
RADA NAUKOWA DYSCYPLINY INŻYNIERIA MECHANICZNA

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Andrzej Grączewski

**WYTRZYMAŁOŚĆ I TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA ZŁĄCZY
SPAWANYCH WYKONANYCH ZE STOPU ALUMINIUM EN
AW-5754**

***STRENGTH AND FATIGUE LIFE OF WELDED JOINTS MADE
OF EN AW-5754 ALUMINUM ALLOY***

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR PRACY

dr hab. inż. BOGDAN LIGAJ

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. TOMASZ GIĘTKA

Bydgoszcz, 2022

1. Wprowadzenie

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że badania wytrzymałości i trwałości złączy spawanych elementów wykonanych ze stopu aluminium są prowadzone od wielu lat. Świadczy to o istotności zagadnienia z inżynierskiego punktu widzenia oraz z rosnącego zużycia aluminium i jego stopów na konstrukcje inżynierskie. Pomimo wykonania wielu badań proces spajania wymienionego wcześniej materiału jest trudny i pozwala na postawienie wielu pytań pozostających bez jednoznacznej odpowiedzi.

Stopy aluminium są grupą materiałów coraz powszechniej stosowaną na elementy konstrukcyjne maszyn wykonywanych w technologii spajania. Wynika to ze znacznie niższej gęstości stopu ($2,65 \div 2,85 \text{ kg/dm}^3$) w odniesieniu do gęstości stali konstrukcyjnej ($7,85 \text{ kg/dm}^3$) przy jednoczesnym posiadaniu dobrych właściwości wytrzymałościowych oraz innych właściwości np. odporności na korozję. Problemy występujące podczas procesu spawania stopów aluminium, utrudniające wykonanie poprawnych złączy, wynikają z ich cech m.in. przewodności cieplnej, powinowactwa do wodoru itp. Pojawiające się trudności skutkują zapotrzebowaniem na realizację badań właściwości wytrzymałościowych złączy spawanych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych.

Stopem aluminium, na którego temat jest niewiele informacji dotyczących wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej jest stop EN AW-5754. Wskazany gatunek materiału w postaci blachy jest powszechnie stosowany na: konstrukcje spawane, elementy środków transportu, zbiorniki ciśnieniowe, elementy rurociągów itd.

Do zalecanych metod spawania elementów ze stopów aluminium zalicza się metodę MIG (metoda 131) i metodę TIG (metoda 141). Spawanie metodą MIG jest stosowane przy wykonywaniu długich ciągłych spoin charakteryzujących się mniejszą deformacją. Metoda ta jest stosowana także ze względu na czasochłonność wykonywania złączy i wymaga poszukiwania takich parametrów spawania, których wartości są optymalne ze względu na realizację procesu.

Istotnym problemem wykonywania złączy spawanych jest ilość dostarczanej energii cieplnej do określonej objętości materiału wpływającej na zmianę jego właściwości. W złączu spawanym obszarem, który charakteryzuje się najniższymi właściwościami wytrzymałościowymi jest tzw. strefa wpływu ciepła (SCW). Ilość dostarczonej energii cieplnej wpływa na wielkość strefy wpływu ciepła oraz strukturę materiału w jej obszarze.

Istnieją różne podejścia do określania ilości dostarczonej energii cieplnej do złącza spawanego w celu jego poprawnego wykonania. Jednym z parametrów jest ilość wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q . Parametr Q jest ściśle związany z energią liniową spawania E_s , którą oblicza się na podstawie parametrów realizacji procesu spawania uwzględniających: napięcie prądu spawania U , natężenie prądu spawania I oraz liniową prędkość spawania v .

W przypadku ilości wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q uwzględnia się dodatkowo współczynnik związany z metodą spawania k . Obliczenia parametru Q

na podstawie wartości parametrów prądowo-napięciowych nastawionych na urządzeniu spawalniczym jest mało dokładny. Wykorzystując możliwości techniczne wskazanych urządzeń, pozwalających na monitorowanie parametrów prądowo-napięciowych spawania, istnieje możliwość precyzyjniejszego wyznaczenia ilości wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q i uznanie tego parametru jako wielkości opisującej ilość energii cieplnej użytej do wykonania złącza.

Na podstawie analizy literatury określono zakres zalecanych wartości ilości wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q dla blachy o grubości 4 mm. Minimalna wartość $Q_{\min} = 0,288$ kJ/mm, natomiast wartość maksymalna $Q_{\max} = 0,400$ kJ/mm. Wskazane jest przeprowadzenie badań złączy spawanych dla wartości ilości wprowadzonego ciepła spoza wskazanego zakresu.

Proces spawania wybranych grup materiałów jest związany z koniecznością stosowania ściśle określonych warunków i parametrów spawania. Zbyt niska energia liniowa spawania może skutkować powstawaniem niepełnych przetopów, stwardnieniem w SWC lub brakiem przetopu w złączu. Z kolei zbyt wysoka energia liniowa spawania może prowadzić do nadmiernej penetracji, przegrzania i rozrostu ziarna w SWC oraz na występowanie niekorzystnych zjawisk opadowych w SWC.

W literaturze trudno odnaleźć jednoznaczne informacje na temat wpływu ilości wprowadzonego ciepła Q na właściwości mechaniczne złącza spawanego wykonanego ze stopu aluminium serii 5xxx, zwłaszcza stopu EN AW-5754.

1.1. TEZA BADAWCZA

Ilość energii cieplnej zużytej do wykonania złącza spawanego ze stopu aluminium EN AW-5754 wpływa na jego wytrzymałość i trwałość zmęczeniową.

Jednym z parametrów opisujących energię cieplną użytą do wykonania złącza spawanego jest ilość wprowadzonego ciepła Q .

1.2. CEL PRACY

Podstawowymi celami pracy jest przeprowadzenie badań:

- doświadczalnych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych,
- rozkładu twardości,
- makro- i mikrostruktury,

złączy spawanych stopu aluminium EN AW-5754 wykonanych z użyciem zmiennych wartości ilości wprowadzonego ciepła Q oraz analiza uzyskanych wyników.

1.3. ZAKRES PRACY

Rozprawę doktorską podzielono na 6 rozdziałów. Rozdział pierwszy i drugi zawiera analizę stanu wiedzy, która pozwoliła na sformułowanie hipotezy badawczej, przygotowanie

programu badań doświadczalnych oraz opracowaniu metodyk badawczych (rozdziały: trzeci i czwarty).

Część eksperymentalna pracy obejmuje przeprowadzenie:

- a) badań w warunkach obciążeń statycznych:
 - blachy ze stopu EN AW-5754 na próbkach pobranych wzdłuż kierunku walcowania,
 - blachy ze stopu EN AW-5754 na próbkach pobranych poprzecznie do kierunku walcowania,
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 1 (ilość wprowadzonego ciepła Q_1),
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 2 (ilość wprowadzonego ciepła Q_2),
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 3 (ilość wprowadzonego ciepła Q_3),
- b) badań w warunkach obciążeń zmiennych o współczynniku $R=0,1$:
 - blachy ze stopu AW-5754 na próbkach pobranych wzdłuż kierunku walcowania,
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 1 (ilość wprowadzonego ciepła Q_1),
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 2 (ilość wprowadzonego ciepła Q_2),
 - złącza spawanego wykonanego wg wariantu parametrów spawania nr 3 (ilość wprowadzonego ciepła Q_3),
- c) badania rozkładu twardości materiału w złączach spawanych wykonanych wg wariantu parametrów spawania:
 - numer 1 (ilość wprowadzonego ciepła Q_1),
 - numer 2 (ilość wprowadzonego ciepła Q_2),
 - numer 3 (ilość wprowadzonego ciepła Q_3),
- d) badania makro- i mikrostruktury materiału w złączach spawanych wykonanych wg wariantu parametrów spawania:
 - numer 1 (ilość wprowadzonego ciepła Q_1),
 - numer 2 (ilość wprowadzonego ciepła Q_2),
 - numer 3 (ilość wprowadzonego ciepła Q_3).

W rozdziale piątym przedstawiono analizę wyników badań, która pozwoliła na sformułowanie wniosków podsumowujących rozprawę (rozdział szósty).

2. Badania doświadczalne

2.1. Charakterystyka parametrów technologicznych spawania

Ilość wprowadzonego ciepła Q przy spawaniu jest głównym czynnikiem, który wpływa na własności spoin. Parametr Q oblicza się ze wzoru (1):

$$Q = ((k \cdot U \cdot I)/v) \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/mm]} \quad (1)$$

gdzie:

k - współczynnik sprawności cieplnej związany z metodą spawania (dla metoda 131 wartość wynosi $k = 0,8$),

U - napięcie prądu spawania, V,

I - natężenie prądu spawania, A,

v - liniowa prędkość spawania, mm/s.

Proces spawania blach ze stopu EN AW-5754 przeprowadzono metodą MIG (metodą spawania 131) z zastosowaniem różnych parametrów technicznych przy pomocy urządzenia Kemppi Flexlite X5 FastMig. Zastosowano spoinę typu V wykonywaną w pozycji PA (wg normy PN-EN ISO 6947:2020-03). W procesie spawania użyto drut spawalniczy ESAB OK Autrod 5183 o średnicy $d = 1,2$ mm, gaz osłonowy argon, zużycie gazu osłonowego 16-20 l/min. Drut aluminiowy ESAB OK Autrod 5183 posiada następujący skład chemiczny: Si < 0,40%, Mn = 0,80%, Fe < 0,40%, Mg = 4,80% i reszta Al.

Wartości parametrów spawalniczych użyte w przygotowaniu płyt próbnych zestawiono w tabeli 1, a wartości ilość wprowadzonego ciepła Q obliczono ze wzoru 1.

