[\%]$					
AZ91	95-	-100		125 -170		2					
AM50	1	230			15						
AM60	1	30		240			13				

Z uwagi na oczekiwane właściwości felg specjalnego zastosowania oraz specyfikę ich użytkowania np. w przemyśle rolniczym, leśnym czy też górniczym, materiałem wykorzystywanym do produkcji takich felg jest stal. Inne materiały specjalne takie jak stopy aluminium, stopy magnezu, stopy tytanu czy też włókna węglowe stosowane są w przemyśle samochodowym i wynika to głównie z kosztów produkcji, środowiska pracy oraz wrażliwości na uszkodzenia mechaniczne, które w tym przypadku występują znacznie rzadziej.

2.3 Technologia wytwarzania felg

Do procesu projektowania i produkcji felg specjalnych dane wejściowe stanowią przepisy techniczne oraz wymagania (specyfikacje) klienta. W przepadku felg przeznaczonych dla dostawców oryginalnego oprzyrządowania (OEM), wymagania bardzo często pokrywają się ze standardami ETRTO. Niezależnie czy wymagania zostały określone w jakiejkolwiek normie lub standardzie, jeśli felga nie była wcześniej produkowana lub dla produkowanej felgi zostały wprowadzone zmiany projektowe, konieczne jest przeprowadzenie symulacji pola naprężeń i odkształceń podczas eksploatacji felgi, a następnie symulacji warunków jej produkcji.

Felga jest elementem tocznym na którym zamontowana jest opona. Na felgę oddziałują siły wynikające z ciśnienia powietrza w oponie rys. 2.3.1 [34] (gdzie P oznacza ciśnienie powietrza, a F_s siłę boczną oddziaływania stopki opony na felgę), jak i siły reakcji podłoża na oponę rys. 2.3.2 (gdzie θ oznacza kąt obciążenia) [34].



Rys. 2.3.1. Oddziaływanie ciśnienia powietrza w oponie na felgę [34]



Rys. 2.3.2. Rozkład sił oddziaływania podłoża na felgę [34]

W symulacji warunków obciążenia przed przyłożeniem sił wywieranych przez oponę na felgę, należy wprowadzić kilka zmian w modelu, aby uprościć analizę. Linia podziału musi zostać

dodana do stopki, aby można było zastosować pionową reakcję podłoża na kąt obciążenia. Właściwe jest również przecięcie koła na pół, w celu wykorzystania symetrii do uproszczenia modelu. Jako kolejny krok zakłada się sposób oddziaływania ciśnienia na felgę (rys. 2.3.3) [34].



Rys. 2.3.3. Ciśnienie oddziaływujące na felgę [34]

Oblicza się oddziaływanie siły bocznej F_s oraz wyznacza promień wewnętrznej powierzchni bieżnika opony, a także promień osadzenia stopki, otrzymując całkowitą powierzchnię oddziaływania siły. Ze względu na symetrię modelu, siła ta jest pomniejszana o połowę, a następnie oddzielnie przyłożona do każdej ściany bocznej, ustawiając kierunek normalny do płaszczyzny odniesienia. Ostatecznie dodaje się siłę reakcji podłoża. Przed utworzeniem obciążenia łożyska należy utworzyć układ współrzędnych z osią z na osi obrotu koła i osią x przechodzącą przez środek rozkładu. Na tak przygotowany model nakłada się siatkę i poddaje analizie. Symulacja metodą elementów skończonych pokazuje, że maksymalne naprężenie von Misesa występuje na wewnętrznym promieniu kołnierza obręczy (rys. 2.3.4).



Rys. 2.3.4. Przykładowe wyniki analizy pola naprężeń dla felgi ze stopów aluminium [34]

Naprężenie to jest prawie w całości powodowane przez boczną siłę działającą na kołnierz felgi, gdy ścianki boczne próbują rozchodzić się na zewnątrz z powodu ciśnienia.

Pokazuje to kluczowe znaczenie właściwego uwzględnienia warunków brzegowych podczas konfigurowania symulacji. Sposób, w jaki siły te są przenoszone przez oponę na felgę, ma znaczący wpływ na naprężenia w kole. Chociaż możliwe jest bezpośrednie modelowanie opony, jest to generalnie niepotrzebne i znacznie zwiększa złożoność modelu. Istnieją jednak ustalone analityczne i empiryczne sposoby uproszczenia opony do kilku warunków brzegowych, które można zastosować bezpośrednio do felgi [34]. Teoria ta została wyjaśniona przez Stearnsa, który zakłada, iż koła można traktować jako elementy związane z bezpieczeństwem. Na podstawie przeprowadzonych analiz wpływu nacisku i obciążenia promieniowego obracającego się koła stwierdzono:

- ciśnienie w oponie ma bezpośredni wpływ na stan naprężenia felgi pod wpływem maksymalnego obciążenia opony,
- pod obciążeniem promieniowym felga ma tendencję do owalizacji wokół punktu styku, z maksymalnym przemieszczeniem występującym w miejscu osadzenia stopki,
- wewnętrzna stopka ugina się najbardziej i jest podatna na utratę ciśnienia powietrza w wyniku oderwania się opony od felgi,
- naprężenia cylindra felgi są znacznie większe niż dysku,
- krytycznym obszarem projektowym felgi jest wewnętrzne osadzenie stopki.

W związku z tym problemem istotne jest odporność na zmęczenie i stan rozkładu naprężeń w feldze w różnych warunkach obciążenia [35].

Formowanie felg stalowych odbywa się w procesie roll-formingu (formowania tocznego), gdzie głównymi elementami formującym są narzędzia pierścieniowe obejmujące trzpień formujący, walec roboczy oraz rolki prowadzące (rys. 2.3.5) [36].



Rys. 2.3.5. Schemat poglądowy procesu formowania 1) walec roboczy, 2) trzpień formujący,
3) rolki prowadzące, 4) cylinder dociskowy rolek prowadzących, 5) formowany cylinder [36]

Sterowanie tymi narzędziami i optymalizacja parametrów obróbki jest utrudniona ze względu na charakter niestacjonarnego trójwymiarowego odkształcania formowanego materiału. Hiroshi Utsunomiya opisał problem różnic grubości materiału powstającego przy formowaniu felg na zimno za pomocą metody elementów skończonych (rys. 2.3.6) [36-37].



Rys. 2.3.6. Przykładowe wyniki analizy pola naprężeń podczas formowania felgi stalowej [36]

Podczas analizy Utsunomiya stwierdził, iż [37]:

- odkształcenia powstające w pierwszym kroku formującym przy pierwszym obrocie oraz w kolejnych są różne. Dzieje się tak z uwagi na zmiany grubości materiału w pierwszym obrocie na obwodzie cylindra. Na początku walcowania prędkość cylindra jest równa prędkości narzędzi i zmniejsza się podczas pierwszego obrotu wykazując prawie stałą wartość od drugiego obrotu. Podczas pierwszego obrotu odkształcenie równoważne jest większe na obu powierzchniach i rozkłada się nieregularnie na obwodzie,
- przy drugim kroku formowania elementy powierzchni wewnętrznej są rozciągane, podczas gdy elementy powierzchni wewnętrznych są ściskane. Wartości naprężeń zmieniają się okresowo w obrotach,
- zmienność naprężeń poza zgniotem na rolkach jest tak duża, że w analizie należy uwzględnić wiązanie sprężyste. Charakterystyki odkształcenia można oszacować na podstawie analizy kilku obrotów.

Metoda elementów skończonych wykorzystywana do tej analizy w znaczny sposób skraca czas projektowania oraz pozwala eliminować potencjalne problemy wynikające w samego procesu produkcyjnego felg.

Procesy produkcyjne felg specjalnych można podzielić na następujące po sobie etapy:

- produkcja cylindra felgi:
 - o cięcie materiału,
 - o formowanie cylindra na prasach rolkowych,
 - o spawanie cylindra,
 - o szlifowanie lica spoiny,
 - o formowanie wstępne cylindra na prasie stożkowej,
 - o formowanie kształtu felgi proces roll-formingu,
 - o kalibrowanie uformowanego cylindra felgi,
- produkcja dysku felgi:
 - o cięcie materiału,
 - o piaskowanie,
 - o formowanie dysku,
 - obróbka numeryczna uformowanego dysku (wycinanie otworów, fazowanie krawędzi),
- montaż dysku i cylindra,
- montaż wzmocnienia krawędzi felgi tylko dla felg wzmacnianych,
- spawanie dysku i cylindra,
- wycinanie otworu pod zawór felgi,
- spawanie ochrony zaworu,
- malowanie proszkowe,
- kontrola końcowa,
- pakowanie.

W przypadku felg specjalnych procesy produkcji pierścienia jak również dysku felgi można prowadzić oddzielnie z uwagi na rożne konfiguracje wyrobów gotowych, dla których używane są jednakowe półwyroby. Jest to powiązane ze standaryzacją wg ETRTO oraz możliwością elastycznego planowania cyklu produkcyjnego.

Proces produkcji pierścienia felgi zależy od technologii przygotowania materiału. Materiał może być dostarczany w arkuszach o znormalizowanych wymiarach handlowych, co wymaga cięcia lub pozwala na bezpośrednie użycie ich w procesie produkcyjnym. Korekcję wymiarową arkuszy wykonuje się na gilotynie mechanicznej (rys. 2.3.7 a) lub numerycznie sterowanej maszynie do cięcia plazmowego (rys. 2.3.7 b).



Rys. 2.3.7. Maszyny do przygotowania arkuszy zainstalowane w Yokohama-TWS Łotwa:
a) gilotyna do wstępnego cięcia Darley GS300, b) sterowana numerycznie maszyna do cięcia plazmowego ESAB SXE HD3500

W przypadku gdy materiał jest dostarczany w kręgach, konieczne jest stanowisko do rozwijania i prostowania arkusza stalowego oraz cięcia na wymiar (rys. 2.3.8)



Rys. 2.3.8. Rozwijarka kręgów stalowych

Materiał dostarczany w kręgach umożliwia większą elastyczność produkcyjną, minimalizację odpadów oraz redukcję stanów magazynowych. Drugim etapem produkcyjnym jest formowanie cylindra z arkusza na prasach rolkowych sterowanych numerycznie (rys. 2.3.9).



Rys. 2.3.9. Prasa rolkowa sterowana numerycznie Roundo Pass-205

Proces ten ma wpływa na kolejny etap produkcyjny, którym jest spawanie MAG – niewłaściwe przygotowanie materiału powoduje powstawanie niezgodności spawalniczych – najczęściej jest to pęknięcie cylindra. Spawanie cylindra kończy się automatycznym szlifowaniem lica spoiny i następnie jest on przekazany na stanowisko wstępnego formowania na prasie stożkowej. Krawędzie cylindra zostają wstępnie uformowane, pozwalając na łatwiejsze i bardziej precyzyjne prowadzenie procesu roll-formingu czyli formowania finalnego kształtu felgi (rys. 2.3.10).



Rys. 2.3.10. Prasa stożkowa Jochnick & Norrman 1471 do wstępnego formowania cylindra felgi

Wstępnie uformowany cylinder przechodzi kolejne etapy roll-formingu – ich liczba zależy od konstrukcji maszyny i narzędzi formujących i waha się zazwyczaj od dwóch do czterech kroków formowania. W procesie roll- formingu (rys. 2.3.11 a), felga uzyskuje finalny kształt, który nie jest jednak jeszcze zgodny wymiarowo – jest ona mniejsza od finalnego wyrobu. Po zakończeniu procesu, felga jest poddawana kalibracji, gdzie narzędzie formujące nadaje feldze końcowe wymiary zgodne ze specyfikacją klienta (rys. 2.3.11 b).



Rys. 2.3.11. a) maszyna do roll-formingu Savsjo Falgar AB zainstalowana w zakładzie Yokohama-TWS Łotwa, b) kalibrator

Proces produkcji dysku felgi rozpoczyna się od wycięcia stalowego dysku z arkusza blachy na numerycznej maszynie do cięcia plazmowego. Następnie dysk jest piaskowany i przekazywany do formowania na prasie hydraulicznej (rys. 2.3.12).



Rys. 2.3.12. Prasa hydrauliczna do formowania dysku APT ZD-22000-25/20

W uformowanym dysku wycina się otwory zgodnie z wytycznymi technologicznymi. Na tym etapie dostępne są dwa oddzielne półwyroby, które są łączone ze sobą w różnych konfiguracjach, zmieniając głębokość osadzenia dysku, osłony zaworów, położenie zaworu, typ dysku oraz typ samego pierścienia. Półwyroby są spawane ze sobą metodą MAG. Jeśli felga przeznaczona jest do pracy w szczególnie wymagającym środowisku (np. w przemyśle leśnym), dodatkowo montuje się wzmocnienie krawędzi, co chroni felgę przed uszkodzeniem. Gdy wszystkie elementy są zmontowane i pospawane, felgę przekazuje się do malowania proszkowego i kontroli końcowej. Jeżeli nie ujawniono żadnych wad, felga zostaje przekazana do magazynu wyrobów gotowych i jest wysłana do klienta lub do centrum dystrybucyjnego, w którym dodatkowo montuje się opony a wyrób jest wysłany w postaci pełnego rozwiązania – opony i felgi jednocześnie.

2.4 Przegląd metod łączenia stosowanych w produkcji felg

Spawalnictwo to dział techniki obejmujący procesy łączenia trwałego metali za pomocą złączy spawanych, zgrzewanych, lutowanych lub klejonych spełniających oczekiwane wymagania jakościowe [11].

Spawalność, zgodnie z definicją podaną przez profesora Józefa Pilarczyka [9], jest miarą zdolności materiału do tworzenia połączeń za pomocą spawania, które spełniałyby stawiane im z góry wymagania. Spawalność rozpatruje się z punktu widzenia metalurgicznego, technologicznego oraz konstrukcyjnego. Definicja spawalności podana przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa mówi że: "Materiał metaliczny jest spawalny w danym stopniu, przy użyciu danej metody spawania i w danym przypadku zastosowania, gdy pozwala, przy uwzględnieniu odpowiednich dla danego przypadku środków ostrożności, na wykonanie złącza pomiędzy elementami łączonymi z zachowaniem ciągłości metalicznej oraz utworzenie złącza spawanego, które poprzez swe właściwości lokalne i konsekwencje ogólne zadość uczyni wymogom żądanym i przyjętym za warunki odbioru" [38]. Spawalność jest związana zatem nie tylko z kontrolą jakości, gdzie dla danego rodzaju materiału, w odniesieniu do procesów spawania, należy rozpatrywać ją z uwagi na gatunek i własności materiału, ale także w powiązaniu z rodzajem konstrukcji, warunkami eksploatacji i samą technologią spawania [11, 39]. Analizując spawalność danego materiału, wymagane jest uwzględnienie trzech czynników, wpływających na jakość złączy spawanych, tj. czynników:

- technologicznych,
- metalurgicznych,
- konstrukcyjnych.

Spawalność technologiczna – wiąże się z metodą, techniką oraz parametrami spawania konstrukcji.

Spawalność metalurgiczna – wiąże się z własnościami fizycznymi spawanego materiału i materiałów dodatkowych oraz zachodzących przemian strukturalnych, które są wynikiem procesu spawania. Skład chemiczny materiału dodatkowego, rodzimego i jego struktura, w danych warunkach technologicznych spawania, może wpływać na skłonność do tworzenia się pęknięć w złączach [38].

Spawalność konstrukcyjna – wiąże się z czynnikami wpływającymi na naprężenia powstającymi podczas operacji spawania oraz eksploatacji.

Spawalność można ocenić jako:

- dobrą kiedy proces spawania nie wymaga dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej złączy oraz stosowania specjalnego oprzyrządowania,
- trudną lub ograniczoną kiedy konieczne są dodatkowe zabiegi cieplne złączy, w celu uniknięcia pęknięć, a także zastosowanie specjalnego oprzyrządowania zapobiegającego odkształceniu konstrukcji,
- bardzo trudną kiedy wymagane są bardzo złożone zabiegi cieplne, specjalne metody i techniki spawania oraz specjalne oprzyrządowanie [9, 11].

Uwzględniając wszystkie aspekty technologiczne można przyjąć, że jeżeli podczas spawania jakiegoś materiału nie występują niedopuszczalne niezgodności spawalnicze zgodnie ze specyfikacją wykonania konstrukcji, to taki materiał charakteryzuje się dobrą spawalnością [11]. Materiały o trudnej spawalności, wymagają często dodatkowych zabiegów cieplnych i technologicznych, co znacznie zwiększają koszt procesu spawania. Podstawowym parametrem oceny spawalności danego materiału jest ocena jakości złącza spawanego [9]. Technologia wykonania złączy spawanych obejmuje trzy podstawowe etapy [39]:

- przygotowanie materiału do spawania (w tym czyszczenie oraz przygotowanie brzegów materiału do łączenia),
- spawanie (wykonanie spoiny wybraną metodą przy określonych parametrach technologicznych),
- zabiegi po spawaniu (np. obróbka cieplna złączy).

Połączenie w procesie spawania uzyskuje się w poprzez stopienie łączonych brzegów materiału łączonego i materiału dodatkowego lub w przypadku niektórych technik spawania do stopienia elementów spawanych bez materiału dodatkowego, które mieszając się w jeziorku spawalniczym krystalizują, tworząc spoinę (rys. 2.4.1) [9, 39]. W zależności od rodzaju, spoiny dzieli się na [11]:

- czołowe,
- pachwinowe,
- otworowe,
- brzeżne.



Rys. 2.4.1. Spoina spawalnicza [40]

Złącza spawane można podzielić w zależności od położenia części względem siebie [11, 39]:

- doczołowe,
- zakładkowe,
- teowe,
- krzyżowe,
- narożne,
- grzbietowe.

Źródłem ciepła w procesie spawania mogą być między innymi łuk elektryczny, wiązka elektronów lub wiązka promieniowania laserowego.

W procesie spawania, następują po sobie topienie metalu, a następnie krystalizacja metalu spoiny. Krystalizacja przebiega w warunkach zależnych od kształtu jeziorka spawalniczego oraz warunków odprowadzenia ciepła. Średnia prędkość krystalizacji spoiny

jest równa prędkości spawania, a charakterystyczną cechą spoiny jest struktura dendrytyczna. Rodzaj i kształt spoiny, kierunek odprowadzenia ciepła oraz prędkości spawania wpływają na wielkość i układ dendrytów. Materiał rodzimy, przylegający bezpośrednio do spoiny oddzielony liną wtopienia, na który oddziaływuje cykl cieplny spawania zwany jest Strefą Wpływu Ciepła (SWC). Wykazano, iż każdy punkt SWC jest nagrzewany z inną prędkością, do innej temperatury maksymalnej oraz jest chłodzony z inną szybkością [9, 11, 39], co jest opisane właśnie przez cykl cieplny spawania.

Dla stali konstrukcyjnej niskostopowej, szybkość chłodzenia w różnych punktach SWC, położonych równolegle do osi złącza, wzdłuż linii spawania wynosi:

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{E}$$
(2.4.1)

gdzie:

w [W/mK] – szybkość chłodzenia,

E [J/m] – energia liniowa spawania,

 T_k [°C] – temperatura najmniejszej trwałości austenitu (przyjmuje się $T_k = 650$ °C),

 T_0 [°C] – temperatura początkowa spawania,

 λ [W/mK] – współczynnik przewodzenia ciepła.

Do metod łączenia felg najczęściej stosuje się zgrzewanie oporowe (dla felg o mniejszej średnicy) oraz spawanie metodą MAG (Metal Active Gas). Obecnie rozważa się takie technologie jak spawanie laserowe, hybrydowe lub spawanie z podwójnym pulsem.

2.4.1 Zgrzewanie

Do produkcji małych felg poniżej 20" najczęściej wykorzystuje się zgrzewanie oporowe doczołowe zwarciowe [39]. Zgrzewanie oporowe jest metodą łaczenia, gdzie blachy lub kształtowniki łączone są ze sobą poprzez nagrzanie obszaru ich styku przepływającym prądem elektrycznym o dużym natężeniu (100-100kA) i niskim napięciu [10-11, 39, 41]. Jako alternatywne rozwiązanie, stosuje się również impulsowy przepływ prądu szczególnie dla materiałów wrażliwych na szybkie nagrzewanie. Można wyróżnić kilka podstawowych typów zgrzewania oporowego: punktowe, liniowe, garbowe, iskrowe i zwarciowe. W procesie łączenia strefa nagrzanego metalu zostaje odkształcona plastycznie poprzez docisk zgrzewanych krawedzi. Wymaganą jakość zgrzeiny, odpowiednie właściwości wytrzymałościowe, geometrię oraz kształt, a także stały kontakt pradowy osiaga się poprzez docisk łączonych elementów przed, w trakcie i po przepływie prądu [41-44]. Temperatura zgrzewania jest w przedziale od 1000 do 2000°C w miejscu styku i zależy od parametrów, składu chemicznego łączonych materiałów oraz przekroju połączenia. Ilość wydzielonego ciepła podczas zgrzewania oporowego, można opisać wzorem (2.4.1.1.) [39]:

$$Q = \int_0^t I^2 R dt$$
 (2.4.1.1)

gdzie:

I - natężenie prądu zgrzewania,

R - oporność strefy zgrzewania,

t - czas przepływu prądu.

Podczas zgrzewania punktowego i doczołowego największy opór występuje w miejscu styku łączonych elementów [39]. Przykładowy układ zgrzewania felg przedstawiono na rysunku 2.4.1.1.



Rys. 2.4.1.1. Przykładowy układ zgrzewania oporowego [45]

Dla zgrzewania oporowego liniowego, punktowego i garbowego, warunki technologiczne procesu zależą od współczynnika przetopienia "k" opisanego wzorem (2.4.1.2):

$$k = \rho \lambda T \tag{2.4.1.2}$$

gdzie:

 $\rho - rezystywność,$

 $\lambda - przewodność cieplna właściwa,$

T-temperatura topnienia zgrzewanego metalu.

Do głównych parametrów procesu zgrzewania zwarciowego należy zaliczyć: moc jednostkową (na 1mm² przekroju) i siłę docisku, natężenie prądu oraz czas przepływu prądu zgrzewania, a także długość mocowania. Wytrzymałość wykonanych złączy osiąga 70-100% wytrzymałości materiałów łączonych [39].

Baracaldo i inni analizowali wpływ parametrów procesu na jakość zgrzeiny stali SPFH590 po procesie zgrzewania doczołowego iskrowego. Wyniki ich analizy wykazały na zmiany w zgrzeinie ferrytu płytkowego w iglasty. Obserwowali zmiany kształtu ziaren oraz struktury Widmanstattena. Autorzy wyznaczyli najkorzystniejsze parametry procesu zgrzewania, przy których uzyskano najlepsze właściwości wytrzymałościowe. Wyniki tych badań umożliwiły obniżenie poziomu niezgodności w procesach produkcyjnych felg [46].

Szymański w swojej pracy badał zjawiska fizyczne występujące podczas zgrzewania oporowego punktowego oraz przedstawił opis matematyczny dla tego procesu. Opisał on prędkości płynięcia w zgrzeinie oraz deformacji fazy stałej dla materiałów niejednorodnych termicznie. Badania te potwierdziły poprawność przyjętych założeń w procesie matematycznego modelowania [47].

Kersten i Richardson obserwowali rozkład temperatur podczas procesu zgrzewania przy produkcji felg. Pomiary natężenia prądu wykazały, że podczas zgrzewania doczołowego występuje nierównomierny rozkład prądu a jego zmienność oraz wyższe wartości w określonych położeniach odpowiada wyższym temperaturom mierzonym w tych miejscach. Przedstawiony prosty model elementów skończonych wykazuje dobrą zgodność z przebiegami temperatur mierzonymi podczas zgrzewania dla próbek jednoczęściowych. W badaniu określono nierównomierności rozkładu temperatur podczas zgrzewania, wynikające z nierównomiernie przyłożonej siły docisku i różnej siły docisku [42]. Dane te wykorzystywane są w projektowaniu procesu zgrzewania felg.

2.4.2 Spawanie metodą MAG

Spawanie metodą MAG w atmosferze ochronnej jest półautomatyczną metodą łączenia, charakteryzującą się dużo większą wydajnością w stosunku do ręcznego spawania łukowego [48-58]. Jako gaz osłonowy w celu ochrony łuku spawalniczego przed dostępem powietrza stosuje się dwutlenek węgla lub mieszanki dwutlenku węgla i argonu. Schemat spawania metodą MAG przedstawiono na rysunku 2.4.2.1.


Rys. 2.4.2.1. Schemat spawania metodą MAG [59]

Można wyróżnić cztery podstawowe rodzaje spawania w technologii MAG zależne od rodzaju łuku elektrycznego:

- spawanie łukiem krótkim metal przenoszony jest w postaci drobnych kropli podczas krótkich zwarć,
- spawanie łukiem natryskowym metal przenoszony jest w postaci natrysku drobnych kropli, bez zwarć,
- spawanie łukiem długim metal przenoszony jest w postaci dużych kropli oraz możliwe są krótkie zwarcia,
- spawanie łukiem pulsującym przenoszenie metalu zachodzi bez zwarć, istnieje możliwość regulacji przenoszenia kropli i ich objętości [41].

Dla poszczególnych rodzaju spawania, krople metalu w procesie mogą być przenoszone zwarciowo, kroplowo, natryskowo lub pulsacyjnie.

Zwarciowe przenoszenie metalu – kropla metalu, znajdująca się na końcu drutu spawalniczego, po zetknięciu się z jeziorkiem powoduje krótkie zwarcie w obwodzie spawania, co skutkuje wygaszeniem łuku. Wzrost natężenia prądu wywołany zwarciem, zwiększa siły elektrodynamiczne ściskające mostek pomiędzy kroplą i końcem drutu. Kropla ciekłego metalu odrywa się od drutu i rozpływa w jeziorku spawalniczym - łuk elektryczny jarzy się swobodnie [11]. Cykle krótkiego zwarcia powtarzają się w granicach 20-200 razy na sekundę w zależności od nastawionych parametrów prądowych, indukcyjności urządzenia, rodzaju gazu ochronnego, materiału i średnicy elektrody. Zwarciowy sposób przenoszenia metalu występuje przy spawaniu łukiem krótkim [41].

Kroplowe przenoszenie metalu – materiał przenoszony jest w postaci dużych kropli, czasami powodujących zwarcie. Sposób ten, najczęściej można zaobserwować spawając stale niskowęglowe w osłonie CO₂ łukiem długim, przy dużych natężeniach prądu [11, 41].

Natryskowe przenoszenie metalu - zachodzi przy bardzo dużej gęstości prądu spawania, powyżej krytycznego natężenia prądu. Przenoszenie materiału występuje w postaci małych, pojedynczych kropel, odrywających się w osi łuku [11]. Zaostrzony i roztopiony koniec drutu elektrodowego, kończy się strugą ciekłego metalu. Struga ta rozrywa się na poszczególne krople. Przenoszenie natryskowe metalu występuje przy zastosowaniu do osłony łuku argonu lub mieszanek bogatych w argon [41].

Spawanie łukiem pulsującym – aby uzyskać jednolitą wielkość kropli i regularny ich przepływ stosowane jest spawanie łukiem pulsującym. Przechodzeniem kropli metalu z elektrody do spoiny w sposób bezzwarciowy sterują impulsy prądowe [11]. Urządzenie do spawania pulsacyjnego, wyposażone jest w dwa źródła prądu. Jedno dostarcza prąd o niewielkim natężeniu, drugie zaś jest źródłem periodycznych impulsów prądowych o określonej częstotliwości. Ten sposób spawania jest przydatny przy łączeniu stali wysokostopowych i metali nieżelaznych. Stosowanym gazem ochronnym jest argon lub mieszanki bogate w argon, bez dwutlenku węgla [41].

Metodą MAG w osłonie CO₂ spawa się felgi ze stali niskowęglowych i niskostopowych o małej i średniej grubości, a wydajność spawania jest 4 razy większą w stosunku do spawania elektrodami otulonymi. Stosuje się druty spawalnicze o średnicy 0,6 - 2,4mm, przy czym najczęściej używane są o średnicach 1,2 i 1,6mm. Osłonę łuku zapewnia dwutlenek węgla o czystości 98 lub 99% - natężenia przepływu wacha się od 10 do 251/min. Chcąc zapewnić wyższe własności wytrzymałościowe złączy, o korzystnej mikrostrukturze z mniejszą zawartością rozpuszczonych w nich gazów, stosuje się mieszanki Ar i CO₂ wpływające na sposób przenoszenia metalu przez łuk, rozprysk, kształt wtopienia i wygląd lica spoiny. Spawanie metodą MAG z uwagi na swoją prostotę oraz stosunkowo niskie koszty procesu znalazło zastosowanie we wszystkich gałęziach przemysłu.

Jak określił Pałubicki [60], przemysł motoryzacyjny wykazuje ciągłe zapotrzebowanie na metody, umożliwiające uzyskanie wysokiej jakości połączeń elementów o małej grubości w wydajny sposób. Spawanie elementów cienkościennych, z blach o grubości do 3mm metodą MAG bardzo często powoduje odkształcenia wynikające z ilości ciepła wprowadzonego do złącza oraz odpryski pogarszające estetykę. Jednym z podstawowych wymagań, jakie stawia się nowoczesnym procesom spawania jest ograniczenie ilości ciepła wprowadzanego do elementów. Z uwagi na występowanie wielu zmiennych, optymalizacja procesu spawania jest bardzo skomplikowana. Najkorzystniejsze warunki spawania metodą MAG, przy danej średnicy i określonym składzie chemicznym spoiwa, a także określonym rodzaju gazu osłonowego, uzyskuje się przez dobór odpowiednich parametrów spawania takich jak napięcie łuku, prędkości podawania drutu, długość wysuniętego odcinka elektrody, indukcyjności obwodu spawania i prędkości spawania. By sprostać wymaganiom przemysłu, opracowano niskoenergetyczne odmiany metody MAG, wśród których najczęściej stosowane są procesy CMT (Cold Metal Transfer), STT (Surface Tension Transfer), CA (Cold Arc) i CBT (Controlled Bridge Transfer) [60].

CMT (**Cold Metal Transfer**) [60-67] – jest to metoda, w której siły napięcia powierzchniowego oraz siły ciężkości potrzebne do oderwania się kropli i jej przejścia do jeziorka spawalniczego są wykorzystywane poprzez kontrolę podawania drutu elektrodowego, który jest cofany z jeziorka ciekłego metalu z częstotliwością około 70Hz przed wystąpieniem zwarcia. Metodą CMT wykonuje się najczęściej połączenia stali z aluminium.

STT (**Surface Tension Transfer**) [60-61] – jest to spawanie łukiem krótkim realizowane poprzez przenoszenie kropli ciekłego metalu. Uzyskane połączenia są wysokiej jakości, bez rozprysków, ze znacznym ograniczeniem odkształceń i uszkodzeń powłok ochronnych oraz poprawą własności wytrzymałościowych połączeń. Metoda ta obniża emisję szkodliwych gazów o ponad 50% [68].

CA (**Cold Arc**) [60] – "zimny łuk", jest to krótki, w pełni regulowany łuk elektryczny o zredukowanym cieple i mocy, pozwalający na kontrolowane przejście kropli do jeziorka spawalniczego. Metoda pozwala na spawanie elementów cienkościennych i wypełnianie szczelin z ograniczeniem odkształceń w materiale spawanym [61].

CBT (**Controlled Bridge Transfer**) [60-61] – jest najbardziej rozwiniętą technologicznie odmianą metody MAG, pozwalającą na sterowanie czasem i wartością natężenia prądu, podczas zakończenia zwarcia i ponownego zajarzenia łuku spawalniczego.

