



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY



ROZPRAWA DOKTORSKA

**ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW PROCESU
SPAWANIA METODĄ MIG/MAG ORAZ GEOMETRII
ROWKA SPAWALNICZEGO NA ODCHYLENIE
PŁASKOŚCI ELEMENTÓW ZE STALI
NIERDZEWNEJ GATUNKU 1.4301**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS
OF MIG/MAG WELDING PROCESS AND WELD
GROOVE GEOMETRY ON FLATNESS DEVIATION
OF ELEMENTS MADE OF STAINLESS STEEL 1.4301**

mgr inż. Damian Grzesiak

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta

Promotor pomocniczy: dr inż. Kwiryn Jan Wojsyk

Koszalin, 2022

Spis treści

Wykaz oznaczeń.....	4
Streszczenie.....	5
Summary	6
1. Wstęp.....	7
1.1. Wprowadzenie.....	7
1.2. Geneza pracy i uzasadnienie wyboru tematu.....	7
1.3. Zakres pracy	8
2. Analiza stanu wiedzy z zakresu powstawania odkształceń spawalniczych	9
2.1. Charakterystyka złączy spawanych	9
2.2. Wpływ ciepła na odkształcenia spawalnicze	13
2.3. Charakterystyka odkształceń spawalniczych	15
2.4. Charakterystyka metody spawania łukowego elektrodą topliwą MIG/MAG	17
2.5. Metody pomiaru odkształceń spawalniczych	17
2.6. Charakterystyka stali 1.4301.....	18
2.7. Analiza wpływu parametrów procesu spawania na odkształcenia spawalnicze	19
2.8. Analiza wpływu geometrii rowka spawalniczego na odkształcenia spawalnicze.....	27
2.9. Wnioski z analizy literatury	30
3. Hipotezy, cele i zakres rozprawy	32
3.1. Cel i zakres rozprawy	32
3.2. Hipotezy badawcze.....	34
4. Badania doświadczalne.....	35
4.1. Cel i metodyka badań	35
4.2. Stanowiska badawcze	35
4.2.1. Zrobotyzowane stanowisko spawalnicze Panasonic TM2000	35
4.2.2. Stanowisko badawcze z wykorzystaniem przyrządu sterowanego numerycznie do wykonywania spoin wzdłużnych	36
4.3. Stanowiska pomiarowe.....	39
4.3.1. Stanowisko pomiarowe stykowe z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Wenzel LH 108.....	39
4.3.2. Stanowisko pomiarowe bezstykowe z zastosowaniem skanera Atos 5M.....	40
4.4. Analiza rozkładu zmiennej losowej odchyłek płaskości.....	43
4.4.1. Metodyka badań zmiennej losowej odchyłek płaskości	43
4.4.2. Wyniki pomiaru odchyłek płaskości powierzchni	44
4.4.3. Analiza statystyczna	45
4.4.4. Analiza wyników badań.....	50
4.4.5. Wnioski z analizy rozkładu zmiennej losowej odchyłek płaskości	50
4.5. Analiza wpływu kierunku walcowania blach na odchyłkę płaskości powierzchni.....	51
4.5.1. Wprowadzenie.....	51
4.5.2. Metodyka badań wpływu kierunku walcowania na odchyłkę płaskości.....	51
4.5.3. Analiza wyników wpływu kierunku walcowania na odchyłkę płaskości	57
4.5.4. Wnioski z analizy wpływu kierunku walcowania blach na odchyłkę płaskości powierzchni	58

4.6.	Badania i analiza wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni	59
4.6.1.	Wprowadzenie	59
4.6.2.	Metodyka badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni	60
4.6.3.	Wyniki pomiarów wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni	65
4.6.4.	Analiza wyników wpływu parametrów technologicznych MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości	68
4.6.5.	Wnioski z analizy wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni	77
5.	wdrożenie wyników rozprawy w zakładzie produkcyjnym Tepro s.a.	78
5.1.	Aplikacja wyników rozprawy oraz analizy stanu wiedzy z materiałów źródłowych w zakładzie TEPRO S.A.	79
5.2.	Przykład zmian przebiegu technologii wykonania drzwi komory próżniowej na podstawie wyników rozprawy i analizy stanu wiedzy	80
5.3.	Wnioski	82
6.	Podsumowanie	83
	Bibliografia	87
	Spis rysunków	91
	Spis tabel	93

WYKAZ OZNACZEŃ

- $\sigma_{\ln x}$ – odchylenie standardowe nieobciążone logarytmu,
- $\sigma_{\ln x}^2$ – wariancja rozkładu logarytmu-normalnego,
- $\mu_{\ln x}$ – wartość oczekiwana rozkładu logarytmu-normalnego,
- **A** – amper,
- **g** – średnia geometryczna,
- **GP** – wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa,
- **MAG** – Metal Activ Gas – spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych,
- **MIG** – Metal Inert Gas – spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych,
- **ms** – milisekunda,
- **s** – sekunda,
- **V** – volt,
- v_a – dolna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o jedno odchylenie standardowe logarytmu,
- v_g – górna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o jedno odchylenie standardowe logarytmu,
- v_{2a} – dolna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o dwa odchylenia standardowe logarytmu,
- v_{2g} – górna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o dwa odchylenia standardowe logarytmu,
- v_{3a} – dolna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o trzy odchylenia standardowe logarytmu,
- v_{3g} – górna wartość rozproszenia względem średniej geometrycznej o trzy odchylenia standardowe logarytmu.

STRESZCZENIE

W rozprawie podjęto działania mające na celu ustalenie wpływu mocy prądu, kąta pochylenia uchwytu względem kierunku spawania, odległości końcówki prądowej od powierzchni blachy oraz oscylacji uchwytu w postaci wychylenia w stosunku do osi rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni przy zachowaniu określonej energii liniowej procesu spawania. Dodatkowo przeanalizowano wpływ kąta ukosowania, odstępu i progu przy zachowaniu określonym polu przekroju jego powierzchni na odchyłkę płaskości powierzchni po procesie spawania. Analizę rozpatrywanych parametrów uzupełniono o ustalenie wpływu kierunku walcowania blach na odchyłkę płaskości. W pracy wyznaczono rozkład zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni na podstawie którego dobrano metodykę oceny wpływu badanych parametrów technologicznych. Spawanie przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku firmy Panasonic oraz na zaprojektowanym przyrządzie do spawania spoin wzdłużnych. Akwizycje danych przeprowadzono z wykorzystaniem metody stykowej oraz bezstykowej z wykorzystaniem skanera 3D. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że rozkład zmiennej losowej jest rozkładem logarytmo-normalnym. Kierunek walcowania blachy wpływa istotnie na średnią geometryczną i odchylenie standardowe logarytmu odchyłki płaskości oraz rozkład odchyłek wzdłuż osi spoiny. Najistotniejszy wpływ na minimalizację odchyłki płaskości po procesie spawania miał kąt pochylenia uchwytu w stosunku do kierunku spawania mimo określonego poziomu energii liniowej. Kryterium określonego przekroju poprzecznego rowka spawalniczego w tolerancji 5% było niewystarczające w celu minimalizacji wpływu zmian geometrii rowka spawalniczego. Wyniki rozprawy oraz analizy literatury wdrożono w firmie TEPRO S.A..

Słowa kluczowe: wpływ parametrów technologicznych, wpływ geometrii rowka na kształt litery V, odchyłka płaskości, spawanie MIG/MAG, rozkład zmiennej losowej

SUMMARY

In the dissertation, efforts were made to determine the effect of current power, the angle of the torch with reference to the welding direction, the distance of the current tip from the surface of the sheet metal and the oscillation of the torch in the form of deflection with reference to the axis of the welding groove on the deviation of surface flatness while maintaining a given linear energy of the welding process. In addition, the effect of groove angle, root opening and root face at a given cross-sectional area on the deviation of surface flatness after the welding process was analyzed. The analysis of the studied parameters was supplemented by the determination of the influence of the direction of sheet rolling on the flatness deviation. In this study, the distribution of the random variable deviation of surface flatness was determined. The methodology for analyzing the influence of the studied technological parameters was selected on the basis of the determined distribution of the random variable. The study was carried out on a robotic workstation made by Panasonic and on a designed longitudinal welding instrument. Data acquisition was carried out using contact and non-contact methods with a 3D scanner. Based on the study, the distribution of the random variable was determined to be a log-normal distribution. The direction of sheet rolling significantly influenced on the geometric mean, standard deviation of the logarithm of flatness deviation and the distribution of deviations along the weld axis. The most significant influence on the minimization of the flatness deviation after the welding process was the angle of the torch in relation to the welding direction regardless of the given level of linear energy. The criterion of the given weld groove cross-section within a tolerance of 5% was not enough to minimize the impact of changes in weld groove geometry. The results of the dissertation and literature analysis were implemented at TEPRO S.A.

Keywords: influence of technological parameters, influence of groove geometry on V-shape, flatness deviation, MIG/MAG welding, distribution of random variable

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Proces spawania jest procesem specjalnym wg normy PN-EN ISO 9001:2015, spowodowane jest to problemem pełnego zagwarantowania jakości złącza spawanego. Stosowanie badań nieniszczących umożliwia ustalenie poziomu jakości złącza wyłącznie na ściśle określonych jego odcinkach. Należy podkreślić, iż wdrożenie i stosowanie metodyki przewidzianej w serii norm PN-EN ISO 3834, całkowicie nie wyeliminuje niezgodności czy też wad w złączach. Przytoczona problematyka skupia się głównie na zapewnieniu wytrzymałości złącza spawanego na poziomie wytrzymałości materiału podstawowego.

Wytwarzanie spawanych komór próżniowych, oprócz konieczności zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości złącza spawanego, dodatkowo narzuca konieczność zapewnienia odpowiedniej szczelności. Jej poziom dodatkowo determinuje jakość wyrobu. Brak nieszczelności oraz odpowiednia wytrzymałość złączy spawanych, to główne wymagania stawiane komorom próżniowym. Wytwórca obok przytoczonej problematyki, szczególną uwagę zwraca również na wielkość naddatków na obróbkę skrawaniem. Im mniejsze naddatki będzie można zastosować przy produkcji danej komory próżniowej, tym większy zysk producent może wygenerować. Warto zaznaczyć, że niewłaściwy dobór naddatków technologicznych wiąże się z ryzykiem ogromnych strat finansowych.

Oddziaływanie cyklu cieplnego podczas spawania w większym lub mniejszym stopniu indukuje odkształcenia spawalnicze. Operacje prostowania płomieniowego, mogą usuwać niektóre z powstałych odkształceń, jednakże wyprostowanie skomplikowanej struktury konstrukcyjnej, w której występują puste przestrzenie tj. podwójne płaszcze wodne często jest niemożliwe. Poza tym zawsze lepsza i tańsza jest profilaktyka, niż poprawianie odkształconej konstrukcji. Analiza wpływu dostępnych parametrów technologicznych oraz geometrii rowka spawalniczego na powstawanie i obecność odkształceń w komorach umożliwia minimalizację ryzyka oraz kosztów przy produkcji spawanych komór próżniowych.

1.2. Geneza pracy i uzasadnienie wyboru tematu

Autor niniejszej pracy pełniąc funkcję technologa oraz inżyniera spawalnictwa w firmie TEPRO S.A. w Koszalinie, podczas wypełniania swoich obowiązków zawodowych niejednokrotnie musiał dokonywać analiz ryzyka danego procesu technologicznego. Największą trudność sprawia przewidywanie poziomu odkształceń spawalniczych na określonym etapie produkcyjnym. Analiza stanu wiedzy z zakresu niniejszej problematyki, zawarta w literaturze oraz wiedzy empirycznej skumulowanej w środowisku spawalników

i spawaczy, często jest niewystarczająca do minimalizacji powstających odkształceń spawalniczych. Dodatkowym czynnikiem, wpływającym na wybór tematu podjętej pracy, jest restrykcja ilości wprowadzanego ciepła przy uznaniu technologii przez jednostkę notyfikującą wg normy m.in. PN-EN ISO 15614-1:2017-08/A1:2019-12. Ograniczanie ilości wprowadzanego ciepła, pozwoli bowiem zachować przydatność uznanych technologii spawania (WPQR) oraz znacząco obniżyć koszty produkcji.

1.3. Zakres pracy

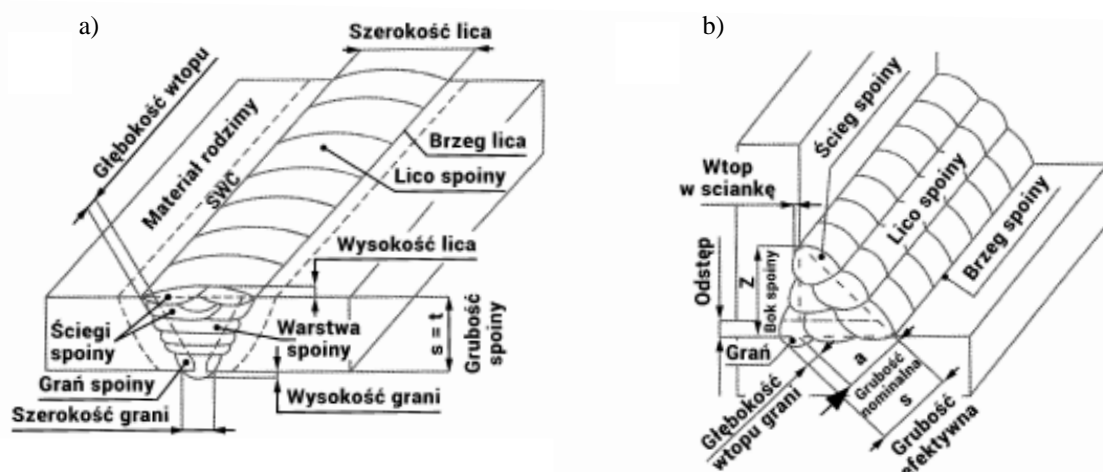
Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy z nich to wprowadzenie do tematyki pracy oraz geneza podjęcia tematu rozprawy. W drugim przedstawiono analizę problematyki odkształceń spawalniczych na podstawie zgromadzonej literatury. W kolejnej części pracy przedstawiono hipotezy, cel i zakres rozprawy. W rozdziale czwartym zaprezentowano specyfikacje stanowisk badawczych i pomiarowych, wyniki badań analizy rozkładu zmiennej losowej odkształceń spawalniczych, wpływu kierunku walcowania łączonych blach oraz wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu MIG/MAG i geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości po procesie spawania. W rozdziale piątym przedstawiono etapy wdrożenia oraz zakres zastosowania wyników rozprawy w firmie TEPRO S.A. Natomiast ostatni rozdział to podsumowanie, oraz wnioski końcowe rozprawy.

2. ANALIZA STANU WIEDZY Z ZAKRESU POWSTAWANIA ODKSZTAŁCEŃ SPAWALNICZYCH

Z analizy dostępnej literatury wynika, że wpływ cyklu cieplnego spawania na odkształcenia spawalnicze zależy jest od wielu czynników. Do tych czynników należy rodzaj spoiny, metoda spawania oraz parametry spawania. To samo złącze można wykonać stosunkowo szerokim zakresem parametrów technologicznych, wykorzystując określoną metodę spawania np. półautomatyczną metodę spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów MIG/MAG. Różnorodność doboru parametrów spawania sprawia, że uzyskane w ten sposób złącza, pod względem wytrzymałości mechanicznej mogą różnić się nieznacznie, jednakże różnica poziomu odkształceń spawalniczych danego złącza może być znacząca. Minimalizacja odkształceń spawalniczych jest konieczna pod względem ekonomicznym. Zmniejszając odkształcenia spawalnicze, można pomniejszyć naddatki technologiczne na obróbkę skrawaniem oraz zminimalizować zakres prac związanych z prostowaniem konstrukcji. Dzięki odpowiedniej prewencji powstających odkształceń spawalniczych zabiegi prostowania można całkowicie wyeliminować w toku produkcyjnym.

2.1. Charakterystyka złączy spawanych

Do podstawowych spoin stosowanych przy wytwarzaniu konstrukcji stalowych, należą spoiny czołowe i pachwinowe. Na rysunku 1 przedstawiono graficznie spoinę czołową i pachwinową wraz z podstawowymi elementami tych spoin.



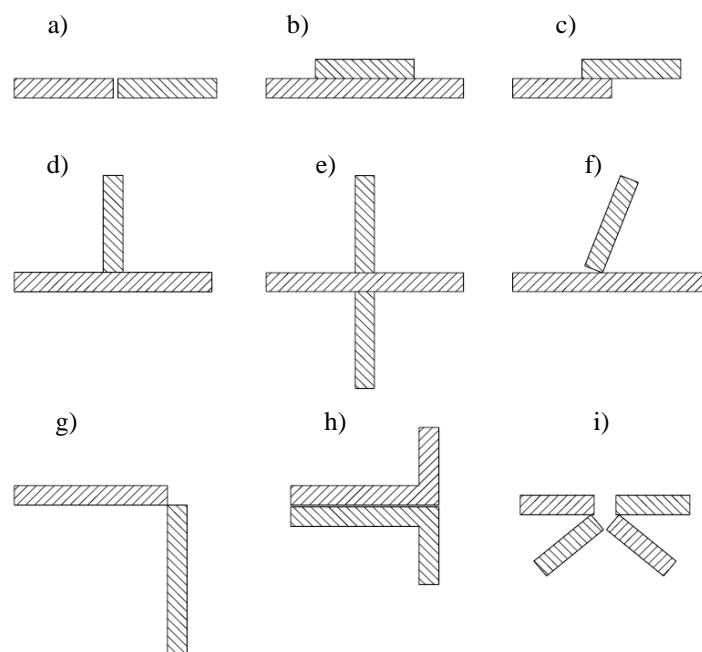
Rys. 1. Ilustracja spoiny czołowej i pachwinowej oraz elementy podstawowe spoiny: czołowej (a), pachwinowej (b) [Ferenc2017]

Spoiny czołowe i pachwinowe różnią się istotnie m. in. sposobem wykonania, przygotowaniem krawędzi czy wytrzymałością mechaniczną. Szersze zestawienie różnic między spoinami czołowymi i pachwinowymi przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie różnic między spoinami czołowymi i pachwinowymi [Wojsyk2019]

Spoiny czołowe	Spoiny pachwinowe
Grubość spoiny zazwyczaj jest równa grubości materiałów łączonych, ewentualnie cieńszego z nich (Wyjątkiem są spoiny czołowe z niepełnym przetopem dopuszczone Eurokodem 3).	Grubość spoiny zależy w pewnej relacji od grubości łączonych materiałów. Dobierając grubość spoiny pachwinowej należy spełnić zależności. $t_{sp} > 0,2 t_{max}$, lecz minimum 4 mm, $t_{sp} \leq 0,7 t_{min}$ dla spoin jednostronnych, $t_{sp} \leq 0,5 t_{min}$ dla spoin dwustronnych.
W zależności od metody spawania wymagane jest ukosowanie krawędzi materiałów spawanych.	Nie wymagają ukosowania materiałów spawanych.
Powinny posiadać płaskie lub nieznacznie wypukłe lico.	Najkorzystniej jest gdy lico jest wklęsłe, akceptowalne – płaskie. Niekorzystne jest wypukłe lico ze względów wytrzymałościowych i ekonomicznych.
Nie powiększają objętości konstrukcji.	Zwiększają objętość konstrukcji.
Przeznaczone są do przenoszenia obciążeń głównych.	Przeznaczone są do łączenia elementów słabiej obciążonych i nie poddanych obciążeniom wibracyjnym.
Ich przekrój poprzeczny jest uzależniony od grubości łączonych elementów oraz metody spawania.	Grubość spoiny może być powiększona „do wewnątrz” pod warunkiem dokumentowania tego faktu. Wykorzystując głęboko wtapiające metody spawania można powiększyć grubość spoin pachwinowych zgodnie z PN-EN 1993-1-8:2006.
Łatwość kontroli stosując badania nienoszące. Możliwość uzyskania grani o wysokich parametrach wytrzymałościowych.	Kontrola istnienia i jakości przetopu jest ograniczona zarówno w przypadku spoin jedno- jak i dwustronnych. Prowadzi to do obecności w grani korbów i inicjatorów pęknięć.
Długość spoiny jest zawsze równa długości materiałów łączonych	Możliwe wykonanie ściegami przerywanymi. Długość pojedynczych odcinków spoin pachwinowych zawarta jest między $6a_{sp}$ a $150 a_{sp}$ (a_{sp} – obliczeniowa grubość spoiny) jednak nie mniej niż 30 mm. Dla długości spoiny powyżej $150a_{sp}$ lub 1,7 m spoiny mają mniejszą wytrzymałość obliczeniową.

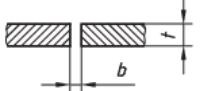

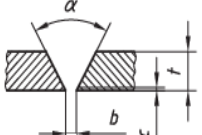

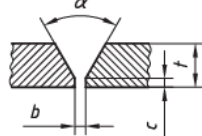

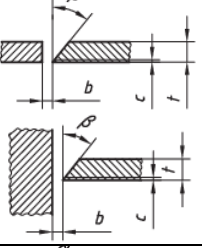
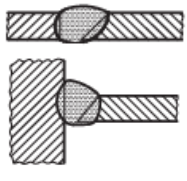
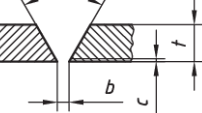
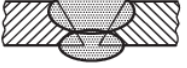
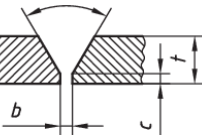

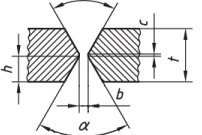

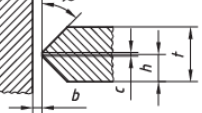
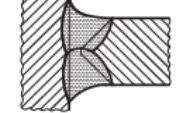
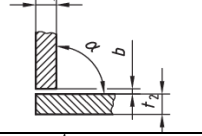
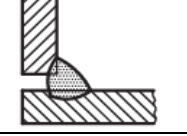
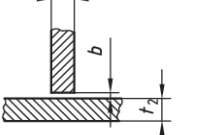
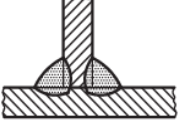
Typy złączy przedstawione w normie PN-EN ISO 17659:2008 określają głównie orientację elementów względem siebie oraz ich krawędzi przeznaczonych do połączenia. Na rysunku 2 przedstawiono typy złączy wg normy PN-EN ISO 17659:2008.



Rys. 2. Typy złączy: złącze doczołowe (a), złącze równoległe (b), złącze zakładkowe (c), złącze teowe (d), złącze krzyżowe (e), złącze kątowe (f), złącze narożne (g), złącze grzbietowe (h), złącze wieloczęściowe (i) [PN-EN ISO 17659:2008]

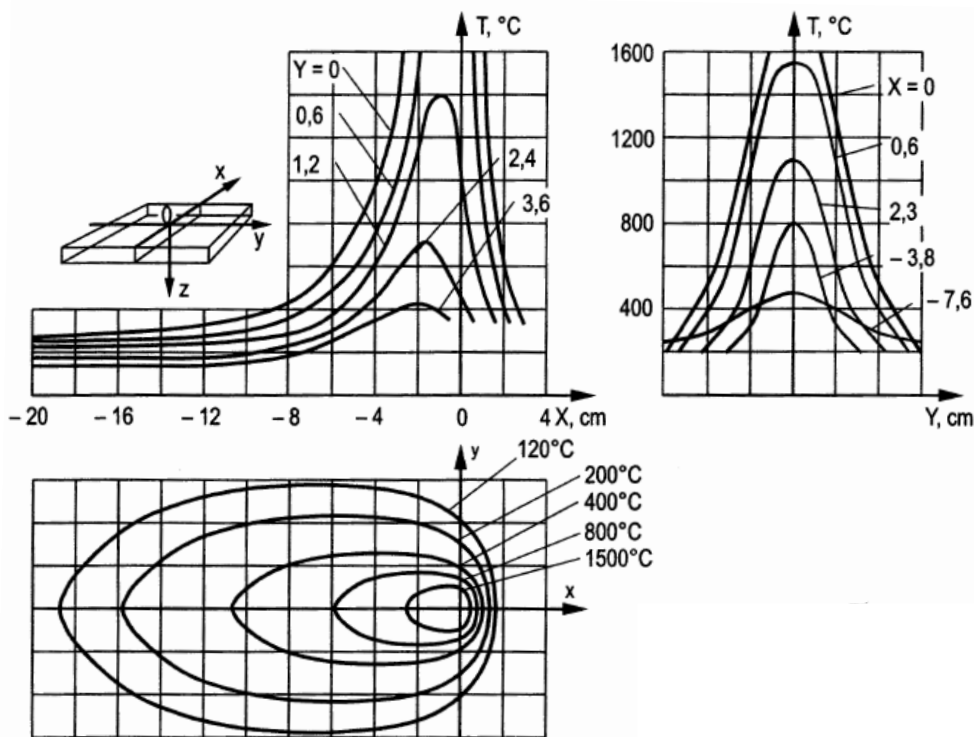
W normie PN-EN ISO 9692-1:2014-02, przedstawiono rodzaje oraz sposób przygotowania krawędzi spawanych elementów do spawania m.in. łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów. Norma, w swoim zakresie obejmuje spoiny czołowe z pełnym przetopem oraz spoiny pachwinowe. Warto podkreślić, że sposób przygotowania krawędzi łączonych elementów wpływa bezpośrednio na ekonomię procesu spawania. Każdy sposób przygotowania owych krawędzi wiąże się z innym polem przekroju poprzecznego rowka spawalniczego, co bezpośrednio wpływa na liczbę ściągów wypełniających ten rowek. Należy zaznaczyć, że nowoczesne niskoenergetyczne technologie spawania w tym odmiany pulsacyjne MAG i hybrydowe: Plazma MAG i Laser-MAG umożliwiają stosowanie znacznie węższych rowków, a nawet rezygnacji z ukosowania wstępnego materiałów łączonych. Ma to bowiem istotny wpływ na wielkość odkształceń pozostających po spawaniu. W normie PN-EN ISO 2553:2019-06 zawarto nazwy, kształty i znaki umowne spoin przedstawianych na rysunkach technicznych. Znaki umowne, pozwalają w łatwy sposób zidentyfikować rodzaj spoiny oraz sposób, w jaki powinny być przygotowane krawędzie spawanych elementów. W tabeli 2 przedstawiono wybrane sposoby przygotowania krawędzi spawanych elementów do spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów.

Tab. 2. Wybrane sposoby przygotowania krawędzi spawanych elementów dla spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów

Zalecany zakres grubości materiału	Symbol graficzny PN-EN ISO 2553	Przekrój poprzeczny rowka	Odstęp	Kąt rozwarcia	Próg	Ilustracja
			mm	°	mm	
$3 < t \leq 8$			$6 \leq b \leq 8$			
$3 < t \leq 10$	V		≤ 4	$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 2	
$5 < t \leq 40$	Y		$1 \leq b \leq 4$	$\alpha \approx 60^\circ$	$2 \leq c \leq 4$	
$3 < t \leq 10$	∟		$2 \leq b \leq 4$	$35^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$1 \leq c \leq 2$	
$3 < t \leq 40$	U		≤ 3	$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 2	
> 10	YU		$1 \leq b \leq 4$	$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$2 \leq c \leq 4$	
> 10	X		$1 \leq b \leq 3$	$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 2	
> 10	K		$1 \leq b \leq 4$	$35^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 2	
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	△		≤ 2	$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$		
$t_1 > 3$ $t_2 > 3$	▷		≤ 2	$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$		

2.2. Wpływ ciepła na odkształcenia spawalnicze

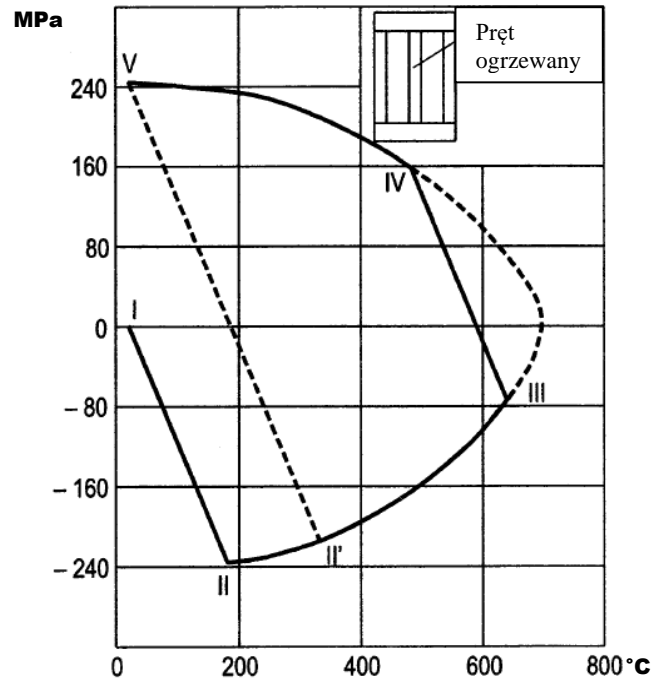
Biorąc pod uwagę dostępną literaturę, zauważa się, że bez względu na typ złącza spawanego oraz rodzaj spoiny, cechą charakterystyczną procesu spawania, jest konieczność doprowadzenia energii cieplnej. Jej celem jest lokalne stopienie i wymieszanie materiałów łączonych. Proces ten może przebiegać z udziałem materiału dodatkowego i podstawowych lub wyłącznie z udziałem materiałów podstawowych. Wynikiem procesu spawania jest spoina, której główną cechą jest monolityczność. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład temperatur wokół źródła ciepła na powierzchni spawanego elementu [Pilarczyk2017].



Rys. 3. Rozkład temperatur wokół źródła ciepła na powierzchni spawanych elementów [Pilarczyk2017]

Biorąc pod uwagę powyższe rozkłady temperatury, zauważa się, że proces spawania wprowadza nierównomierny rozkład ciepła w obszarze łączenia spawanych elementów. Metale i ich stopy, podczas podgrzewania wykazują zależność wydłużenia w funkcji temperatury. W wyniku nierównomiernego rozkładu ciepła, strefy materiału spawanego o niższej temperaturze stawiają opór strefom o temperaturze wyższej. Nierównomierny rozkład ciepła jest główną przyczyną powstawania naprężeń i odkształceń spawalniczych. Powyższe zjawisko zobrazować można za pomocą jarzma składającego się z trzech prętów, w którym środkowy pręt jest ogrzewany, a sąsiadujące są odizolowane cieplnie. Środkowy pręt w wyniku oddziaływania cieplnego próbuje wydłużyć się, jednakże sąsiadujące pręty odizolowane cieplnie stawiają temu opór, przez co środkowy pręt trwale odkształca się. W środkowym pręcie

w wyniku trwałego odkształcenia podczas nagrzewania po ostygnięciu będą obecne naprężenia rozciągające. Na rysunku 4 przedstawiono wykres naprężeń pręta ogrzewanego w funkcji temperatury [Sędek2000].



Rys. 4. Naprężenia pręta ogrzewanego w funkcji temperatury. I-II odkształcenia sprężyste, II-II odkształcenia plastyczne, III-IV chłodzenie, IV-V odkształcenia plastyczne, V-II' redystrybucja naprężeń przy ponownym podgrzewaniu [Sędek2000]

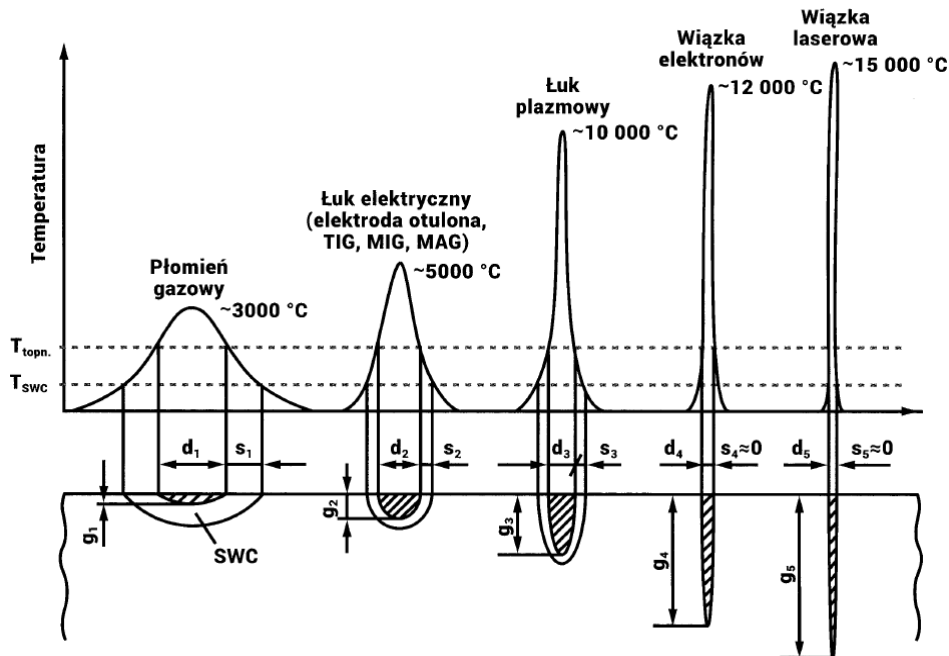
Rozkład temperatur w strefie nagrzania a tym samym odkształcenia spawalnicze, będą różne w zależności od zastosowanej metody spawania. W tabeli 3 przedstawiono zestawienie podstawowych metod spawania wraz z ich przybliżoną wartością gęstości ciepła oraz temperaturę maksymalną źródła ciepła.

