

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY INŻYNIERIA
MECHANICZNA**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Wojciech Ziółkowski

**Analiza odporności na pękanie połączeń
doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych
tarciovo metodą FSW**

***Analysis of fracture toughness of S355/AA6061-
T6 friction stir welded butt joints***

DZIEDZINA: nauki inżynieryjno-techniczne
DYSCYPLINA: inżynieria mechaniczna

PROMOTOR

prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Robert Kosturek

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

Bydgoszcz, 2025

Podziękowania

Na wstępie pragnę wyrazić głęboką wdzięczność moim Promotorom, prof. dr hab. inż. Dariuszowi Borońskiemu oraz dr inż. Robertowi Kosturkowi, których wsparcie, cierpliwość i inspirujące wskazówki były nieocenione na każdym etapie powstawania tej pracy. Ich wiedza, zaangażowanie oraz życzliwość pozwoliły mi poszerzać horyzonty badawcze i nieustannie podnosić poziom moich aspiracji naukowych.

Szczególne słowa podziękowania kieruję do mojej Żony i Syna – za miłość, wyrozumiałość i nieustające wsparcie. To dzięki Wam miałem siłę i motywację, aby dążyć do celu, nawet w chwilach zwątpienia. Wasza obecność była dla mnie największym źródłem otuchy i radości.

Z całego serca dziękuję również moim Rodzicom – za wychowanie, cierpliwość, a przede wszystkim za wiarę we mnie i nieustanne wsparcie na wszystkich etapach życia. To fundament, na którym mogłem budować swoje plany i marzenia.

Wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób przyczynili się do powstania tej rozprawy, wyrażam swoją głęboką wdzięczność.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI

symbol	jednostka	opis
R_m	MPa	wytrzymałość na rozciąganie
R_{eh}	MPa	górną granicę plastyczności
$R_{0.2}$	MPa	umowną granicę plastyczności
A_{gt}	%	całkowite wydłużenie przy R_m
E	MPa	moduł Younga
ε	mm/mm	odkształcenie
σ	MPa	naprężenie
a	mm	całkowita długość pęknięcia
b	mm	długość niepękniętej części próbki CT
W	mm	wymiar nominalny próbki CT
B	mm	grubość próbki CT
v	mm	wartość rozwarcia ekstensometru COD
Δv	mm	zmiana wartości rozwarcia ekstensometru COD
P	N	wartość siły
ΔP	N	zmiana wartości siły
R	mm	promień obrotu linii środkowej pęknięcia
θ	rad	kąt obrotu sztywnego elementu bryły wokół nieprzerwanej linii środkowej
K	MPa $\cdot\sqrt{m}$	współczynnik intensywności naprężeń
ν	-	współczynnik Poissona
J_Q	kJ/m ²	wartość tymczasowa (quasi-krytyczna) całki J wyznaczona eksperymentalnie na podstawie próby pękania
J_{IC}	kJ/m ²	krytyczna wartość całki J

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW

skrót	opis
FSW	zgrzewanie tarciove z przemieszaniem
I	interfejs, linia styku łączonych materiałów w zgrzeinie
WNZ	jądro zgrzeiny (ang. Weld Nugget Zone)
TMAZ	strefa cieplno-plastyczna (ang. Thermo-Mechanically Affected Zone)
HAZ	strefa wpływu ciepła (ang. Heat Affected Zone)
BM	materiał bazowy (ang. Base Material)
AS	strona natarcia (ang. Advancing Side)
RS	strona spływu (ang. Retreating Side)
IMC	związki intermetaliczne (ang. Intermetallic compounds)
PSO	płaski stan odkształcenia
PSN	płaski stan naprężenia
CT St	próbka do badania odporności na pękanie stali
CT Al	próbka do badania odporności na pękanie stopu aluminium
CT_FSW_I	próbka do badania odporności na pękanie połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w interfejsie
CT_FSW_WNZ	próbka do badania odporności na pękanie połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w jądrze zgrzeiny
CT_FSW_TMAZ	próbka do badania odporności na pękanie połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w strefie cieplno-plastycznej
xxx_yyy_zzz	przyjęty sposób identyfikacji zgrzeiny według zmienianych parametrów procesowych gdzie xxx to prędkość obrotowa narzędzia, yyy to wartość parametru offset a zzz to prędkość posuwu
offset	wartość odległości między tworzącą trzpienia a linią styku łączonych materiałów

SPIS TREŚCI

1.	Wstęp.....	8
1.1.	Geneza wyboru tematu.....	8
1.2.	Cel pracy.....	11
1.3.	Zakres pracy	11
2.	Analiza literatury	12
2.1.	Proces wykonywania połączeń z wykorzystaniem metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem.....	12
2.2.	Zastosowanie połączeń FSW.....	18
2.3.	Przegląd Aktualnej wiedzy na temat aluminiowo- stalowych połączeń FSW.....	19
2.4.	Metody oceny Odporności na pękanie	25
2.5.	Wnioski do badań własnych.....	30
3.	Program badań własnych.....	31
4.	Obiekty badań.....	32
4.1.	Materiały bazowe	32
4.1.1.	Stop aluminium AA6061-T6.....	32
4.1.2.	Stal konstrukcyjna S355.....	32
4.2.	Połączenie S355/AA6061-T6 wykonane metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem.....	33
4.3.	Próbki badawcze.....	35
4.3.1.	Próbki do badań właściwości mechanicznych materiałów bazowych.....	35
4.3.2.	Próbki do badań globalnych i lokalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6	36
4.3.2.1.	Próbki do badań globalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6	36
4.3.2.2.	Próbki do badań lokalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6	37
4.3.3.	Próbki do badania odporności na pękanie materiałów bazowych oraz połączenia S355/AA6061-T6	38
5.	Metody i stanowiska badawcze	40
5.1.	Makro i mikrostruktura.....	40

5.2. Mikrotwardość w przekroju poprzecznym zgrzeiny S355/AA6061-T6	40
5.3. Właściwości mechaniczne.....	41
5.3.1. Właściwości mechaniczne materiałów bazowych.....	42
5.3.2. Właściwości mechaniczne połączenia S355/AA6061-T6.....	42
5.3.3. Statyczne właściwości lokalne zgrzeiny S355/AA6061-T6.....	43
5.4. Naprężenia własne w zgrzeinie S355/AA6061-T6.....	44
5.5. Odporność na pękanie materiałów bazowych oraz połączenia S355/AA6061-T6	46
5.6. Analiza odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia	53
5.7. Fraktografia	53
6. Wyniki badań i ich analiza	54
6.1. Makro i mikrostruktura.....	54
6.1.1. Makrostruktura zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6	54
6.1.2. Mikrostruktura materiałów bazowych i zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6	55
6.3. Właściwości mechaniczne.....	64
6.3.1. Właściwości mechaniczne materiałów bazowych.....	64
6.3.2. Właściwości mechaniczne połączenia S355/AA6061-T6.....	67
6.3.3. Statyczne właściwości lokalne zgrzeiny S355/AA6061-T6.....	71
6.5. Odporność na pękanie materiałów bazowych oraz połączenia S355/AA6061-T6	76
6.6. Analiza odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia	83
6.7. Fraktografia	85
7. Wnioski.....	90
7.1. Wnioski z badań	90
7.2. Wnioski do dalszych badań	92
LITERATURA.....	93

1. WSTĘP

1.1. GENEZA WYBORU TEMATU

Zdecydowana większość konstrukcji maszyn i urządzeń współczesnego świata przemysłu wymaga łączenia poszczególnych elementów. Umiejętne dobranie metody łączenia i poprawne obliczenia węzła konstrukcyjnego są jednym z kluczowych etapów pracy inżyniera. Fizyczne zespolenie poszczególnych części musi spełnić szereg wymagań wytrzymałościowych i trwałościowych oraz wpływa m.in. na koszt produkcji, masę, odporność korozyjną czy szczelność konstrukcji.

Dążenie do lekkich, tanich w produkcji i przyjaznych środowisku konstrukcji to jedno z głównych celów nowoczesnego przemysłu. Aby sprostać wymaganiom klientów i stać się konkurencyjnym na rynku, inżynierowie bardzo często szukają alternatywnych metod łączenia. Coraz większą popularność zyskują połączenia materiałów różniamiennych. Połączenie różniamiennych stopów metali pozwala wykorzystać zalety obu materiałów bazowych. Najprostszym a zarazem jednym z najczęściej stosowanych sposobów jest zespolenie dwóch materiałów o odmiennych właściwościach poprzez połączenie mechaniczne takie jak śruby lub nity. Tego typu rozwiązania prowadzą do wzrostu masy i ograniczeń w geometrii konstrukcji [1].

Choć metody łączenia z wykorzystaniem nitów lub śrub pozwalają na szybkie i stosunkowo proste połączenie materiałów o odmiennych właściwościach fizykochemicznych, posiadają również wiele wad takich jak: koncentracja naprężeń, korozja galwaniczna i szczelinowa oraz źródło dodatkowej masy konstrukcji. Rozwiązaniem niektórych z tych problemów może być zastosowanie metod spajania.

Spajanie to proces, który pozwala wykonać trwałe połączenie dwóch materiałów poprzez dostarczenie ciepła lub ciśnienia, z wykorzystaniem spoiwa lub bez niego. Celem spajania jest uzyskanie szczelnego połączenia o odpowiedniej wytrzymałości i trwałości eksploatacyjnej. Podział metod spajania według ISO/TR 25901 [2] zaprezentowano na rysunku 1.1.

proces spajania przez stopienie (ang. fusion welding)

- spawanie łukowe (ang. Arc welding)
- spawanie gazowe (ang. Oxy-fuel welding)
- spawanie plazmowe (ang. Plasma arc welding)
- spawanie elektronowe (ang. Electron beam welding)
- spawanie laserowe (ang. Laser beam welding)
- spawanie termitowe (ang. Thermite welding)

spajanie w stanie stałym (ang. solid-state welding)

- zgrzewanie tarciove (ang. Rotary Friction Welding)
- zgrzewanie tarciove z przemieszaniem (ang. Friction Stir Welding)
- zgrzewanie wybuchowe (ang. Explosive welding)
- zgrzewanie ultradźwiękowe (ang. Ultrasonic welding)
- zgrzewanie dyfuzyjne (ang. Diffusion welding)
- zgrzewanie oporowe (ang. Resistance welding)

lutowanie (ang. brazing and soldering)

- lutowanie miękkie
- lutowanie twarde

procesy pokrewne (ang. related processes)

- napawanie
- metalizacja
- nakładanie powłok laserowych

Rys. 1.1. Podział metod spajania według ISO/TR 25901 [2]

Ze względu na fakt, iż celem zespoleniem dwóch materiałów różniamiennych jest uzyskanie trwałego połączenia z jak najmniejszą ilością wad w złączu, metodami dedykowanymi do ich wykonania są metody łączenia w stanie stałym. Spajanie tymi metodami odbywa się poniżej temperatury topnienia materiałów bazowych, co zmniejsza ilość powstawania faz intermetalicznych (ang. IMC). Fazy te charakteryzują się wysoką twardością i tendencją do kruchego pęknięcia, co wpływa na obniżenie wytrzymałości powstałych połączeń [3–5]. Brak stopienia łączonych materiałów ogranicza ryzyko powstania defektów krzepnięcia takich jak: pęknięcie na gorąco, porowatość gazowa i wtrącenia niemetaliczne [6,7]. Ponadto stosunkowo niskie temperatury procesowe generują niewielki wpływ w mikrostrukturę obszarów zmiennych własności w pobliżu spoiny [3].

Metody łączenia w stanie stałym, choć łączy je brak topnienia materiałów bazowych, charakteryzują się odmiennymi sposobami dostarczenia energii celem zespolenia elementów:

a) Zgrzewanie tarciove (ang. RFW) – proces, w którym obracający się element jest wciskany siłą osiową w drugi, nieruchomy obiekt. Ciepło wytworzone w wyniku tarcia powoduje uplastycznienie materiału co umożliwia trwałe połączenie dwóch elementów. Metoda ta jest szczególnie efektywna w przypadku łączenia prętów, rur oraz elementów osiowo symetrycznych. Stosowana jest m.in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i energetycznym do łączenia stali z aluminium, niklem lub tytanem [8].

b) Zgrzewanie wybuchowe (ang. EXW) – proces polega na zderzeniu metali poprzez detonację ładunku wybuchowego powodującego uplastycznienie i stworzenie metalurgicznego połączenia dwóch materiałów [9].

c) Zgrzewanie ultradźwiękowe (ang. USW) – metoda wykorzystująca wibracje ultradźwiękowe o częstotliwości 20-70 kHz oraz siłę docisku do lokalnego uplastycznienia i zespolenia dwóch elementów. Znalazła zastosowanie w przemyśle elektronicznym oraz w łączeniu cienkich foli aluminiowych lub stalowych [10].

d) Zgrzewanie dyfuzyjne (ang. DFW) – łączenie podczas tego procesu następuje poprzez dyfuzję atomów na skutek podwyższonej temperatury i docisku. Ze względu na wyjątkową jakość złącza, którą determinuje sposób przygotowanych powierzchni, metoda znalazła zastosowanie w przemyśle lotniczym [11].

e) Zgrzewanie tarciove z przemieszczaniem (ang. FSW) – metoda wykorzystująca dedykowane narzędzie, która poprzez jego ruch obrotowy i postępowy wzdłuż linii styku materiałów oraz siłę docisku, łączy elementy na skutek uplastycznienia i wymieszania [12–14]. Metoda ta cechuje się wieloma zaletami m.in. relatywnie wysoką powtarzalnością procesu, niskim zużyciem energii w porównaniu do metod konwencjonalnych czy wysoką jakością połączenia.

Na szczególną uwagę zasługują połączenia FSW stali z stopami aluminium, materiałów z grupy najczęściej stosowanych w przemyśle. Tego typu zgrzeiny mogą potencjalnie znaleźć zastosowanie w procesie redukcji masy elementów, jako łączniki do montażu podzespołów lub elementy nośne. Jednym z przykładów możliwości użycia tego typu połączenia mogą być stalowe punkty montażowe w aluminiowej ramie pojazdu szynowego celem umożliwienia montażu elementów wyposażenia poprzez ich spawanie metodą konwencjonalną lub wykonanie otworu gwintowanego i zastosowanie połączeń śrubowych.

Podczas analizy literatury odnaleziono prace naukowe poruszające zagadnienia doczołowych, aluminiowo-stalowych połączeń FSW [15–19], w których autorzy analizowali wpływ parametrów technologicznych na właściwości mechaniczne oraz makro i mikrostrukturę połączenia. Spajanie w stanie stałym różnych materiałów bazowych, w przeciwieństwie do łączenia materiałów tożsamyh tą metodą, wpływa na powstawanie asymetrycznych

profilu połączeń, zwiększając ryzyko powstania defektów w zgrzeinie, co może prowadzić do obniżenia jego trwałości i odporności na pękanie. Pomimo zainteresowania świata nauki i przemysłu połączeniami FSW Fe/Al, brakuje jednoznacznych wyników badań w zakresie technologii ich wykonania oraz usystematyzowanej wiedzy na temat właściwości statycznych, zmęczeniowych oraz odporności na pękanie połączeń Fe/Al, która jest niezbędna do bezpiecznego ich zastosowania w elementach nośnych i poszerzenia obszaru ich aplikacyjności.

1.2. CEL PRACY

W świetle przedstawieniowej genezy wyboru tematu pracy, można stwierdzić, że brakuje wiedzy na temat odporności na pękanie różnoimiennych połączeń doczołowych St/Al wykonanych metodą FSW. Aby rozwiązać wskazany problem badawczy sformułowano następujące cele pracy:

1. Dobór parametrów procesowych oraz opracowanie technologii zgrzewania metodą FSW z kontrolowaną wartością przesunięcia trzpienia względem linii styku łączonych elementów.
2. Analiza statycznych właściwości mechanicznych zgrzein FSW S355/AA6061-T6.
3. Doświadczalna analiza porównawcza odporności na pękanie próbek połączenia S355/AA6061 zgrzewanych tarciovo metodą FSW w wybranych strefach połączenia oraz materiałów bazowych.
4. Analiza charakteru pęknięcia połączenia FSW S355/AA6061-T6.

1.3. ZAKRES PRACY

Rozprawa doktorska składa się z 7 głównych rozdziałów. W pierwszym rozdziale przedstawiono genezę wyboru tematu oraz założone cele badawcze. Drugi rozdział obejmuje analizę literaturową pod kątem przyjętej problematyki zwieńczoną wnioskami do badań własnych. Trzeci rozdział to program badań własnych opracowany na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej. W rozdziale 4 i 5 opisano obiekt badań oraz przyjęte metody badawcze. Uzyskane wyniki wraz z ich analizą szczegółowo przedstawiono i opisano w rozdziale 6. Wnioski z przeprowadzonych badań oraz możliwości dalszych badań zaprezentowano w rozdziale ostatnim.

2. ANALIZA LITERATURY

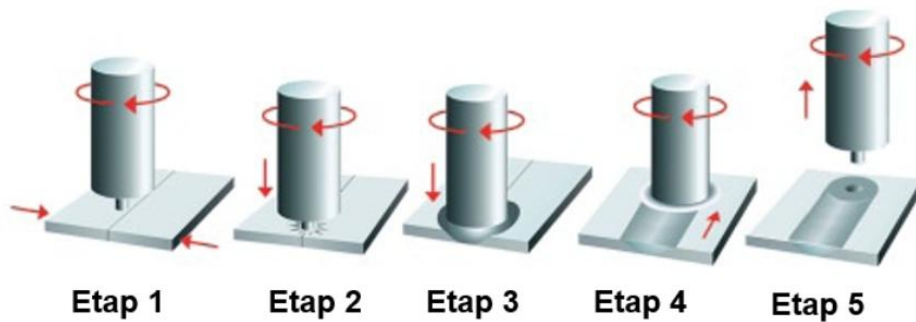
Niniejszy rozdział obejmuje analizę literaturową pod kontem procesu wykonywania połączeń z wykorzystaniem metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, przeglądu badań dotyczących stalowo-aluminiowych połączeń FSW i ich zastosowania, oraz metod analizy odporności na pękanie.

2.1. PROCES WYKONYWANIA POŁĄCZEŃ Z WYKORZYSTANIEM METODY ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z PRZEMIESZANIEM

Metoda zgrzewania tarcowego z przemieszaniem została opracowana i opatentowana w instytucie spawalnictwa w Cambridge w Wielkiej Brytanii [20]. Technologia ta była odpowiedzią na potrzeby łączenia materiałów trudnospawalnych lub niespawalnych dotychczasowo dostępnymi metodami. Jest to proces termomechaniczny, w którym ciepło wywołane tarciami narzędzia uplastycznia łączone materiały a jego ruch obrotowy miesza je ze sobą. Dla przykładu temperatura podczas zgrzewania stopów aluminium 6061-T6 według przeprowadzonej analizy literaturowej przez autorów [21] mieści się między 383 °C a 571 °C, co jest wartością niższą, niż temperatura topnienia tego materiału. Niższa temperatura procesu ogranicza niepożądane zjawiska takie jak pękanie na gorąco i odkształcenia poprocesowe. Jak podają autorzy publikacji [22], zgrzeiny FSW posiadają wiele innych zalet pożądanych w świecie przemysłu. Jednorodna i drobnoziarnista mikrostruktura w jądrze zgrzeiny pozwala na uzyskanie wysokich właściwości mechanicznych. Dodatkowo zwrócili uwagę na to, że metoda ta umożliwia automatyzację, redukcję masy połączenia (brak dodatkowego spoiwa lub elementów złącznych) oraz wykazuje niższą energochłonność procesu co czyni ją konkurencyjną w stosunku do konwencjonalnych metod łączenia.

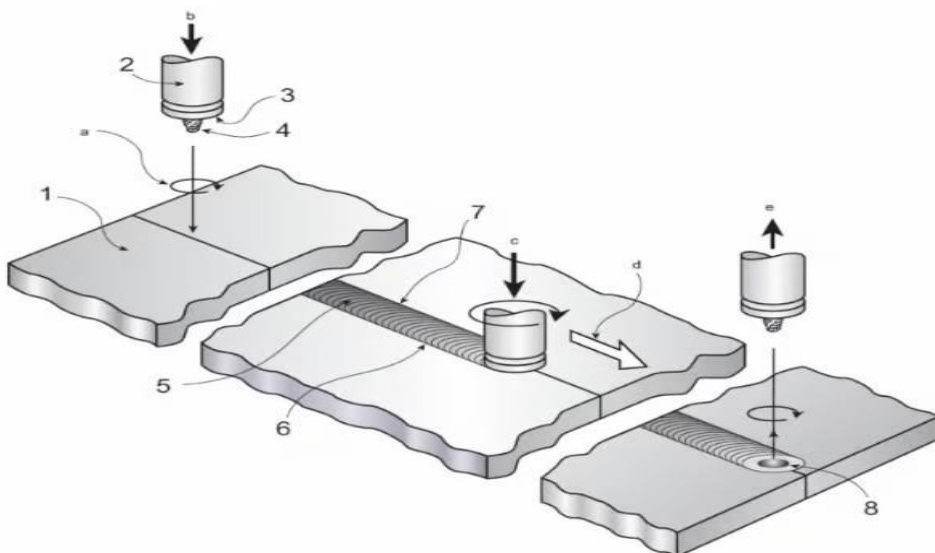
Proces FSW można podzielić na 5 etapów (rysunek 2.1):

- Etap I - przygotowanie łączonych elementów poprzez obróbkę krawędzi przeznaczonych do zgrzania, ustalenie ich pozycji w oprzyrządowaniu oraz sztywne i mocne przytwierdzenie;
- Etap II - ustawienie narzędzia w pozycji początkowej oraz wprowadzenie obracającego się narzędzia w obszar styku elementów łączonych;
- Etap III - przetrzymanie obracającego się narzędzia celem początkowego nagrzania i uplastycznia materiału w wyniku tarcia;
- Etap IV - posuw obracającego się narzędzia wzdłuż docelowej linii zgrzewania z zachowaniem siły docisku;
- Etap V - wyprowadzenie narzędzia w pozycji końcowej.



Rys. 2.1. Etapy procesu FSW [23]

Norma ISO 25239 [24] została opracowana celem usystematyzowania tworzenia połączeń ze stopów aluminium, określając m.in. terminologię używaną do opisu procesu. Terminologia ta jest również stosowana przy opisie połączeń materiałów innych niż stopy aluminium. Na rysunku 2.2 zilustrowano i opisano podstawową terminologię.



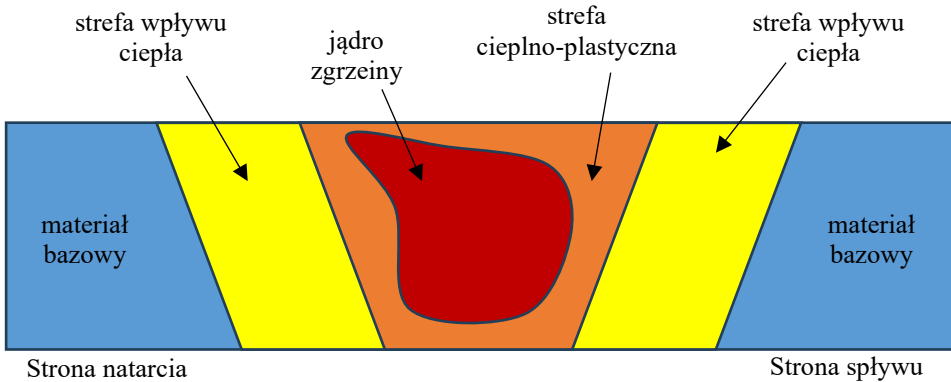
Rys. 2.2. Podstawowe terminy stosowane do opisu procesu i zgrzeiny FSW: 1 - element łączony, 2 - narzędzie, 3 - wieniec opory, 4 - trzpień, 5 - powierzchnia zgrzeiny, 6 - strona spływu zgrzeiny, 7 - strona natarcia zgrzeiny, 8 - otwór wyjściowy, a - kierunek obrotu narzędzia, b - ruch zagłębienia narzędzia, c - siła osiowa, d - kierunek zgrzewania, e - kierunek wyjścia narzędzia [24]

Jakość zgrzeiny determinują parametry procesowe, zwłaszcza takie jak:

- prędkość obrotowa narzędzia – wpływa na ilość dostarczonego ciepła do procesu, szybkości nagrzewania oraz stopień wymieszania materiałów bazowych,
- prędkość posuwu – wpływa na ilość dostarczonego ciepła do procesu oraz na stopień wymieszania materiałów bazowych i właściwości mechaniczne powstałej zgrzeiny,
- wartość parametru offset – szczególnie istotny podczas wytwarzania połączeń różnoimiennych, w których wpływa na stopień wymieszania materiałów, ilość dostarczonego ciepła do zgrzeiny podczas procesu oraz właściwości mechaniczne powstałej zgrzeiny,
- siła docisku – siła z jaką narzędzie jest dociskane do materiałów łączonych, wpływa pośrednio na ilość dostarczonego ciepła do zgrzeiny w wyniku tarcia wieńca opory o powierzchnie elementów,
- kierunek obrotu narzędzia – determinuje położenie strony spływu i strony natarcia w zgrzeinie,
- geometria i typ narzędzia (trzcienie i wieńiec opory) – wpływa na stopień wymieszania materiałów.

Jak pokazano na rysunku 2.2, narzędzie składa się z trzcienia (części mieszającej) oraz wieńca opory, odpowiedzialnej za docisk i dostarczenie ciepła do łączonych elementów w wyniku tarcia. Ruch posuwisty obracającego się narzędzia, nachylonego pod zadany kąt nachylenia, powodując ich zmiękczenie i wymieszanie. Dobór odpowiedniego narzędzia jest kluczowy dla procesu FSW ponieważ determinuje wartości pozostałych parametrów procesowych oraz bezpośrednio wpływa na właściwości mechaniczne powstałego połączenia. Autorzy [25] w swojej pracy zaprezentowali szeroki przegląd narzędzi, charakteryzując geometrię trzcienia i wieńca opory, materiały z których zostały one wytworzone oraz efekty związane z ich użyciem. Duży wybór narzędzi o bardzo zróżnicowanych geometriach świadczy o dogłębnej analizie świata nauki nad ich wpływem na proces i właściwości mechaniczne powstałych połączeń, oraz udowadnia ich kluczowe znaczenie.

Zgrzeina FSW posiada swoją unikalną budowę i charakteryzuje się obszarami przedstawionymi na rysunku 2.3.



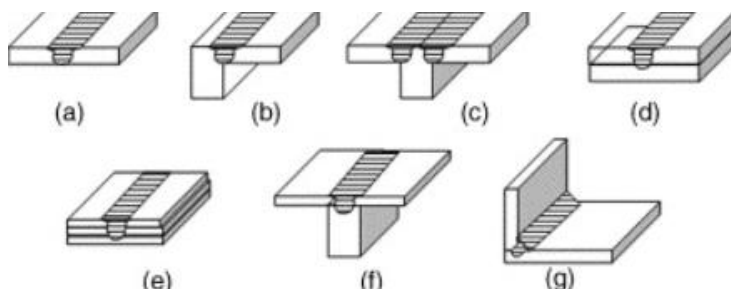
Rys. 2.3. Budowa zgrzeiny FSW

W przekroju poprzecznym zgrzeiny można scharakteryzować takie obszary jak:

- materiał bazowy (ang. BM) – materiał elementów łączonych, nie wykazuje zmian mikrostrukturalnych spowodowanych procesem FSW,
- strefa wpływu ciepła (ang. HAZ) – obszar wykazujący zmiany mikrostrukturalne wynikające z cyklu cieplnego zachodzącego podczas procesu FSW,
- strefa cieplno-plastyczna (ang. TMAZ) – obszar charakteryzujący się zmienioną strukturą pod wpływem temperatury procesu i oddziaływań mechanicznych narzędzia,
- jądro zgrzeiny (ang. WNZ) – określane również jako strefa zmieszania, obszar wykazujący zmienioną strukturę pod wpływem temperatury procesu i oddziaływań mechanicznych narzędzia. Intensywność odkształceń plastycznych oraz temperatury procesu prowadzi do dynamicznej rekrytalizacji ziaren.

Ponadto, zgrzeina FSW posiada dwie, charakterystyczne tylko dla tej metody strony. Strona natarcia, gdzie kierunek obrotu narzędzia jest tożsamy z kierunkiem zgrzewania oraz strona spływu gdzie kierunek ten jest przeciwny.

Technologia zgrzewania tarcowego z przemieszaniem umożliwia tworzenie różnych konfiguracji połączeń, które występują w konwencjonalnych metodach spawania (rysunek 2.4).



Rys. 2.4. Konfiguracje połączeń do spawania tarcowego z przemieszaniem: (a) połączenie doczołowe, (b) połączenie czołowe krawędziowe, (c) połączenie czołowe typu T, (d) połączenie zakładkowe, (e) połączenie wielozakładkowe, (f) połączenie zakładkowe typu T, (g) połączenie pachwinowe [26]

Technologia zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW posiada charakterystyczną, jak każda inna technologia spajania, listę zalet i wad. Zalety tej technologii można opisać jako technologiczno-konstrukcyjne, metalurgiczne, energetyczne oraz środowiskowe [27–29].