Mirski i Pękala również analizowali kierunki rozwoju automatyzacji spawania i potwierdzili, iż jedną z wielu rozwijanych metod jest łączenie cienkich blach z materiałów o jednakowych i różnorodnych właściwościach, metodą CMT [61].

Kah, Suoranta, oraz Martikainen przeprowadzili badania, których celem była analiza innowacyjnych metod spawania oraz ich koncepcji w przemyśle. Zadaniem było określenie wpływu ilości dostarczonej energii na ograniczenie rozprysków oraz zwiększenia elastyczności procesów spawalniczych. Nowoczesne metody spawania łukowego w tym badaniu zostały opisane ze szczególnym uwzględnianiem sposobu przenoszenia kropli. Stwierdzono, iż jedną z głównych innowacji w procesie MAG była modernizacja źródła prądu, posiadającego możliwość szybkiego przełączania i regulacji. Autorzy zwrócili również uwagę na kontrolę odrywania się kropli poprzez odwrócenie ruchu podajnika drutu, dzięki czemu w proces spawania włączono mechaniczne cofanie elektrody [69].

Analizując różne metody spawania oraz parametry procesu, można regulować ilość energii wprowadzanej do złącza, co wpływa na charakter cyklu cieplnego, a to przekłada się na szybkość chłodzenia SWC oraz ilość przetopionego metalu [60]. Zmienia się również kształt spoiny mający duży wpływ na segregację zanieczyszczeń i rozkład naprężeń. Niskoenergetyczne odmiany spawania w osłonach gazowych pozwalają na spawanie w sposób wydajny i kontrolowany elementów cienkościennych oraz materiałów wrażliwych na wprowadzane ciepło. Dalsze prace nad udoskonaleniem technologii spawania MAG oraz konieczności uzyskania bardziej wydajnych procesów, przyczyniły się do rozwinięcia technologii spawania laserowego oraz spawania hybrydowego (łączącej w sobie metodę MAG i wiązkę lasera).

2.4.3 Spawanie metodą z podwójnym pulsem

Do wydajnych i popularnych metod łączenia z uwagi na koszt procesu można zaliczyć spawanie metodą MAG, natomiast od strony możliwości spawania materiałów trudnych do łączenia oraz technologii zapewniającej wysoką estetykę spoin jest technologia TIG (Tungsten Inert Gas). Technologią spawania, która łączy w sobie te dwa procesy jest spawanie MAG z podwójnym pulsem.

Spawanie pulsem, jest to spawanie prądem pulsującym, w którym na przemian stosowane jest wysokie i niskie natężenie prądu [70-75]. Powoduje to zmniejszenie ilości energii wprowadzanej do metalu, ograniczenie ilości rozprysków oraz ograniczenie występowania braku przetopu. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość spawania cienkich blach. Spawanie pulsacyjne różni się od tradycyjnych procesów tym, iż po włączeniu funkcji puls, prąd ulega ciągłym zmianom od niskiego do wysokiego natężenia. Częstotliwość pulsu, jest to częstotliwość, z jaką natężenie prądu spawania przechodzi w ciągu sekundy od natężenia szczytowego do natężenia podstawowego. Z kolei współczynnik wypełnienia – jest to procent impulsu prądu. Określa się go w stosunku do okresu trwania poszczególnych impulsów. W spawaniu pulsacyjnym MAG pulsacyjne natężenie prądu pierwotnie zostało wprowadzone w celu kontroli przenoszenia metalu przy niskich oraz średnich poziomach mocy poprzez nakładanie krótkotrwałych impulsów prądu o wysokim natężeniu. Do najważniejszych zalet można zaliczyć: oszczędność drutu i gazu, ograniczenia ilości dymu, wprowadzonego ciepła,

poprawę wydajności, polepszenie jakości spoiny oraz zmniejszenie ilości rozprysków co skraca czas potrzebny na czyszczenie spawanego materiału po zakończeniu procesu [70].

Sena, Mukherjeeb, Singhb and Palc, analizowali wpływ zmiennych procesu spawania technologią MAG z podwójnym pulsem na mikrostrukturę i twardość spoiny stali niskowęglowej [76]. Zbadali oni wpływ ilości ciepła podczas spawania, częstotliwości impulsów prądu i częstotliwości impulsów termicznych na proces krzepnięcia i mikrostrukturę spoiny. Ponadto przeprowadzili analizę mikrotwardości spoiny, aby ocenić wpływ zmian mikrostrukturalnych na właściwość złącza. Opracowali kilka równań liniowych i nieliniowych do przewidywania wyników eksperymentu, na podstawie różnych zmiennych procesowych. Wyniki wskazały, że zmniejszenie dopływu ciepła, częstotliwości impulsów i częstotliwości impulsów cieplnych zwiększa udział objętościowy wtrąceń i ferrytu w spoinie [71-76].

Z kolei Wua, Dinga, Yina, Zenga oraz Liang badali wpływ pojedynczych i podwójnych impulsów na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne złączy podczas spawania technologiami MAG dużej mocy [77]. Eksperyment wykazały, że dzięki zastosowaniu układu tandemowego dużej mocy, pojedynczego i podwójnego impulsu, można uzyskać stabilny proces spawania, wysokiej jakości spoiny z niewielkimi rozpryskami, bez podtopień. Dwudrutowy MAG z podwójnym impulsem był bardziej stabilny, dając lepszy kształt spoiny i wyższą mikrotwardość w porównaniu z MAG z podwójnym drutem, z pojedynczym pulsem. Efekt mieszania naprzemiennych silnych i słabych impulsów na jeziorku spawalniczym podczas podwójnego pulsacyjnego spawania MAG generuje znaczące rozdrobnienie ziarna i wyższą twardością. Badania dowiodły, że cykl impulsów o niskiej częstotliwości precyzyjnie kontrolował powstawanie jeziorka spawalniczego.

2.4.4 Spawanie laserowe

Jedną z współcześnie rozwijanych technologii w spawalnictwie jest spawanie laserowe, które wykorzystuje wiązkę lasera (wzmocnionego światła za pomocą wymuszonej emisji promieniowania). W obszarze spawania jest ogniskowana wiązka laserowa, która nagrzewa element tworząc jeziorko ciekłego metalu [39, 78-87]. W celu ochrony roztopionego metalu podczas spawania przed dostępem powietrza, stosuje się gazy obojętne. Absorbcja energii wiązki laserowej przez powierzchnię spawanego elementu wpływa na efektywność całego procesu spawania. Metodą tą można wykonywać złącza doczołowe, zakładkowe i grzbietowe. W technologii laserowej, można wyróżnić dwie techniki spawania:

• spawanie z jeziorkiem – elementy o małej grubości,

 spawanie z przetopieniem na wskroś (z oczkiem) – w przypadku elementów o dużej grubości [39].

Głównymi parametrami spawania laserowego sa: moc wiązki laserowej, energia impulsu lasera, czas trwania i częstotliwość impulsów, prędkość spawania, położenie ogniska wiązki względem złacza, rodzaj oraz natężenie przepływu gazu ochronnego [83]. Do głównych zalet spawania laserowego można zaliczyć bardzo waską strefę wpływu ciepła, dużą szybkość łączenia, możliwość spawania w atmosferze ochronnej lub w komorze próżniowej, ogniskowanie promienia lasera na małej powierzchni, automatyzację oraz brak wpływu pola magnetycznego na spoinę. Dodatkową zaletą spawania laserowego jest możliwość łączenia wielu metali jednocześnie oraz wykonywanie złączy niejednorodnych. Do materiałów łatwo spawalnych tą metodą można zaliczyć stale niskoweglowe. W stalach o zawartości wegla powyżej 0,25% w złączu mogą wystąpić pęknięcia, które eliminuje się stosując spawanie impulsowe. Laserem spawa się również metale nieżelazne oraz stale nierdzewne [39]. Pomimo wielu zalet, spawanie laserowe wykazuje również pewne ograniczenia: wymagane jest precyzyjne usytuowane złącza względem ogniska wiązki laserowej, łączone powierzchnie powinny być dociśnięte do siebie. Technologia ta charakteryzuje się wciąż wysokim kosztem wdrożenia w stosunku do konwencjonalnych technologii spawania [39, 78-87]. Najczęściej spawanie i cięcie laserowe można spotkać w produkcji wielkoseryjnej w przemyśle samochodowym, gdzie wysoka jakość otrzymanych złączy przekłada się na aspekty ekonomiczne [9, 78-87]. Przykładowy schemat spawania laserowego impulsowego, przedstawiono na rysunku 2.4.4.1.



Rys. 2.4.4.1. Schemat spawania laserowego impulsowego [88]

W spawalnictwie wykorzystuje się [39, 89]:

- lasery gazowe CO₂,
- lasery na ciele stałym: Nd:YAG, Nd:Glass:
 - o prętowe,
 - o tarczowe,
 - o włóknowe,
- lasery półprzewodnikowe.

Laser gazowy CO₂ stosowany powszechnie w procesach spawalniczych, głównie do cięcia i czasami do spawania. Wiązka laserowa wykazuje dużą spójność oraz stabilność [90]. Lasery te mogą pracować w trybie ciągłym z mocą 5-20 kW lub trybie impulsowym o czasie i energii impulsów odpowiednio 10 - 600 µs i 0,25 J oraz częstotliwości do 1 kHz. Sprawność energetyczna lasera CO₂ może dochodzić do 15% [89].

Laser na ciele stałym może pracować w trybie ciągłym, jak również w trybie impulsowym. Elementem podstawowym laserów YAG jest pręt, płyta lub dysk wykonany z materiału krystalicznego. W laserach nowego typu domieszkowanego neodymem Nd:YVO4 materiałem bazowym jest kryształ ortowanadanu itru YVO4 [90]. Najczęściej stosowanym laserem zbudowanym na ciele stały w przemyśle jest laser Nd:YAG, emitujący promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni. Charakteryzuje się on dość niską spójnością emitowanego promieniowania laserowego, wykazując jednocześnie niemal 10-krotnie mniejsza długość emitowanej fali wiązki promieniowania laserowego w stosunku to lasera CO₂. Zapewnia tym samym znacznie wyższe współczynniki absorpcji energii wiązki laserowej przez obrabiany materiał [89-91]. Głównymi zaletami laserów typu YAG są: szerokie zakresy pasma absorpcji promieniowania wzbudzającego, budowa modułowa ośrodka czynnego, możliwość wykorzystania złączy światłowodowych w transmisji promieniowania laserowego, łatwość automatyzacji oraz adaptacji w obecnie już zrobotyzowanych systemach, duża odporność na obciążenia cieplne. Wśród wad należy wymienić przede wszystkim konieczność stosowania układów chłodzenia oraz względnie małą gęstość mocy w plamce lasera. Laserami typu YAG spawa się głównie cienkie materiały, jak również stosuje się je do drażenia otworów, a także trasowania i grawerowania metali. Z uwagi na małą gęstość mocy w plamce w laserach YAG jakość cięcia jest niska [89, 90].

Laser półprzewodnikowy, nazywany też laserem diodowym, w którym elementem czynnym są dwa półprzewodniki niesamoistne p-n o różnych typach przewodnictwa, np. GaAs, AlGaAs, AlInGaP. Wzbudzanie następuje poprzez przepływający przez te półprzewodniki prąd elektryczny, emitując promieniowanie światła laserowego o stosunkowo niskiej spójności

wiązki oraz wysokiej mocy wyjściowej [89-91]. Maksymalna sprawność energetyczna lasera diodowego wynosi do 30%. Podstawowe zalety lasera diodowego to: niewielki rozmiar i masa, prosta oraz wytrzymała konstrukcja, duża sprawność energetyczna i niskie napięcie zasilania, wysoki współczynnik absorpcji promieniowania przez metale i tworzywa sztuczne. Do głównych wad lasera diodowego należy zaliczyć małą gęstość mocy względem laserów gazowych lub zbudowanych na ciele stałym oraz dużą awaryjność powodowaną niską trwałością diod, co przekłada się na wysokie koszty eksploatacji [89, 90]. Lasery diodowe stosuje się głównie do spawania cienkich blach, napawania, lutowania, a także obróbki cieplnej. Ponadto wykorzystywany jest również jako źródło wzbudzania lasera na ciele stałym typu YAG.

Borek i inni w artykule opisującym technologie laserowe spawania, wytwarzania i obróbki cieplnej warstw wierzchnich stwierdzili, iż istnieje wiele możliwości zastosowania technologii laserowych w przemyśle. Wykazali oni liczne zalety technologii spawania laserowego, napawania oraz obróbki cieplnej, w stosunku do technologii konwencjonalnych. Autorzy opisali zalety spawania laserowego, które wykazuje dużą gęstość mocy i dużą prędkość spawania, możliwość spawania samą wiązką (bez materiału dodatkowego), wysoką precyzję i czystość procesu, możliwość łączenia materiałów trudno spawalnych, różnoimiennych oraz materiałów o rożnych grubościach [91].

2.4.5 Spawanie metodą hybrydową

W celu połączenia zalet procesu spawania laserowego techniką z oczkiem oraz spawania łukowego MAG drutem litym lub proszkowym, opracowano technologię spawania hybrydowego HLAW (Hybrid Laser Arc Welding) [9, 92-100]. Połączenie to zapewnia wyższe własności technologiczne procesu oraz lepszą jakości złączy spawanych konstrukcji a także łączy zalety technologii MAG i szybkości spawania laserem. Stosując tą technologię, można osiągnąć znacznie wyższą stabilność i prędkość procesu spawania, mniejsze zużycie drutu spawalniczego i bardzo korzystne właściwości mechaniczne złączy. Aby zapewnić wystarczającą ilość miejsca dla topionego materiału dodatkowego z procesu MAG, a także gładkie i równe lico spoiny, złącza doczołowe bardzo często przygotowuje się na Y z kątem ukosowania 30° [9, 92-100] – przykład układu spawania hybrydowego, przedstawiono na rysunku 2.4.5.1.



Rys. 2.4.5.1. Schemat przykładowego układu hybrydowego – Laser - MAG [101, 102]

Guen i inni badali procesy spawania hybrydowego, laser-MAG i stwierdzili poprawę wydajności spawania, możliwość spawania grubszych materiałów, lepszą stabilnością procesu i poprawę jakości metalurgicznej połączeń [103]. Aby efektywnie wykorzystać ten proces, konieczne jest dokładne zrozumienie złożonych zjawisk fizycznych, które rządzą tą techniką spawania. W swoim artykule opisali wpływ głównych parametrów spawania dla samego procesu spawania laserowego, procesu MAG i hybrydowego Laser/MAG. Stosując szybkie kamery wideo, precyzyjnie scharakteryzowali jeziorko stopionego materiału poprzez pomiary wtopienia i jego długości oraz badali zjawiska zachodzące w jeziorku. Wyniki eksperymentalne posłużyły do stworzenia bazy danych wykorzystywanej do walidacji trójwymiarowego modelu termicznego procesu spawania hybrydowego dla szerokiego zakresu parametrów roboczych. Uwzględniono trójwymiarową geometrię jeziorka stopionego materiału. Opracowane procedury pozwoliły na wyznaczenie odpowiednich parametrów spawania związanych z energią łuku i wiązką lasera, wpływających na jakość powierzchni jeziorka stopionego metalu [103].

Z kolei Zhang oraz Liu opisali spawanie hybrydowe laser-MAG stali o wysokiej wytrzymałości (HSS) z dodatkiem drutu ze stali austenitycznej o średnicy 1,2 mm (rys. 2.4.5.2) [104].



Rys. 2.4.5.2. Schemat eksperymentalnego układu spawania hybrydowego dla stali o wysokiej wytrzymałości [104]

Wykorzystali oni również szybką kamerę do uzyskania w czasie rzeczywistym obrazów kropel stopionego metalu i sygnałów elektrycznych podczas procesu spawania hybrydowego. Przeprowadzili statystyczne obliczenia matematyczne w celu zbadania, w jaki sposób stosunek mocy lasera do mocy łuku wpływa na morfologię spoiny, chwilową gęstość prawdopodobieństwa prądu oraz na charakterystykę przenoszenia kropli. Zmiany sposobu przenoszenia kropli zaobserwowano dla różnych wartości prądu spawania. Wartości 160A określono jako prąd krytyczny dla przenoszenia kroplowego. Gdy prąd spawania wyniósł 206A, określono to jako prąd krytyczny przenoszenia natryskowego. Przy prądzie spawania oceniano stosując jako główny współczynnik odniesienia szerokość spoiny. Dla przenoszenia natryskowego kropli stabilność spawania określono jako najlepszą. Wynik tych badań wskazał na wpływ mocy wiązki lasera i energii łuku na głębokość wtopienia i szerokość spoiny. Odległość między wiązką lasera i łukiem wpływa na sposób przenoszenie kropli [104].

Biorąc pod uwagę, iż określenie wpływu energii liniowej spawania jest istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa felg specjalnego zastosowania, konieczna jest ocena możliwości wykorzystania nowoczesnych wysokowydajnych procesów łączenia w ich produkcji. Wdrożenie tych metod może przyczynić się do zwiększenia jakość i wydajność produkowanych felg specjalnych.

2.5 Podsumowanie

Rosnące wymagania dotyczące właściwości użytkowych felg specjalnego zastosowania oraz technologii ich wytwarzania, a w szczególności technologii ich łączenia, przyczyniają się do poszukiwania nowoczesnych i innowacyjnych metod spawania.

Gumenyuk oraz Rethmeier [105] stwierdzili, że światowe trendy w produkcji elementów spawanych charakteryzują się zapotrzebowaniem na obniżenie kosztów operacji i czasu spawania, z drugiej zaś strony powtarzalnej i niejednokrotnie wyższej jakości przy odpowiednich własnościach mechanicznych elementów spawanych.

Redukcja czasu operacji spawalniczych poprzez wdrożenie wysokowydajnych metod spawania i ich automatyzację wpływa na obniżenie kosztu transformacji rozumianego jako kosztu wytworzenia felgi. Koszt transformacji oraz koszty materiału stanowią całkowity koszt produkcji danego wyrobu uwzględniając koszty stałe i zmienne. Wyższa jakość przekłada się nie tylko na mniejsze koszty, ale również na lepsze właściwości użytkowe i bezpieczeństwo eksploatacji oraz na wizerunek przedsiębiorcy.

Wysokowydajnymi metodami spawania są między innymi metoda MAG z podwójnym pulsem, spawanie laserowe oraz spawanie hybrydowe. Metody te na szeroką skale zaczęto wykorzystywać w przemyśle samochodowym i okrętowym w ciągu ostatnich 10 lat [90, 105, 106]. Według Optech Consulting, wykorzystanie systemów laserowych w sektorze samochodowym było na poziomie 15% w 2012 [106]. Powodem tak małego udziału tej technologii w globalnym rynku technologii spawalniczych były koszty wdrożenia oraz adaptacja tej technologii do produkcji. Dalszy jej rozwój oraz rosnące możliwości przyczyniły się do popularyzacji tej metody w innych gałęziach przemysłu [12, 90].

Spawanie laserowe polega na stapianiu brzegów materiału rodzimego w osłonie gazu ochronnego skoncentrowaną wiązką promieniowania światła o dużej gęstości mocy [9, 107]. Główne zalety tej technologii to większa prędkość spawania i wąska strefa wpływu ciepła oraz możliwość głębokiego wtopienia.

Spawanie hybrydowe – łączy w sobie proces spawania laserowego i spawania łukowego MAG [9, 107]. Proces ten jest określany jako Hybrid Laser Arc Welding (HLAW) i jest obecnie procesem intensywnie rozwijanym. Wykorzystywane źródła ciepła tj. wiązka promieniowania laserowego i łuku elektrycznego, wykazuje szereg zalet w odniesieniu do każdego z tych źródeł z osobna. Podstawową korzyścią spawania hybrydowego jest możliwość płynnej regulacji łuku elektrycznego i mocy lasera, co przekłada się na elastyczność w zakresie doboru energii liniowej spawania, pola temperatur i cyklu cieplnego a także optymalizacji kształtu spoin w stosunku do spawania laserowego i spawania łukowego osobno [9, 107, 108].

Obecnie jedną z najbardziej powszechnych metod spawania łukowego felg stalowych jest metoda MAG. Procesy produkcyjne felg o rozmiarze powyżej 20" pozwalają na poprawne wykonanie wyrobu. W praktyce jednak proces ten obarczony jest dużymi kosztami wynikającymi z braku powtarzalności, znacznej liczby wyrobów niezgodnych, co skutkuje wzrostem czasochłonności procesów. Felgi mniejsze niż 20" spawane są również metodą MAG lub są zgrzewane iskrowo. Z uwagi na mniejsze gabaryty oraz prostą technologię łączenia, pęknięcia złączy podczas wstępnego kształtowania cylindra występują znacznie rzadziej.

Powtarzalność i jakość wykonania felg specjalnego zastosowania są kluczowymi aspektami nie tylko z perspektywy wymagań technicznych oraz wymagań klienta, ale również wpływają na bezpieczeństwo eksploatacji produkowanych wyrobów. By w pełni sprostać tym oczekiwaniom konieczne są zmiany od strony projektowej, wydajności produkcji i jakości felg specjalnego zastosowania.

W celu dokonania tych zmian, istotne jest poznanie czynników decydujących o właściwościach złączy spawanych, co umożliwia dobór i zastosowanie nowych technologii spawania, np. spawania laserowego lub spawania hybrydowego.

Wykorzystanie nowoczesnych technologii łączenia podczas produkcji felg specjalnego zastosowania oraz dobór parametrów technologicznych tj. energii liniowej łuku, decyduje o strukturze i właściwościach złączy, pozwalając na wykonanie złączy na poziomie jakości B wg. (PN-EN ISO 5817:2023, PN-EN ISO 13919-1:2020, PN-EN ISO 14554-1:2014) oraz spełniających założone właściwości użytkowe w tym odporność na korozję atmosferyczną. Określenie wpływu energii liniowej łuku spawalniczego jest zatem istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa takich konstrukcji.

Wysokowydajnymi technologiami spawania przy produkcji felg stalowych zainteresowani są wszyscy wiodący producenci na runku. Poziom zaawansowania wdrożenia tych technologii w produkcji seryjnej jest trudny do określenia, jednak każde wdrożenie poprawiające wydajność, przekłada się na wzrost sprzedaży.

Technologie spawania, gdzie źródłem ciepła mogą być łuk elektryczny, wiązka lasera, strumień plazmy czy też płomień gazowy, wpływają na strukturę i właściwości złączy. Istnieje zatem konieczność oceny możliwości wykorzystania nowych procesów spawania do łączenia felg specjalnego zastosowania, w których o właściwościach złączy decyduje jego struktura, powstająca w wyniku zachodzących zjawisk metalurgicznych i przemian fazowych.

2.6 Teza, cel i zakres pracy

Na podstawie analizy stanu wiedzy oraz przeglądu literatury sformułowano następującą tezę pracy:

Energia liniowa łuku spawalniczego oraz moc wiązki laserowej decydują o strukturze i właściwościach złączy, a tym samym o możliwym zastosowaniu nowoczesnych wysokowydajnych procesów łączenia w produkcji felg specjalnego zastosowania, spełniających wymagania klienta zgodnych z wytycznymi ETRTO.

Dla potwierdzenia tezy pracy przyjęto następujące cele badań:

Cel metodyczny:

 opracowanie metodyki oceny struktury i właściwości złączy spawanych metodą MAG, MAG z podwójnym pulsem, spawanych laserowo, hybrydowo oraz zgrzewanych z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych umożliwiających opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o ich właściwościach.

Cele poznawcze:

- określenie wpływu energii liniowej łuku spawalniczego i mocy wiązki laserowej na strukturę i właściwości złączy ze stali stosowanych na felgi specjalnego zastosowania,
- ocena czynników technologicznych i strukturalnych decydujących o odporności złączy spawanych wysokowydajnymi technologiami na korozję elektrochemiczną,
- określenie możliwości zastosowania wysokowydajnych i energooszczędnych technologii łączenia zapewniających wzrost wydajności procesu wytwarzania felg.

<u>Cel utylitarny:</u>

 opracowanie wytycznych technologicznych spawania felg metodą laserową, hybrydową oraz MAG z podwójnym pulsem oraz przygotowanie dokumentacji do kwalifikowania tych technologii łączenia.

Cele te osiągnięto w wyniku realizacji programu badań, którego schemat przedstawiono na rys. 2.6.1.



Rys. 2.6.1. Schemat programu badań pracy

3 BADANIA WŁASNE

3.1 Materiał do badań

Do badań wykorzystano stale z grupy niskowęglowych walcowanych na gorąco do przeróbki plastycznej na zimno tj. gatunki DD11 i DD14 [7, 109]. Stale te są używane do produkcji felg specjalnego zastosowania. Skład chemiczny badanych stali według atestów producenta i wymagań normy PN-EN10111:2009 oraz ich właściwości mechaniczne podano w tabeli 3.1.1.

Skład Chemiczny [% masowy]								
Materiał	Norma	C	Si	Mn	Р	S		
	Atest	C					AI	
DD11	PN-EN 10111	≤ 0.120	-	≤ 0.600	≤ 0.045	≤ 0.045	-	
וועע	0001105031146	0.080	0.018	0.500	0.014	0.011	0.043	
DD14	PN-EN 10111	≤ 0.080	-	≤ 0.350	≤ 0.025	≤ 0.025	-	
DD14	0001104963495	0.033	0.006	0.190	0.012	0.006	0.032	
	Właściwości mechaniczne							
Materiał	Norma	Do [MDo]		Dm [MDo]		A [0/]		
	Atest	Ke [1	viraj	KIII [1	viraj	A [70]		
DD11	PN-EN 10111	170 - 340		\leq 440		≥ 28		
DD11	0001105031146	286		399		35.9		
DD14	PN-EN 10111	170 - 290		≤ 380		≥ 36		
DD14	0001104963495	236		315		46.5		

Tab. 3.1.1. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne materiału do badań

Na podstawie porównania wyników analizy składu chemicznego oraz właściwości mechanicznych próbek stwierdzono, że badane gatunki spełniają wymagania dla stali DD11 i DD14 wg PN-EN 10111:2009.

Do spawania metodą MAG, MAG z podwójnym pulsem oraz w układzie hybrydowym wykorzystano drut spawalniczy G4Si1 o średnicy 1.2mm wyprodukowany przez firmę ESAB (wg EN ISO 14341-A: G4Si1) oraz gaz osłonowy MISON 18 o składzie 81.97 % Ar, 18% CO₂ oraz 0.03% NO (tabela 3.1.2).

m 1	0 1	\mathbf{a}	011 1	1 •	1 /	1 •	1	•	• 1	· ·	•
Tab	- 1 - 1	2	Skład	chemiczny	v driifii s	nawalniczego) oraz osło	onowei	mieszanl	Κ1	gazowei
I uo.	J.1.	<i>_</i> .	oniad	entennezh	y arata b	panamezeg	oral obic	0110 n c j	medulam		Suzonej

	Skład chemiczny [% masowy]						
Spawanie MAG	Drut spawalniczy C Mn		Si				
	G4Si1	0.074	1.68	0.95			
	Gaz osłonowy	Ar [%]	CO ₂ [%]	NO [%]			
	Mison 18	81.97	18	0.03			

Na rys. 3.1.1 przedstawiono mikrostruktury ferrytyczno perlityczne materiału rodzimego stali DD11 (a, b) oraz stali DD14 (c, d).



Rys. 3.1.1. Struktura ferrytyczno perlityczna stali wykorzystanych w badaniach: (a, b) stal DD11, (c, d) DD14

3.2 Metodyka badań

Do oceny jakości złączy spawanych ze stali DD11 i DD14 wykonano badania nieniszczące oraz badania niszczące. Badania nieniszczące obejmowały badania wizualne i radiograficzne. W ramach badań niszczących wykonano badania metalograficzne, badania właściwości złączy, w szczególności statyczną próbę rozciągania, próbę zginania, próbę udarności, pomiary twardości, a także badania odporności korozyjnej w komorze solnej oraz w komorze Koesternicha.

3.2.1 Badania nieniszczące złączy

Badania wizualne VT (visual testing) złączy wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 17637 [110], natomiast badania radiograficzne RT (radiographic testing) wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 17636-1:2013 [111]. Złącza spawane zostały ocenione przyjmując jako kryterium poziom jakości B wg norm:

- dla spawania łukowego PN-EN ISO 5817:2023 [112],
- dla spawania metodą laserową wg PN-EN ISO 13919-1:2020 [113],

- dla spawania metodą hybrydową wg PN-EN ISO 12932:2013 [114],
- dla zgrzewania oporowego wg PN-EN ISO 14554-1:2014 [115].

3.2.2 Badania metalograficzne złączy

Próbki do badań metalograficznych pobrano zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2022 [116], prostopadle do kierunku spawania. Pobrane próbki obejmowały spoinę, strefę wpływu ciepła i materiał podstawowy (rys. 3.2.2.1). Próbki były szlifowane papierem ściernym o ziarnistości od 80 do 1000, następnie tak uzyskane zgłady metalograficzne były trawione 5% nitalem (5% roztwór HNO₃ w alkoholu etylowym).



Rys. 3.2.2.1. Miejsce wycięcia próbek do badań metalograficznych i mechanicznych wg normy PN-EN ISO 15614-1:2017 [117]

Badania makroskopowe przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2022 [116]. Obrazy zarejestrowano aparatem fotograficznym Olympus C-70, a ocenę makrostruktury wykonano okiem nieuzbrojonym oraz przy powiększeniu do 50x na mikroskopie stereoskopowym Olympus SZX9.

Badania mikroskopowe polegały na obserwacji mikrostruktury za pomocą mikroskopu metalograficznego świetlnego przy powiększeniu od 50 do 500x. Prowadzono je w celu opisu struktury złączy spawanych, a także ujawnienia niezgodności spawalniczych. Badania mikroskopowe przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2022 [116], wykorzystując mikroskop świetlny Olympus GX71. Obserwowano obszar materiału podstawowego, strefy wpływu ciepła oraz spoinę zgodnie z schematem przedstawionym na rys. 3.2.2.2.



Rys. 3.2.2.2. Obszary badania mikroskopowego na przekroju złącza spawanego [118]

Skaningowa mikroskopia elektronowa SEM – komplementarnym badaniem struktury na mikroskopie świetlnym były badania przy powiększeniach powyżej 500x na elektronowych mikroskopach skaningowych (SEM – Skaning Electron Microscopy): Hitachi S-3400N oraz Jeol NeoScope 2. Badania prowadzono w technice rejestracji elektronów wtórnych (SE - Secondary Electrons) i elektronów wstecznie rozproszonych (BSE - Back-Scattered Electrons). Obserwacja w technice rejestracji elektronów wtórnych pozwoliła na rejestrację topografii powierzchni, natomiast obrazy uzyskane w technice elektronów wstecznie rozproszonych uwzględniają różnicę w składzie chemicznym. Dodatkowo wykonano mikroanalizę składu chemicznego ujawnionych faz w złączu metodą spektroskopii promieniowania X z dyspersją energii (EDS - Energy- Dispersive X-ray Spectroscopy). Badanie wykonane było przy napięciu 15kV na analizatorze System Six firmy Hitachi Thermo Noran współpracującym z mikroskopem HITACHI S-3400N. Badania prowadzono metodą punktową oraz powierzchniową. Otrzymana mapa powierzchniowego rozkładu pierwiastków pozwala na wnioskowanie o zmianach stężenia głównych pierwiastków stopowych.