Tab. 3. Zestawienie podstawowych metod spawania oraz przybliżone wartości gęstości ciepła oraz temperatury maksymalnej źródła [Kumar2018]

Metoda spawania	Gęstość ciepła (W/cm ²)	Temperatura maksymalna (°C)
Spawanie gazowe	10 ² -10 ³	2500-3500
Spawanie elektrodami otulonymi	10 ⁴	>6000
Spawanie elektryczne w osłonie gazów	10 ⁵	8000-10000
Spawanie plazmowe	10 ⁶	15000-30000
Spawanie wiązką elektronów	10 ⁷ -10 ⁸	20000-30000
Spawanie laserowe	>10 ⁸	>30000

Z powyższej tabeli wynika, iż im wyższa gęstość ciepła i temperatura maksymalna źródła ciepła, tym strefa wpływu ciepła jest węższa. Wykonanie tego samego złącza spawanego różnymi metodami, charakteryzuje się innym rozkładem temperatur na powierzchni spawanego elementu. Spodziewać się można zatem innego poziomu odkształceń spawalniczych

[Ferenc2017]. Na rysunku 5 przedstawiono wpływ temperatury maksymalnej oraz gęstości mocy źródła ciepła, na głębokość i szerokość wtopienia z zaznaczeniem szerokości strefy wpływu ciepła.



Rys. 5. Wpływ temperatury maksymalnej oraz gęstości mocy źródła ciepła na głębokość i szerokość wtopienia oraz szerokość strefy wpływu ciepła [Ferenc2017]

2.3. Charakterystyka odkształceń spawalniczych

Literatura podaje, że odkształceniem spawalniczym określa się zmianę kształtu spawanych elementów, w wyniku oddziaływania ciepła pochodzącego z procesu spawania. Odkształcenia spawalnicze występują w trzech kierunkach spawanego elementu. W zależności od kierunku odkształcenia spawanego elementu wyróżnia się:

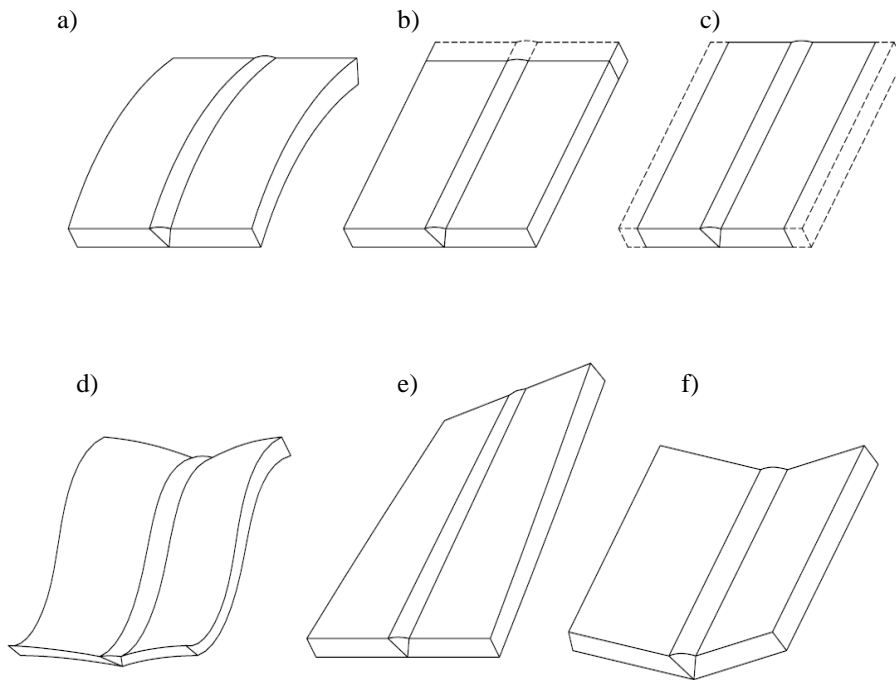
- odkształcenia w kierunku poprzecznym do osi spoiny,
- odkształcenia w kierunku równoległym do osi spoiny,
- odkształcenia w kierunku grubości spawanego elementu [Banyś2012].

Trudnością w ocenie odkształceń spawalniczych jest fakt występowania wielu kierunków odkształceń. Ze względu na dominującą postać lub kierunek, odkształcenia spawalnicze można podzielić na:

- skurcz poprzeczny,
- skurcz wzdłużny,
- odkształcenia wzdłużne,
- odkształcenia kątowe,

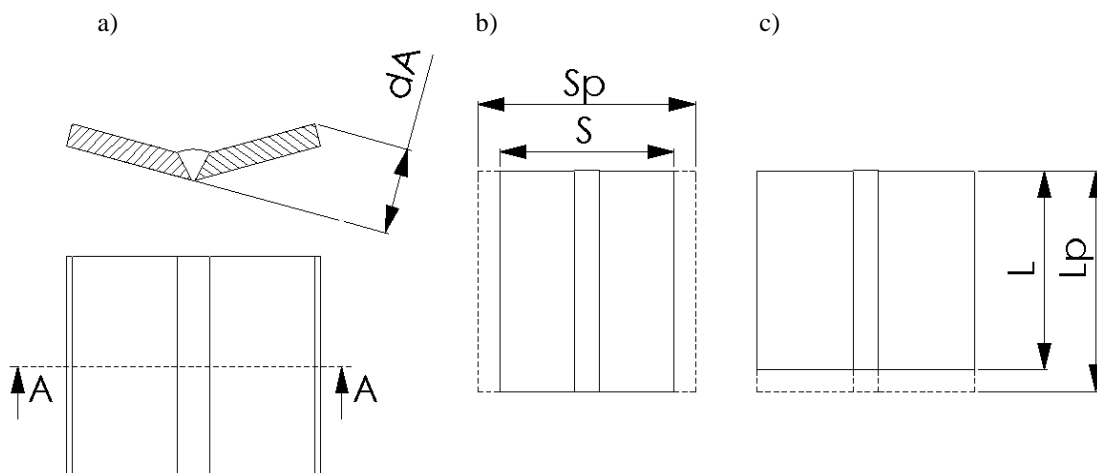
- wygięcie,
- utrata płaskości,
- skręcenie [Ferenc2017].

Na rysunku 6, przedstawiono wizualizacje rodzajów odkształceń spawalniczych.



Rys. 6. Wizualizacja rodzajów odkształceń spawalniczych: wygięcie (a), skurcz wzdłużny (b), skurcz poprzeczny (c), utrata płaskości (d), skręcenie (e), odkształcenie kątowe (f) [Ferenc2017]

Rysunek 7 przedstawia sposób pomiaru wybranych odkształceń spawalniczych. Oznaczenia wymiarów S_p oraz L_p przedstawione na poniższym rysunku określają wymiary początkowe przed spawaniem.



Rys. 7. Wizualizacja sposobu pomiaru odkształceń spawalniczych: odkształcenie kątowe (a), skurcz poprzeczny (b), skurcz wzdłużny (c)

2.4. Charakterystyka metody spawania łukowego elektrodą topliwą MIG/MAG

Analizując zgromadzoną literaturę zauważa się, iż metoda spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów (GMAW – Gas Metal Arc Welding), w zależności od zastosowanego gazu osłonowego dzieli się na:

- metodę MIG (Metal Inert Gas) spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych chemicznie, tj. argon i hel oraz ich mieszanin,
- metodę MAG (Metal Activ Gas) spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych chemicznie, tj. dwutlenek węgla, tlen oraz ich mieszaniny z gazami obojętnymi.

Metoda MIG/MAG znalazła szerokie zastosowanie we wszystkich gałęziach przemysłu. Swoją popularność zawdzięcza niezwyklej prostocie spawania. Wynika ona z zastosowania półautomatycznego podawania drutu, a także zjawisku samoregulacji łuku elektrycznego [Mizer2014, Kudła2006].

Literatura podaje, że zjawisko samoregulacji łuku polega na samoczynnym dostosowaniu napięcia i natężenia prądu przez źródło spawalnicze tak, aby przy stałej prędkości podawania drutu łuk elektryczny charakteryzował się stałą długością. Samoregulacja łuku elektrycznego jest możliwa dzięki płaskiej lub wznoszącej charakterystyce źródła prądu. Powyższe zjawisko zapewnia stabilne jarzenie się łuku elektrycznego w trakcie procesu spawania [Kudła2006].

Do podstawowych parametrów procesu MIG/MAG zalicza się:

- moc prądu iloczyn napięcia i natężenia prądu spawania,
- prędkość podawania drutu elektrodowego,
- prędkość posuwu uchwytu,
- rodzaj gazu osłonowego oraz natężenie jego przepływu, rodzaj i średnica drutu spawalniczego.

2.5. Metody pomiaru odkształceń spawalniczych

Wnioskując ze zgromadzonej literatury, należy zaznaczyć, że dobór metody pomiaru odkształceń spawalniczych, jest kluczowy ze względu na złożoną postać odkształceń spawalniczych, a podział metod pomiaru odkształceń spawalniczych zależy od sposobu akwizycji danych z powierzchni spawanego elementu. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdza się, że metody pomiaru odkształceń spawalniczych dzielą się na stykowe i bezstykowe.

Do metod stykowych zalicza się pomiar odkształceń z wykorzystaniem czujników zegarowych, suwmiarek oraz z maszyn współrzędnościowych. Zastosowanie czujników zegarowych to najprostszy sposób pomiaru odkształceń spawalniczych. Niestety wadą tej metody, jest ograniczone pole pomiaru odkształceń i ograniczona ilość informacji o postaci odkształceń. Bardziej zaawansowaną metodą stykową jest zastosowanie maszyny współrzędnościowej do stworzenia siatki punktów pomiarowych na badanym elemencie. Pozwala to na przeprowadzenie szczegółowych analiz tj. akwizycji płaskości powierzchni, badanie przekrojów, tudzież tworzenie map gradientów. Należy jednak podkreślić, powyższa metoda jest bardzo czasochłonna i jednocześnie wymaga znajomości rozkładu punktów na powierzchni próbki [Grzesiak2019, Deng2013, Kozak2016, Pazooki2017, Sulaiman2011].

Bezstykowe metody pomiaru odkształceń spawalniczych, czyli metody oparte na technikach skanowania 3D z zastosowaniem m.in. skanerów światła strukturalnego oraz skanerów wykorzystujących światło laserowe. Bezstykowe pomiary odkształceń mogą być wykonywane punktowo czy też metodą trójwymiarowej rejestracji kształtu w postaci chmury punktów. Skanowanie z wykorzystaniem skanera 3D umożliwia stworzenie modelu CAD mierzonego elementu, dzięki czemu można przeprowadzić dowolne analizy odkształceń spawalniczych w wybranym punkcie próbki. Przeprowadzić można również, ocenę płaskości całego elementu, przekrojów elementu, jak i analizę gradientu odkształceń spawalniczych. Należy nadmienić, że skanowanie z wykorzystaniem skanera 3D daje największy wachlarz możliwości oceny odkształceń spawalniczych, a także jest najszybszą metodą pomiaru [Nowacki2018, Nowacki2019 Sikstorm2006, Grzesiak2020, Camilleri2007].

2.6. Charakterystyka stali 1.4301

Zgodnie z europejskim systemem cyfrowym wg PN-EN 10027-2:2015-07. Cyfra 1. oznacza stop żelaza, cyfry 43 oznaczają przynależność do stali stopowych odpornych na korozję i żaroodpornych, natomiast cyfry 01 oznaczają konkretny numer stopu. Stal 1.4301 stosując oznaczenie zgodnie z systemem znakowym wg PN-EN 10027-1:2016-12, oznaczona jest jako X5CrNi18-10, gdzie X5 oznacza średnie stężenie węgla w stali w setnych częściach stężenia (w tym przypadku jest to 0,05%) natomiast liczby 18 i 10 oznaczają stężenie głównych pierwiastków stopowych. W tym przypadku są to: chrom – 18% oraz nikiel – 10%. Charakterystyczną cechą stali 1.4301 jest stabilna struktura austenityczna, której obecność wynika z dużej zawartości niklu. Struktura austenityczna stali bezpośrednio wpływa na jej własności mechaniczne oraz chemiczne. Stal 1.4301 cechuje się wysoką udarnością w temperaturach poniżej 0°C oraz wysokim wydłużeniem przy zerwaniu sięgającym powyżej

40%. Należy zaznaczyć, iż stal ta charakteryzuje się jednocześnie znaczną odpornością korozyjną w środowisku naturalnym, zasolonym i wysokiego stężenia chloru. Stal nierdzewna gatunku 1.4301 szeroko wykorzystuje się w przemyśle budowlanym, samochodowym, przemyśle spożywczym oraz chemicznym (w tym naftowym i petrochemicznym). Austenityczna stal nierdzewna gatunku 1.4301 cechuje się bardzo dobrą spawalnością, wynika to z braku zachodzenia przemian alotropowych przy zmianie temperatury oraz niemożnością wystąpienia kruchych stref (podhartowań) w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania. Podczas spawania stali austenitycznych należy zwrócić uwagę na ilość wprowadzanego ciepła, ponieważ wpływa ono bezpośrednio na osłabienie własności antykorozyjnych w strefie wpływu ciepła. Przykładową komorę próżniową wykonaną ze stali 1.4301, przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowa komora próżniowa ze stali 1.4301 wykonana w TEPRO S.A.

2.7. Analiza wpływu parametrów procesu spawania na odkształcenia spawalnicze

Do parametrów procesu spawania łukiem elektrycznym w osłonie gazów, które wpływają na rozkład temperatury na powierzchni i w kierunku grubości łączonych elementów zalicza się m.in. natężenie prądu, napięcie prądu, prędkość spawania czy rodzaj zastosowanego gazu osłonowego.

Ghosh et al. przeprowadzili analizę porównawczą wpływu zastosowania łuku pulsującego i zvarciowego w metodzie MIG, na odkształcenia spawalnicze złącza doczołowego wykonanego z blachy HSLA o grubości 16 mm. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zastosowanie łuku pulsującego w przypadku metody MIG znacząco zmniejsza powstające odkształcenia spawalnicze. Wiąże się to ze zmianą ilości wprowadzonego ciepła do złącza spawanego. Jednakże złożony przebieg prądowy utrudnia oszacowanie ilości wprowadzonego ciepła do złącza [Ghosh2010]. W jaki sposób oszacować ilość wprowadzonego ciepła pokazują w swych pracach Kudła i Kensik. Wynika to z tego, że natężenie i napięcie prądu podczas spawania są nie tylko przesunięte w fazie, ale mają niesinusoidalny przebieg, stąd moc nie może być ich iloczynem, a $\cos\phi$ niewiele zmienia. W tym przypadku całka iloczynu nie jest równa iloczynowi całek. Przykładowo Lincoln Electric montuje już w zasilaczach łuku watomierze, zliczające moc i sumujące wynik w milisekundach co przy pomiarze prędkości spawania umożliwia w miarę dokładne wyznaczenie ilości ciepła wprowadzonego [Kensik2000].

Okano et al. analizowali wpływ zmiany natężenia prądu w metodzie TIG na odkształcenia kątowe i wzdłużne blach stalowych. Autorzy wskazali, że wraz ze wzrostem natężenia prądu, odkształcenia kątowe oraz wzdłużne również się zwiększały. Należy mieć na uwadze fakt, że napięcie prądu podczas eksperymentu również ulegało zmianie, o czym świadczy zmiana wartości promienia łuku spawalniczego. Dlatego należy w tym przypadku, oceniać wzrost odkształceń spawalniczych zmianą wartości energii liniowej procesu spawania, poprzez obliczenie mocy źródła i prędkości spawania. [Okano2017].

Tian et al. analizowali wpływ zmiany parametrów spawania tj. napięcie oraz prąd spawania i prędkość spawania metodą TIG stali gatunku 308L. Wykazano, że wraz ze wzrostem parametrów spawania, a tym samym wraz ze wzrostem energii liniowej procesu spawania, uzyskano liniową zależność skurczu w kierunku prostopadłym do osi spoiny. W przypadku odkształceń kątowych wartość odkształceń rosła do punktu 1 kJ/mm, po czym malała. Autorzy wskazali, że odkształcenia kątowe, zależne są od gradientu temperatury w kierunku grubości materiału spawanego [Tian2014]. Brakuje jednakże informacji na temat rodzaju zastosowanego łuku elektrycznego. Obliczona energia liniowa przez autorów posiada błąd w postaci nieprawidłowego współczynnika sprawności cieplnej. Zastosowano bowiem współczynnik 0,8 zamiast 0,6 dla metody TIG.

Adamczuk et al. przeprowadzili analizę wpływu energii liniowej procesu w funkcji liczby ściegów złącza doczołowego ze spoiną czołową, na wielkość odkształceń podczas spawania jednostronnego metodą MAG. Autorzy podkreślili, że odkształcenia kątowe zwiększały

się wraz z liczbą ściegów złącza. Dodatkowo poziom odkształceń kątowych był zbliżony dla pierwszych czterech ściegów złącza, bez względu na poziom energii liniowej. Odkształcenia kątowe w przypadku złączy doczołowych wielowarstwowych spawanych jednostronnie, wykazują multiplikatywny charakter [Adamczuk2017]. Uzyskane wyniki różnią się znacząco od przytoczonych w poprzednim akapicie, mimo zbliżonego poziomu energii liniowej. Należy podkreślić fakt, iż Adamczuk i współpracownicy zastosowali inną metodę spawania.

Liang i Deng przeprowadzili m.in. analizę wpływu energii liniowej na wielkość odkształceń przy spawaniu złożonej konstrukcji stalowej. Wykonano ją ze stali węglowej spawanej metodą MAG. W toku przeprowadzonych analiz wykazano, że w przypadku złączy teowych ze spoiną pachwinową, wyższa energia liniowa procesu spawania zmniejsza powstające odkształcenia spawalnicze [Liang2018]. Porównując uzyskane wyniki, zauważa się różnice wyników przedstawionych przez Adamczuk i współpracowników mimo zastosowania tej samej metody spawania.

Adak i Mundal przeprowadzili analizę wpływu chłodzenia wodą w odległości 30 mm od osi spoiny, na powstawanie odkształceń spawalniczych. Przytoczone badanie przeprowadzono na próbkach o grubości 6, 8, 10 i 12 mm ze stali węglowej spawanej metodą MAG. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie chłodzenia w pewnej odległości od spoiny powoduje wyraźne zmniejszenie odkształceń wzdłużnych dla wszystkich grubości analizowanych próbek [Adak2010]. Należy jednak podkreślić, że zmiana prędkości chłodzenia w przypadku stali węglowych, przyczynia się do powstania podhartowań oraz wzrostu twardości spoiny i strefy wpływu ciepła. Takie złącze w wyniku podhartowania będzie charakteryzować się niższymi własnościami wytrzymałościowymi.

Ilman et al. przeprowadzili analizę wpływu podgrzewania wstępnego blach o grubości 3 mm na odkształcenia wzdłużne. Próbkę o wymiarach 200 na 400 mm, wykonaną z aluminium o zawartości 4,5 % magnezu. W odległości 40 mm od osi spoiny, po obu stronach próbki podgrzewano rezystancyjnie powierzchnie o szerokości 40 mm do temperatury 100, 200 i 300°C. Spawano metodą MIG, złącza doczołowe ze spoiną czołową. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że podgrzewanie wstępne do 200°C, spowodowało znaczące zmniejszenie odkształceń wzdłużnych. W przypadku podgrzewania wstępnego do temperatury 300°C powstawały odkształcenia o przeciwnym kierunku, w porównaniu do odkształceń bez podgrzewania. Przeprowadzone badanie dowodzi, że zmniejszenie gradientu temperatury w strefie nagrzewania spawanego elementu sprzyja minimalizacji odkształceń spawalniczych. Temperaturę podgrzewania należy dobrać na podstawie stosunku

temperatury maksymalnej źródła ciepła do temperatury topnienia spawanego metalu [Liman2016]. Zastanawiające jest jednak, dlaczego odkształcenia spawalnicze zmieniły kierunek przy temperaturze podgrzania wstępnego 300°C. Czynnikiem zakłócającym, danego badania prawdopodobnie stała się metoda podgrzewania wstępnego, która przyczyniła się do powstania odkształceń.

Sudhakaran et al. przeprowadzili analizę wpływu kąta pochylenia uchwytu, prędkości spawania, długości złącza, natężenia prądu i natężenia przepływu gazu osłonowego na odkształcenia spawalnicze złącza doczołowego spawanego metodą TIG. Próbkę wykonano ze stali nierdzewnej Cr-Ni-Mn o grubości 3 mm. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że największy wpływ na zmniejszenie odkształceń kątowych cienkich blach, ma zwiększenie natężenia prądu spawania. Natężenie przepływu gazu osłonowego charakteryzowało się najmniejszym wpływem na odkształcenia spawalnicze. Zwiększenie kąta pochylenia uchwytu natomiast zmniejszało odkształcenia kątowe. Podobnym wpływem charakteryzowało się zwiększenie długości złącza. W przypadku zwiększania prędkości spawania, odkształcenia kątowe również zwiększały się [Sudhakaran2012]. Uzyskane wyniki mogą być obarczone błędem, ponieważ nie wykonano powtórzeń danego punktu planu eksperymentu. Dodatkowo uzyskana funkcja zależności sugeruje, że dla zerowych parametrów odkształcenie kątowe będzie na poziomie 2,852 stopnia.

Islam et al. przeprowadzili analizę wpływu parametrów spawania tj. napięcia i natężenia prądu oraz prędkości spawania, na odkształcenia spawalnicze. Złącze zakładkowe ze spoiną pachwinową wykonano ze stali węglowej o grubości 3,2 mm. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zwiększenie napięcia i natężenia prądu, znacząco wpływa na zwiększenie odkształceń wzdłużnych, natomiast zwiększanie prędkości spawania sprzyja minimalizacji odkształceń. Autorzy zwrócili uwagę na mniejszą głębokość wtopienia przy zwiększaniu prędkości spawania [Islam2015]. Wyniki badania są sprzeczne z wynikami uzyskanymi przez [Liang2018] oraz [Tian2014], natomiast pokrywają się z pracą [Adamczuk2017].

Panday et al. przeprowadzili analizę wpływu podgrzewania drutu spawalniczego na odkształcenia wzdłużne. Próbkę o grubości 3 mm wykonano ze stali węglowej, spawano metodą SAW. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wraz ze wzrostem natężenia prądu podgrzewającego drut spawalniczy, odkształcenia spawalnicze się zmniejszają. Autorzy wskazują, że powyższy zabieg zmniejsza gradient temperatury w obrębie złącza, a także poprawia stabilność jarzenia się łuku spawalniczego [Panday2020]. Zabieg podgrzewania drutu elektrodowego może bowiem wpływać na zmniejszenie odkształceń

spawalniczych, ze względu na lepsze warunki stapiania oraz zmniejszenie strat energii cieplnej na stapianie drutu elektrodowego. Zastanawiające jest jednak, czy zabieg ten nie zwiększa ilości wprowadzonego ciepła do złącza spawanego.

Deng et al. przeprowadzili analizę wpływu stałych parametrów spawania metodą MAG w osłonie CO₂ dwóch wariantów złączy teowych ze spoiną pachwinową. Złącze A składało się z blachy podstawy o grubości 12 mm i średnika 9 mm. Natomiast złącze B składało się z blachy podstawy o grubości 9 mm i średnika 9 mm. Materiał podstawowy stanowiła stal węglowa. Wyniki pomiaru odkształceń kątowych wykazały, że złącze B miało wyższe wartości odkształceń kątowych oraz skurczu poprzecznego w porównaniu do złącza A. Autor wskazuje, że rozkład temperatury ma decydujący wpływ na mechanizm powstawania odkształceń kątowych i skurczu wzdłużnego, o czym świadczą większe odkształcenia płyty cieńszej [Deng2007]. Należy podkreślić, że autorzy nie podali liczby powtórzeń danego punktu eksperymentu, a dodatkowo nie określono kierunku walcowania blachy względem osi spoiny. Różnice w wynikach, mogą zatem wynikać wymienionych czynników.

Liang et al. zweryfikowali wpływ geometrii spawanego elementu na powstające odkształcenia spawalnicze. Autorzy analizowali złącze teowe z pojedynczym średnikiem ze spoiną pachwinową oraz złącze teowe z podwójnym średnikiem, spawane metodą MAG. Przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku złącza teowego z jednym średnikiem ze spoiną pachwinową, odkształcenia kątowe były symetryczne po obu stronach próbki, natomiast złącze teowe ze spoinami pachwinowymi z dwoma średnikami w części środkowej, nie odkształciło się w istotny sposób [Liang2014]. Na podstawie wyników badania można przyjąć, że zwiększenie sztywności złącza z zastosowaniem dodatkowego średnika, pozwoli sterować odkształceniami spawalniczymi. Warto podkreślić, że w tym przypadku również nie określono liczby powtórzeń danego punktu eksperymentu oraz kierunku walcowania blachy względem osi spoiny. Nie opisano także kolejności spawania złącza teowego z dwoma średnikami.

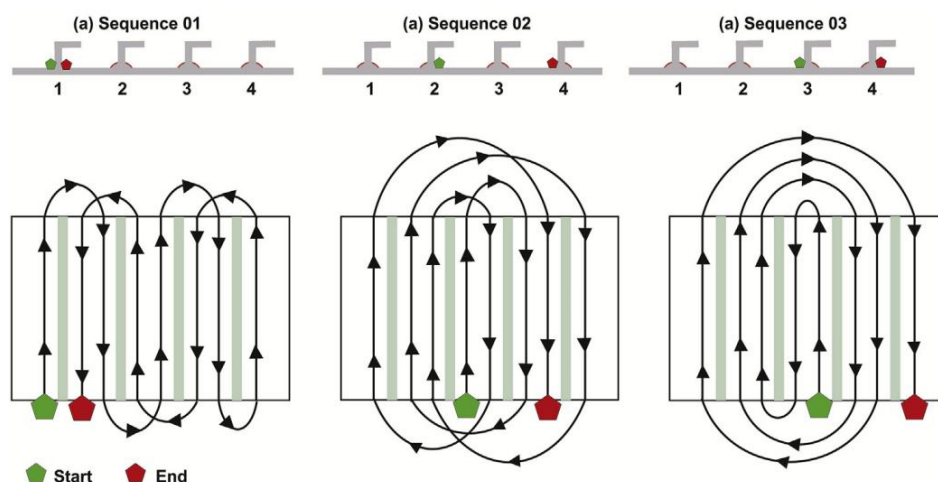
Tapas et al. wykonali złącze doczołowe ze spoiną czołową różnoimiennych stopów aluminium metodą MIG. Proces spawania przeprowadzono dla stałych parametrów spawania. Wykazano, iż występuje różny poziom odkształceń na początku i końcu złącza, co spowodowane było nagrzewaniem się materiału w trakcie spawania. Autorzy wskazują, że gradient temperatury w obrębie spawania elementów, jest głównym mechanizmem powstawania odkształceń kątowych i skurczu prostopadłego do osi spoiny. Zasadne jest zaznaczyć, że dodatkowo uzyskano różnice w skurczu poprzecznym dla obu materiałów, co wskazuje, że własności materiału również wpływają na poziom odkształceń [Tapas2017].

Wnioskowanie przeprowadzono na podstawie jednego powtórzenia eksperymentu oraz nie określono kierunku walcowania blachy w stosunku do osi spoiny.

Hashemzadeh et al. przeprowadzili analizę wpływu stałych parametrów spawania, na odkształcenia złączy doczołowych ze spoiną czołową o grubości 2, 4 i 5 mm. Próbki o wymiarach 300×500 mm wykonano ze stali węglowej. Analizowano odkształcenia kątowe i odkształcenia wzdłużne. Odkształcenia kątowe, najwyższą wartość wykazywały w części środkowej spawanego elementu. W przypadku skurczu wzdłużnego najwyższą wartość osiągnięto na końcu spawanego elementu. Warto zwrócić uwagę, że dla złącza o grubości 2 i 4 mm, uzyskano podobny poziom skurczu w kierunkach Z i X oraz porównywalny poziom odkształceń kątowych. Złącze o grubości 5 mm posiadało mniejszy skurcz w kierunku Z oraz wyższe odkształcenia kątowe w kierunku X (prostopadle do spoiny) [Hashemzadeh2017]. Próbki spawano tymi samymi parametrami dla wszystkich analizowanych grubości blach, co może być mało wiarygodne bowiem różne powierzchnie przekroju rowka spawalniczego blachy o grubości 2 i 4, powinny wpływać na wyraźną różnicę poziomu odkształceń. W tym badaniu również nie określono kierunku walcowania blachy w stosunku do osi spoiny oraz liczby powtórzeń eksperymentu.

Doyen et al. przeprowadzili analizę wpływu sekwencji spawania na odkształcenia spawalnicze konstrukcji stalowej o wymiarach 460×665×1670 mm. Złącze teowe ze spoiną czołową dwustronną, spawano metodą TIG. Przeanalizowano 4 różne sekwencje spawania. Kluczowe w kwestii minimalizacji odkształceń spawalniczych, było zastosowanie naprzemiennego spawania ściegów spoiny czołowej, bez względu na kombinacje kierunku spawania. Największe odkształcenia spawalnicze uzyskano przy spawaniu bez naprzemienności układania ściegów spoiny czołowej dwustronnej [Doyen2017]. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem modelu komputerowego. Nie porównano otrzymanych wyników z rzeczywistym elementem.

Rodrigues et al. przeprowadzili analizę wpływu sekwencji spawania na odkształcenia spawalnicze konstrukcji stalowej, składającej się z podstawy i czterech żeber wykonanych ze stali węglowej. Spawanie przeprowadzono metodą MIG z zastosowaniem drutu proszkowego. Badanie obejmowało trzy sekwencje spawania przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Sekwencje spawania [Rodrigues2019]

Najwyższą wartość odkształceń spawalniczych uzyskano dla sekwencji 1, natomiast najmniejszą dla sekwencji 3. Warto zwrócić uwagę na kierunki spawania. Przy sekwencji 1, większość spoin wykonano w tym samym kierunku, co ścieg poprzedzający. Sekwencja 2: lewa strona konstrukcji została wykonana w przeciwnym kierunku do prawej. Sekwencja 3: rozejście od środka na zewnątrz z zachowaniem przeciwnego kierunku spawania [Rodrigues2019]. Wyniki te są sprzeczne z badaniami przeprowadzonymi przez [Fu2016]. Sekwencja 2 i 3 powinna posiadać wyższy poziom odkształceń spawalniczych ze względu na multiplikację odkształceń, gdy kierunki spawania pokrywają się.

Fu et al. przeprowadzili analizę wpływu sekwencji spawania na odkształcenia spawalnicze. Złącze teowe ze spoiną pachwinową, wykonano ze stali węglowej niskostopowej z gatunku DH36 metodą spawania MAG przy stałych parametrach spawania. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że multiplikacja odkształceń spawalniczych, powodują sekwencje o tym samym kierunku spawania, co spoina poprzedzająca. Dowodzi to o konieczności planowania kierunków spoin z zachowaniem ich naprzemienności, przy spawaniu złożonych konstrukcji stalowych [Fu2016]. Wyniki badania są sprzeczne z wynikami przedstawionymi w poprzednim akapicie.

Camilleri et al. przeprowadzili analizę wpływu materiału dodatkowego na powstające odkształcenia spawalnicze oraz naprężenia resztkowe. Analizę przeprowadzono na próbkach ze stali gatunku S355 o wymiarach 500×500 i grubości 4 mm spawanych metodą MAG. Uzyskano zbliżony poziom odkształceń wzdłużnych, bez względu na rodzaj zastosowanego materiału dodatkowego. Warto podkreślić, że proces spawania przeprowadzono z zastosowaniem różnych parametrów spawania, co zmniejsza wiarygodność przeprowadzonych analiz [Camilleri2013].

Zhang et al. przeprowadzili analizę wpływu elementów usztywniających i kontroldkształceń, przy spawaniu złącza teowego ze spoiną czołową na odkształcenia kątowe. Stal węglową o grubości 30 mm gatunku Q390 spawano metodą MAG. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zastosowanie usztywnienia pozwala na zmniejszenie odkształceń kątowych o prawie 76%. Blisko 97% zmniejszenia odkształceń spawalniczych, uzyskano podczas zastosowania kontr odkształceń [Zhang2019]. Warto podkreślić, że zastosowanie kontr odkształceń, jest trudne do zastosowania w warunkach przemysłowych przy produkcji małoseryjnej. Jako kolejny punkt należy zaznaczyć, że dodatkowe zwiększenie sztywności złącza może przyczynić się do niekontrolowanego wzrostu naprężeń oraz kruchości złącza. Należy przytoczyć, że wprowadzenie naprężeń ściskających podczas wstępnego prostowania blach wieloma walcami przed spawaniem umożliwia uzyskanie podobnego efektu bez negatywnych skutków.

Schenk et al. przeprowadzili analizę wpływu momentu uwolnienia elementu spawanego z zacisków spawalniczych. Złącze teowe ze spoiną pachwinową z blachy węglowej gatunku S355 gr. 6 mm, spawano metodą MAG przy stałych parametrach dla wszystkich punktów eksperymentu. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że najniższy poziom odkształceń spawalniczych, można uzyskać w momencie, gdy element spawany zostanie uwolniony z zacisków po całkowitym ostygnięciu. Świadczy to, o konieczności przeciwdziałania skurczom cieplnym, w celu minimalizacji odkształceń spawalniczych [Schenk2009]. Należy zaznaczyć, że można w ten sposób doprowadzić do niekontrolowanego wzrostu naprężeń spawalniczych i kruchości konstrukcji.