Zalety technologiczno-konstrukcyjne FSW to:

- robotyzacja i automatyzacja procesu,
- możliwość wykonania połączenia w jednym przejściu i w każdej pozycji,
- brak dodatkowego spoiwa co może przyczynić się do redukcji masy elementów,
- minimalny nakład na przygotowanie powierzchni łączonych,
- możliwość tworzenia połączeń z materiałów różnoimiennych,
- brak konieczności stosowania gazów osłonowych.

Zalety metalurgiczne zgrzeiny FSW to:

- spajanie w stanie stałym,
- relatywnie niewielkie odkształcenia poprocesowe co przyczynia się do powtarzalności i stabilności wymiarowej,
- drobnoziarnistość i jednorodność mikrostruktury w jądrze zgrzeiny,
- brak pęknięcia na gorąco.

Do zalet środowiskowych i energetycznych procesu zalicza się:

- ograniczenie hałasu,
- brak emisji szkodliwych substancji,
- relatywnie niskie zapotrzebowanie energetyczne technologii FSW,
- stosowanie połączeń tożsamyh i różnoimiennych FSW przyczynia się pośrednio do obniżenia zużycia paliw napędowych, poprzez redukcję masy w konstrukcjach sektora transportowego.

Pomimo wielu pozytywnych cech metody FSW, posiada ona również ograniczenia:

- wysoki koszt urządzeń, oprzyrządowania okołoprocessowego oraz zużywających się narzędzi,
- wykonanie połączenia po całej grubości zgrzeiny jest zależne od siły osiowej maszyny (możliwość wystąpienia niedogrzanania po stronie grani),
- wymaganie pełnego podparcia pod miejscem zgrzewania,
- obecność otworu wyjściowego.

W zgrzeinach FSW, jak w każdej metodzie spajania, mogą wystąpić niezgodności. W połączeniach zgrzewanych tarciowo z przemieszaniem niezgodności dotyczą głównie struktury zgrzeiny, które najczęściej są efektem złego doboru parametrów technologicznych. Przyczynami powstawania defektów są [30–32]:

- zbyt duża ilość ciepła dostarczona podczas procesu,
- zbyt mała ilość ciepła dostarczona podczas procesu,
- zbyt niska prędkość obrotowa narzędzia, prowadząca do niedokładnego wymieszania łączonych materiałów.

Niezgodności w zgrzeinach FSW to w szczególności:

- Niezgodności związane z powstawaniem wypłytki - pojawiają się, gdy energia zgrzewania jest zbyt wysoka. Zjawisko to występuje przede wszystkim w sytuacji, gdy prędkość obrotowa narzędzia znacznie przewyższa prędkość zgrzewania. Wówczas materiał jest silnie nagrzewany i ulega intensywnemu odkształceniu plastycznemu. Nadmiar ciepła uplastycznia obszar w pobliżu narzędzia, a docisk powoduje odkładanie się materiału na zewnątrz w formie wypłytki.
- Niezgodności w postaci pustek - wynikają z niedostatecznej energii zgrzewania. Są one skutkiem zbyt dużej prędkości zgrzewania w stosunku do prędkości obrotowej. W takich warunkach może dochodzić do tworzenia się pustek po stronie natarcia, na granicy strefy zmieszania. Dalsze zwiększanie prędkości posuwu narzędzia

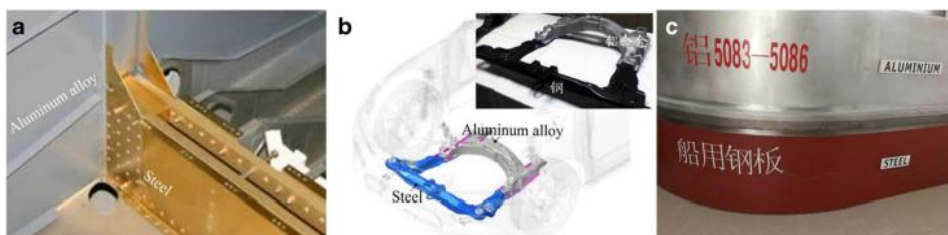
skutkuje pojawianiem się tzw. pustek tunelowych. Mechanizm ten związany jest z ograniczonym przepływem uplastycznionego materiału, co prowadzi do niepełnego wypełnienia zgrzeiny. Innym powodem występowania pustek jest zbyt słabe mieszanie materiału. Typowo występują one przy jednocześnie wysokiej prędkości obrotowej oraz wysokiej prędkości posuwu. W takich warunkach pojawia się różnica temperatur pomiędzy górną i dolną częścią zgrzeiny, co skutkuje zakłóceniem ciągłości przepływu i prowadzi do powstawania pęcherzy.

- Niezgodność typu „kissing bonds” – wynika głównie z niewystarczającej penetracji narzędzia w materiał podczas procesu. Ujawnia się w postaci linii po stronie grani zgrzeiny, gdzie materiały stykają się ale nie są wzajemnie połączone.

2.2. ZASTOSOWANIE POŁĄCZEŃ FSW

Metoda FSW ze względu na swoje liczne zalety stanowiące przewagę nad konwencjonalnymi metodami łączenia znalazła zastosowanie w wielu sektorach przemysłu. Już w 1995 roku, cztery lata po opatentowaniu metody przez TWI Cambridge, skandynawskie firmy zajmujące się obróbką aluminium, wykorzystały FSW do produkcji paneli aluminiowych znajdujących zastosowanie przy procesie głębokiego mrożenia oraz pokładów i grodzi w przemyśle stoczniowym [33]. Metoda FSW, choć stosunkowo niedawno opatentowana, znalazła zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. W przemyśle kosmicznym była wykorzystana między innymi w procesie tworzenia rakiet nośnych Delta II i Delta IV spełniając oczekiwania i odnosząc pierwsze sukcesy [34]. Firma SpaceX podczas budowy rakiety Falcon 9 zastosowała zbiornik zespolony w 100% przy wykorzystaniu metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem. Również kapsuła Dragon firmy SpaceX została wytworzona między innymi z wykorzystaniem tej metody, co potwierdza oficjalnie TWI [35]. Światowi producenci w przemyśle kolejowym tacy jak Alstom, Hitachi czy Nippon Sharyo już od końca lat 90 XX wieku stosują metodę FSW do łączenia lekkich konstrukcji poszyć taborów kolejowych często należących do pociągów dużych prędkości [36]. Producenci sektora kolejowego zwracają uwagę na większą wytrzymałość i mniejsze odkształcenia zgrzeiny FSW w porównaniu do konwencjonalnej metody spawania łukowego oraz mniejszą energochłonność procesu [37]. Proces ten popularność zdobył również w produkcjach seryjnych przemysłu motoryzacyjnego, znajdując zastosowanie między innymi przy produkcji radiatorów do pojazdów elektrycznych, półfabrykatów elementów konstrukcyjnych czy elementów lekkich karoserii luksusowych samochodów [38].

Jak wynika z powyższych źródeł, duża część producentów wykorzystuje tę metodę do tworzenia cienkościennych połączeń, stosowanych do odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych, zazwyczaj łącząc stopy aluminium. Połączenia różnoimienne mogą przyczynić się do jeszcze większej popularyzacji metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, znajdując zastosowanie w optymalizacji masy elementów lub całych konstrukcji maszyn i urządzeń. Przykładowo, stalowe elementy wspawane w lekką, aluminiową konstrukcję nośną pojazdu szynowego mogą usprawnić proces montażu wyposażenia wnętrza pociągu jednocześnie zwiększając trwałość zmęczeniową miejsc ich zakotwienia. Autorzy [39] w swojej pracy przedstawili przykładowe zastosowania połączeń St/Al w przemyśle (rysunek 2.5).

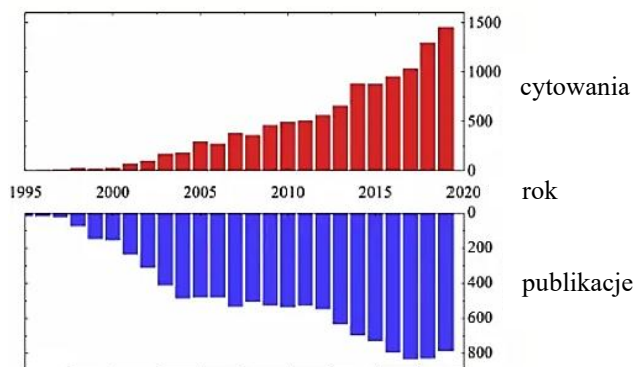


Rys. 2.5. Typowe zastosowania konstrukcji hybrydowych ze stopami aluminium i stali w przemyśle: (a) przemysł lotniczy, (b) przemysł motoryzacyjny i (c) przemysł stoczniowy [39]

Szybki rozwój i nieustannie rosnąca popularność metody zgrzewania tarcowego z przemieszaniem w przemyśle oraz coraz większe wymagania stawiane uzyskanym połączeniom oczekuje od naukowców obszernej analizy pod kątem wytrzymałości statycznej, trwałości zmęczeniowej oraz odporności na pękanie ze względu na potencjalne makro i mikroskopowe defekty zgrzeiny.

2.3. PRZEGLĄD AKTUALNEJ WIEDZY NA TEMAT ALUMINIOWO- STALOWYCH POŁĄCZEŃ FSW

Nakłady finansowe przeznaczone na rozwój metody FSW, przyczyniły się do wzrostu aplikacji tej technologii w różnych gałęziach przemysłu, co zaprezentowano w podrozdziale 2.2. Wiele zalet jakie posiada ta metoda przyczynia się do wzrostu jej popularności [40,41]. Autorzy publikacji [42], Jacquin D. i Guillemot G., opisują imponujący wzrost popularności metody FSW w ciągu ostatnich kilkunastu lat. Jak wynika z przedstawionego przez nich wykresu (rysunek 2.6), tempo publikacji naukowych, złożonych patentów na temat FSW oraz zainteresowanie tą tematyką (liczba cytowań) charakteryzuje się nieustannym wzrostem. Świadczy to o wszechstronności tej technologii i potwierdza wagę jej zalet.



Rys. 2.6. Globalna ewolucja publikacji naukowych i patentów dotycząca procesu FSW od roku 1995 [42]

Autorzy jednego z pierwszych artykułów [43] na temat łączenia stopów aluminium i stali metodą FSW, Kittipong Kimapong i T. Watanabe, przeprowadzili badania nad możliwością wykonania doczołowej zgrzeiny stopu aluminium serii 5000 ze stalą konstrukcyjną. W swojej pracy skupili się na analizie wpływu parametrów procesu, takich jak prędkość obrotowa narzędzia i średnica trzpienia, a także wartość odsunięcia tworzącej trzpienia od linii styku łączonych materiałów (wartość parametru offset), na mikrostrukturę i wytrzymałość otrzymanych zgrzein. Wykazali, że odpowiednie ustawienie trzpienia oraz umieszczenie aluminium po stronie spływu umożliwia skuteczne zgrzewanie tych dwóch materiałów. Najlepsze wyniki uzyskano przy prędkości obrotowej 250 obr/min, zapewniającej właściwy rozkład temperatury, oraz przy wartości parametru offset równym 0,2 mm w stronę stali, co pozwoliło osiągnąć wytrzymałość na rozciąganie sięgającą 86% słabszego materiału bazowego. Stwierdzono ponadto, że zbyt niska prędkość obrotowa prowadzi do niedogrzenia i szybkiego zużycia trzpienia, a zbyt wysoka sprzyja utlenianiu magnezu i powstawaniu wad poprocesowych. Analiza mikrostruktury ujawniła obecność fragmentów stali w osnowie aluminium oraz lokalne tworzenie się grubych faz intermetalicznych w górnej części zgrzeiny, które obniżały jego wytrzymałość. Wyniki badań pozwoliły wskazać optymalne warunki procesu i jednocześnie ujawniły ograniczenia technologii w tworzeniu połączeń St/Al, co stanowi istotny krok w kierunku dalszego rozwoju zastosowań FSW do łączenia stopów aluminium ze stalą.

Istnieją naukowe prace przeglądowe analizujące problematykę tworzenia różniamiennych połączeń FSW z wykorzystaniem stopów aluminium i stali. Opracowanie przeglądowe [39] dotyczy problematyki połączeń St/Al wykonanych metodą FSW. Według jego autorów, metoda FSW daje ogromne możliwości łączenia materiałów o odmiennych właściwościach fizycznych i chemicznych – co w przypadku tradycyjnych metod spawania jest trudne lub niemożliwe. Podkreślono w nim, że niska energia cieplna procesu pozwala

ograniczyć nadmierne tworzenie kruchych faz intermetalicznych (IMC), co przekłada się na wyższą jakość połączeń. Wykazali, że aktualne badania koncentrują się głównie na wpływie parametrów procesu na strukturę połączenia i właściwości statyczne, podczas gdy niewiele uwagi poświęcono powtarzalności oraz trwałości zmęczeniowej tego typu zgrzein. Jednym z kluczowych wyzwań pozostaje trwałość i niezawodność połączeń oraz żywotność narzędzi, które podczas zgrzewania St/Al są narażone na intensywne zużycie. Dlatego istotny jest odpowiedni dobór materiału i kształtu narzędzia, a także rozwój technologii powłok ograniczających ich degradację. Zwrócono także uwagę na możliwość stosowania hybrydowych metod spajania, łączących FSW z dodatkowymi źródłami ciepła (np. spawanie laserowe), co może poprawić mieszanie materiałów i własności mechaniczne zgrzein. Podsumowując, stwierdzili, że FSW ma ogromny potencjał do komercyjnego zastosowania w wytwarzaniu wysokiej jakości konstrukcji St/Al, jednak aby w pełni go wykorzystać, konieczne są dalsze badania nad mechanizmami powstawania IMC, poprawą trwałości narzędzi oraz niezawodnością i długowiecznością zgrzein poprzez badania nad powtarzalnością procesu i trwałością zmęczeniową.

Praca autorstwa Manank M. Patel i Vishvesh J. Badheka [44] stanowi przegląd badań nad zastosowaniem zgrzewania tarcowego z przemieszaniem do łączenia stali ze stopami aluminium. Podkreślono, że metoda ta jest szczególnie atrakcyjna dla przemysłu transportowego, gdzie dąży się do redukcji masy konstrukcji. W artykule omówiono wpływ materiału i konstrukcji narzędzia oraz parametrów procesu na jakość zgrzeiny, a także przedstawiono zagadnienia związane z mikrostrukturą, tworzeniem się faz intermetalicznych (IMC), właściwościami mechanicznymi i typowymi defektami zgrzein. Zwrócono uwagę na czynniki decydujące o wytrzymałości i twardości spoin. Jednocześnie wskazano kilka obszarów wymagających dalszych badań. Należą do nich przede wszystkim:

- dokładniejsze poznanie mechanizmów powstawania i wzrostu faz intermetalicznych oraz sposobów ich kontroli,
- opracowanie nowych materiałów i powłok narzędziowych zwiększających trwałość narzędzi FSW podczas łączenia metali o dużym zróżnicowaniu fizyko-chemicznym,
- optymalizacja parametrów procesu w celu ograniczenia powstawania defektów, takich jak pęknięcia czy nieciągłości,
- badania nad powtarzalnością jakości połączeń i ich zachowaniem pod obciążeniem zmęczeniowym.

Jak wykazali autorzy powyższych artykułów przeglądowych, naukowcy, badając połączenia FSW Fe/Al, szczególną uwagę poświęcają mikrostrukturze zgrzeiny oraz warstwom IMC. Autorzy [15] zbadali mikrostrukturę zgrzein wykonanych metodą FSW stopu aluminium AA6061-T6 ze stalą AISI304.

Wykazali, że proces prowadzi do powstania struktur ziarnistych z wyraźnie wydłużonymi i stosunkowo grubszymi ziarnami w jądrze zgrzeiny. Analiza mikrostruktury powstałej zgrzeiny ujawniła rekrytalizację we wszystkich jej strefach.

Badania nad zgrzewaniem tarciovym z przemieszaniem aluminium ze stalą [16] wykazały, że wzrost faz intermetalicznych (IMC) przebiega w dwóch wyraźnych etapach. Pierwszy związany jest z kontaktem trzpienia narzędzia z bokiem stalowej płyty, a drugi - z oddziaływaniem oporowej części narzędzia (wieniec opory) na powierzchnię stali, gdzie temperatura osiąga wyższe wartości i przyspiesza proces. Analizy mikrostruktury oraz pomiary temperatury potwierdziły, że to właśnie drugi etap odpowiada za najbardziej intensywny rozwój warstw IMC. Zaproponowano także równanie opisujące szybkość wzrostu z wykorzystaniem mechanizmu dyfuzji i rejestrowanych temperatur. Wskazano, że ograniczenie kontaktu narzędzia ze stalą (szczególnie w rejonie wieńca opory) i regulacja siły docisku - stanowi skuteczną strategię hamowania nadmiernego formowania się warstw IMC. Takie podejście pozwala uzyskać trwalsze połączenia, co ma znaczenie praktyczne w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz innych aplikacjach wymagających łączenia metali różnoimiennych.

To głównie parametry procesowe determinują właściwości mechaniczne połączenia różnoimiennego FSW oraz powstawanie faz intermetalicznych. Autorzy [17] przeprowadzili badania nad zgrzewaniem doczołowym stopu aluminium ze stalą niskowęglową, koncentrując się na wpływie prędkości obrotowej trzpienia oraz wartości parametru offset na mikrostrukturę i wytrzymałość zgrzein. Wykazali, że odpowiednie ustawienie pozycji trzpienia, umożliwiające aktywację powierzchni styku stali, pozwala na skuteczne uzyskanie zgrzeiny. Dowiedli, iż zbyt niska prędkość obrotowa narzędzia powoduje niedostateczne nagrzanie i niespójność zgrzeiny, a zbyt wysoka sprzyja powstawaniu wad. Otrzymane połączenia osiągały maksymalnie ok. 86% wytrzymałości materiału bazowego aluminium. Analiza mikrostruktury ujawniła obecność cienkiej warstwy związków intermetalicznych, która sprzyjała inicjacji pęknięć, a także fragmentów stali rozproszonych w osnowie aluminium. Zaobserwowano również usuwanie warstwy tlenków ze stali dzięki tarcieu obrotowego trzpienia, co ułatwiało tworzenie wiązania między materiałami.

Autorzy [18] przeprowadzili zgrzewanie tarciove z przemieszaniem stopu aluminium 5186 ze stalą niskowęglową, badając wpływ parametrów procesu - m.in. prędkości spawania (posuw), wartości zagłębienia narzędzia, kąta pochylenia narzędzia oraz geometrii trzpienia - na mikrostrukturę, tworzenie się związków intermetalicznych, powstawanie tuneli oraz wytrzymałość zgrzein. W niskich prędkościach zgrzewania obserwowano grube warstwy IMC (Al_6Fe i Al_3Fe_2), co skutkowało bardzo niską wytrzymałością oraz powstawaniem tuneli. Wraz ze wzrostem prędkości posuwu grubość IMC malała, a wytrzymałość połączeń rosła. Zastosowanie trzpieni cylindrycznych o średnicach 3 i 4 mm nie

eliminowało wad, natomiast użycie standardowego trzpienia gwintowanego M3 pozwoliło uniknąć wad tunelowych i uzyskać charakterystyczny dzwonowaty kształt strefy mieszania, co zwiększyło wytrzymałość zgrzeiny do 90% wytrzymałości stopu bazowego aluminium. Przy zbyt dużej prędkości zgrzewania i małej wartości zagłębienia narzędzia obserwowano spadek wytrzymałości zgrzein z powodu braku odpowiedniego połączenia stopu aluminium ze stalą. Na podstawie badań opracowano okno procesowe FSW umożliwiające uzyskanie wysokiej jakości zgrzein analizowanej pary materiałów.

Autorzy [19] zbadali wpływ parametrów zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączenia ze stopu aluminium AA2024 i stali nierdzewnej 304. Wykazali, że kluczowym czynnikiem jest położenie narzędzia (offset), które decyduje o powstawaniu wad i tworzeniu się faz intermetalicznych. Optymalne parametry, zapewniające wysoką wytrzymałość i plastyczność analizowanej zgrzeiny, to prędkość obrotowa 250 obr/min, prędkość posuwu 65 mm/min oraz offset równy zero (bez penetracji części stalowej). Przy dodatnim offsecie i niskim cieple procesowym powstawały puste przestrzenie i szczeliny, natomiast przy ujemnym offsecie i wysokim cieple procesowym tworzyły się grube warstwy IMC. w warunkach optymalnych powstawały cienkie IMC wokół cząstek stali w osnowie aluminium co zapewniało korzystne właściwości mechaniczne i charakterystyczny przełom jamkowy. Dodatkowo, w obszarze styku formowała się ultradrobnoziarnista warstwa stali o grubości $\sim 5 \mu\text{m}$, a fragmentacja cząstek stali i otaczające je IMC podwyższyły twardość zgrzeiny.

Autorzy [45] dokonali przeglądu badań nad powstawaniem faz intermetalicznych podczas zgrzewania tarcowego z przemieszaniem aluminium ze stalą, analizując wpływ rodzaju stopów na grubość i morfologię tych warstw. Wykazali, że w stopach aluminium serii 6000, zawierających krzem w roztworze stałym, wzrost IMC jest wyraźnie spowolniony, a ich grubość utrzymuje się poniżej $4 \mu\text{m}$. Opracowane zestawienie i analiza mechanizmów dyfuzji dostarczają praktycznych wskazówek doboru materiałów dla poprawy jakości zgrzein St/Al wykonywanych metodą FSW.

Istnieją nieliczne prace poruszające temat udarności stalowo-aluminiowych połączeń FSW. W artykule [46] podjęto próbę wyznaczenia optymalnych warunków zgrzewania tarcowego z przemieszaniem dla połączeń różnoimiennych stopu aluminium AA6061 i stali niskowęglowej SS400, koncentrując się na ocenie udarności zgrzeiny. Analizie poddano cztery kluczowe parametry procesu: prędkość obrotową narzędzia, prędkość posuwu, kąt pochylenia oraz średnicę trzpienia. Jako kryterium jakości wykorzystano wartości udarności – z karbem V, odpowiadające odporności interfejsu, oraz z karbem C, charakteryzujące strefę zgrzeiny. Dodatkowo przeanalizowano powierzchnię przełomów, aby określić typ uszkodzenia i mechanizm pęknięcia. Wyniki badań wykazały, że najlepszym zestawieniem parametrów jest prędkość obrotowa 550

obr/min, prędkość posuwu 0,9 mm/s, kąt pochylenia narzędzia 2° oraz średnica trzpienia 6 mm. W tych warunkach uzyskano najwyższą udatność zgrzein oraz dobrą odporność na zginanie, co wskazuje na wysoką integralność połączenia. Ostatecznie praca potwierdziła, że staranna optymalizacja parametrów FSW pozwala znacząco poprawić właściwości mechaniczne i niezawodność zgrzein aluminium–stal.

Nie licząc testów udatnościowych, nie odnaleziono prac skupiających się na odporności na pękanie aluminiowo-stalowych połączeń FSW, jednakże można odnaleźć prace poświęcone badaniu odporności na pękanie aluminiowych połączeń FSW. Artykuł [47] autorstwa C.G. Derry i J.D. Robsona koncentruje się na ocenie oraz modelowaniu odporności na pękanie w zgrzeinach wykonanych metodą FSW ze stopu aluminium 6013-T6 stosowanego w lotnictwie. W pracy szczegółowo scharakteryzowano mikrostrukturę poszczególnych stref zgrzeiny. W materiale bazowym występują typowe ziarna dla tego stopu, natomiast w jądrze zgrzeiny powstały drobne, równoosiowe ziarna wskazujące na pełną rekrytalizację dynamiczną. Strefa ciepno-plastyczna (TMAZ) i strefa wpływu ciepła (HAZ) okazały się najbardziej osłabione, głównie z powodu rozpuszczenia i przestarzenia cząstek umacniających, co skutkowało lokalnym obniżeniem twardości. Badania mikrotwardości potwierdziły spadek z 130 HV w materiale bazowym do 100 HV w WNZ oraz jeszcze niższych wartości w TMAZ. Analiza wytrzymałości połączenia wykazała, że mieści się w zakresie 64–75% wytrzymałości materiału bazowego. Autorzy podkreślili, że to właśnie mikrostruktura TMAZ i HAZ, a nie WNZ, odpowiada za ograniczoną odporność na pękanie i niższą ciągliwość zgrzeiny. Opracowany model oparty na mechanice pękania pozwolił przewidywać zachowanie zgrzein i wyjaśnić zależność pomiędzy mikrostrukturą, rozkładem twardości a odpornością na kruche pękanie. Całość badań dostarcza wartościowych danych dla przemysłu lotniczego, pokazując, że choć FSW w aluminium 6013-T6 prowadzi do powstania zgrzeiny o dobrej jakości, to strefy TMAZ i HAZ pozostają newralgiczne dla odporności na pękanie i wymagają dalszych prac nad poprawą ich właściwości.

W badaniach [48] oceniono odporność na pękanie zgrzein wykonanych metodą FSW z płyt stopu aluminium A5083-O o grubości 25 mm. Stwierdzono, że energia udatności Charpy’ego oraz krytyczne rozwarcie wierzchołka pęknięcia (CTOD) w jądrze zgrzeiny są znacznie wyższe niż w materiale rodzimym i strefie wpływu ciepła, mimo że twardość i krzywe naprężenie–odkształcenie nie wykazują istotnych różnic. Analiza krzywych odporności na pękanie oraz obserwacje przełomów po próbach rozciągania i zginania ujawniły, że drobnoziarnista mikrostruktura powstała w strefie zmieszania zwiększa odporność na inicjację pęknięć i ich propagację. W konsekwencji wykazano, że to właśnie zrekrystalizowana, drobnoziarnista struktura charakterystyczna dla połączenia FSW odpowiada za wyraźnie podwyższoną odporność na pękanie w porównaniu z materiałem bazowym.

Badania [49] dotyczyły mikrostruktury, właściwości mechanicznych i odporności na pękanie zgrzein doczołowych wykonanych metodą FSW z płyt stopu aluminium AA7075-T651 o grubości 10 mm. Analizowano jądro zgrzeiny (WNZ), strefę cieplno-plastyczną (TMAZ) i strefę wpływu ciepła (HAZ), a wyniki zestawiono z właściwościami materiału bazowego. Testy rozciągania wykazały, że w optymalnych warunkach procesu (obciążenie osiowe 12 kN, prędkość obrotowa 750 obr/min, prędkość posuwu 30 mm/min) uzyskano wytrzymałość na rozciąganie 350 MPa i wydłużenie 9%, co odpowiada odpowiednio 72% i 82% wartości materiału rodzimego. Odporność na pękanie wyniosła 23 MPa√m, czyli około 77% wartości bazowej. Za stosunkowo wysoką jakość zgrzein odpowiada drobnoziarnista mikrostruktura w jądrze zgrzeiny, powstała w wyniku intensywnego mieszania materiału.

2.4. METODY OCENY ODPORNOŚCI NA PĘKANIE

Odporność na pękanie to zdolność materiału do powstrzymywania rozwoju istniejących pęknięć pod obciążeniem. W przeciwieństwie do klasycznej wytrzymałości na rozciąganie opisuje zachowanie materiału w obecności defektów, które są nieuniknione w rzeczywistych konstrukcjach i złączach spawanych. Badanie odporności na pękanie ma dużą wartość poznawczą, ponieważ pozwala:

- ocenić bezpieczeństwo konstrukcji i przewidzieć ryzyko awarii,
- wskazać najbardziej wrażliwe strefy w złączach spajanych,
- porównywać technologie łączenia metali pod kątem ich niezawodności,
- zrozumieć wpływ mikrostruktury, faz intermetalicznych i defektów na inicjację i propagację pęknięć.

W kontekście zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) stopów aluminium ze stalą, odporność na pękanie ma szczególne znaczenie praktyczne. Proces ten prowadzi do powstawania cienkich warstw faz intermetalicznych oraz zróżnicowanej mikrostruktury w strefach zgrzeiny, co może sprzyjać inicjacji mikropęknięć. Ocena odporności na pękanie pozwala więc określić, czy zgrzeiny będą bezpieczne i trwałe w warunkach eksploatacyjnych, zwłaszcza pod obciążeniami zmiennymi i długotrwałymi. Dzięki tym badaniom można nie tylko porównać jakość spoin FSW z innymi metodami łączenia, ale również zoptymalizować parametry procesu, aby minimalizować ryzyko pęknięcia i poprawić niezawodność konstrukcji stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, kolejowym, morskim, lotniczym i kosmicznym.

Klasyfikację pękania można przeprowadzić na podstawie intensywności odkształcenia plastycznego podczas obciążenia. Wyróżnia się:

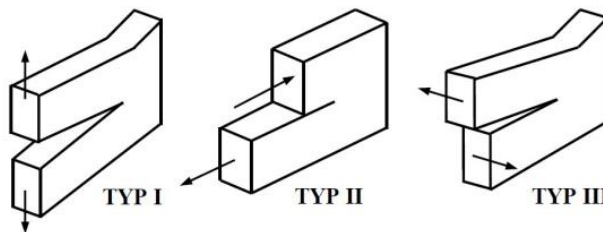
- Pękanie kruche – brak śladów odkształceń plastycznych; propagacja pęknięcia nie wymaga zwiększania naprężenia.
- Pękanie plastyczne – propagacji pęknięcia towarzyszą intensywne odkształcenia plastyczne wymaga zwiększania wartości naprężenia.

Pękanie można również podzielić ze względu na kryteria strukturalne:

- Pękanie transkryystaliczne – propagujące przez ziarna materiału.
- Pękanie międzykryystaliczne – propagujące wzdłuż granicy ziaren.