3.2.3 Badania własności mechanicznych

Próba statycznego rozciągania złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 spawanych metodami MAG, MAG z podwójnym pulsem, hybrydowo, laserowo i zgrzewanych prowadzona była zgodnie z normą PN-EN ISO 4136:2022 [119] na 2 próbkach wyciętych ze złącza próbnego. Określono tylko wytrzymałość na rozciąganie R_m [120]. Na rys. 3.2.3.1 przedstawiono kształt i wymiary próbek do rozciągania, gdzie a_0 jest określona jako grubość próbki, b_0 – jest to szerokość części bocznej próbki płaskiej, a L_0 – to całkowita długość próbki. Wartości a_0 , b_0 i L_0 podano w mm.



Rys. 3.2.3.1. Próbka wykorzystywana do prób statycznego rozciągania poprzecznego złącza spawanego [121]

Próbki pobrane ze złącza spawanego były przygotowane zgodne z wymaganiami normy PN-EN ISO 6892-1:2020 i wycięto je prostopadle do spoiny oraz usunięto z nich nadlewy grani i lica spoiny [121]. Próbę statycznego rozciągania przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową QC501A2 firmy Cometech.

Próbę zginania złączy doczołowych prowadzono w celu sprawdzenia plastyczności złączy, ustalenie odporności na zginanie badanych połączeń oraz wykrycia niezgodności spawalniczych. Zewnętrzna powierzchnia podczas próby zginania była rozciągana, natomiast wewnętrzna która przylegała do trzpienia gnącego była ściskana. Jako kryterium oceny przyjęto wartość kąta gięcia. Gdy kąt gięcia wyniósł 180° a na powierzchni rozciąganej nie wystąpiły pęknięcia, próbę zginania uznawano za pozytywną. Do badania pobrano dwa zestawy próbek, po dwie w każdym zestawie. Pierwsze dwie próbki poddano zginaniu z rozciąganiem od strony lica spoiny, drugi zestaw próbek poddano zginaniu z rozciąganiem grani spoiny. Od strony lica i grani dla pobranych próbek usunięto nadlewy. Na rysunku 3.2.3.2 przedstawiono schemat zginania poprzecznego złącza spawanego, gdzie: L - oznaczało długość całkowitą próbki, D - średnicę trzpienia, 1 - odległość pomiędzy podporami, natomiast a - grubość próbki, α - kąt gięcia.



Rys. 3.2.3.2. Schemat próby zginania próbki [122]

Badania na zginanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 5173:2023 [122] na maszynie wytrzymałościowej QC-501A2 firmy Cometech.

twardości złączy spawanych przeprowadzono na trawionym Pomiar zgładzie metalograficznym na przekroju poprzecznym złącza zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 9015-2:2016 [123]. Pomiar twardości metodą Vickersa (HV), wykonano wzdłuż linii pomiarowei oddalonej 2 mm od krawędzi próbki. Odciski wykonano w spoinie, strefie wpływu ciepła oraz w materiale podstawowym po trzy w każdej strefie. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 3.2.3.3.

<u>م 2</u>	5 7 9 1	1 13 15
1 3	4 6 8 10	1/2 14
B 2	5 7 9 11	13 15
1 3	4 6 8 10 12	2 14

Rys. 3.2.3.3. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru twardości dla badanych złączy [123]

Badanie twardości przeprowadzono przy obciążeniu HV10 (98,1 N) zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-2:2016 [123] na twardościomierzu typu Brickers 220.

Próbę udarności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 148-1:2017 [124, 125] na próbkach o pomniejszonym przekroju (o wymiarach 2,5 x 8,0 x 55,0 mm) z karbem V o głębokości 2 mm. Karb został nacięty w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła i spoinie. Próby udarności wykonano w temperaturze 20°C oraz -40°C. Pracę łamania wyznaczono za pomocą młota udarnościowego typu RKP 450 firmy ZWICK.

3.2.4 Badania własności użytkowych

Badanie odporności korozyjnej w komorze solnej prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2023 [126]. Do badań zastosowano komorę solną typu CORROTHERM Model 610, firmy Erichsen, której schemat przedstawiono na rys. 3.2.4.1.

Test korozyjny poległ na poddawaniu badanych próbek działaniu mgły wodnego roztworu NaCl. Badania prowadzono w komorze solnej o pojemności 400dm³. Urządzenie wyposażone było w układ ogrzewania solanki, przyrządy pomiarowe do kontroli i regulacji temperatury zapewniające uzyskiwanie założonej temperatury badań (35±2°C). Mgła solna rozpylana była z rozpylacza, do którego doprowadzone było sprężone powietrze o odpowiedniej czystości. Ciśnienie dobrano tak, aby szybkość kondensacji mgły w komorze wynosiła 1,5±0,5ml/h na powierzchni poziomej równej 80cm². Kondensat mgły solnej odprowadzany był na dno komory

korozyjnej w taki sposób, aby niemożliwy był jego kontakt z badanymi próbkami. Roztwór solanki do badań przygotowywano przez rozpuszczenie w wodzie destylowanej takiej ilości chlorku sodowego NaCl, aby jego stężenie wynosiło 50±5 g/l, pH roztworu zachowywano w granicach 6,5 ÷ 7,2. W celu określenia jednostkowych zmian masy oraz w trakcie trwania testu przeprowadzono badania grawimetryczne po 24, 48, 96, 168, 240, 480, 720 i 1000 godzinach ekspozycji próbek w komorze. Przed pomiarem masy nie usuwano w powierzchni produktów korozji. Pomiaru masy dokonano na trzech próbkach każdego rodzaju. Wynik końcowy stanowiła średnia pomiarów. Ocenę wyglądu próbek w toku badań prowadzono co 24 h, natomiast dokumentację fotograficzną wykonano przed rozpoczęciem badań oraz po 240, 480, 720 oraz po 1000 godzinach badań.



Rys. 3.2.4.1. Komora solna do przyspieszonych, laboratoryjnych testów korozyjnych w obojętnej mgle solnej: a) schemat komory: 1-regulacja gęstości mgły solnej, 2-panel sterowania, 3-wyłącznik, 4-zbiornik na solankę, 5-rozpylacz, 6-uchwyt próbek; b) widok z przodu komory solnej; c) wnętrze komory solnej

Przyśpieszone badanie odporności korozyjnej w komorze Koesternicha w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 22479:2022 [127]. Metoda polega na poddawaniu badanych elementów cyklicznemu działaniu wilgotnej atmosfery w komorze (rys.3.2.4.2), do której został wprowadzony dwutlenek siarki wg ustalonego cyklu badawczego. Badania prowadzono w komorze Koesternicha typu Hygrotherm model 519 firmy Erichsen. Pojemność komory wynosiła 300dm³. Komora wyposażona była w termometr do kontroli temperatury wnętrza, zawór syfonowy umożliwiający wyrównywanie ciśnienia z otoczeniem oraz króciec z zamknięciem służący do wprowadzania SO₂ do komory. Dno komory stanowił zbiornik o pojemności 2dm³ wypełniany

wodą destylowaną, wyposażony w grzałkę pozwalającą na ogrzewanie wody oraz w regulator temperatury umożliwiający utrzymanie wewnątrz komory temperatury 40±2°C. Próbki zawieszano w komorze w taki sposób, aby krople kondensatu nie ściekały na inne próbki wiszące poniżej. Badania prowadzono utrzymując następujące parametry:

- stężenie SO₂ w komorze w chwili rozpoczynania cyklu: 0,2dm³,
- temperatura w zamkniętej komorze: 40±2°C przy wilgotności 90÷100%,
- temperatura przy otwartej komorze: 20±5°C i wilgotności względnej do 75%,
- cykl badawczy 8h eksponowania w zamkniętej komorze i następne suszenie przy otwartych drzwiach komory w temperaturze i atmosferze otoczenia przez 16h,
- łączny czas badań 30 cykli dobowych (720 godz.).

Wygląd próbek oceniano w toku badań co 24h (jeden cykl). W celu określenia jednostkowych zmian masy w trakcie trwania testu przeprowadzono badania grawimetryczne co 1 cykl dobowy do 8 cyklu badań, co 2 cykle dobowe w przedziale od 8 do 16 cyklu badań i co 5 cykli dobowych w przedziale od 16 do 30 cyklu badań. Przed pomiarem masy nie usuwano w powierzchni produktów korozji. Pomiaru masy dokonano na trzech próbkach każdego rodzaju. Wynik końcowy stanowiła średnia pomiarów. Zdjęcia stanu powierzchni próbek wykonano przed rozpoczęciem badań oraz po 18, 16, 25 i 30 cyklach badań.



Rys. 3.2.4.2. Komora do badań w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki: a) schemat komory Koesternicha: 1-pokrywa, 2-drzwi szklane, 3-uchwyt do zawieszania 5-panel 4-rynienka 6–zawór ciśnienia próbek, okapowa, sterowania, wyrównawczego, 7–czujnik temperatury komorze, 8–uszczelka, W 9-doprowadzenie gazu, 10-zawór odpływowy wody, 11-dozownik; b) widok z przodu komory Koesternicha; c) wnętrze komory Koesternicha

3.3 Symulacja procesów spawania felg specjalnego zastosowania

Symulacje numeryczne procesów spawania i obróbki cieplnej stanowią nowoczesne, zaawansowane narzędzie, które umożliwia określenie poziomu naprężeń i odkształceń w elementach spawanych, jak i całych konstrukcjach spawanych, bez wykonywania kosztownych prób i prototypów [128, 129]. Obliczone rozkłady naprężeń i odkształceń mogą być również użyte do przewidywania trwałości konstrukcji oraz wykrywania potencjalnych miejsc inicjacji pęknięć i uszkodzeń w trakcie eksploatacji, już na etapie projektowania. Symulacje numeryczne procesów spawania mogą być wykorzystane zarówno podczas opracowywania nowych technologii produkcji elementów i konstrukcji spawanych, jak i wprowadzania zmian w istniejących, a także w celu oceny trwałości elementów, uwzględniając naprężenia wynikające z procesów spawania lub napraw wykonanych technikami spawalniczymi. Wykonywane na złaczach testowych próby technologiczne często nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistych warunków konstrukcji (rozmiary, sposób zamocowania czy odprowadzanie ciepła ze złącza), a budowa prototypów wiaże się z wysokimi kosztami. Dzięki symulacjom numerycznym istnieje więc możliwość sprawdzenia wielu wariantów i wyboru optymalnego rozwiązania jeszcze przed przystąpieniem do procesu spawania. Uzyskuje się w ten sposób oszczędności zarówno materiału, czasu i pieniędzy, jak również możliwe jest uzyskanie znacznie bardziej dokładnych, a czasami i dodatkowych informacji o przebiegu samego procesu oraz zachodzących zjawiskach podczas spawania. Jest to możliwe np. dzięki możliwości analizy w dowolnej chwili czasowej przebiegu procesu, a nie dopiero po jego zakończeniu [128].

W przeprowadzonych analizach procesów spawania, w przypadkach spawania metodą MAG oraz metodą hybrydową, modelem źródła ciepła był powszechnie znany model w kształcie podwójnej elipsoidy, zwany również modelem Goldak'a, rys. 3.3.1.



Rys. 3.3.1. Model w kształcie podwójnej elipsoidy (model Goldak'a) [130 - 136]

Model ten jest opisany równaniami (3.3.1) i (3.3.2).

$$Q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$
(3.3.1)

Model przedniej części źródła ciepła.

$$Q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$$
(3.3.2)

Model tylnej części źródła ciepła.

gdzie:

Q_f, Q_r – składowa ciepła dostarczanego jako objętościowe źródło ciepła (odpowiednio przedniej (f) i tylnej (r) części modelu),

Q – moc spawalniczego źródła ciepła,

a – szerokość jeziorka ciekłego metalu,

b – głębokość jeziorka ciekłego metalu,

 $c_{f},\,c_{r} \quad - \,d ^{l} ugość \, przedniej \, i \, tylnej \, części \, jeziorka \, ciekłego \, metalu,$

 f_f , f_r – współczynnik wpływający na intensywność przepływu energii do materiału.

Efektywność przekazywania ciepła do materiału rodzimego określa zastosowana metoda spawania. Geometrię modelu źródła ciepła można modyfikować zmieniając współczynniki a, b, c.

W analizach procesów spawalniczych charakteryzujących się dużymi gęstościami energii – dla spawania laserem, wiązką elektronów lub spawania plazmowego, zwykle stosuje się objętościowy model stożkowy o rozkładzie normalnym, rys. 3.3.2 [134].



Rys. 3.3.2. Objętościowy model stożkowy

Matematyczny opis gęstości objętościowego przepływu ciepła do materiału jest opisany równaniem (3.3.3).

$$Q(x, y, z) = Q_0 exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$
(3.3.3)

Stożkowy model źródła ciepła.

dla którego:

$$r_0(z) = r_e \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e)$$

gdzie:

- Q0 maksymalna wartość objętościowe gęstości strumienia ciepła,
- re, ri górny i dolny promień stożka,

 $z_e, z_i - wysokość stożka,$

x, y, z - współrzędne położenia.

Ze względu na sposób prowadzenia, symulacje numeryczne mogą być podzielone na następujące grupy [137]:

Metoda ciągła (transient method) – obliczenia wykonywane są krok po kroku, z ruchomym modelem źródła ciepła poruszającym się wzdłuż określonej trajektorii. Obliczenia wykonywane są w kolejnych etapach (chwilach czasowych), określonych przez tzw. krok symulacji, który zależny jest m.in. od budowy samej siatki modelu. Parametry procesu spawania (takie jak natężenie prądu, napięcie łuku, prędkość spawania itp.) określane są na podstawie parametrów modelu źródła ciepła, a sam model podlega procedurze kalibracji i walidacji. Efektem tych analiz są rozkłady pól temperatury, faz, naprężeń, twardości oraz odkształceń. Metoda ciągła znajduje zastosowanie w przypadkach identyfikacji lokalnych efektów spawania oraz optymalizacji parametrów na podstawie rozkładu faz metalurgicznych, twardości oraz naprężeń w obszarze połączenia spawanego i jego sąsiedztwie [128].

Metoda z wykorzystaniem wymuszonego cyklu cieplnego (macro bead deposit) – w metodzie tej, źródło ciepła w postaci zdefiniowanego cyklu cieplnego, jest definiowane na jednym lub częściej kilku węzłach siatki jednocześnie, a spoina jest podzielona na kilka sekcji, w zależności od jej długości. Ciepło wprowadzane do połączenia odzwierciedla rzeczywisty cykl cieplny procesu spawania. Metoda macro bead deposit jest rozszerzeniem techniki "transient", umożliwiając zredukowanie czasu obliczeń oraz zwiększenie możliwości przeprowadzania obliczeń dla dużych konstrukcji [128].

Metoda lokalno-globalna - jest stosowana w przemyśle stoczniowym, ciężkim i motoryzacyjnym dla bardzo dużych konstrukcji z dużą liczbą spoin/złączy spawanych. Dla takich analiz zastosowanie technik "transient" i "macro bead deposit" jest zazwyczaj niemożliwe ze względu na długi czas obliczeń i wymagania dotyczące pamięci komputera. W metodzie tej proces spawania jest powiązany z lokalnymi zmianami naprężeń i przemieszczeń, które mają odzwierciedlenie w globalnym stanu odkształceń konstrukcji. Technika ta umożliwia symulację dużych struktur z wieloma połączeniami, jednak wynikiem obliczeń jest tylko stan odkształceń [128].

Metoda skurczu (shrinkage method) - jest oparta na wykorzystaniu programu Weld Planner i umożliwia szybkie określenie odkształceń konstrukcji z dużą liczbą spawanych połączeń. Ta aplikacja służy głównie do szybkiej weryfikacji planu spawania, wprowadzaniu ewentualnych zmian oraz określenie ich wpływu na całkowite odkształcenie konstrukcji [128]. Jest to najbardziej uproszczona metoda obliczenia, w której zamiast modelu wprowadzającego ciepło stosuje się reprezentatywną siłę skurczu działającą na określony obszar złącza spawanego. Jej wartość oraz zasięg znajduje się poprzez wykonanie prostych analiz ciągłych i określenie zasięgu skurczu ciekłego metalu. Obliczenia prowadzone są zwykle na modelach powłokowych (z elementów typu "shell") a wyniki ograniczone są do rozkładów odkształceń [128].

W pakiecie VisualWeld (SYSWELD) możliwe jest prowadzenie obliczeń 4 różnymi technikami obliczeniowymi [137]:

- analizą ciągłą,
- analizą ciągłą z zastosowaniem zadanego cyklu cieplnego,
- metodą lokalno-globalną,
- metodą skurczu cieplnego.

Dane wejściowe analiz numerycznych stanowią:

- metoda spawania,
- parametry procesu spawania,
- geometria spawanego detalu,
- rodzaj materiału,
- temperatura podgrzewania wstępnego,
- liczba ściegów/złączy oraz ich lokalizacja i kolejność wykonywania,
- sposób usztywnienia konstrukcji do spawania,
- ewentualne parametry obróbki cieplnej po spawaniu [128].

Wynikami symulacji numerycznych procesów spawania mogą być:

- pola i gradienty temperatury,
- rozkłady faz w poszczególnych obszarach złącza,
- rozkłady odkształceń,
- rozkłady naprężeń,
- rozkłady twardości [128].

Po przeprowadzonych próbach spawalniczych wykonano analizy numeryczne metodą elementów skończonych dla procesów spawania laserowego, hybrydowego i metodą MAG. W tym celu wykorzystano specjalizowane oprogramowanie Visual WELD (SYSWELD), w celu weryfikacji parametrów procesu oraz porównania wpływu zastosowanych metod na rozkłady naprężeń oraz odkształceń po procesie spawania.

Model numeryczny

W oparciu o rzeczywiste wymiary materiału wsadowego do produkcji felgi specjalnej, przygotowano trójwymiarowy model numeryczny, rys.3.3.3.



Rys. 3.3.3. Widok trójwymiarowego modelu dyskretnego

Model dyskretny w przypadku spawania laserowego zawierał 100808 węzłów, 75567 elementów 3D oraz 56832 elementów typu 2D. Model dyskretny w przypadku spawania hybrydowego oraz metodą MAG, ze względu na konieczność dodania nadlewu spoiny zawierał 102538 węzłów, 78327 elementów 3D oraz 50820 elementów typu 2D.

W zależności od analizowanego procesu spawania, modele różniły się od siebie budową – w przypadku metody MAG oraz spawania hybrydowego, modelowano dodatkowo nadlew ściegu. Szczegóły ich budowy przedstawiono na rys. 3.3.4.





Rys. 3.3.4. Widok trójwymiarowego modelu dyskretnego procesu spawania: a) wiązką laserową oraz b) hybrydowego oraz metodą MAG

Siatka modelu została zagęszczona w obszarze ściegu oraz strefy wpływu ciepła tak, aby w obszarze oddziaływania źródła ciepła uzyskać wysoką precyzję prowadzonych analiz, rys. 3.3.4.

Warunek brzegowy opisujący odprowadzanie ciepła do otoczenia został zrealizowany przez określenie na wszystkich zewnętrznych powierzchniach modelu odprowadzania ciepła przez promieniowanie i konwekcyjnego odprowadzania ciepła do otoczenia w temperaturze 21°C, rys. 3.3.5 (a).

Warunek brzegowy opisujący zamocowanie spawanego elementu określono zgodnie z warunkami rzeczywistego procesu spawania, poprzez zamocowanie wzdłużne styku blach do spawania oraz wykorzystanie standardowych warunków zamocowania dla uwolnionego elementu w fazie chłodzenia, rys. 3.3.5 (b).



Rys. 3.3.5. Zdefiniowane warunki brzegowe: a) odprowadzania ciepła oraz b) zamocowania spawanego elementu

Wszystkie analizy przeprowadzono jako analizy ciągłe, przy użyciu techniki "transient" z ruchomym, definiowanym modelem źródła ciepła. Definicja modelu źródła ciepła w przypadku trzech analizowanych wariantów zależna była od wykorzystywanego rzeczywistego źródła ciepła.

Spawanie hybrydowe

W przypadku modelowania procesu spawania hybrydowego, wykorzystano dwa modele źródeł ciepła: odpowiadający wiązce laserowej, objętościowy model stożkowy o rozkładzie gaussowskim, rys. 3.3.6 (a) oraz model w kształcie podwójnej elipsoidy dla odwzorowania źródła łukowego, rys. 3.3.6 (b). W analizach wykorzystano standardowe modele źródeł ciepła, zaimplementowane w oprogramowaniu VisualWeld. Aby jednak poprawić jakość odwzorowania kształtu ściegu, wprowadzono modyfikację modelu, polegającą na dodaniu definiowanych elementów siatki modelu, które nagrzewane są standardowym modelem źródła ciepła, rys. 3.3.6 (c) i 3.3.6 (d) [135, 138].

W wyniku kalibracji modelu w oparciu o uzyskane w badaniach makrostruktury złączy, określono optymalne parametry modeli służących odwzorowaniu procesu spawania hybrydowego, tabl. 3.3.1, rys. 3.3.6.

Tabela 3.3.1. Parametry modeli źródeł ciepła zastosowanych w modelowaniu procesu spawania hybrydowego felg specjalnych

	Rodzaj źr				
	Laser	łuk elektryczny – metoda MAG	dodatkowe informacje		
rodzaj modelu źródła ciepła	trójwymiarowy stożkowy model gaussowski	model w kształcie podwójnej elipsoidy	wraz z definiowanym obszarem obciążanych elementów siatki		
wymiary modelu [mm]	górna średnica – 3.0 dolna średnica – 2.0 wysokość – 5.0	długość – 15.0 ¹⁾ szerokość – 12.0 wysokość – 2.0	_		
energia liniowa [J/mm]	175	350 ²⁾	_		
współczynnik sprawności cieplnej metody spawania [-]	0.9	0.8	_		
prędkość spawania [mm/s]	2	źródło łukowe opóźnione o 0.1 s			
UWAGI: ¹⁾ długość przedniej części elipsoidy – 5.0 mm, długość tylnej części elipsoidy – 10.0 mm; ²⁾ rozkład ciepła przednia/tylna część elipsoidy – 1.0/0.833					



Rys. 3.3.6. Zastosowane modele źródeł ciepła: a) wiązki laserowej, b) łukowego źródła ciepła oraz c) i d) widoczne obszary definiowanego nagrzewania elementów siatki (kolor czerwony)

Obliczone rozkłady pól temperatury z wykorzystaniem zaproponowanego modelu, potwierdziły dużą zgodność uzyskanej geometrii jeziorka ciekłego z obrazem makrostruktury złącza, rys. 3.3.7. Ze względu na dwa, poruszające się jednocześnie modele źródeł ciepła, nie jest możliwe przedstawienie ostatecznego kształtu jeziorka ciekłego metalu na jednym rysunku, stąd rys, 3.3.7 przedstawia kształty tych jeziorek dla każdego ze źródeł osobno.



Rys. 3.3.7. Porównanie obliczonych rozkładów ciepła: a) uzyskanych z działania wiązki laserowej i b) łukowego źródła ciepła w procesie spawania hybrydowego felgi specjalnej z c) makrostrukturą złącza oraz d) widok jeziorka ciekłego metalu na powierzchni spawanej

Spawanie laserowe

W przypadku procesu spawania laserowego felgi specjalnej, jako model źródła ciepła został wykorzystany standardowy, trójwymiarowy model stożkowy o rozkładzie gaussowskim, rys. 3.3.8 (a). W tym przypadku, nie zaistniała konieczność modyfikacji obszaru wprowadzania ciepła, rys. 3.3.8 (b). W wyniku kalibracji modelu w oparciu o uzyskane w badaniach makrostruktury złączy, określono optymalne parametry modelu stożkowego, tabl. 3.3.2, rys. 3.3.8.

Tabela 3.3.2. Parametry modelu źródła ciepła w modelowaniu procesu spawania laserowego felg specjalnych

	Rodzaj źródła ciepła	dodatkowa informacia	
	Laser	uvuaikowe mormacje	
rodzaj modelu źródła ciepła	trójwymiarowy stożkowy model gaussowski	-	
	górna średnica – 3.0		
wymiary modelu [mm]	dolna średnica – 2.0	-	
	wysokość – 5.0		
energia liniowa [J/mm]	337	_	
współczynnik sprawności	0.8		
cieplnej metody spawania [-]	0.8	_	
prędkość spawania [mm/s]	13.3	_	



Rys. 3.3.8. Zastosowany model źródła ciepła: a) wiązki laserowej oraz b) obszar definiowanego nagrzewania elementów siatki (kolor czerwony)

Obliczone rozkłady pól temperatury z wykorzystaniem zaproponowanego modelu, potwierdziły wysoką zgodność uzyskanej geometrii jeziorka ciekłego z obrazem makrostruktury złącza, rys. 3.3.9.



Rys. 3.3.9. Porównanie obliczonych rozkładów ciepła w procesie spawania laserowego felgi specjalnej z b) makrostrukturą złącza oraz c) widok jeziorka ciekłego metalu na powierzchni spawanej

Spawanie metodą MAG

W przypadku procesu spawania metodą MAG felgi specjalnej, jako model źródła ciepła został wykorzystany standardowy model w kształcie podwójnej elipsoidy, rys. 3.3.10 (a). Również w tym przypadku, do uzyskania odpowiedniego kształtu jeziorka ciekłego metalu, została wykorzystana modyfikacja obszaru elementów siatki nagrzewanych modelem źródła ciepła, rys. 3.3.10 (b). W wyniku kalibracji modelu w oparciu o uzyskane w badaniach makrostruktury złączy, określono optymalne parametry modelu stożkowego, Tabela 3.3.3, rys. 3.3.10.



Rys. 3.3.10. Zastosowany model źródła ciepła MAG oraz b) obszar definiowanego nagrzewania elementów siatki (kolor czerwony)

Tabela 3.3.3. Parametry modelu źródła ciepła w modelowaniu procesu spawania metodą MAG felg specjalnych

	Rodzaj źródła ciepła	dadatkawa informacia			
	Łuk elektryczny – metoda MAG	uouatkowe miormacje			
		wraz z definiowanym			
rodzaj modelu źródła ciepła	model w kształcie podwójnej elipsoidy	obszarem obciążanych			
		elementów siatki			
	długość – 15.0 ¹⁾				
wymiary modelu [mm]	szerokość – 12.0	_			
	wysokość – 3.0				
energia liniowa [J/mm]	800 ²⁾	—			
współczynnik sprawności	0.7	-			
cieplnej metody spawania [-]	0.7				
prędkość spawania [mm/s]	13	—			
UWAGI: ¹⁾ długość przedniej części elipsoidy – 5.0 mm, długość tylnej części elipsoidy – 10.0 mm;					
²⁾ rozkład ciepła przednia/tylna część elipsoidy – 1.0/0.833					

Porównanie obliczonego rozkładu pola temperatury z wykorzystaniem zaproponowanego modelu z obrazem makrostruktury złącza przedstawiono na rys. 3.3.11.



Rys. 3.3.11. Porównanie obliczonych rozkładów ciepła w procesie spawania metodą MAG felgi specjalnej z b) makrostrukturą złącza oraz c) widok jeziorka ciekłego metalu na powierzchni spawanej

Analizy prowadzone w oprogramowaniu VisualWeld umożliwiają również obliczenie rozkładów poszczególnych faz, wynikających z oddziaływania ciepła stosowanych metod spawania. Na rys. 3.3.12 przedstawiono porównanie rozkładów fazy początkowej, martenzytu i bainitu na przekroju poprzecznym złącza (w połowie jego długości) dla trzech analizowanych metod spawania felg specjalnych.



Rys. 3.3.12. Porównanie obliczonych rozkładów faz na przekroju poprzecznym złącza (w połowie jego długości): początkowej, martenzytu i bainitu dla wszystkich trzech analizowanych metod spawania felg specjalnych

Analizując rozkłady poszczególnych faz należy zauważyć, że rodzaj zastosowanego źródła ciepła ma swoje odzwierciedlenie zarówno w kształcie jak i wartościach maksymalnych obliczonych rozkładów.



Rys. 3.3.13. Porównanie obliczonych rozkładów odkształceń całkowitych po procesie spawania dla trzech zastosowanych metod: spawania hybrydowego, spawania laserowego oraz łukowego felg specjalnych

Obliczone rozkłady odkształceń całkowitych, przedstawione na rys. 3.3.13, wykazały, że istnieje pewna zależność odkształceń od charakteru zastosowanego źródła ciepła, jak również zwiększeniem szerokości strefy przetopionej i co się z tym wiąże wzrostem skurczu cieplnego stygnącej spoiny w przypadku metody hybrydowej oraz łukowej w porównaniu ze spawaniem laserowym. Maksymalna wartość obliczonych odkształceń w przypadku spawania hybrydowego wynosiła 1,44 mm i była blisko 55% wyższa od 0,93 mm uzyskanych w przypadku spawania laserowego. W procesie spawania metodą MAG maksymalne odkształcenie uzyskane w obliczeniach to 1,65 mm (o 78,5% więcej niż w przypadku spawania laserowego), rys. 3.3.13.



Rys. 3.3.14. Porównanie obliczonych rozkładów naprężeń średnich po procesie spawania dla trzech zastosowanych metod: spawania hybrydowego, spawania laserowego oraz łukowego felg specjalnych

Obliczone rozkłady naprężeń średnich wszystkich analizowanych wariantów spawania felg specjalnych wykazały podobny, równomierny rozkład naprężeń na długości złącza z obszarami niewielkiego wzrostu wartości na początku i końcu spoiny, rys. 3.3.14. Zaobserwowano różnice pomiędzy wartościami minimalnymi i maksymalnymi, podobnie jak w przypadku analizy odkształceń. Najniższe wartości uzyskano w procesie spawania laserowego, a następnie spawania łukowego i hybrydowego.
W przypadku analizy naprężeń zredukowanych, rozkłady naprężeń również były podobne, jednak analogicznie jak w przypadku poprzednich wielkości, w przypadku spawania laserowego, maksymalna wartość naprężenia zredukowanego była niższa niż w przypadku pozostałych metod, gdzie wielkości tej wartości były zbliżone.



Rys. 3.3.15. Porównanie obliczonych rozkładów naprężeń zredukowanych (von Mises) po procesie spawania dla trzech zastosowanych metod: spawania hybrydowego, spawania laserowego oraz łukowego felg specjalnych

Obliczone rozkłady skumulowanego odkształcenia plastycznego wykazały występowanie obszarów o największym odkształceniu plastyczny w złączach spawanych laserowo, rys. 3.3.16. Mimo, że wartość maksymalna tego odkształcenia była niższa o 55% niż w przypadku spawania hybrydowego oraz 21% niż spawania metodą MAG, na uzyskanych wynikach widoczne są znacznie większe obszary jego występowania. Na brzegach złącza wartości te są niższe w przypadku wszystkich analizowanych wariantów, a wartości maksymalne występują w środkowej części złącza. Dodatkowo maksymalna wartość ok. 12% występująca w złączu

spawanym hybrydowo, zlokalizowana jest w dolnej części ściegu, gdzie nagrzewanie odbywa się poprzez wiązkę laserową. Większe odkształcenie plastyczne w przypadku złączy spawanych laserowo jest wytłumaczeniem uzyskanych niższych wartości maksymalnych naprężeń w tych złączach, rys. 3.3.14 i 3.3.15. W każdym z analizowanych przypadków nie są to jednak wartości, które znacząco wpływają na pogorszenie własności złączy spawanych.