Park et al. przeprowadzili analizę wpływu obciążenia zewnętrznego na powstające odkształcenia spawalnicze. Wykonano złącze teowe ze spoiną pachwinową. Próbkę zestawiono z blach o grubościach 5 i 8 mm ze stali węglowej ze średnikiem gr. o grubości 6 mm. Złącze wykonano głowicą do spawania obustronnego w jednym przejściu metodą MAG. Analizie poddano obciążenia zewnętrzne o wartości 6 i 12 MPa w kierunku wzdłużnym oraz prostopadłym do osi spoiny. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że obciążenie zewnętrzne w kierunku wzdłużnym do osi spoiny, nie wpłynęło znacząco na odkształcenia spawalnicze. Obciążenie w kierunku prostopadłym spowodowało zmniejszenie odkształceń kątowych o 60% dla próbki o grubości 5 mm i 40% dla próbki o grubości 8 mm. W przypadku odkształceń wzdłużnych obciążenie w kierunku prostopadłym do osi spoiny nie wpłynęło znacząco na zmniejszanie odkształceń [Park2012]. Nie opisano skutków stosowania obciążenia zewnętrznego na własności wytrzymałościowe gotowego

złącza. Stosowanie obciążeń zewnętrznych analogicznie jak podczas stosowania dodatkowych usztywnień, można doprowadzić w ten sposób do wzrostu naprężeń złącza spawanego.

Vetri Selvan et al. przeprowadzili analizę wpływu sekwencji spawania odgałęzienia rury w funkcji liczby ściegów, na odkształcenia spawalnicze w kierunku X (równoległe do początku i końca spawania) i Y (prostopadle do początku i końca spawania) wg przyjętego układu współrzędnych. Rury wykonano ze stali węglowej metodą MMA. Analizowane sekwencje zawierały przeciwny punkt rozpoczęcia i zakończenia ze zgodnym kierunkiem spawania oraz wspólny punkt rozpoczęcia i zakończenia spawania z przeciwnym kierunkiem spawania. Porównywano odkształcenia powstałe po wykonaniu jednego, dwóch i trzech ściegów spoiny pachwinowej. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że największy wpływ na odkształcenia wzdłuż osi X wg przyjętego układu współrzędnych, mają punkty rozpoczęcia i zakończenia spawania. Natomiast wzdłuż osi Y kierunek spawania rury [Vetri2015]. Analiza wyników przedstawionych w artykule jest niejasna, bowiem bez względu na sekwencje spawania, poziom odkształceń maksymalnych był jednakowy dla każdej sekwencji, z wykluczeniem sekwencji 2 przy trzech ściegach. Dodatkowo różnica odkształceń między jednym ściegiem a dwoma, jest minimalna, a ilość wprowadzonego ciepła w obrębie spawania znacząco większa.

2.8. Analiza wpływu geometrii rowka spawalniczego na odkształcenia spawalnicze

Vasantharaja et al. przeprowadzili analizę wpływu przygotowania krawędzi elementu spawanego wykonanego ze stali nierdzewnej gatunku 316LN na odkształcenia spawalnicze. Porównaniu poddano różne metody spawania. Wykonano złącze doczołowe o grubości 16 mm ze spoiną czołową przygotowaną na I, X oraz Y. Złącze I spawano dwustronnie metodą A-TIG, natomiast złącze X spawano metodą TIG. W złączu Y przetop wykonano metodą A-TIG oraz wypełnienie rowka metodą TIG. Najwyższe odkształcenia kątowe posiadało złącze Y z powodu spawania jednostronnego. Złącza przygotowane na I i X, mimo różnych parametrów oraz innych metod spawania, charakteryzowały się podobnym poziomem odkształceń kątowych z różnicą w ich kierunkach [Vasantharaja2015]. W badaniu autorzy nie uwzględnili kierunku walcowania blachy w stosunku do osi spoiny. Warto podkreślić, że w przypadku rowka przygotowanego w kształcie litery X, nie podano informacji na temat kolejności spawania 17 ściegów spoiny. Badanie przeprowadzono bez powtórzeń, co również mogło wpłynąć na otrzymane wyniki.

Ye et al. przeprowadzili analizę wpływu geometrii rowka spawalniczego przygotowanego na kształt litery V, K oraz X na wielkość odkształceń kątowych. Złącza spawano metodą MIG na zrobotyzowanym stanowisku. Analizie poddano blachy nierdzewne gatunku 304 o wymiarach 300 na 300 mm. Cechą wspólną dla wszystkich próbek, była liczba ściągów wypełniających. Energia linowa procesu spawania mieściła się w zakresie od 0,71 do 1,01 kJ/mm. Największe odkształcenia uzyskano dla geometrii rowka w kształcie litery V, natomiast najmniejsze dla geometrii w kształcie litery X. Różnica odkształceń wynosiła 66%. Rowek przygotowany w kształcie litery V miał największe pole przekroju poprzecznego [Ye2015]. W badaniu autorzy nie uwzględnili kierunku walcowania blachy w stosunku do osi spoiny. Nie podano również pola powierzchni przekroju rowków, dlatego też nierozstrzygująca jest kwestia wpływu przygotowania złącza. Badania przeprowadzono na jednej serii próbnej.

Rathod i Reddy przeprowadzili analizę wpływu geometrii rowka spawalniczego przygotowanego na kształt litery V, 1/2V oraz X na poziom odkształceń spawalniczych. Złącza spawano metodą MAG z zastosowaniem czystego dwutlenku węgla. Próbkę wykonano z blachy stalowej niskowęglowej o grubości 8 mm i wymiarach 250 na 250 mm. Próbkę spawano z zastosowaniem różnych poziomów energii liniowej. Wykazano, że wzrost energii liniowej procesu, wpływał na wzrost odkształceń kątowych dla wszystkich wariantów analizowanych geometrii rowka spawalniczego. Największe odkształcenia kątowe uzyskano dla rowka 1/2V, a najmniejsze dla X dla każdego poziomu energii liniowej. Największy poziom skurczu poprzecznego uzyskano dla złącza przygotowanego na X, natomiast najmniejszy dla 1/2V [Rathod2016]. Porównując pola powierzchni rowków, można stwierdzić, że rowek przygotowany w kształcie litery X charakteryzował się największym polem powierzchni, natomiast 1/2V najmniejszym. Warto podkreślić fakt, że złącze V i 1/2V były wykonane z niepełnym przetopem (na połowę grubości materiału podstawowego), co wpłynęło na wyraźne przesunięcia środka ciężkości spoiny, a tym samym na poziom odkształceń. Wyniki są niejednoznaczne oraz sprzeczne z wynikami przedstawionymi w poprzednim akapicie.

Ghosh et al. przeprowadzili analizę wpływu pola przekroju rowka spawalniczego oraz łuku pulsującego, na odkształcenia spawalnicze. Geometrię rowka opisano wymiarem rozwarcia rowka. Analizie poddano rowki o rozwarciu 21, 11 oraz 8 mm. Próbkę spawalniczą o wymiarach 100 na 100 mm wykonano ze stali HSLA o grubości 16 mm, a spawano je metodą MAG z zastosowaniem synergii oraz łuku pulsującego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie łuku pulsującego znacząco wpływa na zmniejszenie odkształceń spawalniczych. Największe odkształcenia uzyskano dla rozwarcia rowka 8 mm, natomiast najmniejsze dla 11 mm. Autorzy podkreślają, że zastosowanie zbyt wąskiego kąta rozwarcia

rowka spawalniczego wpływa bezpośrednio na zwiększenie momentu gnącego, ze względu na niekorzystny stosunek szerokości do wysokości ściegu wypełniającego [Ghosh2010]. Warto podkreślić, że nie ma powodu, by moment gnący dla rowka o rozwarciu 21 mm był mniejszy. Warto podkreślić, że położenie środka ciężkości wyraźnie zmienia się wraz ze zmianą rozwarcia rowka spawalniczego, co bezpośrednio mogło wpłynąć na odkształcenia spawalnicze. Dodatkowo na podstawie wyników badań można stwierdzić, że w przypadku braku ukosowania uzyska się największe odkształcenia spawalnicze.

Reddy et al. przeprowadzili analizę wpływu zmiany odstępów między łączonymi blachami oraz kąta ich ukosowania dla złączy doczołowych ze spoiną czołową, przygotowaną na kształt litery V oraz X na wielkość skurczu poprzecznego. Próbki do badań o wymiarach 250 na 250 mm, wykonano z blachy niskostopowej o grubości 8 mm. Próbki spawano metodą MAG, z zastosowaniem dwutlenku węgla, jako gazu osłonowego oraz drutu elektrodowego o średnicy 0,8 i 1,2 mm. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że średnica zastosowanego drutu elektrodowego nie wpływa istotnie na poziom skurczu poprzecznego. Wraz ze wzrostem kąta ukosowania oraz odstępów między blachami, poziom skurczu poprzecznego wzrastał dla wszystkich analizowanych wariantów geometrii rowka [Reddy2013]. Na podstawie uzyskanych wyników, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem pola przekroju rowka odkształcenia spawalnicze również się zwiększają. Autorzy nie uwzględnili kierunku walcowania blachy. Dodatkowo warto podkreślić, że nie podano ile, powtórzeń eksperymentu zastosowano.

Mahendramani i Lakshmana Swamy przeprowadzili analizę wpływu zmiany odstępów między łączonymi blachami oraz kąta ukosowania krawędzi na skurcz poprzeczny, oraz wzdłużny. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem spawania łukiem krytym. Próbki wykonano z 10 mm stali węglowej o wymiarach 250 na 250 mm. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zwiększenie odstępów oraz kąta ukosowania, bezpośrednio wpływa na wzrost odkształceń spawalniczych. Najmniejsze odkształcenia spawalnicze uzyskano dla odstępów 0 oraz krawędzi bez ukosowania. Warto podkreślić, że dla spoin jednostronnych i dwustronnych, uzyskano zbliżone odkształcenia wzdłuż osi spoiny. Złącze ze spoiną dwustronną charakteryzowało się największymi odkształceniami w kierunku prostopadłym do spoiny [Mahendramani2012]. Uzyskane wyniki pokrywają się z przedstawionymi w poprzednim akapicie.

Mahendramani i Lakshmana Swamy przeprowadzili analizę wpływu zmiany pola przekroju rowka spawalniczego na odkształcenia spawalnicze. Próbki wykonane ze stali węglowej o wymiarach 250 na 250 mm o grubości 10 mm, spawano łukiem krytym.

Analizowano dwa warianty rowka spawalniczego, przygotowanego na kształt litery V oraz $\frac{1}{2}V$. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem pola przekroju rowka spawalniczego, odkształcenia spawalnicze również wzrastały. Odkształcenia wzdłuż spoiny były zbliżone bez względu na zmianę pola przekroju poprzecznego rowka. Odkształcenia kątowe maleją wraz ze wzrostem pola przekroju poprzecznego, co ma związek ze wzrostem odkształceń wzdłuż osi spoiny [Mahendramani2018]. Uzyskana zależność jest niewiarygodna, gdyż wraz ze wzrostem pola przekroju rośnie moment gnący, który powoduje powstawanie odkształceń kątowych. Wyniki te są sprzeczne z wynikami [Mahendramani2012] oraz [Reddy2013].

Chen et al. przeprowadzili analizę wpływu ukosowania krawędzi próbek na kształt litery V, X oraz K, na odkształcenia oraz naprężenia spawalnicze. Próbki ze stali nierdzewnej 316L oraz stali niestopowej spawano elektrodami otulonymi, wykonując połączenie różnoimienne. Próbki o wymiarach 200 na 200 i grubości 8 mm, spawano przy stałych parametrach spawania z jednakową liczbą ściegów wypełniających. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla ukosowania X, K osiągnięto zbliżone wartości skurczu prostopadłego do osi spoiny. Istotną różnicę skurczu wynoszącą 26,8% zauważono przy ukosowaniu krawędzi na kształt litery V. Odkształcenia kątowe najwyższą wartość osiągnęły dla ukosowania na kształt litery V, natomiast dla ukosowania K i X odnotowano o 43,3% mniejsze odkształcenia, w stosunku do ukosowania V. Między odkształceniami po ukosowaniu na K i X, nie zanotowano istotnych różnic [Chen2019]. Autorzy nie uwzględnili kierunku walcowania blachy. Nie podano również ile, powtórzeń eksperymentu zastosowano.

Wei i Jiang przeprowadzili analizę wpływu ukosowania rowka na kształt litery K w złączy teowym, na odkształcenia i naprężenia kątowe. Analizę przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali DH36 o wymiarach 500 na 500 mm o grubości 12 mm. Złącza wykonano metodą MIG/MAG. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w złączy teowym zmiana spoiny pachwinowej na spoinę czołową w złączy ukosowanym na kształt litery K, nie wpływa istotnie na zmniejszenie odkształceń spawalniczych [Wei2020], natomiast obecność karbu w grani, zwiększa spiętrzenie naprężeń dla złączy ze spoinami pachwinowymi [Nawrocki2020, Wojsyk2020].

2.9. Wnioski z analizy literatury

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

1. W badaniach rozpoznawczych i właściwych należy uwzględnić czynniki istotnie wpływające na poziom odkształceń i naprężeń spawalniczych, takie

jak stosowanie elementów usztywniających złącze, sekwencja spawania, moment zwolnienia zacisków spawalniczych

2. Czynnikiem znacząco wpływającymi na wielkość odkształceń spawalniczych, są pole przekroju poprzecznego rowka spawalniczego oraz poziom energii liniowej procesu spawania.
3. Parametry technologiczne, dla których nie odnotowano istotnego wpływu na poziom odkształceń spawalniczych, to natężenie przepływu gazu osłonowego oraz gatunek materiału dodatkowego.
4. W analizowanej literaturze wykazano braki informacji o liczbie powtórzeń eksperymentów oraz orientacji kierunku walcowania blachy względem osi spoiny.
5. W literaturze nie uwzględniono wpływu geometrii rowka spawalniczego przy określonym jego polu przekroju poprzecznego na wielkość odkształceń spawalniczych.
6. Cytowani autorzy nie uwzględnili wpływu parametrów technologicznych spawania, przy określonym poziomie energii liniowej na odkształcenia spawalnicze.
7. Badania procesów spawania prowadzone w wielu ośrodkach na różnych materiałach i w odmiennych warunkach dawały niejednoznaczne, często sprzeczne rezultaty, co jest jednym z powodów podjęcia badań zaprezentowanych w niniejszej pracy.

3. HIPOTEZY, CELE I ZAKRES ROZPRAWY

3.1. Cel i zakres rozprawy

Przeprowadzona analiza literatury procesów spawania wykazała pewne niejasności wyników badań oraz niejednokrotnie sprzeczne ich rezultaty. Warto podkreślić, że w cytowanych publikacjach zarówno energia liniowa procesu spawania, jak i pole przekroju poprzecznego rowka spawalniczego były zmieniane. Sprzeczności wyników mogą być spowodowane zmianą warunków początkowych procesu spawania lub objętości złącza. Należy zauważyć, czy wpływ parametrów procesu MIG/MAG i geometrii rowka spawalniczego byłby istotny w przypadku, gdy energia liniowa i pole przekroju byłyby na określonym poziomie.

Potrzeba analizy wpływu parametrów procesu MIG/MAG na powstawanie odkształceń złączy spawanych przy określonej energii liniowej wynika również z potrzeb praktyki przemysłowej. Proces spawania jest procesem specjalnym, w związku z tym przy uznaniu technologii spawania przez jednostki notyfikujące, określany jest zakres dopuszczalnej energii liniowej. Na etapie projektowania technologii spawania, spawalnicy nie są w stanie przewidzieć poziomu odkształceń spawalniczych konstrukcji spawanych. Uzupełnienie wiedzy o wpływ parametrów procesu spawania MIG/MAG przy określonej energii liniowej na odkształcenia spawalnicze umożliwi sterowanie ich poziomem bez potrzeby zmiany uznanej technologii spawania (WPQR).

Analiza literatury wykazała również, że zmiana pola przekroju poprzecznego spoiny wpływa bezpośrednio na zmianę odkształceń spawalniczych. Wiedzę tę należy uzupełnić o wpływ parametrów geometrycznych rowków spawalniczych na odkształcenia spawalnicze, dobranych tak, aby ich pola przekrojów poprzecznych były określone w tolerancji 5%. Zastosowanie tolerancji dla pól przekrojów rowków umożliwi porównanie i ocenę rzeczywistego wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych rowka spawalniczego na poziom odkształceń spawalniczych.

Przegląd literatury wykazał brak informacji na temat rozkładu zmiennej losowej odchyłki odkształceń spawalniczych. Jego znajomość umożliwi przybliżyć położenie wartości średniej rozkładu zmiennej losowej oraz dobrać odpowiednią metodykę oceny wpływu analizowanych parametrów procesu MIG/MAG, oraz geometrii rowka spawalniczego na stan odkształceń pozostających po spawaniu.

Analiza literatury ukazuje brak informacji na temat wpływu kierunku walcowania blachy oraz różnic własności wytrzymałościowych i wydłużenia między dostawami materiału

podstawowego, na powstawanie odkształceń spawalniczych. Stal walcowana wykazuje anizotropię własności mechanicznych, w zależności od kierunku walcowania. Anizotropia własności mechanicznych w zależności od kierunku walcowania wpływa na wyniki prób statycznego rozciągania. Określenie wpływu kierunku walcowania na wielkość powstających odkształceń spawalniczych umożliwi eliminację błędów oceny wpływu wybranych parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na to zjawisko.

Cele poznawcze rozprawy obejmują:

1. Opracowanie metodyki analizy wyników odchyłki płaskości na podstawie rozkładu zmiennej losowej odkształceń spawalniczych.
2. Określenie wpływu kierunku walcowania blachy na powstające odkształcenia spawalnicze.
3. Ustalenie wpływu na odkształcenia spawalnicze różnic granicy plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenia A5 między dostawami materiału podstawowego na podstawie certyfikatów materiałowych 3.1.
4. Ustalenie wpływu parametrów technologicznych procesu MIG/MAG na wielkość odkształceń, przy zachowaniu restrykcji ilości wprowadzonego ciepła.
5. Określenie wpływu parametrów geometrycznych rowka spawalniczego przygotowanego na kształt litery V na poziom odkształceń, przy zachowaniu określonego pola przekroju rowka spawalniczego.

Celem użytecznym rozprawy jest opracowanie wytycznych, mających na celu minimalizację odkształceń spawalniczych na podstawie przeprowadzonego zakresu badań.

Zakres badań rozprawy doktorskiej obejmuje:

1. Analizę rozkładu zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni.
2. Ocenę wpływu orientacji kierunku walcowania wzdłuż dłuższej krawędzi próbek na odchyłki płaskości powierzchni.
3. Ocenę wpływu na odchyłkę płaskości różnic granicy plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenia A5 między dostawami materiału podstawowego na podstawie certyfikatów materiałowych 3.1.
4. Analizę wpływu wybranych parametrów procesu MIG/MAG, na wielkość odkształceń spawalniczych z zachowaniem określonego poziomu energii liniowej w tolerancji 5%.
5. Analizę wpływu wybranych parametrów geometrycznych rowka spawalniczego na poziom odkształceń z zachowaniem określonego pola przekroju poprzecznego rowka spawalniczego w tolerancji 5%.

3.2. Hipotezy badawcze

Na potrzeby realizacji rozprawy sformułowano następujące hipotezy badawcze:

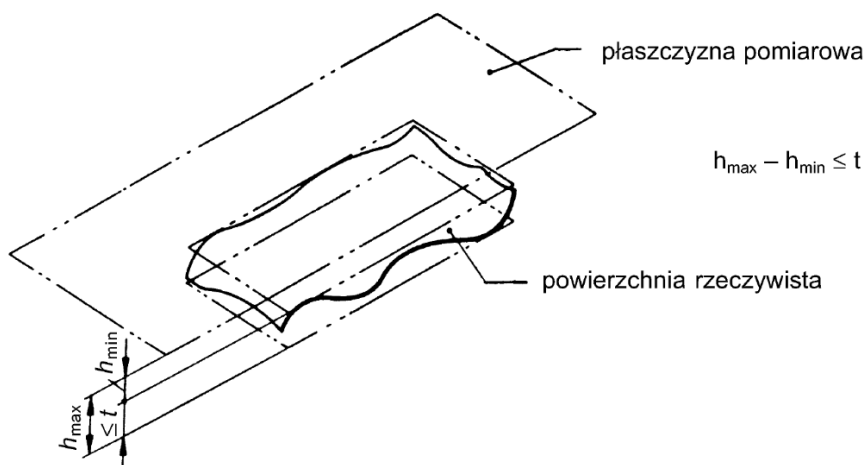
1. Należy założyć, że przy określonym poziomie energii liniowej procesu spawania metodą MIG/MAG oraz wielkości pola przekroju rowka spawalniczego, istnieje możliwość ograniczenia wpływu zmian położenia i orientacji uchwytu spawalniczego lub parametrów geometrycznych rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni elementów spawanych wyznaczoną na podstawie normy PN EN-ISO 13920:2000, przy uwzględnieniu anizotropii własności mechanicznych uzależnionych od kierunku walcowania oraz różnic wartości granicy plastyczności $R_{p0,2}$ i wydłużenia $A5$ określonych na podstawie certyfikatu materiałowego 3.1.
2. Postać rozkładu prawdopodobieństwa odchyłki płaskości powierzchni elementów blaszanych spawanych metodą MIG/MAG jest wynikiem oddziaływań wielu czynników technologicznych, takich jak technika i parametry spawania, sposób ustalenia i mocowania próbek. Ponieważ odchyłka płaskości wyznaczona na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000 może przyjmować jedynie wartości dodatnie, to można założyć, że jej rozkład, powinien być zbliżony do rozkładu logarytmo-normalnego.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. Cel i metodyka badań

Spawaniu poddano próbki o wymiarach 300 na 350 mm, przygotowane na podstawie normy PN-EN ISO 15614-1:2017-08. Próbki wykonane ze stali 1.4301, spawano doczołowo metodą MIG/MAG z wykorzystaniem stanowisk badawczych, opisanych w punkcie 4.2 niniejszej rozprawy, na podstawie zakresu badań przedstawionego w rozdziale 3.

Po procesie spawania próbek dokonywano pomiarów odchyłek płaskości na stanowiskach badawczych, które opisano w punkcie 4.3 rozprawy. Odchyłki płaskości powierzchni zmierzono zgodnie z normą PN-EN ISO 13920:2000. Na rysunku 10, przedstawiono w sposób graficzny pomiaru odchyłki płaskości wg normy PN-EN ISO 13920:2000.



Rys. 10. Graficzne przedstawienie sposobu pomiaru odchyłki płaskości powierzchni (PN EN ISO 13920:2000)

4.2. Stanowiska badawcze

Proces spawania realizowano na dwóch stanowiskach badawczych. Były to stanowiska: zrobotyzowane w postaci robota przemysłowego firmy Panasonic TM2000 oraz wyposażone w zaprojektowany, sterowany numerycznie przyrząd do spawania spoin wzdłużnych.

4.2.1. Zrobotyzowane stanowisko spawalnicze Panasonic TM2000

Zrobotyzowane stanowisko spawalnicze składało się z robota spawalniczego nowej generacji Serii TM o wysokiej sztywności oraz udźwigu 6 kg. Zasilaczem łuku było zintegrowane źródło prądu umożliwiające spawanie prądem pulsującym. Stanowisko wyposażono w oprogramowanie monitorujące w czasie rzeczywistym parametry prądowo-napięciowe. W tabeli 4 przedstawiono specyfikację ważniejszych parametrów stanowiska zrobotyzowanego TM2000, a na rysunku 11 przedstawiono jego widok.

Tab. 4. Specyfikacja stanowiska zrobotyzowanego TM2000

Parametr	Wartość
Maksymalne obciążenie	6kg
Zasięg maksymalny	2011 mm
Ilość stopni swobody	6
Dokładność pozycjonowania	$\pm 0,1$ mm
Maksymalny prąd spawania	350 A



Rys. 11. Widok stanowiska zrobotyzowanego TM2000

Na zrobotyzowanym stanowisku TM2000 przeprowadzono spawanie próbek spawalniczych przeznaczonych do analizy rozkładu zmiennej losowej odkształceń spawalniczych.

4.2.2. Stanowisko badawcze z wykorzystaniem przyrządu sterowanego numerycznie do wykonywania spoin wzdłużnych

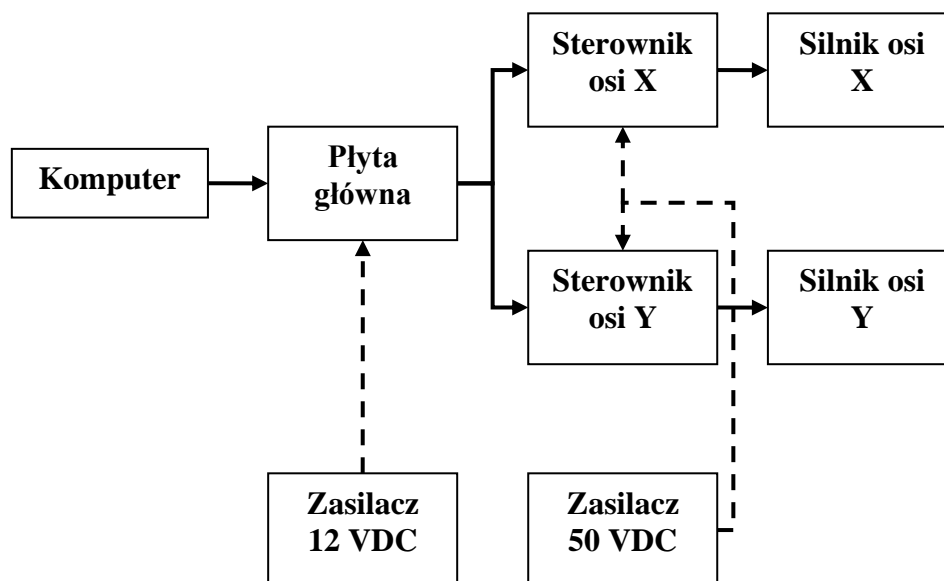
Analiza kinematyki oraz specyfikacji Robota TM2000 umożliwiła stworzenie koncepcji sterowanego numerycznie stanowiska badawczego, z wykorzystaniem przyrządu do spawania

spoin wzdłużnych. Pierwszym etapem projektu, były pomiary danych prędkości spawania spawaczy w warunkach produkcyjnych. Badania przeprowadzono w firmie TEPRO S.A.. Na podstawie niniejszych badań ustalono, że prędkość spawania ręcznego mieściła się w przedziale od 2 mm/s do 6 mm/s. Prędkość spawania wyznaczono na podstawie pomiaru czasu wykonania złącza spawanego w stosunku do jego długości. Kolejnym etapem, było wytypowanie funkcji dodatkowych stanowiska badawczego. Ustalono, że stanowisko musi umożliwiać m.in. wprowadzenie różnych trajektorii ruchu uchwytu spawalniczego (w tym jego oscylacje), zmianę odległości końcówki prądowej względem powierzchni próbki oraz zmianę kąta pochylenia uchwytu spawalniczego.

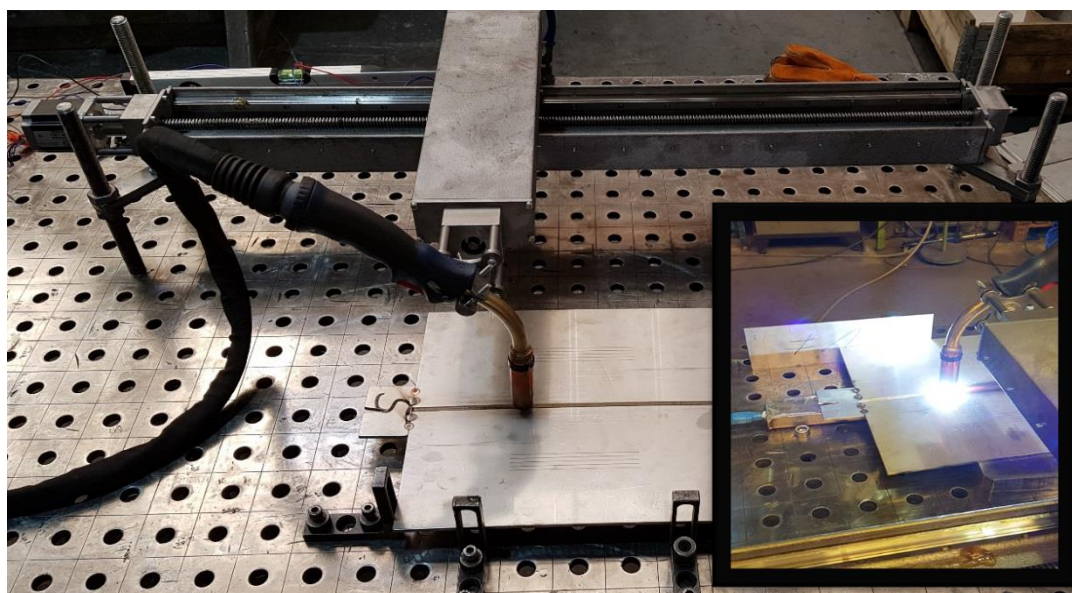
Na podstawie przeprowadzonego procesu koncyptowania, zaprojektowano geometrie, a także wykonano i wdrożono dwuosiowe stanowisko badawcze do spawania spoin wzdłużnych. Projekt stanowiska stworzono w programie Solid Works 2013. Belki poszczególnych osi wykonano z typowych kształtowników hutniczych mianowicie ceownika 120. Śruby pociągowe osadzono na łożyskach kulkowych zwykłych 6700. Przesuw poszczególnych osi realizowano za pomocą śrub trapezowych Tr16x4, a prowadzenie osi X i Y realizowano za pomocą prowadnic i wózków liniowych marki HIWIN serii HG 15. Do napędu osi stanowiska, zastosowano bipolarne silniki krokowe 1,89 Nm model SM 57/76-2804A. Komponenty układu sterowania, tj. sterowniki silników, płytę główną CNC oraz zasilacz, dobrano w odniesieniu do zastosowanych silników krokowych. Sterownik silnika krokowego stanowił model SSK-B03 (M542) o maksymalnym prądzie fazy 4,2 A. Sterownik ten umożliwia podział kroków od 1/2 do 1/128. Płyta główna układu sterowania SSK-MB2 wyposażona została w port równoległy LPT za pomocą którego, połączono z generatorem impulsów w postaci komputera wyposażonego w oprogramowanie Mach3. Źródło prądu stanowił półautomat spawalniczy Lorch S5 Speed Puls XT umożliwiający płynną regulację prądu spawania do 400 A. Akwizycji parametrów prądowo-napięciowych dokonano, za pomocą odczytu sprzężenia zwrotnego zasilacza łuku spawalniczego. Dokładną specyfikację stanowiska, wyszczególniono w tabeli 5. Schemat układu sterowania i napędu stanowiska przedstawiono na rysunku 12. Widok stanowiska badawczego zaprezentowano na rysunku 13. Na niniejszym stanowisku, przeprowadzono proces spawania próbek przeznaczonych do analizy wpływu kierunku walcowania na wielkość odchyłki płaskości powierzchni oraz próbek przeznaczonych do analizy wpływu parametrów technologicznych procesu MIG/MAG i geometrii rowka spawalniczego, na odchyłkę płaskości wyznaczonej na podstawie normy PN-EN ISO 19320:2000.

Tab. 5. Specyfikacja stanowiska badawczego

Parametr	Wartość
Zakres osi X	0-920 mm
Zakres osi Y	0-320 mm
Zakres ręcznej regulacji osi Z	0-250 mm
Prędkość minimalna przesuwu osi X i Y	1 mm/s
Regulacja kąta pochylenia uchwytu	$\pm 90^\circ$
Dokładność pozycjonowania	$\pm 0,1$ mm
Maksymalny prąd spawania	400 A



Rys. 12. Schemat układu sterowania i napędu stanowiska



Rys. 13. Stanowisko badawcze wdrożone w firmie TEPRO S.A.

4.3. Stanowiska pomiarowe

Akwizycje danych odchyłki płaskości powierzchni wyznaczonej na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000, przeprowadzono na dwóch stanowiskach pomiarowych. Stanowiska pomiarowe różniły się między sobą metodą pomiaru odchyłki płaskości powierzchni.

4.3.1. Stanowisko pomiarowe stykowe z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Wenzel LH 108

Stykowe stanowisko pomiarowe Wenzel LH 108 stanowi portalowa maszyna pomiarowa, wyposażona w łożyska pneumatyczne. Jego cechą szczególną jest duża sztywność oraz wysoka dokładność pomiarowa. Pomiarów dokonano z wykorzystaniem uniwersalnej głowicy pomiarowej TP 2 5 W o regulowanej sile nacisku. Akwizycji wyników dokonywano w sposób automatyczny, nakładając siatkę punktów pomiarowych na powierzchnię oczyszczonej próbki. Próbkę mocowano w specjalnym przyrządzie stanowiącym płaszczyznę odniesienia pomiaru odchyłki płaskości powierzchni. W tabeli 6 przedstawiono specyfikację maszyny pomiarowej Wenzel LH 108. Na rysunku 14, zaprezentowano widok stanowiska pomiarowego stykowego Wenzel LH 108.