W mechanice pękania wyróżnia się trzy podstawowe typy obciążeń szczeliny (rysunek 2.7):

- Typ I – rozrywanie - sposób obciążania szczeliny prostopadle do naprężeń głównych.
- Typ II – techniczne ścinanie.
- Typ III – skręcanie – sposób obciążenia szczeliny równoległe do naprężeń głównych.



Rys. 2.7. Typy obciążeń szczeliny

W mechanice pękania podstawowymi kryteriami oceny odporności na pękanie są [50–52]:

- Metoda współczynnika intensywności naprężeń (K_{IC}) - współczynnik intensywności naprężeń K jest wielkością charakteryzującą stan pola naprężeń w otoczeniu wierzchołka pęknięcia. Jego krytyczna wartość (K_{IC}) definiowana jest jako najmniejsza wartość współczynnika intensywności naprężeń, przy której dochodzi do niestabilnego rozwoju pęknięcia. Jest to parametr ściśle materiałowy, o ile spełnione są warunki płaskiego stanu odkształcenia (PSO) i liniowo-sprężystej mechaniki pękania. Badania K_{IC} prowadzi się na próbkach z karbem (CT, SENB), które obciąża się w kontrolowanych warunkach, aż do momentu inicjacji kruchego pęknięcia. Metoda ta znajduje zastosowanie przede wszystkim dla materiałów kruchych oraz o ograniczonej zdolności do uplastycznienia. W przypadku metali ciągliwych lub złączy spawanych, w których strefa

plastyczna jest znacząca, metoda ta może nie dawać wiarygodnych wyników, dlatego wymaga uzupełnienia innymi metodami.

- Metoda krytycznego rozwarcia wierzchołka pęknięcia (CTOD – ang. Crack Tip Opening Displacement) - Parametr CTOD definiuje fizyczną odległość rozwarcia wierzchołka pęknięcia w momencie inicjacji propagacji pęknięcia. Metoda ta została opracowana w latach 60 XX w. jako odpowiedź na potrzebę oceny materiałów ciągliwych i złączy spawanych, gdzie liniowo-sprężysta mechanika pęknięcia nie oddaje w pełni rzeczywistego mechanizmu niszczenia. W praktyce CTOD wyznacza się na próbkach typu SENB lub CT, obciążanych w zginaniu bądź rozciąganiu. Pomiar polega na określeniu przemieszczenia w pobliżu karbu lub na analizie geometrii przełomu.

- Metoda krzywych odporności (ang. R-curves) - Krzywe odporności na pęknięcie przedstawiają zależność pomiędzy energią potrzebną do propagacji pęknięcia a jego długością. W wielu materiałach metalicznych (zwłaszcza stopach aluminium) obserwuje się tzw. zjawisko wzrostu odporności wraz z rozwojem pęknięcia. Analiza krzywych R pozwala nie tylko wyznaczyć parametry krytyczne (np. J_{IC}), ale także opisać procesy stabilnej i niestabilnej propagacji pęknięcia.

- Metoda całki J (J_{IC}) - Całka J jest wielkością energetyczną opisującą gęstość energii odkształcenia zgromadzonej w otoczeniu wierzchołka pęknięcia. Jej krytyczna wartość, J_{IC} , stanowi miarę energii niezbędnej do inicjacji pęknięcia. W przeciwieństwie do K_{IC} , całka J znajduje zastosowanie w ramach sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia, czyli dla materiałów, w których rozwija się znaczna strefa plastyczna. Metoda ta jest szeroko stosowana do oceny stopów aluminium oraz do spoin wykonanych metodami nowoczesnymi (FSW, hybrydowe spawanie laserowo-łukowe). J_{IC} wyznacza się na podstawie krzywych obciążenie–przemieszczenie i długości rozwijającego się pęknięcia, zgodnie z procedurami np. ASTM E1820 [53].

Do oceny odporności na pęknięcie istnieje kilka rodzajów próbek badawczych. Jedną z najpopularniejszych norm stosowaną przy ocenie odporności materiałów ASTM-1820 [53] określa następujące typy próbek to:

Próbki kompaktowe typu CT - Są najbardziej rozpowszechnionymi próbkami stosowanymi w badaniach mechaniki pęknięcia. Mają kształt prostokąta z wyciętym karbem oraz otworami przeznaczonymi do mocowania. Umożliwiają wyznaczanie podstawowych parametrów odporności na pęknięcie, takich jak K_{IC} czy J_{IC} . W próbkach CT można również wyznaczać krzywe odporności (R-curves) opisujące ewolucję energii potrzebnej do propagacji pęknięcia. Z racji na swoją wszechstronność można określić je jako próbki uniwersalne.

Próbki typu SENB – Są to belki z jednostronnym karbem, badane metodą zginania trójpunktowego. Umożliwiają wyznaczenie wartości K_{IC} oraz J_{IC} w warunkach, gdy materiał ulega odkształceniom plastycznym przed propagacją pęknięcia. Stosowane są często do oceny odporności na pękanie stali konstrukcyjnych oraz stopów aluminium o podwyższonej ciągliwości.

Próbki DC(T) - to specjalny typ próbek stosowanych w mechanice pękania do wyznaczania odporności materiału na inicjację i propagację pęknięć. Mają kształt dysku z centralnie umieszczonym nacięciem i otworami na sworznie, które umożliwiają wprowadzenie obciążenia rozciągającego. Dzięki swojej symetrii i geometrii zapewniają równomierny rozkład naprężeń wokół szczeliny, co pozwala precyzyjnie badać rozwój pęknięcia. Próbki DC(T) są szczególnie przydatne przy ocenie właściwości materiałów stosowanych w konstrukcjach obciążonych dynamicznie lub zmęczeniowo.

Poza próbkami wymienionymi w przytoczonej normie istnieją inne, powszechnie stosowane próbki badawcze:

Próbki M(T) - Płaskie próbki z karbem centralnym, rozciągane osiowo. Służą głównie do oceny rozwoju pęknięć zmęczeniowych oraz wyznaczania krzywych odporności R.

Próbki udarowościowe Charpy (z karbem V lub U) - Choć nie należą do metod ścisłej mechaniki pękania, są szeroko stosowane w praktyce przemysłowej. Polegają na pomiarze energii pochłoniętej podczas złamania próbki obciążeniem dynamicznym. Wskazują pośrednio na zdolność materiału do absorpcji energii przed zniszczeniem, a tym samym stanowią szybki wskaźnik odporności na pękanie.

W analizie odporności materiałów na pękanie szczególne znaczenie mają dwa charakterystyczne stany brzegowe opisujące rozkład naprężeń i odkształceń w pobliżu wierzchołka pęknięcia – płaski stan naprężenia (PSN) oraz płaski stan odkształcenia (PSO). Różnice między nimi wynikają z geometrii próbki oraz warunków brzegowych i decydują o mechanizmie propagacji pęknięcia, a tym samym o wyznaczanych parametrach odporności na pękanie.

Płaski stan naprężenia (PSN) występuje zazwyczaj w cienkich elementach, gdzie naprężenia prostopadłe do powierzchni są pomijalne w stosunku do naprężeń w płaszczyźnie próbki. Oznacza to, że w kierunku grubości nie rozwijają się istotne ograniczenia odkształceń. W takim stanie materiał w otoczeniu pęknięcia ma możliwość swobodnego uplastycznienia, co sprzyja rozwinięciu strefy plastycznej i prowadzi do relatywnie wysokiej ciągliwości oraz odporności na pękanie. Pęknięcia rozwijające się w płaskim stanie naprężenia charakteryzują się rozległą strefą uplastycznienia oraz dużą energią potrzebną do ich propagacji.

Płaski stan odkształcenia (PSO) występuje natomiast w grubych elementach, w których odkształcenia w kierunku grubości są skutecznie hamowane przez otaczający materiał. W takim przypadku strefa uplastycznienia jest ograniczona, a naprężenia osiągają wyższe wartości. Prowadzi to do bardziej kruchego charakteru propagacji pęknięcia i niższej wartości odporności na pękanie. Parametr K_{IC} , wyznaczany w warunkach płaskiego stanu odkształcenia, uznaje się za materiałową stałą odporności na kruche pękanie, niezależną od geometrii próbki. Dlatego właśnie badania zgodne z normami (np. ASTM) wymagają, aby grubość próbek była wystarczająca do spełnienia warunku płaskiego stanu odkształcenia.

W praktyce inżynierskiej oba stany stanowią skrajne przypadki: cienkie elementy w warunkach eksploatacji będą charakteryzować się większą odpornością na pękanie, natomiast grube elementy krytyczne konstrukcyjnie muszą być oceniane w warunkach płaskiego stanu odkształcenia.

O badaniu odporności na pękanie cienkościennych próbek myśli się przede wszystkim w reżimie płaskiego stanu naprężenia, typowym dla blach. Stosuje się proste, „płaskie” geometrie sprzyjające stabilnemu prowadzeniu pęknięcia i minimalizujące wyboczenie: M(T) i CT oraz - dla bardzo cienkich arkuszy - DENT (ang. double-edge-notched tension), gdzie układ szczelin po obu stronach ogranicza rotację i tendencję do wyboczenia. Wartości odporności (K, J, R-krzywe) wyznacza się standardowo z wykresu siła–przemieszczenie wierzchołka pęknięcia i rozwoju pęknięcia, przy czym w cienkich blachach często obserwuje się wzrost odporności wraz ze zmniejszaniem grubości.

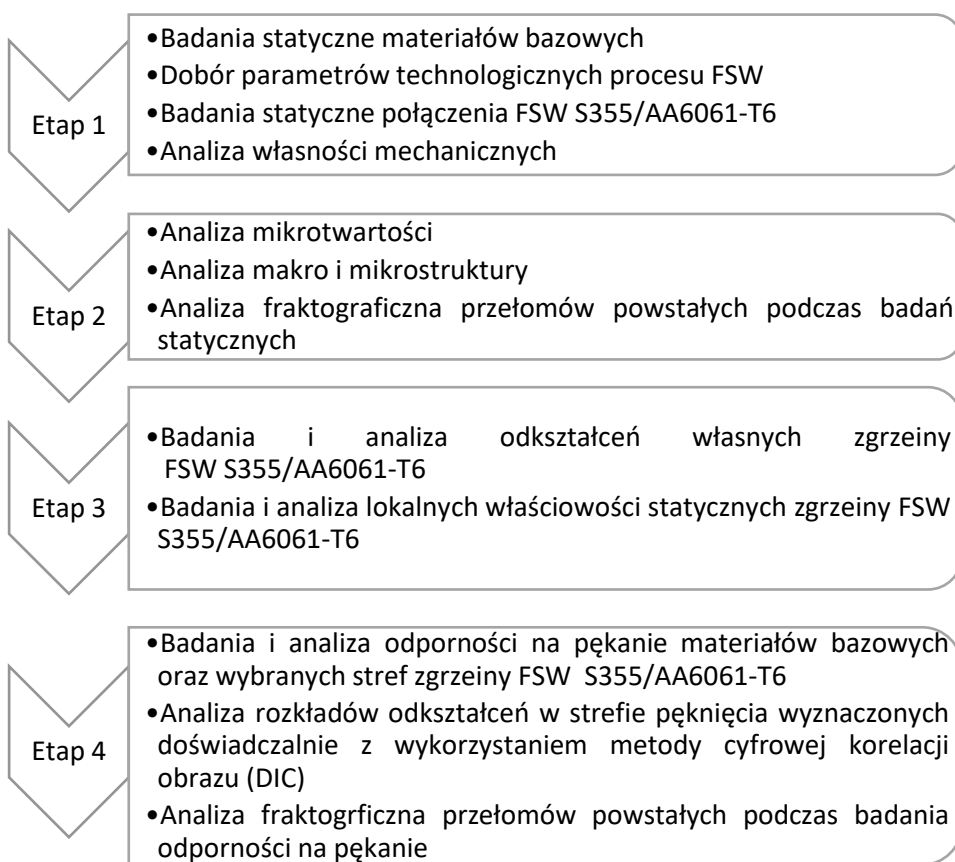
Kluczowy problem to wyboczenie poza płaszczyznę próbki, które zniekształca pole przy wierzchołku pęknięcia i może zawyżać lub zaniżać odporność. Dlatego używa się płyt antywyboczeniowych (ang. anti-buckling plates), gładkich płyt prowadzących po obu stronach próbki, z minimalnym luzem i smarowaniem, które zapewniają podparcie boczne, nie ograniczając jednak odkształceń wzdłużnych. Badania eksperymentalne na cienkich C(T) i M(T) pokazują, że takie prowadnice skutecznie eliminują wyboczenie i pozwalają utrzymać zamierzony tryb pęknięcia (I), o ile nie zaciskają próbki zbyt mocno. [50,54–56].

2.5. WNIOSKI DO BADAŃ WŁASNYCH

- 1) Jak wynika z przedstawionego przeglądu literatury, autorzy bardzo często wskazują inne wartości parametrów technologicznych, przy których uzyskali najbardziej efektywne połączenie FSW St/Al, dla par materiałów przez siebie analizowanych. Świadczy to o konieczności przeprowadzania analizy wpływu parametrów technologicznych na właściwości mechaniczne połączenia FSW St/Al dla każdej nowej pary materiałów.
- 2) Stopy aluminium serii 6000, ze względu na dodatek krzemu w roztworze stałym [45], wykazują właściwości spowalniające tworzenie się faz intermetalicznych w połączeniach St/Al wykonanych metodą FSW co pozwala stwierdzić, że ich wybór jako materiał bazowy jest uzasadniony.
- 3) Autorzy prac [39,44] zgodnie podkreślili, że konieczne są dalsze badania nad mechanizmami powstawania IMC, poprawą trwałości narzędzi oraz niezawodnością i długowiecznością zgrzein poprzez badania nad powtarzalnością procesu i trwałością zmęczeniową. Biorąc pod uwagę to stwierdzenie oraz możliwość występowania niezgodności spawalniczych, które mogą inicjować pękanie, zasadnym jest podjęcie badań odporności na pękanie połączeń St/Al wykonanych metodą FSW.
- 4) Biorąc pod uwagę przedstawione informacje, jako zasadny przyjęto wybór próbek zwartych typu CT oraz metody oceny odporności na pękanie jaką jest całka J dla analizy połączenia FSW S355/AA6061-T6.

3. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH

Program badań własnych przedstawiono na rysunku 3.1. Został on podzielony na 4 główne etapy i obejmuje badania materiałów bazowych oraz połączenia FSW S355/AA6061-T6. Wykonano analizę własności mechanicznych materiałów bazowych oraz połączeń wykonanych przy różnych ustawieniach parametrów procesowych celem ich doboru do dalszych badań. Wybrane połączenie poddano analizie lokalnych własności statycznych oraz analizie odkształceń własnych w zgrzeinie. Dla wybranego połączenia oraz materiałów bazowych wykonano analizę mikrotwardości, analizę makro i mikrostruktury, analizę odporności na pękanie, analizę pól odkształceń wokół wierzchołka pęknięcia oraz analizę faktograficzną uzyskanych przełomów.



Rys. 3.1. Program badań własnych

4. OBIEKTY BADAŃ

W tym rozdziale omówiono wybrane materiały bazowe, opisano obiekty badań jakim było połączenie FSW S355/AA6061-T6 oraz sposób jego wykonania. Ponadto przedstawiono próbki wykorzystane podczas badań.

4.1. MATERIAŁY BAZOWE

4.1.1. Stop aluminium AA6061-T6

Stop aluminium AA6061 to typowy gatunek z serii 6000, którego głównymi składnikami stopowymi są magnez i krzem. AA6061-T6 to poddany obróbce cieplnej, utwardzony wydzieleniowo stop aluminium 6061, który jest jednym z najpopularniejszych stopów tej serii. Znajduje on zastosowanie w sektorze motoryzacyjnym, lotniczym, morskim oraz kolejowym [57–60]. Swoją popularność zawdzięcza lekkości, wysokiej ciągliwości oraz doskonałej odporności na korozję [61]. Jego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Skład chemiczny stopu aluminium AA6061-T6, wt.%

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
97,2	0,6	0,3	0,3	0,1	1	0,2	0,2

4.1.2. Stal konstrukcyjna S355

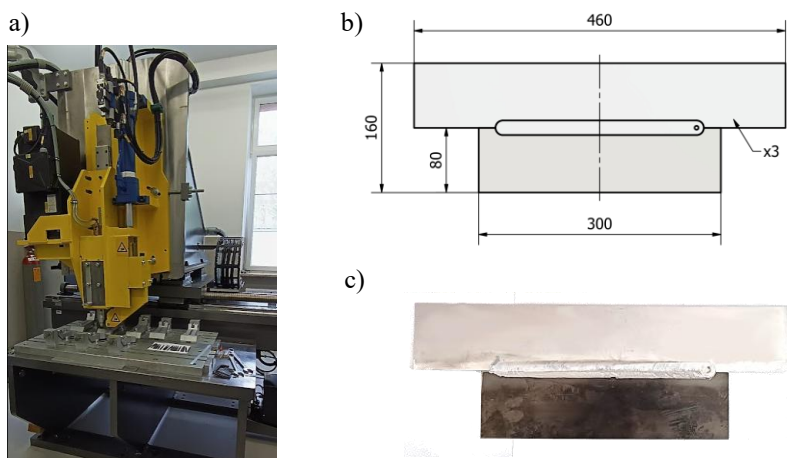
Stal S355 jest jednym z najpopularniejszych stopów konstrukcyjnych, który ma zastosowanie w większości branż przemysłowych. Jest stosowany głównie do budowy elementów nośnych maszyn i urządzeń. Stal ta określana jest jako uniwersalna, charakteryzująca się wysoką wytrzymałością, znaczną ciągliwością, drobnoziarnistością, podatnością na obróbkę skrawaniem i dobrą spawalnością. Jej skład chemiczny przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Skład chemiczny stali konstrukcyjnej S355, wt.%.

Fe	C	Mn	Si	P	S	Cu
97,05	0,2	1,6	0,55	0,025	0,025	0,55

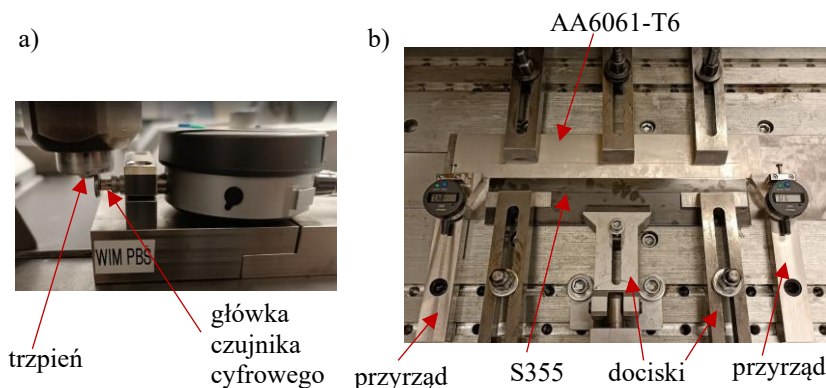
4.2. POŁĄCZENIE S355/AA6061-T6 WYKONANE METODĄ ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z PRZEMIESZANIEM

Obiekt badań eksperymentalnych stanowiło połączenie doczołowe dwóch arkuszy blach stali S355 i stopu aluminium AA6061-T6, o grubości 3 mm wykonane metodą zgrzewania tarciowego z przemieszaniem. Połączenia o zaprojektowanych wymiarach wykonano na dedykowanej maszynie FSW LEGIO 4UT firmy ESAB. Proces zgrzewania odbywał się w Instytucie Robotów i Konstrukcji Maszyn, Wydziału Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie (rysunek 4.1).



Rys. 4.1. a) FSW ESAB LGIO 4UT; b) Wymiary obiektu badań; c) Przykład wykonanego obiektu badawczego

Przedstawiona wyżej maszyna, mimo iż umożliwia kontrolę wielu parametrów procesowych, nie umożliwia wystarczająco precyzyjnej regulacji parametru offset, tj. odległości pomiędzy tworzącą walcowego trzpienia a linią styku zgrzewanych arkuszy blach. Precyzyjna kontrola tego parametru jest szczególnie istotna podczas wykonywania połączeń różnoimiennych. Aby osiągnąć powtarzalność obiektów badawczych, zaprojektowano oraz wykonano przyrząd, który w sposób pośredni umożliwiał ustawianie wartości offsetu między tworzącą trzpienia a linią styku łączonych arkuszy z dokładnością do 0,01 mm. Zaproponowane rozwiązanie poddano procesowi patentowania w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej (RP.540.18.2023). Kompletnie stanowisko technologiczne przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. a) sposób ustawiania wartości offset przy użyciu przrządu; b) stanowisko technologiczne

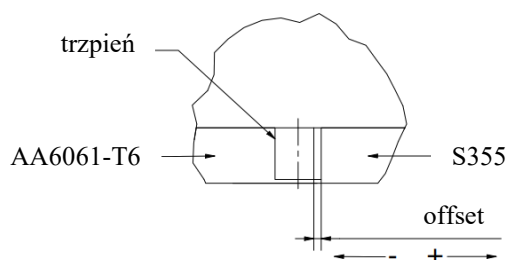
Obiekty badawcze wykonano w zaplanowanych konfiguracjach ustawień parametrów procesowych. Celem przeprowadzenia badań wstępnych wykonano serie połączeń zmieniając wartości parametru offset oraz dla każdego z nich wartości prędkości obrotowej narzędzia. Szczegółowe wartości parametrów przedstawia tabela 4.3.

Tab. 4.3. Parametry procesowe wytypowane do badań wstępnych

Parametry procesowe			
Prędkość obrotowa	250 obr/min	300 obr/min	350 obr/min
Posuw	2,5 cm/min		
Kierunek obrotu	przeciwny do ruchu wskazówek zegara		
Wysokość trzpienia	2,8 mm		
Średnica trzpienia	trzcienie walcowy o średnicy 5 mm		
Nachylenie trzpienia	2°		
Zanurzenie trzpienia	- 2,9 mm		
Offset	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm

Parametr offset w literaturze określany jest dwojako. Dla połączeń FSW materiałów tożsamy wymiar ten określany jest jako odległość między osią narzędzia a linią styku łączonych materiałów. Autorzy artykułów naukowych opisujący problematykę połączeń różnoimiennych wykonanych tą metodą określają ten parametr jako wymiar między zewnętrznym obrysem (tworzącą) trzpienia a wyżej opisaną linią, ze znakiem dodatnim skierowanym w twardszy materiał. Takie różnice mogą wynikać z faktu, iż przy wykonywaniu połączeń różnoimiennych pin zazwyczaj ingeruje w strukturę twardszego materiału tylko w kilku procentach swojej objętości. Właśnie ta ingerencja jest jedną z głównych czynników, wpływających na jakość zgrzeiny, dlatego uzasadnionym jest przedstawiać ją w sposób bezpośredni, pomijając średnicę trzpienia.

Na rysunku 4.3 przedstawiono sposób określania wymiaru parametru offset przyjęty w niniejszej rozprawie doktorskiej.



Rys. 4.3. Schemat opisu wartości parametru offset [62]

Parametry docelowego połączenia FSW S355/AA60061-T6, wybrane na podstawie analizy w ramach punktu 6.3.2, przedstawiono w tabeli 4.4.

Tab. 4.4. Parametry procesowe wytypowane do badań właściwych

Parametry procesowe	
Prędkość obrotowa	350 obr/min
Posuw	5 cm/min
Kierunek obrotu	przeciwny do ruchu wskazówek zegara
Wysokość trzpienia	2,8 mm
Średnica trzpienia	trzpień walcowy o średnicy 6 mm
Nachylenie trzpienia	2°
Zanurzenie trzpienia	- 2,9 mm
Offset	0,4 mm

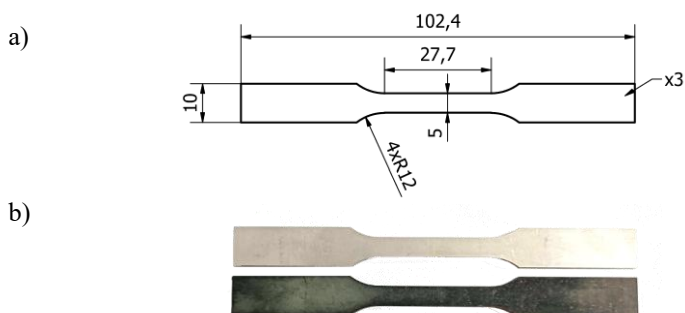
4.3. PRÓBKI BADAWCZE

W podrozdziale przedstawiono i opisano próbki badawcze wykonane na potrzeby przeprowadzenia zaplanowanych badań. Zarówno dla materiałów bazowych jak i połączenia FSW kierunek walcowania blach był prostopadły do osi próbek.

4.3.1. Próbki do badań właściwości mechanicznych materiałów bazowych

Próbki do badań właściwości mechanicznych materiałów bazowych, stali S355 oraz stopu aluminium AA60061-T6, wykonano na podstawie normy PN-EN ISO 6892-1 [63] i przyjęto oznaczenie W1.1. Wycinanie wcześniej zaprojektowanych kształtów próbek odbywało się z wykorzystaniem obróbki elektroerozyjnej WEDM (ang. Wire Electrical Discharge Machining). Metoda ta pozwala na dokładne i powtarzalne odwzorowanie wymiarów obiektu oraz

niewielkim oddziaływaniem na jego mikrostrukturę, co nie wpływa na właściwości wytrzymałościowe próbek stosowanych w badaniach. Wymiary oraz przykład wykonanych próbek przedstawia rysunek 4.4.

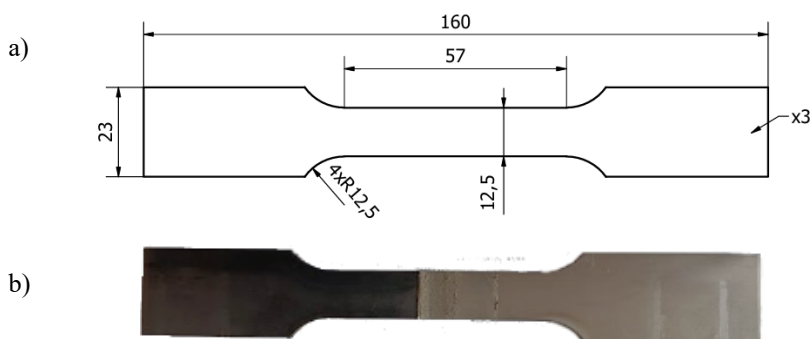


Rys. 4.4. Schemat próbki do badań właściwości mechanicznych materiałów bazowych (a); wykonane próbki do badań właściwości mechanicznych materiałów bazowych (b)

4.3.2. Próbkę do badań globalnych i lokalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6

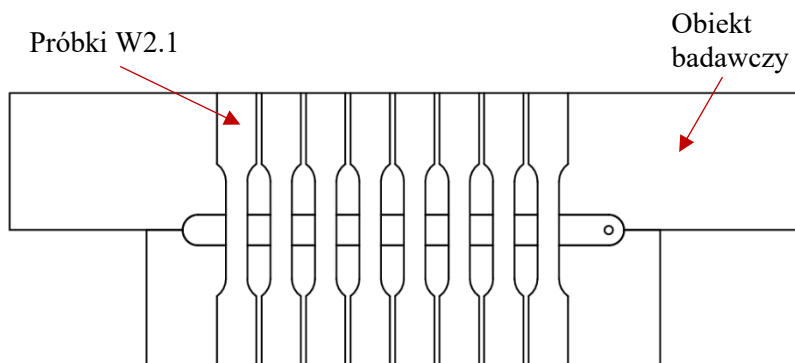
4.3.2.1. Próbkę do badań globalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6

Próbki do badań globalnych właściwości mechanicznych analizowanego połączenia wykonano na podstawie normy PN-EN ISO 6892-1 [63] i przyjęto oznaczenie W2.1. Wycinanie wcześniej zaprojektowanych kształtów próbek odbywało się z wykorzystaniem obróbki elektroerozyjnej WEDM. Wymiary oraz przykład wykonanej próbki przedstawia rysunek 4.5.



Rys. 4.5. a) schemat próbki do badań właściwości mechanicznych pełnego połączenia; b) wykonane próbki do badań właściwości mechanicznych pełnego połączenia

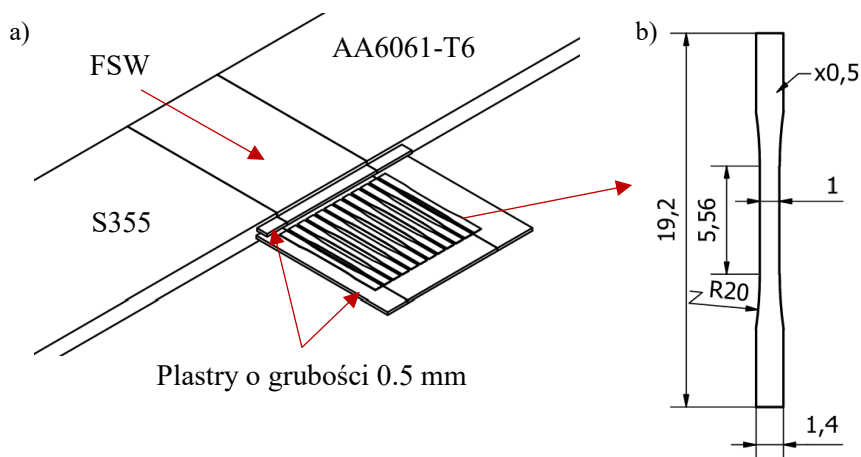
Próbki wycinano z obiektu badań prostopadłe do linii łączenia tak aby zgrzeina znajdowała się w środku jej części pomiarowej. Schemat pokazany na Rysunek 4.6 przedstawia w sposób graficzny rozmieszczenie próbek na arkuszu połączenia S355/AA6061-T6.