Tabela 1. Parametry procesu spawania płyt próbnych na próbki do badań

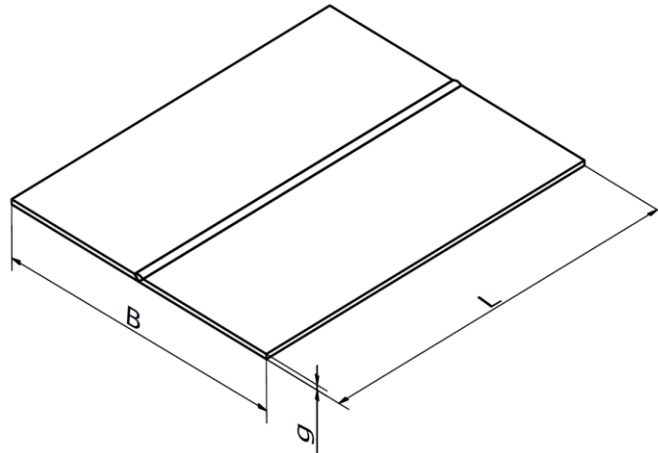
Metoda spawania (wariant parametrów spawania)	Parametry spawania					Ilość wprowadzonego ciepła Q kJ/mm
	Prąd polaryzacji	Średnia wartość napięcie prądu U	Średnia wartość natężenie prądu I	Liniowa prędkość spawania v	Współczynnik k	
	---	V	A	mm/s	---	
Metoda 131 (Wariant nr 1)	DC (+)	28,0	180	5,91	0,8	0,682
Metoda 131 (Wariant nr 2)	DC (+)	25,0	160	6,67	0,8	0,480
Metoda 131 (Wariant nr 3)	DC (+)	18,5	135	7,32	0,8	0,273

Przyjęte wartości parametru Q do wykonania płyt próbnych, w ramach realizacji rozprawy doktorskiej, wykraczały poza zakres $0,288 \text{ kJ/mm} < Q > 0,400 \text{ kJ/mm}$, rozszerzając go w obszarze niższych i wyższych wartości (tabela 1).

2.2. Materiał i próbki do badań

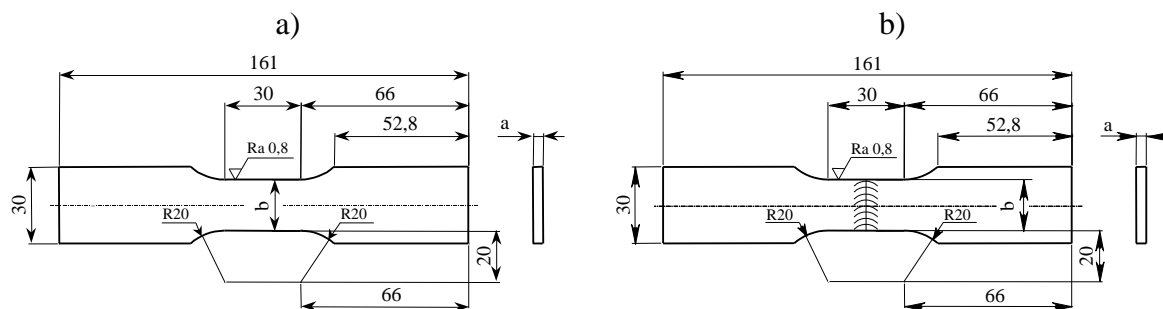
Do badań przyjęto stop aluminium EN AW-5754 (znak stopu AlMg3) według normy PN-EN 573-3:2010 i PN-EN 573-3/AK:1998. Głównymi składnikami stopu jest glin (Al) oraz magnez (Mg).

Próbki do badań złączy spawanych wykonano z płyt próbnych (rys. 1) o wymiarach: szerokość $B = 240$ mm, długość $L = 300$ mm, nominalnej grubości blachy $g = 4,0$ mm.



Rys. 1. Postać geometryczna płyt próbnych na próbki do badań złączy spawanych

Badania w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych przeprowadzono na próbkach (rys. 2) wykonanych według normy PN-84/H-04334. Nominalne wymiary próbek wynosiły: $a = 4,0$ mm, $b = 20$ mm.

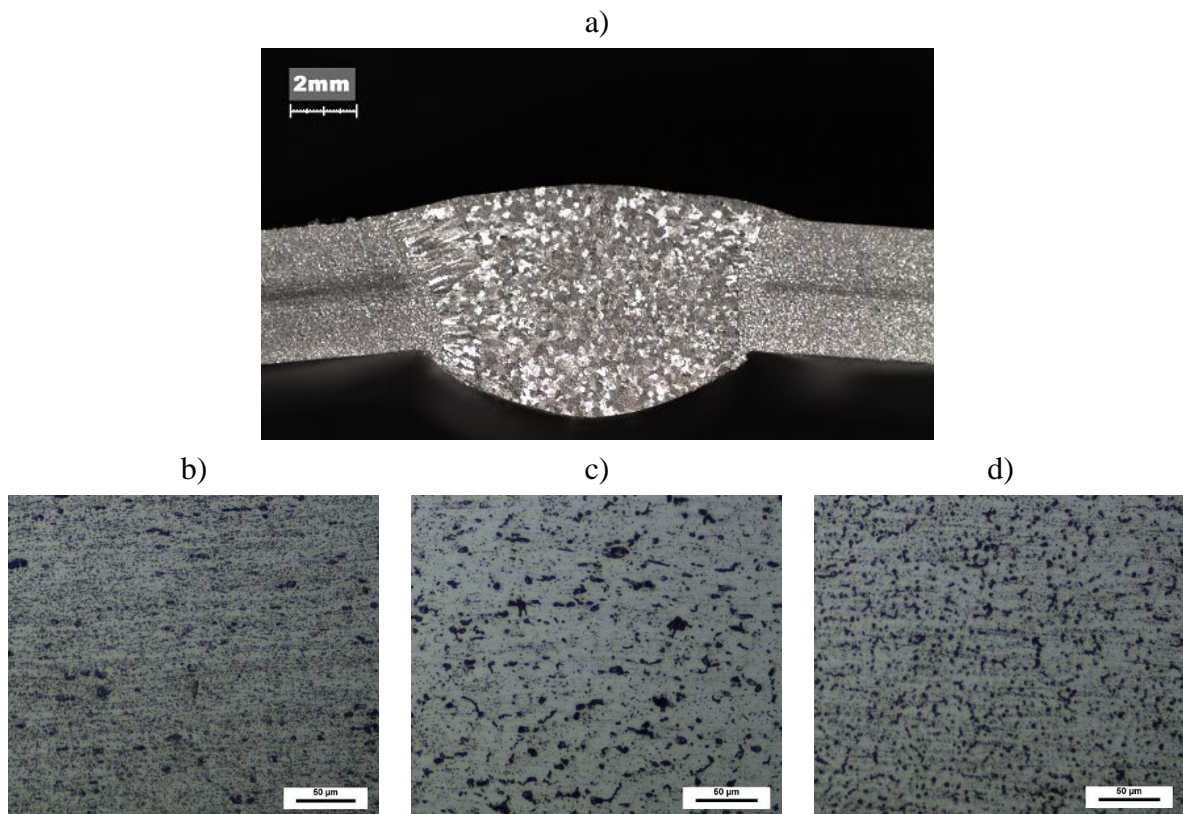


Rys. 2. Cechy geometryczne próbek do badań w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych: a – blachy ze stopu aluminium EN AW-5754, b – złączy spawanych blachy ze stopu aluminium EN AW-5754

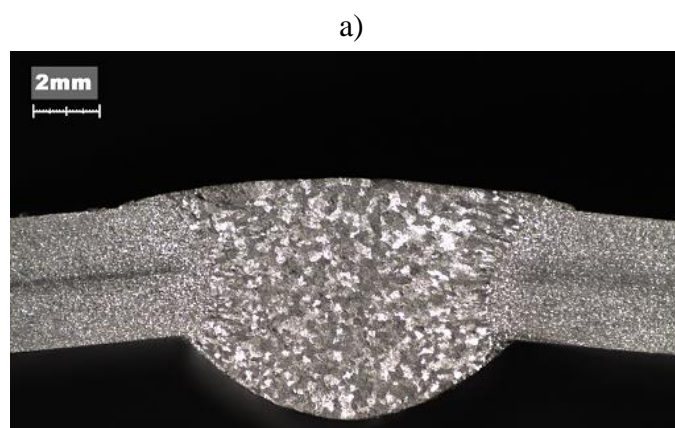
2.3. Badania strukturalne

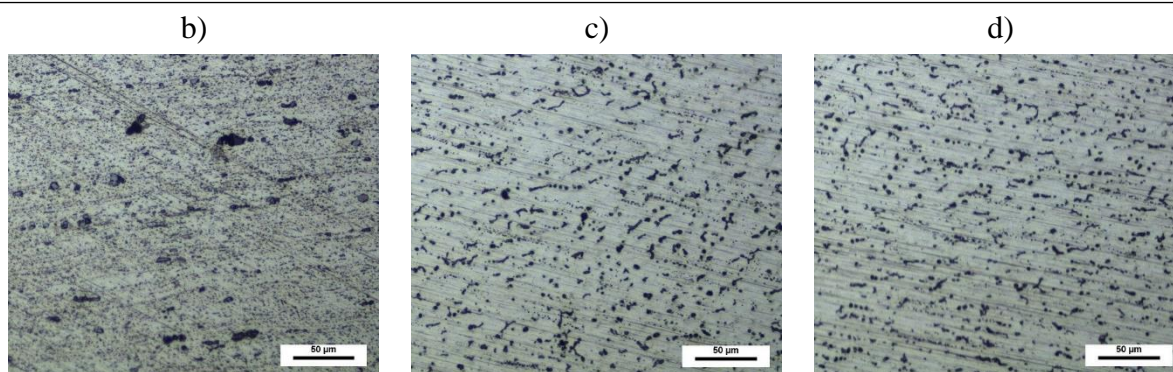
Badania makro- i mikroskopowe wykonano na zglądach metalograficznych odciętych z próbek z wykonanych płyt próbnych. Badania makroskopowe wykonano na stanowisku wyposażonym w obiektyw Computar Telecentric TEC-M55 i kamerę Deltapix 5.0. Badania mikroskopowe przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym firmy Carl ZEISS typ Axiovert 25 wyposażonym w kamerę cyfrową AxioCam Er5s.