Tab. 6. Specyfikacja stanowiska pomiarowego Wenzel LH 108

Parametr	Wartość
Zakres osi X	0-1000 mm
Zakres osi Y	0-2500 mm
Zakres osi Z	0-800 mm
Rozdzielczość	0,0005 mm
Powtarzalność	0,0025 mm
Niedokładność pomiarowa U1	3+ L/250 μm
Niedokładność pomiarowa U3	4+ L/150 μm
Niepewność pomiarowa	1,9 μm
Maksymalna masa mierzonego elementu	2300 kg

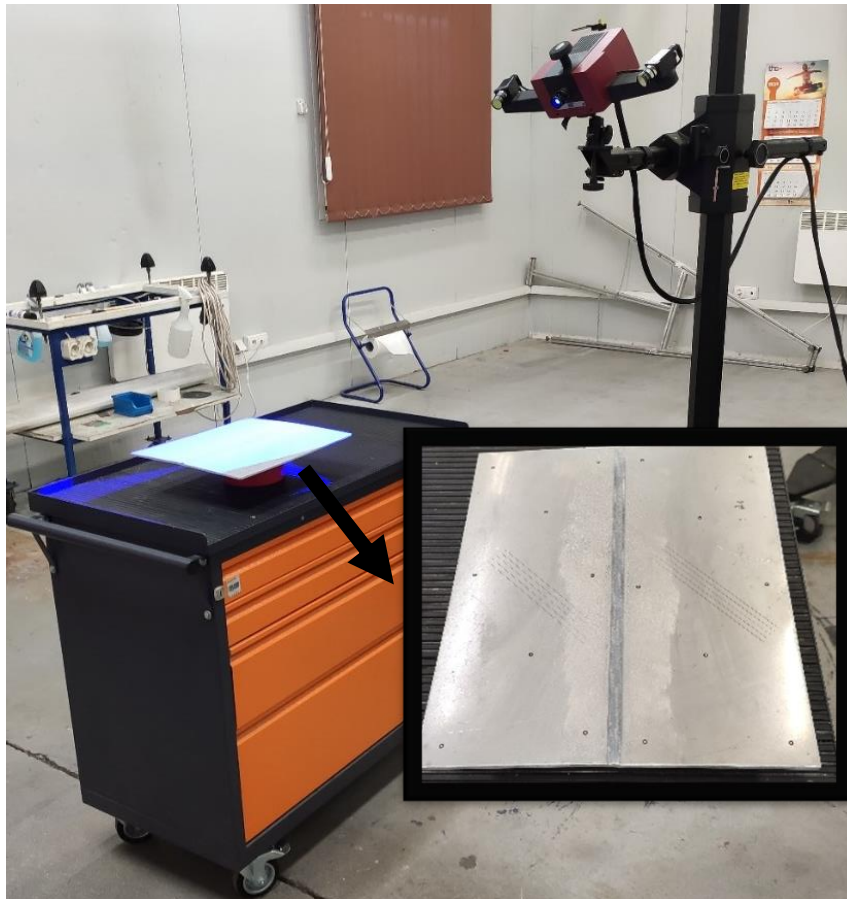


Rys. 14. Stanowisko pomiarowe Wenzel LH 108 w firmie TEPRO S.A.

Na stanowisku stykowym Wenzel LH 108 dokonano akwizycji danych odchyłki płaskości powierzchni próbek, przeznaczonych do określenia rozkładu zmiennej losowej odkształceń spawalniczych.

4.3.2. Stanowisko pomiarowe bezstykowe z zastosowaniem skanera Atos 5M

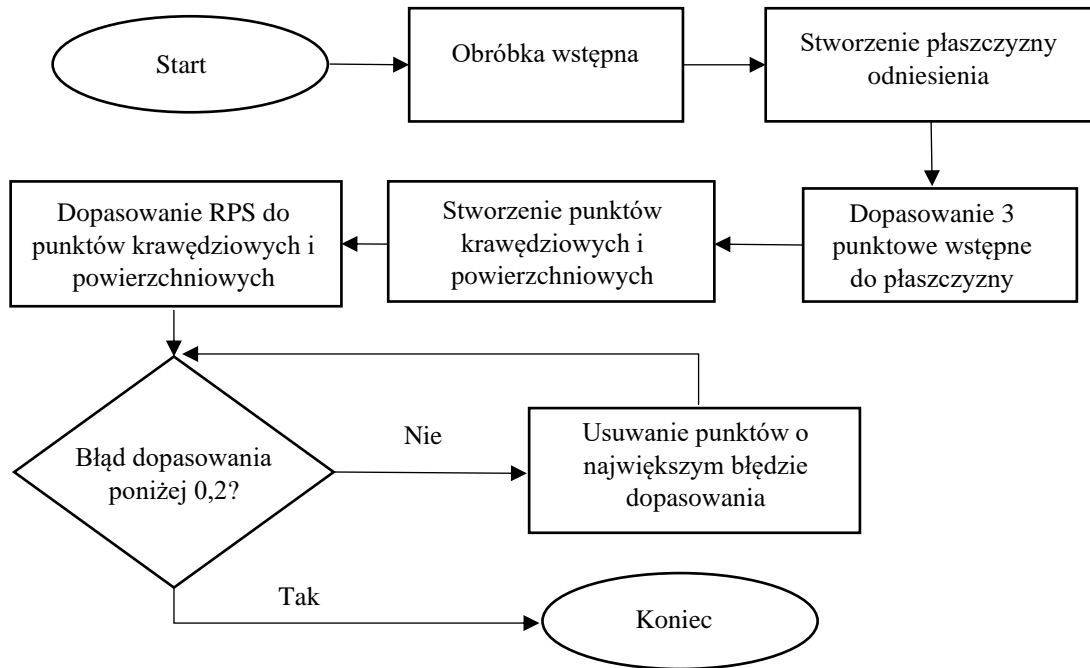
Bezstykowe stanowisko pomiarowe GOM Atos 5M stanowił skaner światła niebieskiego z dwiema kamerami skanującymi i projektorem w centralnej części skanera. Jego cechą szczególną, jest wysoka rozdzielczość oraz niski poziom szumów pomiarowych dzięki wysokiej jasności źródła światła LED. Zastosowanie światła niebieskiego o wąskim paśmie częstotliwości, pozwala na odfiltrowanie światła pochodzącego z otoczenia, co powoduje, że proces skanowania jest szybki bez utraty rozdzielczości. Kamery skanujące o rozdzielczości 12 megapikseli, są skalibrowane w konfiguracji stereo. Akwizycja danych z powierzchni zachodzi na przecięciu się promieni w konfiguracji: lewa i prawa kamera, lewa kamera i projektor oraz prawa kamera i projektor. Rozwiązanie to zostało określone przez producenta jako Triple Scan Technology, gdyż jednakowo kamery oraz projektor są skalibrowane tak, aby wyznaczać odpowiednie współrzędne. Skaner umożliwia wykonanie skanu dla rozstawu punktów pomiarowych mieszczących się w zakresie 0,05-0,29 mm. Na rysunku 15 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego.



Rys. 15. Stanowisko pomiarowe Atos 5M oraz próbka oklejona znacznikami

Przed procesem skanowania próbki oczyszczono z odprysków, a płytki dobiegowe i wybiegowe ułatwiające rozpoczęcie i zakończenie procesu spawania usunięto. Powierzchnie próbek umyto acetonem, po czym, na lico spoiny naniesiono cienką warstwę wywoływacza wykorzystywanego przy badaniach penetracyjnych. Przygotowane w ten sposób próbki, oklejono znacznikami służącymi do orientacji skanera w przestrzeni.

Próbki po procesie akwizycji danych, poddano obróbce w programie GOM Inspect Suite 2020. Schemat procesu obróbki w programie GOM Inspect Suite 2020 przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Schemat procesu obróbki skanowanych próbek w programie GOM Inspect Suite 2020

Po procesie obróbki, na dopasowanej do płaszczyzny odniesienia chmurze punktów, nałożono siatkę 120 punktów pomiarowych, na podstawie których dokonywano akwizycji odchyłki płaskości powierzchni, zgodnie z normą PN-EN ISO 13920:2000. Na bezstykowym stanowisku pomiarowym Atos 5M, przeprowadzono akwizycje danych z próbek przeznaczonych do określenia wpływu kierunku walcowania oraz wpływu parametrów technologicznych procesu MIG/MAG, a także geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni.

4.4. Analiza rozkładu zmiennej losowej odchyłek płaskości

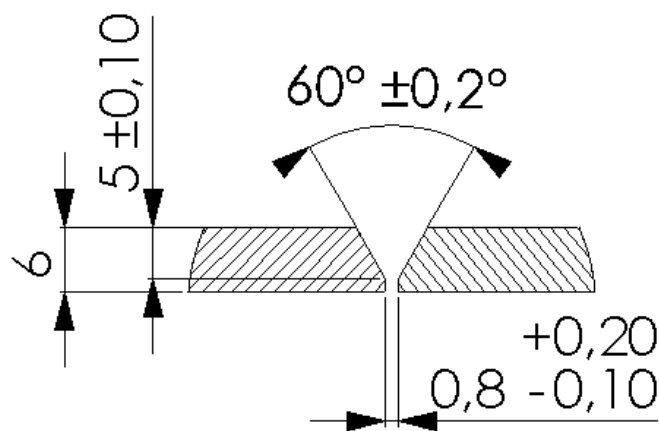
Zasadnym jest zaznaczyć, iż przed badaniami rozpoznawczymi należy dokonać analizy rozkładu zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni. Wyniki, jakie uzyskuje się podczas badań eksperymentalnych, wykazują pewną zmienność mimo ustalonych parametrów procesu. Zmienność ta, spowodowana jest czynnikami losowymi. Weryfikacja zmienności pozwala odpowiedzieć na pytanie: jak wiele wyników skoncentrowanych będzie w obszarze ich średniej wartości? Podczas weryfikacji rozkładu zmiennej losowej, należy dobrać rozkład adekwatny do analizowanej zmiennej. Odchyłka płaskości powierzchni, nie może osiągnąć ujemnych wartości, dlatego też należy poddać weryfikacji wyłącznie rozkłady dodatnie, takie jak rozkład logarytmno-normalny.

Na potrzeby analizy sformułowano hipotezę zerową i alternatywną:

- H_0 – rozkład zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni jest rozkładem logarytmno-normalnym.
- H_1 – rozkład zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni jest inny niż logarytmno-normalny.

4.4.1. Metodyka badań zmiennej losowej odchyłek płaskości

Na potrzeby analizy rozkładu odchyłki płaskości powierzchni, przygotowano 31 próbek z blachy nierdzewnej gatunku 1.4301 o grubości 6 mm. Próbki o wymiarach 300 na 350 mm, zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-1:2017-08 wycięto z arkusza wiązką laserową, z wykorzystaniem lasera CO₂ Platino 1530 CP4000 firmy Prima Power. Dłuższa krawędź próbki zorientowana była wzdłuż kierunku walcowania blachy. Obróbką skrawaniem, przygotowano rowki o geometrii przedstawionej na rysunku 17.



Rys. 17. Szkic rowka spawalniczego z naniesionymi wymiarami charakterystycznymi

Do próbek z obu stron przyspawano płytki dobiegowe i wybiegowe o wymiarach 30 na 30 mm, służące do ułatwienia rozpoczęcia i zakończenia procesu spawania. Próbki przed procesem spawania dokładnie odfuszczone acetonem.

Proces spawania przeprowadzono na stanowisku zrobotyzowanym firmy Panasonic. Dokładniejszą charakterystykę Robota TM2000, przedstawiono w rozdziale 4.2.1. Złącza wykonano z wykorzystaniem podkładek formujących grań spoin. Próbki spawano metodą MAG drutem litym (metoda 135). Gaz osłonowy aktywny M12 Inoxline C2 firmy Messer. Zastosowano drut spawalniczy $\varnothing 1,2$ mm gatunku 316LSi o numerze wytopu 264664-62023. Kąt pochylenia palnika wynosił 16° od prostopadłej do powierzchni próbki. Złącze wykonano z wykorzystaniem oscylacji o amplitudzie 2 mm oraz częstotliwości 0,5 Hz. Wszystkie 31 złącza spawanych wykonano ze stałymi parametrami procesu MAG, które przedstawiono w tabeli 7. Parametry wyjściowe procesu ustalono na podstawie pozytywnego wyniku badania wizualnego(VT) na poziomie jakości B wg PN-EN ISO 5817:2014-05. Próbki mocowano za pomocą zacisków spawalniczych. Czas uwolnienia próbek z zacisków po spawaniu wynosił 20 ± 5 s.

Tab. 7. Parametry procesu spawania metodą MAG drutem litym (metoda 135)

Natężenie prądu ustawione	Natężenie prądu rzeczywiste	Napięcie ustawione	Napięcie rzeczywiste	Prędkość podawania drutu	Prędkość spawania	Energia liniowa
A	A _r	V	V _r	m/min	m/min	kJ/mm
172	215	21	21	7,31	0,4	0,68

Próbki po procesie spawania układano w pakiety po trzy sztuki, po czym pozostawiono je do ostygnięcia na powietrzu. Temperatura otoczenia podczas wykonywania badań wynosiła 28 °C, a wilgotność 48%. Kolejno po 48 godzinach, próbki poddano badaniom wizualnym. Poziom jakości złączy badanych wynosił B wg PN-EN ISO 5817.

Akwizycji danych dokonano za pomocą maszyny współrzędnościowej Wenzel LH 108, której dokładniejszą charakterystykę przedstawiono w rozdziale 4.3.1.

4.4.2. Wyniki pomiaru odchyłek płaskości powierzchni

W tabeli 8, przedstawiono wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni.

Tab. 8. Wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni próbek, wymiary w mm

Lp.	Wynik	Lp.	Wynik	Lp.	Wynik	Lp.	Wynik	Lp.	Wynik
1	2,132	8	1,058	15	3,304	22	1,104	29	1,515
2	2,272	9	3,088	16	1,82	23	1,521	30	1,243
3	1,495	10	2,717	17	2,739	24	1,454	31	2,458
4	0,606	11	2,717	18	2,436	25	4,158		
5	2,105	12	2,778	19	2,032	26	3,985		
6	2,219	13	2,338	20	1,93	27	0,959		
7	1,595	14	2,464	21	1,891	28	1,608		

4.4.3. Analiza statystyczna

W tabeli 9, przedstawiono uszeregowane niemalejąco wyniki pomiarów odchyłki płaskości powierzchni analizowanych próbek.

Tab. 9. Uszeregowane niemalejąco wyniki pomiarów, wyniki w mm

Lp.	Wynik	$\ln x_i$	$(\ln x_i - \mu_{\ln x})$	$(\ln x_i - \mu_{\ln x})^2$
1	0,606	-0,50088	-1,17198	1,373532
2	0,959	-0,04186	-0,71297	0,508321
3	1,058	0,05638	-0,61472	0,377883
4	1,104	0,09894	-0,57216	0,32737
5	1,243	0,217528	-0,45357	0,20573
6	1,454	0,374318	-0,29678	0,088081
7	1,495	0,402126	-0,26898	0,072348
8	1,515	0,415415	-0,25569	0,065376
9	1,521	0,419368	-0,25173	0,06337
10	1,595	0,466874	-0,20423	0,041709
11	1,608	0,474991	-0,19611	0,03846
12	1,82	0,598837	-0,07227	0,005222
13	1,891	0,637106	-0,034	0,001156
14	1,93	0,65752	-0,01358	0,000184
15	2,032	0,709021	0,037918	0,001438
16	2,105	0,744315	0,073213	0,00536
17	2,132	0,757061	0,085958	0,007389
18	2,219	0,797057	0,125954	0,015864
19	2,272	0,820661	0,149558	0,022368
20	2,338	0,849296	0,178193	0,031753
21	2,436	0,890357	0,219255	0,048073
22	2,458	0,899348	0,228246	0,052096
23	2,464	0,901786	0,230684	0,053215
24	2,717	0,999528	0,328426	0,107864
25	2,717	0,999528	0,328426	0,107864
26	2,739	1,007593	0,33649	0,113226
27	2,778	1,021731	0,350629	0,122941
28	3,088	1,127524	0,456421	0,20832
29	3,304	1,195134	0,524031	0,274609
30	3,985	1,382537	0,711435	0,50614
31	4,158	1,425034	0,753932	0,568413
Suma	65,741	20,80417454	0,000000000	5,415673815

Do eliminacji wyników obarczonych błędem grubym zastosowano statystyki B_6^+ i B_6^- , które obliczono ze wzorów 4.1 i 4.2 [Kukielka2002]:

$$B_6^+ = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} = \frac{4,158 - 3,985}{4,158 - 0,606} = 0,0487, \quad (4.1)$$

$$B_6^- = \frac{x_1 - x_2}{x_n - x_1} = \frac{0,606 - 0,959}{4,158 - 0,606} = -0,0994. \quad (4.2)$$

Wartość krytyczna statystyki b_6^+ odczytana z tablic statystycznych [Kukielka2002], na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz dla liczby powtórzeń 31 wynosi $b_6^+ = 0,26$. Spełniono warunek $B_6^+ \leq b_{6(0,05;31)}^+$ oraz $B_6^- \geq b_{6(0,05;31)}^-$, zatem nie ma podstawy do odrzucenia maksymalnego oraz minimalnego wyniku odchyłki płaskości powierzchni.

Do wyznaczenia wartości oczekiwanej zmiennej $\mu_{\ln x}$ zastosowano wzór 4.3 [Ossowski2003]:

$$\mu_{\ln x} = \frac{1}{N} \sum \ln x = \frac{20,80417454}{31} = 0,671102404. \quad (4.3)$$

Wartość wariancji zmiennej $\sigma_{\ln x}^2$ wyznaczono ze wzoru 4.4 [Ossowski2003]:

$$\sigma_{\ln x}^2 = \frac{1}{N} \sum (\ln x_i - \mu_{\ln x})^2 = \frac{5,415673815}{31} = 0,174699. \quad (4.4)$$

Do wyznaczenia minimalnej liczby klas szeregu rozdzielczego skorzystano ze wzoru 4.5 [Kukielka2002]:

$$k = 1 + 3,3 \cdot \log N = 1 + 3,3 \cdot \log 31 = 5,922 \approx 6. \quad (4.5)$$

Szerokość klasy szeregu obliczono ze wzoru 4.6 [Kukielka2002]:

$$c = \frac{R}{k} = \frac{3,552}{6} = 0,592 \approx 0,6. \quad (4.6)$$

Jako początek pierwszej klasy przyjęto wartość odchyłki płaskości powierzchni wynoszącej 0,6 mm. Wyniki pomiarów sklasyfikowano według przyjętych górnych i dolnych granic przedziałów odchyłki płaskości powierzchni. W tabeli 10 przedstawiono szereg rozdzielczy wyników pomiaru odchyłki płaskości powierzchni.

Tab. 10. Szereg rozdzielczy wyników pomiaru odchyłki płaskości powierzchni

Klasa	Dolna granica	Górna granica	Środek przedziału	Liczba obserwacji	Częstość	Częstość skumulowana
k	G_d	G_g	S_p	n_i	C	C_x
1	0,6	1,2	0,9	4	0,13	0,13
2	1,2	1,8	1,5	7	0,23	0,36
3	1,8	2,4	2,1	9	0,29	0,65
4	2,4	3,0	2,7	7	0,23	0,88
5	3,0	3,6	3,3	2	0,06	0,94
6	3,6	4,2	3,9	2	0,06	1,000
			Suma	31	1,000	

Badanie zgodności rozkładu zmiennej losowej odchyłek płaskości powierzchni z rozkładem logarytmo-normalnym przeprowadzono z wykorzystaniem testu χ^2 .

Średnią wartość zmiennej losowej obliczono ze wzoru 4.7 [Ossowski2003]:

$$\ln \bar{X} = \frac{1}{N} \sum \ln S_p \cdot n_i = \frac{21,15681025}{31} = 0,682478. \quad (4.7)$$

Odchylenie standardowe nieobciążone zmiennej losowej obliczono ze wzoru 4.8 [Ossowski2003]:

$$\ln \sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (\ln S_p - \bar{X})^2 \cdot n_i}{N-1}} = \sqrt{\frac{5,171663654}{30}} = 0,415197. \quad (4.8)$$

W tabeli 11 przedstawiono wyniki obliczeń logarytmu naturalnego średniej zmiennej losowej, logarytmu naturalnego odchylenia standardowego nieobciążonego zmiennej losowej rozkładu wzorcowego oraz wartości niezbędne do ich wyznaczenia.

Tab. 11. Wyniki obliczeń logarytmu naturalnego średniej zmiennej losowej, logarytmu naturalnego odchylenia standardowego nieobciążonego zmiennej losowej rozkładu wzorcowego

Logarytm średniej zmiennej losowej	Logarytm odchylenia standardowego nieobciążonego zmiennej losowej	Iloczyn	Różnica	Kwadrat	Iloczyn
$\ln \bar{X}$	$\ln \sigma_X$	$\ln S_p \cdot n_i$	$\ln S_p - \bar{X}$	$(\ln S_p - \bar{X})^2$	$(\ln S_p - \bar{X})^2 \cdot n_i$
0,682478	0,415197	-0,42144	-0,787838266	0,6206891	2,482757
		2,838256	-0,277012642	0,076736	0,537152
		6,677436	0,059459595	0,0035354	0,031819
		6,952762	0,310774023	0,0965805	0,676063
		2,387845	0,511444718	0,2615757	0,523151
		2,721953	0,678498803	0,4603606	0,920721
	Suma	21,15681			5,171664

Liczbę obserwacji rozkładu wzorcowego w danym przedziale wyznaczono na podstawie różnicy wartości funkcji na obu końcach przedziału.

Korzystając ze wzoru 4.9 oraz 4.10, wyznaczono wartości oczekiwane rozkładu wzorcowego [Kukielka2002].

$$u_{i1} = \frac{\ln G_d - \ln \bar{X}}{\ln \sigma_X}, \quad (4.9)$$

$$u_{i2} = \frac{\ln G_g - \ln \bar{X}}{\ln \sigma_X}, \quad (4.10)$$

Wartość dystrybuanty rozkładu wzorcowego odczytano z tablic dystrybuanty rozkładu logarytmo-normalnego. W tabeli 12, przedstawiono wyniki obliczeń wartości niezbędnych do wyznaczenia oczekiwanych wartości liczby obserwacji rozkładu wzorcowego. W tabeli 13, przedstawiono wyniki obliczeń statystyki χ^2 .

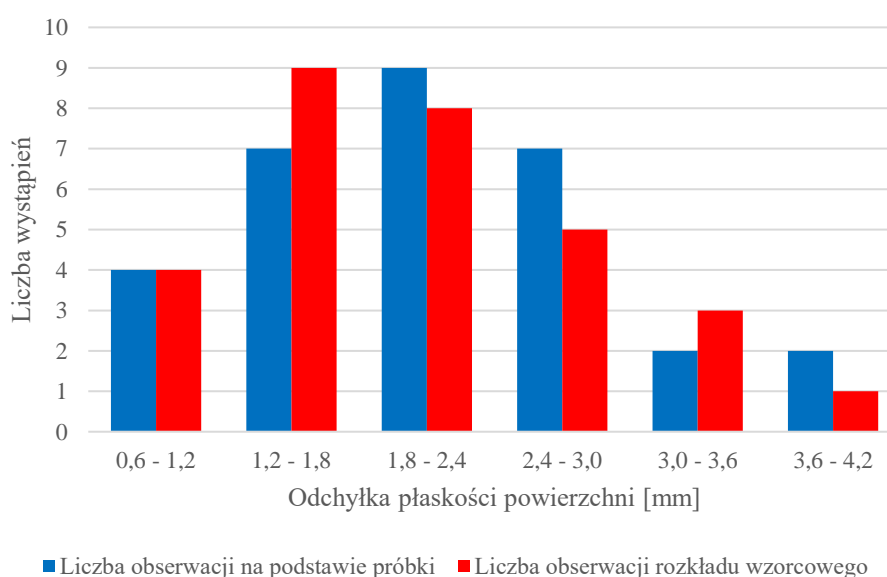
Tab. 12. Wyniki obliczeń liczby obserwacji rozkładu wzorcowego

u_{i1}	u_{i2}	$\varphi(u_{i1})$	$\varphi(u_{i2})$	$p(x)$	E_i	Zaokrąglenie
				$\varphi(u_{i2}) - \varphi(u_{i1})$	$p(x) \cdot N$	E_i
-2,87406	-1,20462	0,002026	0,114174	0,112148	3,477	4
-1,20462	-0,22806	0,114174	0,409799	0,295624	9,164	9
-0,22806	0,464818	0,409799	0,678969	0,26917	8,344	8
0,464818	1,002257	0,678969	0,84189	0,162921	5,051	5
1,002257	1,441378	0,84189	0,925261	0,083371	2,584	3
1,441378	1,812649	0,925261	0,965057	0,039796	1,234	1

Tab. 13. Wyniki obliczeń statystyki χ^2

n_i	E_i	$n_i - E_i$	$(n_i - E_i)^2$	$\frac{(n_i - E_i)^2}{E_i}$
4	4	0	0	0,000
7	9	-2	4	0,444
9	8	1	1	0,125
7	5	2	4	0,800
2	3	-1	1	0,333
2	1	1	1	1,000
Suma				2,703

Liczba stopni swobody układu $f = k - \varepsilon = 6 - 3 = 3$, ponieważ parametry rozkładu oszacowano na podstawie próbki, wartości średniej zmiennej losowej $\ln\bar{X}$ oraz odchylenia standardowego nieobciążonego zmiennej losowej $\ln\sigma_X$. Wartość krytyczna testu $\chi^2_{(0,05,3)} = 7,815$, ponieważ spełniono nierówność $\chi^2_{(0,05,3)} \geq \chi^2$, oznacza to brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Rozkład odkształceń spawalniczych jest zatem rozkładem logarytm-normalnym.



Rys. 18. Histogram liczebności obserwacji odchyłek płaskości powierzchni na podstawie próbki oraz rozkładu wzorcowego

W tabeli 14 przedstawiono wyniki parametrów rozkładu logarytmno-normalnego na podstawie próbki.

Tab. 14. Zestawienie parametrów rozkładu logarytmno-normalnego odchyłki płaskości wartości w mm

Średnia logarytmu	Średnia geometryczna	Wariancja logarytmu	Odchylenie standardowe logarytmu
μ_{lnx}	g	σ_{lnx}^2	σ_{lnx}
0,671102404	1,956	0,174699	0,41797

Mając obliczoną wariancję nieobciążoną skorzystano ze wzoru 4.11 w celu obliczenia odchylenia standardowego nieobciążonego logarytmu [Ossowski2003]:

$$\sigma_{lnx} = \sqrt{\sigma_{lnx}^2} = 0,41797. \quad (4.11)$$

Do wyznaczenia rozproszenia wartości odchyłki płaskości względem średniej geometrycznej populacji, skorzystano ze wzorów 4.12, 4.13 oraz 4.14 [Ossowski2003]:

$$v_d = e^{-\sigma_{lnx}} = e^{-0,41797} = 0,658, v_g = e^{\sigma_{lnx}} = e^{0,41797} = 1,519 \quad (4.12)$$

$$v_{2d} = e^{-2\sigma_{lnx}} = e^{-0,835941} = 0,433, v_{2g} = e^{2\sigma_{lnx}} = e^{0,835941} = 2,307 \quad (4.13)$$

$$v_{3d} = e^{-3\sigma_{lnx}} = e^{-1,253911} = 0,285, v_{3g} = e^{3\sigma_{lnx}} = e^{1,253911} = 3,504 \quad (4.14)$$

Odchylenie od wartości średniej geometrycznej rozkładu logarytmno-normalnego dla prawdopodobieństwa 68,26% obliczono ze wzoru 4.15 i 4.16 [Ossowski2003]:

$$(v_d - 1) \cdot 100\% = (0,658 - 1) \cdot 100\% = -34,16\%, \quad (4.15)$$

$$(v_g - 1) \cdot 100\% = (1,519 - 1) \cdot 100\% = 51,9\%, \quad (4.16)$$

Odchylenie od wartości średniej geometrycznej rozkładu logarytmno-normalnego dla prawdopodobieństwa 95,45% obliczono ze wzoru 4.17 i 4.18 [Ossowski2003]:

$$(v_{2d} - 1) \cdot 100\% = (0,433 - 1) \cdot 100\% = -56,7\%, \quad (4.17)$$

$$(v_{2g} - 1) \cdot 100\% = (2,307 - 1) \cdot 100\% = 130,7\%, \quad (4.18)$$

Odchylenie od wartości średniej geometrycznej rozkładu logarytmno-normalnego dla prawdopodobieństwa 99,73% obliczono ze wzoru 4.19 i 4.20 [Ossowski2003]:

$$(v_{3d} - 1) \cdot 100\% = (0,285 - 1) \cdot 100\% = -71,5\%, \quad (4.19)$$

$$(v_{3g} - 1) \cdot 100\% = (3,504 - 1) \cdot 100\% = 2,504\%, \quad (4.20)$$

Obliczone wartości odchylenia odchyłki płaskości średniej geometrycznej dla danego poziomu prawdopodobieństwa przedstawiono w tabeli 15.

Tab. 15. Obliczone wartości odchylenia odchyłki płaskości od średniej geometrycznej dla danego poziomu prawdopodobieństwa wartości w mm

Odchylenie	Prawdopodobieństwo 68,26%	Prawdopodobieństwo 95,45%	Prawdopodobieństwo 99,73%
Dolna wartość	1,288	0,848	0,558
Górna wartość	2,972	4,513	6,855

4.4.4. Analiza wyników badań

Krytyczna wartość testu $\chi^2_{(0,05,3)}$ na poziomie istotności $\alpha=0,05$ jest większa od obliczonej wartości statystyki χ^2 analizowanego rozkładu. Oznacza to, brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Rozkład odkształceń spawalniczych jest zatem rozkładem logarytmo-normalnym. Rozkład logarytmo-normalny, jest rozkładem dodatnim, co odpowiada wyłącznie dodatnim wartościom odchyłki płaskości powierzchni. Należy podkreślić fakt niesymetryczności rozkładu z wyraźnym lewostronnym przesunięciem.

Parametry rozkładu logarytmo-normalnego odchyłki płaskości powierzchni wynoszą odpowiednio: średnia geometryczna próbki 1,956 mm, odchylenie standardowe logarytmu 0,41797. Warto podkreślić, że najczęściej stosowaną klasą dokładności odchyłki płaskości powierzchni jest klasa F wg PN-EN ISO 13920:2000. Wartość dopuszczalnej normatywnej odchyłki płaskości wynosi 1,5 mm. Analizując dystrybucję otrzymanego rozkładu dla wyznaczonych parametrów średniej i odchylenia zauważono, że wyłącznie 26% elementów spawanych spełni narzuconą przez normę odchyłkę płaskości powierzchni.

4.4.5. Wnioski z analizy rozkładu zmiennej losowej odchyłek płaskości

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozkładu odchyłki płaskości powierzchni sformułowano następujące wnioski:

1. Rozkład odchyłki płaskości powierzchni jest rozkładem logarytmo-normalnym.
2. Rozkład logarytmo-normalny jest rozkładem niesymetrycznym z wyraźnym lewostronnym przesunięciem, dlatego wnioskowanie należy przeprowadzić na podstawie wartości średniej geometrycznej, odchylenia standardowego logarytmu oraz wartości dolnej granicy (v_{3d}) i górnej granicy (v_{3g}) rozproszenia dla prawdopodobieństwa 99,73%.
3. W dalszych badaniach należy dokonać analizy wyników na podstawie zaprezentowanej metodyki.
4. Mimo zapewnienia stałych parametrów spawania wyłącznie 26% elementów spawanych spełni wymagania stawiane przez normę PN-EN ISO 13920:2000 w klasie dokładności F.
5. W dalszych badaniach należy zawęzić tolerancję wykonania rowka spawalniczego oraz spawać bez mocowania próbek za pomocą zacisków spawalniczych. Ma to istotny wpływ na wyniki. Świadczy o tym stosunkowo duże odchylenie standardowe logarytmu odchyłki płaskości powierzchni.

4.5. Analiza wpływu kierunku walcowania blach na odchyłkę płaskości powierzchni

4.5.1. Wprowadzenie

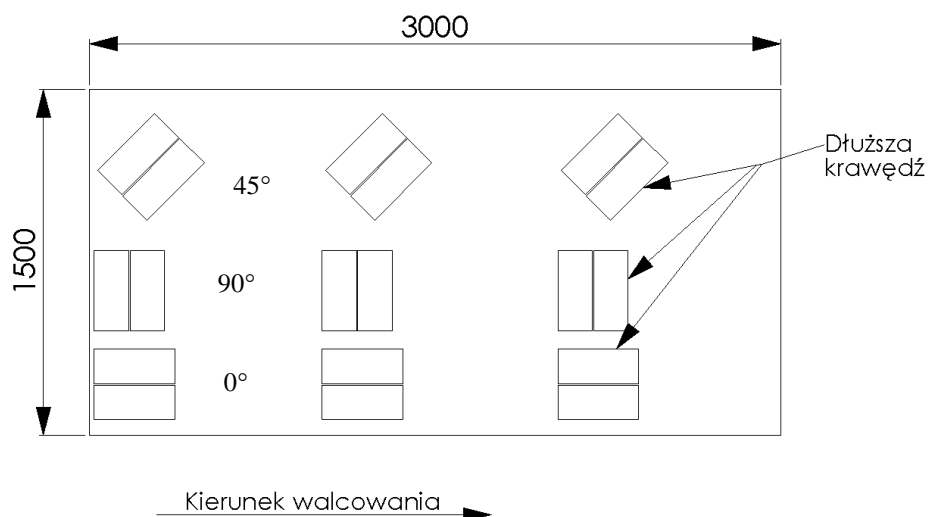
Procesy technologiczne związane z obróbką i łączeniem metali, charakteryzują się wprowadzaniem naprężeń objętościowych. Mogą one przyczyniać się do lokalnych i globalnych odkształceń obrabianego materiału. Przykładem tego jest proces walcowania blach na określoną grubość, podczas którego wprowadzany jest złożony stan naprężeń w wyniku zgniotu. Materiały poddane walcowaniu charakteryzują się anizotropią własności mechanicznych w zależności od kierunku walcowania. Należy nadmienić, że anizotropia własności mechanicznych wpływa na powstające naprężenia i odkształcenia spawanych elementów, powodując przy tym multiplikacje odkształceń w określonych kierunkach względem osi spoiny. Brak wiedzy na temat naprężeń materiału po poprzedzających procesach technologicznych (walcowanie, prostowanie cieplno-mechaniczne), przyczynia się do znaczących trudności w przewidywaniu kierunków i wielkości odkształceń spawalniczych. Dane partie materiału, mogą charakteryzować się zróżnicowanym poziomem i rozkładem naprężeń, a tym samym odmiennym poziomem powstających odchyłek płaskości powierzchni. Niniejsza analiza ma na celu dać odpowiedź, w jaki sposób kierunek walcowania wpływa na powstające odchyłki płaskości powierzchni elementów łączonych metodą spawania.