Rys. 4.6. Rozmieszczenie próbek W2.1

4.3.2.2. Próbki do badań lokalnych właściwości mechanicznych połączenia S355/AA6061-T6

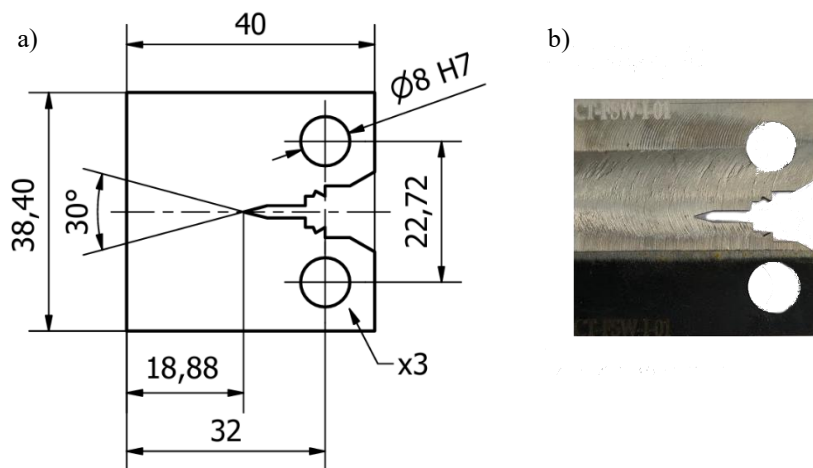
Próbki do badań lokalnych właściwości mechanicznych analizowanego połączenia wykonano na podstawie normy PN-EN ISO 6892-1 [63] i przyjęto oznaczenie WM2.0. Ich wykonanie odbywało się w dwóch etapach. Pierwszy etap polegał na wycięciu dwóch plastrów (warstwy L1 i L2) o grubości 0,5 mm, każdy na innej, określonej wcześniej głębokości połączenia, tj. 0,5 mm dla L1 oraz 1,35 mm dla L2 mierząc od lica zgrzeiny. Drugi etap polegał na wycięciu próbek z wcześniej pozyskanych plastrów, równoległe do interfejsu w możliwie najmniejszym odstępnie między sobą. Graficzne zobrazowanie etapów wykonania oraz wymiary gabarytowe pojedynczej próbki zaprezentowano na rysunku 4.7.



Rys. 4.7. a) procedura wykonania próbek; b) schemat próbki do badań lokalnych właściwości mechanicznych połączenia

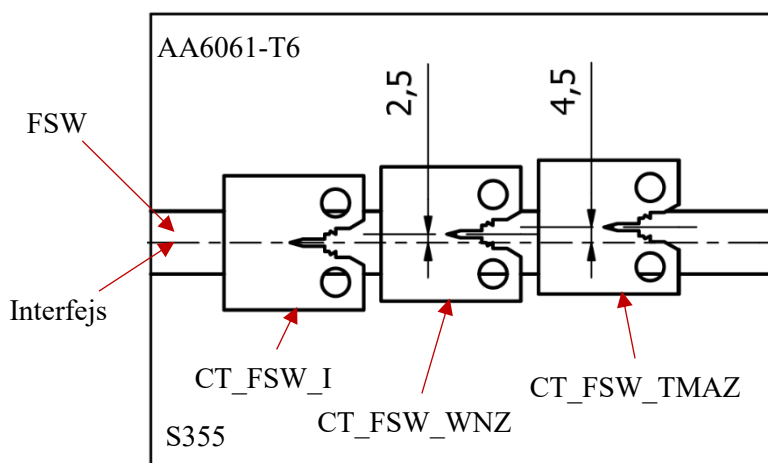
4.3.3. Próbki do badania odporności na pękanie materiałów bazowych oraz połączenia S355/AA6061-T6

Próbki do badania odporności na pękanie materiałów bazowych oraz połączenia FSW S355/AA6061-T6 wykonano w oparciu o normę ASTM 1820-18 [53] i przyjęto oznaczenie CT_[oznaczenie zależne od materiału i strefy]. Z racji na ograniczenia procesu zgrzewania metodą FSW oraz założenie wykorzystywania analizowanego połączenia w konstrukcjach cienkościennych zdecydowano się na wykorzystanie próbek nienormatywnych i wykonanie analizy porównawczej wybranych stref zgrzeiny FSW oraz materiałów bazowych. Schemat przyjętych próbek zwartych typu CT oraz wykonane obiekty przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Próbką zwaarta typu CT: schemat z naniesionymi kluczowymi wymiarami (a) oraz przykład wykonanej próbki (b)

Próbki z połączenia FSW S355/AA6061-T6 wycinano w trzech różnych strefach zgrzeiny: interfejs (CT_FSW_I), strefa zmieszania WNZ (CT_FSW_WNZ) oraz strefa cieplno-plastyczna TMAZ (CT_FSW_TMAZ). Schemat rozmieszczenia próbek wraz z wartościami odległości między wierzchołkiem karbu mechanicznego a interfejsem przedstawiono na rysunku 4.9.



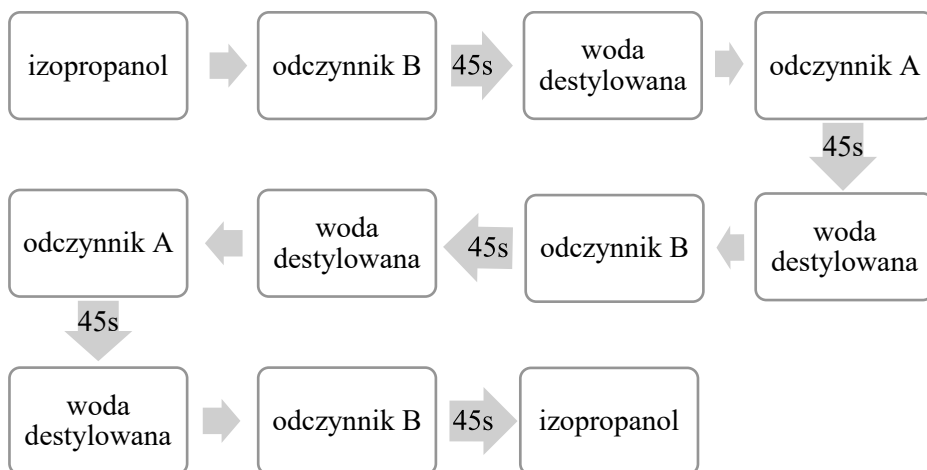
Rys. 4.9. Schemat rozmieszczenia próbek CT podczas wycinania na obiekcie badawczym względem interfejsu

5. METODY I STANOWISKA BADAWCZE

W poniższym rozdziale przedstawiono przyjęte metody badań oraz zaprezentowano stanowiska badawcze.

5.1. MAKRO I MIKROSTRUKTURA

Celem analizy makro i mikrostruktury było zaobserwowanie poszczególnych stref zgrzeiny FSW, analiza ich mikrostruktury, ujawnienie cech szczególnych dla tego typu połączenia oraz ewentualnych defektów i nieciągłości. Do realizacji tego zadania przeprowadzono analizę zglądów z wykorzystaniem mikroskopu metalograficznego Delta Optical IM-100 wyposażonego w kamerę Delta Optical DLT-Cam PRO 14 MP. Odpowiednio pobrane próbki z przekroju poprzecznego zgrzeiny inkludowano na zimno w żywicy epoksydowej a następnie poddawano procesowi polerowania. Odpowiednio przygotowaną próbkę metalograficzną poddawano procesowi trawienia. Część stalową połączenia trawiono nitałem do czasu ujawnienia granicy ziaren. Część aluminiową oraz obszar zgrzeiny trawiono dwoma odczynnikami, odczynnikiem WECK'a (odczynnik A) oraz 0,5% roztworem kwasu fluorowodorowego HF (odczynnik B) w konfiguracji zaprezentowanej na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Proces trawienia części aluminiowej połączenia FSW

5.2. MIKROTWARDOŚĆ W PRZEKROJU POPRZECZNYM ZGRZEINY S355/AA6061-T6

Pomiar mikrotwardości wykonano z wykorzystaniem twardościomierza Digital Vickers Hardness tester HUATEC HV-10. Pomiar metodą Vickersa wykonywano przy obciążeniu wgłębnika równym 0,3 kG (skala HV03). Po wciśnięciu zadanej siły statycznej diamentowego wgłębnika (czworobocznego foremnego ostrosłupa o kącie wierzchołkowym 136°) w materiał i jego

odciążeniu po upływie 10 s, mierzono obie przekątne (d_1 i d_2) powstałego odcisku w kształcie kwadratu. Na podstawie normy PN-EN ISO 6507-1 [64] obliczano twardość dla poszczególnych punktów korzystając ze wzoru:

$$HV = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot P}{A} \quad (5.1)$$

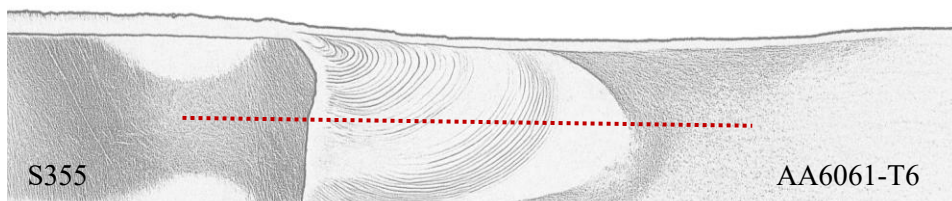
gdzie:

P – siłą obciążenia, kG;

A – pole przekroju powstałego odcisku, mm²;

α – kąt wgnętnika, °.

Na przekroju poprzecznym połączenia FSW S355/AA6061-T6 wykonano 42 pomiary w rozstawie co 0,5 mm, 11 po stronie stalowej zgrzeiny i 31 po stronie stopu aluminium. Liczba punktów pomiarów i ich położenie wynikało z rozmiaru zgrzeiny i odległości wpływów procesu na poszczególne materiały bazowe. Dodatkowo zmierzono mikrotwardość dla obu materiałów bazowych. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przekroju poprzecznym zgrzeiny zaprezentowano na rysunku 5.2.



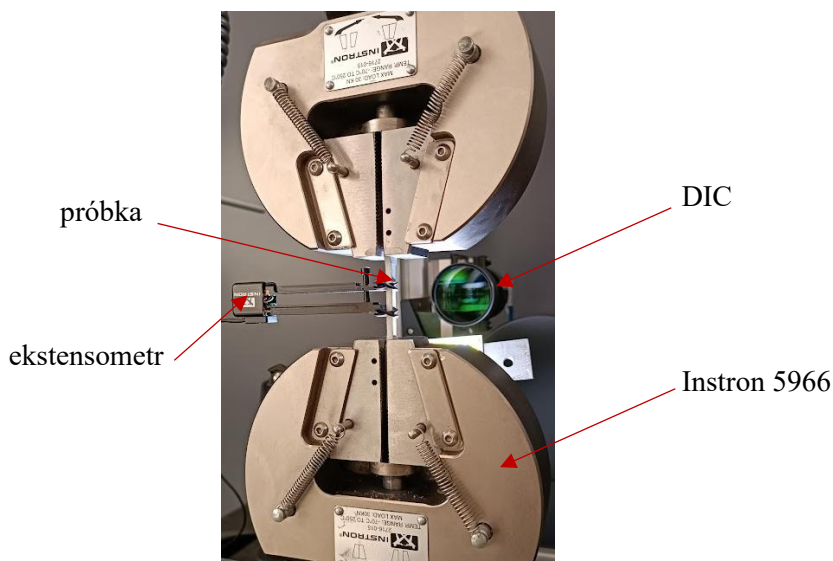
Rys. 5.2 Schemat rozmieszczeni punktów pomiarowych podczas badani mikrotwardości

5.3. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

Badania właściwości mechanicznych globalnych (tj. w skali makro) przeprowadzono dla materiałów bazowych oraz analizowanego połączenia FSW. Dodatkowo dla połączenia przeprowadzono badania właściwości lokalnych (tj. w skali mikro) w zgrzeinie. W poniższym rozdziale przedstawiono stanowiska badawcze oraz omówiono przyjęte metody badawcze.

5.3.1. Właściwości mechaniczne materiałów bazowych

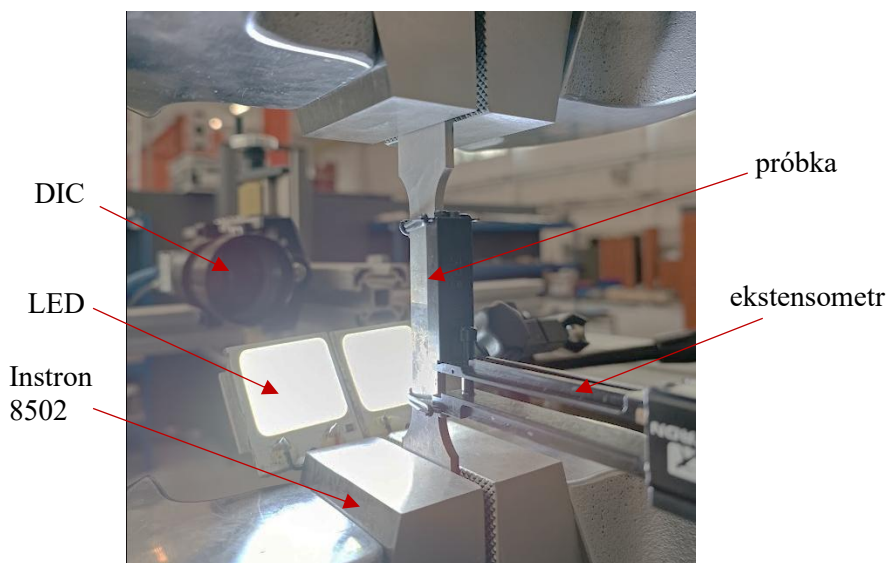
Próby monotonicznego rozciągania materiałów bazowym W1.1. przeprowadzono na śrubowej maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Próbki obciążano sterując przemieszczeniem z prędkością równą 0,02 mm/s. Podczas badania rejestrowano wartości siły i przemieszczenia uchwytów. Dodatkowo przy pomocy ekstensometru rejestrowano wartości odkształceń w próbce oraz obraz powierzchni bocznej próbki przy pomocy kamery z obiektywem do późniejszej analizy odkształceń z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Stanowisko badawcze wraz z opisem przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Stanowisko badawcze do monotonicznej próby rozciągania próbek W1.1

5.3.2. Właściwości mechaniczne połączenia S355/AA6061-T6

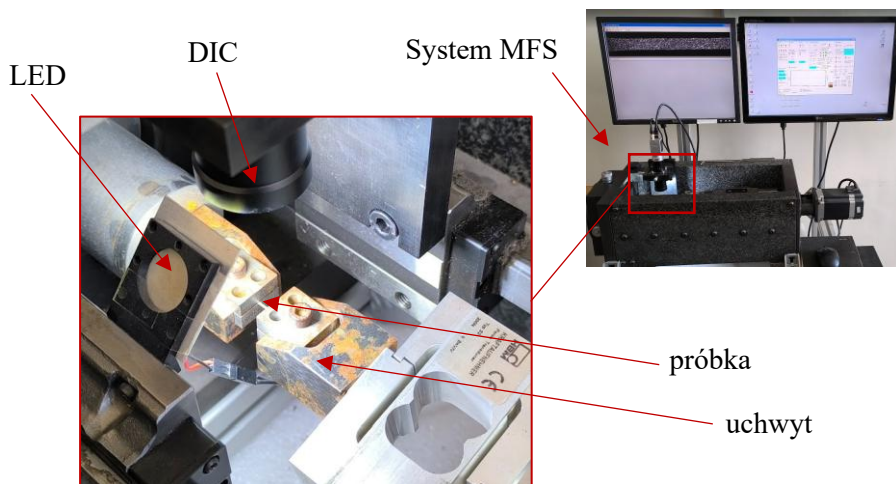
Próby monotonicznego rozciągania połączenia FSW S355/AA6061-T6 (W2.1.) przeprowadzono na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 z prędkością obciążania równą 0,02 mm/s. Każdorazowo, podczas próby rejestrowano siłę, przemieszczenie tłoczyska, odkształcenie próbki poprzez odczyt z ekstensometru oraz obrazy bocznej powierzchni próbki za pomocą kamery z obiektywem. Rejestracja obrazu była niezbędna do wyznaczenia odkształceń w próbce za pomocą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Opisane stanowisko zaprezentowano na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Stanowisko badawcze do monotonicznej próby rozciągania próbek W2.1

5.3.3. Statyczne właściwości lokalne zgrzeiny S355/AA6061-T6

Wyznaczenie lokalnych właściwości mechanicznych zgrzeiny (próbki WM.2.0) zrealizowano z wykorzystaniem systemu MFS przeznaczonego do badań mikro i nano obiektów w monotonicznych lub zmiennych warunkach obciążenia [65,66]. Badania przeprowadzono z prędkością obciążania równą 0,005 mm/s. Podczas próby rejestrowano siłę, przemieszczenie uchwytów oraz obrazy powierzchni bocznej próbki poprzez kamerę z obiektywem. Celem wyznaczenia odkształceń w próbkach, uzyskane obrazy poddano obróbce cyfrową korelacją obrazu (DIC). Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 5.5.

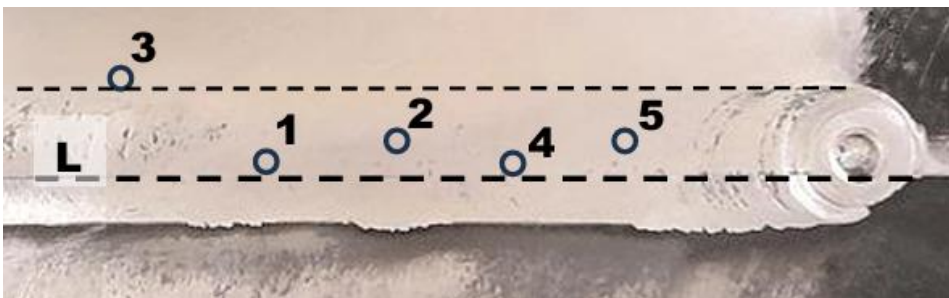


Rys. 5.5. Stanowisko badawcze do monotonicznej próby rozciągania próbek WM2.0

5.4. NAPRĘŻENIA WŁASNE W ZGRZEINIE S355/AA6061-T6

Do przeprowadzenia badań naprężeń własnych w zgrzeinie wykorzystano metodę trepanacji otworowej z tensometrycznym pomiarem odkształceń. Badania zostały zrealizowane w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie przez dr inż. Tomasza Ślęzaka. Wykorzystano system do precyzyjnego wykonywania otworów RS-200 Milling Guide firmy VPG-Micro-Measurements. W badaniu posłużono się frezami z węglików spiekanych o nominalnej średnicy 1,6 mm. Otrzymany napięciowy sygnał wyjściowy był przekazywany z rozet tensometrycznych do kanałów mostka tensometrycznego ESAM Traveler Plus typ 1032-S, następnie sygnał był rejestrowany na komputerze. Dalsza obróbka wyników dokonywana była z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania H-Drill. Do pomiaru odkształceń wykorzystano rozety tensometryczne typu CEA-05-062UM-120.

Pomiary naprężeń własnych zostały wykonane w pięciu punktach pomiarowych, z zachowaniem minimalnych odległości między punktami pomiarowymi, tj. minimum 15 mm. Pomiar nr 3 wykonano na granicy zgrzeiny i materiału rodzimego, pomiar nr 1 i 4 w odległości ok. 2,5 mm od interfejsu a pomiary nr 2 i 5 w odległości ok. 5 mm od interfejsu. Otwory wykonywano na głębokość do 1 mm z rejestracją zmian napięcia co 0,05 mm. Schemat rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Schemat lokalizacji punktów pomiarowych

Zarejestrowane wartości sygnałów wyjściowych przeliczono na wartości odkształceń wykorzystując zależność:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot U_{WY}}{N \cdot V_0 \cdot K \cdot A} \cdot 10^6 [\mu\varepsilon] \quad (5.2)$$

gdzie:

U_{WY} - napięcie wyjściowe, V;

U_0 - napięcie zasilające, V;

N - współczynnik zależny od układu mostka; dla ćwierćmostka $N = 1$;

K - stała tensometru;

A - współczynnik wzmocnienia sygnału wyjściowego.

W efekcie uzyskano charakterystyki zmian wartości odkształceń względnych ε w funkcji głębokości. Do wyznaczenia wartości naprężeń głównych oraz ich kierunku zastosowano zależności

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 \cdot A} \right) - \left(\frac{1}{4 \cdot B} \right) \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} [\text{MPa}] \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\min} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 \cdot A} \right) + \left(\frac{1}{4 \cdot B} \right) \cdot \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} [\text{MPa}] \quad (5.4)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \arctg \left(\frac{\varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right) \quad (5.5)$$

gdzie:

$\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ - naprężenia główne;

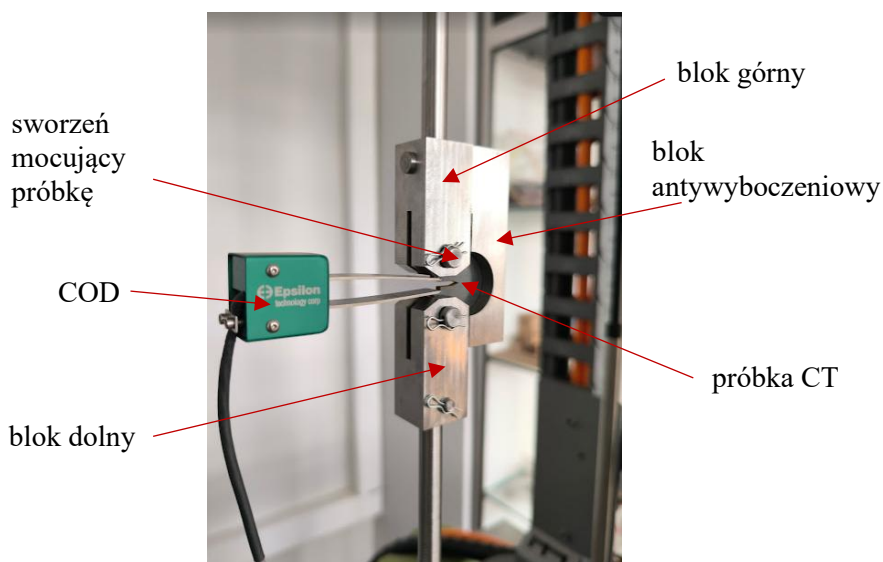
ε_1 , ε_2 , ε_3 - odkształcenia zmierzone na tensometrach numer 1, 2 i 3;

A , B - współczynniki zależne od właściwości materiału oraz geometrii rozety i otworu;

α - kąt zawarty pomiędzy tensometrem nr 1 a kierunkiem najbliższego naprężenia głównego.

5.5. ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE MATERIAŁÓW BAZOWYCH ORAZ POŁĄCZENIA S355/AA6061-T6

Badania odporności na pękanie przeprowadzono w oparciu o normę ASTM E1820-18 [53]. Po zaprojektowaniu i wykonaniu próbek zwartych typu CT przystąpiono do zaprojektowania i wykonania uchwytu umożliwiającego przeprowadzenie badań w pierwszym przypadku obciążenia (rozrywanie). Zależności wymiarowe w odniesieniu do wymiarów próbki zostały zachowane zgodnie z powyższą normą. Dodatkowym elementem był autorski blok antywyboczeniowy (podrozdział 2.4) z przekładkami teflonowymi i wybraniem umożliwiającym obserwację kamerą bocznej powierzchni próbki. Schemat uchwytu wraz z opisem zaprezentowano na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Uchwyt do badań próbek zwartych typu CT

Badanie odporności na pękanie podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap polegał na wygenerowaniu wstępnego pęknięcia zmęczeniowego (ang. precrack). Do tego celu konieczne było, na podstawie wcześniej uzyskanych wyników badań, wyznaczenie wartości maksymalnej siły generowania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego P_m .

$$P_m = \frac{0.4 \cdot B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_y}{2 \cdot W + a_0} \quad (5.6)$$

gdzie:

P_m – siła maksymalna, N;

B – grubość próbki zwartej CT, mm;

b_0 – wymiar niepękniętej części próbki ($W-a_0$), mm,

σ_y – granica plastyczności materiału, MPa;

a_0 – całkowita długość pęknięcia, mm,

W – wymiar nominalny próbki, mm.

Generowanie wstępnego pęknięcia zmęczeniowego było realizowane na maszynie wytrzymałościowej Instron ElectroPuls E3000 (rysunek 5.8). Próbkę obciążano obciążeniem cyklicznie zmiennym przy współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$ gdzie obliczona siła P_m była siłą maksymalną. Długość pęknięcia zmęczeniowego była weryfikowana nadążnie przez cały proces jego generowania za pomocą programu napisanego w WaveMatrix3. Program pozwalał obliczyć aktualną długość pęknięcia na podstawie odczytanych wartości siły oraz wartości rozwarcia ekstensometru COD. Gdy pęknięcie osiągało docelową długość, program automatycznie kończył proces. Do obliczeń wykorzystano przekształcone wzory opisane w normie ASTM E1820-18 [53].

$$a^i = \frac{W \cdot (1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5)}{1} \quad (5.7)$$

gdzie:

a^i – długość pęknięcia, mm;

W – wymiar nominalny próbki, mm.

Wartość parametru u była obliczana ze wzoru:

$$u = \frac{1}{\left(B \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta P}\right)\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (5.8)$$

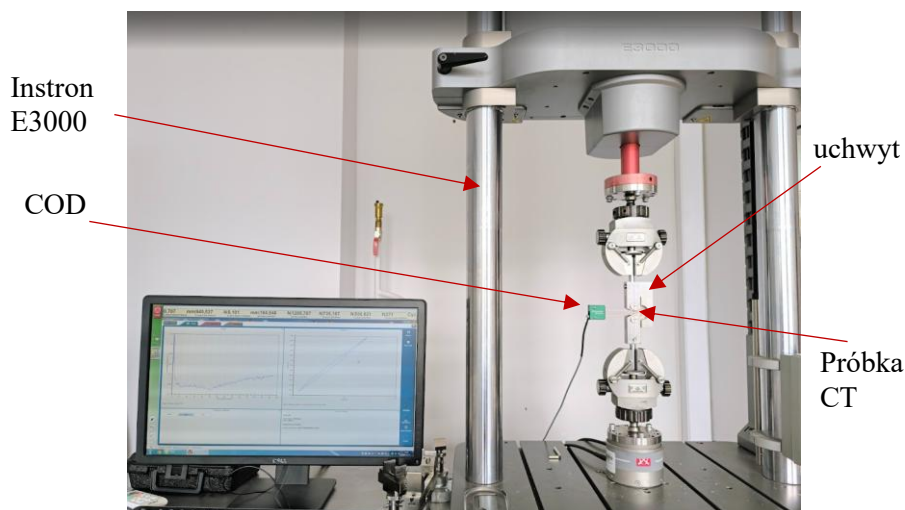
gdzie:

B – grubość próbki zwartej CT, mm;

E – moduł Younga badanego materiału, MPa;

Δv – zmiana wartości rozwarcia ekstensometru COD, mm;

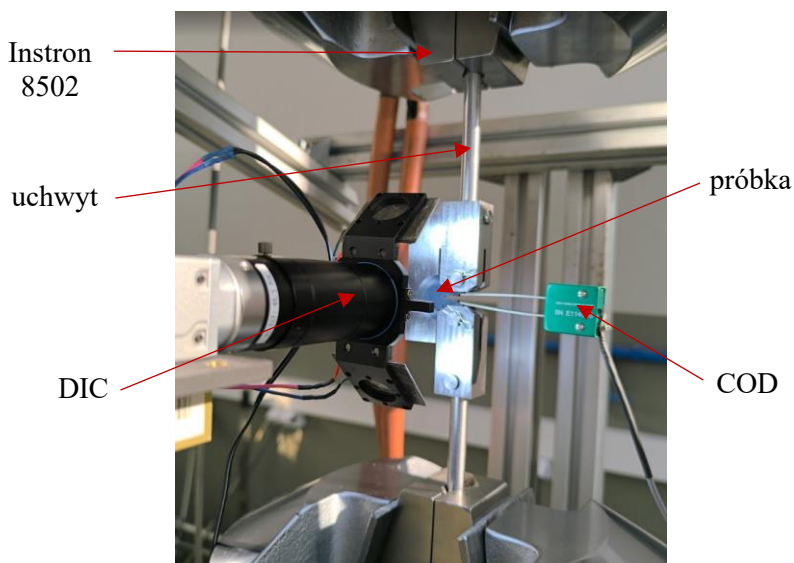
ΔP – zmiana wartości siły, N.