Na rysunkach od 3 do 5 przedstawiono zdjęcia makro- i mikroskopowe złączy spawanych pobranych z płyt próbnych wykonanych metodą spawania 131 z różną wartością ilości wprowadzonego ciepła Q . Wstępna analiza wyników wskazuje na zróżnicowanie struktury materiału w strefie wpływu ciepła (SWC) oraz w spoinie (S). Zmiany strukturalne we wskazanych obszarach mogą wpływać na właściwości złącza spawanego.

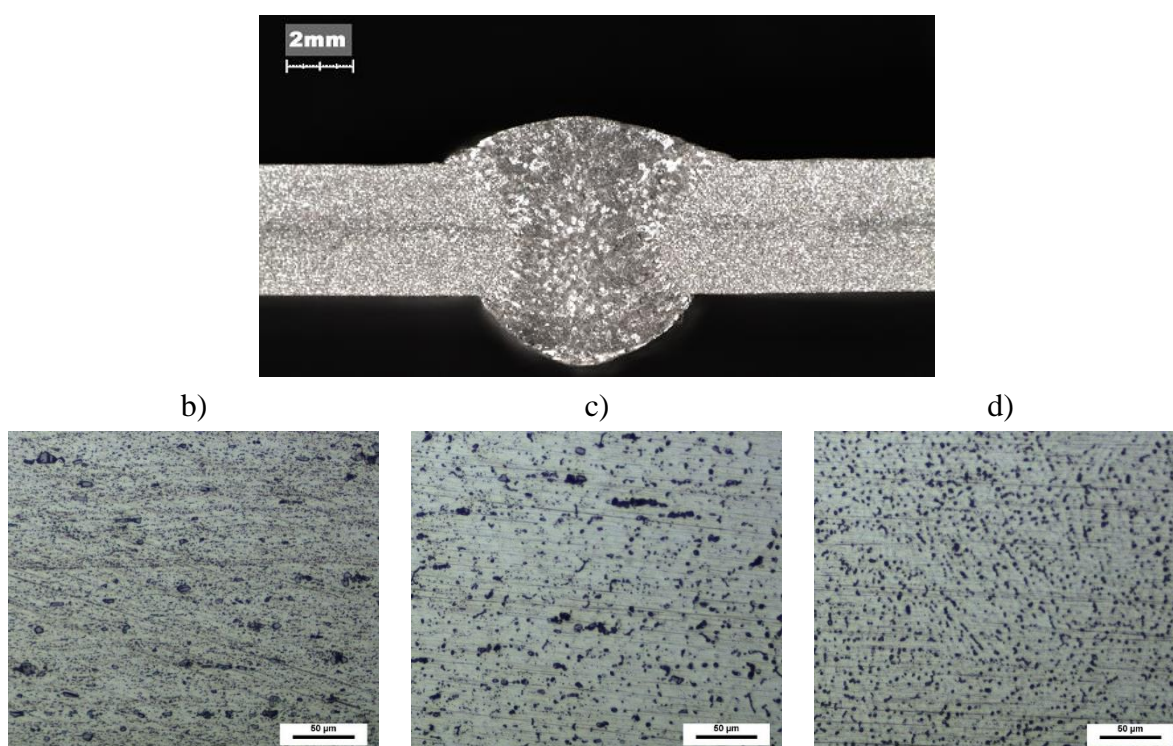


Rys. 3. Przykładowe zdjęcia makro- i mikroskopowe złącza spawanego pobranego z płyty próbnej wykonanej wg wariantu nr 1 ($Q = 0,682$ kJ/mm): a - obraz makroskopowy złącza, b - obraz mikroskopowy materiału rodzimego, c - obraz mikroskopowy strefy wpływu ciepła, d - obraz mikroskopowy spoiny





Rys. 4. Przykładowe zdjęcia makro- i mikroskopowe złącza spawanego pobranego z płyty próbnej wykonanej wg wariantu nr 2 ($Q = 0,480$ kJ/mm): a - obraz makroskopowy złącza, b - obraz mikroskopowy materiału rodzimego, c - obraz mikroskopowy strefy wpływu ciepła, d - obraz mikroskopowy spoiny



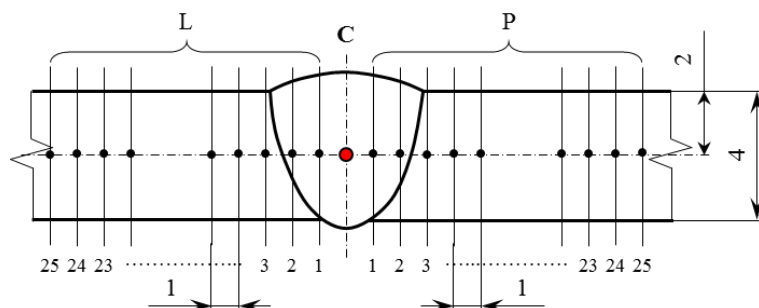
Rys. 5. Przykładowe zdjęcia makro- i mikroskopowe złącza spawanego pobranego z płyty próbnej wykonanej wg wariantu nr 3 ($Q = 0,273$ kJ/mm): a - obraz makroskopowy złącza, b - obraz mikroskopowy materiału rodzimego, c - obraz mikroskopowy strefy wpływu ciepła, d - obraz mikroskopowy spoiny

2.4. Badania twardości

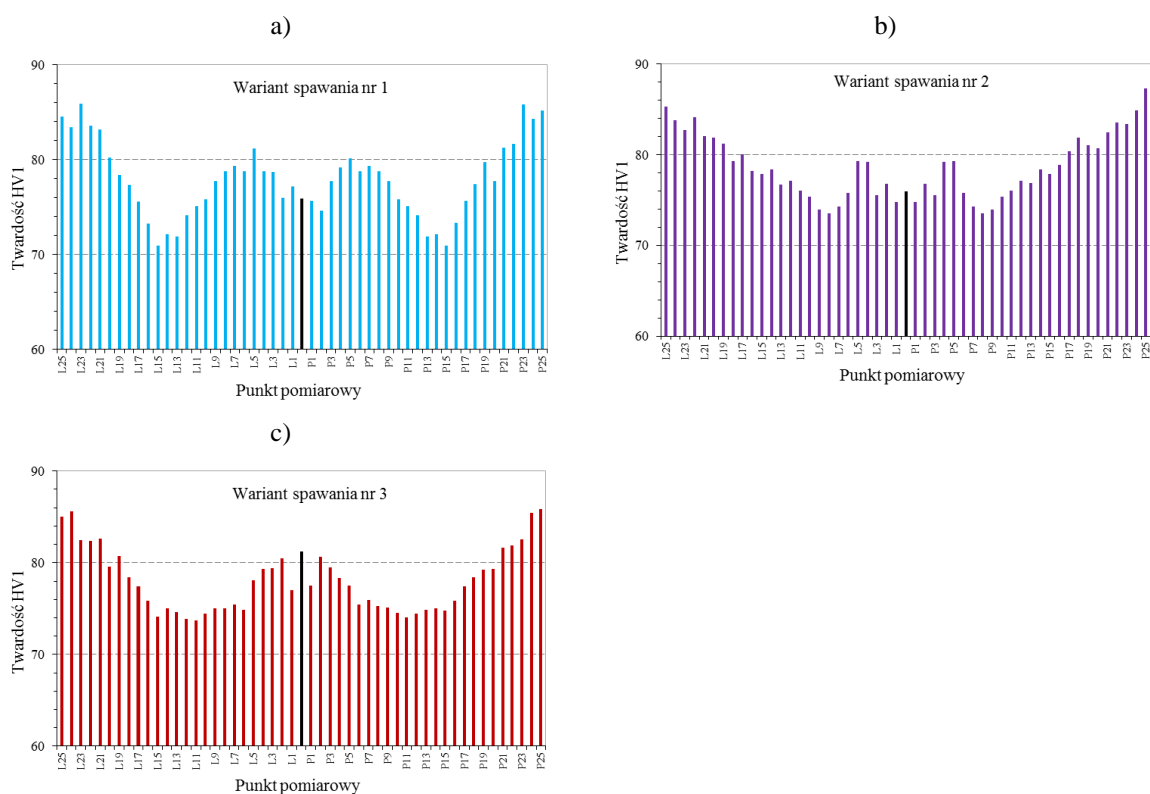
Złącza spawane poddano pomiarowi twardości metodą Vickersa według normy PN-EN ISO 6507-1:2018-05 pt. „*Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badania*”. Powierzchnie w miejscu pomiaru i styku próbki ze stolikiem były wolne od zanieczyszczeń i tlenków, a jej chropowatość była mniejsza od $Ra = 2,5$ μm . Podczas badań stosowano wgłębnik w postaci czworobocznego foremego ostrosłupa diamentowego o kącie wierzchołkowym 136° . Obciążenie pomiarowe wynosiło $F = 9,81$ N, a czas obciążania wynosił

10s. Badania twardości przeprowadzono za zastosowaniem twardościomierza firmy HUATEC HV-10.