4.5.2. Metodyka badań wpływu kierunku walcowania na odchyłkę płaskości

Na potrzeby analizy wpływu kierunku walcowania na odchyłkę płaskości przygotowano 9 próbek wykonanych z blachy nierdzewnej 1.4301 o grubości 5 mm. Próbkę zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-1:2017-08 o wymiarach 300 na 350 mm, wycięto z arkusza blachy wiązką laserową z wykorzystaniem lasera CO₂ Platino 1530 CP4000 firmy Prima Power wg następującej specyfikacji:

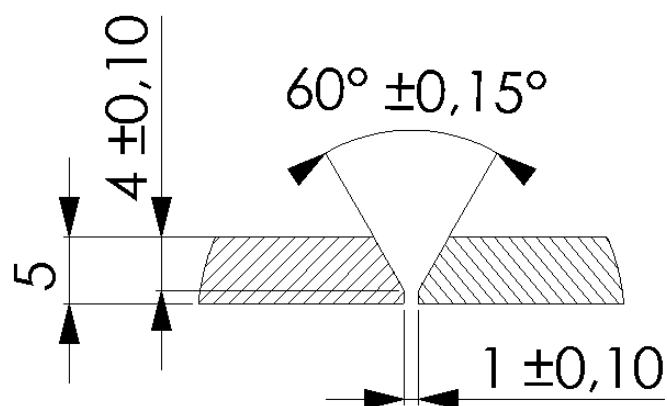
- komplet 3 próbek z dłuższą krawędzią zorientowaną równolegle do kierunku walcowania,
- komplet 3 próbek z dłuższą krawędzią zorientowaną prostopadle do kierunku walcowania,
- komplet 3 próbek z dłuższą krawędzią zorientowaną pod kątem 45° do kierunku walcowania.

Na rysunku 20 przedstawiono szkic orientacji dłuższej krawędzi próbek w stosunku do kierunku walcowania arkusza blachy.



Rys. 19. Orientacja dłuższej krawędzi próbek względem kierunku walcowania arkusza blachy

Metodą obróbki skrawaniem przygotowano rowek o geometrii przedstawionej na rysunku 21.



Rys. 20. Szkic rowka spawalniczego próbki z naniesionymi wymiarami charakterystycznymi

Z obu stron próbek szepiono płytki dobiegowe i wybiegowe o wymiarach 30 na 30 mm, służące do ułatwienia rozpoczęcia i zakończenia procesu spawania. Przed rozpoczęciem spawania próbki odłuszczone acetonem. W rowku spawalniczym nie wykonywano spoin szepnych. Odchyłkę płaskości przygotowanych elementów sprawdzano liniałem.

Złącza spawane wykonano metoda MAG drutem litym (metoda 135). Gaz osłonowy M12 Inoxline C2 firmy Messer. Drut spawalniczy $\varnothing 1,2$ mm gatunku 316LSi o numerze wytopu 264664-62023. Uchwyt spawalniczy usytuowano prostopadle do powierzchni próbki. Odległość końcówki prądowej od powierzchni blachy wynosiła 20 mm. Źródło prądowe, stanowił zasilacz łuku firmy Lorch S5 Speed puls. Posuw uchwytu zrealizowano za pomocą przyrządu sterowanego numerycznie zaprojektowanego przez autora niniejszej rozprawy. Stanowisko szerzej opisano w rozdziale 4.2.2. Próbki spawano bez zastosowania elementów

mocujących i zacisków a do osłony grani spoiny wykorzystano argon 4.9. Złącza wykonano łukiem pulsującym stałymi parametrami przedstawionymi w tabeli 16. Parametry wyjściowe procesu ustalono na podstawie pozytywnego wyniku badania wizualnego na poziomie jakości B. Energię liniową procesu wyznaczono na podstawie pracy [Kensik2006] korzystając ze wzoru:

$$E_{\dot{s}r} = \bar{\lambda}_s \frac{I_{\dot{s}r} U_{\dot{s}r}}{v} \quad (4.21)$$

Gdzie:

$\bar{\lambda}_s$ – współczynnik mocy łuku pulsującego,

$I_{\dot{s}r}$ – średnia wartość napięcia,

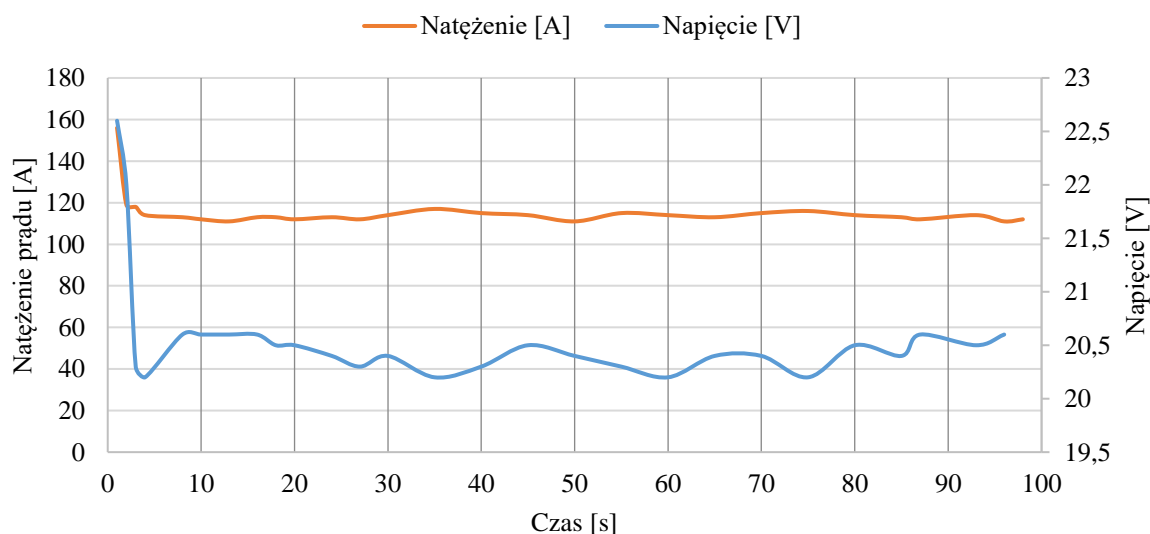
$U_{\dot{s}r}$ – średnia wartość natężenia,

v – prędkość posuwu.

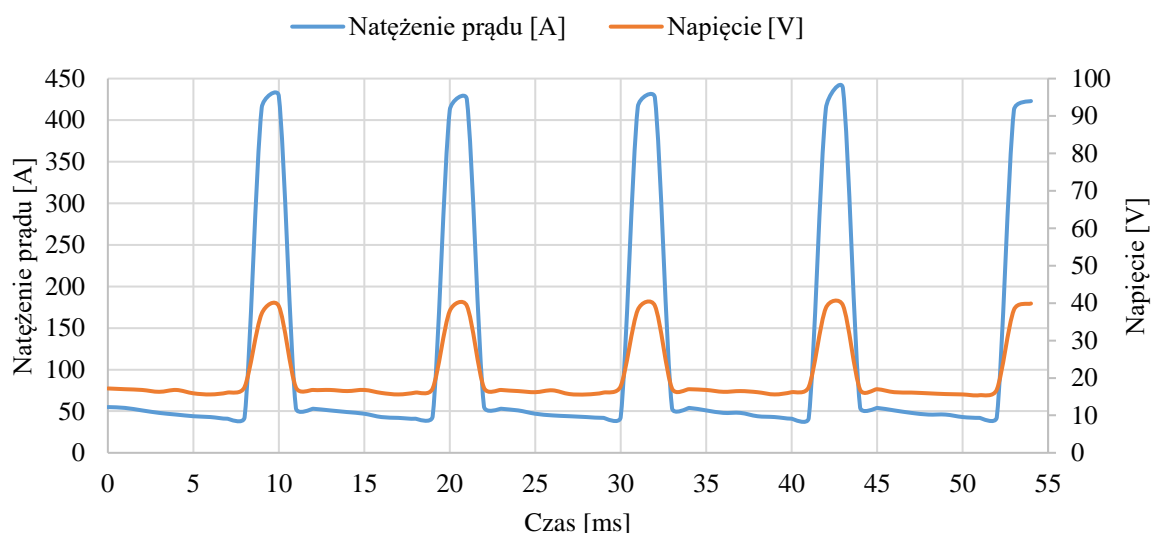
Na rysunku 22 przedstawiono wykres zmiany średnich parametrów napięciowo-prądowych w czasie trwania procesu spawania. Rysunek 23 przedstawia przebieg w czasie chwilowych wartości parametrów napięciowo-prądowych. Pomiarów parametrów prądowo-napięciowych dokonano za pomocą odczytu sprzężenia zwrotnego spawarki Lorch S5 Speed puls.

Tab. 16. Parametry procesu spawania metodą MAG drutem litym (metoda 135)

Natężenie prądu ustawione	Średnie natężenie prądu	Napięcie ustawione	Średnie napięcie	Prędkość podawania drutu	Prędkość spawania	Współczynnik mocy łuku pulsującego	Średnia obliczona energia liniowa
A	A	V	V	m/min	m/min	$\bar{\lambda}_s$	kJ/mm
125	115,2	19,5	20,6	3,25	0,22	1,27	0,822



Rys. 21. Wykres zmiany średnich parametrów napięciowo-prądowych w czasie trwania procesu spawania



Rys. 22. Wykres zmiany chwilowych parametrów napięciowo-prądowych w czasie trwania procesu spawania

Pomiaru odchyłki płaskości powierzchni dokonano za pomocą skanera światła niebieskiego GOM Atos 5M opisanego szerzej w rozdziale 4.3.2, natomiast pomiary próbek poddano obróbce w programie GOM Inspect Suite 2020. Ze stworzonej siatki punktów pomiarowych, dokonano akwizycji odchyłek płaskości powierzchni zgodnie z normą PN-EN ISO 13920:2000. W tabeli 17 przedstawiono wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni.

Tab. 17. Wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni

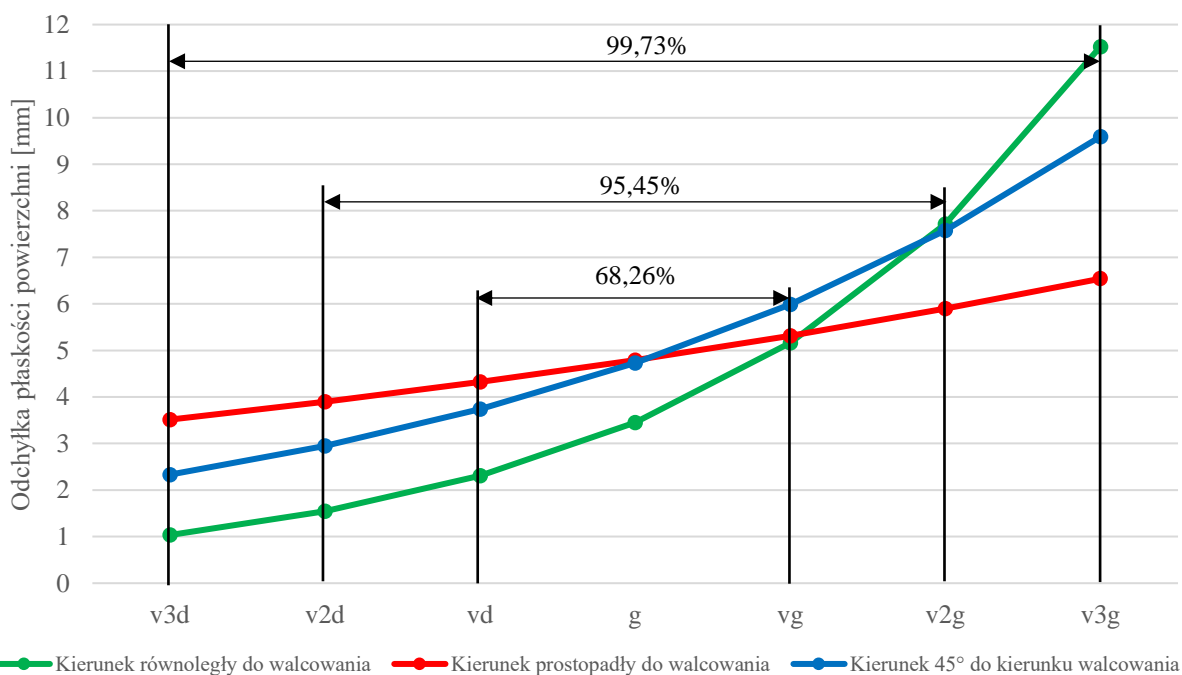
Nazwa czynnika	Oś spoiny równoległe do kierunku walcowania	Oś spoiny prostopadłe do kierunku walcowania	Oś spoiny pod kątem 45° do kierunku walcowania
-	mm	mm	mm
Odchyłka płaskości Próbka 1	1,97	4,27	3,43
Odchyłka płaskości Próbka 2	4,23	4,70	5,14
Odchyłka płaskości Próbka 3	4,94	5,49	6,00
B_6^+	0,239	0,648	0,335
B_6^-	-0,761	-0,353	-0,665

Wartość krytyczna statystyki b_6^+ odczytana z tablic statystycznych [Kukiełka2002], na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz dla 3 powtórzeń eksperymentu wynosi $b_6^+ = 0,941$. Warunek $B_6^+ \leq b_{6(0,05;3)}^+$ oraz $B_6^- \geq b_{6(0,05;3)}^-$ został spełniony, zatem nie ma podstawy do odrzucenia maksymalnego oraz minimalnego wyniku odchyłki płaskości powierzchni analizowanych kierunków walcowania względem dłuższej krawędzi próbki.

Korzystając ze wzorów oraz metodyki przedstawionej w punkcie 4.4.3 rozprawy, wyznaczono wartości parametrów rozkładu logarytmo-normalnego, analizowanych kierunków walcowania względem dłuższej krawędzi próbki. W tabeli 18 ukazano obliczone parametry rozkładu logarytmo-normalnego danego kierunku walcowania. Na rysunku 23, przedstawiono wykres odchyłek względem średniej geometrycznej odchyłki płaszczyzny danego kierunku walcowania.

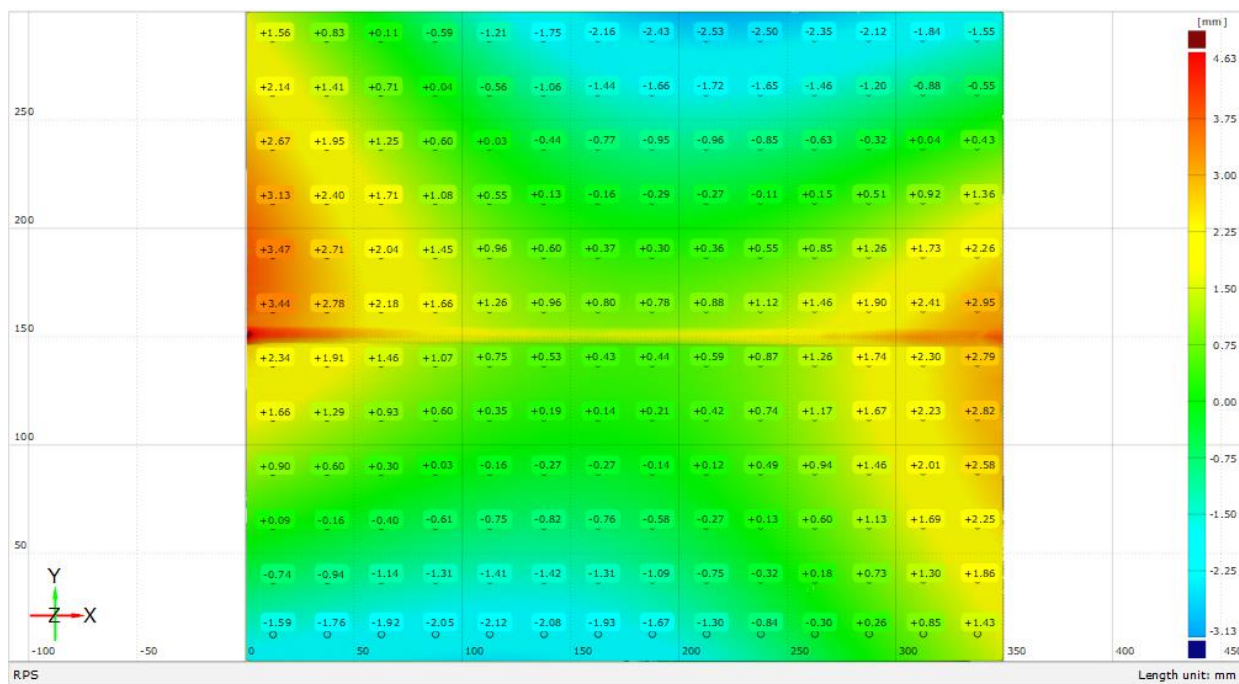
Tab. 18. Obliczone parametry rozkładu logarytmo-normalnego odchyłki płaszczyzny danego kierunku walcowania

Orientacja osi spoiny do kierunku walcowania	Średnia logarytmu	Średnia geometryczna	Odchylenie standardowe logarytmu	v_{3d}	v_{2d}	v_d	v_g	v_{2g}	v_{3g}
	μ_{lnx} [mm]	g [mm]	σ_{lnx} [mm]	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Równoległe	1,24	3,45	0,40	1,03	1,55	2,31	5,16	7,71	11,53
Prostopadle	1,57	4,79	0,10	3,51	3,90	4,32	5,32	5,90	6,54
Pod kątem 45°	1,55	4,73	0,24	2,33	2,95	3,74	5,99	7,58	9,59

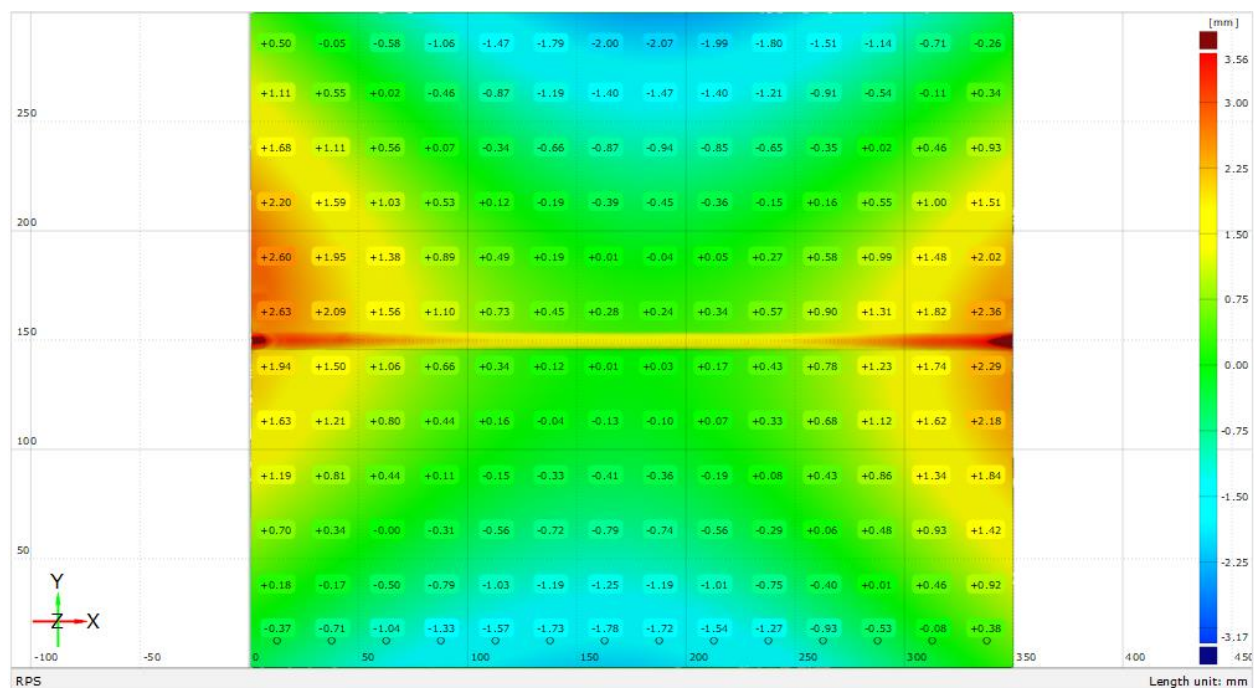


Rys. 23. Wykres odchyłek względem średniej geometrycznej odchyłki płaszczyzny danego kierunku walcowania

Na rysunku 24, 25 oraz 26 przedstawiono wyniki pomiarów odchyłki płaszczyzny powierzchni w programie GOM Inspect Suite 2020.



Rys. 24. Mapa odchyłki płaszczyzny powierzchni próbki 1 o kierunku walcowania pod kątem 45° w stosunku do dłuższej krawędzi



Rys. 25. Mapa odchyłki płaszczyzny powierzchni próbki 3 o kierunku walcowania prostopadłym w stosunku do dłuższej krawędzi

w stosunku do kierunku walcowania, zaobserwować można zbieżność powstałych odkształceń w kierunku prostopadłym i równoległym do osi spoiny. Zauważa się, że w przypadku próbek zorientowanych dłuższą krawędzią wzdłuż kierunku walcowania, powstałe odkształcenia w kierunku prostopadłym i równoległym do osi spoiny, mają przeciwne zwroty w stosunku do pozostałych analizowanych kierunków walcowania. Zatem kierunek powstających odkształceń w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego, zależy od kierunku walcowania. Natomiast dla próbek zorientowanych dłuższą krawędzią pod kątem 45° względem kierunku walcowania, zaobserwować można wyraźne przesunięcie maksymalnych i minimalnych wartości odkształceń w stosunku do osi spoiny. Owo przesunięcie zbliżone było do usytuowania kierunku walcowania względem dłuższej krawędzi próbki.

4.5.4. Wnioski z analizy wpływu kierunku walcowania blach na odchyłkę płaskości powierzchni

Na podstawie przeprowadzonej analizy wpływu kierunku walcowania blachy względem dłuższej krawędzi próbki na odchyłkę płaskości powierzchni, sformułowano następujące wnioski:

1. Kierunek walcowania istotnie wpływa na wartość średniej geometrycznej oraz odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni. Dlatego, brak określenia kierunku walcowania próbek, wpłynie negatywnie na ocenę wpływu parametrów spawania MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego.
2. Najmniejszą wartość odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni uzyskano dla prostopadłego kierunku walcowania. Dlatego do dalszych badań, będą stosowane próbki o kierunku walcowania prostopadłym względem osi spoiny.
3. Kierunek walcowania wpływa bezpośrednio na wielkość i kierunek powstających odkształceń spawalniczych, a na mapach odchyłek płaskości wyraźne są widoczne przesunięcia wartości odchyłek o kąt orientacji kierunku walcowania wzdłuż osi spoiny

4.6. Badania i analiza wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni

4.6.1. Wprowadzenie

Uznana przez jednostki notyfikujące technologia spawania wg normy PN-EN ISO 15614:2017 oraz PN-EN ISO 15613:2006 umożliwia spawanie określonego zakresu grubości materiałów podstawowych, pod warunkiem zachowania wyznaczonego przez jednostkę notyfikującą poziomu ilości wprowadzonego ciepła. Restrykcja ilości wprowadzonego ciepła przy uznawaniu technologii spawania narzuca potrzebę analizy wpływu zmiany parametrów technologicznych spawania na odchyłkę płaskości, w wąskim zakresie tolerancji odchyłki energii liniowej. Wówczas uznane technologie spawania będą użyteczne w warunkach produkcyjnych. Dodatkowe operacje, związane z prostowaniem cieplno-mechanicznym są kosztowne oraz wymagają zaangażowania doświadczonego personelu. Analiza obecnego stanu wiedzy wykazała brak badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG na odchyłkę płaskości powierzchni, mierzoną wg PN-EN ISO 13920:2000 przy zachowaniu wąskiej tolerancji zmian energii liniowej.

Geometria rowka spawalniczego w przypadku złączy doczołowych ze spoiną czołową, przygotowanych na kształt litery V, opisana jest trzema parametrami. Należą do nich kąt rozwarcia rowka, próg i odstęp między łączonymi blachami. W zebranej na potrzeby niniejszej rozprawy literaturze analizowano wpływ na odkształcenia spawalnicze poszczególnych parametrów geometrii rowka spawalniczego. Należy zaznaczyć, że cytowani autorzy analizowali różne pola przekroju poprzecznego rowka. Zmiana danego przekroju wpływa na zmianę objętości spoiny, a tym samym może mieć wpływ na zmianę momentu gnącego wywołanego przez skurcz spoiny. Należy podkreślić, że poprzez zmianę objętości spoiny można wpłynąć, na wielkość momentu gnącego, nawet przy takim samym poziomie sił oddziałujących na złącze podczas spawania. Wnioskując, należy zaznaczyć, że ocena wpływu parametrów przy zmiennym polu przekroju rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni nie odzwierciedla ich realnego znaczenia i może prowadzić do błędnych twierdzeń.

Niniejszą analizę wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na wielkość odchyłki płaskości powierzchni, przeprowadzono przy zachowaniu energii liniowej oraz z zachowaniem pola przekroju poprzecznego rowka spawalniczego w tolerancji wynoszącej 5%. Założona restrykcja ma na celu ustalenie, który z analizowanych parametrów wpływa znacząco na odchyłkę płaskości powierzchni, dzięki zachowaniu zbliżonych warunków początkowych procesu spawania. Dodatkowo, obok parametrów

technologicznych przeprowadzono analizę wpływu zmiany granicy plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenia A_5 między dostawami materiału podstawowego, na odchyłkę płaskości powierzchni.

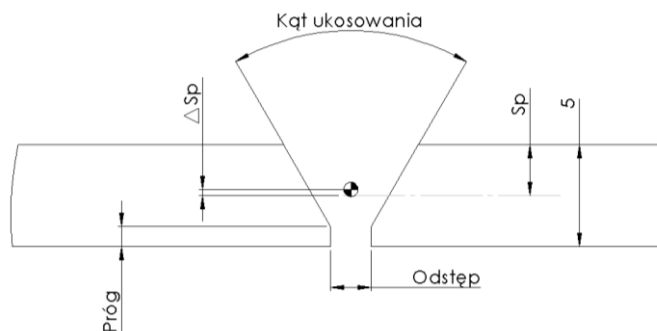
4.6.2. Metodyka badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni

Na potrzeby dokonania analizy wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości przygotowano 45 próbek wykonanych z blachy nierdzewnej 1.4301 o grubości 5 mm. Próbki zgodne z normą PN-EN ISO 15614-1:2017 o wymiarach 300 na 350 mm, wycięto z arkusza blachy wiązką laserową z wykorzystaniem lasera CO₂ Platino 1530 CP4000 firmy Prima Power, dłuższą krawędzią zorientowaną prostopadle do kierunku walcowania blachy.

Metodą obróbki skrawaniem przygotowano geometrię rowków spawalniczych według specyfikacji zawartej w tabeli 19. Wykonano ją, stosując: kąt ukosowania w tolerancji $\pm 0,15^\circ$, odstęp i próg w tolerancji $\pm 0,1$ mm. Odchyłka pola przekroju poprzecznego wszystkich geometrii rowków spawalniczych mieściła się w tolerancji 5%. Na rysunku 27, przedstawiono szkic rowka spawalniczego wraz z oznaczeniami jego parametrów oraz sposób wyznaczenia środka ciężkości.

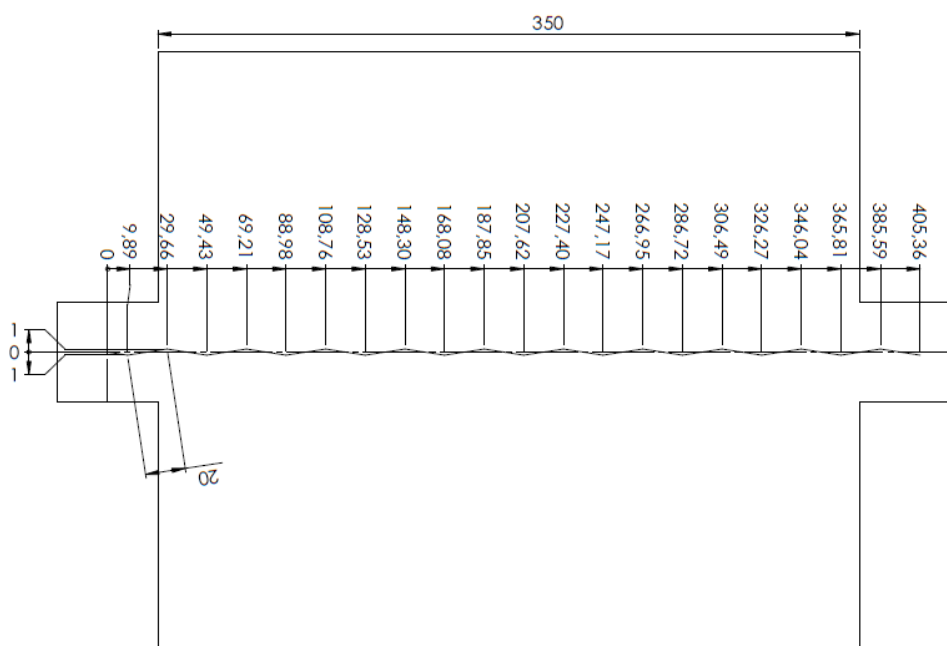
Tab. 19. Specyfikacja geometrii rowków spawalniczych wszystkich użytych próbek

Lp.	Kąt ukosowania	Odstęp	Próg	Pole przekroju poprzecznego	Liczba próbek	Odchyłka środka ciężkości rowka	Szerokość lica
	°					mm	
Go1	60	1	1	14,24	27	0,76	5,62
Go2	60	0,55	0,55	14,18	3	0,82	5,69
Go3	60	0	0	14,43	3	0,83	5,77
Go4	50	1	0,55	14,23	3	0,66	5,15
Go5	40	1	0	14,1	3	0,54	4,64
Go6	50	1,35	1	14,21	3	0,61	5,08
Go7	40	1,7	1	14,32	3	0,47	4,61



Rys. 27. Szkic rowka spawalniczego wraz z oznaczeniami jego parametrów oraz sposób wyznaczenia odchyłki środka ciężkości rowka (ΔSp)

Złącza spawane wykonano łukiem pulsującym metodą MAG drutem litym (metoda 135). Źródło prądowe stanowił zasilacz łuku firmy Lorch S5 Speed puls. Energię liniową procesu, wyznaczono na podstawie pracy [Kensik2006] korzystając ze wzoru 4.21. Pomiaru parametrów prądowo-napięciowych, dokonano za pomocą odczytu sprzężenia zwrotnego spawarki Lorch S5 Speed puls. Do spawania zastosowano mieszkankę gazową M12 Inoxline C2 firmy Messer oraz drut spawalniczy $\varnothing 1,2$ mm gatunku 316LSi o numerze wytopu 264664-62023, natomiast do osłony grani spoiny wykorzystano argon 4.9. Posuw uchwytu podczas badań realizowano za pomocą zaprojektowanego przyrządu sterowanego numerycznie, szerzej opisanego w rozdziale 4.2.2. Próbki spawano bez zastosowania elementów mocujących i zacisków. Z obu stron próbek, przyspawano płytki dobiegowo-wybiegowe o wymiarach 30 na 30 mm służące do ułatwienia rozpoczęcia i zakończenia procesu spawania. Przed rozpoczęciem spawania próbki odtłuszczono acetonem. W rowku spawalniczym nie wykonywano spoin szepnych. Kontrole odchyłki płaskości przygotowanych elementów sprawdzano liniałem. Oscylacje uchwytu zrealizowano za pomocą wychylania uchwytu poza oś rowka spawalniczego. Sumaryczna długość drogi uchwytu spawalniczego z oscylacją wynosiła 410 mm, wobec czego, zastosowano korekcję prędkości spawania. Prędkość spawania po korekcji dla uchwytu z oscylacją wynosiła 0,2255 m/min. Należy zaznaczyć, że korekcja prędkości spawania z oscylacją umożliwiła uzyskanie takiej samej prędkości spawania wzdłuż osi rowka, adekwatnie jak podczas spawania bez oscylacji. Sposób spawania z oscylacją oraz drogę uchwytu przedstawiono na rysunku 28.