Rys. 5.8. Stanowisko do generowania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego

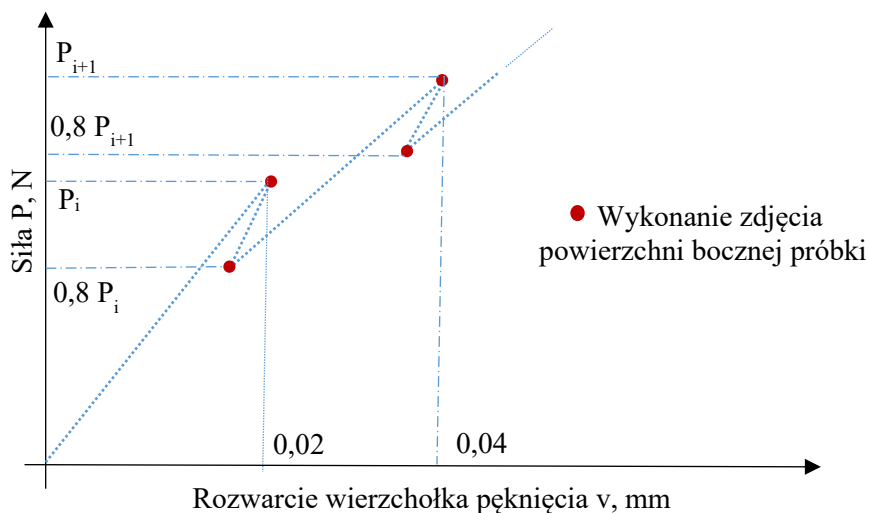
Drugim etapem badania odporności na pękanie były badania właściwe. Z racji na sprężysto-plastyczny charakter przebiegów naprężenie-odkształcenie analizowanych materiałów, zasadnym było wykorzystanie energetycznego kryterium pęknięcia jakim jest całka J . Zdecydowano się na wykorzystanie metody jednej próbki z uwagi na możliwość uzyskania większej liczby powtórzeń.

Próby przeprowadzono na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 z wykorzystaniem ekstensometru COD, uchwytu do próbek zwartych typu CT oraz kamery z obiektywem do obserwacji powierzchni bocznej próbki wokół wierzchołka pęknięcia. Stanowisko wraz z opisem przedstawiono na rysunku 5.9.



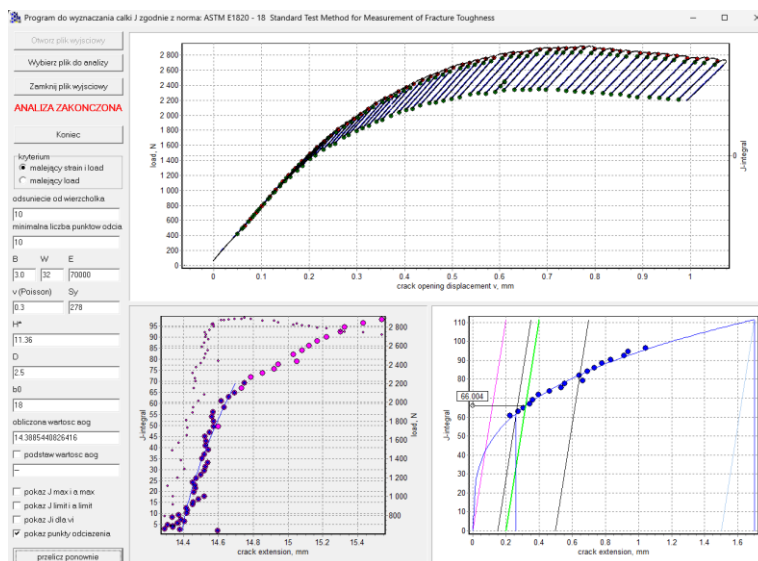
Rys. 5.9. Stanowisko do badania całki J metodą jednej próbki

Zamontowaną w uchwycie próbkę CT z wygenerowanym wstępnym pęknięciem zmęczeniowym obciążano o skok rozwarcia wierzchołka pęknięcia równy 0,02 mm z prędkością 0,05 mm/s. Następnie odciążano próbkę do 80% wartości siły maksymalnej P_i aktualnego cyklu obciążenia. Po odciążeniu do zadanej wartości siły, cykl powtarzano do momentu aż siła maksymalna P_i n-tego cyklu spadła do około 50% siły maksymalnej. Zdjęcia powierzchni bocznej próbki CT były wykonywane każdorazowo w punktach przełamania obciążenie/odciążenie oraz odciążenie/obciążenie. Schemat programu obciążania przedstawiono na rysunku 5.10.



Rys. 5.10. Schemat programu obciążenia metodą jednej próbki

Otrzymane wyniki przeliczono celem wyznaczenia wartości J_Q dla każdej z próbek. Do tego celu został opracowany program z zaimplementowanymi wzorami opartymi o normatywną procedurę obliczeniową (rysunek 5.11).



Rys. 5.11. Okno dialogowe opracowanego programu do wyznaczania wartości J_Q

Procedura obliczeniowa wartości J_i w opracowanym programie odbywała się z wykorzystaniem wzorów na nieskorygowaną długość pęknięcia 5.7 i 5.8. Próbk

CT, z racji na swoją charakterystyczną budowę, wymagały korekty długości pęknięcia o wartość promienia obrotu linii środkowej pęknięcia, która była obliczona z wykorzystaniem wzorów 5.9 – 5.13.

$$R_i = \frac{W+a_i}{2} \quad (5.9)$$

gdzie:

R – promień obrotu linii środkowej pęknięcia, mm;

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{\left(D + \frac{v_{m(i)}}{2}\right)}{\sqrt{(D^2 + R_i^2)}}\right) - \arctan\left(\frac{D}{R_i}\right) \quad (5.10)$$

gdzie:

θ_i – kąt obrotu sztywnego elementu bryły wokół nieprzerwanej linii środkowej, rad;

D - połowa początkowej odległości między punktami pomiaru przemieszczenia, mm;

v_m - zmiana wartości rozwarcia ekstensometru COD na początku i-tego cyklu obciążenie/odciążenie.

$$C_{ci} = \frac{C_i}{\left(H \cdot \frac{H}{R_i} \sin(\theta_i) - \cos(\theta_i)\right) \cdot \left(\frac{D}{R_i} \sin(\theta_i) - \cos(\theta_i)\right)} \quad (5.11)$$

gdzie:

C_{ci} - skorygowana podatność sprężysta próbki;

C_i – zmierzona podatność sprężysta próbki $\Delta v/\Delta P$ na linii obciążenia;

H – połowa początkowej odległości między osiami otworów przyłożenia siły w próbce CT.

$$u^* = \frac{1}{\left(B \cdot E \cdot C_{ci}\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (5.12)$$

$$\left(\frac{a^i}{W}\right)^* = \frac{1.000196 - 4.06319u^* + 11.242u^{*2} - 106.043u^{*3} + 464.335u^{*4} - 650.677u^{*5}}{1} \quad (5.13)$$

Po wyznaczeniu skorygowanej długości pęknięcia, program wyznaczał wartości i-te wartości współczynnika intensywności naprężeń oraz i-te wartości całki J za pomocą wzorów 5.14 – 5.19.

$$v_{pl(i)} = v_i - P_i \cdot C_{C(i)} \quad (5.14)$$

gdzie:

v_{pl} – plastyczna część rozwarcia wierzchołka pęknięcia.

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{(P_i + P_{i-1}) \cdot (v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)})}{2} \quad (5.15)$$

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{i-1}} \right) \cdot \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_{i-1} \cdot \left(\frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \right] \quad (5.16)$$

gdzie:

$$\eta_{pl(i-1)} = 2.0 + 0.522 \cdot b_{(i-1)} / W;$$

$$\gamma_{i-1} = 1.0 + 0.76 \cdot b_{(i-1)} / W.$$

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_i^*}{W}\right) \cdot \left[0.886 + 4.64 \cdot \left(\frac{a_i^*}{W}\right) - 13.32 \cdot \left(\frac{a_i^*}{W}\right)^2 + 14.72 \cdot \left(\frac{a_i^*}{W}\right)^3 - 5.6 \cdot \left(\frac{a_i^*}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a_i^*}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.17)$$

$$K_i = \frac{P_i}{(B^2 \cdot W)^{\frac{1}{2}}} \cdot f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (5.18)$$

gdzie:

K – współczynnik intensywności naprężeń.

$$J_i = \frac{(K_i)^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (5.19)$$

gdzie:

J_i – całka J dla i -tego cyklu;

ν – współczynnik Poissona.

Obliczone wartości $J_{(i)}$ oraz a_i pozwalały na zbudowanie wykresu krzywej oporu J - R . Wrysowanie linii konstrukcyjnych w powstały wykres zależności J_i od a_i , umożliwiało odczytanie wartości J_Q dla konkretnej próbki.

5.6. ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ W STREFIE WIERZCHOŁKA PĘKNIĘCIA

Analizę odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia przeprowadzono na podstawie obrazów powierzchni bocznej próbek CT rejestrowanych podczas badania odporności na pękanie. Do tego celu wykorzystano oprogramowanie FatigueVIEW wykorzystujące metodę cyfrowej korelacji obrazu [67,68]. Program umożliwia analizę przemieszczeń i odkształceń na podstawie obrazu referencyjnego oraz danych zarejestrowanych podczas badania.

5.7. FRAKTOGRAFIA

Analizę przełomów statycznych i próbek zwartych dla poszczególnych materiałów bazowych oraz połączenia S355/AA6061-T6 wykonano z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM JEOL 6480LV. Odpowiednio przygotowane próbki, po oczyszczeniu alkoholem, umieszczano w komorze próżniowej mikroskopu. Analizę przełomów przeprowadzano z wykorzystaniem metody detekcji elektronów wtórnych SEI, detekcji elektronów rozproszonych BEC oraz czujnika referencyjnego REF. Celem identyfikacji pierwiastków w obszarze interfejsu zgrzeiny, wykorzystano metodę dyspersyjnej spektroskopii energii EDS.

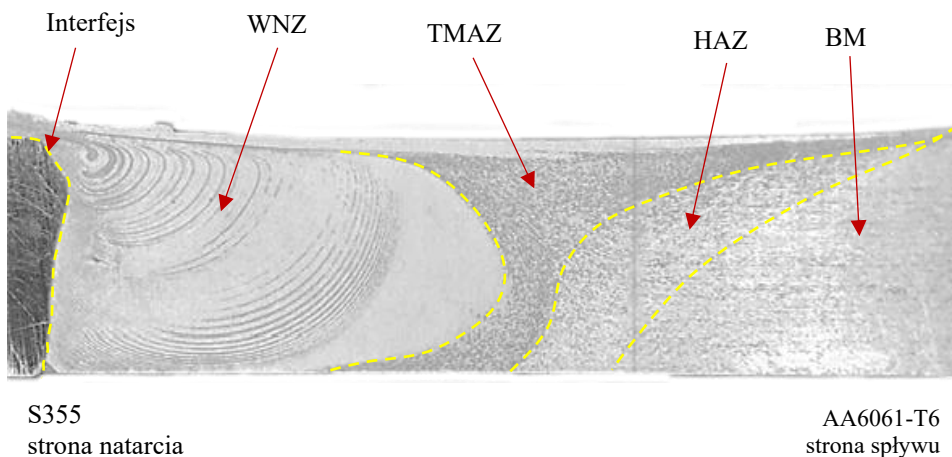
6. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W poniższym rozdziale przedstawiono oraz przeanalizowano uzyskane wyniki przeprowadzonych badań. Omówiono i przeanalizowano makro i mikrostrukturę połączenia FSW S355/AA6061-T6, jego mikrotwardość oraz naprężenia własne w zgrzeinie. Przeanalizowano przedstawione wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie powstałego połączenia FSW w skali makro i mikro, odporność na pękanie materiałów bazowych i wybranych stref zgrzeiny oraz omówiono odkształcenia w strefie wierzchołka pęknięcia i fraktografię powstałych przełomów próbek.

6.1. MAKRO I MIKROSTRUKTURA

6.1.1. Makrostruktura zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6

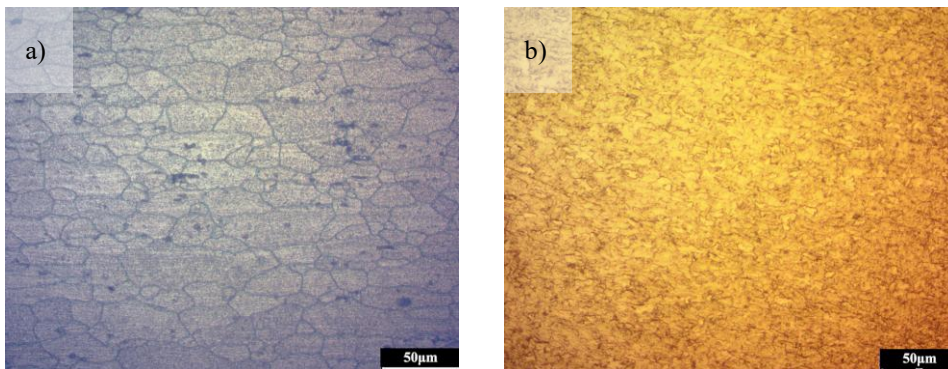
Metodę przygotowania zglądów opisano w podrozdziale 5.2. Analiza makrostruktury przekroju poprzecznego połączenia FSW S355/AA6061-T6 za pomocą optycznego mikroskopu metalograficznego pozwoliła zaobserwować strefy typowe dla zgrzein różnoimiennych wykonanych metodą FSW: interfejs (I), jądro zgrzeiny (WNZ), strefę cieplno-plastyczną (TMAZ) oraz strefę wpływu ciepła (HAZ). Ponadto określono stronę natarcia (AS) oraz stronę spływu (RS) oraz zaznaczono materiały bazowe (BM). Obraz makrostruktury przekroju poprzecznego analizowanej zgrzeiny o parametrach procesowych wskazanych w Tab. 4.4, wraz z opisem stref przedstawia rysunek 6.1. W strefie WNZ zaobserwowano charakterystyczne prążki, do których powstania przyczynił się ruch obrotowy i postępowy narzędzia oraz ciepło generowane podczas procesu. Analiza makroskopowa próbki nie wykazała niezgodności w zgrzeinie.



Rys. 6.1. Makrostruktura połączenia FSW S355/AA6061-T6 350_0.4_5

6.1.2. Mikrostruktura materiałów bazowych i zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6

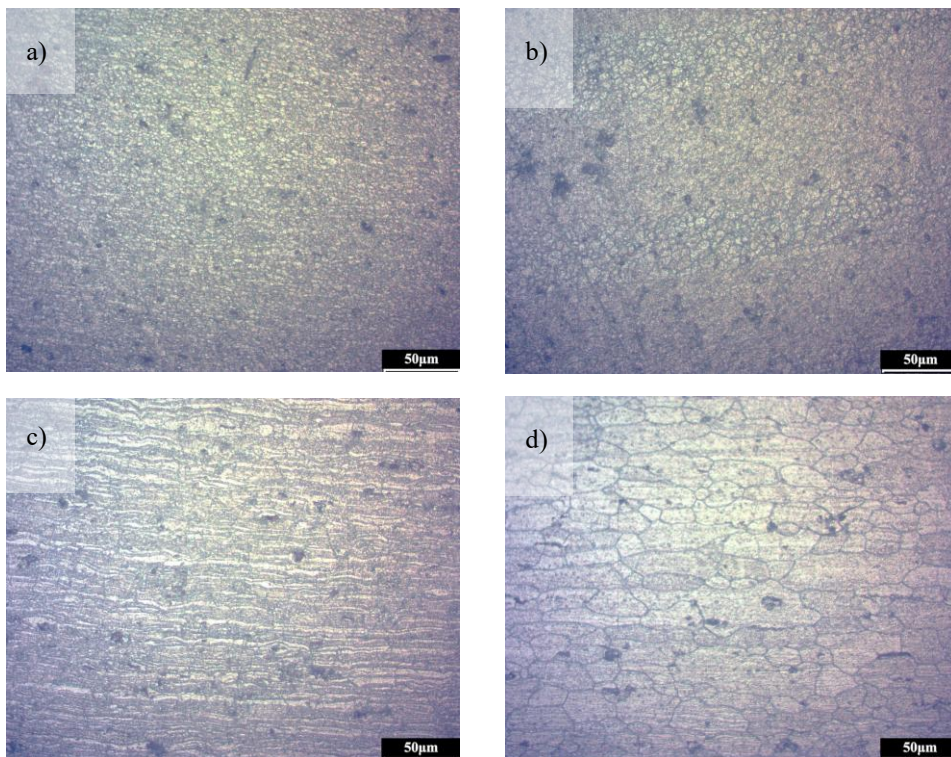
Przygotowanie zglądów oraz obserwację mikrostruktury przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.1. Rysunek 6.2 przedstawia mikrostrukturę materiałów bazowych wybranych do wykonania różnoimiennej zgrzeiny FSW. Obraz mikrostrukturalny odpowiada typowym obrazom tych materiałów i stanowi odniesienie do analizy mikrostruktury zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6.



Rys. 6.2. Mikrostruktura bazowego stopu aluminium AA6061-T6 (a); stali S355 (b)

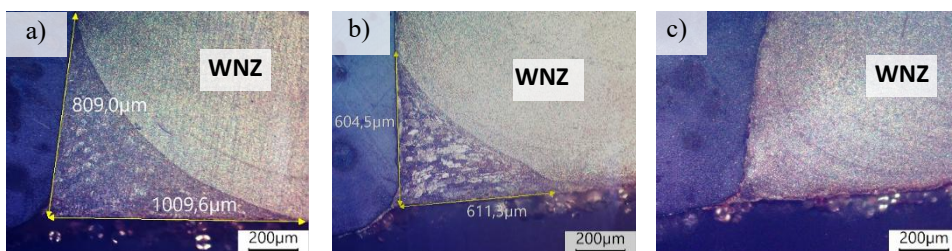
Na Rys. 6.3 przedstawiono obraz mikrostruktury w poszczególnych strefach aluminiowej części zgrzeiny. Strefa zmieszania w większości cechuje się silnie rozdrobnionymi, równoosiowymi i przemieszanymi ziarnami aluminium (Rys. 6.3 a)). Powodem tego zjawiska było ciepło tarcia i silne odkształcenie plastyczne w wyniku ruchu obrotowego narzędzia, co prowadziło do rozdrobnienia a następnie dynamicznej rekrytalizacji [69]. Podczas tego procesu mogły wystąpić 3 rodzaje rekrytalizacji dynamicznej: nieciągła rekrytalizacja dynamiczna (ang. DDRX) zachodząca poprzez zarodkowanie i wzrost, ciągła rekrytalizacja dynamiczna (ang. CDRX) obejmująca tworzenie sieci granic o niskim kącie i stopniowym wzroście dezorientacji granic oraz geometryczna rekrytalizacja dynamiczna (ang. GDRX), która jest wynikiem kolizji ząbkowanych granic ziaren, występujących w przypadku ich silnego wydłużenia termomechanicznego. Mogą one występować jednocześnie, a ich jednostkowy udział jest trudny do wyizolowania na podstawie danych eksperymentalnych [70]. Udział geometrycznej rekrytalizacji dynamicznej w jądrze zgrzeiny WNZ, może potwierdzać obraz mikrostruktury strefy cieplno-plastycznej TMAZ (Rys. 6.3 b)), który cechuje się silnie wydłużonymi i ukierunkowanymi ziarnami aluminium bez oznak rekrytalizacji. Dodatkowo w jądrze zgrzeiny zauważalne są naprzemienne pasy ziaren o większych średnicach, co przypomina swoim ułożeniem pierścienie cebuli (ang. onion rings) (Rys. 6.3 b)). Pasma te są kolejno odkładanymi przez narzędzie „warstwami” metalu, które cechują się odmienną

historią cieplno-odkształceniową [71]. Różnice w rozmiarze ziaren między strefą wpływu ciepła HAZ a bazowym aluminium były słabo zauważalne między innymi przez niewielki wpływ ciepła procesu na strukturę ziarnistą w tym obszarze połączenia (Rys. 6.3 d)).



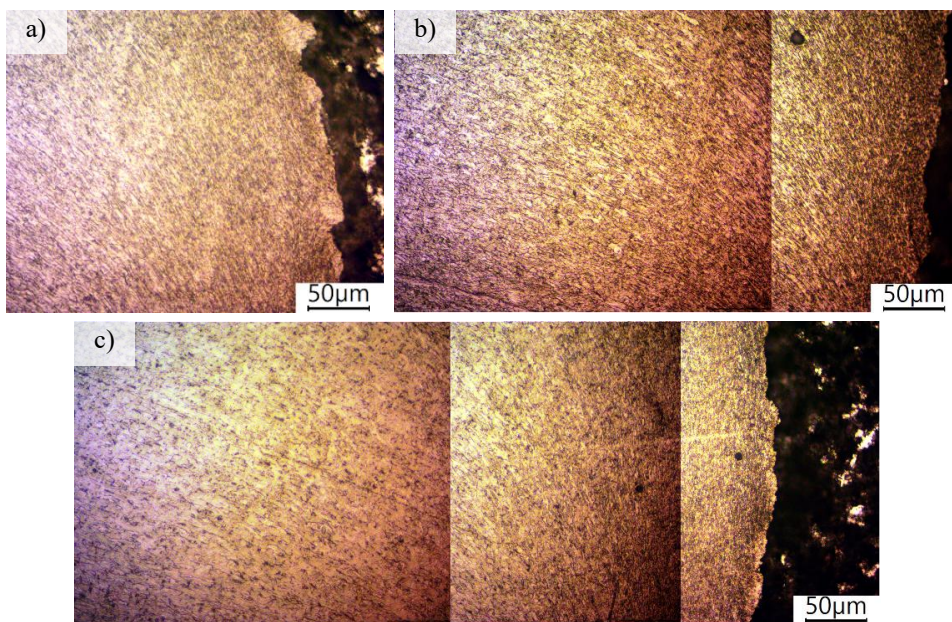
Rys. 6.3. Mikrostruktura: jądro zgrzeiny (a); „pierścienie cebuli” w strefie zmieszania (b); strefa cieplno-plastyczna TMAZ (c); strefa wpływu ciepła HAZ (d).

Analiza mikrostrukturalna połączeń FSW wykonanych przy prędkości obrotowej 250 obr/min, posuwie 25 mm/min i różnych wartościach parametru offset (0,2 mm, 0,3 mm, oraz 0,4 mm) ujawniła gruboziarnistą strukturę blisko części stalowej zgrzeiny po stronie grani. Jej obraz mikroskopowy świadczy jedynie o rozroście ziaren na skutek generowanego ciepła bez odkształceń plastycznych pożądaných w jądrze zgrzeiny. Jest to niekorzystne zjawisko, generujące zróżnicowanie mikrostrukturalne wzdłuż linii interfejsu. Jak można zauważyć na rysunku 6.4 wielkość tej struktury była, w tym przypadku, odwrotnie proporcjonalna do wartości parametru offset. Dla wartości offset 0,4 mm nie zaobserwowano tego zjawiska.



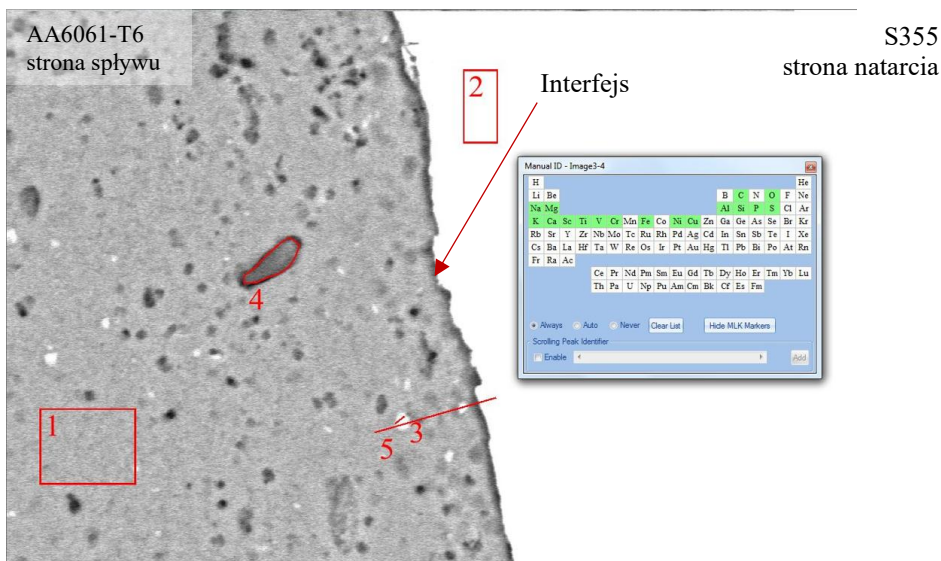
Rys. 6.4. Strefa braku zgrzania połączenia dla offsetu 0,2 mm (a), 0,3 (b) oraz 0,4 mm (c); zdjęcia z polaryzacją [62]

Ingerencja w mikrostrukturę części stalowej połączenia FSW S355/AA6061-T6 była niewielka do całości powstałej zgrzeiny. Na rysunku 6.5 przedstawiono wpływ offsetu na mikrostrukturę stali. Można zauważyć, że proces spowodował wydłużenie i ukierunkowanie ziaren stali. Obszar ten swoją budową silnie przypomina strefę cieplno-plastyczną po stronie aluminiowej.



Rys. 6.5. Wielkość i ukierunkowanie ziaren w części stalowej zgrzeiny dla offsetu 0,2 mm (a), 0,3 mm (b) i 0,4 mm (c) [62]

Przygotowany zgląd wprowadzono do komory mikroskopu skaningowego celem identyfikacji pierwiastków w obszarze zgrzeiny, z wykorzystaniem metody dyspersyjnej spektroskopii energii EDS. Rysunek 6.6 przedstawia przeanalizowane obszary.



Rys. 6.6. Punkty identyfikacji pierwiastków w obszarze zgrzeiny z wykorzystaniem metody dyspersyjnej spektroskopii energii EDS

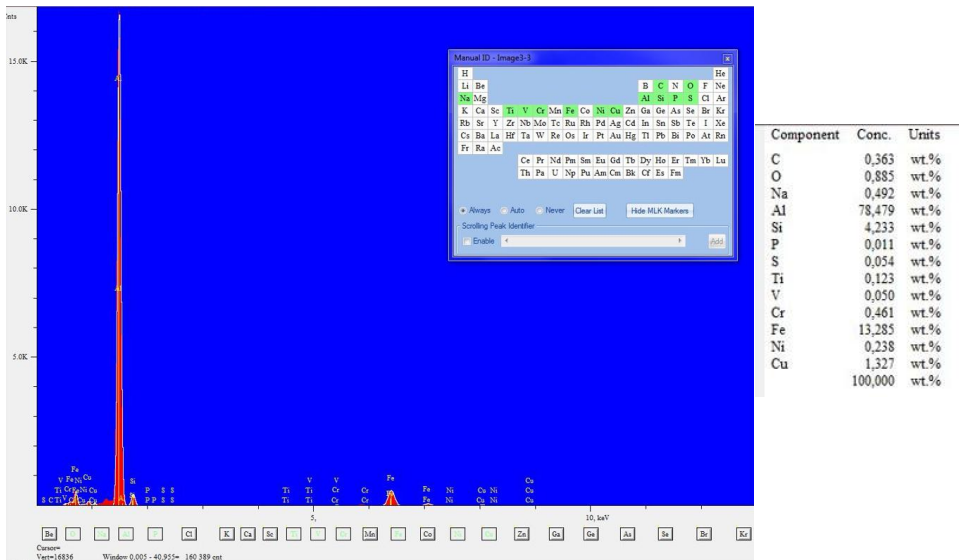
Rysunek 6.7 przedstawia udział pierwiastków w analizowanych obszarach 1 i 2. Obszar 1 znajdował się w strefie zmieszania w pobliżu interfejsu. Analiza nie wykazała obecności magnezu i obniżoną wartość krzemu w odniesieniu do składu chemicznego bazowego stopu aluminium przedstawionego w tabeli 4.1. Analiza części stalowej zgrzeiny (obszar 2) w pobliżu interfejsu wykazała niewielki udział aluminium oraz brak obecności manganu.

Obszar 1				Obszar 2			
Component	Conc.	Units		Component	Conc.	Units	
O	0,227	wt.%		C	0,894	wt.%	
Na	0,253	wt.%		O	0,000	wt.%	
Al	98,621	wt.%		Na	0,017	wt.%	
Si	0,172	wt.%		Al	0,823	wt.%	
Fe	0,407	wt.%		Si	0,225	wt.%	
Ni	0,082	wt.%		P	0,096	wt.%	
Cu	0,238	wt.%		S	0,090	wt.%	
	100,000	wt.%	Total	Ti	0,087	wt.%	
				V	0,036	wt.%	
				Cr	0,099	wt.%	
				Fe	97,197	wt.%	
				Ni	0,079	wt.%	
				Cu	0,357	wt.%	
					100,000	wt.%	Total

Rys. 6.7. Udział pierwiastków w obszarach 1 i 2 wyrażone w wt%

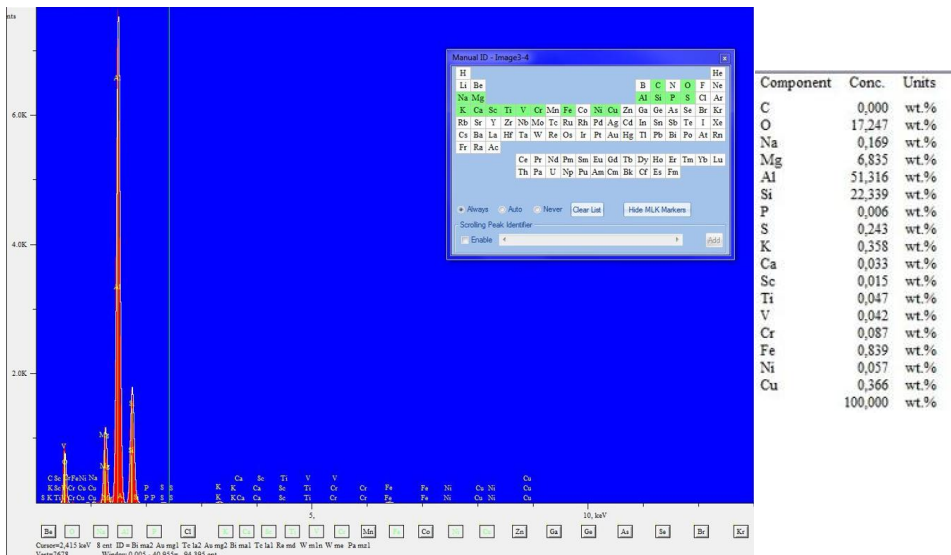
Analiza wydzielenia w obszarze numer 3 (rysunek 6.8) wykazała obecność żelaza na poziomie 13% i obecność aluminium na poziomie 78%. Może to świadczyć o potencjalnym powstawaniu wytrąceń związków intermetalicznych

AlFe rozłokowanych w osnowie aluminiowej strefy zmieszania na skutek przemian cieplno-plastycznych.