Rys. 3.3.16. Porównanie obliczonych rozkładów skumulowanego odkształcenia plastycznego po procesie spawania dla trzech zastosowanych metod: spawania hybrydowego, spawania laserowego oraz łukowego felg specjalnych

Przeprowadzone analizy numeryczne procesów spawania hybrydowego, laserowego oraz metodą MAG, wykazały spore zbieżności wyników, co pozwala twierdzić, że zastąpienie dotychczasowego procesu przez wysokowydajne metody spawania nie wiąże się ze znaczącymi zmianami własności produkowanych felg specjalnych, przy zwiększonej wydajności i jakości produkcji.

Analizy numeryczne procesów pozwalają w sposób precyzyjny na uzupełnienie wyników prowadzonych badań na etapie R&D, co znacząco podnosi jakość i skraca czas przygotowania zmian w produkcji.

Uzyskane wyniki wstępnych prób spawania oraz analiz numerycznych procesów spawania, porównując metodę MAG, spawanie laserowe oraz spawanie hybrydowe w kontekście produkcji felg specjalnych, można podsumować z uwagi na:

- zbieżność wyników różnych metod spawania analizy numeryczne wykazały znaczną zbieżność wyników między omawianymi metodami spawania. Oznacza to, że różne techniki spawania prowadzą do podobnych rezultatów pod względem własności mechanicznych i strukturalnych gotowych produktów, w tym przypadku felg specjalnych,
- możliwość zastąpienia procesów spawania zastąpienie obecnie stosowanych metod spawania przez bardziej wydajne techniki (np. spawanie hybrydowe lub laserowe) jest możliwe bez znaczących zmian w właściwościach końcowych produktów. To wskazuje na potencjalne korzyści ekonomiczne i produkcyjne, takie jak zwiększenie wydajności i jakości produkcji felg, ale wymaga dalszej analizy ekonomicznej projektu wdrożeniowego,
- wpływ na procesy produkcyjne analizy numeryczne mogą ulepszyć etap badawczorozwojowy w produkcji. Użycie takich analiz pozwala na dokładniejsze i szybsze przygotowanie zmian w procesie produkcyjnym, co przekłada się na wyższą jakość końcowych produktów i skrócenie czasu wprowadzania innowacji,
- znaczenie dla przemysłu z uwagi na poszukiwanie nowych technologii łączenia w produkcji felg specjalnych, wykorzystanie zaawansowanych metod spawania i analiz numerycznych może przyczynić się do poprawy efektywności produkcji oraz jakości produktów, co jest kluczowe w konkurencyjnym środowisku przemysłowym.

3.4 Próby technologiczne spawania materiałów na felgi specjalnego zastosowania

Na podstawie wyników badań wstępnych dobrano parametry procesów spawania przyjmując dla złączy jako kryterium poziom jakości B według norm:

- dla spawania łukowego PN-EN ISO 5817:2023 [112],
- dla spawania metodą laserową wg PN-EN ISO 13919-1:2020 [113],
- dla spawania metodą hybrydową wg PN-EN ISO 12932:2013 [114],
- dla zgrzewania oporowego wg PN-EN ISO 14554-1:2014 [115].

Próby technologiczne spawania stali niskowęglowych walcowanych na gorąco do przeróbki plastycznej na zimno w gatunku DD11 i DD14 wykonano:

- metodą zgrzewania doczołowego oporowego,
- metodą MAG,
- metodą MAG z podwójnym pulsem,
- laserem,
- hybrydowo laser + MAG.

Spawanie metodą MAG oraz zgrzewanie wykonano w zakładzie produkcyjnym Yokohama-TWS Liepaja na Łotwie, natomiast próby spawania metodą MAG z podwójnym pulsem, spawania laserowego oraz spawania w układzie hybrydowym wykonano w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Parametry procesów zgrzewania i spawania dobrano na podstawie badań własnych [3] i danych literaturowych [120].

3.4.1 Dobór parametrów technologicznych spawania i zgrzewania

Próby zgrzewania przeprowadzono na stanowisku do spawania felg specjalnych o średnicy poniżej 20" (rys. 3.4.1.1), wyposażonym w zgrzewarki marki Bobo Machine. Łączone blachy były ukosowane na "I". Czas zgrzewania wynosił 10 sekund a siła docisku 500kN – wykres procesu zgrzewania tj. siły docisku w funkcji czasu przedstawiono na rys. 3.4.1.2. Parametry procesu zostały dobrane na podstawie praktyki przemysłowej w firmie Yokohama-TWS Liepaja.



Rys. 3.4.1.1. Stanowisko do zgrzewania felg specjalnego zastosowania o średnicy poniżej 20": a – widok ogólny, b – szczęki dociskowe z zamontowanym cylindrem do zgrzewania



Rys. 3.4.1.2. Wykres zmiany siły docisku oraz prądu zwarcia podczas zgrzewania doczołowego oporowego felg specjalnych

Próby spawania metodą MAG przeprowadzono na stanowisku do spawania felg specjalnych o średnicy powyżej 20" (rys. 3.4.1.3), wyposażonym w:

- stanowisko spawalnicze Kemec Weld,
- podajnika drutu spawalniczego Feed 3004 marki ESAB,



Rys. 3.4.1.3. Stanowisko do spawania felg specjalnego zastosowania o średnicy powyżej 20": a – widok ogólny, b – szczęki dociskowe z zamontowanym cylindrem do spawania

Blachy były ukosowane na "I", odstęp pomiędzy łączonymi blachami wynosił 2 mm. Jako materiał dodatkowy stosowano drut o średnicy 1,2 mm w gatunku G4Si1 marki ESAB Autrod 12.64 o składzie C 0,074%, Mn 1,68% Si 0,95% podawany z prędkością 6,1 m/min. Spawanie przeprowadzono w osłonie mieszanki M21 oznaczonej jako Mison 18 o składzie Ar 81,97%, CO₂ 18%, NO 0,03% i przepływie 151/min. Średni prąd spawania wynosił 327A, a napięcie łuku 32,2V. Prędkość spawania wynosiła 0,65m/min.

Próby spawania metodą MAG z podwójnym pulsem przeprowadzono na stanowisku spawalniczym w Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach (rys. 3.4.1.4), wyposażonym w urządzenie TPS 500i marki Fronius [139].



Rys. 3.4.1.4. Stanowisko do spawania metodą MAG z podwójnym pulsem: a – prowadnica liniowa uchwytu spawalniczego, b – urządzenie spawalnicze TPS500i marki Fronius z podajnikiem drutu

Blachy były ukosowane na "I", odstęp pomiędzy łączonymi blachami wynosił 2,4 mm. Jako materiał dodatkowy stosowano drut o średnicy 1mm w gatunku G3Si1 marki ESAB Autrod 12.51 o składzie C 0,078%, Mn 1,46% Si 0,85% podawany z prędkością 7,2 m/min. Spawanie przeprowadzono w osłonie mieszanki M21 oznaczonej jako Ferroline C18 o składzie Ar 82%, CO₂ 18% i przepływie 16 l/min. Prąd spawania wynosił 140A, a napięcie łuku 20,8V. Prędkość spawania wynosiła 1,2m/min.

Próby spawania metodą laserową przeprowadzono na stanowisku spawalniczym (rys. 3.4.1.5), wyposażonym w stół uchylno-obrotowy z możliwością pozycjonowania elementów spawanych, 6-cio osiowy robot przemysłowy o powtarzalności pozycjonowania min. 0,15 mm firmy KUKA KR30HA oraz laser dyskowy firmy Trumpf - TruDisk 12002 wyposażony w system światłowodów o średnicy 200 μm, 300 μm, 400 μm i 600 μm, umożliwiających połączenie rezonatora z głowicą spawalniczą. Blachy były ukosowane na "I" bez odstępu. Połączenie rezonatora z głowicą było realizowane za pomocą światłowodu o średnicy 300 μm. Spawanie przeprowadzono w osłonie argonu o przepływie 16l/min. Moc lasera wynosiła 4,5kW, a prędkość spawania 0,8 m/min.



Rys. 3.4.1.5. Zrobotyzowane stanowisko do spawania laserowego z laserem dyskowym TruDisk 12002: a – widok ogólny, b – głowica D70 do spawania laserowego i hybrydowego zintegrowana z robotem przemysłowym

Próby spawania metodą hybrydową laser + MAG przeprowadzono na stanowisku spawalniczym (rys. 3.4.1.5), wyposażonym w robot przemysłowy KUKA KR30HA oraz głowicę spawania hybrydowego opartej na klasycznej głowicy D70 firmy Trumpf. Jako źródło łukowe źródło prądu spawania zastosowano źródło prądu EWM wyposażone w programy do pracy w trybie synergicznym (rys. 3.4.1.6 b i c). Układ sterowania źródłem został zintegrowany

programowo z kontrolerem robota. Blachy były ukosowane na "I" bez odstępu. Jako materiał dodatkowy stosowano drut o średnicy 1.2mm w gatunku G4Si1 marki ESAB Autrod 12.51 podawany z prędkością 8,5m/min. Spawanie przeprowadzono w osłonie mieszanki M21 oznaczonej jako Ferroline C18 i przepływie 16 l/min. Prąd spawania wynosił 270A, napięcie łuku 26V, prędkość spawania 1,2 m/min, moc lasera 3,5kW, a odległość od miejsca ogniskowania wiązki lasera do środka łuku elektrycznego drutu wynosiła 2 mm.



Rys. 3.4.1.6. Laserowa głowica do spawania laserowego i hybrydowego laser + MIG/MAG (a); źródło prądu EWM metody MIG/MAG (b); przykładowa lista programów pracy urządzenia w trybie synergicznym (c)

3.4.2 Określenie cyklu cieplnego

Zmiany temperatury w funkcji czasu podczas spawania laserowego i hybrydowego laser + MAG określono podczas spawania na stanowisku w Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach (rys. 3.4.2.1 a). Przykładowe wyniki dla spawania laserowego przedstawiono na rys. 3.4.2.2 natomiast na rys. 3.4.2.3 dla metody hybrydowej. Miejsce mocowania termopar pokazano na rys. 3.4.2.1 b



Rys. 3.4.2.1. Stanowisko do badania cyklu cieplnego spawania (a); próbka ze stali DD11, z zamocowanymi termoparami (b)



Rys. 3.4.2.2. Przykładowy cykl cieplny podczas spawania laserowego stali DD11

Na podstawie analizy wyników cyklu cieplnego dla spawania laserowego, stwierdzono że obszar znajdujący się w odległości 5 mm od spoiny, nagrzewa się do temperatury maksymalnej

wynoszącej około 310°C, natomiast w odległości 10 i 15 mm od osi spoiny temperatury te wynoszą odpowiednio 220 i 155°C.



Rys. 3.4.2.3. Przykładowy cykl cieplny podczas spawania hybrydowego laser + MAG dla stali DD11



Rys. 3.4.2.4. Przykładowy cykl cieplny podczas spawania MAG dla stali DD11

Zarejestrowany cykl cieplny dla spawania MAG stali DD11 pokazano na rys. 3.4.2.4. Na rys. 3.4.2.5 przedstawiono przykład cyklu cieplnego podczas spawania MAG z podwójnym pulsem, a na rys. 3.4.2.6 przedstawiono cykl cieplny zgrzewania zarejestrowany podczas procesu produkcyjnego w zakładzie Yokohama-TWS na Łotwie.



Rys. 3.4.2.5. Przykładowy cykl cieplny podczas spawania MAG z podwójnym pulsem dla stali DD11



Rys. 3.4.2.6. Przykładowy cykl cieplny dla zgrzewania stali DD11, zarejestrowany w zakładzie Yokohama-TWS na Łotwie podczas procesu produkcyjnego.

3.5 Wyniki badań

Badania złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 zgrzewanych oraz spawanych metodami MAG, MAG z podwójnym pulsem, hybrydowo i laserowo wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 3.2. Badania obejmowały badania nieniszczące, w tym badania wizualne, radiograficzne i penetracyjne oraz badania niszczące, a w szczególności metalograficzne, badania właściwości mechanicznych i właściwości użytkowych złączy w odniesieniu do materiału rodzimego.

3.5.1 Wyniki badań nieniszczących połączeń spawanych felg specjalnego zastosowania

Badania wizualne (VT) wykonane zgodnie z normą PN-EN ISO 17637, badania penetracyjne wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 3452-1:2021, a badania radiograficzne (RT) wykonane zgodnie z normą PN-EN ISO 17636-1:2013. Złącza spawane zostały kwalifikowane do poziomu jakości B według norm:

- dla spawania łukowego PN-EN ISO 5817:2023 [112],
- dla spawania metodą laserową wg PN-EN ISO 13919-1:2020 [113],
- dla spawania metodą hybrydową wg PN-EN ISO 12932:2013 [114],
- dla zgrzewania oporowego wg PN-EN ISO 14554-1:2014 [115].

3.5.2 Wyniki badań metalograficznych połączeń spawanych felg specjalnego zastosowania

Próbki do badań metalograficznych pobrano zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2022. Badania metalograficzne wykonano dla trzech typowych obszarów złączy tj.: materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny. W tabeli 3.5.2.1. zestawiono podstawowe parametry opisujące makrostrukturę wykonanych złączy. Pomiary makrostruktury zostały wykonane w programie METIlo opracowanym w Katedrze Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej. Przykładowe mikro i makro struktury złącza spawanymi poszczególnymi metodami przedstawiono na rysunku 3.5.2.1.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że kształt geometryczny poszczególnych złączy jest różny w zależności od zastosowanej technologii. Jest to spowodowane koncentracją energii liniowej podczas wykonywania złączy oraz cyklem cieplnym spawania. Złącze zgrzewane charakteryzuje się równomierną szerokością na całym przekroju. Wskaźnik szerokości zgrzeiny rozumiany jako stosunek szerokości lica do szerokości grani wynosi tylko 0,13 a wskaźnik kształtu opisany jako wysokość zgrzeiny do jej największej szerokości jest na poziomie 1,07. W przypadku złącza zgrzewanego jako wymiary zgrzeiny przyjęto szerokość gruboziarnistej strefy odkształconej plastycznie w procesie zgrzewania. Szerokość strefy wpływu ciepła jest równomierna na całym przekroju i wynosi ok. 5,7 mm. Po usunięciu wypływki złącze to charakteryzuje się bardzo małą wysokością lica i grani, odpowiednio 0,6 mm i 0,5 mm (rys. 3.5.2.1a, tabl. 3.5.2.1).

Złącze wykonane metodą MAG ma charakterystyczny kształt dla spawania łukowego (rys. 3.5.1.1b). Wskaźnik kształtu spoiny wynosi 0, 72, co świadczy o znacznie większej szerokości w stosunku do wysokości spoiny. Potwierdza to również wskaźnik szerokości spoiny na poziomie 1,46. Spoina w połowie wysokości ma szerokość 6,7 mm, co wskazuje na znaczne stopienie brzegów łączonego materiału. Wysokość lica jest na poziomie 1,8 mm a wysokość grani wynosi 1,3 mm.

	Makrostruktura złącza	Wysokość, [mm]/ Szerokość, [mm] Wskaźnik kształtu spoiny	Szerokość lica, [mm] / szerokość grani [mm] Wskaźnik szerokości spoiny	Szerokość spoiny w połowie wysokości [mm]	Wysokość lica [mm] / Wysokość grani spoiny [mm] Wskaźnik szerokości lico/grań	Szerokość SWC [mm]
wane		7,2	5,3		0,6	
ie zgrze		6,7	4,0	4,9	0,5	5,7
Złącz	[5 mm]	1,07	1,32		1,2	
MAG		8,3	11,5		1,8	
awane		11,5	7,9	6,7	1,3	2,3
ącze sp		0.72	1.46		1 38	,
G Zł	5 mm	0,72	1,40		1,50	
e MA	The Market	9,7	14,0		1,3	
spawan Puls		14,0	6,2	3,0	2,1	2,8
Złącze s	5 mm	0,69	2,25		0,62	
ne		6,5	4,9		-0,4	
spawa erowo		5.1	4.3	3.2	0.3	1.5
Aącze lase		0,1	.,e	-,-	0,0	_,-
Z	1	1,27	1,14		1,33	
ane		7,9	6,7		1,8	
spawa		6.7	2.8	3.3	0.7	2.4
łącze hybr			_,0	-,-		-, -
Z	5 mm	1,17	2,39		2,57	

Tabela 3.5.2.1. Parametry opisujące makrostrukturę wykonanych połączeń

	Złącze zgrzewane (a)	Złącze spawane MAG (b)	Złącze spawane MAG Puls (c)	Złącze spawane laserowo (d)	Złącze spawane hybrydowo (e)
Makrostruktura		L S mm			E mm
Mikrostruktura SWC				100 ar	
Mikrostruktura spoiny	90 M	10 m	20. M		20 un

Próbki do badań metalograficznych pobrano zgodnie z normą PN-EN ISO 17639:2022

Rys. 3.5.2.1. Mikro i makro struktury wykonanych połączeń: a) zgrzewanych, b) spawanych metodą MAG, c) spawanych metodą MAG z podwójnym pulsem, d) spawanych laserowo, e) spawanych metodą hybrydową

Szerokość strefy wpływu ciepła w połowie wysokości spoiny wynosi 2,3 mm, co jest wynikiem oddziaływania cyklu cieplnego spawania (tabl. 3.5.2.1).

Badania kształtu złącza spawanego metodą MAG z pulsem ujawniły znaczące przewężenie spoiny w części środkowej, szerokość spoiny w połowie wysokości wynosi 3,0 mm a szerokość lica aż 14 mm (rys. 3.5.2.1c, tabl. 3.5.2.1). Obserwowano również duży wyciek od strony grani o wysokości 2,1 mm. Taki kształt spoiny jest niekorzystny z punktu widzenia właściwości mechanicznych. Szerokość strefy wpływu ciepła wynosi 2,8 mm.

Makrostruktura złącza spawanego laserowo z pełnym przetopieniem jest podobna do złącza zgrzewanego (rys. 3.5.2.1a,d). Spoina charakteryzuje się równomiernym kształtem (wskaźnik kształtu spoiny 1,27, wskaźnik szerokości spoiny 1,14), szerokością na poziomie 3,2 mm oraz wąską strefa wpływu ciepła o szerokości 1,5 mm. Ujawniono w badanym złączu zaniżenie lica na poziomie 0,4 mm, co jednak nie powinno obniżać właściwości mechanicznych w zakresie pracy felg specjalnych (tabl.3.5.2.1).

Połączenie spawania laserowego i spawania metodą MAG (złącze hybrydowe) powoduje powstanie spoiny o klasycznym kształcie, łączącym w sobie równomierny kształt spoiny wykonanej metodą MAG oraz wąskiej spoiny laserowej (rys. 3.5.2.1.e). W efekcie tego procesu otrzymujemy spoinę o wskaźniku kształtu 1,17 oraz wskaźniku szerokości spoiny na poziomie 2,39. Szerokość spoiny w połowie jej wysokości wynosi 3,3 mm a szerokość strefy wpływu ciepła wynosi 2,4 mm. Jest to korzystny kształt spoiny z równomiernym rozkładem SWC (tabl. 3.5.2.1). W obszarze spoiny ujawniano liczne pęcherze, które powstają w wyniku zbyt szybkiej krystalizacji spoiny i braku możliwości odgazowania się ciekłego metalu.

Badania mikrostruktury złącza zgrzewanego wykonane na mikroskopie świetlnym (LM) (rys. 3.5.2.1a) zostały uzupełnione obserwacjami na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) (rys. 3.5.2.2). Na podstawie obserwacji strefy wpływu ciepła stwierdzono typowe ferrytyczno-perlityczne struktury przegrzania (rys. 3.5.2.1.a), tj. gruboziarnistą strukturę w układzie Widmanstättena (rys. 3.5.2.2a), strukturę strefy normalizacji (rys. 3.5.2.2b,) oraz obszar niepełnej normalizacji. Są to klasyczne struktury wynikające z cyklu cieplnego procesu zgrzewania.

W złączu wykonanym metodą MAG obserwowano typowe struktury spawalnicze. W spoinie ujawniono strukturę ferrytyczno-perlityczną w układzie kryształów pierwotnych narastających w kierunku odprowadzenia ciepła, prostopadle do linii wtopienia (rys. 3.5.2.1b). W spoinie obserwowano ferryt poligonalny oraz ferryt bocznopłytkowy i ferryt drobnoziarnisty (rys. 3.5.2.3a), natomiast SWC składała się ze strefy przegrzania, strefy normalizacji oraz niepełnej normalizacji podobnie jak w przypadku zgrzewania (rys. 3.5.2.3b).



Rys. 3.5.2.2. Mikrostruktura połączenia zgrzewanego: a) strefa przegrzania w układzie Widmanstättena, b) strefa normalizacji w SWC



Rys. 3.5.2.3. Mikrostruktura połączenia wykonanego metodą MAG: a) obszar spoiny z widocznym ferrytem poligonalnym oraz ferrytem drobnoziarnistym, b) strefa wpływu ciepła z obszarami niepełnej normalizacji

Spawanie metodą MAG z pulsem wiąże się z obniżeniem ilości wprowadzonej energii, co jest spowodowane wykorzystaniem łuku natryskowego o natężeniu prądu mniejszym od natężenia prądu krytycznego. Mniejsza ilość wprowadzonej energii zmienia również cykl cieplny spawania. W badanym złączu stwierdzono w spoinie struktury ferrytyczno-perlityczne narastające w układzie kryształów pierwotnych prostopadle do powierzchni stopienia (rys. 3.5.2.1c). W części środkowej spoiny nie obserwowano obszaru o ziarnach równoosiowych. Cechą charakterystyczną spoiny było jej przewężenie od strony grani oraz duży wyciek w grani . Struktura spoiny jest zbudowana z ferrytu drobnoziarnistego z niewielką ilością ferrytu poligonalnego (rys. 3.5.2.4a), natomiast w strefie wpływu ciepła ujawniono struktury ferrytyczno- perlityczne z obszarami bainitu (rys. 3.5.2.4b).



Rys. 3.5.2.4. Mikrostruktura połączenia wykonanego metodą MAG z pulsem: a) obszar spoiny ferryt drobnoziarnisty, b) strefa wpływu ciepła z obszarami bainitycznymi

Mikrostruktura złączy ze stali DD11 i DD14 wykonanych laserem jest bardzo podobna. Nie ujawniono istotnych różnic pomiędzy tymi złączami. Obserwowana struktura jest typowa dla spawania wiązką laserową o skoncentrowanej energii, która powoduje bardzo szybkie nagrzewanie i topienie materiału a następnie krystalizację kierunkową kryształów w spoinie. W obszarze spoiny kryształy pierwotne narastają prostopadle do linii wtopienia tworząc w środku spoiny linię styku kryształów pierwotnych. Krzyształy te zbudowane ze złożonych struktur ferrytyczno-perlitycznych, w tym obszarów martenzytu i bainitu oraz ferrytu drobnoziarnistego (rys. 3.5.2.5a) natomiast w strefie wpływu ciepła ujawniono znaczne rozdrobnienie struktury ferrytyczno-perlitycznej (rys. 3.5.2.1d, 3.5.2.5b).



Rys. 3.5.2.5. Mikrostruktura połączenia spawanego laserowo: a) obszar spoiny z widocznym ferrytem Widmanstättena i obszarami martezytyczno-bainitycznymi,
b) drobnoziarnisty obszar SWC

Badania mikrostrukturalne złącza wykonanego metodą hybrydową (laser+MAG) ujawniły typowe złącze, zbudowane z materiału rodzimego o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, strefę wpływu ciepła, w której ujawniono struktury wynikające ze złożonego cyklu cieplnego spawania hybrydowego, w tym gruboziarnista strefę przegrzania, strefę normalizacji oraz strefę niepełnej normalizacji (rys. 3.5.2.6b). Natomiast w spoinie obserwowano złożony układ struktur ferrytycznych. Ujawniono ferryty poligonalny, ferryt boczno-płytkowy oraz ferryt drobnoziarnisty (rys. 3.5.2.6a). Struktur te zorientowane są zgodnie z budową kryształów pierwotnych narastających prostopadle do powierzchni stopienia, zgodnie z kierunkiem odprowadzenia ciepła (rys. 3.5.2.1e).



Rys. 3.5.2.6. Mikrostruktura połączenia spawanego hybrydowo (laser + MAG): a) obszar spoiny z widocznym ferrytem Widmanstättena i obszarami martezytycznobainitycznymi, b) drobnoziarnisty obszar SWC

Uzupełnieniem badań metalograficznych była mikroanaliza składu chemicznego EDS ujawnionych w strukturze złączy nielicznych wydzieleń i wtrąceń. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 3.5.2.7. Uzyskane wyniki potwierdziły występowanie typowych wtrąceń niemetalicznych w spoinach tj. faz bogatych w siarkę i mangan, prawdopodobnie MnS (rys. 3.5.2.7a), faz bogatych w aluminium, prawdopodobnie tlenku aluminium (rys. 3.5.2.7b) oraz faz bogatych w krzem, prawdopodobnie jest to SiO₂ (rys. 3.5.2.7c) oraz złożonych spineli tlenkowych. Wszystkie te wydzielenia są o morfologii kulistej a ich średnica nie przekracza 10μm, co wskazuje, że nie mają one istotnego na właściwości mechaniczne wykonanych złączy.



Rys. 3.5.2.7. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS wydzieleń ujawnionych w spoinach: a) faza bogata w siarkę i mangan, b) faza, w której ujawniono aluminium i tlen, c) wydzielenie z podwyższoną zawartością krzemu i tlenu

Na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych stwierdzono, że wszystkie obserwowane struktury są podobne. Spoiny składają się z mieszanych struktur ferrytyczno perlitycznych w układzie kryształów pierwotnych nastrajających prostopadle do linii wtopienia, natomiast w SWC ujawniono złożone struktury wynikające z cyklu cieplnego poszczególnych metod spawania. Ujawniono strefę przegrzania, strefę normalizacji oraz strefę niepełnej normalizacji. Materiał rodzimy charakteryzował się strukturą ferrytyczną z nielicznymi obszarami kolonii perlitycznych.

3.5.3 Wyniki badań mechanicznych złączy spawanych felg specjalnego zastosowania

Próba statycznego rozciągania złączy przeprowadzona została zgodnie z normą PN-EN ISO 4136:2022 w temperaturze 20°C. Przykładowe próbki po zerwaniu przedstawiono na rys. 3.5.3.1. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 3.5.3.1 oraz przedstawiono na wykresie rys. 3.5.3.2.



Rys. 3.5.3.1. Przykładowe próbki po statycznej próbie rozciągania spawane a) laserowo dla stali DD11, b) hybrydowo dla stali DD14

Tabela 3.5.3.1.	Wyniki badań	dla	statycznej	próby	rozciągania	złączy	doczołowych	ze	stali
	DD11 i DD14								

	Statyczna próba rozciągania							
		Wymia	ry	Pozo	ingonia	*Mieisce		
In	Oznaczenie próbki	$t_s x b_o S_0$		KOZC	iągame	zerwania /		
цр.	Oznaczenie probki	(mm)	(mm^2)	Fm	Rm	Llwagi		
		(IIIII)	(mm)	(kN)	(MPa)	Owugi		
1	1.3 DD14 MAG PULS	5,00 x 25,4	127,00	39	310	MR		
2	1.2 DD14 MAG PULS	5,00 x 24,5	122,50	41	338	MR		
3	2.3 DD11 MAG PULS	5,00 x 24,9	124,50	51	408	MR		
4	2.2 DD11 MAG PULS	5,05 x 25,1	126,76	52	407	MR		
5	3.3 DD11 LASER	5,05 x 25,2	127,26	50	396	MR		
6	3.2 DD11 LASER	5,05 x 25,2	127,26	51	397	MR		
7	4.3 DD14 LASER	5,04 x 25,5	128,52	39	300	MR		
8	4.2 DD14 LASER	5,08 x 25,3	128,52	39	304	MR		
9	5.3 DD14 HLAW	5,05 x 25,4	128,27	40	310	MR		
10	5.2 DD14 HLAW	5,02 x 25,4	127,51	40	311	MR		
11	6.3 DD11 HLAW	5,02 x 25,7	129,01	51	395	MR		
12	6.2 DD11 HLAW	5,05 x 24,8	125,24	49	394	MR		
13	7.3 DD11 MAG	5,03 x 25,0	125,25	51	407	MR		
14	7.2 DD11 MAG	4,93 x 25,1	123,25	51	415	MR		
15	8.3 DD14 MAG	4,92 x 24,9	122,51	40	326	MR		
16	8.2 DD14 MAG	4,91 x 25,0	122,26	40	326	MR		
17	9.3 DD14 ZGRZEW	5,00 x 25,2	126,00	40	321	MR		
18	9.2 DD14 ZGRZEW	5,00 x 25,1	125,50	41	327	MR		
19	10.3 DD11 ZGRZEW	5,00 x 25,4	127,00	50	396	MR		
20	10.2 DD11 ZGRZEW	5,05 x 25,2	126,76	51	401	MR		

*MR - materiał rodzimy, S – spoina, SWC – strefa wpływu ciepła



Rys. 3.5.3.2. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 spawanych poszczególnymi metodami

zgodnie Próbę zginania doczołowych przeprowadzono złączy Ζ normą PN-EN ISO 5173:2023. Do wykorzystano badań maszynę wytrzymałościową QC-501A2. Wymiary próbek wynosiły 5,0 x 20,0mm, temperatura badania 20°C, trzpień gnący 20mm, a kąt gięcia 180°. Wyniki zestawiono w tabeli 3.5.3.2. Przykładowe próbki po próbie zginania przedstawiono na rys. 3.5.3.3.



Rys. 3.5.3.3. Przykładowe próbki dla spawania metodą hybrydową laser + MAG po próbie zginania dla stali: a) DD11, b) DD14

Próba zginania							
Lp.	Oznaczenie próbki	Kąt gięcia	Uwagi				
1	1.1 Lico - DD14 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
2	1.2 Lico - DD14 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
3	1.3 Grań - DD14 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
4	1.4 Grań - DD14 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
5	2.1 Lico - DD11 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
6	2.2 Lico - DD11 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
7	2.3 Grań - DD11 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
8	2.4 Grań - DD11 MAG PULS	180°	Brak pęknięć				
9	3.1 Lico - DD11 LASER	180°	Brak pęknięć				
10	3.2 Lico - DD11 LASER	180°	Brak pęknięć				
11	3.3 Grań - DD11 LASER	180°	Brak pęknięć				
12	3.4 Grań - DD11 LASER	180°	Brak pęknięć				
13	4.1 Lico - DD14 LASER	180°	Brak pęknięć				
14	4.2 Lico - DD14 LASER	180°	Brak pęknięć				
15	4.3 Grań - DD14 LASER	180°	Brak pęknięć				
16	4.4 Grań - DD14 LASER	180°	Brak pęknięć				
17	5.1 Lico - DD14 HLAW	180°	Brak pęknięć				
18	5.2 Lico - DD14 HLAW	180°	Brak pęknięć				
19	5.3 Grań - DD14 HLAW	180°	Brak pęknięć				
20	5.4 Grań - DD14 HLAW	180°	Brak pęknięć				
21	6.1 Lico – DD11 HLAW	180°	Brak pęknięć				
22	6.2 Lico – DD11 HLAW	180°	Brak pęknięć				
23	6.3 Grań – DD11 HLAW	180°	Brak pęknięć				
24	6.4 Grań – DD11 HLAW	180°	Brak pęknięć				
25	7.1 Lico - DD11 MAG	180°	Brak pęknięć				
26	7.2 Lico - DD11 MAG	180°	Brak pęknięć				
27	7.3 Grań - DD11 MAG	180°	Brak pęknięć				
28	7.4 Grań - DD11 MAG	180°	Brak pęknięć				
29	8.1 Lico - DD14 MAG	180°	Brak pęknięć				
30	8.2 Lico - DD14 MAG	180°	Brak pęknięć				
31	8.3 Grań - DD14 MAG	180°	Brak pęknięć				
32	8.4 Grań - DD14 MAG	180°	Brak pęknięć				
33	9.1 Lico - DD14 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
34	9.2 Lico - DD14 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
35	9.3 Grań - DD14 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
36	9.4 Grań - DD14 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
37	10.1 Lico - DD11 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
38	10.2 Lico - DD11 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
39	10.3 Grań - DD11 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				
40	10.4 Grań - DD11 ZGRZEW	180°	Brak pęknięć				

Tabela 3.5.3.2. Wyniki próby zginania złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14

Pomiary twardości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-2:2016. Wyniki pomiarów twardości na przekroju poprzecznym złączy przedstawiono w tabeli 3.5.3.3 oraz na wykresie rys. 3.5.3.4 dla stali DD11 oraz rys. 3.5.3.5 dla stali DD14.