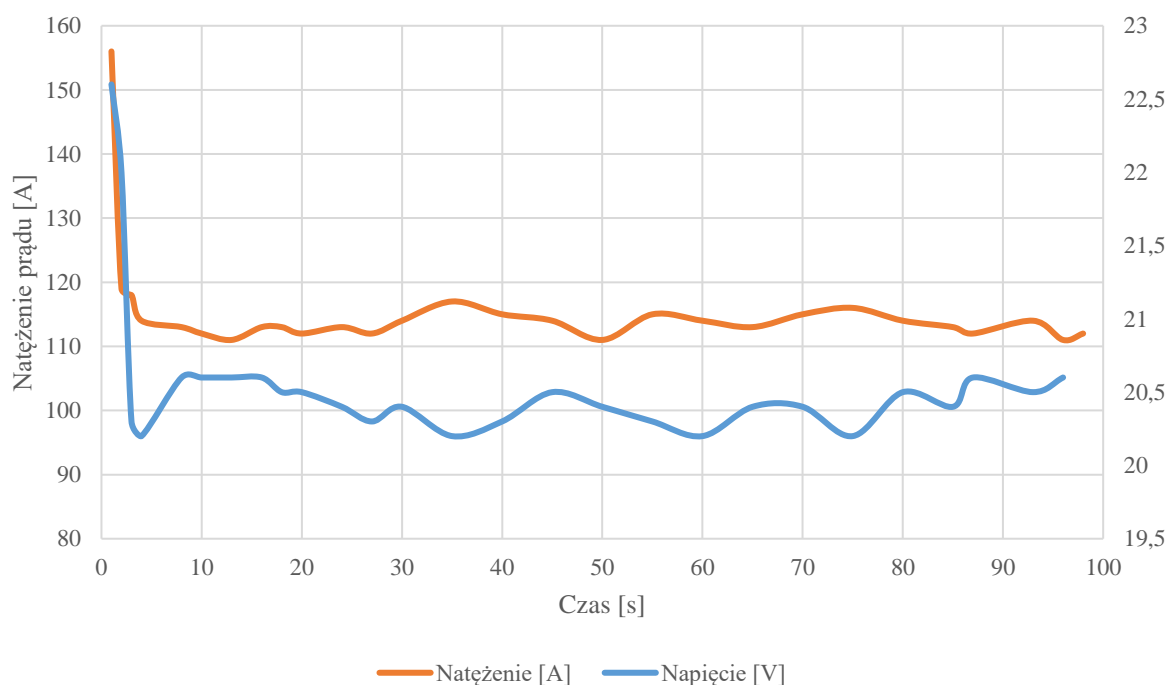


Rys. 28. Sposób spawania oraz droga uchwytu z oscylacją

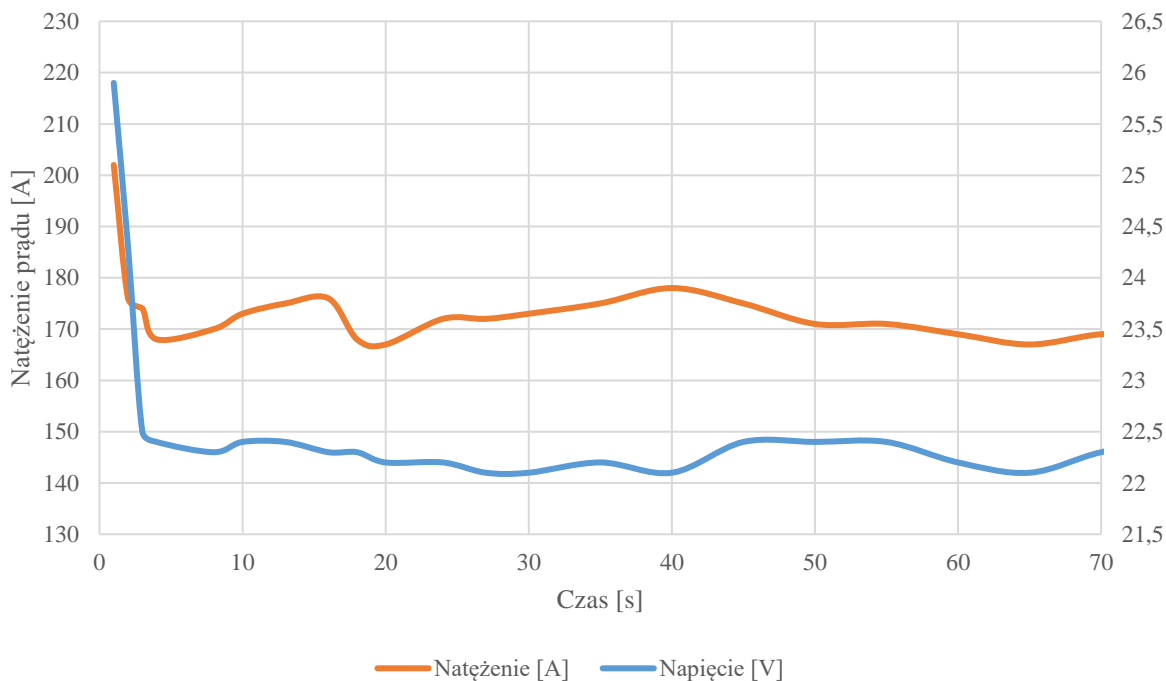
Parametry prądowe dla poszczególnych punktów planu badawczego, przedstawiono w tabeli 20. Parametry wyjściowe procesu spawania pokrywały się parametrami stosowanymi podczas badania wpływu kierunku walcowania. Z poniższej tabeli można odczytać, że odchyłka średniej energii liniowej procesu spawania dla wszystkich punktów planu badawczego wynosiła poniżej 5%. Na rysunkach 29, 30 oraz 31, przedstawiono wykres średnich parametrów prądowych w czasie dla punktów P1, P2 oraz P3.

Tab. 20. Parametry prądowo-napięciowe oraz prędkości spawania danego punktu planu badawczego

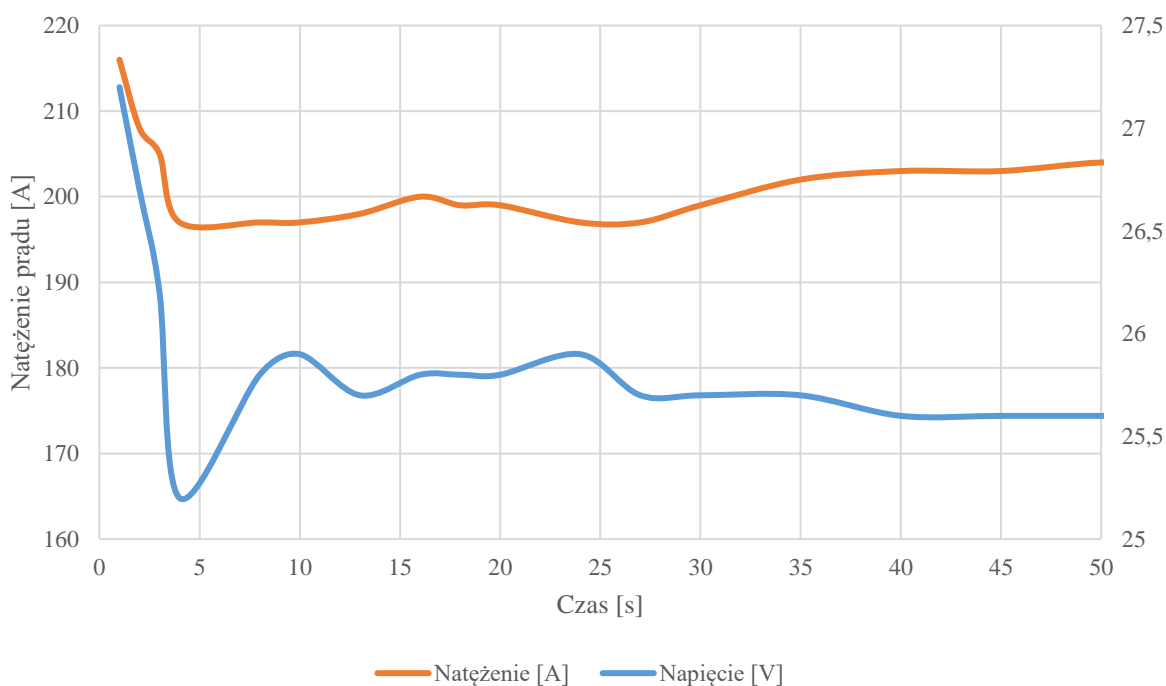
Punkt planu badawczego	Natężenie prądu ustawione	Średnie natężenie prądu	Napięcie ustawione	Średnie napięcie	Prędkość podawania drutu	Prędkość spawania	Współczynnik mocy łuku pulsującego	Średnia obliczona energia liniowa
	A	A	V	V	m/min	m/min	-	kJ/mm
P1	125	115,2	19,5	20,6	3,25	0,22	1,297	0,839
P2	186	172,6	22,2	22,5	5,50	0,33	1,217	0,859
P3	218	201,1	24,1	25,8	6,80	0,44	1,188	0,841
P4	125	110,3	19,5	21,3	3,25	0,22	1,306	0,837
P5	125	108,1	19,5	21,5	3,25	0,22	1,310	0,830
P6	125	105,3	19,5	21,7	3,25	0,22	1,316	0,820
P7	125	103,2	19,5	22,5	3,25	0,22	1,320	0,836
P8	125	114,6	19,5	20,7	3,25	0,23	1,298	0,840
P9	125	114,8	19,5	20,7	3,25	0,23	1,298	0,841



Rys. 29. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P1 planu badawczego

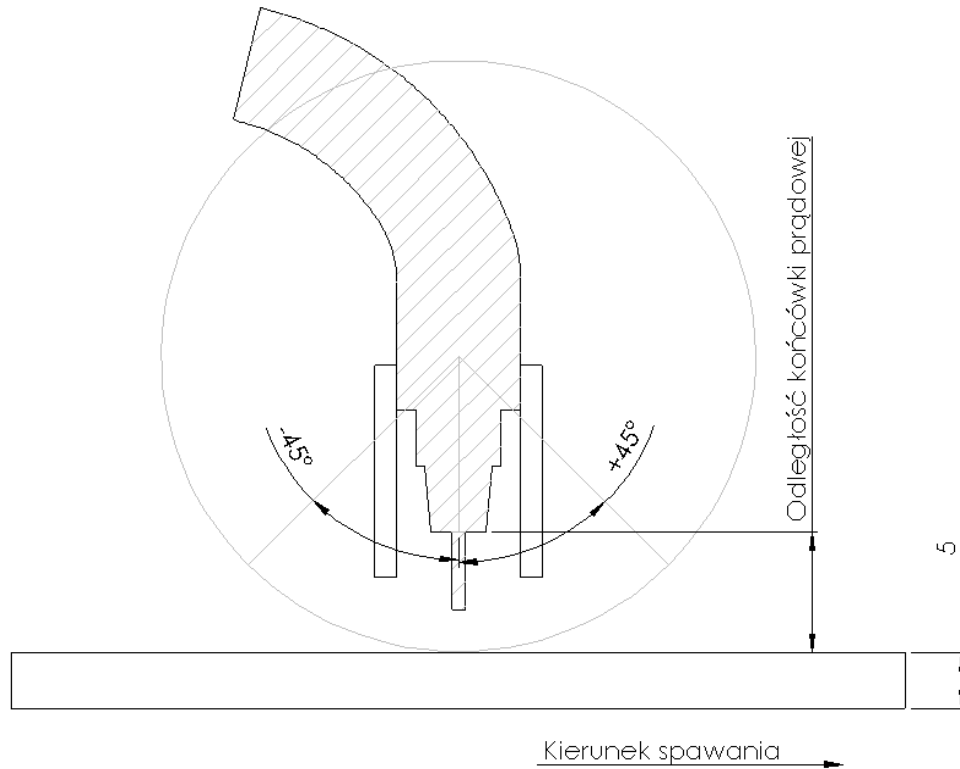


Rys. 30. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P2 planu badawczego



Rys. 31. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P3 planu badawczego

W tabeli 21 przedstawiono plan badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii złącza na odchyłkę płaskości powierzchni. Na rysunku 32 przedstawiono orientację uchwytu w stosunku do powierzchni próbki oraz sposób pomiaru odległości końcówki prądowej od powierzchni blachy.



Rys. 32. Orientacja uchwyty względem kierunku spawania oraz sposób pomiaru odległości końcówki prądowej

Tab. 21. Plan badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii złącza na odchyłkę płaskości powierzchni

Oznaczenie czynnika	Parametry prądowe	Pochylenie uchwyty	Odległość końcówki prądowej od powierzchni blachy	Oscylacja uchwyty	Geometria rowka spawalniczego
	Tabela 15	°	mm	mm	Tabela 14
PW	P1	0	10	0	Go1
A1	P2	0	10	0	Go1
A2	P3	0	10	0	Go1
B1	P4	+45	10	0	Go1
B2	P5	-45	10	0	Go1
C1	P6	0	15	0	Go1
C2	P7	0	20	0	Go1
D1	P8	0	10	0,5	Go1
D2	P9	0	10	1	Go1
E1	P1	0	10	0	Go6
E2	P1	0	10	0	Go7
F1	P1	0	10	0	Go2
F2	P1	0	10	0	Go3
G1	P1	0	10	0	Go4
G2	P1	0	10	0	Go5

Przed procesem akwizycji danych próbki poddano badaniom wizualnym, zgodnie z normą PN-EN ISO 5817:2014. Wyniki tych badań, umieszczono w tabeli 22. Należy nadmienić, że dla wszystkich próbek, poza próbkami D1 i D2, osiągnięto poziom jakości B.

Próbki D1 oraz D2 charakteryzowały się niekompletnym wypełnieniem lica (511). Niezgodność oceniono, jako krótką mieszczącą się w zakresie poziomu jakości C.

Tab. 22. Wyniki badań wizualnych próbek dla rozważanej fazy eksperymentu

Oznaczenie czynnika	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Uwagi
PW	B	B	B	
A1	B	B	B	
A2	B	B	B	
B1	B	B	B	
B2	B	B	B	
C1	B	B	B	
C2	B	B	B	
D1	C	C	C	511
D2	C	C	C	511
E1	B	B	B	
E2	B	B	B	
F1	B	B	B	
F2	B	B	B	
G1	B	B	B	
G2	B	B	B	

Do akwizycji danych, wykorzystano skaner światła niebieskiego GOM Atos 5M szerzej przedstawiony w rozdziale 4.3.2. Spoiny zmatowiono cienką warstwą wywoływacza stosowanego podczas badań penetracyjnych, po czym próbki oklejono znacznikami, a następnie przeprowadzono proces skanowania.

4.6.3. Wyniki pomiarów wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni

Próbki poddano obróbce w programie GOM Inspect Suite 2020, z minimalną dokładnością dopasowania modelu do chmury punktów na poziomie 0,2 mm. Ze stworzonej siatki 120 punktów pomiarowych dokonano akwizycji odchyłek płaskości powierzchni zgodnie z normą PN-EN ISO 13920:2000. W tabeli 23 przedstawiono wyniki analizy wpływu parametrów spawania oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni.

Tab. 23. Wyniki pomiarów odchyłki płaskości powierzchni danego punktu planu badawczego

Oznaczenie czynnika	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	B_6^+	B_6^-	Uwagi
	mm	mm	mm			
PW	1,86	2,13	2,40	0,50	-0,50	
A1	2,47	3,07	3,37	0,33	-0,67	
A2	1,56	1,87	2,29	0,58	-0,42	
B1	2,26	2,47	2,68	0,50	-0,50	
B2	0,49	0,89	1,24	0,47	-0,53	Zmiana zwrotu odkształceń
C1	2,87	3,27	3,66	0,49	-0,51	
C2	3,05	3,37	3,68	0,49	-0,51	
D1	0,52	1,06	1,70	0,54	-0,46	
D2	0,5	1,18	1,39	0,24	-0,76	
E1	1,73	3,21	3,50	0,16	-0,84	
E2	1,64	2,15	3,50	0,73	-0,27	
F1	2,43	2,56	2,78	0,63	-0,37	
F2	1,45	2,22	3,70	0,66	-0,34	Zmiana zwrotu odkształceń
G1	1,72	2,16	2,74	0,57	-0,43	
G2	1,18	2,46	3,54	0,46	-0,54	Zmiana zwrotu odkształceń

Wartość krytyczna statystyki b_6^+ odczytana z tablic statystycznych[Kukiełka2002], na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz dla liczby powtórzeń 3 wynosi $b_6^+ = 0,941$. Spełniono warunek $B_6^+ \leq b_{6(0,05;3)}^+$ oraz $B_6^- \geq b_{6(0,05;3)}^-$, zatem nie ma podstawy do odrzucenia maksymalnego oraz minimalnego wyniku odchyłki płaskości powierzchni wszystkich punktów planu badawczego.

W tabeli 24 przedstawiono wyniki obliczeń parametrów rozkładu logarytmo-normalnego danego punktu planu badawczego, a kolejno w tabeli 25 przedstawiono udział procentowy odchyłek płaskości powierzchni danego punktu planu badawczego wszystkich klas dokładności wg normy PN-EN ISO 13920:2000.

Tab. 24. Wyniki obliczeń parametrów rozkładu logarytmo-normalnego odchyłki płaskości danego punktu planu badawczego wyniki w mm

Oznaczenie czynnika	Średnia logarytmu	Średnia geometryczna	Odchylenie standardowe logarytmu	v_{3d}	v_{2d}	v_d	v_g	v_{2g}	v_{3g}
	μ_{lnx}	g	σ_{lnx}	mm	mm	mm	mm	mm	mm
PW	0,75	2,12	0,104	1,55	1,72	1,91	2,35	2,61	2,90
A1	1,08	2,95	0,130	1,99	2,27	2,59	3,35	3,82	4,35
A2	0,63	1,88	0,157	1,18	1,38	1,61	2,20	2,58	3,01
B1	0,90	2,46	0,070	2,00	2,14	2,30	2,64	2,83	3,04
B2	-0,20	0,81	0,384	0,26	0,38	0,55	1,20	1,76	2,58
C1	1,18	3,25	0,099	2,41	2,66	2,94	3,59	3,97	4,38
C2	1,21	3,36	0,077	2,67	2,88	3,11	3,62	3,91	4,23
D1	-0,02	0,98	0,487	0,23	0,37	0,60	1,59	2,59	4,22
D2	-0,07	0,94	0,448	0,24	0,38	0,60	1,47	2,29	3,59
E1	0,99	2,69	0,314	1,05	1,44	1,96	3,68	5,04	6,89
E2	0,84	2,31	0,314	0,90	1,23	1,69	3,16	4,33	5,92
F1	0,95	2,59	0,055	2,19	2,31	2,45	2,73	2,89	3,05
F2	0,83	2,28	0,383	0,72	1,06	1,56	3,35	4,91	7,20
G1	0,77	2,17	0,190	1,23	1,48	1,79	2,62	3,17	3,83
G2	0,78	2,17	0,457	0,55	0,87	1,38	3,43	5,42	8,56

Tab. 25. Szacowane na podstawie próbek prawdopodobieństwo spełnienia wymagań dla danej klasy dokładności wg normy PN-EN ISO 13920:2000

Oznaczenie czynnika	Klasa dokładności E	Klasa dokładności F	Klasa dokładności G	Klasa dokładności H
	1 mm	1,5 mm	3 mm	5 mm
PW	0%	0%	100%	100%
A1	0%	0%	56%	100%
A2	0%	7%	100%	100%
B1	0%	0%	100%	100%
B2	70%	94%	100%	100%
C1	0%	0%	21%	100%
C2	0%	0%	7%	100%
D1	52%	81%	99%	100%
D2	56%	85%	100%	100%
E1	0%	3%	64%	98%
E2	0%	8%	80%	99%
F1	0%	0%	100%	100%
F2	2%	14%	76%	98%
G1	0%	3%	96%	100%
G2	4%	21%	76%	97%

W celu określenia istotności wpływu zmian danego parametru planu eksperymentu stworzono współczynnik WPW, który określa jaki udział procentowy wyników ma wartość niższą lub równą niż dolna granica rozproszenia punktu wyjściowego oraz WNW, który określa jaki udział procentowy wyników posiada wartość wyższą lub równą niż górna granica rozproszenia punktu wyjściowego. Określenie wpływu zmiany danego parametru na odchyłkę płaskości dokonano na podstawie wartości średniej oraz odchylenia standardowego logarytmu danego punktu pomiarowego, wartości v_{3d} oraz v_{3g} parametrów wyjściowych. Zapis współczynników WPW i WNW przedstawiono poniżej:

$$WPW = GP(PW_{v_{3d}}, g_i, \sigma_{\ln x i}) \quad (4.22)$$

$$WNW = GP(PW_{v_{3g}}, g_i, \sigma_{\ln x i}) - 1 \quad (4.22)$$

Gdzie:

WPW – współczynnik pozytywnego wpływu,

WNW – współczynnik negatywnego wpływu,

GP – funkcja gęstości rozkładu logarytmo-normalnego,

$PW_{v_{3d}}$ – dolna wartość rozproszenia punktu wyjściowego,

$PW_{v_{3g}}$ – górna wartość rozproszenia punktu wyjściowego,

g_i – wartość średniej geometrycznej danego punktu planu badań,

$\sigma_{\ln x i}$ – wartość odchylenia standardowego logarytmu danego punktu planu badań.

Obliczoną wartość współczynników WPW i WNW przedstawiono na rysunku 35 i 38.

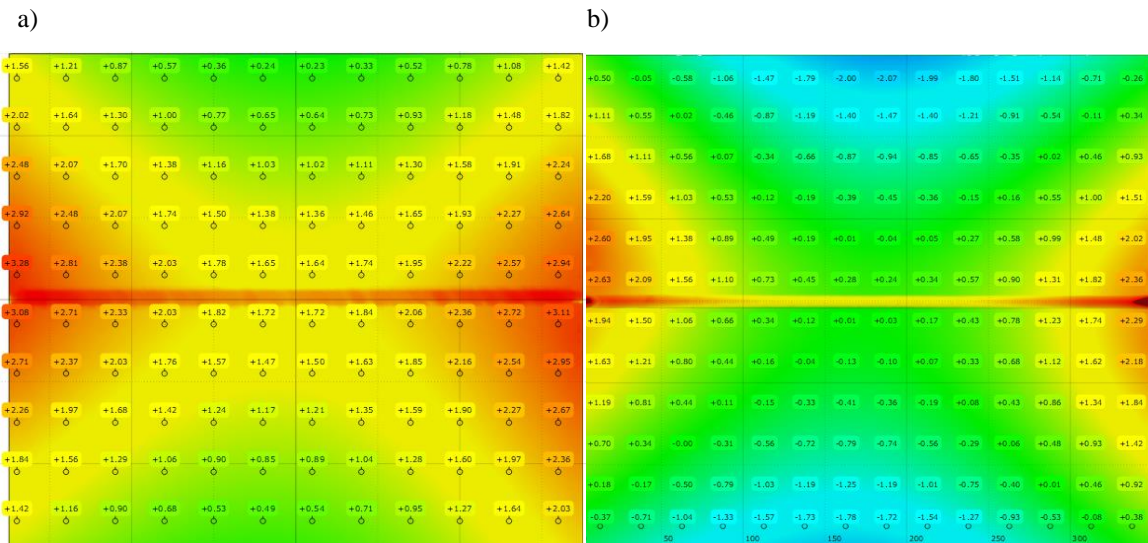
4.6.4. Analiza wyników wpływu parametrów technologicznych MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości

Parametry procesu spawania oraz geometria rowka spawalniczego dla punktu C2, oraz podczas badania wpływu kierunku walcowania były takie same, jednakże otrzymana średnia geometryczna odchyłki płaskości punktu C2, jest niższa o 42% od wartości średniej geometrycznej, otrzymanej przy analizie wpływu kierunku walcowania na tę wielkość. Rozbieżność ta wynika bowiem z różnicy własności wytrzymałościowych wynoszącej 13% oraz wydłużenia A5 wynoszącego blisko 9% dla danej dostawy materiału podstawowego. W tabeli 26 przedstawiono zestawienie wartości średniej geometrycznej, odchylenia standardowego logarytmu oraz własności wytrzymałościowych i wydłużenia A5 na podstawie certyfikatu materiałowego 3.1. Warto podkreślić, że uzyskano zbliżoną wartość odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości, co świadczy o braku wpływu dodatkowych czynników zakłócających.

Tab. 26. Zestawienie wartości średniej geometrycznej, odchylenia standardowego logarytmu oraz własności wytrzymałościowych i wydłużenia A5 na podstawie certyfikatu materiałowego 3.1

Pochodzenie próbek	Średnia geometryczna	Odchylenie standardowe logarytmu	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie
			R _{p0,2}	R _m	A5
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Wpływ kierunku walcowania	4,79	0,1	276	655	58
Wpływ parametrów technologicznych spawania (C2)	3,37	0,077	317	645	53

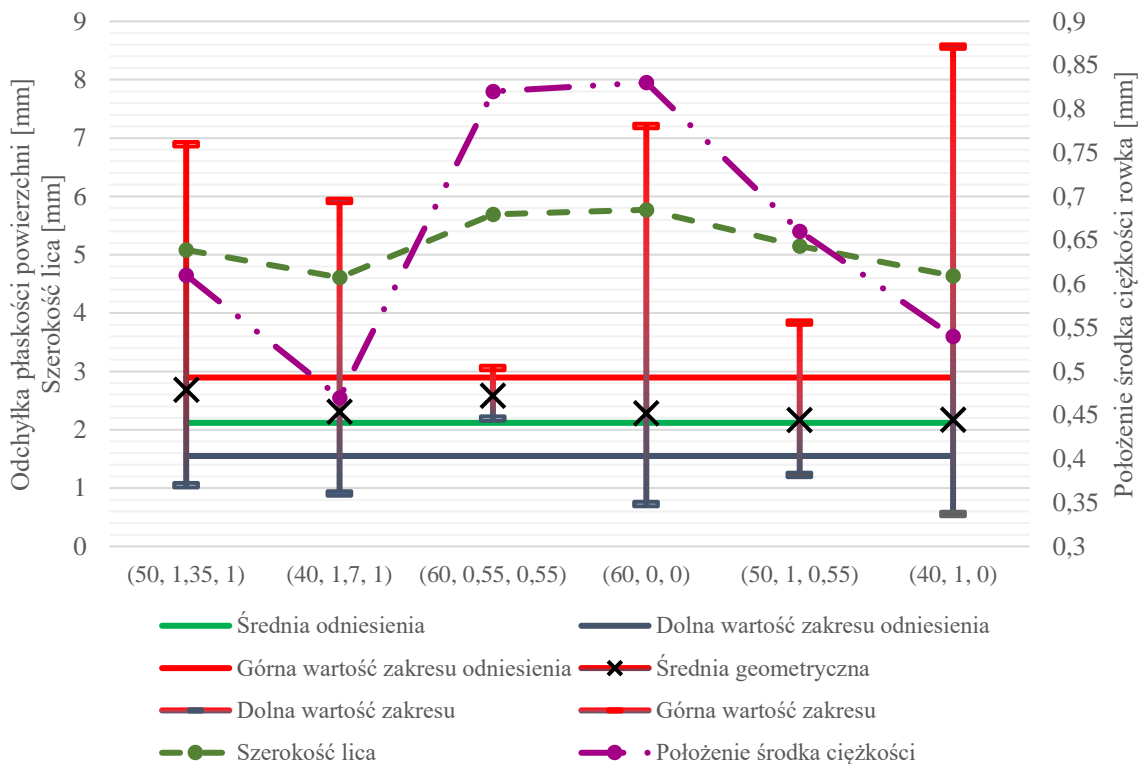
Na podstawie analizy porównawczej własności wytrzymałościowych próby rozciągania oraz wartości wydłużenia A5 danej dostawy materiału podstawowego można stwierdzić, że im niższa wartość granicy plastyczności R_{p0,2} oraz im wyższa wartość wydłużenia A5 danej dostawy materiału podstawowego, tym wyższa różnica poziomu odchyłki płaskości powierzchni. Poziom odchyłki płaskości powierzchni próbek poddanych badaniu był różny, jednakże kształt rozkładu wartości odchyłki dla poszczególnych punktów pomiarowych, był zbliżony dla wszystkich próbek analizowanych w niniejszym badaniu. Na rysunku 33, przedstawiono porównanie wyników skanowania dla punktu C2 planu badawczego oraz wyniku pochodzącego z analizy wpływu kierunku walcowania. Dokonując analizy obu map odchyłek płaskości, zaobserwować można charakterystyczny rozkład odchyłek w kształcie litery X. Maksymalne wartości odchyłki zlokalizowane są w pobliżu osi spoiny, natomiast minimalne wartości odchyłki zlokalizowane są na zewnętrznej krawędzi próbki w okolicach środka jej długości.



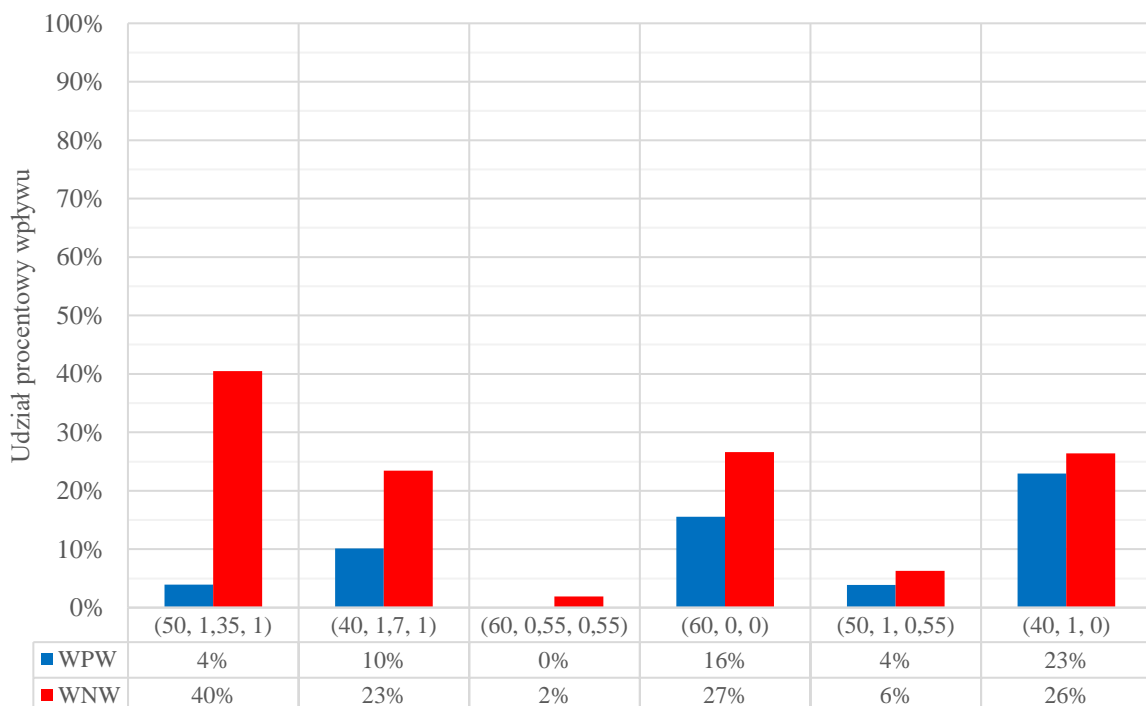
Rys. 33. Mapy odchyłek płaskości powierzchni: punkt C2 planu badawczego (a), próbka 3 prostopadłego kierunku walcowania (b)

Zmiana poziomu odchyłki płaskości powierzchni oraz kierunku powstających odkształceń próbek pochodzących z różnych dostaw materiału podstawowego sugeruje, że oprócz wpływu parametrów procesu spawania i geometrii rowka spawalniczego, istotny wpływ mają operacje kształtowania materiału oraz obróbki cieplnej. Operacje technologiczne tj. prostowanie mechaniczne z wykorzystaniem walcarek prostujących, odprężanie wibracyjne lub stabilizacja w ciekłym azocie, mogą okazać się pomocne w prewencji powstających odkształceń spawalniczych.

Wyniki pomiarów wpływu geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości wyznaczoną na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000 wykazały, że przy zachowaniu określonej powierzchni przekroju poprzecznego rowka spawalniczego poziom średniej geometrycznej oraz odchylenia standardowego odchyłki płaskości powierzchni, jest różny dla wszystkich rozpatrywanych kombinacji parametrów geometrycznych rowka spawalniczego. Na rysunku 34 przedstawiono porównanie wyników średniej geometrycznej oraz v_{d3} i v_{g3} , szerokości lica i położenia środka ciężkości spoiny danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1). Na rysunku 35 przedstawiono porównanie wpływu pozytywnego oraz negatywnego danej konfiguracji rowka spawalniczego w porównaniu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1).