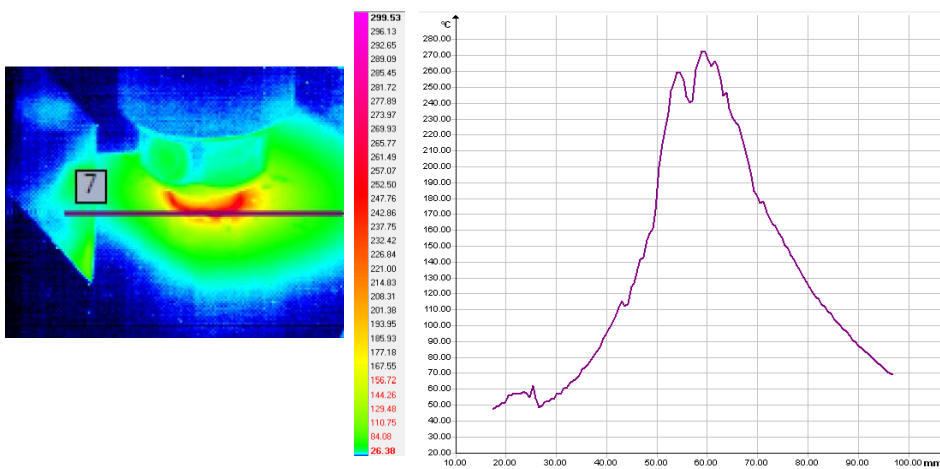


Rys. 6.8. Udział pierwiastków w obszarze 3

Analiza obszaru numer 4 (rysunek 6.9) wykazała 22% udział krzemu, 8 % udział magnezu oraz 51% udział aluminium w wydzieleniu. Stop aluminium AA6061-T6 jest obrabiany cieplnie w temperaturze 515°C- 535°C celem rozpuszczenia i przesylenia go magnezem i krzemem a następnie poddaje się go sztuczemu starzeniu w temperaturze 160°C- 180°C [72]. Biorąc pod uwagę zmierzoną temperaturę górnej powierzchni połączenia S355/AA6061-T6 podczas procesu zgrzewania metodą FSW (rysunek 6.10), możliwym jest występowanie niekorzystnych wydzielen o podwyższonym stężenia dodatków stopowych w pobliżu interfejsu zgrzeiny.

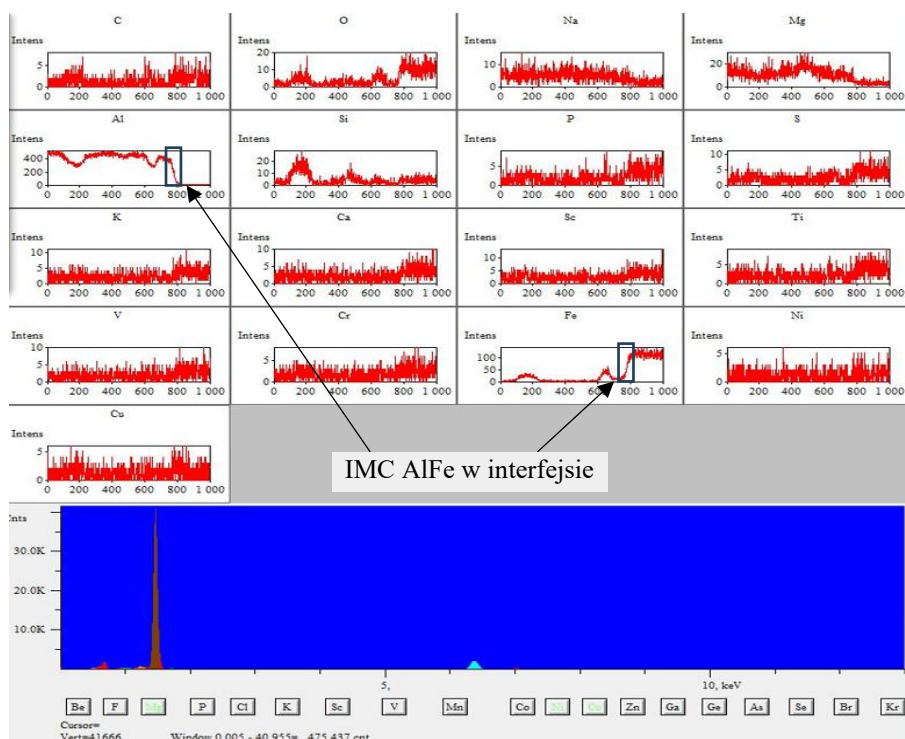


Rys. 6.9. Udział pierwiastków w obszarze 4



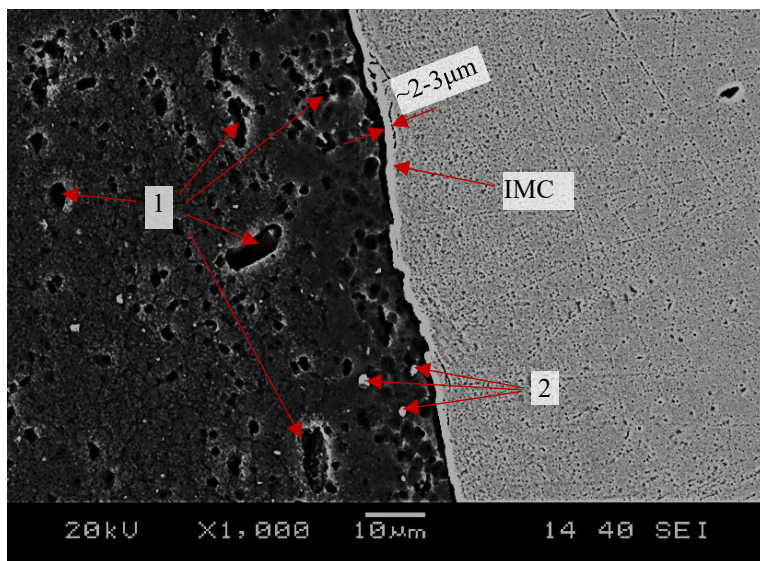
Rys. 6.10. Analiza termograficzna górnej powierzchni połączenia podczas procesu FSW

Analiza linii będącej obszarem 5 potwierdziła istnienie swobodnych wydzieleni potencjalnych związków intermetalicznych AlFe w strefie mieszania oraz udowodniła istnienie ciągłej warstwy IMC AlFe w interfejsie zgrzeiny (rysunek 6.11). Istnienie obszaru IMC w interfejsie ma kluczowe znaczenie w kontekście spójności zgrzeiny a jego rozmiar wpływa na właściwości mechaniczne zgrzeiny.



Rys. 6.11. Udział pierwiastków w obszarze 5

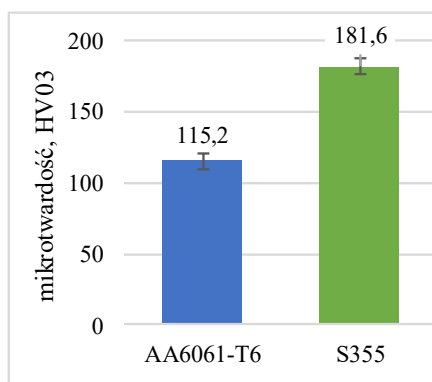
Szerokość ciągłej warstwy IMC AlFe w interfejsie analizowanej zgrzeiny wynosiła od 2 μ m do 3 μ m (rysunek 6.12), co jest zgodne z danymi literaturowymi [45] odnośnie skutków użycia stopów serii 6000 do wykonania połączenia St/Al metodą FSW. Jak można zaobserwować na przytoczonej ilustracji, strefa zmieszania w pobliżu interfejsu cechuje się wydzielaniami o podwyższonym stężeniu dodatków stopowych oraz nielicznymi potencjalnymi wydzieleniami związków IMC AlFe w osnowie aluminiowej. Wpływa to na jednorodność mikrostruktury zgrzeiny i może prowadzić do pogorszenia właściwości mechanicznych połączenia.



Rys. 6.12. Obraz mikroskopii skaningowej obszaru w pobliżu interfejsu z widoczną ciągłą warstwą związków intermetalicznych (IMC) w interfejsie, wydzielienia o podwyższonym stężeniu dodatków stopowych (1) oraz potencjalnymi wydzieleniami związków intermetalicznych AlFe w osnowie aluminiowej

6.2. MIKROTWARDOŚĆ W PRZEKROJU POPRZECZNYM ZGRZEINY S355/AA6061-T6

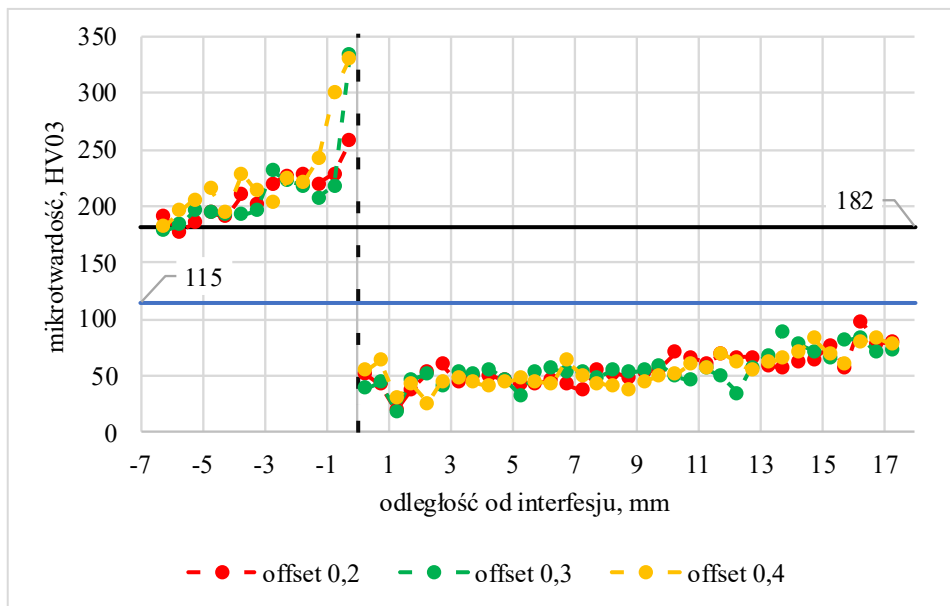
W pierwszej kolejności zbadano mikrotwardość materiałów bazowych zgrzeiny celem określenia wartości referencyjnych. Wyniki średnich wartości przedstawiono na rysunku 6.13.



Rys. 6.13. Średnie wartości mikrotwardości dla materiałów bazowych zgrzeiny

Mikrotwardość w przekroju poprzecznym zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6 zbadano zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.2. Analizie poddano

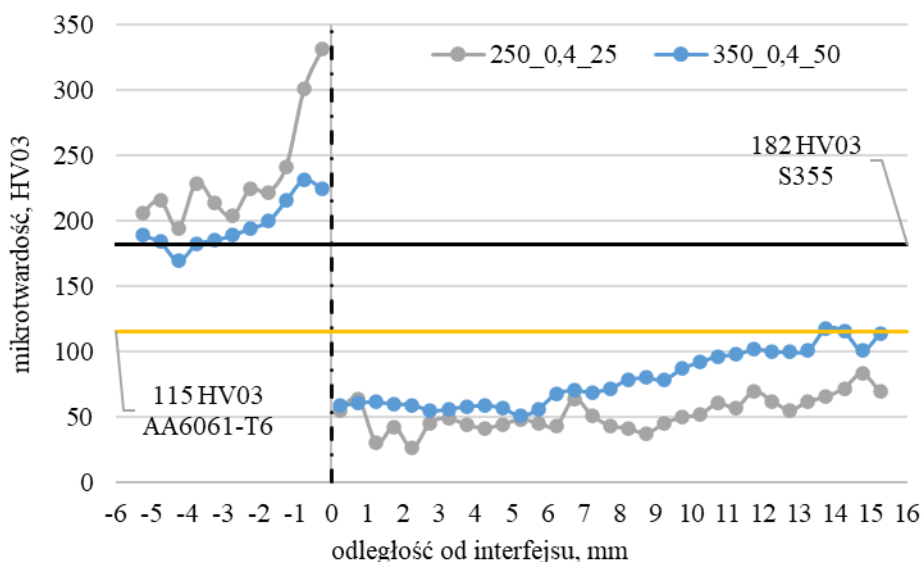
zgrzeiny wykonane z różnymi wartościami parametru offset oraz stałą prędkością obrotową narzędzia równą 250 obr/min i posuwem 25 mm/min. Trzy profile twardości przekroju poprzecznego dla wartości offset 0,2 mm, 0,3 mm oraz 0,4 mm zobrazowano na rysunku 6.14.



Rys. 6.14. Profile twardości dla przekroju poprzecznego zgrzein o różnych wartościach parametru offset

Zwiększenie wartości parametru offset przyczyniło się do wzrostu mikrotwardości części stalowej zgrzeiny w okolicy interfejsu. Zwiększanie ingerencji narzędzia w część stalową zgrzeiny prowadzi do zwiększenia intensywności odkształceń plastycznych a co za tym idzie do umocnienia odkształceniowego (Rys. 6.5). Proces FSW spowodował spadek mikrotwardości w strefie zmieszania o średnio 60% wartości bazowego stopu aluminium. Strefa TMAZ oraz HAZ również cechowały się dużym, średnio 40%, spadkiem mikrotwardości w odniesieniu do bazowego aluminium. Powodem tego zjawiska były zmiany mikrostrukturalne wywołane temperaturą procesu opisane w punkcie 6.1.2. Badanie mikrotwardości potwierdza, że znaczne rozdrobnienie ziaren aluminium nie rekompensuje skutków rozpuszczania wydzielen fazy umacniającej w stopie AA6061-T6. Ponadto nie zauważono istotnego wpływu zmiany wartości parametru offset na profil mikrotwardości po stronie aluminiowej zgrzeiny.

Docelowe połączenie FSW S355/AA6061-T6 (Tab. 4.1) również poddano badaniu mikrotwardości w przekroju poprzecznym. Wyniki pomiarów zestawiono z wynikami pomiarów dla połączenia wstępnego o takiej samej wartości parametru offset na rysunku 6.15.



Rys. 6.15. Profile twardości dla przekroju poprzecznego zgrzeiny docelowej 350_0,4_50 oraz wytypowanego z badań wstępnych zgrzeiny 250_0,4_25

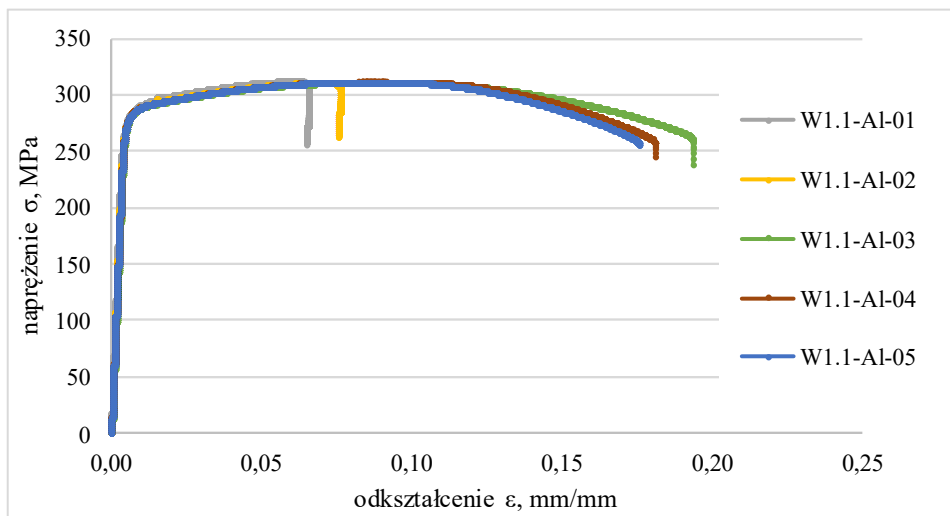
Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia oraz jego posuwu przy zachowaniu wartości parametru offset na poziomie 0,4 mm wpłynęła pozytywnie na profil mikrotwardości zgrzeiny. Po stronie stalowej zaobserwowano wyraźnie mniejszy wzrost twardości, na wyraźnie mniejszym odcinku w głąb materiału bazowego. Mikrotwardość zgrzeiny docelowej w strefie mieszania cechowała się mniejszym, średnio 50%, spadkiem twardości względem twardości bazowego aluminium, w porównaniu do zgrzein wstępnych. Brak dużych różnic wartości względem sąsiadujących punktów pomiarowych, świadczy o jednorodnej mikrostrukturze w obszarze poszczególnych stref. w odległości 13,5 mm i więcej od interfejsu, zmierzone wartości mikrotwardości były porównywalne do średniej wartości AA6061-T6, czego nie zaobserwowano dla pozostałym zgrzein poddanych temu badaniu. Zwiększenie prędkości posuwu narzędzia spowodowało zmniejszenie ilości ciepła dostarczonego do zgrzeiny a zwiększenie jego prędkości obrotowej spowodowało jego dokładniejsze wymieszanie. Przyczyniło się to do zmniejszenia gradientu mikrotwardości w przekroju poprzecznym zgrzeiny.

6.3. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

6.3.1. Właściwości mechaniczne materiałów bazowych

Próbie monotonicznego rozciągania przeprowadzono zgodnie z metodą przedstawioną w punkcie 5.3.1. Dla analizowanego stopu aluminium oraz stali przebadano po 5 próbek. Na rysunku 6.16 przedstawiono wykresy naprężenia

w funkcji odkształcenia dla próbek z stopu aluminium AA6061-T6. W tabeli 6.1 zestawiono wyznaczone wartości modułu Younga E , wytrzymałości na rozciąganie R_m , umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$ oraz całkowitego wydłużenia przy R_m A_{gt} . Wartości opisanych właściwości mechanicznych przedstawiono dla poszczególnych próbek oraz wyznaczono ich wartości średnie.



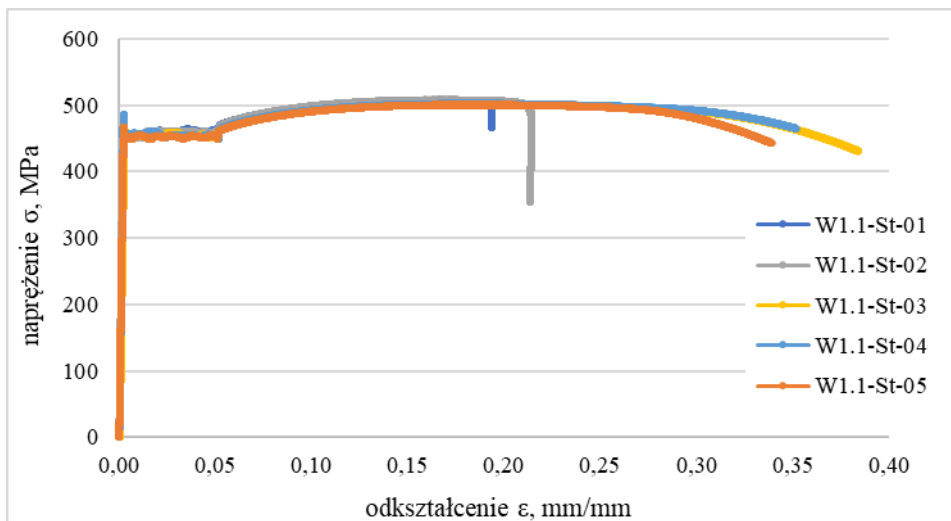
Rys. 6.16. Wykresy naprężenie/odkształcenie dla próbek z stopu aluminium AA6061-T6

Tab. 6.1. Wartości podstawowych właściwości mechanicznych dla poszczególnych próbek z stopu aluminium AA6061-T6

nr próbka	E	R_m	$R_{0.2}$	A_{gt}
	MPa	MPa	MPa	%
W1.1-Al-01	74318	312,1	278,7	6,1
W1.1-Al-02	71352	310,7	278,3	7,2
W1.1-Al-03	63997	310,9	278,4	8,9
W1.1-Al-04	66777	311,5	280,5	8,5
W1.1-Al-05	67919	311,3	278,5	8,9
średnia	68873	311,3	278,9	7,9
odch. stand.	4027	0,5	0,9	1,3

Średnia wytrzymałość na rozciąganie R_m wyniosła 311,3 MPa a średnia wartość umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$ to 278,9 MPa. Wartość średnia modułu Younga E osiągnęła 68873 MPa natomiast średnia wartość całkowitego wydłużenia przy R_m A_{gt} nie przekroczyła 8% (7,9 %). Wyznaczone wartości odpowiadają wartościom literaturowym [73].

Na rysunku 6.17 przedstawiono wykresy naprężenia w funkcji odkształcenia dla próbek z stali S355. W tabeli 6.2 zestawiono wyznaczone wartości modułu Younga E , wytrzymałości na rozciąganie R_m , górnej granicy plastyczności R_{eh} oraz całkowitego wydłużenia przy R_m A_{gt} . Wartości opisanych właściwości mechanicznych przedstawiono dla poszczególnych próbek oraz wyznaczono ich wartości średnie.



Rys. 6.17. Wykresy naprężenie/odkształcenie dla próbek z stali S355

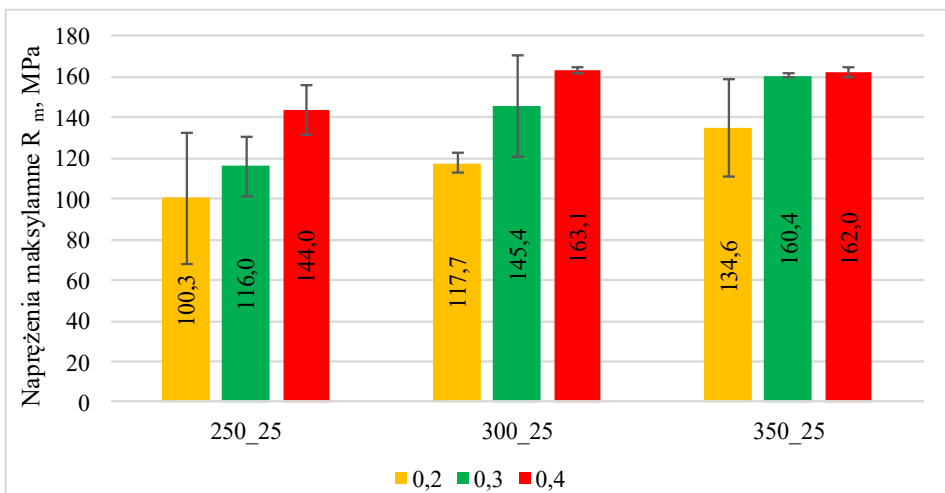
Tab. 6.2. Wartości podstawowych właściwości mechanicznych dla poszczególnych próbek z stali S355

nr próbka	E	R_m	R_{eh}	A_{gt}
	MPa	MPa	MPa	%
W1.1-St-01	229072	506,9	470,3	16,4
W1.1-St-02	226093	508,1	460,1	16,6
W1.1-St-03	203202	502,1	475,2	18,3
W1.1-St-04	214884	502,4	485,8	18,7
W1.1-St-05	206028	500,7	467,0	18,3
średnia	215856	504,1	471,7	17,7
odch. stand.	11588	3,2	9,6	1,1

Średnia wytrzymałość na rozciąganie R_m wyniosła 504,1 MPa a średnia wartość górnej granicy plastyczności R_{eh} to 471,7 MPa. Wartość średnia modułu Younga E wyniosła 215855 MPa natomiast średnia wartość całkowitego wydłużenia przy R_m A_{gt} wyniosło 17,7 %. Średnie wartości są zgodne z normą PN-EN 10025-2 [74].

6.3.2. Właściwości mechaniczne połączenia S355/AA6061-T6

Monotoniczne próby rozciągania dla połączenia doczołowego FSW S355/AA6061-T6 w skali makro przeprowadzono zgodnie z metodą przedstawioną w punkcie 5.3.2. Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m dla poszczególnych wariantów połączenia zgodnie z tabelą 4.3 przedstawiono na rysunku 6.18.



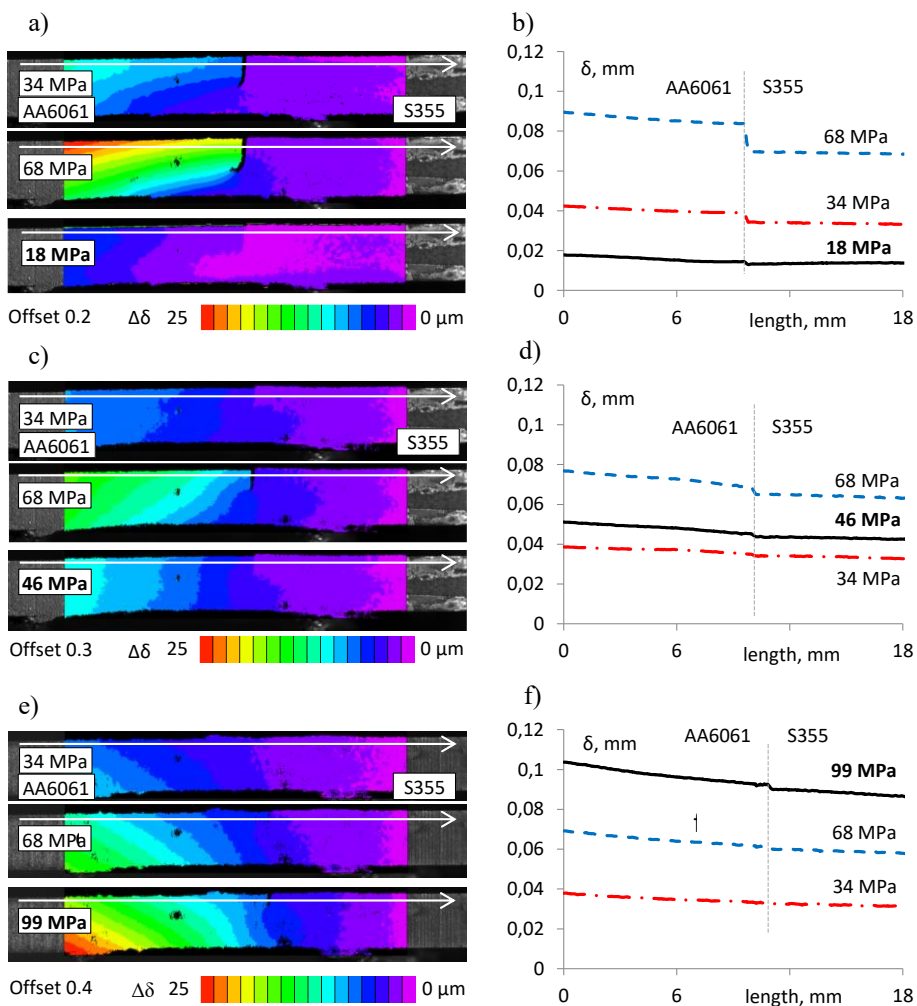
Rys. 6.18. Wykres średnich wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m połączenia FSW S355/AA6061-T6 dla kombinacji różnych prędkości obrotowych narzędzia i różnych wartości parametru offset

Połączenie FSW S355/AA6061-T6 wykonane z prędkością obrotową narzędzia wynoszącą 250 obr/min i prędkością posuwu równą 25 mm/min wykazało najwyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie R_m równą 144,0 MPa dla offsetu 0,4 mm. Najwyższą wartość R_m , 163,1 MPa, wykazało połączenie wykonane z prędkością obrotową 300 obr/min, prędkością posuwu równą 25 mm/min oraz offsetem 0,3 mm. Z wyników badań wstępnych można zauważyć, że zarówno wartość parametru offset oraz prędkość obrotowa narzędzia wpływa na wytrzymałość oraz powtarzalność połączenia różnoimienne S355/AA6061-T6.