	Pomiar twardości																
In	Oznaczania próbli	Linia nomiarowa		MR			SWC		S	SPOINA	ł		SWC			MR	
Lp.	Oznaczenie probki	Line poinaiowa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.1 DD11 ZGRZEW	А	125	127	128	129	129	126	141	141	149	125	126	129	126	131	126
2	1.2 DD11 ZGRZEW	В	118	122	121	129	129	124	144	147	157	125	128	126	124	125	124
3	2.1 DD14 ZGRZEW	А	105	109	107	106	107	108	122	124	121	108	105	106	107	108	110
4	2.2 DD14 ZGRZEW	В	105	105	108	109	109	109	120	121	117	108	109	105	108	108	109
5	3.1 DD11 MAG	А	124	128	123	142	144	146	164	165	173	147	145	143	120	129	123
6	3.2 DD11 MAG	В	122	122	123	144	147	140	173	161	167	146	149	141	120	124	123
7	4.1 DD14 MAG	А	102	102	105	122	119	124	163	162	159	124	120	117	105	102	102
8	4.2 DD14 MAG	В	102	108	105	125	116	132	165	171	155	118	123	118	101	104	105
9	5.1 DD11 MAG PULS	А	124	123	121	137	141	151	179	187	177	157	142	129	126	127	121
10	5.2 DD11 MAG PULS	В	122	129	126	157	157	160	187	191	184	162	142	142	129	128	129
11	6.1 DD14 MAG PULS	А	104	112	109	118	124	131	179	177	184	117	130	127	114	113	110
12	6.2 DD14 MAG PULS	В	110	110	109	126	124	129	174	180	187	132	128	128	113	110	115
13	7.1 DD11 LASER	А	124	128	131	148	151	161	180	198	192	154	145	139	132	131	128
14	7.2 DD11 LASER	В	128	128	135	154	153	163	191	185	190	154	147	142	135	133	133
15	8.1 DD14 LASER	А	105	101	100	122	125	140	173	169	171	127	121	117	102	102	101
16	8.2 DD14 LASER	В	102	105	102	118	121	127	162	153	157	123	121	121	100	99	102
17	9.1 DD11 HLAW	А	127	129	130	133	137	149	184	180	185	135	137	130	131	128	130
18	9.2 DD11 HLAW	В	132	128	129	131	134	136	183	178	184	130	137	132	129	126	127
19	10.1 DD14 HLAW	А	107	110	110	117	127	137	168	167	169	119	119	114	111	106	104
20	10.2 DD14 HLAW	В	102	108	111	117	118	121	162	162	162	121	114	120	112	109	109

Tabela 3.5.3.3. Wyniki pomiarów twardości złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14

Dla każdej próbki spawanej badanymi metodami łączenia pomiar twardości wykonano wzdłuż linii pomiarowej A i B, oddalonej 2 mm od krawędzi próbki. Odciski wykonano w spoinie, strefie wpływu ciepła oraz w materiale rodzimym po trzy w każdej strefie.



Rys. 3.5.3.4. Rozkład twardości dla poszczególnych metod spawania w badanych złączach ze stali DD11



Rys. 3.5.3.5. Rozkład twardości dla poszczególnych metod spawania w badanych złączach ze stali DD14

Badanie udarności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 148-1:2017 za pomocą młota udarnościowego typu RKP 450 firmy ZWICK. Wyniki zestawiono w tabeli 3.5.3.4. Średnią udarność złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 w temperaturze 20°C przedstawiono graficznie na wykresie rys. 3.5.3.6, a wyniki badań udarności w temperaturze - 40°C na wykresie rys. 3.5.3.7.

Próba udarnościowa							
		Wymi	ary	Temp.	Praca	Udamacíć	
In	Materiał próbki	$b_0 \ge h_0$	S_0	próby	łamania	Udarnosc	
Lp.		(mm)	(mm^2)	$t(^{\circ}C)$	K	KC	
		(11111)	(11111)	ι(C)	(J)	(J/cm^2)	
1	DD11 ZGRZEWANIE	2,5 x 8,0	20	20	29	145	
2	DD11 MAG	2,5 x 8,0	20	20	28	140	
3	DD11 MAG PULS	2,5 x 8,0	20	20	29	145	
4	DD11 LASER	2,5 x 8,0	20	20	30	150	
5	DD11 HLAW	2,5 x 8,0	20	20	29	145	
6	DD11 ZGRZEWANIE	2,5 x 8,0	20	-40	26	130	
7	DD11 MAG	2,5 x 8,0	20	-40	30	150	
8	DD11 MAG PULS	2,5 x 8,0	20	-40	28	140	
9	DD11 LASER	2,5 x 8,0	20	-40	31	155	
10	DD11 HLAW	2,5 x 8,0	20	-40	28	140	
11	DD14 ZGRZEWANIE	2,5 x 8,0	20	20	30	150	
12	DD14 MAG	2,5 x 8,0	20	20	31	155	
13	DD14 MAG PULS	2,5 x 8,0	20	20	36	180	
14	DD14 LASER	2,5 x 8,0	20	20	32	160	
15	DD14 HLAW	2,5 x 8,0	20	20	36	180	
16	DD14 ZGRZEWANIE	2,5 x 8,0	20	-40	32	160	
17	DD14 MAG	2,5 x 8,0	20	-40	35	175	
18	DD14 MAG PULS	2,5 x 8,0	20	-40	32	160	
19	DD14 LASER	2,5 x 8,0	20	-40	25	125	
20	DD14 HLAW	2,5 x 8,0	20	-40	36	180	

Tabela 3.5.3.4. Wyniki próby udarności złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14



Rys. 3.5.3.6. Wyniki pomiarów udarności w temperaturze 20°C złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 spawanych poszczególnymi metodami



Rys. 3.5.3.7. Wyniki pomiarów udarności w temperaturze -40°C złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 spawanych poszczególnymi metodami

3.5.4 Badania własności użytkowych

Jako kryterium oceny właściwości użytkowych złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 przyjęto poziom odporności na korozję w mgle solnej oraz atmosferze zawierającej związki siarki. Badanie odporności korozyjnej w komorze solnej prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2023 i metodyką opisaną w rozdziale 3.2.4. Przyspieszone badanie odporności korozyjnej w komorze Koesternicha w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 22479:2022 i metodyką opisaną w rozdziale 3.2.4. Wyniki badań pokazano zbiorczo, odpowiednio na rys. 3.5.4.1-3.5.4.5 oraz w tabeli 3.5.4.1.i tabl. 5.4.4.2 dla korozji w komorze solnej i na rys. 3.5.4.6-3.5.4.10 oraz w tabeli 3.5.4.3 i w tabl. 3.5.4.4 dla badań w komorze Koesternicha.

Jednostkowe zmiany masy próbki wyciętej z badanych złączy zgrzewanych i spawanych metodą MAG, MAG z podwójnym pulsem, laserowo i hybrydowa wskazują, że odporność na korozję w mgle solnej jest na podobnym poziomie (rys. 3.5.4.1). Stwierdzono, że korozja zachodzi równomiernie na całym obszarze złączy, bez szczególnego wyróżnienia materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła czy też spoiny (tabl. 3.5.4.1, tabl.3.5.4.2). Kinetyka korozji jest typowa dla stali niskowęglowych i jest zgodna z parabolicznym prawem utleniania (rys. 3.5.4.1). W początkowej fazie narastają warstwowo produkty korozji na całej powierzchni złącza (rys. 3.5.4.2a). Produkty korozji są popękane i ułożone warstwowo (rys. 3.5.4.2b), a po 720 h ekspozycji mają tendencję do odpadania i tym samym odsłaniania materiału złącza, który charakteryzuje się rozwiniętą powierzchnią ze względu na wcześniejszy proces korozji i ujawnione wżery. Wyniki badań mikroanalizy składu chemicznego EDS potwierdzają, że są to głównie złożone tlenki żelaza oraz produkty zawierające chlor i sód, FeO(OH) oraz kryształy

NaCl (rys. 3.5.4.3) [148-152]. Wskazują na to również powierzchniowe mapy rozkładu pierwiastków w produktach korozji (rys. 3.5.4.4) oraz wyniki badań XRD (rys. 3.5.4.5).

Należy zatem stwierdzić, że w warunkach oddziaływania mgły solnej, co może symulować eksploatację felg specjalnych np. podczas zimy, odporność na korozję wszystkich złączy jest podobna. Z punktu widzenia tego typu korozji wszystkie badane technologie łączenia mogą być stosowane zamiennie.



Rys. 3.5.4.1. Jednostkowa zmiany masy próbek wyciętych z badanych złączy w funkcji czasu ekspozycji podczas badań odporności na korozję w warunkach mgły solnej

	Próbka wyjściowa	96 h ekspozycji w mgle solnej	720 h ekspozycji w mgle solnej
Złącze zgrzewane			
Złącze spawane MAG			
Złącze spawane MAG Puls			
Złącze spawane laserowo			
Złącze spawane hybrydowo			

Tabela 3.5.4.1. Przykładowe powierzchni próbek badanych złączy ze stali DD11 po ekspozycji w mgle solnej

	Próbka wyjściowa	96 h ekspozycji w mgle solnej	720 h ekspozycji w mgle solnej
Złącze zgrzewane			
Złącze spawane MAG			
Złącze spawane MAG Puls			
Złącze spawane laserowo			
Złącze spawane hybrydowo			

Tabela 3.5.4.2. Przykładowe powierzchni próbek badanych złączy ze stali DD14 po ekspozycji w mgle solnej



Rys. 3.5.4.2. Przykładowa morfologia produktów korozji badanych złączy po ekspozycji w komorze solnej przez 720 h: a) warstwowy układ kolejnych produktów,
b) pęknięcia na powierzchni produktów korozji



Rys. 3.5.4.3. Przykładowe wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS produktów korozji obserwowanych na powierzchni złączy po ekspozycji w mgle solnej przez 720 h



Rys. 3.5.4.4. Mapy rozkładu pierwiastków w produktach korozji na powierzchni badanych złączy po ekspozycji przez 720 h w mgle solnej: a) powierzchnia pokryta produktami korozji, b) powierzchniowy rozkład żelaza, c) rozkład powierzchniowy tlenu, d) rozkład powierzchniowy sodu w produktach korozji, e) rozkład powierzchniowy chloru, f) rozkład powierzchniowy manganu



Rys. 3.5.4.5. Wyniki badań składu fazowego (XRD) produktów korozji złącza po ekspozycji w mgle solnej przez 720 h

Na podstawie wyników badań odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki wykonanych złączy stwierdzono podobną odporność złączy niezależnie od zastosowanej technologii spawania oraz spawanej stali (tabl. 3.5.4.3, tabl. 3.5.4.4). Analiza zmian masy próbek w zależności od liczby cykli ekspozycji przez 24 h atmosferze korozyjnej wykazała, że korozja zachodzi równomiernie, zgodnie W z parabolicznym prawem kinetyki narastania produktów korozji (rys. 3.5.4.6). Próbki już po 5 cyklach pokryły się równomierną warstwą produktów, bez wyróżnienia poszczególnych stref złącza, tzn. warstwa narastała równo na całej powierzchni i w kolejnych cyklach zwiększała swoją objętość i masę (tabl. 3.5.4.3, tabl. 3.5.4.4). Na podstawie wyników pomiaru zmiany masy próbek stwierdzono, że proces korozyjny zachodzi równomiernie i stabilnie w czasie a warstwa produktów korozji jest ciągła i przylega do powierzchni. Przeprowadzone badania metalograficzne powierzchniowe produktów korozji ujawniły jednorodną powierzchnię z widocznymi pęknięciami (rys. 3.5.4.7a), które jednak nie powodują odpadania warstwy oraz liczne drobne fazy rozłożone równomiernie na powierzchni (rys. 3.5.4.7b). Stwierdzono, że warstwa produktów znacznie bardziej przylega do powierzchni próbki w stosunku do warstwy produktów korozji po ekspozycji w mgle solnej.



Rys. 3.5.4.6. Jednostkowa zmiany masy próbek wyciętych z badanych złączy w funkcji liczby cykli podczas badań odporności na korozję w komorze Koesternicha

Mikroanaliza składu chemicznego EDS wykazała, że w produktach korozji występuje głownie żelazo, tlen i siarka (rys. 3.5.4.8). Na podstawie danych literaturowych [148-152] oraz wyników EDS oraz rozkładów powierzchniowych pierwiastków stwierdzono, że są prawdopodobnie złożone fazy FeO(OH), Fe₃O(OH) oraz FeS [149]. Wskazują na to również powierzchniowe mapy rozkładu pierwiastków w produktach korozji (rys. 3.5.4.9) oraz wyniki badań XRD (rys. 3.5.4.10).

	Próbka wyjściowa	Po 5 cyklach	Po 15 cyklach
Złącze zgrzewane			
Złącze spawane MAG			
Złącze spawane MAG Puls	•		
Złącze spawane laserowo			
Złącze spawane hybrydowo			

Tabela 3.5.4.3. Przykładowe powierzchni próbek badanych złączy ze stali DD11 po ekspozycji w komorze Koesternicha

	Próbka wyjściowa	Po 5 cyklach	Po 15 cyklach
Złącze zgrzewane			
Złącze spawane MAG			
Złącze spawane MAG Puls	0		
Złącze spawane laserowo			
Złącze spawane hybrydowo	0		

Tabela 3.5.4.4. Przykładowe powierzchni próbek badanych złączy ze stali DD14 po ekspozycji w komorze Koesternicha



Rys. 3.5.4.7. Przykładowa morfologia produktów korozji badanych złączy ze stali DD14 po wilgotnych ekspozycji W atmosferze związków siarki, po 15 powierzchni (dwudziestoczterogodzinnych) cyklach: a) równomierna produktów korozji z widocznymi pęknięciami, b) pęknięcia na powierzchni produktów korozji



Rys. 3.5.4.8. Przykładowe wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS produktów korozji obserwowanych na powierzchni złączy stali DD14 po ekspozycji w atmosferze wilgotnych związków siarki, po 15 cyklach


Rys. 3.5.4.9. Mapy rozkładu pierwiastków w produktach korozji na powierzchni badanych złączy po ekspozycji po ekspozycji w atmosferze wilgotnych związków siarki, po 15 cyklach: a) powierzchnia pokryta produktami korozji, b) powierzchniowy rozkład żelaza, c) rozkład powierzchniowy tlenu, d) rozkład powierzchniowy siarki w produktach korozji, e) rozkład powierzchniowy manganu



Rys. 3.5.4.10. Wyniki badań składu fazowego (XRD) produktów korozji złącza po ekspozycji w atmosferze wilgotnych związków siarki, po 15 cyklach

Procesy korozyjne wywoływane przez dwutlenek siarki i chlorki mają złożony charakter i przyczyniają się do znacznego wzrostu przewodnictwa elektrolitycznego warstwy wilgoci na powierzchniach metali [148–150]. Ponadto, chlorki i dwutlenek siarki charakteryzują się wysoką aktywnością chemiczną, rozpuszczone w wodzie tworzą jony Cl⁻ i SO₃²⁻. Produkty korozji metali, takie jak żelazo (Fe, Cu, Zn, Al), ułatwiają szybkie utlenianie bezwodnika kwasu siarkawego według reakcji (3.1):

$$SO_2 + O_2 + 2e^- \rightarrow SO_4^{2-} \tag{3.1}$$

Obecność tych jonów w warstwie wilgoci na powierzchni metalu prowadzi do powstawania galwanicznych ogniw korozyjnych, wynikających z różnic stężenia, niejednorodności powierzchni lub nierównomiernego napowietrzania [151-152]. Metal w tych rozpuszcza się w elektrolicie aktywowanym jonami Cl⁻ (3.2) lub SO₄²⁻ (3.3) Procesy te można opisać następującymi równaniami [149]:

a) dla jonów chlorkowych:

$$Me + H_2O + Cl^- \rightarrow H^+ + MeOHCl + 2e^-$$

$$MeOHCl^- + H^+ + Cl^- \rightarrow MeCl_2 + H_2O$$

$$MeCl_2 + 2H_2O \rightarrow \downarrow Me(OH)_2 + 2H^+ + 2Cl^-$$
(3.2)

b) dla jonów siarczanowych:

$$\begin{split} & Me + SO_4{}^{2-} \rightarrow MeSO_4 + 2e^- \eqno(3.3) \\ & MeSO_4 + Me + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MeSO_4 + Me(OH)_2 \\ & MeSO_4 + 2H_2O \rightarrow \downarrow Me(OH)_2 + SO_4{}^{2-} + 2H^+ \end{split}$$

W powyżej opisanym procesie, zanieczyszczenia katalizują korozję, wydobywając z sieci metalicznej pewną liczbę atomów, które stają się częścią produktów korozji.

4 ASPEKTY EKONOMICZNE ZASTOSOWANIA NOWEJ TECHNOLOGII SPAWANIA FELG SPECJALNEGO ZASTOSOWANIA

W dynamicznie rozwijającym się sektorze maszynowym, produkcja felg specjalnych stanowi istotny element łączący innowacyjność z wysokimi wymaganiami technicznymi. Jakość i wydajność procesów produkcyjnych w tej dziedzinie bezpośrednio wpływają na bezpieczeństwo, efektywność oraz niejednokrotnie estetykę produkowanych wyrobów. W tym kontekście, rola zaawansowanych technik spawania, które są kluczowe w procesie produkcji felg specjalnych nabiera szczególnego znaczenia. Opłacalność inwestycji technologicznej w firmie Yokohama-TWS jest analizowana z uwagi na:

- możliwości doposażenia obecnej technologii, zwiększając maksymalne moce przerobowe,
- wdrożenie nowej technologii,
- czynniki rynkowe i ekonomiczne,
- koszt początkowy obejmujący zakup sprzętu, oprogramowania oraz koszty wdrożenia i szkolenia pracowników,
- zwrot z inwestycji przewidywany czas zwrotu z inwestycji oraz stopy zwrotu,
- poprawę wydajności,
- konkurencyjność na rynku,
- zgodność z przepisami podyktowane potrzebą dostosowania się do zmieniających się przepisów prawa, np. w zakresie ochrony danych osobowych,
- skalowalność,
- ryzyko obejmująca potencjalne problemy techniczne lub biznesowe, które mogą wpłynąć na realizację projektu,
- integracja z istniejącymi systemami,
- wsparcie techniczne i utrzymanie,
- oczekiwany wpływ na pracowników rozważa się, jak technologia wpłynie na zespół, w tym potrzeby szkoleniowe oraz potencjalne zmiany w strukturze zatrudnienia.

Ma to na celu ocenę ekonomiczną obejmującą analizę kosztów, efektywności produkcji, a także jakość końcowego produktu w ujęciu zwrotu kosztów danej inwestycji. Analiza ekonomiczna zastosowania nowej technologii spawania w produkcji felg specjalnych obejmuje zarówno rozważania zwiększenia obecnych mocy przerobowych, jak również wdrożenia nowej technologii dla felg specjalnych o średnicy powyżej 20". Wdrażanie innowacyjnych metod spawania, takich jak spawanie laserowe, hybrydowe czy metody MAG z podwójnym pulsem, otwiera nowe możliwości w zakresie zwiększenia wydajności i jakości produkcji, jednocześnie minimalizując ryzyko wad produkcyjnych. Zmiany technologiczne niosą ze sobą również istotne wyzwania ekonomiczne, w tym: koszty inwestycji początkowych, szkolenia personelu oraz potencjalne zmiany w strukturze kosztów operacyjnych. Konieczne jest zatem zbadanie, szczegółowe jak te czynniki wpływają na całkowitą rentowność i efektywność procesu produkcji felg specjalnych, wykorzystując do tego celu analizy kosztów, symulacje wydajności oraz studia przypadków.

Analizy stanu obecnego każdego procesu w firmie Yokohama-TWS rozpoczyna się od wykorzystania narzędzi mapowania procesów ujętych w metodologii LEAN. Mapowanie procesów polega na opisywaniu poszczególnych kroków, w tym przypadku produkcji felg specjalnych, pod kątem tego jak poszczególne etapy są ze sobą powiązane. Istnieje wiele technik, które są wykorzystywane do mapowania. Wszystkie techniki identyfikują różne rodzaje działań zachodzących podczas procesu i pokazują przepływ materiałów, ludzi lub informacji w procesie[140 – 141].

Proces mapowania obejmuje co najmniej trzy podstawowe elementy:

- analiza SIPOC (diagram opisujący dane wejściowe, proces i dane wyjściowe procesu: Supplier, Input, Process, Output, Customer),
- podstawowe mapowanie strumienia wartości obejmujące wszystkie czynności procesu produkcyjnego,
- obserwacje procesu.

Analiza ta może obejmować zarówno realnego dostawcę materiałów wsadowych do produkcji oraz finalnego odbiorcę, jak również rozważać jako dostawcę poprzedni krok procesu, a jako odbiorcę jego kolejny krok. Jest to uzależnione od wymaganej szczegółowości danej analizy oraz jak dostawcy, procesy oraz odbiorcy wpływają na całość realizowanej produkcji.

Dane wsadowe do analizy zakładają, iż produkcja felg specjalnych powyżej 20" osiągnęła maksimum swojej wydolności, dlatego też konieczne jest zwiększenie mocy przerobowej dodając rozwiązania technologiczne znane i używane w zakładzie Yokohama-TWS lub wdrożenie nowoczesnej technologii, która z jednej strony usprawni obecne procesy a z drugiej zwiększy maksymalne moce przerobowe zakładu. Z uwagi na kompleksowe rozważania wdrożenia nowej technologii, w analizie SIPOC uwzględniono również produkcję felg poniżej 20" co pozwoli na uzyskanie pełnych danych projektowych które posłużą do wnioskowania o wykonalności projektu.

Analiza SIPOC to narzędzie używane w zarządzaniu procesami biznesowymi i jakością, które pomaga w identyfikacji kluczowych elementów procesów w organizacji. Skrót SIPOC oznacza:

- Supplier (dostawca): odnosi się do osób lub organizacji dostarczających wejścia (input) dla danego procesu. Identyfikacja dostawców jest ważna, aby zrozumieć, skąd pochodzą surowce, informacje lub inne zasoby niezbędne do rozpoczęcia procesu,
- Input (wejście): są to zasoby, materiały, informacje, które są potrzebne do przeprowadzenia procesu. Precyzyjne zdefiniowanie danych wejściowych/wsadowych pozwala lepiej zrozumieć wymagania procesu i identyfikować potencjalne obszary dla usprawnień,
- Process (proces): ten element opisuje sekwencję działań lub kroków przeprowadzanych, aby przekształcić wejścia w wyjścia. Proces jest zwykle reprezentowany w formie mapy lub diagramu, który ukazuje, jak działania są ze sobą powiązane,
- Outputs (wyjście): to są wyniki lub produkty końcowe generowane przez proces.
 Wyjścia mogą być materialne lub niematerialne (takie jak usługa czy informacja) i są dostarczane odbiorcom,
- Customers (klient): odbiorca wyjść procesu. Mogą to być wewnętrzni lub zewnętrzni użytkownicy, którzy korzystają z produktów lub usług wygenerowanych przez proces. Zrozumienie, kim są klienci i jakie są ich potrzeby, jest kluczowe dla zapewnienia jakości i efektywności procesu.

Analiza SIPOC jest często stosowana na początkowych etapach projektów poprawy jakości i wydajności, aby zrozumieć proces w szerokim kontekście, zanim przystąpi się do bardziej szczegółowych analiz. Narzędzie to jest szczególnie pomocne w identyfikowaniu zakresu procesu, kluczowych udziałowców oraz w zapewnianiu ogólnego zrozumienia procesu przed jego optymalizacją. W tabeli 4.1 oraz 4.2 przedstawiono analizę SIPOC odpowiednio dla produkcji felg poniżej i powyżej 20".

S I		Р	0	С	
Supplier	Input (wsad)	Process (proces)	Output (wynik)	Customer (klient)	
(dostawca)					
Magazyn	Materiał do produkcji cylindra	Rolowanie	Otwarty cylinder	Zgrzewanie	
Rolowanie	Otwarty cylinder	Zgrzewanie	Zgrzany cylinder	Obróbka po zgrzewaniu - trimming	
Zgrzewanie Zgrzany cylinder Obróbka po zgrzewaniu - trimming - mechaniczne		Obróbka po zgrzewaniu - trimming - mechaniczne usuwanie wypływki	Zgrzeina bez wypływki	Obróbka po zgrzewaniu - rolling	
Obróbka po zgrzewaniu - trimming	Cylinder ze zgrzeiną bez wypływki	Obróbka po zgrzewaniu - rolling - mechaniczne wyrównanie spoiny po obcięciu wypływki	Cylinder z obrobioną zgrzeiną i wypływką na krawędziach	Obróbka po zgrzewaniu - end cutting	
Obróbka po zgrzewaniu - rolling	Cylinder z obrobioną zgrzeiną i wypływką na krawędziach	Obróbka po zgrzewaniu - end cutting - obcinanie wypływki na krawędziach cylindra	Cylinder z obrobioną zgrzeiną	Obróbka po zgrzewaniu - re- rounding	
Obróbka po zgrzewaniu - end cutting	Cylinder z obrobioną zgrzeiną	Obróbka po zgrzewaniu - re- rounding - owalowanie cylindra	Zgrzany i obrobiony cylinder	Roll-forming (formowanie kształtu felgi)	
Obróbka po zgrzewaniu - re- rounding	Zgrzany i obrobiony cylinder	Roll-forming	Uformowana felga bez dysku	Montaż dysku	
Roll-forming	Uformowana felga bez dysku	Montaż dusku	Felga przed spawaniem dysku	Spawanie	
Montaż dysku	u Felga z zamontowanym dyskiem przed spawaniem		Felga przed malowaniem	Malowanie	
Spawanie dysku	Felga przed malowaniem	Malowanie proszkowe	Wyrób gotowy	Magazyn	

Tabela 4.1. Analiza SIPOC dla procesów produkcji felg poniżej 20"

S	Ι	Р	0	С
Supplier	Input (wejście)	Process	Output	Customer (klient)
(dostawca)		(proces)	(wyjście)	
Magazyn	Materiał do produkcji cylindra	Rolowanie	Otwarty cylinder	Spawanie metodą MAG
Rolowanie	Otwarty cylinder	Spawanie metodą MAG	Pospawany cylinder	Szlifowanie
Spawanie metodą MAG	Pospawany cylinder	Szlifowanie lica i grani spoiny	Obrobiony cylinder	Roll-forming (formowanie kształtu felgi)
Szlifowanie lica i grani spoiny	Obrobiony cylinder	Roll-forming	Uformowana felga bez dysku	Montaż dysku
Roll-forming	Uformowana felga bez dysku	Montaż dusku	Felga przed spawaniem dysku	Spawanie
Montaż dysku	Felga z zamontowanym dyskiem przed spawaniem	Spawanie dysku	Felga przed malowaniem	Malowanie
Spawanie dysku	Felga przed malowaniem	Malowanie proszkowe	Wyrób gotowy	Magazyn

Tabela 4.2. Analiza SIPOC dla procesów produkcji felg powyżej 20"

Value Stream Mapping (VSM) jest kolejnym krokiem mapowania analizowanego procesy – jest to narzędzie wykorzystywane w Lean Manufacturing do analizowania i projektowania przepływu materiałów i informacji niezbędnych do dostarczenia produktu lub usługi klientowi. VSM pomaga zidentyfikować marnotrawstwo w procesach i wskazuje na możliwości ich usprawnienia. Jest to narzędzie bardziej szczegółowe i skoncentrowane na wartości dodanej niż tradycyjne mapowanie procesów.

Kluczowymi elementami Value Stream Mapping (VSM) są:

- strumień wartości odnosi się do pełnej sekwencji działań, od początku do końca, wymaganych do stworzenia produktu lub usługi. Obejmuje to zarówno działania tworzące wartość, jak i te nie tworzące wartości, ale niezbędne z różnych powodów,
- kroki tworzące wartość i marnotrawstwo VSM różnicuje działania, które faktycznie dodają wartość z punktu widzenia klienta, od tych, które są marnotrawstwem (takie jak nadmierna produkcja, opóźnienia, niepotrzebne przemieszczanie się, itp.). Celem jest

maksymalizacja działań tworzących wartość i minimalizacja lub eliminacja marnotrawstwa,

- przepływ materiałów i informacji mapowanie obejmuje zarówno przepływ fizyczny produktów, jak i przepływ informacji, które sterują procesami. Zrozumienie tych przepływów pozwala na identyfikację opóźnień, przestoje i inne problemy wpływające na wydajność,
- wskaźniki wydajności w Value Stream Mapping ważne jest wykorzystanie wskaźników, takich jak czas cyklu, czas oczekiwania, poziomy zapasów, które pomagają ocenić efektywność procesu,
- stan obecny i stan przyszły VSM zazwyczaj rozpoczyna się od mapowania obecnego stanu procesu, a następnie przechodzi do projektowania optymalnego, przyszłego stanu procesu, w którym eliminowane są marnotrawstwa i zwiększana jest wartość dla klienta.

Value Stream Mapping jest narzędziem wspierającym kulturę ciągłego doskonalenia i skupienia na kliencie. Umożliwia organizacji Yokohama-TWS lepsze zrozumienie procesów, identyfikację przyczyn problemów oraz planowanie skutecznych działań naprawczych i optymalizacyjnych. Metoda ta znajduje zastosowanie nie tylko podczas analizy produkcji, ale może być również stosowane w usługach i funkcjach administracyjnych.

Na rysunku 4.1 przedstawiono przykładowy diagram mapowania strumienia wartości.



Rys. 4.1. Przykładowy diagram mapowania strumienia wartości [142]

Obserwacja procesu (process mapping) to graficzna metoda przedstawienia i analizy kroków składających się na dany proces w organizacji. Celem mapowania procesu jest zrozumienie procesu poprzez wizualizację jego działania, co pomaga w identyfikacji obszarów wymagających usprawnień.

Podstawowymi elementami mapowania procesu są:

- identyfikacja procesu określenie, który proces ma być zmapowany. Może to być dowolny proces w organizacji, od prostych czynności administracyjnych po złożone procesy produkcyjne,
- zbieranie informacji polega na obserwacji samego procesu zbierając jednocześnie dane takie jak czas cyklu, ilość sztuk, odległość przemieszczania komponentu lub ludzi, i wiele innych które wpływają na analizowany proces,
- tworzenie mapy procesu używając narzędzi takich jak diagramy przepływu (flowcharts), tworzy się wizualną reprezentację procesu. Diagram powinien pokazywać kolejność i zależności między poszczególnymi krokami, a także wskazywać, gdzie podejmowane są decyzje,
- analiza mapy procesu po utworzeniu mapy analizuje się ją pod kątem znalezienia marnotrawstwa (np. zbędnych kroków, opóźnień, nadmiernego przetwarzania), przestoju, wąskich gardeł i innych problemów. Szuka się również możliwości usprawnień i optymalizacji procesu.