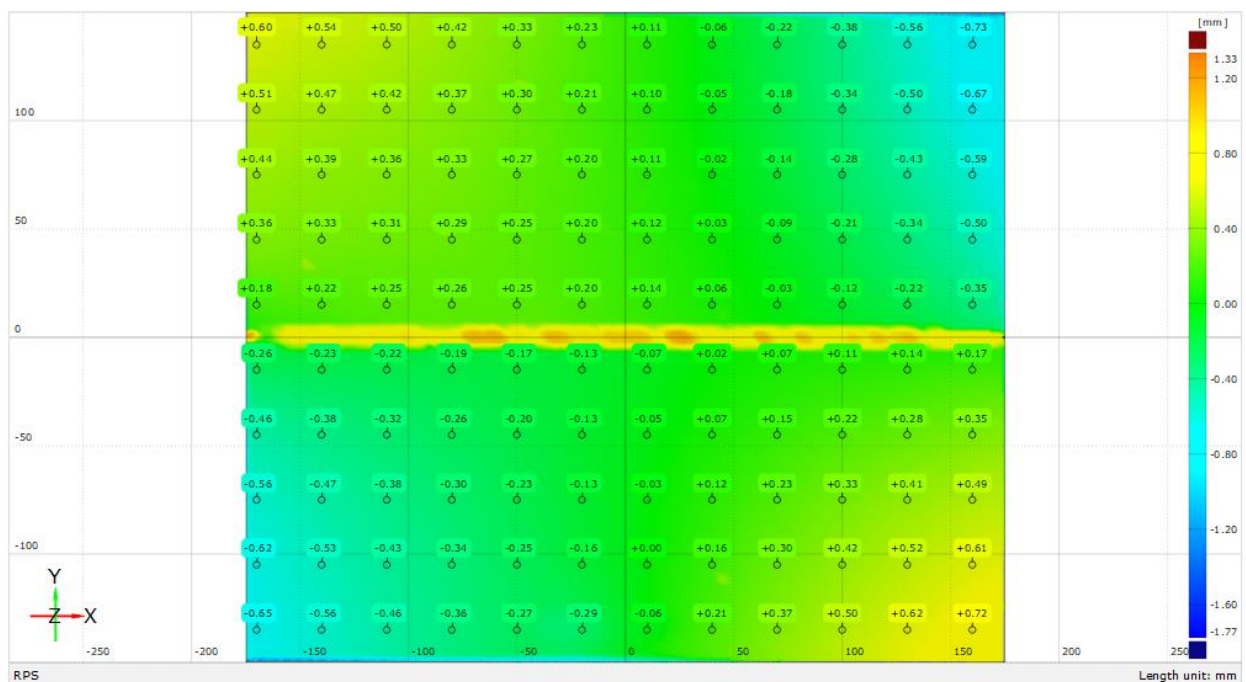


Rys. 34. Porównanie wyników średniej geometrycznej oraz v_{d3} i v_{g3} odchyłki płaskości, szerokości lica i położenia środka ciężkości spiny danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1)



Rys. 35. Porównanie współczynników wpływu pozytywnego(WPW) oraz negatywnego(WNW) danej konfiguracji rowka spawalniczego w porównaniu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1)

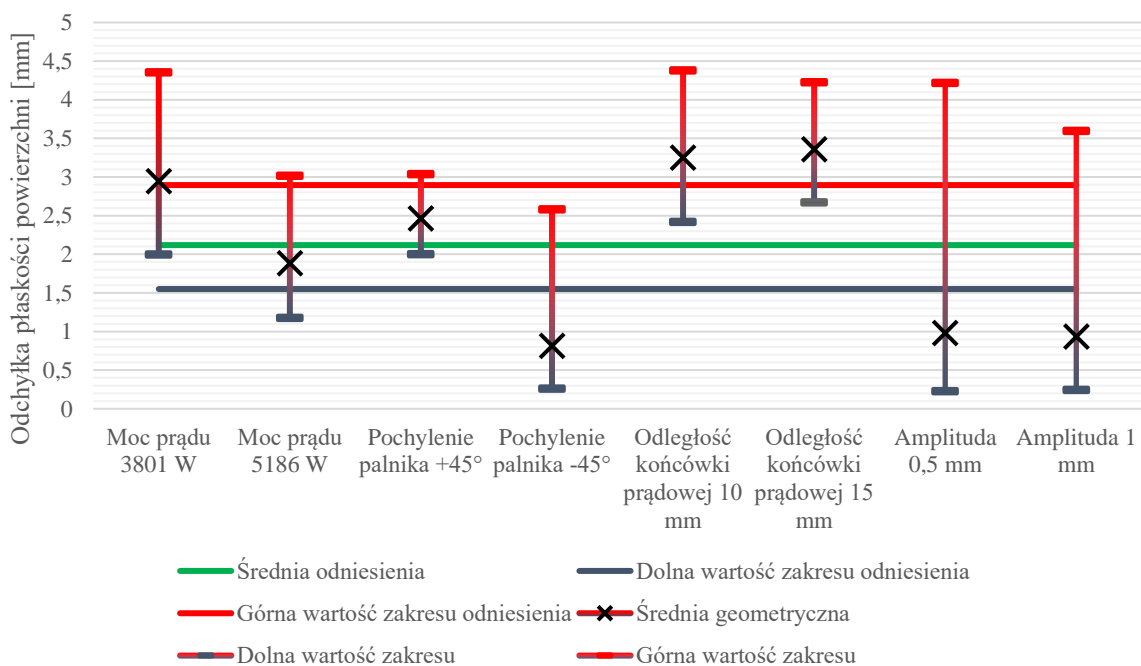
Dokonując analizy danych wykresów, zauważa się, że największa różnica wartości średniej, wynosząca 23%, wystąpiła dla punktu E1(50,1,35,1) planu badawczego. Wyraźne przesunięcie średniej geometrycznej spowodowało, że 40% wyników odchyłki płaskości jest większa od górnej wartości odchyłki płaskości parametrów wyjściowych. Uzyskane wyniki odchyłki płaskości punktu F2(60,0,0) i E2(40,1,7,1), nie potwierdzają opisanego w literaturze wpływu położenia środka ciężkości przekroju poprzecznego spoiny na wielkość powstających odkształceń spawalniczych. Punkt F2(60,0,0) planu badawczego, charakteryzował się największym odsunięciem środka ciężkości rowka względem powierzchni próbki, natomiast E2(40,1,7,1) najmniejszym. Różnica średnich dla punktu F2(60,0,0) i E2(40,1,7,1), wynosiła poniżej 2%. Świadczy to o tym, że odchyłka położenia środka ciężkości rowka, w przypadku złączy doczołowych ze spoiną czołową wykonanych jednym ścięciem, nie wpływa istotnie na odchyłkę płaskości powierzchni po spawaniu. Warto podkreślić, że zmiany parametrów geometrycznych rowka, spowodowały znaczącą zmianę odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni. Świadczy to o występowaniu dodatkowych czynników wpływających na odchyłkę płaskości powierzchni, które pojawiają się wyłącznie przy zmianie kąta ukosowania oraz odstępów między łączonymi blachami. Dla punktów pomiarowych F2(60,0,0) i G2(50,1,0,55), uzyskano zmianę kierunku oraz postaci odkształceń spawalniczych. Na rysunku 36, przedstawiono wynik skanowania próbki 1 punktu F2(60,0,0) planu badawczego.



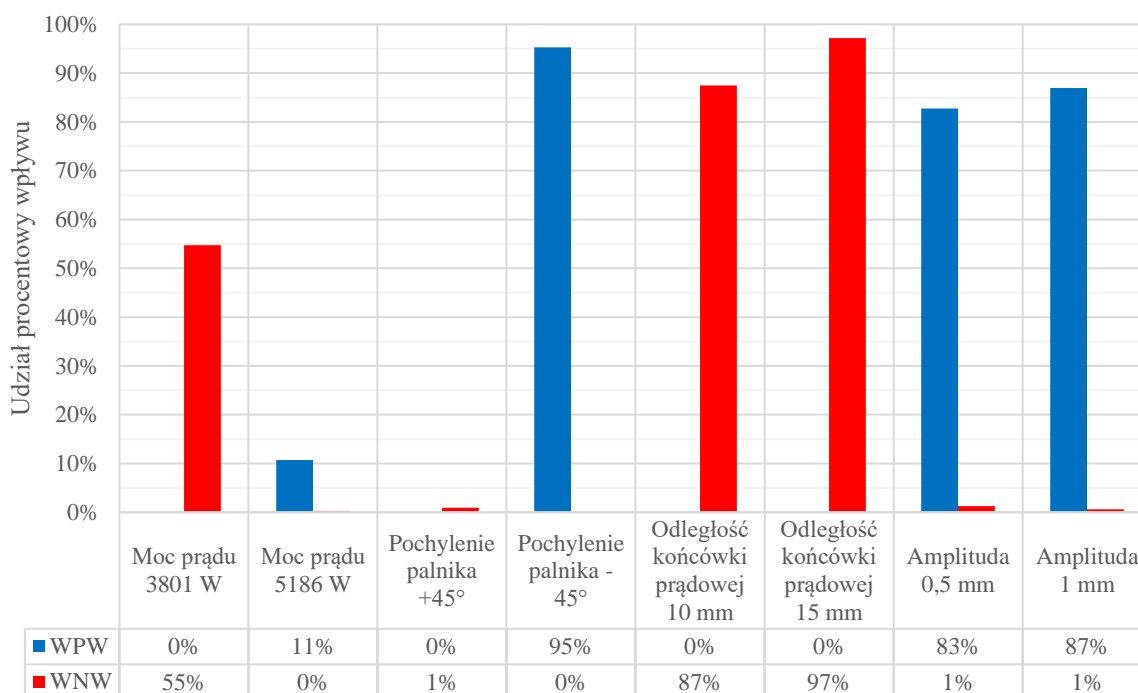
Rys. 36. Mapa odchyłek płaskości punktu F2 próbka 1

Wyniki skanowania próbek planu punktu F2(60,0,0) i G2(50,1,0,55), wskazują na wyraźne skrzywienie próbki. Świadczy to o powstaniu momentu skręcającego, powodującego zakleszczanie się rowka spawalniczego podczas spawania. Rowek dla punktu badawczego F2(60,0,0), charakteryzował się brakiem odstępu między łączonymi blachami, natomiast geometria rowka G2(50,1,0,55), posiadała drugie najwęższe lico spośród analizowanych kombinacji parametrów rowków spawalniczych. Przeprowadzona analiza wpływu parametrów geometrycznych rowka nie jest rozstrzygająca, ponieważ jak wykazano, pewne kombinacje parametrów mimo zapewnienia wąskiej tolerancji odchyłki przekroju poprzecznego rowka spawalniczego, powodują znaczącą zmianę mechanizmu powstawania odkształceń spawalniczych. Na podstawie porównania wyników współczynników wpływu z rysunku 35 oraz szerokości lica z rysunku 34 przebadanych konfiguracji rowka spawalniczego stwierdzono, że aby minimalizować odchyłkę płaskości po procesie spawania metodą MIG/MAG należy stosować rowki spawalnicze, których szerokość rozwarcia jest większa niż grubość łączonych blach, natomiast odstęp między łączonymi elementami jest większa niż 20% grubości łączonych blach.

Analiza wpływu zmiany mocy prądu przy zachowaniu stałego poziomu energii liniowej na odchyłkę płaskości powierzchni wykazała, że mimo zachowania wąskiej tolerancji odchyłki średniej energii liniowej, otrzymano wyraźne różnice średniej geometrycznej oraz rozproszenia V_{3d} oraz V_{3g} .



Rys. 37. Porównanie wyników średniej geometrycznej oraz v_{d3} i v_{g3} odchyłki płaskości danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(2373,0,5,0)



Rys. 38. Porównanie współczynników wpływu pozytywnego (WPW) oraz wpływu negatywnego (WNW) danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(2373,0,5,0)

Analizując rysunek 37 i 38 zauważa się, że dla mocy 5186W, otrzymano pozytywny wpływ na poziom średniej wartości odchyłki płaskości powierzchni. Warto podkreślić, że dla mocy prądu 3801W otrzymano odchyłkę płaskości o blisko 36% wyższą, niż najniższa odnotowana wartość średniej geometrycznej dla mocy prądu 5186W. Wyraźne przesunięcie średniej wartości dla mocy prądu 3801W skutkuje tym, że 55% wyników jest wyższa w porównaniu do parametrów wyjściowych. Może to świadczyć o wpływie dodatkowego czynnika na poziom odchyłki płaskości powierzchni. Największy jego wpływ pojawia się przy mocy prądu 3801W. Czynniki, które mogą oddziaływać w ten sposób, są m.in. tarcie drutu spawalniczego o spiralę w podajniku drutu elektrodowego, moc prądu na poziomie 3801W. Przy braku pulsacji łuku elektrycznego dla pewnego zakresu parametrów, zaobserwować można zmianę sposobu przejścia kropli ciekłego metalu do jeziora spawalniczego. Poziom mocy prądu 3801W mieścił się w zakresie występowania łuku globularnego, który charakteryzuje się niestabilnym oraz burzliwym przejściem kropli ciekłego metalu do jeziora spawalniczego. Dodatkowo opór wywołany wzrostem tarcia drutu elektrodowego o spiralę w podajniku przyczynia się do zachwiania stabilności jarzenia się łuku. Dokładne ustalenie przyczyny wzrostu odchyłki płaskości powierzchni dla mocy 3801W wymaga dodatkowych badań z wykorzystaniem kamery szybkoobrotowej, która m.in. umożliwi porównanie szerokości podstawy stożka łuku spawalniczego oraz wielkości kropli ciekłego metalu przechodzącego do jeziora spawalniczego. Zachowanie stałej energii liniowej

procesu spawania poza punktem krytycznym 3801W, nie wpływa negatywnie na odchyłkę płaskości w stosunku parametrów wyjściowych. Różnica średniej geometrycznej oraz rozproszenia może być wynikiem niskiej liczby powtórzeń eksperymentu.

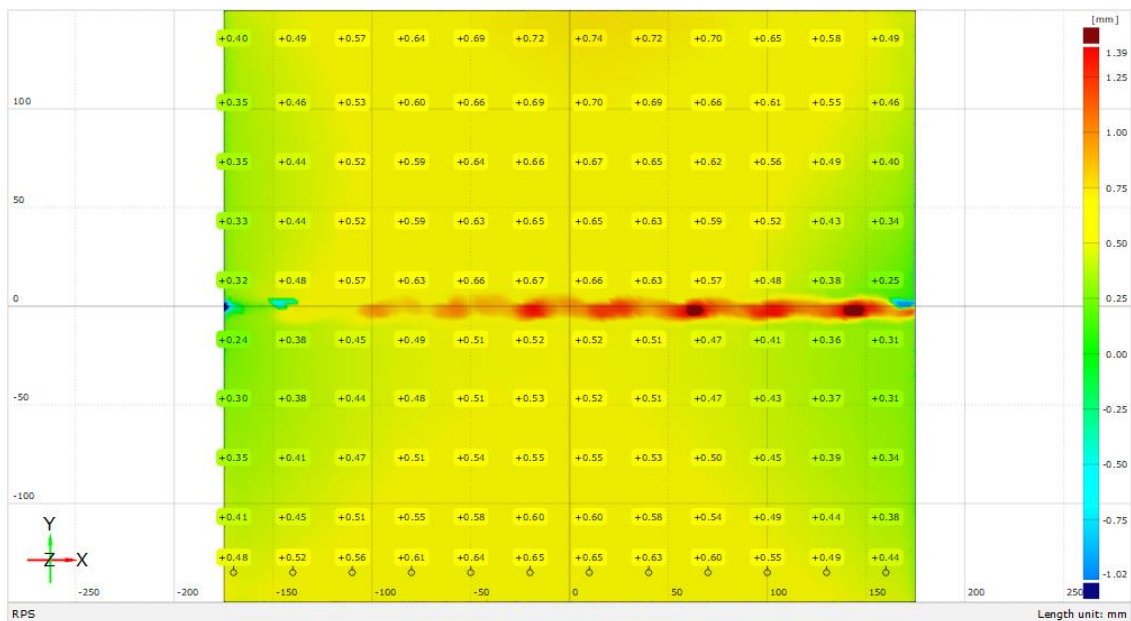
Analiza wpływu kąta pochylenia uchwytu do powierzchni próbki na wielkość odchyłki płaskości powierzchni wykazała jego istotny wpływ na zmiany odchyłki płaskości powierzchni. Dla uchwytu usytuowanego pod kątem -45° względem kierunku spawania, w taki sposób, żeby jeziorko spawalnicze było „ciągnięte”, uzyskano najmniejszą średnią geometryczną odchyłki płaskości spośród analizowanych parametrów procesu MIG/MAG. Uzyskana odchyłka płaskości była bowiem mniejsza o 66% w stosunku do odchyłki przy uchwycie usytuowanym pod kątem $+45^\circ$ (technika spawania jeziorka „pchanego”) do kierunku spawania. Wyraźne przesunięcie średniej geometrycznej odchyłki płaskości w porównaniu do parametrów wyjściowych spowodowała, że 95% elementów spawanych stosując technikę spawania tak, aby jeziorko było „ciągnięte” będzie charakteryzować się mniejszą odchyłką płaskości niż dolna wartość rozproszenia parametrów wyjściowych. Dokonując porównania wpływu zmiany pochylenia uchwytu, stwierdzono brak istotnych różnic między orientacją uchwytu między 0° a $+45^\circ$ (technika spawania jeziorka „pchanego”) w stosunku do kierunku spawania.

Należy podkreślić, że przy usytuowaniu uchwytu pod kątem -45° względem kierunku spawania tak, aby jeziorko spawalnicze było „ciągnięte” uzyskano zmianę kierunku odkształceń spawalniczych. Zmiana kierunku odkształceń spawalniczych może być głównym powodem większego rozproszenia v_{3d} oraz v_{3g} , w porównaniu do pozostałych konfiguracji ustawienia uchwytu. Należy zwrócić uwagę, że zmiana kąta pochylenia uchwytu, wymaga korekcy odległości końcówki prądowej, ponieważ sama zmiana pochylenia uchwytu bez korekcy odległości końcówki prądowej, może spowodować wzrost odchyłek płaskości powierzchni. Przypuszcza się, że zmniejszenie odchyłki płaskości powierzchni dla uchwytu usytuowanego tak, aby jeziorko było „ciągnięte”, może być spowodowane sprzyjającymi warunkami procesu spawania, ponieważ energia cieplna pochodząca ze zjonizowanego gazu osłonowego, skierowana jest na krawędzie łączonych materiałów. Należy podkreślić, że usytuowanie uchwytu pod kątem -45° względem kierunku spawania (technika spawania jeziorkiem „ciągniętym”) umożliwi spełnienie wymagań klasy dokładności F wg normy PN-EN ISO 13920:2000 z prawdopodobieństwem 94%.

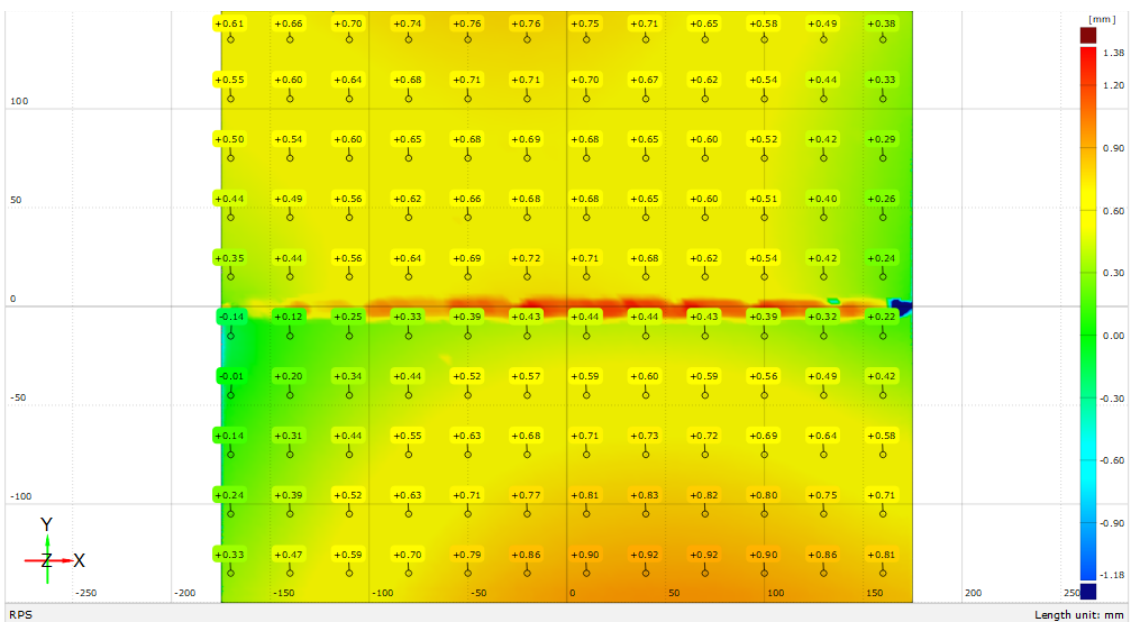
Analiza wpływu odległości końcówki prądowej od powierzchni próbki na odchyłkę płaskości spawanych elementów wykazała, że wraz ze wzrostem odległości końcówki prądowej od powierzchni, wzrasta poziom średniej geometrycznej odchyłki płaskości

powierzchni. Na rysunku 37 widoczne jest wyraźne przesunięcie średniej odchyłki płaskości w stosunku do średniej parametrów wyjściowych. Zmiana odległości końcówki prądowej spowodowała uzyskanie wpływu negatywnego na poziomie 87% przy odległości końcówki prądowej 10 mm i 95% przy odległości końcówki prądowej 15 mm, w stosunku do wyjściowych 5 mm. Należy zauważyć, że zbyt mała odległość końcówki prądowej od powierzchni blachy, przyczynia się do zwiększenia częstotliwości czyszczenia łuski spawalniczej. W związku z tym należałoby przeprowadzić optymalizację odległości końcówki prądowej od powierzchni próbki, a jedno z kryteriów stanowiło toby częstotliwość przestojów potrzebnych na czyszczenie łuski. Wzrost średniej odchyłki płaskości powierzchni próbki, przy zwiększeniu odległości końcówki prądowej spowodowany jest większą szerokością łuku spawalniczego. Przyczyną rozszerzenia się łuku jest wzrost napięcia oraz spadek natężenia prądu przy zwiększaniu odległości końcówki prądowej od powierzchni próbki. Większa szerokość łuku spawalniczego przyczynia się do zwiększenia strefy wpływu ciepła, a tym samym do wzrostu odchyłki płaskości powierzchni.

Dokonując analizy wpływu oscylacji uchwytu na płaskość próbek, zauważono istotność wpływu tego parametru na średnią odchyłkę płaskości powierzchni. Oba analizowane poziomy amplitudy, charakteryzowały się blisko o 53% mniejszym poziomem średniej geometrycznej odchyłki płaskości powierzchni w stosunku do średniej geometrycznej próbek wykonanych bez oscylacji. Stosując oscylacje, uzyskano istotny wpływ pozytywny, w którym 83% dla oscylacji 0,5 mm i 87% dla oscylacji 1 mm wyników będzie niższa niż dolna granica odchyłki płaskości powierzchni punktu wyjściowego bez oscylacji. Trzeba mieć na uwadze fakt, że wyższa wartość odchylenia standardowego logarytmu, wynika ze zmiany mechanizmu odkształcania się próbek spawalniczych. Spawanie z oscylacją spowodowało, że największe wartości odchyłki płaskości rozłokowane były na zewnętrznych krawędziach w okolicach środka próbki. Na rysunkach 39 i 40, przedstawiono przykładową mapę odchyłek płaskości powierzchni, uzyskaną z wykorzystaniem metody skanowania.. Kształt rozkładu odchyłki płaskości był inny niż w przypadku standardowego rozkładu w kształt litery X przedstawionego na rysunku 33.



Rys. 39. Mapa odchyłek płaskości powierzchni punktu D2 próbka 1



Rys. 40. Mapa odchyłek płaskości powierzchni punktu D1 próbka 2

Zmniejszenie poziomu średniej odchyłki płaskości powierzchni mogło być spowodowane zmianą rozkładu ciepła wzdłuż osi spoiny. Przeprowadzone badanie wizualne wykazało niższy poziom jakości dla spoin wykonanych z oscylacją uchwytu. Zaobserwowane niezgodności spawalnicze, w postaci niekompletnego wypełnienia łożyska (511) wg PN-EN ISO 5817:2014, rzutują bezpośrednio na możliwość zastosowania oscylacji (wychylania uchwytu w stosunku do osi rowka spawalniczego), jako parametru zmniejszającego odchyłkę płaskości blach. Niniejsze badanie potwierdza konieczność analizy złożonych ruchów uchwytu, jako jedną z metod minimalizacji odchyłki płaskości powierzchni.

4.6.5. Wnioski z analizy wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni

Na podstawie przeprowadzonych analiz wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości powierzchni, sformułowano następujące wnioski.

1. Istotne różnice poziomu odchyłki płaskości powierzchni po spawaniu dla poszczególnych dostaw materiału podstawowego, wynikają z różnic własności wytrzymałościowych oraz wydłużenia procentowego po zerwaniu.
2. Kryterium określonego pola przekroju poprzecznego rowka spawalniczego jest niewystarczające do eliminacji wpływu zmian kąta ukosowania, odstępów oraz wysokości progu. Świadczy o tym istotna różnica wartości współczynnika negatywnego/pozytywnego wpływu analizowanej konfiguracji rowka spawalniczego na odchyłki płaskości powierzchni.
3. Kryterium określonej energii liniowej procesu spawania jest niewystarczające do eliminacji wpływu zmian mocy prądu, kąta pochylenia palnika w stosunku do kierunku spawania, odległości końcówki prądowej od powierzchni blachy oraz amplitudy oscylacji uchwytu. Świadczy o tym istotna różnica wartości współczynnika negatywnego/pozytywnego wpływu analizowanego parametru orientacji i położenia uchwytu w trakcie spawania na odchyłki płaskości powierzchni.
4. Brak odstępów między spawanymi elementami oraz dobranie parametrów w taki sposób, aby szerokość rozwarcia rowka była mniejsza niż grubość łączonych elementów, wpływa na zwiększenie wartości odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni. Powodem tego jest zmiana mechanizmu powstawania odkształceń spawalniczych.
5. Pochylenie palnika przeciwnie względem kierunku spawania (technika spawania jeziorkiem "ciągniętym"), ma największy wpływ na zmniejszenie poziomu odchyłki płaskości powierzchni spośród analizowanych parametrów procesu MIG/MAG. Skierowanie uchwytu w taki sposób żeby jeziorko spawalnicze było „ciągnięte”, przyczynia się do polepszenia warunków stapiania brzegów łączonych blach.

5. WDROŻENIE WYNIKÓW ROZPRAWY W ZAKŁADZIE PRODUKCYJNYM TEPRO S.A.

Konstrukcje spawane różnią się względem siebie wymiarami gabarytowymi, poszczególnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi oraz zastosowanym materiałem. Na rysunku 41, przedstawiono przykłady konstrukcji spawanych produkowanych w firmie TEPRO S.A..



Rys. 41. Przykłady konstrukcji spawanych produkowanych w firmie TEPRO S.A.

Na szczególną uwagę, zasługują spawane komory próżniowe. Cechują się one wysokim stopniem trudności wykonania, ponieważ od procesu spawania oczekuje się połączeń, charakteryzujących się możliwie najmniejszym stopniem nieszczelności, przy jednoczesnym zachowaniu własności wytrzymałościowych oraz odporności korozyjnej (w przypadku stali nierdzewnych i kwasoodpornych). Dodatkowym elementem składającym się na trudność wykonania komór próżniowych jest konieczność uzyskania możliwie najmniejszych odkształceń spawalniczych, ze względu na narzucone naddatki na obróbkę skrawaniem. Na etapie wdrożenia dokumentacji a kolejno doboru naddatków na obróbkę skrawaniem, ogromną trudność stwarza przewidzenie poziomu odchyłki płaskości powierzchni po procesie spawania. Dzieje się to z powodu występowania znacznej liczby połączeń spawanych

oraz ich różnej konfiguracji. Jak powszechnie wiadomo zastosowanie zbyt dużych naddatków technologicznych, jest nieekonomiczne, a przedsiębiorstwo wówczas nie jest konkurencyjne na światowym rynku. Warto podkreślić, że bardzo często konstrukcje tego typu mają charakter produkcji jednostkowej. Opracowana metodyka oraz wiedza, nabyta w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej umożliwiły ich aplikacje na etapie opracowania dokumentacji technologicznej oraz produkcji spawanych komór próżniowych.

5.1. Aplikacja wyników rozprawy oraz analizy stanu wiedzy z materiałów źródłowych w zakładzie TEPRO S.A.

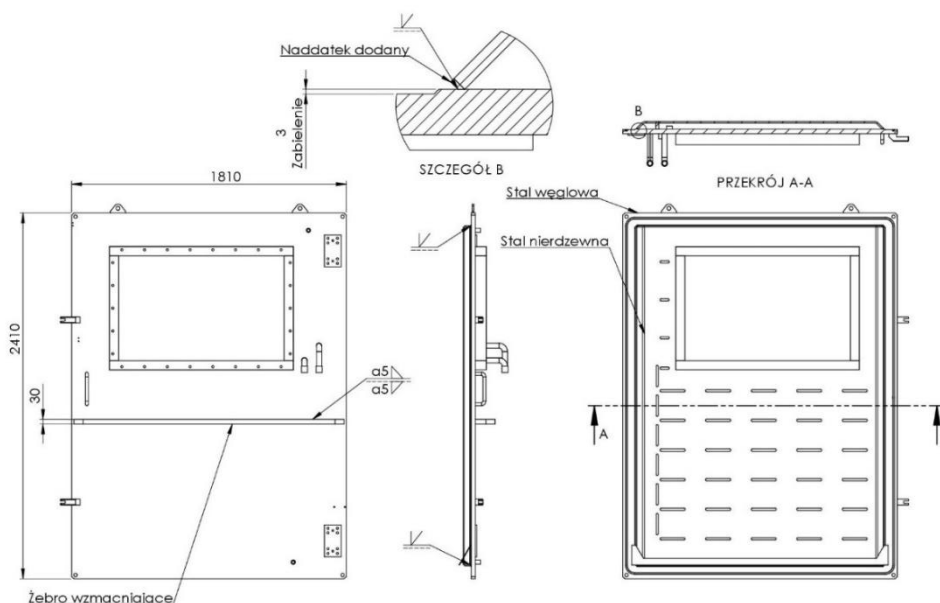
Wyniki badań oraz wiedzę z analizy literatury na etapie przygotowania dokumentacji technologicznej wykorzystano do szkolenia pracowników działu technologicznego. Szkolenie obejmowało sposób doboru parametrów geometrycznych rowka spawalniczego oraz konieczności stosowania materiałów normalizowanych po operacjach kształtowania. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy literatury stwierdzono, że parametry geometryczne rowka, na które szczególnie trzeba zwrócić uwagę to odległość między łączonymi elementami oraz szerokość rozwarcia rowka spawalniczego. Analiza literatury wskazała, że stosowanie przekroju możliwie najmniejszego, dostosowanego do metody spawania jest konieczne w celu minimalizacji odchyłki płaskości powierzchni. Podczas przeprowadzonego szkolenia poinstruowano pracowników działu technologii, które parametry geometrii rowka wpływają negatywnie pod względem wzrostu rozrzutu odchyłki płaskości powierzchni. Na podstawie przeprowadzonych badań, przedstawiono istotność stosowania materiałów normalizowanych oraz konieczność odprężania konstrukcji na poszczególnych etapach produkcyjnych.

Wykorzystanie wyników badań oraz analizy literatury na etapie produkcji obejmowało dwa etapy. Pierwszym etapem, było szkolenie spawaczy firmy TEPRO S.A. z zakresu technik manipulacyjnych uchwytem spawalniczym z uwzględnieniem ich indywidualnych predyspozycji. Spośród różnic umiejętności i predyspozycji między spawaczami firmy TEPRO S.A. wyróżnić można technikę spawania jeziorkiem „ciągniętym” lub „pchany” oraz prędkość spawania i związaną z tym energią liniową procesu. Uwzględniając wyniki badań rozprawy, poinstruowano pracowników w jaki sposób technika spawania wpływa na odkształcenia spawalnicze oraz na które elementy techniki spawania należy zwrócić szczególną uwagę. Mając na uwadze występowanie zakresu parametrów prądowych, przy których następuje wzrost odchyłki płaskości, w celu zachowania określonego poziomu energii liniowej parametry spawania należy dobrać w taki sposób, aby ominąć punkt krytyczny.

Dostosowano więc parametry spawania do preferowanych prędkości spawania poszczególnych spawaczy w taki sposób, aby restrykcje ilości wprowadzonego ciepła zostały zachowane. Drugim etapem wdrożenia wyników badań było podzielenie pracowników na stanowisku spawacza ze względu na technikę spawania. Spawaczy podzielono na grupy osób wykorzystujących technikę jeziorka „ciągniętego” oraz „pchanego”. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że technika spawania z jeziorkiem „ciągniętym”, efektywniej wpływa na zmniejszenie odchyłki płaskości powierzchni, dlatego też do konstrukcji szczególnie podatnych na odkształcenia spawalnicze przydzielono pracowników korzystających z techniki jeziorka „ciągniętego”.

5.2. Przykład zmian przebiegu technologii wykonania drzwi komory próżniowej na podstawie wyników rozprawy i analizy stanu wiedzy

Na podstawie drzwi komory próżniowej numer 11324393 zaprezentowane zostaną zmiany w technologii wykonania komór próżniowych produkowanych w firmie TEPRO S.A.. Przykładem będą drzwi komory, które składają się z płyty podstawy o wymiarach 1810 na 2410 mm, wykonanej ze stali węglowej S235 o grubości 30 mm. Drzwi komory próżniowej chłodzone są wymuszonym obiegiem wody od strony próżniowej. Powierzchnia chłodzona wodą przykryta jest blachą nierdzewną wykonaną ze stali 1.4301 o grubości 10 mm. Warto podkreślić, że od strony próżniowej, konstruktor przewidział naddatek na obróbkę skrawaniem wynoszący 3 mm. Na powierzchni frezowanej, przewidziane jest wykonanie rowka dla przewodu gumowego zapewniającego uszczelnienie. Na rysunku 42 przedstawiono uproszczony rysunek drzwi komory numer 11324393.



Rys. 42. Drzwi komory numer 11324393

Przebieg skrócony procesu spawania głównych pozycji przed dokonaniem zmian obejmował:

1. Spawanie płaskowników obiegu wody techniką jeziorka „pchanego”.
2. Prostowanie płomieniowe.
3. Zamknięcie obiegu wody płaszczem ze stali nierdzewnej techniką jeziorka „pchanego”.
4. Spawanie żebra wzmacniającego techniką jeziorka „pchanego”.
5. Prostowanie płomieniowe.