Pomiary twardości przeprowadzono na przygotowanych próbkach zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6. Wyniki badań próbek przedstawiono w rysunku 7.



Rys. 6. Schemat pomiarów twardości złączy spawanych



Rys. 7. Przebieg zmian uśrednionej twardości HV1 w złączu spawanym wykonanym wg wariantu: a - nr 1 ($Q = 0,682$ kJ/mm), b - nr 2 ($Q = 0,480$ kJ/mm), c - nr 3 ($Q = 0,273$ kJ/mm)

2.5. Badania wytrzymałości w warunkach obciążeń statycznych

W ramach badań przeprowadzono statyczną próbę rozciągania zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 6892-1:2020-05, pt. „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”. Parametrem sterującym podczas badań było przemieszczenie tłoka maszyny wynoszące $v = 0,05$ mm/s.

Badania właściwości blach ze stopu aluminium EN AW-5754 przeprowadzono na próbkach, których postać geometryczną przedstawiono na rysunku 2.a. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości statyczne blachy ze stopu EN AW-5754

Kierunek pobrania próbek z arkusza blachy	Miara statystyczna	Właściwości statyczne blachy				
		R _{p0,2}	R _m	E	A	Z
		MPa	MPa	MPa	%	%
Wzdłuż kierunku walcowania	Średnia arytmetyczna	150,4	310,5	71 896	25,6	33,2
	Odchylenie stand.	2,4	7,1	554	3,5	0,4
Poprzecznie do kierunku walc.	Średnia arytmetyczna	111,1	217,6	68 645	27,2	31,4
	Odchylenie stand.	0,7	0,1	776	1,3	1,1

Badania właściwości złączy spawanych przeprowadzono na próbkach, których postać geometryczną przedstawiono na rysunku 2.b. Wyników badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki badań złączy spawanych w warunkach obciążeń statycznych

Ilość wprowadzonego ciepła Q	Miara statystyczna	Właściwości statyczne złączy spawanych			
		R _{p0,2}	R _m	A	Z
		MPa	MPa	%	%
Q = 0,682 kJ/mm	Średnia arytmetyczna	111,9	310,8	14,4	16,2
	Odchylenie stand.	12,8	6,0	2,6	0,4
Q = 0,480 kJ/mm	Średnia arytmetyczna	137,0	310,4	12,9	16,4
	Odchylenie stand.	8,7	3,2	0,9	0,6
Q = 0,273 kJ/mm	Średnia arytmetyczna	139,6	314,5	19,1	28,2
	Odchylenie stand.	0,9	0,2	0,6	1,8

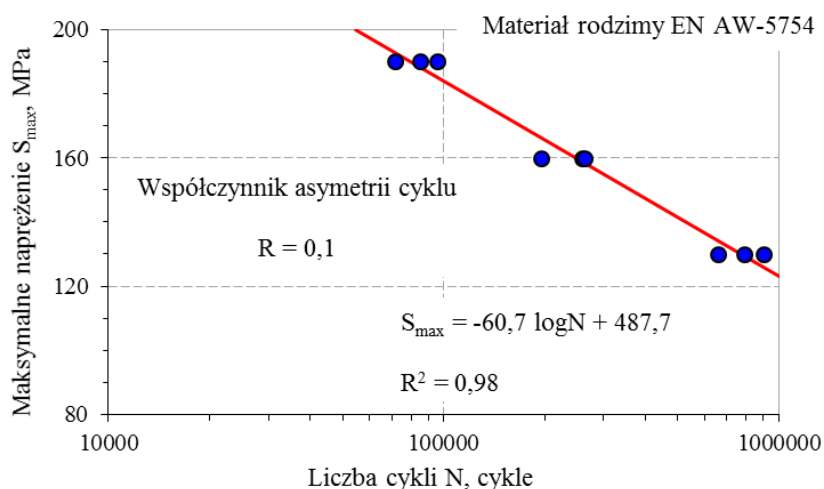
2.5. Badania wytrzymałości w warunkach obciążeń zmiennych

Badania blachy oraz złączy spawanych w warunkach obciążeń zmiennych przeprowadzono z zastosowaniem obciążeń sinusoidalnych o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$. Parametrem sterującym podczas badań było naprężenie. Częstotliwość zmian obciążenia wynosiła $f = 5$ Hz. Badania przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej firmy MTS.

Badania właściwości zmęczeniowych blach przeprowadzono na próbkach (rys. 2.a) pobranych z arkusza blachy zgodnie z kierunkiem walcowania. Wartości poziomów maksymalnych naprężeń przyjętych w badaniach blach wynosiły:

- I poziomu obciążeń wynosiła $S_{\max} = 190$ MPa,
- II poziomu obciążeń wynosiła $S_{\max} = 160$ MPa,
- III poziomu obciążeń wynosiła $S_{\max} = 130$ MPa.

Wyników badań blachy w postaci wykresu trwałości zmęczeniowej w układzie semilogarytmicznym (S_{\max} - N) przedstawiono na rysunku 8.

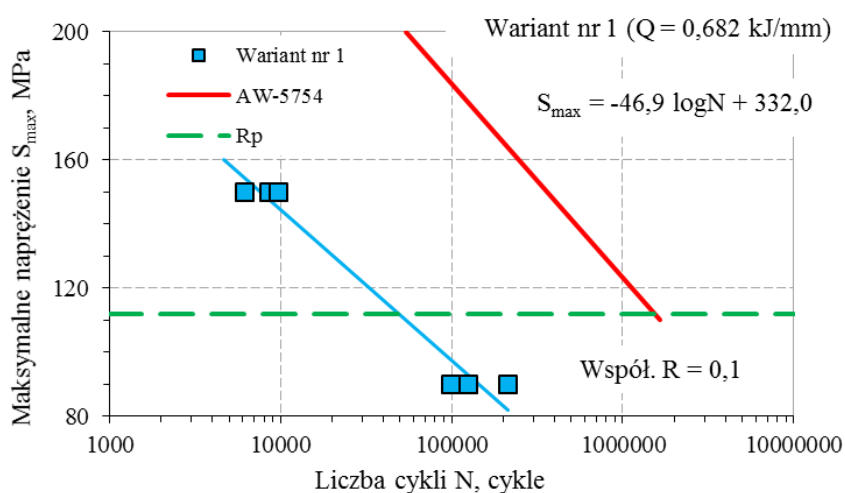


Rys. 8. Wykres trwałości zmęczeniowej blachy ze stopu EN AW-5754

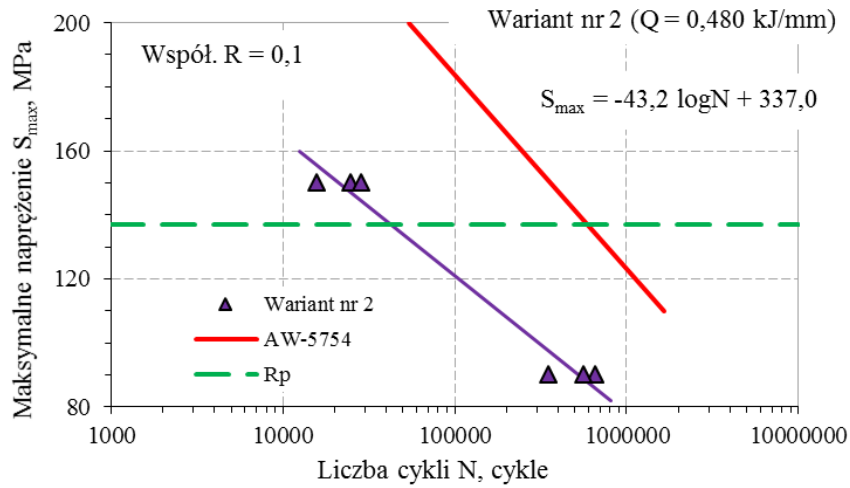
Badania właściwości zmęczeniowych złączy spawanych przeprowadzono na próbkach przedstawionych na rysunku 2.b. Wartości poziomów maksymalnych napiężeń przyjętych w badaniach złączy spawanych wynosiły:

- I poziomu obciążeń wynosiła $S_{\max} = 150$ MPa,
- II poziomu obciążeń wynosiła $S_{\max} = 90$ MPa.

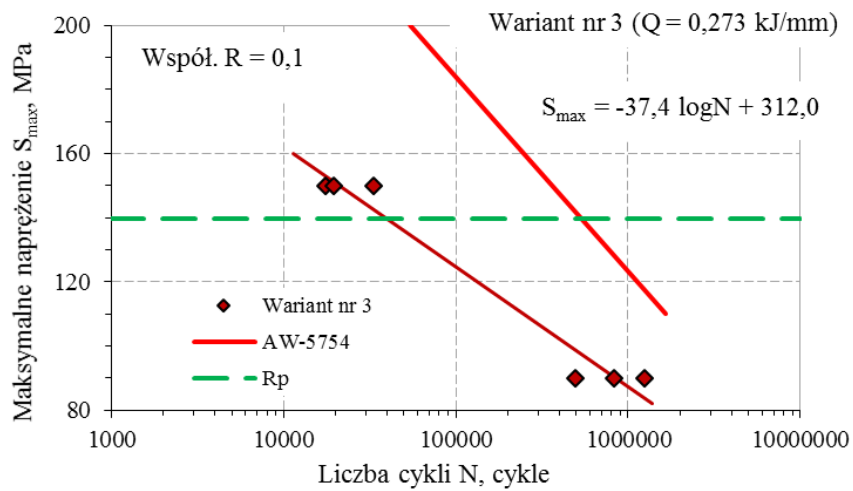
Wyników badań złączy spawanych w postaci wykresu trwałości zmęczeniowej w układzie semilogarytmicznym (S_{\max} - N) przedstawiono na rysunkach od 9 do 11.