Obserwacja procesu jest metodą stosowaną w zarządzaniu procesami biznesowymi, inżynierii, a także w wielu innych dziedzinach, która polega na dokładnym monitorowaniu i analizowaniu bieżącego wykonania określonego procesu. Celem tej metody jest zrozumienie, jak rzeczywiście działa proces, identyfikacja problemów i możliwości usprawnień, a także weryfikacja zgodności procesu z planowanymi procedurami. Na rys. 4.2 przedstawiono oznaczenia wykorzystywane podczas mapowania procesu produkcyjnego, natomiast na rys. 4.3 oraz rys. 4.4 przedstawiono mapy procesu dla produkcji felg poniżę i powyżej 20".

Operacja - krok w procesie generujący wartość dodaną	Transport - przemieszczenie wyrobu w inne miejsce
Pomiar - ikontrola jakości	Magazynowanie - w celu dalszego wykorzystania
Decyzja - krok w procesie gdzie może nastąpić zmiana przepływu	Opóźnienie - oczekiwanie na kolejne operacje (brak wartości dodanej)

Rys. 4.2. Oznaczenia wykorzystane podczas mapowania procesu

Lp.	Krok procesu	Odległość [m]			•			
1	Formowanie cylindra	0	\checkmark					
2	Transport cylindra	5		\checkmark				
3	Zgrzewanie	0	\checkmark					
4	Transport cylindra	2		~				
5	Obróbka po zgrzewaniu - trimming	0	\checkmark					
6	Obróbka po zgrzewaniu - rolling	0	\checkmark					
7	Obróbka po zgrzewaniu - end cutting	0	\checkmark					
8	Obróbka po zgrzewaniu - re-rounding	0	\checkmark					
9	Roll-rorming	0	\checkmark					
10	Kontrola jakości	0					\checkmark	
11	Kalibracja i Paletowanie	0				\checkmark		
12	Transport	5		\checkmark				
13	Montaż dysku	0	\checkmark					
14	Transport	25		\checkmark				
15	Malowanie	0	\checkmark					
16	Kontrola jakości	0	\checkmark					
17	Transport	25		~				
18	Pakowanie	0	\checkmark					
19	Magazynowanie / Wysyłka	0						\checkmark
	Total	62						

Rys. 4.3. Mapa procesu produkcji felg poniżej 20"

Lp.	Krok procesu	Odległość [m]			♦			
1	Formowanie cylindra	0	\checkmark					
2	Transport cylindra	10		~				
3	Spawanie cylindra metodą MAG	0	\checkmark					
4	Transport cylindra	3		\checkmark				
5	Szliforanie lica i grani spoiny	0	\checkmark					
6	Transport cylindra	10		~	\checkmark			
7	Roll-rorming	0	\checkmark					
8	Kontrola jakości	0					\checkmark	
9	Paletowanie	0				✓		
10	Transport	17		✓				
11	Montaż dysku	0	\checkmark					
12	Spawanie	0	\checkmark					
13	Transport	95		\checkmark				
14	Paletowanie	0				\checkmark		
15	Malowanie	0	\checkmark					
16	Kontrola jakości	0	\checkmark					
17	Transport	15		✓				
18	Pakowanie	0	\checkmark					
19	Magazynowanie / Wysyłka	0						V
	Total	150						

Rys. 4.4. Mapa procesu produkcji felg powyżej 20"

Analiza obecnie wykorzystywanych procesów produkcji felg specjalnych oparta na metodologii VSM (value stream mapping) wymaga rozgraniczenia dwóch etapów, w których występuje proces łączenia. Etapy te, to kolejno proces łączenia cylindra oraz proces łączenia

felgi i dysku. Produkcja cylindra może być prowadzona z wykorzystaniem wszystkich badanych technologii łączenia, natomiast do procesu łączenia felgi i dysku nie można zastosować zgrzewania. Przeprowadzona analiza wykazała iż produkcja felg specjalnych (obejmująca cały przepływ materiału) dla których łączenie cylindra następuje poprzez zgrzewanie w stosunku do obecnie wykorzystywanej technologii spawania metodą MAG jest pięciokrotnie bardziej wydajna z uwagi na czas procesów produkcyjnych i dwukrotnie z uwagi na pokonywany dystans. Pokonywany dystans może zostać zminimalizowany poprzez modyfikacje procesu produkcyjnego, natomiast czas wynikający z łączenia cylindra zależy wyłącznie od wykorzystanej technologii łączenia i bez znacznych inwestycji nie ulegnie on znacznej poprawie. W tabeli 4.3 przedstawiono porównanie czasu potrzebnego na wykonanie połączenia oraz obróbkę cylindra zakładając najszybszy proces jako proces bazowy względem którego porównano pozostałe technologie łączenia.

Metoda łączenia	Czas potrzebny na łączenie	Czas potrzebny na łączenie i obróbkę
Zgrzewanie	100%	100%
MAG	545%	525%
MAG Puls	300%	389%
Laser	450%	250%
Hybryda	300%	389%

Tabela 4.3. Analiza SIPOC dla procesów produkcji felg powyżej 20"

Wnioskować można zatem iż z uwagi na wydajność procesu łączenia cylindra, najkorzystniejsze było by zastąpienie technologii MAG procesem zgrzewania lub spawania laserowego. Ponieważ próby wykorzystania spawania laserowego cylindra wykazały powstawanie pęcherzy, które mogą wpłynąć na właściwości mechaniczne złącza oraz na koszt wdrożenia tej technologii, proces ten nie jest brany pod uwagę. Uwzględniając koszty wdrożenia nowej technologii należy rozważyć kolejno zastąpienie procesu MAG procesami spawania MAG z podwójnym pulsem, spawania hybrydowego lub zgrzewania. Analizując proces łączenia felgi i dysku, najkorzystniejsze będzie rozważenie wdrożenia spawania metodą MAG z podwójnym pulsem lub spawania nowej linii produkcyjnej, jak również przy modyfikacji obecnych linii. Do wszystkich linii półautomatycznych na podstawie przeprowadzonych badań założono modyfikację procesu spawania metodą MAG i wdrożenie spawania metodą MAG z podwójnym pulsem.

5 ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Energia liniowa łuku spawalniczego ma znaczący wpływ na właściwości i jakość złącza spawanego. Jest ona opisana jako ciepło wprowadzone na jednostkę długości (5.1). Ilość wprowadzonego ciepła do materiału zależy od metody spawania, natężenia prądu, napięcia oraz prędkości spawania i jest określona zależnością [118, 143-145]:

$$Q = \frac{U \cdot I}{V_s} \cdot 10^{-3} \cdot k \tag{5.1}$$

gdzie:

Q	-	ilość wprowadzonego ciepła do materiału [kJ/mm],
U	-	napięcie łuku [V],
Ι	-	natężenie prądu spawania [A],
Vs	-	prędkość spawania [mm/s],
k	-	współczynnik sprawności cieplnej.

Współczynnik sprawności cieplnej (k), podawany jest jako wartość bezwymiarowa i zmienia się w zależności od wykorzystanej metody spawania. Współczynniki te podano w tabeli 5.1.

Nr metody	Metoda	Współczynnik k
121	Spawanie drutem elektrodowym pod topnikiem	1.0
111	Spawanie łukowe elektrodą otuloną	0.8
131	Spawanie metodą MIG	0.8
135	Spawanie metodą MAG	0.8
114	Spawanie drutem proszkowym bez osłony gazowej	0.8
136	Spawanie drutem proszkowym w osłonie gazu aktywnego	0.8
137	Spawanie drutem proszkowym w osłonie gazu obojętnego	0.8
138	Spawanie drutem proszkowym z dodatkiem metalu w osłonie gazu aktywnego	0.8
139	Spawanie drutem proszkowym z dodatkiem metalu w osłonie gazu obojętnego	0.8
141	Spawanie metodą TIG	0.6
15	Spawanie plazmowe	0.6

Tabela 5.1. Współczynniki sprawności cieplnej (k) poszczególnych metod spawania [143]

Dla spawania laserowego ilość wprowadzonego ciepła (Q) jest obliczana przy pomocy równania (5.2):

$$Q = \frac{P_{lasera}}{V_s} \tag{5.2}$$

gdzie:

Q - ilość wprowadzonego ciepła do materiału [kJ/mm],

P_{lasera} - moc lasera [W],

V_s - prędkość spawania [mm/s].

W przypadku spawania hybrydowego laser + MAG, ilość wprowadzonego ciepła oblicza się przy pomocy równania (5.3):

$$Q = \frac{(P_{lasera} \cdot U \cdot I)}{V_s} \cdot 10^{-3}$$
(5.3)

gdzie:

Q	-	ilość wprowadzonego ciepła do materiału [kJ/mm],
Plasera	-	moc lasera [W],
U	-	napięcie łuku [V],
Ι	-	natężenie prądu spawania [A],
Vs	-	prędkość spawania [mm/s].

Dla zgrzewania oporowego energia liniowa jest obliczana za pomocą równania (5.4):

$$E = \frac{I^2 \cdot R \cdot t}{L} \tag{5.4}$$

gdzie:

E	-	energia liniowa zgrzewania [J/m],
R	-	opór elektryczny stref zgrzewania [Ω],
Ι	-	natężenie prądu zgrzewania [A],
L	-	długość zgrzewanej powierzchni [m],
t	-	czas zgrzewania [s].

Na podstawie analizy literaturowej można stwierdzić że energia liniowa łuku wpływa na [118, 143-145]:

- głębokość spoiny większa energia liniowa zwiększa głębokość penetracji ciekłego metalu, co może być pożądane w przypadku grubych materiałów, jednak nadmierna penetracja może prowadzić do niezgodności takich jak przepalenia,
- szerokość spoiny zwiększenie energii liniowej powoduje szerszą spoinę, co wpływa na wytrzymałość złącza. Szeroka spoina zwiększa ryzyko pojawienia się naprężeń i odkształceń, w efekcie czego złącze może pękać,
- strefę wpływu ciepła (SWC) większa energia liniowa prowadzi do większej strefy wpływu ciepła, co może wpływać na mikrostrukturę i właściwości materiału w tej strefie,
- zmiany mikrostruktury energia liniowa wpływa na szybkość chłodzenia spoiny, co z kolei wpływa na mikrostrukturę spoiny i SWC,

- ryzyko powstawania wtrąceń i pęknięć wyższa energia liniowa może zwiększać ryzyko powstawania niezgodności, takich jak pęcherze gazowe, porowatość czy pęknięcia na gorąco, szczególnie w materiałach wrażliwych na działanie ciepła,
- odkształcenia i naprężenia resztkowe zwiększenie energii liniowej prowadzi do większej ilości ciepła wprowadzonego do materiału, co z kolei może zwiększać ryzyko odkształceń i naprężeń resztkowych po spawaniu, szczególnie w dużych konstrukcjach,
- właściwości mechaniczne energia liniowa ma wpływ na właściwości mechaniczne złącza spawanego, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, udarność i twardość. Energia liniowa spawania decyduje o strukturze, a tym samym o właściwościach mechanicznych złącza, co ma istotne znaczenie przy produkcji felg specjalnych. Prawidłowy dobór parametrów procesu spawania wpływających na energię liniową łuku lub moc wiązki laserowej, zapewnia odpowiednią głębokość wtopienia, strukturę i właściwości złączy. Do podstawowych czynników wpływających na energię liniową łuku można zaliczyć: napięcie łuku spawalniczego, natężenie prądu oraz prędkość spawania [118, 147].

Do oceny wpływu czynników technologicznych, w szczególności energii liniowej łuku oraz cyklu cieplnego spawania na strukturę i właściwości połączenia wykonano złącza spawane blach o grubości 5 mm ze stali DD11 oraz DD14 opisane w rozdziale 3.4. Parametry procesu oraz energie liniowe dla poszczególnych procesów spawania zostały przedstawione w tabeli 5.2.

Metoda spawania	Wymiary próbki	Natężenie prądu (I)	Napięcie łuku (U)	Czas zgrzewania (t)	Prędkość spawania (V _s)	Moc lasera (P)	Opór elektryczny zgrzewania (R)	Energia liniowa (E _l)
-	[mm]	[A]	[V]	[s]	[mm/s]	[W]	[Ω]	[kJ/mm]
Zgrzewanie	5x150x400	8000	11,8	10	-	-	0,001475	2,36
MAG		327	32,2	-	11	-	-	0,97
MAG puls	5x150x600	140	20,8	-	20	-	-	0,15
Laser		-	-	-	13,33	4500	-	0,34
Hybryda		270	26	-	20	3500	-	1,23

Tabela 5.2. Parametry procesu oraz obliczona energia liniowa łuku lub energia wiązki dla poszczególnych metod spawania

Parametry procesu takie jak napięcie łuku spawalniczego, natężenie prądu oraz prędkość spawania określają warunki w jakich spoina krystalizuje, a także jakie zachodzą przemiany fazowe w spoinie i SWC. Zmiana parametrów spawania powoduje zmianę właściwości złącza,

w tym zmianę twardości. Zmieniając parametry procesu spawania można wpłynąć na rozkład twardości w złączu w następujący sposób [118, 144-145]:

- prąd spawania wyższe wartości prądu spawania zazwyczaj prowadzą do większej głębokości wtopienia i wyższej temperatury, co może zwiększyć twardość spoiny poprzez szybsze chłodzenie i przemiany fazowe,
- napięcie spawania wyższe napięcie prowadzi do szerszego łuku spawalniczego, co wpływa na rozkład ciepła i szybkość chłodzenia. To z kolei wpływa na twardość spoiny, zwłaszcza na jej powierzchni,
- prędkość spawania zwiększona prędkość spawania oznacza, krótszy czas ekspozycji materiału na wysoką temperaturę i prowadzi do szybszego chłodzenia - potencjalnie wyższej twardości spoiny,
- rodzaj i ilość gazu ochronnego gaz ochronny wpływa na stabilność łuku i ochronę strefy spawania. Niektóre gazy mogą promować szybsze chłodzenie, co wpływa na mikrostrukturę i twardość spoiny,
- materiał dodatkowy dodatek pierwiastków stopowych, takich jak węgiel, mangan, chrom czy nikiel, może zwiększyć twardość spoiny w wyniku tworzenia twardych faz lub przemian fazowych.

Właściwy dobór tych parametrów jest kluczowy dla zapewnienia odpowiedniej twardości złącza, a tym samym właściwości mechanicznych. Podczas procesu rolowania cylindra felgi, zbyt wysoka twardość złącza może powodować jego pękanie podczas formowania wstępnego na prasie stożkowej. Można zatem przyjąć, że rozkład twardości w złączu jest parametrem decydującym o możliwości stosowania danej metody spawania.

Rozkłady twardości dla złączy wykonanych poszczególnymi metodami spawania zostały przeanalizowane uwzględniając jako kryterium wymagania normy PN-EN ISO 15614-1:2017 dla złączy ze stali niskowęglowej o określonej grubości, spawanych bez obróbki cieplnej. Twardość spoiny nie powinna przekraczać 380HV. Do weryfikacji rozkładów wyników pomiarów twardości wykorzystano testy nieparametryczne ze względu na liczbę próbek i wynikającą z tego niepewność, co do spełnienia założeń rozkładu normalnego danych. Weryfikacja wyników pomiaru twardości, czy pochodzą z populacji o rozkładzie normalnym nastąpiła przez zastosowanie testu Ryana-Joinera, który jest zamiennie stosowany z testem Shapiro-Wilka. Test Shapiro-Wilka wykorzystuje współczynnik korelacji między wartościami próbki, a odpowiadającymi im wartościami teoretycznymi z rozkładu normalnego [141, 146]. Jest on uważany za jeden z najbardziej mocnych statystycznie testów (posiadający wysoką

czułość) do badania rozkładu normalnego, szczególnie dla małych i umiarkowanych populacji próbek (n < 50). Test Ryana-Joinera porównuje rangi danych z oczekiwanymi wartościami z rozkładu normalnego, ale jest dostosowany do lepszego dopasowania do wartości krytycznych testu badania rozkładu normalnego Andersona-Darlinga. Test Ryan-Joiner jest uważany za bardziej odporny na obecność wartości skrajnych w danych. Obie metody są uznawane za bardzo skuteczne w wykrywaniu odchyleń rozkładu normalnego.

Wykonano analizy rozkładu normalnego uzyskanych danych, w celu weryfikacji doboru odpowiednich testów statystycznych. Na rysunku 5.1 przedstawiono analizę badania rozkładu normalnego danych z pomiarów twardości dla spawania metodą MAG (metoda obecnie stosowana w Yokohama-TWS), a na rysunku 5.2 dla zgrzewania, metody MAG z podwójnym pulsem, metody laserowej i hybrydowej.



Rys. 5.1. Badanie rozkładu normalnego danych pomiaru twardości dla metody MAG z wykorzystaniem testu Ryana-Joinera



Rys. 5.2. Badanie rozkładu normalnego danych pomiaru twardości dla zgrzewanie, metody MAG z podwójnym pulsem, spawania laserowego i hybrydowego z wykorzystaniem testu Ryana-Joinera

Głównym kryterium oceny normalności danych w teście Ryan-Joinera jest wartość "p". Określa ona prawdopodobieństwo uzyskania wyników co najmniej tak skrajnych, jak zaobserwowane, przy założeniu, że rozkład danych jest normalny. Jeśli wartość "p" jest większa od ustalonego poziomu istotności (zazwyczaj 0,05), nie ma wystarczających dowodów, aby odrzucić hipotezę zerową o normalności rozkładu danych. Założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: Dane pochodzą z rozkładu normalnego,
- hipoteza alternatywna **H**_a: Dane nie pochodzą z rozkładu normalnego.

Ponieważ uzyskana wartość P jest mniejsza lub równa 0,05 dla wszystkich metod spawania, dlatego z 95% pewnością stwierdzić, że dane nie pochodzą z rozkładu normalnego i wykorzystać w dalszej analizie testy nieparametryczne.

Kolejnym etapem było porównanie wartości mediany twardości dla linii pomiarowej A oraz B. Do tego celu wykorzystano statystyczny nieparametryczny test moda mediany. Badanie wykonane dla poszczególnych metod spawania miało na celu analizę czy wartości pomiarów twardości dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe. Pozwoliło to na wnioskowanie o jednorodności spoiny, a w przypadku wystąpienia pęknięć może przyczyniać się do powstawania niezgodności podczas formowania wstępnego przed procesem rolowania felgi.

Przeprowadzono analizę moda mediany wyników pomiaru twardości dla linii pomiarowej A oraz B w celu weryfikacji jednorodności spoiny. Założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są różne.

W tabeli 5.3 przedstawiono wartości median pomiarów twardości dla zgrzewania.

Linia	Madiana	$N \ll$	N >	95% poziomu ufności			
pomiarowa	Wieurana	Całkowita Mediana	Całkowita Mediana	Median			
А	128,0	6	9	(126,0;130,3)			
В	125,0	9	6	(124,0;129,0)			
Całkowita	126,5						
95.0% poziomu ufności dla różnicy: mediana(A) - mediana(B): (-3;5)							

Tabela 5.3. Wartości median pomiarów twardości dla procesu zgrzewania

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,273 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartości median twardości dla zgrzewania są

jednakowe dla linii pomiarowej A oraz B, co pozwala wnioskować o jednorodnym rozkładzie twardości na całym przekroju złącza.

Następnie obliczono wartości moda median dla spawania metodą MAG. Założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe,
- hipoteza alternatywna Ha: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są różne.

W tabeli 5.4 przedstawiono wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą MAG.

Tabela 5.4. Wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą MAG

Linia pomiarowa	Mediana	N <=	N >	95% poziomu ufności	
		Całkowita Mediana	Całkowita Mediana	Median	
А	143,0	7	8	(125,5;146,6)	
В	141,0	8	7	(123,0;148,3)	
Całkowita	142,5				
95.0% poziomu ufności dla różnicy: mediana(A) - mediana(B): (-19;23)					

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,715 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartości median twardości dla spawania metodą MAG są jednakowe dla linii pomiarowej A oraz B, co pozwala wnioskować również o jednorodnym rozkładzie twardości na całym przekroju złącza.

Kolejno wyznaczono wartości moda median dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem. Założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są różne.

W tabeli 5.5 przedstawiono wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem.

Tabela 5.5. Wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem

		N <	N	050/ maria may us for a dai
Linia pomiarowa	Mediana	19 <-	IN >	95% pozioniu umosci
		Całkowita Mediana	Całkowita Mediana	Median
А	137,0	9	6	(124,7;154,8)
В	142,0	6	9	(129,0;161,3)
Całkowita	141,5			
95.0% poziomu ufności dla różnicy: mediana(A) - mediana(B): (-34;22)				

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,273 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartości median twardości dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem są jednakowe dla linii pomiarowej A oraz B, co pozwala wnioskować o jednorodnym rozkładzie twardości na całym przekroju złącza.

Przeprowadzono analizę wartości moda median dla spawania metodą laserową. Założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe,
- hipoteza alternatywna Ha: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są różne.

W tabeli 5.6 przedstawiono wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą laserową.

Linia pomiarowa	Mediana	N <=	N >	95% poziomu ufności	
		Całkowita Mediana	Całkowita Mediana	Median	
А	145,0	8	7	(131,0;158,4)	
В	147,0	7	8	(133,7;159,6)	
Całkowita	146,0				
95.0% poziomu ufności dla różnicy: mediana(A) - mediana(B): (-23:19)					

Tabela 5.6. Wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą laserową

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,715 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartości median twardości dla spawania laserowego

twardości na całym przekroju złącza.

Obliczono wartości moda median dla spawania metodą hybrydową laser + MAG. Założono następujące hipotezy statystyczne:

są jednakowe dla linii pomiarowej A oraz B, co pozwala wnioskować o jednorodnym rozkładzie

- hipoteza zerowa H₀: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są jednakowe,
- hipoteza alternatywna Ha: mediany twardości populacji dla linii pomiarowej A oraz B są różne.

W tabeli 5.7 przedstawiono wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą hybrydową laser + MAG.

Linia pomiarowa	Mediana	N <= Całkowita Mediana	N > Całkowita Mediana	95% poziomu ufności Median	
		Carkowita Mculalla	Calkowita Mculalla	wieulali	
А	133,0	7	8	(130,0;144,5)	
В	132,0	9	6	(129,7;136,6)	
Całkowita	132,0				
95.0% poziomu ufności dla różnicy: mediana(A) - mediana(B): (-6;8)					

Tabela 5.7. Wartości median pomiarów twardości dla spawania metodą hybrydową laser + MAG

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,464 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartości median twardości dla spawania metodą hybrydową są jednakowa dla linii pomiarowej A oraz B, co pozwala wnioskować o jednorodnym rozkładzie twardości na całym przekroju złącza.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów twardości złączy przeprowadzono dwie analizy pomiędzy poszczególnymi metodami łączenia. W pierwszej analizie za pomocą testu Mann-Whitneya oceniono czy dwie niezależne próbki pochodzą z tej samej populacji lub czy też jedna z próbek ma tendencję do generowania większych wartości w stosunku do obecnie stosowanej metody łączenia. W drugim teście zbadano czy odchylenia standardowe pomiarów twardości dla poszczególnych prób są jednakowe w stosunku do obecnie używanej metody łączenia tj. metody MAG.

Test Mann-Whitneya, znany również jako test U Wilcoxona-Mann-Whitneya, to nieparametryczny test statystyczny, który jest alternatywą dla t-testu dla dwóch niezależnych próbek, ale nie wymaga założenia normalności rozkładu danych. To czyni go bardziej elastycznym w zastosowaniu, szczególnie gdy rozkład danych jest nieznany lub wyraźnie odbiega od normalności. W teście Mann-Whitneya każdej obserwacji z obu grup przypisywana jest ranga, a następnie sumowane są rangi dla każdej z grup. Statystyka testowa U jest następnie obliczana na podstawie tych rang. Wartość U wskazuje, czy jedna z grup ma tendencję do uzyskiwania wyższych lub niższych rang, co sugerowałoby różnicę między rozkładami dwóch grup. Test ten jest szczególnie użyteczny, gdy porównuje się mediana dwóch niezależnych grup.

W teście Mann-Whitney wyróżnia się dwa pojęcia:

- wartość P nie skorygowana pod kątem powiązań (wartość p nieprzystosowana do jednakowych wartości danych),
- wartość P skorygowana pod kątem powiązań (wartość p przystosowana do jednakowych wartości danych),

odnoszą się one do sposobu, w jaki test radzi sobie z obecnością takich samych wartości w danych. Jednakowe wartości danych występują, gdy w obu porównywanych grupach pojawiają się identyczne wartości. W idealnej sytuacji, gdzie wszystkie wartości są unikalne, każdej obserwacji można przypisać jednoznaczny rangowy porządek. Jednakowe wartości ponieważ trudno jest jednoznacznie komplikują ten proces, przypisać rangi. Wartość p nieprzystosowana do jednakowych danych, jest to wartość p obliczona bez wprowadzenia żadnych korekt na obecność jednakowych danych. Oznacza to, że wszystkie jednakowe dane otrzymują taką samą rangę, co może nie odzwierciedlać dokładnie ich rzeczywistej pozycji w zbiorze. Nieuwzględnianie jednakowych danych może prowadzić do niedokładnych wyników, szczególnie w przypadku, gdy dane te są częste. Wartość p przystosowana do jednakowych danych (skorygowana pod kątem powiązań) jest to wartość, w której uwzględnia się obecność jednakowych danych poprzez dostosowanie obliczeń testu, aby lepiej odzwierciedlić ich wpływ na wyniki. Korekta ta polega na modyfikacji formuły testu, aby uwzględnić zmniejszoną różnorodność w zbiorze, co skutkuje dokładniejszymi wynikami. Używanie tej wartości p jest zalecane, gdy w analizowanej grupie występują jednakowe dane, ponieważ zapewnia to bardziej wiarygodną ocenę istotności statystycznej. Zaleca się używanie wartości p przystosowanej do jednakowych wartości, ponieważ uwzględnia ona szczególny charakter danych i daje bardziej wiarygodne wyniki. Współczesne oprogramowanie statystyczne zazwyczaj automatycznie dokonuje tej korekty, dostarczając wyniki, które można interpretować bezpośrednio.

Wykonano analizę median pomiarów twardości złączy spawanych metodą MAG z pozostałymi metodami łączenia, w celu weryfikacji czy dwie niezależne próbki pochodzą z tej samej populacji lub czy też jedna z próbek ma tendencję do generowania większych wartości w stosunku do obecnie stosowanej metody łączenia. Dla złączy spawanych metodą MAG oraz MAG z podwójnym pulsem, założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem są różne.

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,442 (skorygowana pod kątem powiązań) jest większa od poziomu alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość mediany populacji pomiarów twardości złączy dla metody MAG w stosunku do mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody MAG z podwójnym pulsem jest jednakowa. Brak statystycznej różnicy median pomiarów twardości

dla dwóch różnych metod spawania, pozwala wnioskować o jednorodności złączy względem siebie i możliwości zamiennego stosowania tych metod.

Porównano mediany pomiarów twardości złączy spawanych metodę MAG oraz laserowo, zakładając następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody laserowej są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody laserowej są różne.

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,067 (skorygowana pod kątem powiązań) jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody laserowej jest jednakowa. Brak statystycznej różnicy median pomiarów twardości dla dwóch różnych metod spawania, pozwala wnioskować o jednorodności złączy względem siebie i możliwości zamiennego stosowania tych metod.

Wykonano analizę mediany pomiarów twardości złączy spawanych metodę MAG oraz metodą hybrydową, zakładając następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej są różne.

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,784 (skorygowana pod kątem powiązań) jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody hybrydowej jest jednakowa. Brak statystycznej różnicy median pomiarów twardości dla dwóch różnych metod spawania, pozwala wnioskować o jednorodności złączy względem siebie i możliwości zamiennego stosowania tych metod.

Przeanalizowano wartości mediany pomiarów twardości złączy spawanych metodę MAG oraz zgrzewanych, zakładając następujące hipotezy statystyczne:

 hipoteza zerowa H₀: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania są jednakowe, hipoteza alternatywna H_a: mediany populacji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania są różne.

Ponieważ uzyskana wartość P = 0,093 (skorygowana pod kątem powiązań) jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej H_0 i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość mediany populacji pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do mediany populacji pomiarów twardości złącza dla zgrzewania jest jednakowa. Brak statystycznej różnicy median pomiarów twardości dla dwóch różnych metod spawania, pozwala wnioskować o jednorodności złączy względem siebie i możliwości zamiennego stosowania tych metod.

Kolejnym etapem analizy statystycznej było porównanie odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza spawanego metodą MAG z pozostałymi metodami łączenia, w celu określenia jednorodności spoiny oraz możliwości zastosowania różnych metod łączenia. Dla porównania metody MAG oraz MAG z podwójnym pulsem założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem są jednakowe,
- hipoteza alternatywna Ha: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem są różne.

Na rysunku 5.3 przedstawiono graficzną analizę odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem, a w tabeli 5.8 przedstawiono wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza.

Tabela 5.8. Wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem

Metoda spawania	MAG	MAG PULS
Ilość pomiarów	30	30
Odchylenie standardowe	16,9	23,0
Wariancja	284,2	529,4
95% poziomu ufności odchylenia standardowego	(13,9 ; 21,9)	(18,8;30,2)

Z uwagi na brak normalnego rozkładu danych do badania odchyleń standardowych wykorzystano test Levenea. Ponieważ uzyskana wartość P = 0,102 jest większa od założonego poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość odchyleń standardowych pomiarów twardości

złącza dla metody MAG w stosunku do odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody MAG z podwójnym pulsem jest jednakowa, co świadczy o jednorodności spoiny złącza oraz możliwości zastosowania obu metod do łączenia felg specjalnych.



Rys. 5.3. Wyniki analizy statystycznej odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody MAG z podwójnym pulsem

W celu porównania wyników uzyskanych dla metody MAG oraz laserowej założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody laserowej są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody laserowej są różne.

Na rysunku 5.4 przedstawiono graficzną analizę odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do spawania laserowego, a w tabeli 5.9 przedstawiono wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla badanych metod spawania.

Tabela 5.9. Wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody laserowej

Metoda spawania	MAG	LASER
Ilość pomiarów	30	30
Odchylenie standardowe	16,9	22,5
Wariancja	284,2	507,8
95% poziomu ufności odchylenia	$(13.0 \cdot 21.0)$	$(17.7 \cdot 30.7)$
standardowego	(13,7,21,9)	(17,7,30,7)

Z uwagi na brak normalnego rozkładu danych do badania odchyleń standardowych wykorzystano test Levenea. Ponieważ uzyskana wartość P = 0,216 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody laserowej jest jednakowa, co świadczy o jednorodności spoiny oraz możliwości zastosowania obu metod do łączenia felg specjalnych.



Rys. 5.4. Wyniki analizy statystycznej odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do spawania laserowego

W kolejnym etapie porównano wyniki uzyskane dla metody MAG oraz hybrydowej laser + MAG, gdzie założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa H₀: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej są jednakowe,
- hipoteza alternatywna H_a: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej są różne.

Na rysunku 5.5 przedstawiono graficzną analizę odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej, a w tabeli 5.10 zestawiono wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla badanych metod spawania.