Jednym z powodów znacznych różnic w średnich wartościach wytrzymałości na rozciąganie R_m dla poszczególnych offsetów przy prędkości obrotowej 250 obr/min jest zróżnicowanie mikrostrukturalne zgrzeiny w obszarze interfejsu (rysunek 6.4). Na rysunku 6.19 a), c) i e) pokazano przykładowe zakresy rozkładów przemieszczeń $\Delta\delta$ w kierunku obciążenia w próbkach w wybranych fazach obciążenia tj. dla naprężenia nominalnego $S=34$ i 68 MPa. Rysunki 6.19 b), d) i f) przedstawiają rozkłady przemieszczeń δ w momencie utraty spójności w przekrojach oznaczonych na rysunkach białą osią. Dla każdej z próbek

określono przybliżone naprężenia nominalne S , pod wpływem których, zgrzeina traciła spójność i następował efekt rozrywania próbki (czarna linia na wykresach pokazanych na rysunkach 6.19 b), d) i f)).

Dla próbki 250_0,2_25 nieciągłość w analizowanym przekroju próbki zaobserwowano przy naprężeniu $S=18$ MPa. Dla próbki połączenia 250_0,3_25 naprężenie S wyniosło 46 MPa a dla próbki 250_0,4_25 osiągnęło 99 MPa. Efekt nieciągłości zgrzein lub jej zróżnicowana wytrzymałość wzdłuż linii interfejsu może mieć niekorzystny wpływ na jego aplikacyjność.

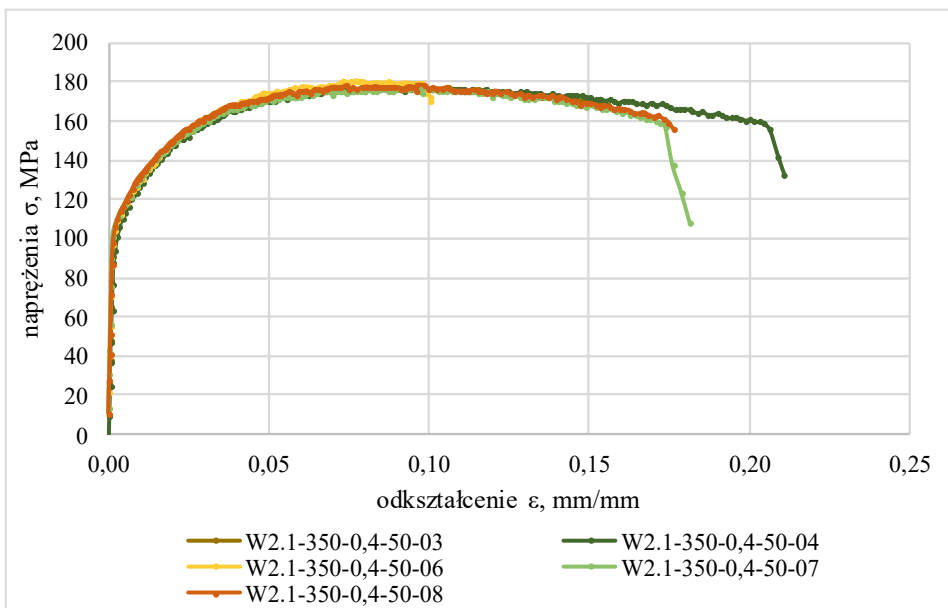


Rys. 6.19. Przykładowe zakresy rozkładów przemieszczeń $\Delta\delta$ w kierunku obciążenia w próbkach z offsetem 0,2 mm (a), 0,3 mm (c) i 0,4 mm (e); rozkłady przemieszczeń δ w fazie utraty spójności zgrzeiny w wybranym przekroju połączenia z offsetem 0.2 mm (b), 0.3 mm (d) i 0.4 mm (f) [62]

Jak można zaobserwować (rysunek 6.18), wzrost prędkości obrotowej narzędzia wpływa korzystnie na wytrzymałość i powtarzalność połączenia FSW S355/AA6061-T6. Jej zwiększanie umożliwia dokładniejsze przemieszanie oraz powoduje wzrost ilości ciepła dostarczanego do zgrzeiny w wyniku tarcia co skutkowało tworzeniem połączeń o lepszej spójności wzdłuż jego interfejsu. Mimo wyraźnego wpływu, najlepsze warianty połączenia pod względem wytrzymałości na rozciąganie oscylowały w okolicach 160 MPa. Aby ocenić aplikacyjność zgrzeiny a zarazem wytypować zestaw parametrów procesowych do dalszej analizy, wyniki zweryfikowano pod kątem wymogów minimalnych wytrzymałości na rozciąganie stawianym połączeniom stopów aluminium AA6061-T6 wykonanych konwencjonalnymi metodami spawania. Międzynarodowe Stowarzyszenie Towarzystw Klasyfikacyjnych (IACS) określiło minimalną wytrzymałość na rozciąganie dla połączenia spawanego AA6061-T6 na poziomie 170 MPa [75]. Autorzy [76] granicę tę określili na poziomie 160 MPa. Tylko niektóre z przeanalizowanych wariantów połączenia połowicznie spełniają postawione kryteria.

Biorąc pod uwagę iż w grupie badanych parametrów, prędkość obrotowa na poziomie 350 obr/min zminimalizowała wpływ wartości offset poprzez zrównanie średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie dla każdego z wariantów tego parametru do poziomu około 160 MPa oraz pozwoliła uzyskać najniższe wartości odchyłeń standardowych, wartość ta została przyjęta do dalszej analizy. Na podstawie analizy mikroskopowej połączeń, ze względu na brak efektu niedogrzanania po stronie grani zgrzeiny w grupie połączeń wykonanych przy prędkości 250 obr/min (rysunek 6.4) zdecydowano się na przyjęcie do dalszej analizy wartość parametru offset na poziomie 0,4 mm. Aby poprawić mikrostrukturę a co za tym idzie właściwości mechaniczne połączenia postanowiono zredukować ilość dostarczanego ciepła do połączenia poprzez zwiększenie prędkości posuwu do 50 mm/min oraz zwiększenie średnicy trzpienia do 6 mm.

Wykonano połączenie o parametrach zgodnych z tabelą 4.4. Wycięte próbki (rysunek 4.5) poddano próbie monotonicznego rozciągania zgodnie z metodą opisaną w punkcie 5.3.2. Rysunek 6.20 przedstawia wykresy naprężenia w funkcji odkształcenia ,wyznaczonego z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu, dla poszczególnych próbek. W tabeli 6.3 zestawiono wyznaczone wartości modułu Younga E^* (wyznaczone z wykorzystaniem DIC), wytrzymałości na rozciąganie R_m , umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$ oraz całkowitego wydłużenia przy R_m A_{gt} . Wartości opisanych właściwości mechanicznych przedstawiono dla poszczególnych próbek oraz wyznaczono ich wartości średnie.



Rys. 6.20. Wykresy naprężenie/odkształcenie dla próbek z połączenia FSW S355/AA6061-T6

Tab. 6.3. Wartości podstawowych właściwości mechanicznych dla poszczególnych próbek z połączenia FSW S355/AA6061-T6

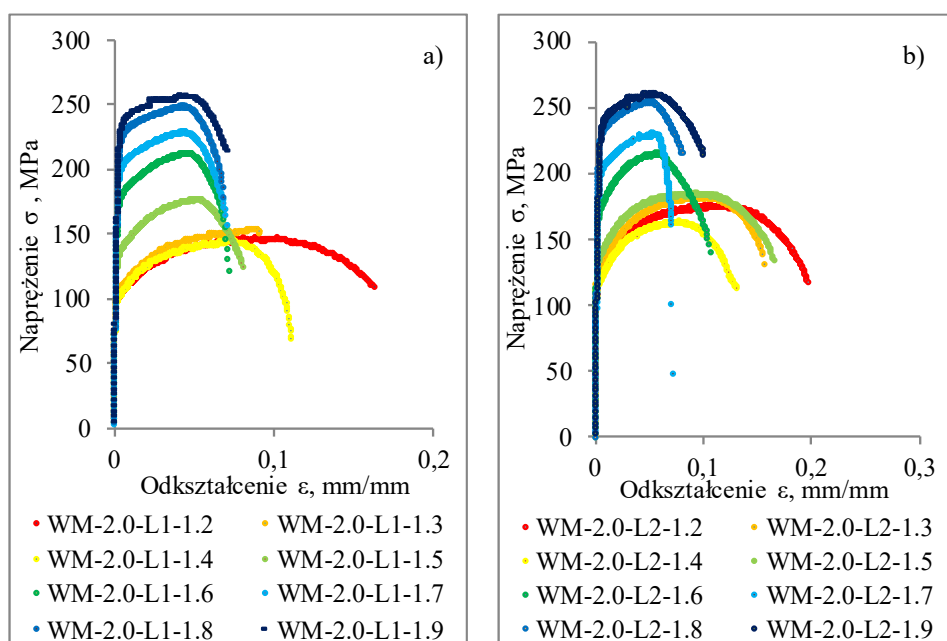
nr próbka	E*	R _m	R _{0,2}	A _{gt}
	MPa	MPa	MPa	%
W2.1-350-0,4-50-03	70301	177,9	112,5	8,0
W2.1-350-0,4-50-04	72759	177,8	109,2	8,6
W2.1-350-0,4-50-06	73793	180,7	118,1	7,7
W2.1-350-0,4-50-07	69477	177,3	138,9	9,8
W2.1-350-0,4-50-08	72267	178,2	137,3	9,6
średnia	71720	178,4	123,2	8,8
odch. stand.	1783	1,4	14,0	0,9

Połączenie 350_0,4_50 wykazało średnią wartość wytrzymałości na rozciąganie $R_m=178,4$ MPa co stanowi 57% średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie bazowego stopu aluminium. Średnia wartość modułu Younga E oraz średnie całkowite wydłużenie przy R_m A_{gt} dla tej zgrzeiny były zbliżone dla średnich wartości aluminium AA6061-T6 (tabela 6.1). Wpływ na spadek wytrzymałości na rozciąganie oraz wartości umownej granicy plastyczności był spowodowany przemianami mikrostrukturalnymi w zgrzeinie opisanymi w punkcie 6.1.2 a co za tym idzie spadkiem twardości w poszczególnych strefach.

Właściwości mechaniczne uzyskanego połączenia różnoimennego FSW spełniają wymagania stawiane przez autorów [75,76] a ich powtarzalność jest wyższa niż połączeń przeanalizowanych podczas badań wstępnych. Pozwala to stwierdzić, że zgrzeina ta jest zdolna do przenoszenia obciążeń i może być stosowana do tworzenia odpowiedzialnych konstrukcji. Tę zgrzeinę wytypowano do dalszych badań.

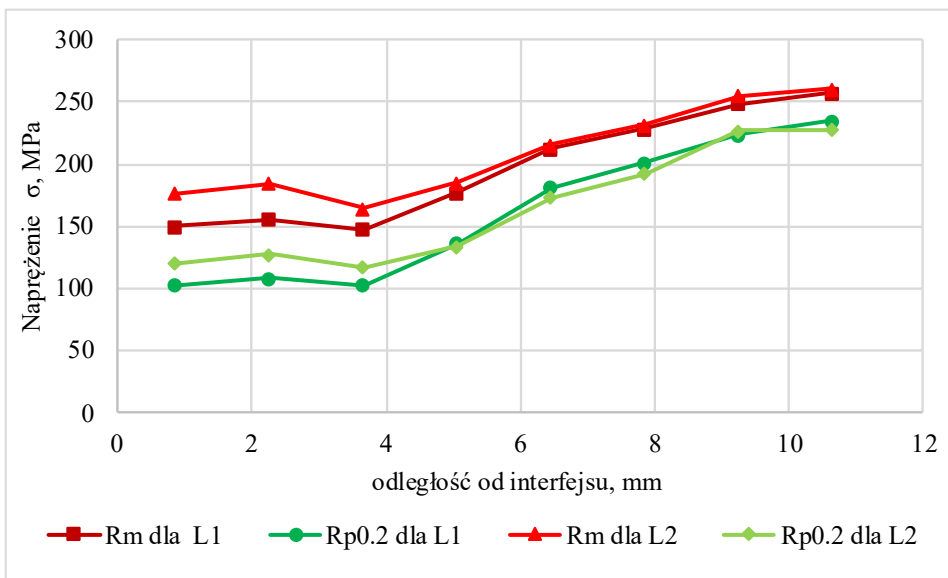
6.3.3. Statyczne właściwości lokalne zgrzeiny S355/AA6061-T6

Badania statycznych właściwości lokalnych zgrzeiny S355/AA6061-T6 przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w punkcie 5.3.3 z wykorzystaniem próbek przedstawionych w podpunkcie 4.3.2.2. Badania przeprowadzono dla 8 punktów pomiarowych w dwóch warstwach, L1 i L2, części aluminiowej zgrzeiny. Rysunek 6.21 prezentuje wykresy naprężenie/odkształcenie dla próbek WM-2.0 z wykonanych z warstw zgrzeiny L1 i L2.



Rys. 6.21. Wykresy naprężenie/odkształcenie dla próbek WM-2.0 z warstwy L1 (a) i warstwy L2 (b)

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$ dla badanych punktów przedstawiono na wykresie (rysunek 6.22). Wartości właściwości mechanicznych uzyskane dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabelach 6.4 i 6.5.



Rys. 6.22. Wykres R_m i $R_{0.2}$ dla badanych punktów w warstwach L1 i L2

Tab. 6.4. Właściwości mechanicznych dla poszczególnych próbek z warstwy L1

Nazwa próbki	R_m , MPa	$R_{0.2}$, MPa	E, MPa
WM-2.0-L1-1.2	149,6	102,0	70920
WM-2.0-L1-1.3	155,1	108,0	70955
WM-2.0-L1-1.4	147,7	102,0	70867
WM-2.0-L1-1.5	176,9	136,0	70889
WM-2.0-L1-1.6	212,4	181,0	70504
WM-2.0-L1-1.7	228,5	201,0	70562
WM-2.0-L1-1.8	248,4	224,0	70502
WM-2.0-L1-1.9	257,9	235,0	70683

Tab.6.5. Właściwości mechanicznych dla poszczególnych próbek z warstwy L2

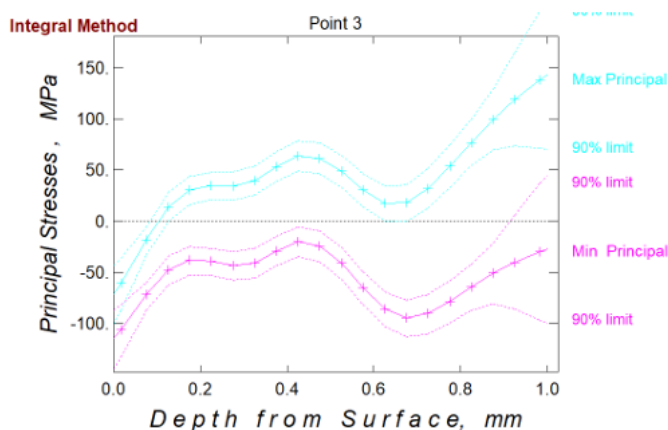
Nazwa próbki	R_m , MPa	$R_{0,2}$, MPa	E, MPa
WM-2.0-L2-1.2	176,6	120,0	70937
WM-2.0-L2-1.3	184,2	127,0	78178
WM-2.0-L2-1.4	164,1	117,0	70037
WM-2.0-L2-1.5	185,5	134,0	70987
WM-2.0-L2-1.6	215,8	173,0	70178
WM-2.0-L2-1.7	231,9	192,0	66250
WM-2.0-L2-1.8	255,3	227,0	67407
WM-2.0-L2-1.9	261,1	228,0	63120

Wyższą wytrzymałością na rozciąganie R_m w każdym z punktów wykazały się próbki z warstwy L2. Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ dla pierwszych trzech punktów oraz punktu 8 była wyższa w warstwie L2, a dla pozostałych punktów, jej wyższe wartości odnotowano dla warstwy L1. Nie wykazano znaczących różnic w module Younga E dla poszczególnych próbek. Jak wynika z uzyskanych danych, zarówno wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ były zależne od odległości od interfejsu oraz odległości od lica zgrzeiny. Świadczy to o dużym zróżnicowaniu właściwości mechanicznych w obrębie powstałej zgrzeiny zarówno w kierunku prostopadłym jak i równoległym do interfejsu. Powodem takiego zróżnicowania może być nierównomierne rozprowadzanie ciepła po grubości zgrzeiny ze względu na wieniec opory biorący czynny udział w nagrzewaniu elementów oraz niejednorodność mikrostrukturalna po szerokości przekroju poprzecznego zgrzeiny wynikająca z procesu FSW.

Na podstawie analizy mikrotwardości w przekroju poprzecznym zgrzeiny (rysunek 6.15) oraz lokalnych właściwości mechanicznych, zaobserwowano korelację między tymi dwiema właściwościami mechanicznymi.

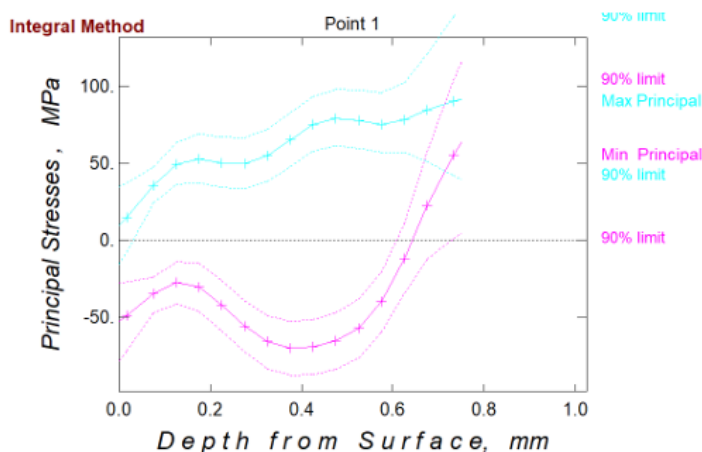
6.4. NAPRĘŻENIA WŁASNE W ZGRZEINIE S355/AA6061-T6

Analizę naprężeń własnych przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.4. Zmiany naprężeń głównych wraz z przyrostem głębokości w P1 i P3 przedstawiono w postaci wykresu na rysunkach 6.23 i 6.24.



Rys. 6.23. Zmiany naprężeń głównych w P3 wraz z przyrostem głębokości

W badanym obszarze, do głębokości około 0,15 mm, widoczny jest efekt obróbki powierzchni wykonanej podczas przygotowania miejsca pod instalację tensometru. Obróbka ta wprowadziła w warstwie wierzchniej naprężenia ściskające o wartości od -60 MPa do -105 MPa, typowe dla szlifowania papierem ściernym. Na głębokości od 0,2 mm do 0,5 mm stan naprężeń ulega stabilizacji. Pojawiają się naprężenia rozciągające w kierunku wzdłużnym (od 30 MPa do 60 MPa) oraz naprężenia ściskające w kierunku poprzecznym, prostopadłym do osi zgrzeiny (-40 MPa do -50 MPa). Poniżej tej strefy obserwuje się wyraźniejsze naprężenia ściskające przy jednoczesnym zmniejszeniu naprężeń rozciągających. Efekt ten można powiązać z działaniem pierścienia opory narzędzia, powodującego miejscowe „wciskanie” materiału w głąb zgrzeiny.



Rys. 6.24. Zmiany naprężeń głównych w P1 wraz z przyrostem głębokości

Podobnie jak w przypadku punktu P3, do głębokości około 0,1 mm zauważalny jest wpływ obróbki powierzchni papierem ściernym. Proces ten redukuje przypowierzchniowe naprężenia rozciągające do poziomu około 15 MPa w kierunku równoległym do interfejsu oraz wprowadza naprężenia ściskające o wartości -50 MPa w kierunku prostopadłym do interfejsu. Poniżej, od głębokości około 0,15 mm do 0,75 mm, obserwuje się stopniowy wzrost naprężeń rozciągających w kierunku równoległym do interfejsu od 50 MPa do 90 MPa. Naprężenia w kierunku prostopadłym do interfejsu utrzymują się w charakterze ściskającym, osiągając maksymalnie około -70 MPa w zakresie od 0,3 mm do 0,5 mm, a następnie zmieniają swój charakter na rozciągający przy głębokości około 0,65 mm.

W punktach P2, P3 oraz P5 przeprowadzenie analizy rozkładu naprężeń okazało się niemożliwe z uwagi na uzyskanie niewiarygodnych sygnałów pomiarowych. Główną przyczyną była niejednorodna struktura zgrzeiny, składająca się m.in. z potencjalnych fragmentów stali znajdujących się w aluminium. Ze względu na znacznie większą twardość stali w porównaniu z aluminium, proces skrawania przebiegał nierównomiernie. W trakcie pomiarów dochodziło do zjawiska wyrywania wtrąceń stalowych z osnowy oraz ich wtłaczania w ścianki otworu, co prowadziło do istotnych zakłóceń sygnału wyjściowego. Opisane mechanizmy występowały w tych punktach z dużą częstotliwością już od początkowej fazy badań, uniemożliwiając tym samym wyznaczenie nawet przybliżonych wartości naprężeń przypowierzchniowych. Dodatkowym czynnikiem zakłócającym pomiary było odchylenie freza od osi pionowej, wynikające z jednoczesnego skrawania materiału miękkiego (stopu aluminium) i twardego (stali). Nierównomierny opór skrawania prowadził do asymetrycznego zagłębiania się freza, co w konsekwencji dodatkowo obniżało wiarygodność uzyskanych wyników.

Badania naprężeń własnych udowadniają obecność swobodnych potencjalnych wydzielen intermetalicznych AlFe, wyrwanych cząstek części stalowej i podwyższonego stężenia dodatków stopowych w jądrze zgrzeiny oraz strefie cieplno-plastycznej. Fragmenty te powodują niejednorodność zgrzeiny i mogą być przyczyną różnic w właściwościach mechanicznych poszczególnych próbek.

Wyznaczone naprężenia własne w kierunku poprzecznym do osi zgrzeiny mają w ogólności ujemne wartości i nie przekraczają 100MPa, co można uznać za pozytywny efekt z punktu widzenia rozciągających obciążeń złącza (w tym obciążeń zmiennych w czasie). Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w przypadku punktu położonego w pobliżu interfejsu (punkt nr 1) wraz ze wzrostem odległości od powierzchni ich wartość rośnie i zmienia charakter na rozciągający, co utrudnia jednoznaczną ocenę wpływu naprężeń własnych na wytrzymałość złącza.

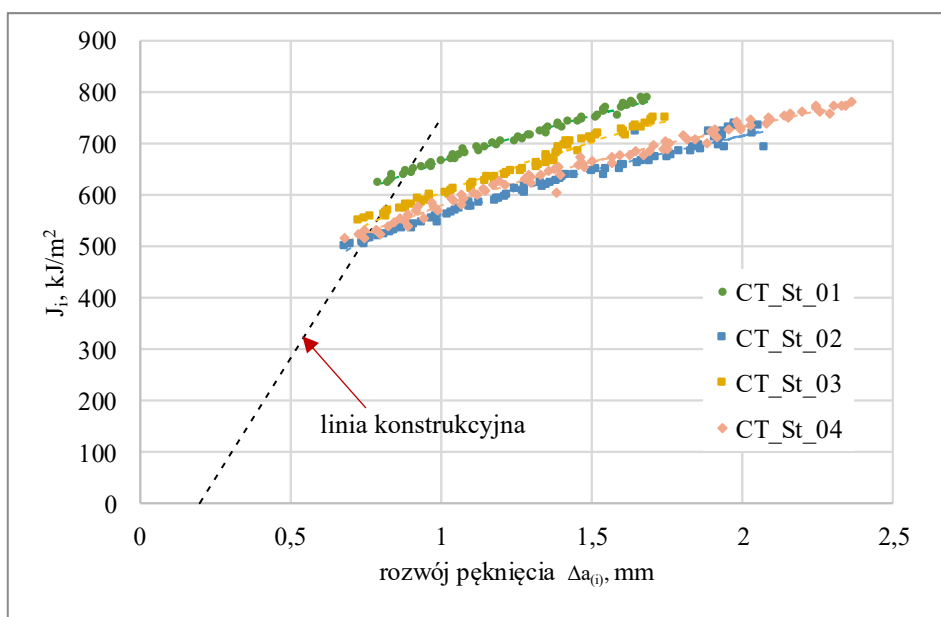
6.5. ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE MATERIAŁÓW BAZOWYCH ORAZ POŁĄCZENIA S355/AA6061-T

Badania odporności na pękanie przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.5 z wykorzystaniem próbek przedstawionych w punkcie 4.3.3. Wyznaczone przebiegi $J_i/\Delta a_{(i)}$ przedstawiono na rysunkach od 6.25 do 6.29. Wrysowana linia jest linią konstrukcyjną z przesunięciem o 0,2 mm wyznaczona ze wzoru:

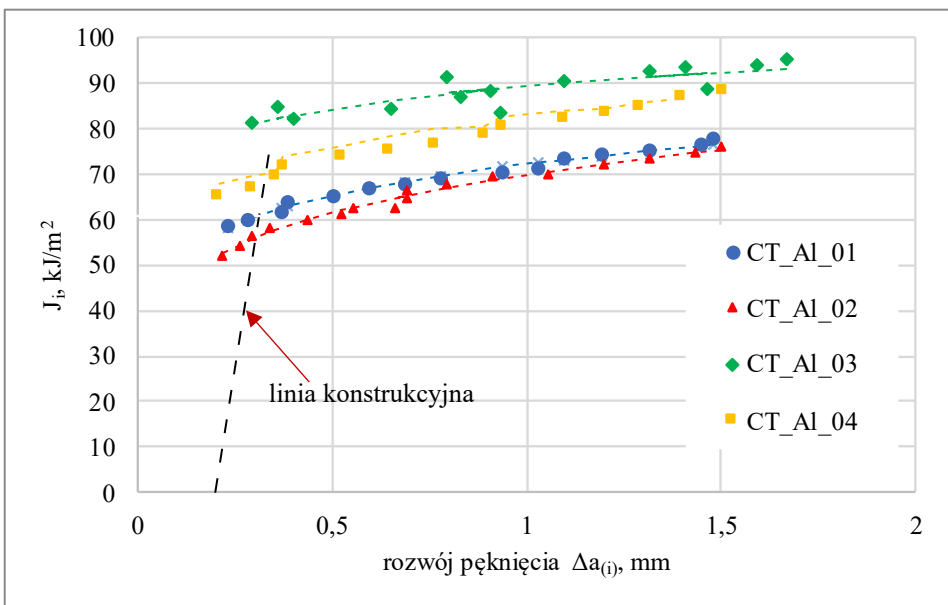
$$J = 2\sigma_y \cdot \Delta a \quad (6.1)$$

gdzie:

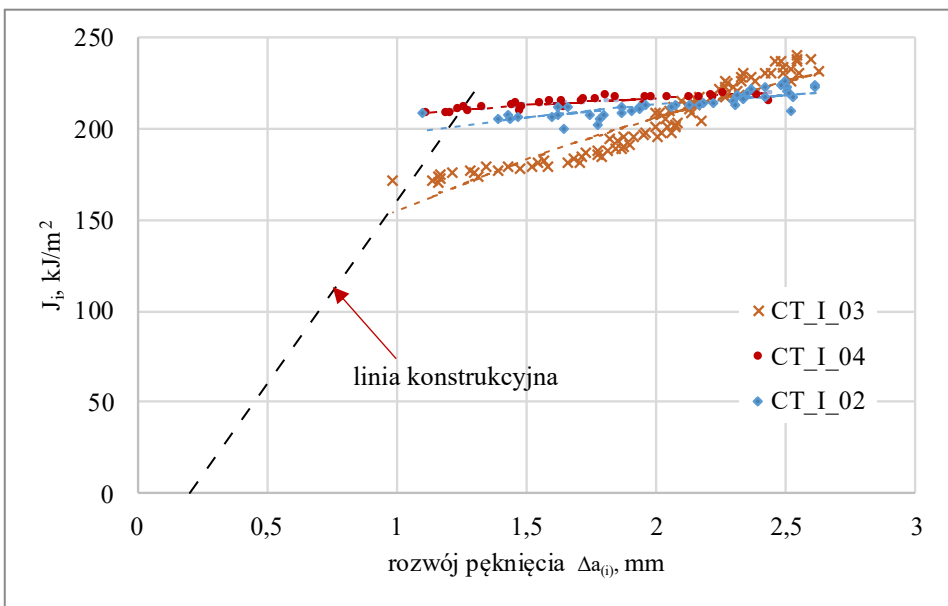
σ_y - granica plastyczności materiału.