Rys. 9. Wykres trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wykonanych wg wariantu nr 1



Rys. 10. Wykres trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wykonanych wg wariantu nr 2



Rys. 11. Wykres trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wykonanych wg wariantu nr 3

3. Analiza wyników badań

3.1. Analiza wyników badań uzyskanych w warunkach obciążeń statycznych

Przeprowadzone badania doświadczalne złączy spawanych wykonanych z różnymi parametrami spawania wykazały różnice w zakresie parametrów wytrzymałościowych w warunkach obciążeń statycznych. Spadek/wzrost wartości parametrów wytrzymałościowych złączy spawanych w stosunku do parametrów dla blachy EN AW-5754 przedstawiono w tabeli 4. Wartości różnicy δ_x pomiędzy parametrami obliczono ze wzoru (3):

$$\delta_x = ((X_{s0}) - X_B)/X_B \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

X_{s0} – wartość parametru wytrzymałościowego ($R_{p0,2}$, R_m , A , Z) dla złącza spawanego wykonanego według określonego wariantu parametrów (wariant nr: 1, 2, 3),

X_B – wartość parametru wytrzymałościowego ($R_{p0,2}$, R_m , A , Z) dla materiału rodzimego (blachy EN AW-5754).

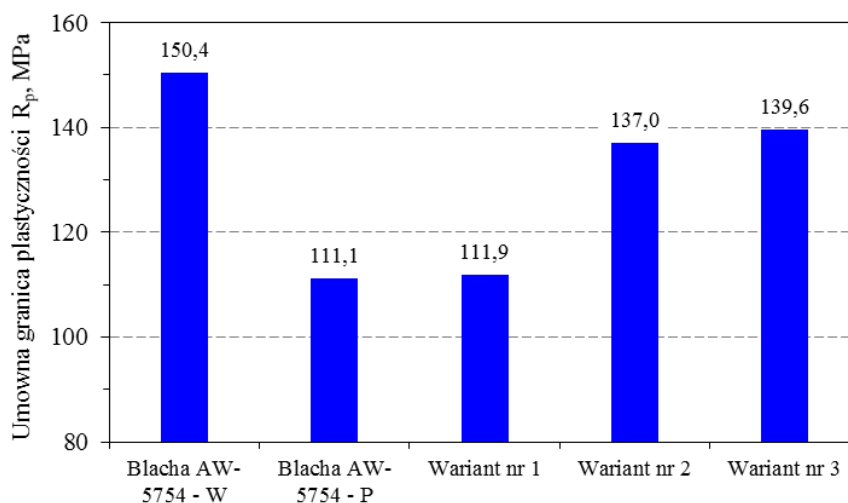
Tabela 4. Spadek/wzrost wartości parametrów wytrzymałościowych złączy spawanych w stosunku do wartości parametrów dla materiału rodzimego (blachy EN AW-5754)

Parametry wytrzymałościowe złączy spawanych					Blacha EN AW-5754			
					$R_{p0,2}$	R_m	A	Z
Wariant parametrów spawania	$R_{p0,2}$	R_m	A	Z	150,4	310,5	25,6	33,2
					MPa	MPa	%	%
Spadek/wzrost parametrów δ_x , %								
Wariant nr 1	111,9 MPa	310,8 MPa	14,4 %	16,2 %	-25,6	0,1	-43,8	-51,2
Wariant nr 2	137,0 MPa	310,4 MPa	12,9 %	16,4 %	-8,9	0,0	-49,6	-50,6
Wariant nr 3	139,6 MPa	314,5 MPa	19,1 %	28,2 %	-7,2	1,3	-25,4	-15,1

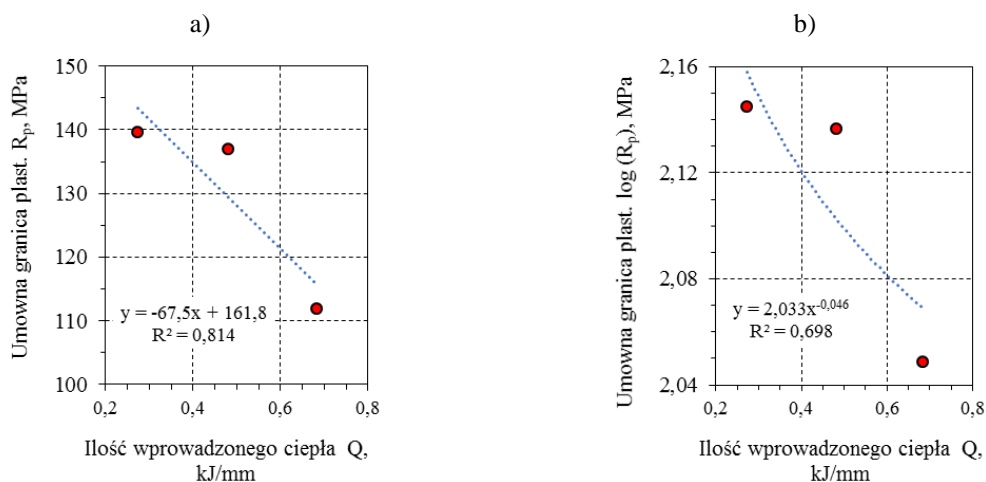
Na rysunku 12 przedstawiono wyniki badań umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ dla złączy spawanych na tle wyników dla blachy EN AW-5754. Spośród analizowanych wariantów spawania najwyższe wartości $R_{p0,2}$ uzyskano dla wariantu nr 3, która charakteryzowała się najniższą wartością ilości wprowadzonego ciepła $Q = 0,273$ kJ/mm. Spadek wartości umownej granicy plastyczności dla złącza spawanego ($R_{p0,2} = 139,6$ MPa) wynosi $\delta_x = 7,2\%$ w stosunku do umownej granicy plastyczności blachy EN AW-5754. Najniższą wartości $R_{p0,2}$ uzyskano dla wariantu spawania nr 1 charakteryzującego się najwyższą wartością parametru $Q = 0,682$ kJ/mm, co stanowiło spadek o wartość $\delta_x = 25,6\%$.

Na rysunku 13 przedstawiono zależność zmian umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ w funkcji ilości wprowadzonego ciepła Q . Badania wykazały, że na wartość umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ wpływa wartość ilości wprowadzonego ciepła Q użyta do wykonania złącza.

Wyniki badań blachy EN AW-5754 wzdłuż i poprzecznie do kierunku walcowania wykazują znaczącą różnicę. Spadek wartości umownej granicy plastyczności dla próbek pobranych poprzecznie do kierunku walcowania wynosi około 26,1%.

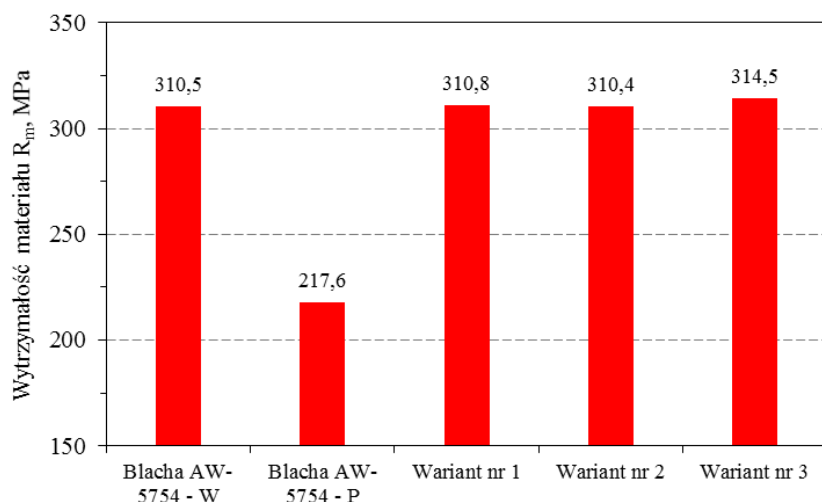


Rys. 12. Zestawienie wyników umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$



Rys. 13. Zależność $R_{p0,2} = f(Q)$ wyznaczona na podstawie wyników badań aproksymowana: a - funkcją liniową, b - funkcją potęgową

W przypadku analizy wytrzymałości na rozciąganie R_m stwierdzono, że wyniki badań uzyskane dla złączy spawanych są zgodne z wynikiem R_m dla materiału rodzimego (tj. blachy EN AW-5754 – wzdłuż kierunku walcowania). Zestawienie wyników przedstawiono na rysunku 14. Spadek wartości R_m wynoszący około 30,0% obserwuje się dla próbek pobranych z blachy EN AW-5754 poprzecznie do kierunku walcowania.