Tabela 5.10. Wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej

Metoda spawania	MAG	HLAW
Ilość pomiarów	30	30
Odchylenie standardowe	16,9	21,0
Wariancja	284,2	440,5
95% poziomu ufności odchylenia standardowego	(13,9;21,9)	(15,3 ; 30,7)

Ze względu na brak normalnego rozkładu danych do badania odchyleń standardowych wykorzystano test Levenea. Ponieważ uzyskana wartość P = 0,847 jest większa od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego nie można odrzucić hipotezy zerowej **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody hybrydowej jest jednakowa, co świadczy o jednorodności spoiny oraz możliwości zastosowania obu metod do łączenia felg specjalnych.



Rys. 5.5. Wyniki analizy statystycznej odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do metody hybrydowej

Ostatnim etapem analizy odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza było porównanie wyników dla metody MAG oraz zgrzewanie, gdzie założono następujące hipotezy statystyczne:

- hipoteza zerowa Ho: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania są jednakowe,
- hipoteza alternatywna Ha: odchylenia standardowe pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania są różne.

Na rysunku 5.6 przedstawiono graficzną analizę odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania, a w tabeli 5.11 przedstawiono wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza.

Tabela 5.11. Wartości odchylenia standardowego oraz wariancji pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania

Metoda spawania	MAG	ZGRZEWANIE	
Ilość pomiarów	30	30	
Odchylenie standardowe	16,9	9,1	
Wariancja	284,2	83,3	
95% poziomu ufności odchylenia standardowego	(13,9;21,9)	(6,2;14,3)	
Standardo i ego			

Z uwagi na brak normalnego rozkładu danych do badania odchyleń standardowych wykorzystano test Levenea. Ponieważ uzyskana wartość P = 0,001 jest mniejsze od poziomu ufności alfa = 0,05, dlatego należy odrzucić hipotezę zerową **H**₀ i z 95% pewnością możemy stwierdzić, że wartość odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla metody MAG w stosunku do odchyleń standardowych pomiarów twardości złącza dla zgrzewania jest różna. Analiza graficzna wykazała większą jednorodność spoiny łączonej metodą zgrzewania w stosunku do metody MAG, a uzyskane wyroby będą w mniejszym stopniu narażone na pękanie podczas kolejnych etapów produkcji.



Rys. 5.6. Wyniki analizy statystycznej odchylenia standardowego pomiarów twardości złącza dla spawania metodą MAG w stosunku do zgrzewania

Na podstawie analizy statystycznej można wnioskować, że średnie wartości median rozkładów twardości złącza dla poszczególnych metod spawania w stosunku do stosowanej obecnie metody MAG nie różnią się znacząco od siebie. Odchylenie standardowe rozkładów twardości złącza dla zgrzewania w stosunku do metody MAG jest statystycznie różne, natomiast odchylenie standardowe rozkładów twardości złącza pozostałych metod w stosunku to metody MAG nie wykazuje statystycznej różnicy.

Statystyczną analizę wyników pomiarów twardości złączy spawanych można podsumować:

- średnie mediany rozkładu twardości we wszystkich badanych spoinach są statystycznie jednakowe, co świadczy o jednorodności złączy niezależnie od metody spawania,
- dla wszystkich metod łączenia poza zgrzewaniem, odchylenia standardowe wyników twardości w stosunku do metody MAG są statystycznie jednakowe. Natomiast dla zgrzewania z 95% pewnością należy stwierdzić, że wartość odchyleń standardowych wyników twardości złącza jest różna w stosunku do metody stosowanej obecnie (MAG). Świadczy to o tym, że rozkład twardości jest najbardziej jednorodny dla zgrzewania, co wskazuje że, uzyskane wyroby będą w mniejszym stopniu narażone na pękanie podczas kolejnych etapów produkcji.

Analizy uzyskanych wyników badań mechanicznych porównujące metodę MAG, metodę MAG z podwójnym pulsem, spawanie laserowe, spawanie hybrydowe oraz zgrzewanie w kontekście produkcji felg specjalnych, można podsumować:

- w warunkach statycznego rozciągania zerwanie wszystkich próbek nastąpiło w materiale rodzimym (rys. 3.5.3.1), co pozwala na stwierdzenie, że obszar spoiny jest bardziej wytrzymały od materiału rodzimego. Analiza wyników jednoznacznie wskazuję, że wszystkie wykonane złącza, niezależnie od zastosowanej metody łączenia spełniają kryterium wytrzymałości stawiane dla materiału rodzimego tj. wytrzymałość złącza (R_m) powyżej 170 MPa (tab. 3.5.3.1; rys. 3.5.3.2),
- ocenę plastyczności złączy wykonano na podstawie prób zginania (rys. 3.5.3.3). Przygotowano dwa zestawy próbek, gdzie pierwszy zginano z rozciąganiem od strony lica, natomiast drugi zginano z rozciąganiem od strony grani. Po oględzinach powierzchni próbek nie ujawniono śladów pęknięć (tab. 3.5.3.2). Wszystkie złącza spełniają wymagania normy PN-EN ISO 5173:2023. Na tej podstawie stwierdzono, że charakteryzują się wystarczającą plastycznością,
- różnica twardości złączy dla wszystkich metod spawania dla stali DD11 pomiędzy materiałem rodzimym, SWC oraz spoiną wynosi 80 HV5 w zakresie od 118 do 198 HV5, natomiast dla stali dla stali DD14 różnica ta wynosi 88 HV5 w zakresie od 99 do

187 HV5 (tab. 3.5.2.3). Dla badanych obszarów średnia twardość w próbce DD11 dla materiału rodzimego jest o około 23% wyższa niż dla próbki DD14. W SWC twardość złączy dla stali DD11 jest wyższa o około 22%, a w spoinie jest wyższa o około 10% w stosunku do stali DD14. Analizując poszczególne metody spawania stwierdzono, że średnia zmiana twardości pomiędzy materiałem rodzimym a SWC jest najniższa dla zgrzewania stali DD11 i wynosi 2%, a najwyższa dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem i wynosi 18%. Z kolei dla materiału DD14 najniższa średnia różnica twardości pomiędzy materiałem rodzimym i SWC została odnotowana dla zgrzewania. Największą różnicę twardość pomiędzy materiałem rodzimym i SWC zaobserwowano dla spawania laserowego i wyniosła 21%. Średnia różnica twardości pomiędzy materiałem rodzimym a spoiną stali DD11 jest najmniejsza dla zgrzewania i wynosi 17%, a największa dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem i wynosi 47%. Z kolei dla materiału DD14 najniższa średnia zmiana twardości pomiędzy materiałem rodzimym i spoiną została odnotowana dla zgrzewania i wyniosła 12%, a najwyższa dla spawania MAG z podwójnym pulsem i wyniosła 63%. Średnia zmiana twardości pomiędzy SWC a spoiną jest dla stali DD11 najniższa dla zgrzewania i wynosi 15%, a najwyższa dla spawania hybrydowego i wynosi 35%. Z kolei dla materiału DD14 najmniejsza średnia zmiana twardości pomiędzy SWC i spoiną została odnotowana dla zgrzewania i wyniosła 12%, a największa dla spawania MAG z podwójnym pulsem i wyniosła 43%. Wzrost twardości dla spoiny wynika bezpośrednio z szybkiego chłodzenia oraz przemian fazowych zachodzących w materiale. Analiza rozkładu twardości wykazała największą średnią twardość spoiny złączy ze stali DD11 wykonanej metodą laserową, a dla spoiny DD14 metodą MAG z podwójnym pulsem. Są to jednak wartości poniżej 200 HV (rys. 3.5.3.4; rys. 3.5.3.5). Nie stwierdzono utwardzenia pomiędzy strefami a różnica twardości była poniżej 100 HV,

• średnia wartość pracy łamania złączy dla poszczególnych metod spawania oraz próbek ze stali DD11 wyniosła 29 J dla temperatury 20°C i 28 J dla temperatury -40°C (tab. 3.5.3.4). Dla próbek DD14 wartości te wynoszą odpowiednio 33 J i 32 J. Średnia udarność dla próbek ze stali DD11 wyniosła 145 J/cm² dla temperatury 20°C i 142 J/cm² dla temperatury -40°C (rys. 3.5.3.6 oraz rys. 3.5.3.7). Dla próbek DD14 wartości te wynoszą odpowiednio 166 J/cm² i 161 J/cm². Na przełomach próbek spawanych laserowo po próbie udarności obserwowano liczne pęcherze wynikające

z niewystarczającego czasu na odgazowanie spoiny. Pęcherze gazowe mogę być powodem obniżenia właściwości mechanicznych w tym udarności złączy i przyczyniać się do powstawania pęknięć zmęczeniowych w trakcie eksploatacji felg specjalnego zastosowania.

Materiał rodzimy badanych złączy (stal DD11 i DD14) jest zbudowany z ferrytu oraz perlitu (rys. 3.5.2.1). Analiza wyników badań metalograficznych wykazała, że spoiny charakteryzują się strukturą ferrytyczno – perlityczną w układzie dendrytów struktury pierwotnej narastających prostopadle do powierzchni krystalizacji w kierunku odprowadzenia ciepła (rys. 3.5.2.1). W zależności od metody spawania w spoinie obserwowano ferryt poligonalny, ferryt bocznopłytkowy oraz ferryt drobnoziarnisty. Najwięcej ferrytu typu boczno-płytkowego ujawniono w spoinach spawanych metodą MAG i MAG z podwójnym pulsem (rys. 3.5.2.3 oraz rys. 3.5.2.4), natomiast w spoinie laserowej obserwowano głównie ferryty drobnoziarnisty (rys. 3.5.2.5). W strefie wpływu ciepła obserwowano typowe struktury przegrzania wynikające z poszczególnych cykli cieplnych spawania charakterystycznych dla każdej z metod. Były to struktury martenzytyczno-bainityczne, struktury Widmanstättena oraz struktury typowe dla procesu normalizacji i niepełnej normalizacji (rys. 3.5.2.6).

Jednym z najważniejszych kryteriów stosowanych do oceny właściwości użytkowych felg specjalnych jest ich odporność na korozję w mgle solnej oraz korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki. Kryteria te są związane z warunkami rzeczywistymi eksploatacji felg. Przeprowadzono analizy statystyczne wyników uzyskanych podczas badań odporności na korozję złączy w komorze solnej i komorze Koesternicha, która miała na celu opisanie zmian masy na powierzchni złączy w czasie ekspozycji. Pierwszym etapem analizy było określenie korelacji pomiędzy zmianą masy badanych próbek, a czasem ich ekspozycji na czynniki korozyjne.

Wykonano analizę korelacji jednostkowej zmiany masy próbki funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla wszystkich metod spawania oraz materiałów DD11 i DD14. Dla wszystkich badanych próbek przejęto hipotezy:

- hipoteza zerowa H₀: brak korelacji,
- hipoteza alternatywna **H**_a: korelacja istnieje.

Współczynnik korelacji liniowej Pearsona jest miarą statystyczną, która opisuje siłę i kierunek liniowej zależności między dwiema zmiennymi ilościowymi. Wartość współczynnika korelacji Pearsona (r) zawiera się w przedziale od -1 do 1, gdzie:

- r = 1 oznacza idealną dodatnią korelację liniową (gdy jedna zmienna rośnie, druga również rośnie),
- r = -1 oznacza idealną ujemną korelację liniową (gdy jedna zmienna rośnie, druga maleje),
- r = 0 oznacza brak liniowej korelacji (zmienne są nieskorelowane liniowo).

Współczynnik Pearsona jest obliczany przy pomocy równania (5.5):

$$r = \frac{\sum (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \overline{x})^2 \sum (y_i - \overline{y})^2}}$$
(5.5)

gdzie:

 $x_i i y_i$ -kolejne wartości zmiennych, $\overline{x} i \overline{y}$ -średnie arytmetyczne zmiennych x i y.

W tabeli 5.12 przedstawiono obliczone wartości współczynnika Pearsona, natomiast na rysunku 5.7 i 5.8 pokazano wyniki analiz korelacji jednostkowej zmiany masy próbki w funkcji czasu dla poszczególnych metod spawania i zgrzewania. Ponieważ współczynnik Pearsona (tabela 5.12) wykazuje silną pozytywną korelację, a wartość P jest mniejsza od 0,05 dla wszystkich badanych próbek, dlatego możemy odrzucić hipotezę zerową i stwierdzić iż istnieje pozytywna korelacja jednostkowej zmiany masy próbki i czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej, niezależnie od metody spawania (rys. 5.7) dla stali DD11 oraz (rys. 5.8) dla stali DD14.

Tabela 5.12. Współczynnik Pearsona korelacji jednostkowej zmiany masy próbki i czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla materiałów DD11 i DD14 oraz wszystkich metod spawania

Materiał	Zgrzewanie	MAG	MAG Puls	Laser	HLAW
	Współczynnik korelacji [r]				
DD11	0,993	0,996	0,997	0,998	0,997
DD14	0,996	0,986	0,994	0,994	0,995



Rys. 5.7. Wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy próbki funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla materiału DD11 i poszczególnych metod spawania


Rys. 5.8. Wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy próbki funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla materiału DD14 i poszczególnych metod spawania

Z uwagi na silną korelację pomiędzy zmianą masy badanych próbek, a czasem ich ekspozycji na czynniki korozyjne, przeprowadzono analizę regresji, która pozwoliła na wyznaczenie równań krzywych kinetyki korozji dla poszczególnych złączy spawanych. Pierwszym etapem była analiza regresji jednostkowej zmiany masy próbki funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla materiału DD11 i DD14 oraz poszczególnych metod spawania, którą można opisać zależnościami przedstawionymi w tabeli 5.13. Na podstawie przeprowadzonych badań korozyjnych w atmosferze mgły solnej można stwierdzić, że istnieje zależność pomiędzy jednostkową zmianą masy próbki i czasem jej ekspozycji w środowisku korozyjnym, a zmienność masy próbek niezależnie o metody spawania jest w 99% opisana funkcją według tabeli 5.13. Przykładową analiza regresji jednostkowej zmiany masy i czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla zgrzewania materiału DD11, przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Wyniki analizy regresji jednostkowej zmiany masy próbki i czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla materiału DD11 łączonego metodą zgrzewania, gdzie: Δm = jednostkowa zmiana masy próbki w komorze solnej [g/m²], t = czas ekspozycji [h]

Tabela 5.13. Zależności opisujące jednostkową zmianę masy funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej, dla materiałów DD11 i DD14 oraz wszystkich metod spawania

Metoda	DD11	DD14	
spawania	Jednostkowa zmiana masy Δm [g/m ²]		
Zgrzewanie	$\Delta m = 16.79 + 0.7184 \text{ t} - 0.0002 \text{t}^2$	$\Delta m = 7.15 + 1.128 \text{ t} - 0.000231 \text{ t}^2$	
MAG	$\Delta m = -1.292 + 1.172 \text{ t} - 0.00028 \text{ t}^2$	$\Delta m = 10.57 + 0.8906 \text{ t} - 0.000348 \text{t}^2$	
MAG Puls	$\Delta m = 39.60 + 0.9977 t$	$\Delta m = 33.93 + 0.6573 t$	
Laser	$\Delta m = 23.10 + 0.8453 t$	$\Delta m = 36.39 + 0.7903 t$	
HLAW	$\Delta m = -1.17 + 0.9855 \text{ t} - 0.00019 \text{ t}^2$	$\Delta m = 35.87 + 0.5548 t$	

Kolejno wykonano analizę korelacji jednostkowej zmiany masy funkcji liczby cykli ekspozycji próbki w atmosferze związków siarki. W tabeli 5.14 przedstawiono obliczone wartości współczynnika Pearsona, natomiast na rysunku 5.10 i 5.11 pokazano wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy w funkcji liczby cykli dla poszczególnych metod spawania i zgrzewania. Dla wszystkich badanych próbek przejęto hipotezy:

- hipoteza zerowa H₀: brak korelacji,
- hipoteza alternatywna **H**_a: korelacja istnieje.

Ponieważ współczynnik Pearsona (tabela 5.14) wykazuje silną pozytywną korelację, a wartość P jest mniejsza od 0,05 dla wszystkich badanych próbek, dlatego możemy odrzucić hipotezę zerową i stwierdzić iż istnieje pozytywna korelacja jednostkowej zmiany masy próbki i liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki, niezależnie od metody spawania (rys. 5.10) dla stali DD11 oraz (rys. 5.11) dla stali DD14.

Tabela 5.14. Współczynnik Pearsona korelacji jednostkowej zmiany masy próbki i liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki dla materiałów DD11 i DD14 oraz wszystkich metod spawania

Materiał	Zgrzewanie	MAG	MAG Puls	Laser	HLAW
	Współczynnik korelacji [r]				
DD11	0,989	0,989	0,987	0,990	0,976
DD14	0,977	0,988	0,993	0,988	0,990



Rys. 5.10. Wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy próbki i liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki dla materiału DD11 i poszczególnych metod spawania



Rys. 5.11. Wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy próbki i liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki dla materiału DD14 i poszczególnych metod spawania

Wykonano analizę regresji jednostkowej zmiany masy próbki funkcji liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki w celu wyznaczenia funkcji krzywych kinetyki korozji, które opisano zależnościami przedstawionymi w tabeli 5.15.

Tabela 5.15. Zależności opisujące jednostkową zmianę masy funkcji liczby cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki, dla materiałów DD11 i DD14 oraz wszystkich metod spawania

Metoda	DD11	DD14	
spawania	Jednostkowa zmiana masy Δm [g/m ²]		
Zgrzewanie	$\Delta m = 1.700 + 27.50 \text{ x} - 0.6321 \text{ x}^2$	$\Delta m = -1.923 + 31.44 \text{ x} - 0.9606 \text{ x}^2$	
MAG	$\Delta m = 3.459 + 29.20 \text{ x} - 0.6912 \text{ x}^2$	$\Delta m = 1.582 + 27.54 \text{ x} - 0.6641 \text{ x}^2$	
MAG Puls	$\Delta m = 3.257 + 29.32 \text{ x} - 0.7170 \text{ x}^2$	$\Delta m = -0.818 + 25.41 \text{ x} - 0.5060 \text{ x}^2$	
Laser	$\Delta m = -0.788 + 24.73 \text{ x} - 0.5501 \text{ x}^2$	$\Delta m = 0.746 + 29.38 \text{ x} - 0.7208 \text{ x}^2$	
HLAW	$\Delta m = -2.983 + 29.42 \text{ x} - 0.9040 \text{ x}^2$	$\Delta m = 2.690 + 28.54 \text{ x} - 0.6500 \text{ x}^2$	

Na podstawie przeprowadzonych badań korozyjnych w atmosferze związków siarki można stwierdzić, że istnieje zależność pomiędzy jednostkową zmianą masy próbki i liczbą cykli ekspozycji w komorze, a zmienność masy próbek niezależnie o metody spawania jest w 99% opisana funkcją według tabeli 5.15. Przykładową analiza regresji jednostkowej zmiany masy i liczbą cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki dla metody MAG i materiału DD11, przedstawiono na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Wyniki analizy współczynników korelacji jednostkowej zmiany masy próbki i liczbą cykli ekspozycji w atmosferze związków siarki dla materiału DD11 i metody MAG, gdzie: $\Delta m =$ jedn. zmiana masy próbki [g/m²], X = 1. cykli w atmosferze związków siarki

W celu określenia czy średni jednostkowy ubytek masy jest statystycznie jednakowy dla badanych próbek w komorze solnej i komorze Koesternicha dla wszystkich metoda spawania, wykonano analizę ANOVA. Pierwszym etapem była analiza ANOVA wartości średnich jednostkowego ubytku masy w atmosferze wilgotnej mgły solnej, dla której wyniki przedstawiono na rysunku 5.13. Na podstawie zebranych danych podczas prób spawania przyjęto następujące hipotezy:

- hipoteza zerowa H₀: średnia wartość jednostkowej zmiany masy funkcji czasu jest taka sama dla wszystkich metod spawania,
- hipoteza alternatywna H_a: średnia wartość jednostkowej zmiany masy funkcji czasu jest różna i zależy od metody spawania.

Ponieważ uzyskana wartości P są większe od 0,05, dlatego nie możemy odrzucić hipotezy zerowej i stwierdzić że wartości średnie jednostkowej zmiany masy funkcji czasu ekspozycji w atmosferze mgły solnej dla wszystkich metod spawania są różne (rys. 5.13).



Rys. 5.13. Wyniki analizy ANOVA wartości średnich jednostkowego ubytku masy dla badań korozyjnych w komorze solnej

Następnie wykonano analizę ANOVA wartości średnich jednostkowego ubytku masy w atmosferze związków siarki, dla której wyniki przedstawiono na rysunku 5.14. Na podstawie zebranych danych podczas prób spawania przyjęto następujące hipotezy:

- hipoteza zerowa H₀: średnia wartość jednostkowej zmiany masy funkcji liczby cykli ekspozycji w komorze Koesternicha jest taka sama dla wszystkich metod spawania,
- hipoteza alternatywna Ha: średnia wartość jednostkowej zmiany masy funkcji liczby cykli ekspozycji w komorze Koesternicha jest różna i zależy od metody spawania.

Ponieważ uzyskana wartości P są większe od 0,05, dlatego nie możemy odrzucić hipotezy zerowej i stwierdzić że wartości średnie jednostkowej zmiany masy funkcji liczby cykli ekspozycji na związki siarki dla wszystkich metod spawania są różne (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Wyniki analizy ANOVA wartości średnich jednostkowego ubytku masy dla badań korozyjnych w komorze Koesternicha

Statystyczna analiza wyników badań korozyjnych złączy spawanych wykazała, że:

• istnieje silna pozytywna korelacja jednostkowej zmiany masy badanej próbki oraz czasu ekspozycji w komorze solnej,

- istnieje silna pozytywna korelacja jednostkowej zmiany masy badanej próbki oraz liczby cykli w komorze Koesternicha,
- proces korozyjny zachodzi równomiernie i stabilnie w czasie niezależnie od metody spawania dla materiału DD11 oraz DD14,
- Wyznaczono krzywe kinetyki korozji dla poszczególnych metod spawania stali DD11 i DD14,
- Wyznaczone krzywe kinetyki korozji pozwalają na określenie zmiany masy produktów korozji w czasie, a tym samym szybkości degradacji złącza.

Felgi specjalne wytwarzane w zakładzie Yokohama-TWS Liepaja produkowane są z wykorzystaniem procesu zgrzewania i procesu MAG dla felg poniżej 20" oraz wyłącznie z wykorzystaniem procesu MAG dla felg powyżej 20". Analiza wydajności badanych procesów łączenia cylindra felg powyżej 20", wykazała iż najkorzystniejsze jest zastąpienie technologii MAG procesem zgrzewania, gdyż proces ten jest pięciokrotnie wydajniejszy w stosunku do procesu stosowanego obecnie lub procesem spawania hybrydowego lub MAG z podwójnym pulsem, które są dwukrotnie bardziej wydajne. Uwzględniając aspekty ekonomiczne, wykazano iż koszt wdrożenia technologii zgrzewania dla cylindra felgi powyżej 20" jest dwukrotnie wyższy od technologii hybrydowej, jednak z uwagi na wydajność procesu, wdrożenie procesu zgrzewanie znajduje biznesowe uzasadnienie.

Uwzględniając kolejne procesy produkcyjne, do łączenia pierścienia felgi z dyskiem zaleca się wdrożenie technologii hybrydowej lub MAG z podwójmy pulsem gdyż proces zgrzewania w tym przypadku jest trudy w realizacji, a proces operacji uległ by wydłużeniu.

6 WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki badań potwierdziły przyjętą tezę, że energia liniowa łuku spawalniczego oraz moc wiązki laserowej decydują o strukturze i właściwościach złączy, a tym samym o możliwym zastosowaniu nowoczesnych wysokowydajnych procesów łączenia w produkcji felg specjalnego zastosowania. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników sformułowano następujące wnioski:

- Opracowana metodyka oceny struktury i właściwości złączy spawanych metodami MAG, MAG z podwójnym pulsem, spawanych laserowo, hybrydowo oraz zgrzewanych umożliwiała opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o ich właściwościach. W metodyce założono wykonanie badań nieniszczących i niszczących. Badania nieniszczące obejmowały badania wizualne, penetracyjne i radiograficzne. W ramach badań niszczących wykonano badania metalograficzne, badania właściwości mechanicznych złączy, a w szczególności statyczną próbę rozciągania, próbę zginania, próbę udarności, pomiary twardości, a także badania odporności korozyjnej. Jako kryterium przyjęto poziom jakości B według norm: dla spawania łukowego ISO 5817:2023. **PN-EN** dla spawania metoda laserowa wg wg PN-EN ISO 13919-1:2020, dla spawania metoda hybrydowa wg PN-EN ISO 12932:2013 oraz dla zgrzewania oporowego wg PN-EN ISO 14554-1:2014.
- Porównanie wyników symulacji badanych procesów spawania metodą elementów skończonych, w tym pola naprężeń i odkształceń oraz wyników prób technologicznych potwierdziły zbieżność wyników. Analizy numeryczne mogą zatem poprawić rozwój prac badawczo-rozwojowy w produkcji felg specjalnych w zakresie technologii spawalniczych. Użycie takich analiz pozwala na dokładniejsze i szybsze przygotowanie zmian w procesie produkcyjnym, co przekłada się na wyższą jakość końcowych produktów i skrócenie czasu wprowadzania innowacji.
- Struktura dla wszystkich złączy ze stali DD11 i DD14 była typowa dla procesów spawania. W złączach wyróżniono ferrytyczno-perlityczną strukturę materiału rodzimego, obszar strefy wpływu ciepła, w którym obserwowano gruboziarniste struktury przegrzania, strefę normalizacji i niepełnej normalizacji, o szerokościach zależności od cyklu cieplnego charakterystycznego dla poszczególnych metod łączenia oraz obszar spoiny zbudowany głównie ze struktur ferrytycznych w układzie dendrytów ukierunkowanych prostopadle do powierzchni krystalizacji o morfologii ferrytu poligonalnego, bocznopłytkowego i ferrytu drobnoziarnistego.

- Właściwości mechaniczne wszystkich złączy były na poziomie materiału podstawowego (R_m>170 MPa). Średnia udarność złączy ze stali DD11 wyniosła 145 J/cm² dla temperatury 20°C i 142 J/cm² dla temperatury -40°C. Dla złączy ze stali DD14 wartości te wynosiły odpowiednio 166 J/cm² i 161 J/cm². Podczas prób zginania, na powierzchni próbek nie ujawniono śladów pęknięć, co pozwala stwierdzić, że złącza charakteryzują się wystarczającą plastycznością do dalszego procesu produkcji felg specjalnych, w tym rolowania.
- Wykonane złącza doczołowe niezależnie od metody spawania, spełniały założone wymagania właściwości mechanicznych wymagane dla poziomu jakości "B" wg odpowiednich norm, jednak z uwagi na ujawnione liczne pęcherze złącza spawane laserowo nie spełniły wymagań poziomu jakości B wg PN-EN ISO 13919-1:2020. Pęcherze są wynikiem zbyt krótkiego czasu odgazowania spoiny. Niezgodności spawalnicze w postaci pęcherzy w spoinie mogą powodować pękanie w procesie formowanie wstępnego lub rolowania.
- Stwierdzono, że istotnym parametrem opisującym właściwości złączy, który może być wykorzystany do weryfikacji przydatności technologicznej określonej metody łączenia, szczególnie podczas formowania cylindra jest rozkład twardości oraz jego zmienność. Największą średnią twardością charakteryzowała się spoina w złączu ze stali DD11 spawana laserowo 189 HV, a dla spoiny złącza stali DD14 największą twardość odnotowano dla spawania metodą MAG z podwójnym pulsem 180 HV. Są to jednak wartości poniżej 200 HV. Nie stwierdzono utwardzenia pomiędzy strefami a różnica twardości była poniżej100 HV. Najmniejszą zmiennością twardości charakteryzowało się złącze zgrzewane, co wskazuje, że zgrzeina jest najbardziej jednorodna pod względem rozkładu twardości, szczególnie w porównaniu do złączy wykonanych obecnie stosowaną technologią MAG.
- Analiza statystyczna wyników zmienności rozkładu twardości w złączu spawanym oraz wyników badań właściwości mechanicznych i badań strukturalnych wykazała, że technologie spawania MAG z pulsem, spawania hybrydowego oraz zgrzewania przewidziane do stosowania w procesie wytwarzania felg specjalnych umożliwiają uzyskanie złączy na podobnym poziomie właściwości, jak w przypadku spawania MAG a zatem pozwalają na zastąpienie obecnie stosowanych metod spawania przez bardziej wydajne techniki bez znaczących zmian w właściwościach końcowych produktów.

- Ocena właściwości użytkowych badanych złączy na podstawie odporności na korozje we mgle solnej oraz w atmosferze wilgotnej siarki wykazała brak statystycznych różnic zmian masy próbki, co wskazuję, że niezależnie od technologii spawania złącza mają podobne właściwości użytkowe. Stwierdzono, że korozją zachodzi zgodnie z prawem parabolicznym, co pozwoliło na wyznaczenie krzywych kinetyki korozji.
- Proces zgrzewania jest najbardziej wydajny, przyjmując jako kryterium czas potrzebny na wykonanie połączenia cylindra oraz czas potrzebny na obróbkę ubytkową. Proces ten jest 5 krotnie szybszy w stosunku do obecnie stosowanej metody spawania MAG, zatem do łączenia cylindrów felg specjalnych, przy założeniu ich dalszego formowania zaleca się zgrzewanie. Natomiast do łączenia uformowanego cylindra wraz z dyskiem felgi, ze względu na brak możliwości zgrzewania zaleca się zastosowanie technologii spawania hybrydowego lub spawania metodą MAG z podwójnym pulsem. Technologie te pomimo, że są trzykrotnie wolniejsze w stosunku do procesu zgrzewania, jednak przy zachowaniu odpowiednich właściwości mechanicznych są dwukrotnie szybsze od obecnie stosowanej metody MAG.
- Koszt wdrożenia technologii zgrzewania w stosunku do technologii spawania hybrydowego do produkcji cylindra felg specjalnych jest dwukrotnie wyższy, natomiast uwzględniając wydajność jest to wdrożenie uzasadnione ekonomicznie.
- Opracowano wytyczne technologiczne do kwalifikowania technologii spawania łukowego metodą MAG z podwójnym pulsem oraz hybrydowego (laser + MAG) oraz zgrzewania blach ze stali DD11 i DD14 w procesie produkcji felg specjalnych, a w szczególności:
 - o dla metody MAG z podwójnym pulsem (135) należy stosować: ukosowanie na "I", odległość między łączonymi brzegami 2 mm, zakres energii liniowej od około 0,13 do 0,17 kJ/mm,
 - dla metody hybrydowej (laser + MAG; 52 + 135) należy stosować: ukosowanie na "I" bez odstępu między łączonymi elementami, energia liniowa w zakresie od 1,21 do 1,25 kJ/mm,
 - o dla zgrzewania (24) należy stosować: ukosowanie na "I" bez odstępu między łączonymi elementami oraz energia liniowa powinna być w zakresie od 2,34 do 2,38 kJ/mm.

Zastosowanie wskazanych wytycznych technologicznych powinno umożliwić uzyskanie złączy spełniających wymagania poziomu jakości B wg odpowiednich norm.