Zamknięcie obiegu wody płaszczem ze stali nierdzewnej wymagało wykonania dwóch ściegów spoiny czołowej, co wiązało się z powstawaniem nadmiernych odkształceń spawalniczych. Dodatkowo spawanie żebra wzmacniającego jako ostatni etap spawania, powodowało wprowadzenie odkształceń, których usunięcie za pomocą prostowania płomieniowego wymagało oddziaływania od strony płaszcza obiegu wody. Odchyłka płaskości przed prostowaniem płomieniowym kształtowała się na poziomie 17 mm. Po prostowaniu osiągnięto odchyłkę płaskości 8 mm. Warto podkreślić, że podczas obróbki skrawaniem, wymagało to usunięcia dodatkowych 5 mm naddatku.

Główne zmiany w technologii wykonania drzwi obejmowały zmianę personelu spawalniczego, kolejności spawania oraz pola przekroju poprzecznego spoiny zamykającej płaszcz wodny. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że spawanie techniką jeziorka „ciągniętego” skuteczniej wpływa na zmniejszenie odchyłki płaskości spawanych elementów. Do procesu spawania drzwi, przydzielono więc spawaczy stosujących technikę jeziorka „ciągniętego”. Zmianę pola przekroju spoin zamykających płaszcz wodny, dokonano za pomocą wydłużenia krawędzi płaszcza ze stali nierdzewnej po 3 mm na stronę. Powierzchnia przekroju rowka przed zmianą wynosiła 25 mm² oraz wymagała dwóch ściegów zamykających. Zaproponowane rozwiązanie umożliwiło uzyskanie rowka o powierzchni 12,25 mm². Wpłynęło to na zmniejszenie liczby ściegów zamykających do jednego ściegu. Dodatkowo zastosowano zmianę kąta rozwarcia rowka spoin czołowych z 45° na 38°. Zmiana kolejności spawania była konieczna, ponieważ prostowanie płomieniowe od strony płaszcza wodnego ze względu na puste przestrzenie nie jest skuteczne. Analiza porównawcza kształtów odchyłek płaskości powierzchni próbek niniejszej rozprawy wykazała, że aby umożliwić prostowanie płomieniowe od strony płyty ze stali węglowej, należało zebro wzmacniające spawać w pierwszej kolejności.

Przebieg procesu spawania głównych pozycji po dokonaniu zmian obejmował:

1. Spawanie żebra wzmacniającego techniką jeziorka „ciągniętego”.

-
2. Prostowanie płomieniowe.
 3. Spawanie płaskowników obiegu wody techniką jeziorka „ciągniętego”.
 4. Prostowanie płomieniowe.
 5. Zamknięcie obiegu wody płaszczem ze stali nierdzewnej techniką jeziorka „ciągniętego”.
 6. Prostowanie płomieniowe.

Zmiana kolejności spawania poszczególnych elementów a kolejno zmiana techniki spawania umożliwiła skierowanie odkształceń spawalniczych w taki sposób, aby proces prostowania przebiegał od strony płyty wykonanej ze stali węglowej. Zmiana powierzchni przekroju rowka i liczby ściegów zamykających obieg wody w połączeniu ze spawaniem techniką jeziorka „ciągniętego” spowodowała, że odchyłka płaskości powierzchni przed prostowaniem płomieniowym wynosiła 6 mm. Po procesie prostowania odchyłka płaskości powierzchni przed obróbką skrawaniem wynosiła 1,5 mm. Należy nadmienić, że mimo wydłużenia procesu spawania drzwi komory próżniowej o dodatkowy zabieg prostowania, koszty wykonania konstrukcji wliczając w to obróbkę mechaniczną, zmniejszyły się o 20%.

5.3. Wnioski

Wyniki badań rozprawy oraz analizy literatury wdrożone w firmie TEPRO S.A. umożliwiły:

1. Podniesienie kwalifikacji pracowników działu technologicznego oraz spawaczy firmy TEPRO S.A. o aktualną wiedzę z zakresu prewencji odkształceń spawalniczych.
2. Wdrożenie zarządzania personelem spawalniczym w zależności od ich indywidualnych predyspozycji.
3. Minimalizacja odchyłki płaskości powierzchni po procesie spawania elementów komór próżniowych umożliwiła wzrost jakości oraz zmniejszenie kosztów produkcji elementów wytwarzanych w firmie TEPRO S.A..

6. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy podjęto starania określenia wpływu niektórych parametrów technologicznych oraz geometrii rowka spawalniczego na poziom odchyłki płaskości powierzchni i kierunki odkształceń spawalniczych powstających w wyniku procesu spawania metodą MIG/MAG. Potrzeba opracowania poruszanych zagadnień uzasadniona była ekonomicznymi oraz technologicznymi potrzebami zakładu przemysłowego.

Zakres realizowanych prac badawczych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej obejmował następujące etapy:

1. Dokonanie analizy dostępnej literatury z zakresu powstawania i obecności odkształceń spawalniczych w konstrukcjach spawanych.
2. Ustalenie rozkładu zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni, którego przybliżenie umożliwiło dobranie metodyki oceny wyników badań.
3. Ustalenie wpływu kierunku walcowania blachy na odchyłkę płaskości powierzchni, co pozwoliło wyeliminować lub zmniejszyć potencjalne zakłócenia procesu oraz uniknąć błędnej interpretacji wyników.
4. Ustalenie wpływu na odchyłkę płaskości różnic własności wytrzymałościowych oraz wydłużenia procentowego przy zerwaniu na podstawie certyfikatu materiałowego 3.1 między dostawami materiału podstawowego.
5. Ustalenie wpływu parametrów technologicznych procesu MIG/MAG, przy określonym poziomie energii liniowej oraz polu przekroju poprzecznego rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości mierzonej na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000.

Przeprowadzona analiza literatury wykazała istotną potrzebę uzupełnienia dostępnej wiedzy o znajomość rozkładu zmiennej losowej odchyłki płaskości, wpływ kierunku walcowania na powstające odkształcenia spawalnicze, określenia wpływu różnic własności wytrzymałościowych i wydłużenia przy zerwaniu na podstawie certyfikatu materiałowego 3.1 oraz wpływu parametrów technologicznych procesu MIG/MAG, i geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości po procesie spawania. Układ oraz poszczególne rozdziały rozprawy mają na celu weryfikacje sformułowanych hipotez. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz testu zgodności χ^2 stwierdzono, że rozkład zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni jest rozkładem logarytmo-normlanym. Potwierdza to hipotezę z rozdziału 3.2 o zgodności rozkładu z rozkładem logarytmo-normlanym. Weryfikacja hipotezy głównej wymagała określenia wpływu kierunku walcowania oraz różnic własności

wytrzymałościowych i wydłużenia przy zerwaniu na odchyłkę płaskości, ponieważ zauważono istotne różnice wyników badań prowadzonych w różnych ośrodkach. Przeprowadzona analiza kierunku walcowania na odchyłkę płaskości wykazała istotny jego wpływ na średnią oraz odchylenie standardowe logarytmu. Zauważono, że kierunek prostopadły charakteryzuje się najmniejszym odchyleniem standardowym logarytmu. Warto podkreślić, że podczas badań właściwych uzyskano porównywalną wartość odchylenia standardowego logarytmu, co dodatkowo uzasadnia wybór prostopadłego kierunku walcowania. Badając wpływ różnic własności wytrzymałościowych i wydłużenia przy zerwaniu podkreślono konieczność normalizacji materiałów lub ich odprężania. Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu różnic własności wytrzymałościowych i wydłużenia przy zerwaniu stwierdzono, że zmiany przytoczonych parametrów istotnie wpływają na wartość średnią odchyłki płaskości. Mając ustalany wpływ potencjalnych zakłóceń, poddano weryfikacji hipotezę główną. Na podstawie przeprowadzonych badań odrzucono przyjętą hipotezę z rozdziału 3.2. Przyjęcie określonego poziomu energii liniowej nie wyeliminowało wpływu zmian orientacji i położenia palnika podczas spawania na odchyłkę płaskości po spawaniu. Dodatkowo przyjmując określony przekrój poprzeczny rowka spawalniczego, nie udało się wyeliminować wpływu zmian geometrii rowka spawalniczego na odchyłkę płaskości po spawaniu. Przeprowadzone badania potwierdzają konieczność dalszego poszukiwania kryteriów umożliwiających ograniczenie wpływu parametrów związanych z orientacją i manipulacją uchwytem oraz geometrii rowka spawalniczego.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski poznawcze:

1. Rozkład zmiennej losowej odchyłki płaskości powierzchni, wyznaczonej na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000 dla próbek spawanych metodą MIG/MAG, jest rozkładem logarytmno-normalnym.
2. Ze względu na lewostronne przesunięcie rozkładu logarytmno-normalnego analizie należy poddać wartość średniej geometrycznej, odchylenia standardowego logarytmu, wartości dolnej granicy (v_{3d}) i górnej granicy (v_{3g}) rozproszenia dla prawdopodobieństwa 99,73%.
3. Zmiana orientacji kierunku walcowania blachy względem osi spoiny wpływa istotnie na zmianę wartości średniej geometrycznej oraz odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni, wyznaczonej na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000.
4. Różnica własności wytrzymałościowych oraz wydłużenia procentowego przy zerwaniu między dostawami materiału podstawowego wpływa istotnie

na zmianę średniej geometrycznej odchyłki płaskości powierzchni wyznaczonej na podstawie normy PN-EN ISO 13920:2000.

5. Zmiany odległości końcówki prądowej oraz kąta pochylenia uchwytu spawalniczego wpływają bezpośrednio na zmianę średniej geometrycznej i odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni, mimo określonego poziomu energii liniowej (w tolerancji 5%).
6. Zmiany kąta ukosowania, odstępu i progu rowka wpływają bezpośrednio na zmianę średniej geometrycznej i odchylenia standardowego logarytmu odchyłki płaskości powierzchni mimo zachowania określonej powierzchni jego przekroju poprzecznego (w tolerancji 5%).

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski użytkowe:

1. Istotny wpływ na powstające odkształcenia spawalnicze (w tym odchyłkę płaskości) mają naprężenia wynikające z zabiegów technologicznych poprzedzających proces spawania (cięcie termiczne, walcowanie). Na konstrukcje spawane należy więc stosować stale wyżarzzone po procesie walcowania lub zastosować operacje prostowania rolkowego z wprowadzeniem wstępnych naprężeń ściskających, odprężania wibracyjnie lub stabilizowania w ciekłym azocie.
2. Mimo zastosowania łuku pulsującego zachodzą istotne różnice średniej geometrycznej oraz rozproszenia odchyłki płaskości powierzchni dla parametrów prądowo-napięciowych, które pokrywają się z występowaniem łuku globularnego (mieszanego).
3. Aby zminimalizować powstające odkształcenia spawalnicze, należy prowadzić uchwyt w taki sposób, by jeziorko spawalnicze „ciągnąć”. Należy zaznaczyć, że zmiana pochylenia palnika wymaga korekcji odległości końcówki prądowej od powierzchni blachy.
4. Dla złączy doczołowych ze spoiną czołową na kształt litery V należy stosować szerokość rozwarcia rowka większą niż grubość łączonych elementów oraz odstęp większy niż 20% grubości łączonych elementów.
5. Mając na uwadze minimalizację odkształceń spawalniczych przy doborze parametrów geometrycznych rowka spawalniczego, należy dążyć do jak najmniejszego pola jego przekroju dostosowanego do metody spawania.
6. Pomiar odchyłki płaskości powierzchni metodami bezstykowymi z wykorzystaniem skanera światła niebieskiego umożliwia przeprowadzenie

szybkiej i dokładnej analizy dominującej postaci odkształceń spawalniczych, w porównaniu do metod stykowych.

7. Metoda wyznaczenia współczynnika pozytywnego/negatywnego wpływu analizowanego czynnika na odchyłkę płaskości umożliwia dokładne oszacowanie procentowego udziału próbek, których odchyłka płaskości jest mniejsza/większa względem punktu odniesienia.
8. Instrukcje technologiczne spawania (WPS) powinny określać orientację uchwytu względem kierunku spawania oraz odległość końcówki prądowej. Umożliwi to kontrolę poziomu odkształceń spawalniczych.

Niniejsza praca, nie wyczerpuje problematyki związanej z profilaktyką, powstawaniem, obecnością, usuwaniem i zwalczaniem odkształceń spawalniczych w konstrukcjach spawanych. Przeprowadzone badania umożliwiły jednak przedstawienie kierunków dalszych prac badawczych:

1. Optymalizacje paramentów technologicznych spawania metodą MIG/MAG złączy doczołowych ze spoiną czołową.
2. Określenie wpływu pochylenia uchwytu oraz odległości końcówki prądowej, na odchyłkę płaskości złączy teowych ze spoiną pachwinową.
3. Ustalenie wpływu poziomemu naprężeniu materiału po poprzedzających zabiegach technologicznych na odchyłkę płaskości po procesie spawania.
4. Określenie wpływu stabilizacji ciekłym azotem oraz odprężenia wibracyjnego elementów spawanych na minimalizację odkształceń spawalniczych.
5. Ocena możliwości sterowania poziomem odkształceń spawalniczych stosując sterowanie parametrami technologicznymi bezpośrednio w trakcie trwania procesu spawania.

Bibliografia

1. [Adak2010] Adak M., Mandal N. R., Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion, *Applied Mathematical Modelling* 34, 2010, p. 146-158.
2. [Adamczuk2017] Adamczuk P. C., Machado I. G., Mazzaferro J. A. E., Methodology for predicting the angular distortion in multi-pass butt-joint welding, *Journal of Materials Processing Technology* 240 2017, p. 305–313].
3. [Banyś2012] Banyś K., Mirski Z., Fałek Z., Technologia naprawy spawanych ustrojów nośnych dźwignic, *Inżynieria Maszyn*, R 17, z 4 2012, s. 107-129.
4. [Camilleri2007] Camilleri D., Mollicone P., Gray TGF., Computational methods and experimental validation of welding distortion models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2007;221(4):235-249.
5. [Camilleri2013] Camilleri D., McPherson N., Gray T. G. F., The applicability of using low transformation temperature welding wire to minimize unwanted residual stresses and distortions, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 110, 2013, p. 2-8.
6. [Chen2019] Chen Q., Yang J., Liu X., Tang J., Huang B., Effect of the groove type when considering a thermometallurgical-mechanical model of the welding residual stress and deformation in an S355JR-316L dissimilar welded joint *Journal of Manufacturing Processes* 45 (2019) 290–303
7. [Deng2007] Deng D., Liang W., Murakawa H., Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements, *Journal of Materials Processing Technology* 183, 207, p. 219-225.
8. [Deng2013] Deng D., Zhou Y., Bi T., Liu X., Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO₂ gas arc welding in thin-plate bead-on joints , *Materials & Design* (1980-2015) Volume 52, December 2013, Pages 720-729.
9. [Doyen2017] Doyen O., Rizzo N., Forest L., Tosi J., Thomas N., Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions, *Fusion Engineering and Design* 121. 2017, p. 80-86.
10. [Ferenc2017] Ferenc K., *Podręcznik Spawania Zagadnienia Ogólne zeszyt 1*, Agenda Wydawnicza SIMP, Warszawa 2017, ISBN 978-83-87982-92-8.
11. [Fu2016] Fu G., Lourenco M. I., Duan M., Estefen S. F., Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures, *Marine Structures*, 2016, p . 30-55.
12. [Ghosh2010] Ghosh P. K., Devakumaran K., Pramanick A. K., Effect of pulse current on shrinkage stress and distortion in multipass GMA welds of different groove sizes, *Supplement To The Welding Journal*, 2010, p. 43-53.
13. [Ghosh2010] Ghosh P. K., Devakumaran K., Pramanick A. K., Effect of Pulse Current on Shrinkage Stress and Distortion in Multipass GMA Welds of Different Groove Sizes, *SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL*, MARCH 2010 s 43-53.
14. [Grzesiak2019] Grzesiak D., Plichta J., Verification of normal distribution of welding distortions, *Welding Technology Review* 91 (3), 2019 s. 6-9

-
15. [Grzesiak2020] Grzesiak D., Badanie wpływu kierunku walcowania blachy gatunku 0H18N9 na odkształcenia spawalnicze, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, Nr 6/2020, s 45-49.
 16. [Hashemzadeh2017] Hashemzadeh M., Garbatov Y., Guedes Soares C., Analytically based equations for distortion and residual stress estimations of thin butt-welded plates, *Engineering Structures* 137, 2017, p. 115-124.
 17. [Ilman2016] Ilman M. N., Kusmono, Muslih M. R., Subeki N., Wibowo H., Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds, *Materials and Design* 99, 2016, p. 273-283.
 18. [Islam2015] Islam M., Buijk A., Rais-Rohani M., Motoyama K., Process parameter optimization of lap joint fillet weld based on FEM–RSM–GA integration technique, *Advances in Engineering Software* 79, 2015, p. 127-136.
 19. [Kensik2006] Kensik R., Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG, *Welding Technology Review*, 2006, R. 78, nr 9-10, s. 5-8.
 20. [Kozak2016] Kozak J., Możliwości szacowania odkształcenia kąтового w spawanym złączu teowym, *MECHANIK NR 12/2016*.
 21. [Kudła2006] K. Kudła, Samoregulacja łuku w procesie MIG/MAG PLUS, *Welding Technology Review*, 2006, R. 78, nr 9-10, s.12-15.
 22. [Kukiełka2002] L. Kukiełka, *Podstawy badań inżynierskich*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
 23. [Kumar2018] Kumar D., *Weld metal temperature mesurment*, College of Engineering and Technology, Noida 2018.
 24. [Liang2014] Liang W., Murakawa H., Predicting Welding Distortion in a Panel Structure with Longitudinal Stiffeners Using Inherent Deformations Obtained by Inverse Analysis Method, *The Scientific World Journal Volume 2014*, article ID 601417]
 25. [Liang2018] Liang W., Deng D., Influences of heat input, welding sequence and external restraint on twisting distortion in an asymmetrical curved stiffened panel, *Advances in Engineering Software* 115, 2018, p. 439-481.
 26. [Mahendramani2012] Mahendramani G., Lakshmana Swamy N., Effect of Included Angle in V-Groove Butt Joints on Shrinkages in Submerged Arc Welding Process, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 4 No.04 April 2012, 1607-1613.
 27. [Mahendramani2018] Mahendramani G., Lakshmana Swamy N., Effect of Weld Groove Area on Distortion of Butt Welded Joints in Submerged Arc Welding, *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2018 8(2), 33 44.
 28. [Mizer2014] Mizerski J., *Spawanie w osłonie gazów metodami Mag i MIG Podręcznik dla spawaczy i personelu nadzoru spawalniczego*. Wydawnictwo Rea 2014.
 29. [Nawrocki2020] Nawrocki J., Słania J., Wojsyk K., Golański G.:Zarys wykorzystania symulacji MES w analizie oddziaływania niezgodności spawalniczych na cechy eksploatacyjne konstrukcji spawanych, *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, Częstochowa 2020
 30. [Nowacki2018] Nowacki J., Siczekiewicz N., Nocoń M., Pomiar odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D *Badania Nieniszczące i Diagnostyka* 3 (2018) s. 3-6
-

-
31. [Nowacki2019] Nowacki J., Siczekiewicz N., Nocoń M., The Use of 3D Scanning Technology in Measurements of Welding Distortions , *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* no. 1/2019 s. 27-36
 32. [Okano2017] Okano S., Mochizuki M., Transient distortion behavior during TIG welding of thin steel plate, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, p. 103-111.
 33. [Ossowski2003] J. Cz. Ossowski, Rozkład logarytmiczno-normalny a względne i absolutne miary rozproszenia, *Dynamiczne Modele Ekonometryczne, Materiały VIII Ogólnopolskiego Seminarium Naukowego*, s. 105-122, Toruń, 2003.
 34. [Panday2020] Pandey A. K., Dixit A., Pandey S., Pandey P. M., Distortion control in welded structure with Advanced Submerged Arc Welding, *Materials Today: Proceedings, Volume 26, Part 2*, 2020, s. 1492-1495.
 35. [Park2012] Park J., An G., Lee H., Effect of external load on angular distortion in fillet welding, *Materials and Design* 42, 2012, p. 403-410.
 36. [Pazooki2017] Pazooki A. M. A., Hermans M. J. M., Richardson I. M., Control of welding distortion during gas metal arc welding of AH36 plates by stress engineering *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 88:1439–1457.
 37. [Pilarczyk2017] Pilarczyk J. praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera: Spawalnictwo 1*, Wydawnictwo naukowe PWN 2017, ISBN 9788301191818.
 38. [Rathod2016] Rathod C., Reddy G., K., Experimental investigation of angular distortion and transverse shrinkage in CO₂ arc welding process, *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)* ISSN(P): 2319-2240; ISSN(E): 2319-2259 Vol. 5, Issue 4, Jun -Jul 2016; 21-28.
 39. [Reddy2013] Sathyanarayana Reddy B. N., Lakshmana Swamy N., Influence of Groove Angle in V-groove Butt joints on Transverse shrinkage in CO₂ Arc Welding proces, *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 5 No.02 February 2013 s. 410-412.
 40. [Schenk2009] Schenk T., Richardson I. M., Kraska M., Ohnimus S., A study on the influence of clamping on welding distortion, *Computational Materials Science* 45, 2009, p. 999-1005.
 41. [Sędek2000] Sędek P., *Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych*, Biuro Gamma, 2000.
 42. [Sikstrom2006] Sikstrom F., Ericsson M., Nylén P., Christiansson A., 3D-Scanning for Weld Distortion Measuring ,2006 *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*
 43. [Sudhakaran2012] Sudhakaran R., Vel Murugan V., Sivasakthivel P. S., Optimization of process parameters to minimize angular distortion in gas tungsten arc welded stainless steel 202 grade plates using particle swarm optimization, *Journal of Engineering Science and Technology* 7, 2012, p. 195-208.
 44. [Sulaiman2011] Sulaiman, M.S., Manurung, Y.H., Haruman, E., Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER, *J Mech Sci Technol* 25, 2641 (2011).
 45. [Tapas2017] Tapas B., Chelladurai H., Zahid A., Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates, *Journal of Manufacturing Processes* 25, 2017, p. 340-350.

-
46. [Tian2014] Tian L., Luo Y., Wang Y., Wu X., Prediction of transverse and angular distortion of gas tungsten arc bead-on-plate welding using artificial neural network, *Materials and Design* 54, 2014, p. 458-472.
 47. [Vasantharaja2015] Vasantharaja P., Vasudevan M., Palanichamy P., Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints, *Journal of Manufacturing Processes* 19, 2015, p. 187-193.
 48. [Vetri2015] Vetri Selvan R., Sathiya P., Ravichandran G., Characterisation of transient out-of-plane distortion of nipple welding with header component, *Journal of Manufacturing Processes* 19, 2015, p. 67-72.
 49. [Wei2020] Wei Ch., Jiang W., Influence of welding groove on residual stress and distortion in T-joint weld, *Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020.
 50. [Wojsyk2020] Wojsyk K., Nawrocki J.: Badanie wpływu braku przetopu w spoinie pachwinowej na jej wytrzymałość zmęczeniową w różnych warunkach obciążenia . *Przegląd Spawalnictwa* 1/2020 str 17-24.
 51. [Ye2015] Ye Y., Cai J., Jiang X., Dai D., Deng D., Influence of groove type on welding-induced residual stress, deformation and width of sensitization region in a SUS304 steel butt welded joint, *Advances in Engineering Software*, Volume 86, 2015, Pages 39-48.
 52. [Zhang2019] Zhang Ch., Li S., Sun J., Wang Y., Deng D., Controlling angular distortion in high strength low alloy steel thick-plate T joints, *Journal of Materials Processing Tech.* 267, 2019, p. 257-267.
 53. PN-EN 10027-1:2016-12: Systemy oznaczania stali – Część 1: Znaki stali.
 54. PN-EN 10027-2:2015-07: Systemy oznaczania stali – Część 2: System cyfrowy.
 55. PN-EN ISO 13920:2000: Spawalnictwo -- Tolerancje ogólne dotyczące konstrukcji spawanych - - Wymiary liniowe i kąty -- Kształt i położenie.
 56. PN-EN ISO 15614-1:2017-08/A1:2019-12: Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -- Badanie technologii spawania – Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
 57. PN-EN ISO 17659:2008: Spawanie - Wielojęzyczne terminy dotyczące złączy spawanych/zgrzewanych z ilustracjami.
 58. PN-EN ISO 2553:2019-06: Spajanie i procesy pokrewne - Umowne przedstawianie na rysunkach - Złącza spajane.
 59. PN-EN ISO 3834-2:2021-09: Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych - Część 2: Pełne wymagania jakości.
 60. PN-EN ISO 9001:2015-10: Systemy zarządzania jakością – Wymagania.
 61. PN-EN ISO 9692-1:2014-02: Spawanie i procesy pokrewne - Rodzaje przygotowania złączy - Część 1: Ręczne spawanie łukowe, spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazów, spawanie gazowe, spawanie metodą TIG i spawanie wiązką stali.

Spis rysunków

Rys. 1.	Ilustracja spoiny czołowej i pachwinowej oraz elementy podstawowe spoiny: czołowej (a), pachwinowej (b) [Ferenc2017].....	9
Rys. 2.	Typy złączy: złącze doczołowe (a), złącze równoległe (b), złącze zakładkowe (c), złącze teowe (d), złącze krzyżowe (e), złącze kątowe (f), złącze narożne (g), złącze grzbietowe (h), złącze wieloczęściowe (i) [PN-EN ISO 17659:2008].....	11
Rys. 3.	Rozkład temperatur wokół źródła ciepła na powierzchni spawanych elementów [Pilarczyk2017]	13
Rys. 4.	Naprężenia pręta ogrzewanego w funkcji temperatury. I-II odkształcenia sprężyste, II-II odkształcenia plastyczne, III-IV chłodzenie, IV-V odkształcenia plastyczne, V-II ² redystrybucja naprężeń przy ponownym podgrzewaniu [Sędek2000]	14
Rys. 5.	Wpływ temperatury maksymalnej oraz gęstości mocy źródła ciepła na głębokość i szerokość wtopienia oraz szerokość strefy wpływu ciepła [Ferenc2017]	15
Rys. 6.	Wizualizacja rodzajów odkształceń spawalniczych: wygięcie (a), skurcz wzdłużny (b), skurcz poprzeczny (c), utrata płaskości (d), skręcenie (e), odkształcenie kątowe (f) [Ferenc2017]	16
Rys. 7.	Wizualizacja sposobu pomiaru odkształceń spawalniczych: odkształcenie kątowe (a), skurcz poprzeczny (b), skurcz wzdłużny (c)	16
Rys. 8.	Przykładowa komora próżniowa ze stali 1.4301 wykonana w TEPRO S.A.	19
Rys. 9.	Sekwencje spawania [Rodrigues2019].....	25
Rys. 10.	Graficzne przedstawienie sposobu pomiaru odchyłki płaskości powierzchni (PN EN ISO 13920:2000)	35
Rys. 11.	Widok stanowiska zrobotyzowanego TM2000	36
Rys. 12.	Schemat układu sterowania i napędu stanowiska	38
Rys. 13.	Stanowisko badawcze wdrożone w firmie TEPRO S.A.	38
Rys. 14.	Stanowisko pomiarowe Wenzel LH 108 w firmie TEPRO S.A.	40
Rys. 15.	Stanowisko pomiarowe Atos 5M oraz próbka oklejona znacznikami	41
Rys. 16.	Schemat procesu obróbki skanowanych próbek w programie GOM Inspect Suite 2020	42
Rys. 17.	Szkic rowka spawalniczego z naniesionymi wymiarami charakterystycznymi	43
Rys. 18.	Histogram liczebności obserwacji odchyłek płaskości powierzchni na podstawie próbki oraz rozkładu wzorcowego.....	48
Rys. 19.	Orientacja dłuższej krawędzi próbek w stosunku do kierunku walcowania arkusza blachy	52
Rys. 20.	Szkic rowka spawalniczego próbki z naniesionymi wymiarami charakterystycznymi	52
Rys. 21.	Wykres zmiany średnich parametrów napięciowo-prądowych w czasie trwania procesu spawania.....	53
Rys. 22.	Wykres zmiany chwilowych parametrów napięciowo-prądowych w czasie trwania procesu spawania.....	54
Rys. 23.	Wykres odchyłek względem średniej geometrycznej odchyłki płaskości powierzchni danego kierunku walcowania	55
Rys. 24.	Mapa odchyłki płaskości powierzchni próbki 1 o kierunku walcowania pod kątem 45° w stosunku do dłuższej krawędzi	56
Rys. 25.	Mapa odchyłki płaskości powierzchni próbki 3 o kierunku walcowania prostopadłym w stosunku do dłuższej krawędzi	56
Rys. 26.	Mapa odchyłki płaskości powierzchni próbki 1 o kierunku walcowania równoległym w stosunku do dłuższej krawędzi	57
Rys. 27.	Szkic rowka spawalniczego wraz z oznaczeniami jego parametrów oraz sposób wyznaczania odchyłki środka ciężkości rowka (ΔSp).....	60

Rys. 28. Sposób spawania oraz droga uchwytu z oscylacją	61
Rys. 29. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P1 planu badawczego	62
Rys. 30. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P2 planu badawczego	63
Rys. 31. Wykres zmian parametrów prądowo-napięciowych w czasie dla punktu P3 planu badawczego	63
Rys. 32. Orientacja uchwytu względem kierunku spawania oraz sposób pomiaru odległości końcówki prądowej	64
Rys. 33. Mapy odchyłek płaskości powierzchni: punkt C2 planu badawczego (a), próbka 3 prostopadłego kierunku walcowania (b).....	69
Rys. 34. Porównanie wyników średniej geometrycznej oraz v_{d3} i v_{g3} odchyłki płaskości, szerokości lica i położenia środka ciężkości spoiny danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1)	70
Rys. 35. Porównanie wpływu pozytywnego oraz negatywnego danej konfiguracji rowka spawalniczego w porównaniu do parametrów wyjściowych PW(60,1,1)	70
Rys. 36. Mapa odchyłek płaskości punktu F2 próbka 1	71
Rys. 37. Porównanie wyników średniej geometrycznej oraz v_{d3} i v_{g3} odchyłki płaskości danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(2373,0,5,0)	72
Rys. 38. Porównanie wpływu pozytywnego oraz negatywnego danego punktu planu eksperymentu do parametrów wyjściowych PW(2373,0,5,0)	73
Rys. 39. Mapa odchyłek płaskości powierzchni punktu D2 próbka 1	76
Rys. 40. Mapa odchyłek płaskości powierzchni punktu D1 próbka 2	76
Rys. 41. Przykłady konstrukcji spawanych produkowanych w firmie TEPRO S.A.	78
Rys. 42. Drzwi komory numer 11324393	80

Spis tabel

Tab. 1.	Zestawienie różnic między spoinami czołowymi i pachwinowymi [Wojsyk2019]	10
Tab. 2.	Wybrane sposoby przygotowania krawędzi spawanych elementów dla spawania łukowego elektroda topliwą w osłonie gazów	12
Tab. 3.	Zestawienie podstawowych metod spawania oraz przybliżone wartości gęstości ciepła oraz temperatury maksymalnej źródła [Kumar2018]	14
Tab. 4.	Specyfikacja stanowiska zrobotyzowanego TM2000	36
Tab. 5.	Specyfikacja stanowiska badawczego	38
Tab. 6.	Specyfikacja stanowiska pomiarowego Wenzel LH 108	39
Tab. 7.	Parametry procesu spawania metodą MAG drutem litym (metoda 135)	44
Tab. 8.	Wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni próbek, wymiary w mm	45
Tab. 9.	Uszeregowane niemalejąco wyniki pomiarów, wyniki w mm	45
Tab. 10.	Szereg rozdzielczy wyników pomiaru odchyłki płaskości powierzchni	46
Tab. 11.	Wyniki obliczeń logarytmu naturalnego średniej zmiennej losowej, logarytmu naturalnego odchylenia standardowego nieobciążonego zmiennej losowej rozkładu wzorcowego	47
Tab. 12.	Wyniki obliczeń liczby obserwacji rozkładu wzorcowego	48
Tab. 13.	Wyniki obliczeń statystyki χ^2	48
Tab. 14.	Zestawienie parametrów rozkładu logarytmu-normalnego odchyłki płaskości wartości w mm	49
Tab. 15.	Obliczone wartości odchylenia odchyłki płaskości od średniej geometrycznej dla danego poziomu prawdopodobieństwa wartości w mm	49
Tab. 16.	Parametry procesu spawania metodą MAG drutem litym (metoda 135)	53
Tab. 17.	Wyniki pomiaru odchyłki płaskości powierzchni	54
Tab. 18.	Wyniki obliczeń parametrów rozkładu logarytmu-normalnego odchyłki płaskości danego kierunku walcowania	55
Tab. 19.	Specyfikacja geometrii rowków spawalniczych wszystkich użytych próbek	60
Tab. 20.	Parametry prądowe oraz prędkości spawania planu badawczego	62
Tab. 21.	Plan badań wpływu parametrów procesu MIG/MAG oraz geometrii złącza na odchyłkę płaskości powierzchni	64
Tab. 22.	Wyniki badań wizualnych próbek dla rozważanej fazy eksperymentu	65
Tab. 23.	Wyniki pomiarów odchyłki płaskości powierzchni danego punktu planu badawczego	66
Tab. 24.	Wyniki obliczeń parametrów rozkładu logarytmu-normalnego odchyłki płaskości danego punktu planu badawczego wyniki w mm	66
Tab. 25.	Szacowane na podstawie próbek prawdopodobieństwo spełnienia wymagań dla danej klasy dokładności wg normy PN-EN ISO 13920:2000	67
Tab. 26.	Zestawienie wartości średniej geometrycznej, odchylenia standardowego logarytmu, własności wytrzymałościowych oraz wydłużenia A5 danej dostawy materiału podstawowego	68