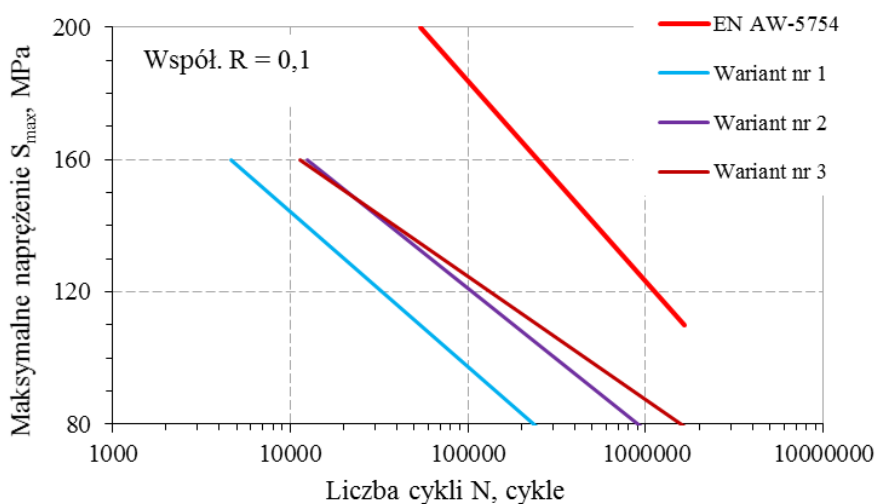
Rys. 14. Zestawienie wyników wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m

Na podstawie przeprowadzonych badań określono stosunek $R_{p0,2}/R_m$ dla:

- blachy EN AW-5754 wzdłuż kierunku walcowania – $R_{p0,2}/R_m = 0,484$,
- blachy EN AW-5754 poprzecznie do kierunku walcowania – $R_{p0,2}/R_m = 0,511$,
- złącza spawanego wykonanego wg wariantu nr 1 – $R_{p0,2}/R_m = 0,360$,
- złącza spawanego wykonanego wg wariantu nr 2 – $R_{p0,2}/R_m = 0,441$,
- złącza spawanego wykonanego wg wariantu nr 3 – $R_{p0,2}/R_m = 0,444$.

3.2. Analiza wyników badań uzyskanych w warunkach obciążeń zmiennych

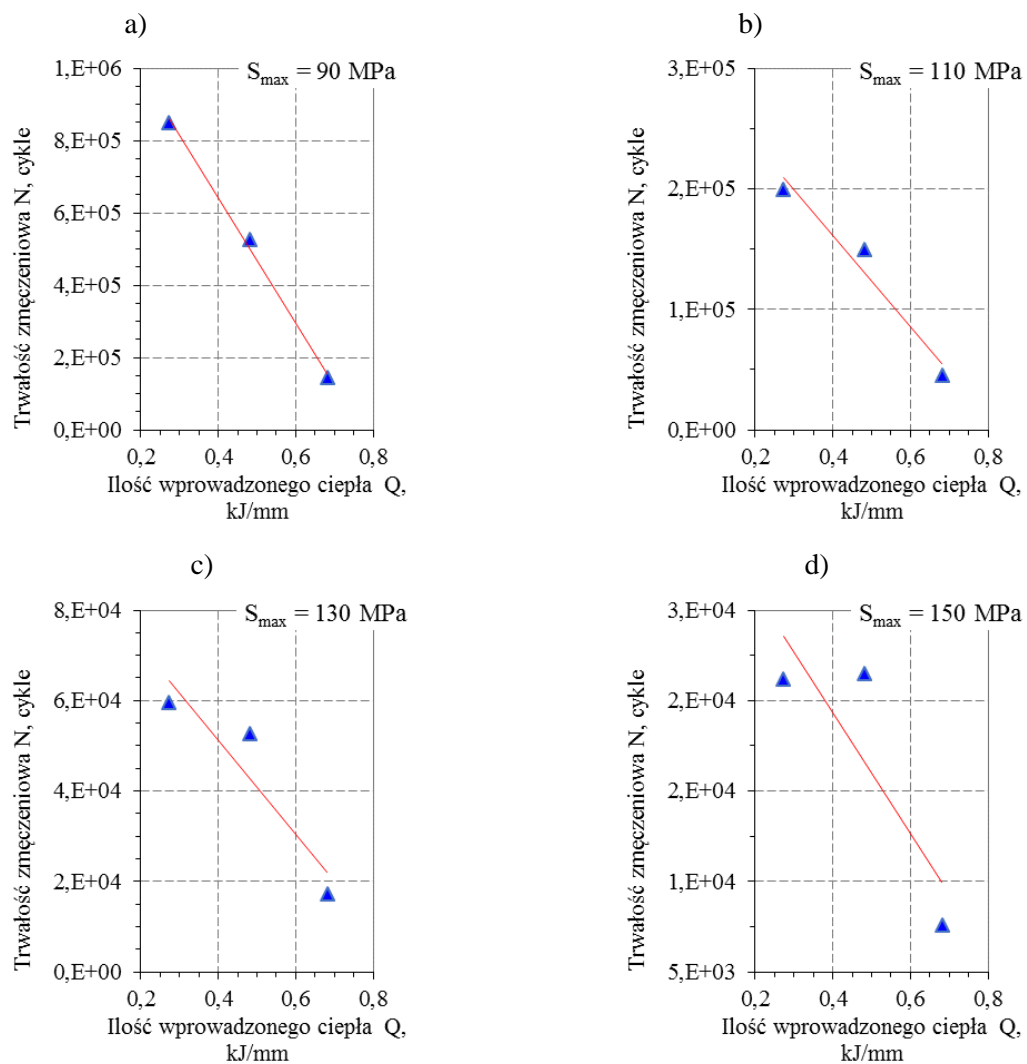
W wyniku przeprowadzonych badań w warunkach obciążeń zmiennych o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$ wyznaczono wykresy trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wykonanych dla przyjętych wariantów parametrów spawania. Zestawienie wykresów trwałości zmęczeniowej złączy spawanych przedstawiono na tle wykresu trwałości dla blachy ze stopu EN AW-5754 (rys. 15).



Rys. 15. Zestawienie wyników badań trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wg przyjętych wariantów parametrów spawania

Analiza wyników wskazuje istotne różnice wartości pomiędzy trwałością zmęczeniową dla złączy spawanych wykonanych wg wariantu nr 1 a wynikami uzyskanymi dla wariantu nr 2 oraz nr 3 na wszystkich poziomach maksymalnych naprężeń S_{max} . Porównanie wyników trwałości dla złączy spawanych wykonanych wg wariantu nr 2 i nr 3 wskazuje, że w zakresie naprężeń S_{max} od 80 MPa do 140 MPa wyższą trwałością charakteryzuje się złącze wykonane wg wariantu nr 3, natomiast dla zakresu zmian naprężeń S_{max} od 150 MPa do 160 MPa wyższą trwałością charakteryzuje się złącze wykonane wg wariantu nr 2.

Oceniając wpływ ilość wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q na trwałość zmęczeniową N złączy spawanych przygotowano wykresy zależności $N = f(Q, S_{max})$ przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Zależność $N = f(Q, S_{max})$ na wybranych poziomach maksymalnych naprężeń: a - $S_{max} = 90$ MPa, b - $S_{max} = 110$ MPa, c - $S_{max} = 130$ MPa, d - $S_{max} = 150$ MPa,

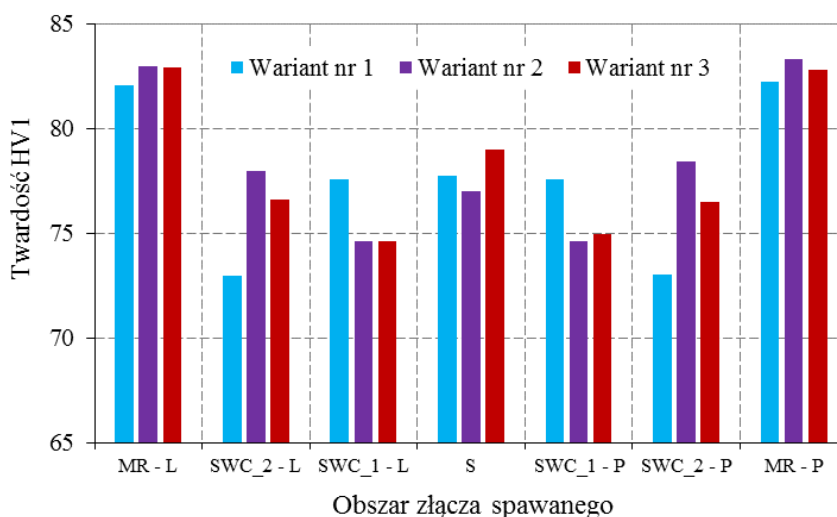
Z przedstawionych danych wynika, że dla poziomu maksymalnych naprężeń $S_{max} = 90$ MPa widoczna jest zależność liniowa pomiędzy ilością wprowadzonego ciepła Q a trwałością zmęczeniową N . Wraz ze wzrostem wartości maksymalnych naprężeń S_{max}

dopasowanie linii aproksymacyjnej do wyników badań maleje, co wynika ze spadku wartości współczynnika determinacji R^2 .

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wykonanych wg przyjętych wariantów parametrów spawania można stwierdzić, że istnieje związek ilością wprowadzonego ciepła Q a trwałością zmęczeniową N . Najniższą trwałość uzyskano dla złączy wykonanych wg wariantu nr 1 ($Q = 0,682$ kJ/mm), natomiast najwyższą trwałość uzyskano dla złączy wykonanych wg wariantu nr 3 ($Q = 0,273$ kJ/mm).

3.3. Analiza wyników badań twardości złączy spawanych

Na podstawie analizy makrostruktury spoin oraz wyników pomiarów twardości w obszarze złącza spawanego wydzielono: spoinę, strefę wpływu ciepła położoną przy spoinie, strefę wpływu ciepła położoną przy materiale rodzimym oraz materiał rodzimy. Wskazane obszary wydzielono po lewej i prawej stronie spoiny. Następnie na podstawie wyników pomiarów wyznaczono średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe twardości HV1. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 17.