7 LITERATURA

- Edemilson J. Mantoam, Thiago L. Romanelli, Leandro M. Gimenez: Energy demand and greenhouse gases emissions in the life cycle of tractors: Biosystems engineering 151 (2016) 158 – 170,
- [2] Zhiquan Yeo, Jonathan Sze Choong Low, Ruisheng Ng, Hui Xian Tan: Planning for Environmental Sustainability Improvements – A Concept based on Eco-Efficiency Improvement: 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering,
- [3] Materiały własne Yokohama-TWS,
- [4] Ananthakrishna Somayaji, Narasimha Marakala, Shashiraj Somayaji, Ajit M. Hebbale: Studies on modal analysis of aluminium based carbon fibre reinforced optimized alloy wheel used in automotive sectors: Materials Today: Proceedings 52 (2022) 274–277,
- [5] Sandip Bhattacharyya, M. Adhikary, M.B. Das, Sudipto Sarkar: Failure analysis of cracking in wheel rims – material and manufacturing aspects: Engineering Failure Analysis 15 (2008) 547–554,
- [6] William Kery Gadwala, Raghu Babu G.: Modeling and analysis of car wheel rim for weight optimization to use additive manufacturing process: Materials Today: Proceedings 62 (2022) 336–345,
- [7] Norma PN-EN 10111:2009: Blachy i taśmy ze stali niskowęglowych walcowane na gorąco w sposób ciągły, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno - Warunki techniczne dostawy,
- [8] J. Mucha, L. Kascak, E. Spisak: Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements: ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, VOL. XI, 2011,
- [9] Andrzej Klimpel: Technologie spawania i cięcia, tom 1, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2013,
- [10] Piotr Adamiec, Jerzy Dziubiński: Techniki wytwarzanie: spawalnictwo, skrypt uczelniany nr 1816, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 1994,
- [11] Andrzej Klimpel, Marceli Mazur: Podręcznik spawalnictwa, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2004,
- [12] https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/welding-market-101657,
- [13] ETRTO European Tyre and Rim Technical Organisation Standards manual 2020,
- [14] EUWA ES 3.12 Association of European Wheel Manufacturers test requirements for agricultural wheels,

- [15] Rozporządzenie nr 167/2013 Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów rolniczych i leśnych,
- [16] Artykuł nr 124 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – stanowiący jednolite przepisy dotyczące homologacji do samochodów osobowych i ich przyczep,
- [17] Norma PN-ISO 3911:2007 koła i obręcze do opon pneumatycznych Terminologia, oznaczenie i cechowanie,
- [18] EUWA ES 3.25 Association of European Wheel Manufacturers Technical Crack Definition for Wheels,
- [19] https://www.trelleborg.com/en/wheels/products-and-solutions/wheels/agriculture-and-forestry-wheels/agricultural-wheels,
- [20] Dobrzański L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Gliwice – Warszawa 2002,
- [21] Adamczyk J.: Inżynieria wyrobów stalowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000,
- [22] Binczyk F.: Konstrukcyjne stopy odlewnicze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003,
- [23] Adamiec P., Dziubiński J.: Wybrane zagadnienia materiałów konstrukcyjnych i technologii wytwarzania pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998,
- [24] Hadasik E.: Przetwórstwo metali: plastyczność a struktura. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006,
- [25] https://www.ronal-wheels.com/pl/r70-blue-jbwt,
- [26] E. Hadasik Red.: Przetwórstwo metali: plastyczność a struktura. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006,
- [27] F. Binczyk: Konstrukcyjne stopy odlewnicze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003,
- [28] J. Piątkowski: Wpływ dodatków stopowych oraz modyfikacji na strukturę oraz właściwości obrabianych cieplnie siluminów średnionadeutektycznych. Rozprawa Doktorska, Politechnika Śląska Katowice (2000),
- [29] https://www.carbonrev.com/motorsports,
- [30] https://f1wheels.com,
- [31] https://www.hrewheels.com,

- [32] E. Hadasik, D. Kuc: Obróbka plastyczna stopów magnezu. Obróbka Plastyczna Metali Vol. XXIV Nr 2 (2013),
- [33] J. Adamiec: Spawalność odlewniczych stopów magnezu Monografia. Wydawnictwo
 Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010,
- [34] https://www.engineersrule.com/finite-element-analysis-of-pneumatic-tire-loading-onwheel/,
- [35] J. Stearns, T. S. Srivatsan, X. Gao, and P. C. Lam.: Understanding the Influence of Pressure and Radial Loads on Stress and Displacement Response of a Rotating Body: The Automobile Wheel. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2006, Article ID 60193, Akron 2005,
- [36] https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814015596115,
- [37] H. Utsunomiya, Y. Saito, T. Shinoda, I. Takasu. Elastic-plastic finite element analysis of cold ring rolling process. Journal of Materials Processing Technology 125–126 (2002) 613–618,
- [38] http://www.e-spawalnik.pl/?spawalnosc-z-definicji,59,
- [39] M. Mazur: Podstawy spawalnictwa, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 1999,
- [40] https://handlowiec-rs.pl/rodzaje-spoin-spawalniczych,
- [41] A. Czupryński: Podstawy technologie spawalnicze w ćwiczeniach laboratoryjnych część 1, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2019,
- [42] N.F.H. Kersten, I.M. Richardson: Heat distribution in resistance upset butt welding: Journal of materials processing technology 2 0 9 (2 0 0 9) 2715–2722,
- [43] T. Kuroda, K. Ikeuchi, H. Ikeda: Flash butt resistance welding for duplex stainless steels: Vacuum 80 (2006) 1331–1335,
- [44] M. Sharifitabar, A. Halvaee, S. Khorshahian: Microstructure and mechanical properties of resistance upset butt welded 304 austenitic stainless-steel joints: Materials and Design 32 (2011) 3854–3864,
- [45] http://spawalnictwo.blogspot.com/2010/09/zgrzewanie.html,
- [46] R. R. Baracaldo, M. C. Santos, M. A. A. Echeverría: Effect of flash butt welding parameters on mechanical properties of wheel rims: Scientia et Technica Año XXII, Vol. 23, No. 01, 2018. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701,
- [47] A. Szymański: Modelowanie procesu zgrzewania oporowego punktowego: Zeszyt naukowy nr 1631: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004,
- [48] J. Mazurkiewicz, J. Szymszal, J. Ścierski: Podstawy technologii przetwórstwa metali, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2003,

- [49] S. Chayoukhi, Z. Bouaziz, A. Zghal: Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model: Journal of materials processing technology 199 (2008) 402–411,
- [50] E. Karayel, Y. Bozkurt: Additive manufacturing method and different welding applications: J mater res technol. 2020; 9(5):11424–11438,
- [51] A. Ramazani, K. Mukherjee, A. Abdurakhmanov, U. Prahl, M. Schleser, U. Reisgen,
 W. Bleck: Micro-macro-characterisation and modelling of mechanical properties of gas
 metal arc welded (GMAW) DP600 steel: Materials Science & Engineering A 589 (2014)
 1–14,
- [52] S. Zielińska, F. Valensib, N. Pellerinc, S. Pellerinb, K. Musioła, Ch. de Izarrab, F. Briand: Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding (GMAW): Journal of materials processing technology 2 0 9 (2009) 3581–3591,
- [53] L. Huang, D. Wu, X. Hua, S. Liu, Z. Jiang, F. Li, H. Wang, S. Shi: Effect of the welding direction on the microstructural characterization in fiber laser-GMAW hybrid welding of 5083 aluminum alloy: Journal of Manufacturing Processes 31 (2018) 514–522,
- [54] R. T. Martinez, G. A. Bestard, A. M. A. Silva, S. C. A. Alfaro: Analysis of GMAW process with deep learning and machine learning techniques: Journal of Manufacturing Processes 62 (2021) 695–703,
- [55] I. A. Ibrahim, S. A. Mohamat, A. Amir, A. Ghalib: The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters: Procedia Engineering 41 (2012) 1502 – 1506,
- [56] G. Tham, M. Y. Yaakub, S. K. Abas, Y. H. Manurung, B. A. Jalil: Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter: Proceedia Engineering 41 (2012) 1794 – 1799,
- [57] E. Mercan, Y. Ayan, N. Kahraman: Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW: Engineering Science and Technology, an International Journal 23 (2020) 723–731,
- [58] I. Shareef, C. Martin, I. Shareef, C. Martin: Effect of Process Parameters on Weld Spatter in Robotic Welding: Procedia Manufacturing 48 (2020) 358–371,
- [59] https://rime.de/en/welding/mag-welding/,
- [60] https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-8f4f2d8c-f4a4-4516-bdd9-bc5b50a80f7f/c/73_Palubicki_Innowacyjne.pdf,

- [61] Z. Mirski, P. Pękala: Spawanie metodą CMT (Cold Metal Transfer) w porównaniu z klasyczną metodą MAG w przemyśle motoryzacyjnym: Przegląd spawalnictwa Vol. 88 2/2016,
- [62] H. Cai, L. Xu, L. Zhao, Y. Han, H. Pang, W. Chen: Cold metal transfer plus pulse (CMT+P) welding of G115 steel: Mechanisms, microstructure, and mechanical properties: Materials Science & Engineering A 843 (2022) 143156,
- [63] R. Escribano-García, N. Rodriguez, O. Zubiri, J. Piccini, I. Setien: 3D numerical simulation of GMAW Cold Metal Transfer using response surface methodology: Journal of Manufacturing Processes 76 (2022) 656–665,
- [64] D. Srinivasan, P. Sevvel, I. John Solomon, P. Tanushkumaar: A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016,
- [65] T. H. Lee, D. H. Kam, J. H. Oh, C. Kim: Ti-6Al-4V alloy deposition characteristics at electrode-negative polarity in the cold metal transfer-gas metal arc process: Journal of materials research and technology 2022;19:685-696,
- [66] M. Balasubramanian, M. V. Choudary, A. Nagaraja, K. O. C. Sai: Cold metal transfer process – A review: Materials Today: Proceedings 33 (2020) 543–549,
- [67] J. Ge, J. Lin, Y. Lei, H. Fu: Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding: Materials Science & Engineering A 715 (2018) 144–153,
- [68] Y. Zhao, X. Shi, K. Yan, G. Wang, Z. Jia, Y. He: Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel: Journal of Materials Processing Tech. 262 (2018) 382–391,
- [69] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen: Advanced gas metal arc welding processes: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 06.2013,
- [70] https://paton.pl/spawanie-pulsem-w-metodzie-tig-oraz-mig-mag/,
- [71] Z. Wang, D. Jiang, J. Wu, M. Xu: A review on high-frequency pulsed arc welding: Journal of Manufacturing Processes 60 (2020) 503–519,
- [72] K. Wu, Y. Zeng, M. Zhang, X. Hong, P. Xie: Effect of high-frequency phase shift on metal transfer and weld formation in aluminum alloy double-wire DP-GMAW: Journal of Manufacturing Processes 75 (2022) 301–319,
- [73] K. Wu, P. Xiea, Z. Liu, M. Zeng, Z. Liang: Investigation of double arc interaction mechanism and quantitative analysis T of double arc offset in high-power double-wire DP-GMAW: Journal of Manufacturing Processes 49 (2020) 423–437,

- [74] K. Wu, X. Cao, T. Yin, M. Zeng, Z. Liang: Metal transfer process and properties of double-wire double pulsed gas T metal arc welding: Journal of Manufacturing Processes 44 (2019) 367–375,
- [75] L.L. Wang, H.L. Wei, J.X. Xue, T. DebRoy: Special features of double pulsed gas metal arc welding: Journal of Materials Processing Tech. 251 (2018) 369–375,
- [76] M. Sena, M. Mukherjeeb, S.K. Singhb, T.K. Palc: Effect of double-pulsed gas metal arc welding (DP-GMAW) process variables on microstructural constituents and hardness of low carbon steel weld deposits: Journal of Manufacturing Processes 31 (2018) 424– 439,
- [77] K. Wu, N. Ding, T. Yin, M. Zeng, Z. Liang: Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW: Journal of Manufacturing Processes 35 (2018) 728–734,
- [78] Y. Huang, Y. Yuan, Y. Feng, J. Liu, L. Yang, L. Cui: Effect of activating flux Cr2O3 on microstructure and properties of laser welded 5083 aluminum alloys: Optics & Laser Technology 150 (2022) 107930,
- [79] Z. Zhang, X. Wang, Q. Sun, B. Yang, L. Xiong, H. Liu: Study on microstructure and properties of laser dissimilar welded joints of ultra-high strength PHS1500/PHS2000 steel: Optics & Laser Technology 150 (2022) 107933,
- [80] L. Cui, Z. Peng, Y. Chang, D. He, Q. Cao, X. Guo, Y. Zeng: Porosity, microstructure and mechanical property of welded joints produced by different laser welding processes in selective laser melting AlSi10Mg alloys: Optics & Laser Technology 150 (2022) 107952,
- [81] J. Svenungsson, I. Choquet, A. F. H. Kaplan: Laser welding process a review of keyhole welding modelling: Physics Procedia 78 (2015) 182 – 191,
- [82] W. Xu, W. Tao, H. Luo, S. Yang: Effect of welding speed on microstructure and mechanical behavior of laser welded Al-Si coated 22MnB5 steel: Optics & Laser Technology 154 (2022) 108344,
- [83] D. Wyszyński: Spawanie laserowe wybrane metody: Przegląd spawalnictwa, Vol. 88 12/2016,
- [84] M. S. Khan, S. Ali, D. Westerbaan, W. Duley, E. Biro, Y. N. Zhou: The effect of laser impingement angle on the optimization of melt pool geometry to improve process stability during high-speed laser welding of thin-gauge automotive steels: Journal of Manufacturing Processes 78 (2022) 242–253,

- [85] H. Ramiarison, N. Barka, S. Amira: Optimization of parameters in laser welding of Aluminum Alloy 5052-H32 using beam oscillation technique for mechanical performance improvement: International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2022,
- [86] Z. Cheng, X. Du, B. Qi, Z. Yuan, Q. Wu, J. Zou, R. Xiao: Microstructure and mechanical properties of 3D- GH3536/R-GH3128 butt joint welded by fiber laser welding with focus rotation: Journal of materials research and technology 2022;18:1460-1473,
- [87] M. Zubairuddin, R. R. Kumar, B. Ali, P. Kumar, A.K. Singh: Thermal analysis of Laser welding of Grade 91 steel: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.291,
- [88] J. Pilarczyk, S. Stano, M. Banasik, J. Dworak: Wykorzystanie technik laserowych do spawania elementów o małych wymiarach w Centrum Laserowym Instytutu Spawalnictwa, Gliwice: Instytut Spawalnictwa, 04.2011,
- [89] A. Czupryński, A. Rzeźnikiewicz: Specjalne technologie spawalnicze w ćwiczenia laboratoryjnych – część 2, Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2020,
- [90] Klimpel A.: Technologie laserowe w spawalnictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011,
- [91] A. Borek, R. Grzelka, A. Klimpel, S. Mucha, B. Scibisz: Technologie laserowe spawania, wytwarzania i obróbki cieplnej warstw wierzchnich: Przegląd spawalnictwa, 10.2013,
- [92] M. Hashemzadeh, Y. Garbatov, C. Guedes Soares: Hybrid-laser welding-induced distortions and residual stresses analysis of large-scale stiffener panel: Ocean Engineering 245 (2022) 110411,
- [93] B. Yanga, F. Liua, C. Tana, L. Wua, B. Chenb, X. Songa, H. Zhao: Influence of alternating magnetic field on microstructure and mechanical properties of laser-MIG hybrid welded HG785D steel joint: J mater res technol. 2020; 9(6):13692–13705,
- [94] J. Ning, S. J. Na, C. Wang, L. J. Zhang: A comparison of laser-metal inert gas hybrid welding and metal inert gas welding of high- nitrogen austenitic stainless steel: journal of materials research and technology 2021;13:1841-1854,
- [95] D. Wang, Y. Dong, L. Liu, M. Zhu, H. Wang, C. Liu: Effect of pulsed laser and laserarc hybrid on aluminum/steel riveting-welding hybrid bonding technology: Journal of materials research and technology 2022; 17:1043-1053,
- [96] Y. Li, S. Geng, Z. Zhu, Y. Wang, G. Mi, P. Jiang: Effects of heat source configuration on the welding process and joint formation in ultra-high power laser-MAG hybrid welding: Journal of Manufacturing Processes 77 (2022) 40–53,

- [97] T. R. Hernandez, V. L. C. Hernandez, M.A. G. Renteria, R. T. Gonzalez, S. G. Villarreal, F. F. C. Lopez, L. A. F. Franco: First assessment on the microstructure and mechanical properties of GTAW-GMAW hybrid welding of 6061-t6: Journal of Manufacturing Processes 59 (2020) 658–667,
- [98] J. Xie, C. Cai, Y. Liang, Z. Liu, Y. Ma: Microstructure and mechanical properties of heat affected zone of laser-MAG hybrid welded low carbon bainitic steel joints: Optics & Laser Technology 148 (2022) 107729,
- [99] S. Zhen, Z. Duan, D. Sun, Y. Li, D. Gao, H. Li: Study on microstructures and mechanical properties of laser–arc hybrid welded S355J2W+N steel: Optics & Laser Technology 59 (2014) 11–18,
- [100] F. Liu, C. Tan, X. Gong, L. Wu, B. Chen, X. Song, J. Feng: A comparative study on microstructure and mechanical properties of T HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding: Optics and Laser Technology 128 (2020) 106247,
- [101] S. E. Nielsen: High power laser hybrid welding challenges and perspectives: 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 15, Finland 08.2015,
- [102] J. Górka, S. Stano: Spawanie hybrydowe HLAW (wiązka laserowa MAG) złączy teowych blach o grubości 10 mm ze stali S700MC: Przegląd spawalnictwa: Vol. 89 5/2017,
- [103] E. Le Guen, R. Fabbro, M. Carin, F. Coste, P. Le Masson: Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes: Optics & Laser Technology 43 (2011) 1155–1166. 04.2011,
- [104] F. Zhang, S. Liu, F. Liu, H. Zhang: Stability evaluation of laser-MAG hybrid welding process: Optics & Laser Technology 116 (2019) 284–292. 03.2019,
- [105] A. Gumenyuk, M. Rethmeier: Developments in hybrid laser-arc welding technology, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany 2013,
- [106] Kyung-Min Hong, Yung C. Shin: Prospects of laser welding technology in the automotive industry: Journal of Materials Processing Technology 245 (2017) 46–69,
- [107] Klimpel A.: Technologie laserowe. Spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012,
- [108] https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/mc1129.pdf,
- [109] Dobrzański L.A. redakcja naukowa: Zasady doboru materiałów inżynierskich z kartami charakterystyk, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001,

- [110] Norma PN-EN ISO 17637:2017: Badania nieniszczące złączy spawanych Badania wizualne złączy spawanych,
- [111] Norma PN-EN ISO 17636-1:2013: Badania nieniszczące spoin Badanie radiograficzne
 Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną,
- [112] Norma PN-EN ISO 5817:2023: Spawanie Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) - Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych,
- [113] Norma PN-EN ISO 13919-1:2020: Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego - Wymagania i zalecenia do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych - Część 1: Stal, nikiel, tytan i ich stopy,
- [114] Norma PN-EN ISO 12932:2013: Spawanie Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu - Poziomy jakości dla niezgodności,
- [115] Norma PN-EN ISO 14554-1:2014: Wymagania dotyczące jakości zgrzewania Zgrzewanie rezystancyjne metali Część 1: Pełne wymagania dotyczące jakości,
- [116] Norma PN-EN ISO 17639:2022: Badania niszczące spawanych złączy metali Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych,
- [117] Norma PN-EN ISO 15614-1:2017: Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali - Badanie technologii spawania - Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu,
- [118] M. Urbańczyk: Rozprawa doktorska "Wpływ technologii spawania hybrydowego (laser + MAG) na strukturę i właściwości złączy doczołowych stali o wysokiej granicy plastyczności S960QL": Politechnika Śląska, Katowice 2018,
- [119] Norma PN-EN ISO 4136:2022: Badania niszczące złączy spawanych metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych,
- [120] J. Pilarczyk: Poradnik inżyniera Spawalnictwo. Tom 1, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2003,
- [121] Norma PN-EN ISO 6892-1:2020: Metale Próba rozciągania. Cześć 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej,
- [122] Norma PN-EN ISO 5173:2023: Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -Badanie na zginanie,
- [123] Norma PN-EN ISO 9015-2:2016: Badania niszczące złączy spawanych metali Badanie twardości - Część 2: Badanie mikrotwardości złączy spawanych łukowo,
- [124] https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/ImpactTest.html,

- [125] Norma PN-EN ISO 148-1:2017: Metale Próba udarności sposobem Charpy'ego -Część 1: Metoda badania,
- [126] Norma PN-EN ISO 9227:2023: Badania korozyjne w sztucznych atmosferach Badania w rozpylonej solance,
- [127] Norma PN-EN ISO 22479:2022: Korozja metali i stopów Próba z ditlenkiem siarki w wilgotnej atmosferze (metoda ustalonej objętości gazu),
- [128] Kik T., Slováček M.: Wykorzystanie analiz numerycznych procesów spawania jako wsparcia technicznego w przemyśle - Część 1 - Wstęp do symulacji numerycznych procesów spawania,
- [129] Kik T., Slováček M.: Wykorzystanie analiz numerycznych procesów spawania jako wsparcia technicznego w przemyśle - Część 2 – metodologia i walidacja,
- [130] Goldak J., Chakravarti A. and Bibby M.: A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. Metallurgical Transactions B., Volume 15B, June 1984, pp. 299 – 305,
- [131] Rochalski D., Golański D., Chmielewski T.: Modelowanie spawalniczego źródła ciepła w procesie spawania hybrydowego: Przegląd spawalnictwa Vol. 89 10/2017,
- [132] Winczek J.: The influence of the heat source model selection on mapping of heat affected zones during surfacing by welding: Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics 2016, 15(3), 167-178,
- [133] Nguyen' N.T., Mai Y. -W., Oht A.: Analytical solution for a new hybrid doubleellipsoidal heat source in semi-infinite body: Advances in Composite Materials and Structures VII, C.A. Brebbia, W.R. Blain & W.P. De Wilde (Editors) 2000 WIT Press, www.witpress.com, ISBN 1-85312-825-2,
- [134] Kik T.: Computational Techniques in Numerical Simulations of 3 Arc and Laser Welding Processes: Materials 2019, 12,
- [135] Kik T.: Heat Source Models in Numerical Simulations of Laser Welding: Materials 2020, 13, 2653,
- [136] Danielewski H., Skrzypczyk A.: Steel Sheets Laser Lap Joint Welding Process Analysis: Materials 2020, 13, 2258,
- [137] ESI Group: SYSWELD reference manual, digital version SYSWELD 2013.1,
- [138] Kik T.: Predykcja własności złączy spawanych z wykorzystaniem zaawansowanych modeli źródeł ciepła. T. 931. Politechnika Śląska; 2022,
- [139] https://www.fronius.com/pl-pl/poland/spawalnictwo/produkty-i-rozwizania/spawanie-ręczne/migmag/tpsi/tps-500i,

- [140] Slack N., Jones A.B., Johnston R.: Operations management: Seventh edition, Pearson, United Kingdom 2013,
- [141] George M.L., Rowlands D., Price M., Maxey J.: Lean Six Sigma pocket toolbook: McGraw-Hill, United Kingdom 2005,
- [142] https://leanmanufacturingupdate.com/wp-content/uploads/2016/12/VSM-Example-1.png,
- [143] https://paulinagrabowska.pl/energia-liniowa-arc-energy-a-ilosc-wprowadzonegociepla-heat-input/,
- [144] N. Konieczna: Rozprawa doktorska "Spawalność stopu INCONEL 617": Politechnika Śląska, Katowice 2019,
- [145] J. Adamiec: Rozprawa doktorska "Wpływ energii liniowej łuku i warunków eksploatacji na strukturę i własności spoin wykonanych wysokoenergetyczną metodą spawania MAG": Politechnika Śląska, Katowice 2000,
- [146] Q. Brook: "Lean Six Sigma and Minitab": OPEX Resources Ltd, 2014,
- [147] Beck M., Berger P., Hügel H.: The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO2 lasers, Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28, s. 2430-2442,
- [148] Costa R. D. F. S, Barbosa M. L. S., Silva F. J. G., Sousa S. R., Sousa V. F. C., Ferreira B. O.: Study of the Chlorine Influence on the Corrosion of Three Steels to Be Used in Water Treatment Municipal Facilities, Materials: 16(6), 2514, 2023,
- [149] Gałuszko M.: Korozja atmosferyczna konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych w otoczeniu elektrowni węglowych. Metody ochrony. Instytut energii atomowej, Raport IAE – 26/A – IV Seminarium naukowo - techniczne, Czerwiec 1997,
- [150] A. Erfanian, M. H. Moayed, M. Mirjalili, S. Pahlavan.: Insight into the Elemental Sulfur Corrosion of Carbon Steel in Chloride Bearing Media Using Electrochemical and Nonelectrochemical Techniques. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering 131 (2022) 104177,
- [151] X. Li, G. Cao, M. Guo, C. Peng, Y. Peng, K. Ma, Z. Wang: Influence of Cl⁻ and SO₂ on Carbon Steel Q235, Pipeline Steel L415 and Pressure Vessel Steel 16MnNi Corrosion Behavior in Industrial and Marine Atmosphere Environment. International Journal of Electrochemical Science 16 (2021) 21126,
- [152] J. Ning, Y. Zheng, B. N. Brown, D. Young: The Role of Iron Sulfide Polymorphism in Localized H2S Corrosion of Mild Steel. Corrosion 73 (2) 2016,

8 STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Główne kierunki rozwoju felg specjalnego zastosowania są związane z podnoszeniem ich właściwości wytrzymałościowych oraz odporności na korozję. Wynika to z trudnych warunków eksploatacji. Jednym z kryteriów decydujących o właściwej konstrukcji felgi, jest możliwość jej łączenia technologiami spawalniczymi, gdzie o właściwościach złącza decyduje cykl cieplny, zależny od energii liniowej spawania. Prawidłowe określenie wpływu energii łuku spawalniczego na strukturę i właściwości złączy, zapewnia bezpieczną eksploatację tego typu elementów.

W pracy podjęto próby określenia wpływu energii liniowej łuku spawalniczego oraz mocy wiązki laserowej na strukturę i właściwości złączy ze stali DD11 i DD14 używanych do produkcji felg specjalnych. Na tej podstawie określono możliwości zastosowania innowacyjnych technologii łączenia, między innymi spawania laserowego, hybrydowego oraz metody MAG z podwójnym pulsem, które zapewniają wzrost wydajności procesu, w porównaniu z obecnie stosowaną metodą MAG oraz technologią zgrzewania stosowaną do produkcji felg poniżej 20".

We współpracy z Centrum Spawalnictwa Górnośląskiego Instytutu Technologicznego (GIT) w Gliwicach i zakładu produkcyjnego Yokohama-TWS Lipawa znajdującego się na Łotwie, wykonano próby technologiczne spawania laserowego, hybrydowego (laser + MAG) i MAG z podwójnym pulsem oraz próby zgrzewania i spawania metodą MAG. Do oceny jakości złączy spawanych wykonano badania nieniszczące oraz badania niszczące. Badania nieniszczące obejmowały badania wizualne, penetracyjne i radiograficzne. W ramach badań niszczących wykonano statyczną próbę rozciągania, udarności, zginania i twardości. Dane te wykorzystano do opracowania modelu procesów spawania metodami elementów skończonych, a także do analizy statystycznej uzyskanych wyników. Potwierdzono, zgodnie z wymaganiami dla poszczególnych metod spawania, że złącza spełniają kryteria poziomu jakości B, z wyłączeniem złączy spawanych laserowo dla których ujawniono liczne pęcherze. Wytrzymałość złączy wynosiła średnio 400MPa dla stali DD11 i 320MPa dla stali DD14. Średnia udarność w temperaturze 20°C wyniosła 145 J/cm² dla stali DD11 i 166 J/cm² dla stali DD14. W temperaturze -40°C odnotowano średnio 142 J/cm² dla stali DD11 i 161 J/cm² dla stali DD14. Podczas próby zginania nie ujawniono pęknięć. Wyniki uzupełniono o badania metalograficzne oraz badania odporności korozyjnej złączy w warunkach mgły solnej i atmosferze wilgotnych związków siarki, co symulowało warunki pracy felgi. Nie stwierdzono istotnych różnic w odporności na korozję pomiędzy materiałem podstawowym,

a złączem spawanym. Opracowano wytyczne technologiczne do kwalifikowania technologii łączenia blach ze stali DD11 i DD14 w procesie produkcji felg specjalnych. Wykazano, że proces zgrzewania jest najbardziej wydajny, przyjmując jako kryterium czas potrzebny na wykonanie połączenia cylindra oraz czas potrzebny na obróbkę ubytkową. Technologie spawania hybrydowego i MAG z podwójnym pulsem są trzykrotnie wolniejsze w stosunku do procesu zgrzewania, jednak dwukrotnie szybsze od obecnie stosowanej metody MAG. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono przyjętą tezę, że energia liniowa łuku spawalniczego oraz moc wiązki laserowej decydują o strukturze i właściwościach złączy, a tym samym o możliwym zastosowaniu nowoczesnych wysokowydajnych procesów łączenia w produkcji felg specjalnego zastosowania, spełniających wymagania klienta zgodnych z wytycznymi ETRTO.

Słowa kluczowe: Felgi specjalnego zastosowania, nowoczesne technologie spawania, stale niskowęglowe do obróbki plastycznej na zimno,

SUMMARY OF THE DISSERTATION

The main directions in the development of special-purpose rims are focused on enhancing their strength properties and corrosion resistance, driven by the demanding operating conditions. One crucial criterion for designing rims is their compatibility with welding technologies, where the properties of the joint depend on the thermal cycle, which in turn is influenced by the linear welding energy. Determining the impact of energy of the welding arc on the structure and properties of joints ensures the safe operation of such components.

This study attempts to determine the influence of linear energy of the welding arc and laser beam on the structure and properties of joints made from DD11 and DD14 steels, which are used in the production of specialized rims. Based on this, the potential for using innovative joining technologies — such as laser welding, hybrid welding, and double-pulse MAG welding — was evaluated. These methods offer increased process efficiency compared to the currently used MAG method and resistance buttwelding technology employed for rims smaller than 20 inches.

In collaboration with the Welding Center of the Silesian Institute of Technology (GIT) in Gliwice and the Yokohama-TWS Lipawa manufacturing plant in Latvia, technological trials of laser, hybrid (laser + MAG), and double-pulse MAG, as well as resistance buttwelding and MAG welding, were conducted. Non-destructive and destructive testing was performed to assess the quality of the welded joints. Non-destructive tests included visual, penetrative, and radiographic examinations. Destructive tests involved static tensile, impact, bending, and hardness tests. The collected data were used to develop finite element welding process models and to perform statistical analyses of the results. It was confirmed that the joints met the quality level B criteria for the respective welding methods, except for the laser-welded joints, which exhibited numerous pores. The joint strength averaged 400 MPa for DD11 steel and 320 MPa for DD14 steel. At -40°C, it averaged 142 J/cm² for DD11 and 161 J/cm² for DD14. No cracks were detected during the bending test.

Additional metallographic and corrosion resistance tests were conducted on the joints in a salt fog and humid sulfur compound atmosphere, simulating operating conditions for rims. No significant differences in corrosion resistance were found between the base material and the welded joints. Technological guidelines were developed for qualifying the welding technology for DD11 and DD14 steel in specialized rim production. The study demonstrated that resistance welding is the most efficient process based on the time required to join the cylinder and perform machining. Hybrid welding and double-pulse MAG welding are three times slower than resistance welding but twice as fast as the currently used MAG method.

The results confirmed the hypothesis that linear energy of the welding arc and laser beam influence the structure and properties of joints. Consequently, modern, high-efficiency joining processes can be applied in the production of specialized rims, meeting customer requirements according to ETRTO guidelines.

Keywords: special-purpose rims, modern welding technologies, low-carbon steels for cold forming.

KONIEC