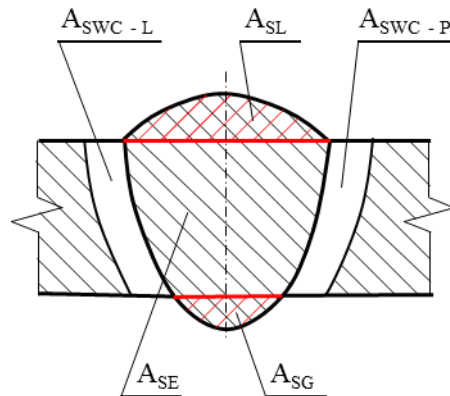


Rys. 17. Zestawienie wartości średnich twardości HV1 w określonych obszarach złączy spawanych wykonanym wg określonych wariantów

Uzyskane wyniki wskazują, że ilością wprowadzonego ciepła do złącza spawanego Q wpływa na twardość materiału w strefie wpływu ciepła. Dla wariantu nr 1 twardość materiału w strefie wpływu ciepła przylegającej do spoiny była większa od twardości w strefie wpływu ciepła przylegającej do materiału rodzimego. W przypadku złączy spawanych wykonywanych wg wariantu nr 2 i nr 3 wyższe wartości twardości uzyskano w strefie wpływu ciepła przylegającej do spoiny. Najniższe wartości twardości HV1 wyznaczono w strefie wpływu ciepła przylegającej do materiału rodzimego dla wariantu nr 1, co może tłumaczyć obniżenie właściwości mechanicznych tego złącza.

3.4. Analiza wyników badań struktury złączy spawanych

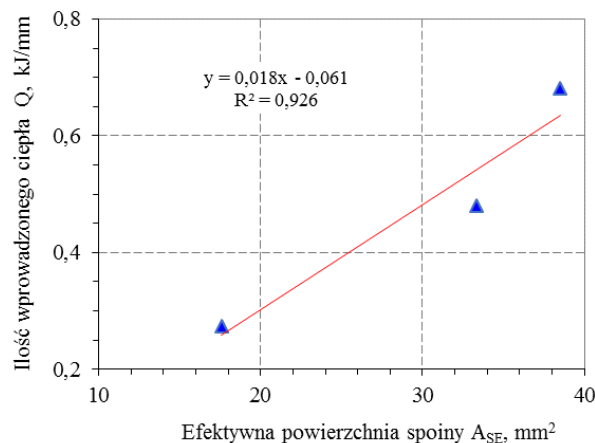
Badania makro- i mikrostruktury złączy spawanych wykonanych dla różnych wariantów parametrów spawania metodą MIG pozwoliły na przeprowadzenie analiza wielości obszarów wymienionych złączy. Na rysunku 18 przedstawiono schemat oznaczenia poszczególnych obszarów wchodzących w skład złącza. Pomiary obszarów złącza przeprowadzono przy użyciu posiadanych zdjęć makroskopowych. Wartości pól powierzchni poszczególnych obszarów obliczono przy użyciu programu AutoCad. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 18. Schemat obliczeń pól powierzchni poszczególnych obszarów złącza spawanego: A_{SWC-L} – strefy wpływu ciepła po lewej stronie spoiny, A_{SWC-P} – strefy wpływu ciepła po prawej stronie spoiny, A_{SL} – nadlew spoiny od strony lica, A_{SG} – nadlew spoiny od strony grani, A_{SE} – efektywna powierzchnia spoiny

Tabela 5. Powierzchnia obszarów złącza spawanego wykonana wg różnych wariantów parametrów spawania

Wariant spawania	Obszar złącza spawanego				
	A_{SWC-L}	A_{SWC-P}	A_{SL}	A_{SG}	A_{SE}
	mm ²				
Wariant nr 1	3,52	3,45	9,43	13,81	38,55
Wariant nr 2	3,49	3,22	8,52	15,76	33,24
Wariant nr 3	2,71	2,37	7,21	8,94	17,61



Rys. 19. Zależność $Q = f(A_{SE})$ wyznaczona na podstawie wyników badań

Na podstawie wyników badań wyznaczono zależność ilości wprowadzonego ciepła Q w funkcji efektywnej powierzchni spoin A_{SE} (rys. 19). Wyznaczona zależność $Q = f(A_{SE})$ wskazuje, że efektywna powierzchnia spoiny jest zależna od energii cieplnej zużytej do wykonania złącza spawanego. Ta zależność jest wprost proporcjonalna co oznacza, że wraz ze wzrostem ilości wprowadzonego ciepła Q podczas procesu spawania wzrasta wielkość czynna przekroju spoiny.

Analiza zdjęć makrostruktur złączy spawanych wskazuje, że wraz ze wzrostem ilości wprowadzonego ciepła użytego w procesie spawania zauważono zróżnicowany rozrost ziaren roztworu stałego α . Mikrostruktura każdego z wykonanych wariantów złącza cechowała się strukturą dendrytyczną z występującym w przestrzeniach międzydendrytycznych roztworem stałym α oraz drobnodispersyjnymi wydzieleniami faz międzymetalicznych. Wielkość tych faz zmieniała się w zależności od ilości wprowadzonego ciepła Q . Dla złącza spawanego wykonanego wg wariantu nr 1 – wydzielenia były największe o małej gęstości występowania, zaś zmniejszanie wartości energii cieplnej spawania przyczyniało się do zmniejszania wielkości wydzieleni, a ich gęstość rosła. Budowa mikroskopowa złącza spawanego była bardziej zwarta i skoagulowana dla próbki spawanej z najniższą wartością parametru Q .

Analiza strefy wpływu ciepła dla trzech badanych wariantów spawania różni się wielkością i kształtem ziarna. Wraz ze spadkiem ilości wprowadzonego ciepła Q zauważa się łagodniejsze przejście pomiędzy mikrostrukturą spoiny a materiałem rodzimym. W przypadku wariantu nr 1 granice te są najbardziej uwypuklone przez rozrost ziarna i zarejestrowany front krystalizacji spoiny w kierunku najłatwiejszej drogi odprowadzania ciepła (tj. do strefy przypowierzchniowej blachy oraz w kierunku materiału rodzimego).

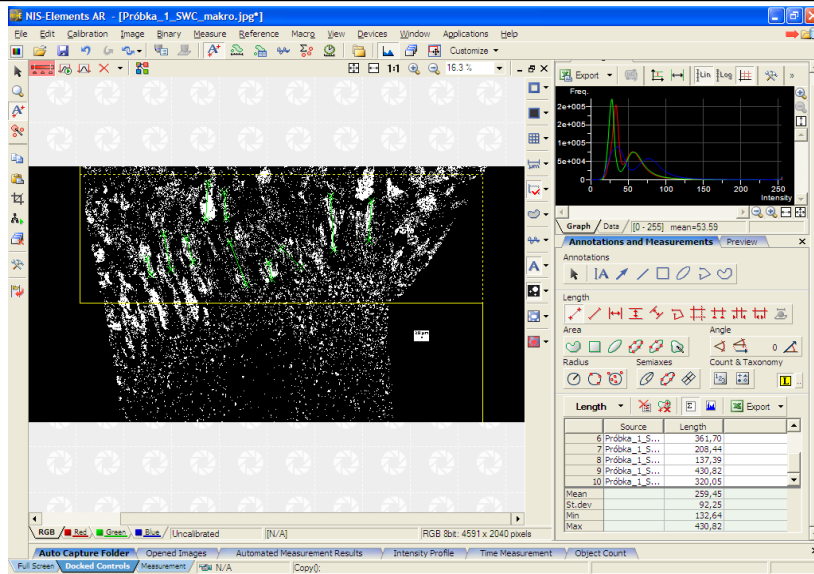
Potwierdzeniem zjawisk zachodzących w obszarze SWC badanych złączy spawanych wykonanych z użyciem różnych ilości wprowadzonego ciepła Q są wyniki analiza obrazów makrostruktur (rys. 20). Komputerowej analizie obrazu poddano obrazy makrostruktur złączy spawanych za pomocą programu NIS Elements 3,0 AR.

Wyniki komputerowej analizie obrazu pozwoliły na wyznaczenie średniej długości ziarn dla:

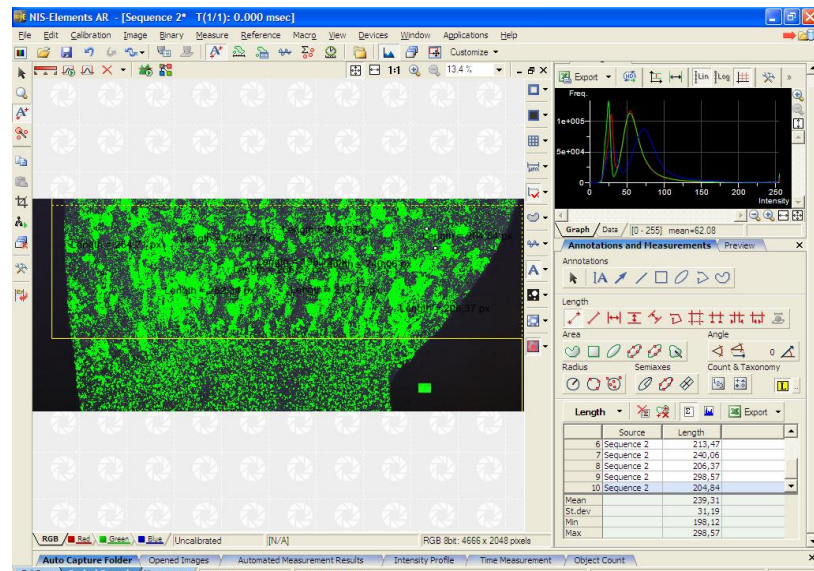
- a) $Q = 0,682 \text{ kJ/mm} - 259,45 \text{ } \mu\text{m} \pm 92,25 \text{ } \mu\text{m}$,
- b) $Q = 0,480 \text{ kJ/mm} - 229,31 \text{ } \mu\text{m} \pm 31,19 \text{ } \mu\text{m}$,
- c) $Q = 0,273 \text{ kJ/mm} - 178,70 \text{ } \mu\text{m} \pm 21,89 \text{ } \mu\text{m}$.

Czas krystalizacji ziarna w obszarze spoiny i strefy wpływu ciepła jest zdecydowanie dłuższy dla złącza spawanego wykonanego przy użyciu największej wartości energii cieplnej (ilości wprowadzonego ciepła $Q = 0,682 \text{ kJ/mm}$), co przedkłada się bezpośrednio na wymiar geometryczny ziarna. Wiążąc wyniki badań złączy spawanych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych z wynikami badań makrostruktury strefy wpływu ciepła można stwierdzić, że wielkość ziarna wpływa na właściwości statyczne i zmęczeniowe wykonanych złączy spawanych.

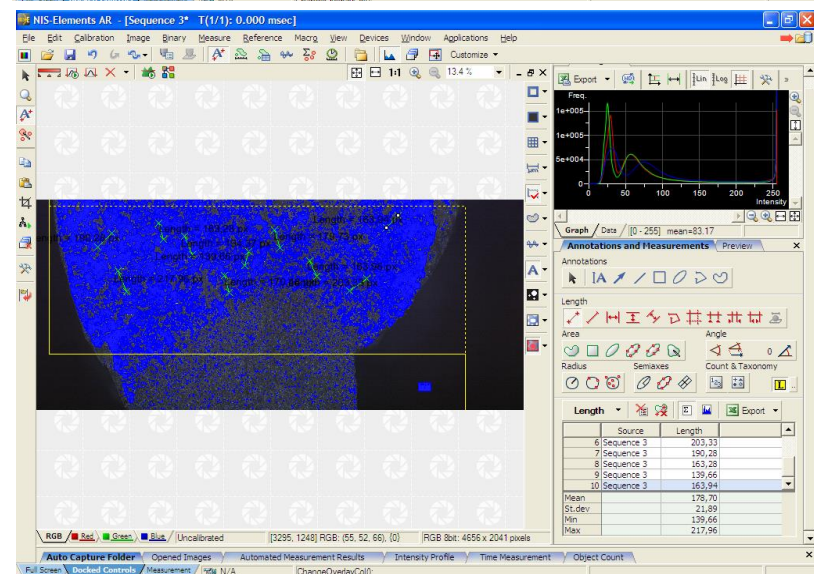
a)



b)



c)



Rys. 20. Obliczenia średniej długości ziarna w obszarze SWC dla złącza spawanego wykonanego wg: a - wariantu nr 1, b - wariantu nr 2, c - wariantu nr 3

4. Wnioski i spostrzeżenia z realizacji badań

Osiągnięciem naukowym pracy jest wyznaczenie wpływu ilości wprowadzonego ciepła Q na właściwości złączy w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych wynikające ze zmiany struktury materiału i cech geometrycznych złącza spawanego stopu EN AW-5754. Postać mikrostruktury metalograficznej złącza spawanego jest ściśle związana z ilością energii cieplnej dostarczonej podczas procesu spawania, a jej morfologia bezpośrednio przekłada się na właściwości mechaniczne.

Sformułowana teza badawcza o treści: „*Ilość energii cieplnej zużytej do wykonania złącza spawanego ze stopu aluminium EN AW-5754 wpływa na jego wytrzymałość i trwałość zmęczeniową*”, może być przyjęta na podstawie uzyskanych wyników testów. Wyniki wskazują, że niska wartość ilości wprowadzonego ciepła Q użyta do poprawnie wykonanego złącza pozwala na uzyskanie:

- a) najwyższej umownej granicy plastyczności złącza spawanego blach,
- b) najwyższej trwałości zmęczeniowej złącza spawanego blach,

w porównaniu do wyników uzyskanych dla innych wartości wprowadzonego ciepła spawania. Zauważone zmiany właściwości mechanicznych są ściśle związane z morfologią kształtowania się mikrostruktury w obszarze strefy wpływu ciepła.

Analiza wyników badań doświadczalnych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej pt.: „*Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa złączy spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754*” pozwoliła na sformułowanie szeregu uwag i wniosków:

- a) doświadczalna weryfikacja trwałości zmęczeniowej próbek złączy spawanych, wykonanych metodą 131 z różną ilością wprowadzonego ciepła Q , wykazała:
 - różnice w trwałości zmęczeniowej dla badanych złączy spawanych,
 - najwyższą trwałość złącza spawanego wykonanego z najniższą ilością wprowadzonego ciepła do złącza spawanego $Q = 0,273$ kJ/mm,
 - zależność pomiędzy ilością wprowadzonego ciepła Q a trwałością zmęczeniową złączy, na którą istotny wpływ ma także wartość maksymalnych naprężeń w cyklu obciążenia,
- b) badania doświadczalne złączy spawanych w warunkach obciążeń statycznych wykazały:
 - związek pomiędzy spadkiem wartości umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ złączy spawanych a wartością ilości wprowadzonego ciepła Q ; wraz ze wzrostem wartości ilości wprowadzonego ciepła Q spada wartość umownej granicy plastyczności,
 - brak zmiany wartości wytrzymałości na rozciąganie złączy spawanych w porównaniu do wytrzymałości na rozciąganie R_m blachy EN AW-5754; świadczy to o poprawnie przeprowadzonym procesie spawania wszystkich próbek użytych w badaniach,

-
- dla wariantu parametrów spawania nr 2 ($Q = 0,480$ kJ/mm) i nr 3 ($Q = 0,273$ kJ/mm) stosunek $R_{p0,2}/R_m$ wynosił odpowiednio 0,441 i 0,444; podane wartości były zbliżone do wartości dla blachy EN AW-5754 wynoszącej $R_{p0,2}/R_m = 0,484$,

c) badania twardości powierzchniowej HV1 złączy spawanych wykazały:

- że, przebieg zmian wartości twardości wszystkich badanych złączy spawanych odpowiadają znanym z literatury przebiegom zmian wymienionego parametru,
- najniższe wartości twardości uzyskano w strefie wpływu ciepła dla każdego złącza i wynosiły:
 - dla wariantu nr 1 ($Q = 0,682$ kJ/mm) – 70,9 HV1 i 71 HV1,
 - dla wariantu nr 2 ($Q = 0,480$ kJ/mm) – 73,6 HV1 i 73,6 HV1,
 - dla wariantu nr 3 ($Q = 0,273$ kJ/mm) – 73,7 HV1 i 74,0 HV1,

d) badania makro- i mikrostruktury wykazały:

- ściłą zależność pomiędzy ilością wprowadzonego ciepła Q do złącza spawanego a wielkością ziarn krystalizujących w obszarze strefy wpływu ciepła; wraz ze wzrostem ilości wprowadzonego ciepła do złącza Q wzrasta wielkość ziarna,
- wielkość ziarn w obszarze wpływu ciepła wpływa na właściwości mechaniczne złącza, w tym na jego trwałość zmęczeniową.

Odnosząc się do wyników uzyskanych podczas realizacji rozprawy doktorskiej można sformułować następujące wnioski:

a) przeprowadzone badania doświadczalne w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych blachy EN AW-5754 i złączy spawanych pozwoliły na wyznaczenie wytrzymałości materiału na rozciąganie R_m i granicy zmęczenia Z_{rj} dla liczby cykli $N = 2 \cdot 10^6$ cykli. Na podstawie wskazanych parametrów można określić wartość współczynnika wynoszącego dla:

- blachy EN AW-5754 – $Z_{rj} = 105$ MPa, $R_m = 310,5$ MPa; $Z_{rj}/R_m = 0,34$,
- złącza wg wariantu nr 1 – $Z_{rj} = 36,4$ MPa, $R_m = 310,8$ MPa; $Z_{rj}/R_m = 0,12$,
- złącza wg wariantu nr 2 – $Z_{rj} = 65,0$ MPa, $R_m = 310,4$ MPa; $Z_{rj}/R_m = 0,21$,
- złącza wg wariantu nr 3 – $Z_{rj} = 76,1$ MPa, $R_m = 314,5$ MPa; $Z_{rj}/R_m = 0,24$.

Najwyższą wartość uzyskano dla złącza spawanego wykonanego wg wariantu nr 3 tj. ilość wprowadzonego ciepła $Q = 0,273$ kJ/mm. Uogólniona wartość dla stopów aluminium podawana w literaturze wynosi 0,48.

b) wydajność procesu spawania dla przyjętych wartości ilości wprowadzonego ciepła Q jest następująca:

- $Q = 0,682$ kJ/mm:
 - średnia moc prądu elektrycznego $P = 5,04$ kW,
 - długość złącza wykonanego w ciągu 1 godziny $L = 21,3$ m/h,
 - $Q = 0,480$ kJ/mm:
 - średnia moc prądu elektrycznego $P = 4,00$ kW,
 - długość złącza wykonanego w ciągu 1 godziny $L = 24,0$ m/h,
 - $Q = 0,273$ kJ/mm:
-

- średnia moc prądu elektrycznego $P = 2,50 \text{ kW}$,

- długość złącza wykonanego w ciągu 1 godziny $L = 26,4 \text{ m/h}$,

c) efektywne pole powierzchni A_{SE} spoiny złącza spawanego rośnie wprost proporcjonalnie z ilością wprowadzonego ciepła Q (w analizowanym zakresie), tym samym wzrasta kosztocłonność realizacji procesu spawania; wzrost pola powierzchni nie przekłada się bezpośrednio na właściwości mechaniczne.