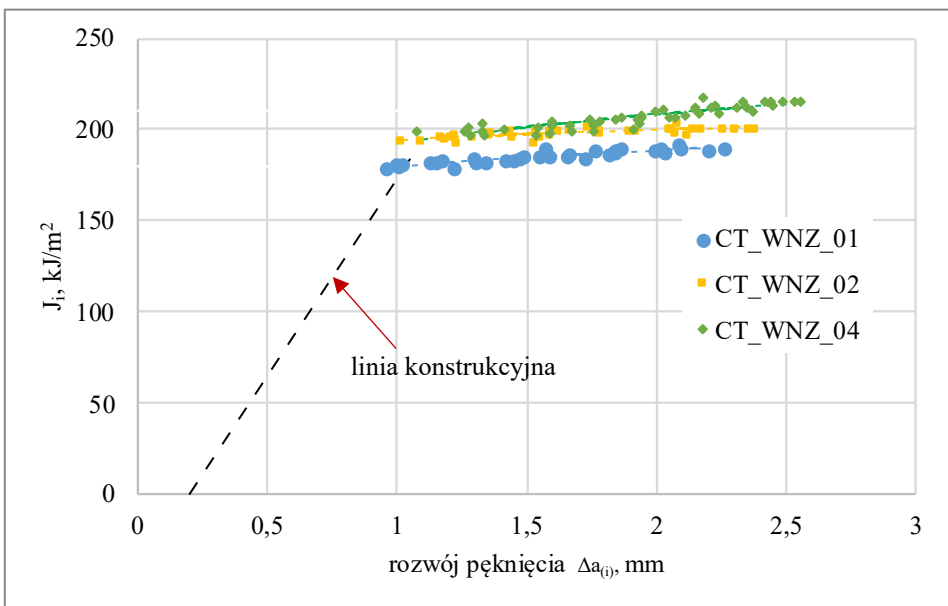
Rys. 6.25. Wyznaczone przebiegi $J_i/\Delta a_{(i)}$ dla próbek z stali S355



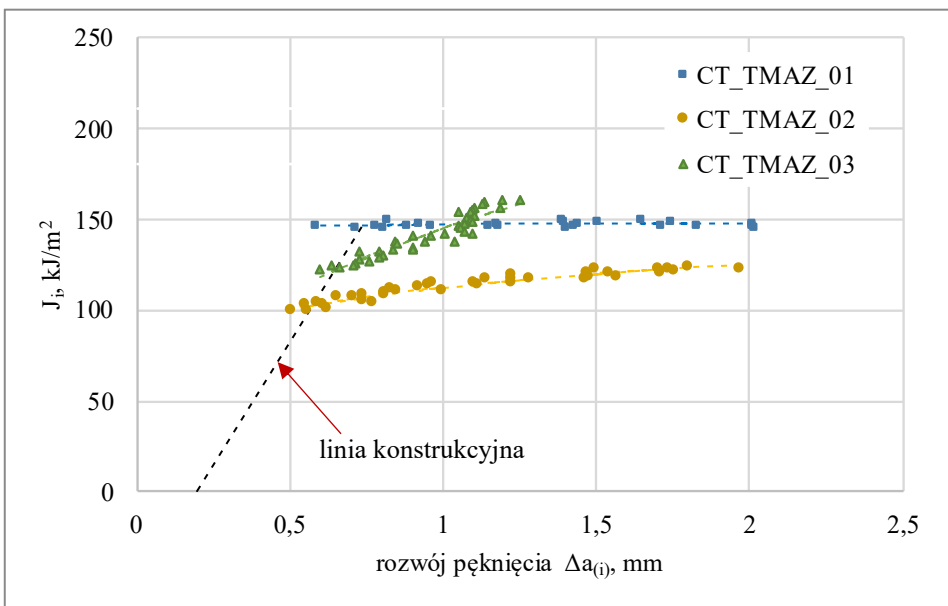
Rys. 6.26. Wyznaczone przebiegi $J_I/\Delta a(i)$ dla próbek ze stopu aluminium AA6061-T6



Rys. 6.27. Wyznaczone przebiegi $J_I/\Delta a(i)$ dla próbek z połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w interfejsie



Rys. 6.28. Wyznaczone przebiegi $J_i/\Delta a_{(i)}$ dla próbek z połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w jądrze zgrzeiny



Rys. 6.29. Wyznaczone przebiegi $J_i/\Delta a_{(i)}$ dla próbek z połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w strefie cieplno-plastycznej

Na podstawie przedstawionych zależności $J_i/\Delta a_{(i)}$ oraz przytoczonej metody wyznaczono wartości J_Q dla poszczególnych próbek. Wyznaczone wartości J_Q dla każdej z próbek CT materiałów bazowych wraz z średnią oraz odchyleniem standardowym zaprezentowano w tabeli 6.6.

Tab. 6.6. Wartości J_Q dla poszczególnych próbek CT z materiałów bazowych

AA6061_T6	J_Q , kJ/m ²	S355	J_Q , kJ/m ²
CT_Al_01	60,9	CT_St_01	640,7
CT_Al_02	56,0	CT_St_02	506,0
CT_Al_03	82,2	CT_St_03	553,2
CT_Al_04	68,8	CT_St_04	528,6
Średnia	67,0	Średnia	557,1
Odch. Stand.	11,4	Odch. Stand.	58,9

Średnia wartość J_Q dla bazowego aluminium przy zastosowaniu próbek o nienormatywnej grubości oraz nienormatywnym stosunku B/W wyniosła 67 kJ/m². W badaniach opisanych przez MacMastera i współautorów [77] porównano odporność na pękanie stopów aluminium AA6069-T6 i AA6061-T6. Autorzy zastosowali klasyczne próby wyznaczania współczynnika K_{IC} oraz K_Q , a także testy oparte na całce J według normy ASTM E813. Wartość K_{IC} dla AA6061-T6 wyniosła 33,3 MPa√m, natomiast szczególną uwagę poświęcono próbom całki J. Dla próbek o grubości 25,3 mm wyznaczono wartości J_Q dla stopu aluminium AA6061-T6, dla którego wartość średnia wyniosła 34,2 kJ/m². Chociaż wyznaczone wartości J_Q nie spełniały wymagań uznania ich za wartości J_{IC} , autorzy podsumowując swoją pracę przyznali, że nawet przy trudnej geometrii frontu pęknięcia można uzyskać wartości porównawcze całki J, które mogą być przydatne przy ocenie odporności na pękanie materiałów.

Autorzy [78] wyznaczyli odporność na pękanie cienkich blach ze stopu aluminium 6061-T6. Dzięki odpowiedniemu ustawieniu punktów obciążenia uzyskano duże naprężenia przy wierzchołku pęknięcia i ograniczono ryzyko wyboczenia. Dla próbek o grubości 1,6 mm średnia wartość J_c wyniosła około 121 kJ/m², a dla próbek o grubości 1,0 mm około 135,9 kJ/m². Wykazano, że cienkie blachy 6061-T6 charakteryzują się znacznie wyższą odpornością na pękanie niż w warunkach pełnego płaskiego stanu odkształcenia.

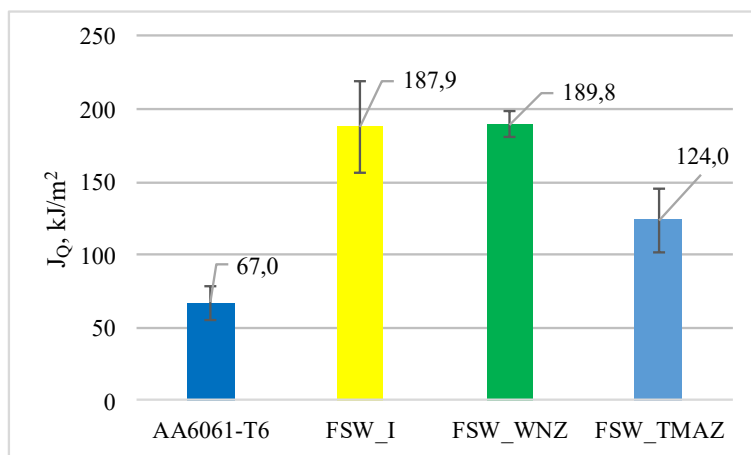
Na podstawie dokonań przedstawionych autorów oraz badań własnych, można zauważyć, iż wartość J_Q dla próbek o nienormatywnej grubości nie jest wartością stałą materiału i wykazuje silną zależność od grubości badanych elementów. Pomimo tego, że uzyskane wartości nie spełniają wymagań do uznania ich za wartość krytyczną J_{IC} , która dla analizowanego stopu według [79] wynosi 13 kJ/m², nie umniejsza ich walorom poznawczym i mogą one służyć jako

wielkości porównawcze z zachowaniem zgodnej metody badań oraz geometrii próbek. Dotyczy to również drugiego materiału bazowego, stali S355, dla której średnia wartość J_Q wyniosła 557,1 kJ/m².

Obliczone wartości J_Q dla każdej z próbek CT z wybranych stref FSW wraz z średnią oraz odchyleniem standardowym zaprezentowano w tabeli 6.7. Średnie wartości J_Q wraz odchyleniami dla poszczególnych stref zgrzeiny zestawiono z średnią wartością J_Q bazowego aluminium w formie graficznej na rysunku 6.30.

Tab. 6.7. Wartości J_Q dla poszczególnych próbek CT z połączenia FSW

FSW_I	J_Q , kJ/m ²	FSW_WNZ	J_Q , kJ/m ²	FSW_TMAZ	J_Q , kJ/m ²
CT_FSW_I_02	201,0	CT_FSW_WNZ_01	180,2	CT_FSW_TMAZ_01	147,1
CT_FSW_I_03	152,0	CT_FSW_WNZ_02	194,9	CT_FSW_TMAZ_02	102,9
CT_FSW_I_04	210,6	CT_FSW_WNZ_04	194,4	CT_FSW_TMAZ_03	121,9
Średnia	187,9	Średnia	189,8	Średnia	124,0
Odch. Stand.	31,4	Odch. Stand.	8,4	Odch. Stand.	22,2



Rys. 6.30. Wykres średnich wartości J_Q dla próbek CT z bazowego stopu aluminium oraz wybranych stref połączenia FSW

Najniższą odpornością na pękanie z pośród analizowanych stref odnotowano dla strefy ciepno-plastycznej TMAZ, której średnia wartość wyniosła 124 kJ/m². Interfejs oraz jądro zgrzeiny wykazały zbliżone średnie wartości odporności na pękanie, które wyniosły kolejno 187,9 kJ/m² oraz 189,8 kJ/m². Jak można zauważyć, w każdej z analizowanych stref zgrzeiny odporność na pękanie wyrażona poprzez wartość J_Q nie była niższa od odporności na pękanie bazowego

stopu aluminium. Tabela 6.8 przedstawia krotność średnich wartości J_Q dla poszczególnych stref analizowanej zgrzeiny FSW w odniesieniu do średniej wartości J_Q dla bazowego stopu aluminium.

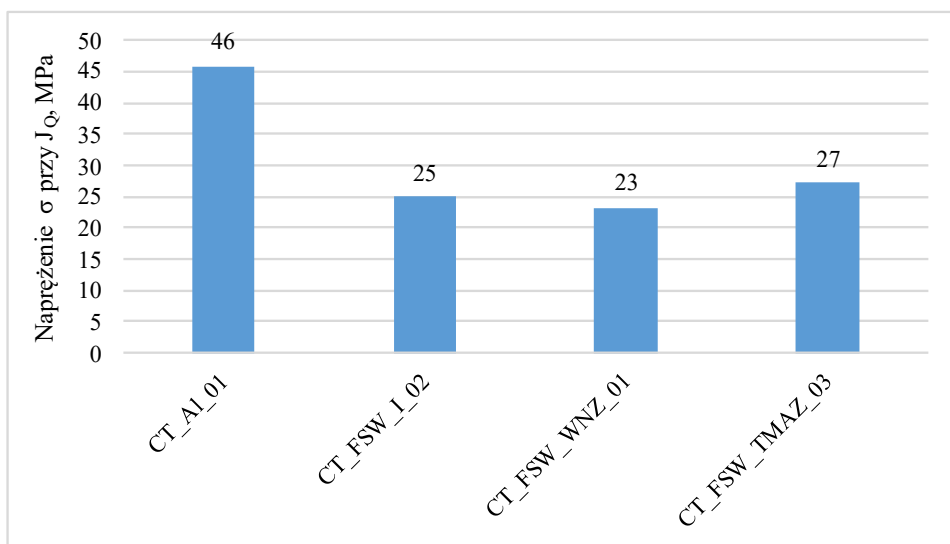
Tab. 6.8. Krotność λ średnich wartości J_Q poszczególnych stref zgrzeiny FSW w odniesieniu do średniej wartości J_Q bazowego stopu aluminium

Nazwa	AA6061_T6	FSW_I	FSW_WNZ	FSW_TMAZ
Krotność λ	1,00	2,8	2,8	1,8
$\lambda = J_{Q\text{ CT-FSW-XXX}}/J_{Q\text{ AA6061-T6}}$				

Jak wynika z przedstawionych obliczeń, średnia wartość J_Q dla strefy cieplno-plastycznej była 1,8 razy wyższa od średniej wartości J_Q bazowego aluminium. Średnie wartości J_Q dla jądra zgrzeiny oraz interfejsu były od niej około 2,8 razy wyższe.

W literaturze dotyczącej odporności na pękanie połączeń FSW stopu aluminium AA6061-T6 można odnaleźć podobne spostrzeżenia. Autorzy pracy [80] przeprowadzili badania nad naprawą zgrzeiny AA6061-T6 metodą FSW. Wykazali, że proces naprawczy skutecznie usuwa defekty i tworzy mikrostrukturę podobną do pierwotnej zgrzeiny, z lokalnym spadkiem twardości w obszarze strefy przemieszania. Próby rozciągania pokazały, że wytrzymałość i plastyczność zgrzein naprawianych i pierwotnych są praktycznie identyczne. Testy odporności na pękanie (CTOD, krzywa R) wykazały wartości wyższe o 40–69% niż w materiale rodzimym, a dodatkowy cykl cieplny związany z naprawą poprawiał odporność w strefie przemieszania bez pogorszenia właściwości strefy wpływu ciepła HAZ. Jednocześnie stwierdzili, że zgrzeiny (zarówno pierwotne, jak i naprawiane) pękają przy niższych naprężeniach niż materiał bazowy, co wiąże się z niższą wytrzymałością na rozciąganie zgrzeiny.

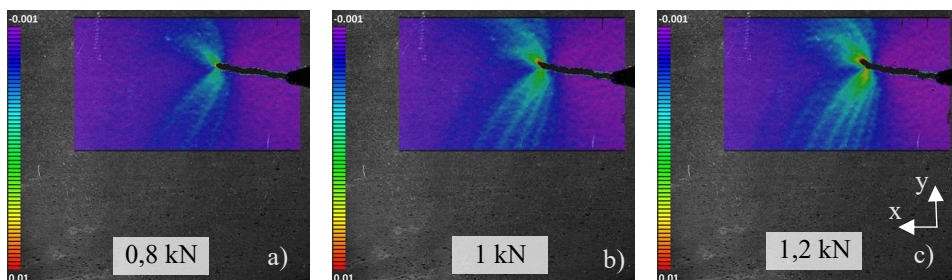
Obliczając naprężenia występujące w próbkach CT przy wartościach J_Q zaobserwowano, w każdej z analizowanych stref zgrzeiny, spadek ich wartości w odniesieniu do bazowego stopu aluminium. Biorąc pod uwagę wnioski autorów przytoczonych powyżej, może mieć to związek z niższą wytrzymałością połączenia w skali makro oraz z zmianami mikrostrukturalnymi w zgrzeinie. Rysunek 6.31 przedstawia wartości naprężeń występujących w niepekniętej części wybranych próbek CT przy ich wartościach J_Q .



Rys. 6.31. Naprężenia występujące w niepekniętej części wybranych próbek CT przy ich wartościach J_Q

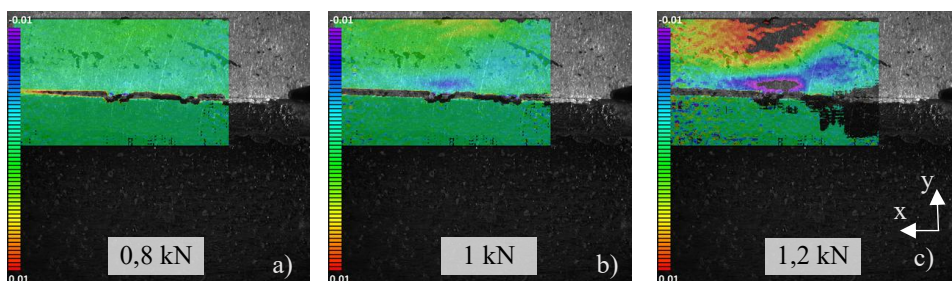
6.6. ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ W STREFIE WIERZCHOŁKA PĘKNIĘCIA

Analizę odkształceń wokół wierzchołka pęknięcia przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.6. Na rysunku 6.32 przedstawiono rozkłady odkształceń ε_y wokół wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania dla wybranych poziomów obciążeń bazowego stopu aluminium. Jak można zauważyć, pola odkształceń charakteryzują się symetrycznym rozkładem względem wierzchołka pęknięcia na każdym z wybranych poziomów obciążenia. Rozprzestrzenianie się odkształceń jest dominujące w kierunku równoległym do kierunku obciążenia (oś y).



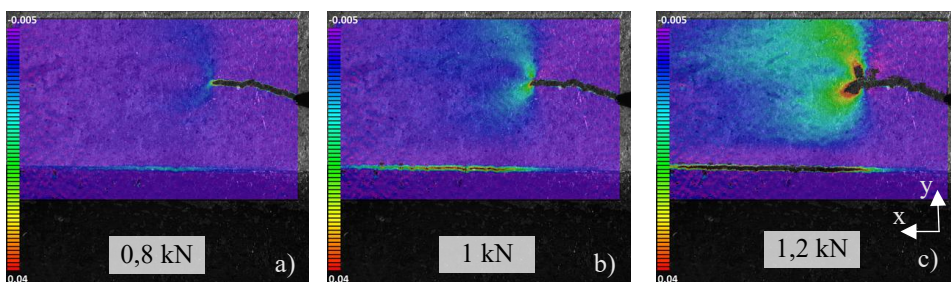
Rys. 6.32. Rozkłady odkształceń ε_y w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania dla wybranych poziomów obciążeń próbki CT_Al

Podczas próby quasi-statycznego obciążania próbek CT we wszystkich analizowanych strefach rejestrowano obrazy powierzchni bocznej po stronie grani połączenia. Rysunek 6.33 przedstawia rozkład odkształceń ε_y w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania w interfejsie. Wyniki pomiaru odkształceń potwierdziły obserwowane w badaniach statycznych efekty niedogrzanania po stronie grani, które jednocześnie utrudniły uzyskanie wiarygodnych wyników, mogących być podstawą do analizy pól odkształceń w strefie pęknięcia.



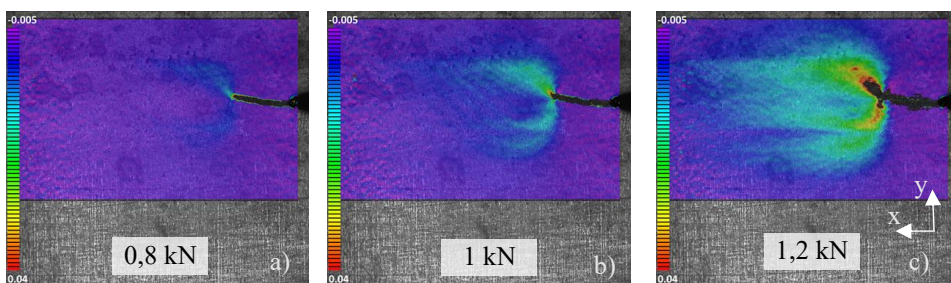
Rys. 6.33. Rozkłady odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania dla wybranych poziomów obciążeń próbki CT_FSW_I

Rysunek 6.34 przedstawia rozkład odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania ε_y w jądrze zgrzeiny. Jak można zaobserwować, część energii wprowadzonej do próbki celem propagacji pęknięcia została pochłonięta przez rozrywający się interfejs co potwierdza zmiana intensywności odkształceń ε_y w tym obszarze. Pola odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia propagują ze znacznie większą intensywnością niż w bazowym stopie aluminium. Oczwistym jest że jest to ściśle powiązane z właściwościami mechanicznymi analizowanej strefy i może tłumaczyć większe zapotrzebowanie energetyczne do dalszego propagowania pęknięcia (J_Q dużo większe niż dla stopu AA6061-T6).



Rys. 6.34. Rozkłady odkształceń ε_y wokół wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania dla wybranych poziomów obciążeń próbki CT_FSW_WNZ

Rysunek 6.35 przedstawia rozkład odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania ε_y w strefie cieplno-plastycznej. Rozprzestrzenianie się odkształceń jest dominujące w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia (oś x), odwrotnie niż dla materiału bazowego. Dominacja rozprzestrzeniania się w tym kierunku była większą niż dla jądra zgrzeiny.



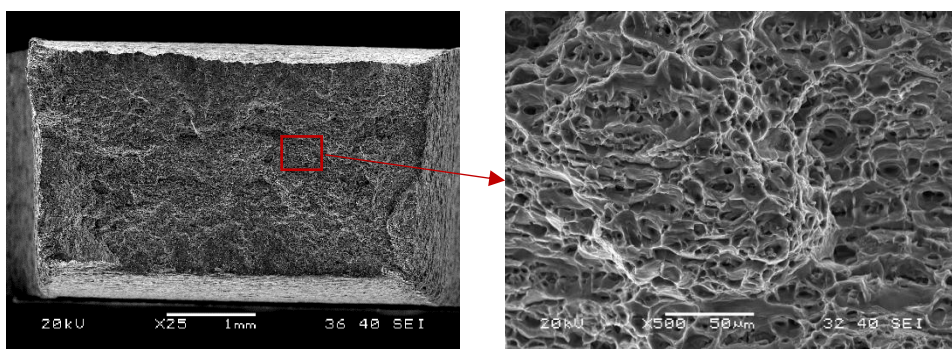
Rys. 6.35. Rozkłady odkształceń ε_y w strefie wierzchołka pęknięcia równoległych do kierunku obciążania dla wybranych poziomów obciążeń próbki CT_FSW_TMAZ

Analiza odkształceń ε_y w strefie wierzchołka pęknięcia dla WNZ i TMAZ wykazała asymetrię odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia. Zjawisko to ma związek z różnicami mikrostrukturalnymi zgrzeiny a co za tym idzie zmianami

lokalnych właściwości mechanicznych, wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$, które zostały opisane w punkcie 6.3.3.

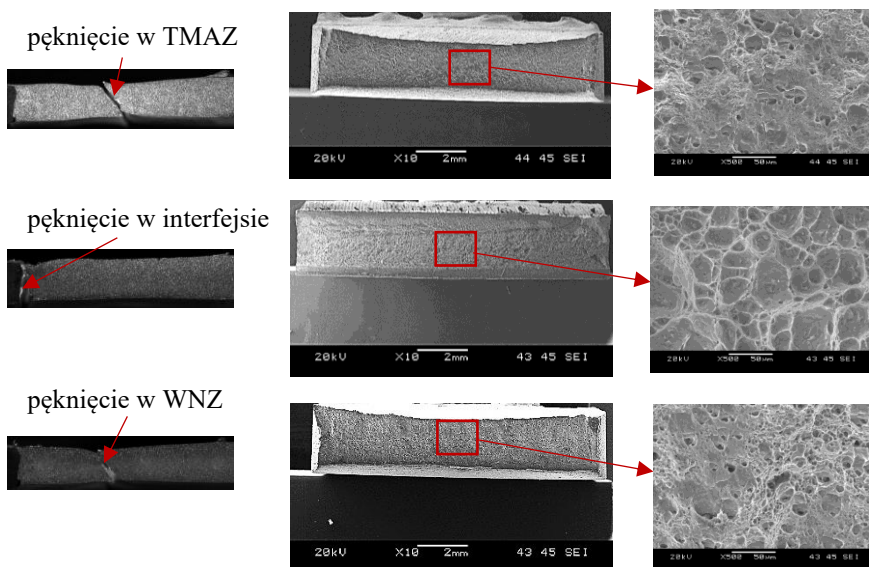
6.7. FRAKTOGRAFIA

Analizę fraktograficzną przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 5.7. Rysunek 6.36 przedstawia obraz przełomu próbki ze stopu aluminium po badaniu wytrzymałości na rozciąganie. Pękanie tych próbek wykorzystanych do analizy statycznej następowało pod charakterystycznym dla stopów aluminium kątem 45° . Obraz charakteryzujący się jednolitym rozkładem przerwanych pustych przestrzeni (ang. dimples) wskazuje na plastyczny charakter przełomu.



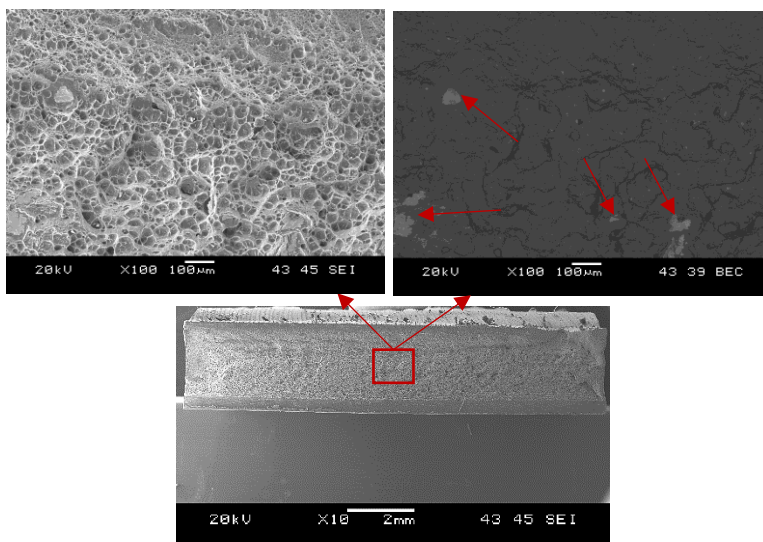
Rys. 6.36. Przełom próbki z stopu aluminium po próbie wytrzymałości na rozciąganie

Rysunek 6.37 przedstawia 3 rodzaje przełomów, zaobserwowanych podczas badania wytrzymałości na rozciąganie połączenia FSW S355/AA6061-T6 w skali makro. Próbkę W2.1 z połączenia pękały w jądrze zgrzeiny, strefie cieplno-plastycznej oraz rzadziej w interfejsie. Pękanie, poza tym zaobserwowanym w pobliżu interfejsu, następowało pod charakterystycznym kątem 45° . Jak można zauważyć, pęknięciu w strefach WNZ oraz TMAZ towarzyszyło znaczne przewężenie próbek, czego nie zaobserwowano w przypadku przełomu powstałego w pobliżu interfejsu. Wszystkie analizowane przełomy posiadały cechy odpowiadające przełomom plastycznym, charakteryzując się zróżnicowanymi wielkościami przerwanych pustych przestrzeni w zależności od strefy pęknięcia. Powstają one w wyniku zarodkowania, wzrostu i koalescencji mikropustek w materiale podczas odkształcenia plastycznego a następnie pęknięcia otaczającego materiału [81]. W przełomie próbki z pęknięciem w pobliżu interfejsu występują duże zagłębienia powstałe w wyniku łączenia pustek. Przełomy w strefach WNZ oraz TMAZ charakteryzują się zagłębieniami o średniej wielkości i otaczających je pasm małych pustek, które powstały od cząstek wydzielen obecnych w stopie.



Rys. 6.37. Przełomy próbek w skali makro z połączenia FSW S355/AA6061-T6 po próbie wytrzymałości na rozciąganie

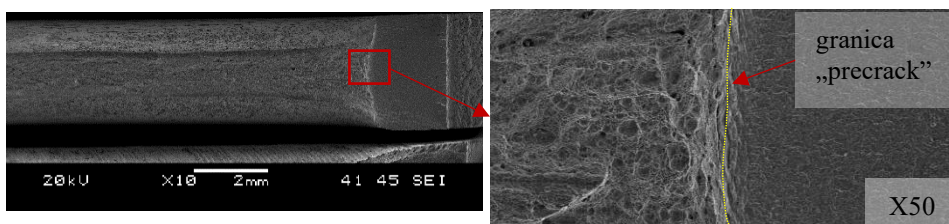
Podczas analizy przełomu z pęknięciem w pobliżu interfejsu zaobserwowano liczne wtrącenia, które jak wynika z analizy przeprowadzonej w punkcie 6.1.1, mogą być wydzieleniami o podwyższonym stężeniu dodatków stopowych lub swobodnymi wydzieleniami związków intermetalicznych AlFe (rysunek 6.38).



Rys. 6.38. Wydzielenia w powstałym przełomie połączenia FSW S355/AA6061-T6 powstałego w pobliżu interfejsu

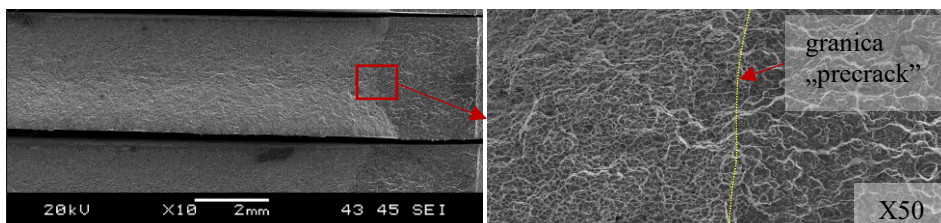
Na obrazach przełamów próbek CT można wyróżnić dwa obszary przełomu, obszar powstały w wyniku generowania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego (ang. precrack) oraz obszar quasi-statycznego pęknięcia podczas badania odporności na pękanie metodą jednej próbki.

Przełom próbki CT z bazowej stali zaprezentowano na rysunku 6.39. Obraz przełomu w obszarze badania odporności na pękanie posiada cechy przełomu plastycznego z licznymi przerwanymi pustymi przestrzeniami. Dodatkowo zaobserwowano około 50% przewężenie grubości próbki, co można powiązać z wysoką wartością J_Q wyznaczoną dla tego materiału. Relatywnie duże odkształcenie plastyczne powierzchni bocznych próbki wymagało dostarczenia dużo większej ilości energii celem propagacji pęknięcia, niż w przypadku bazowego aluminium.



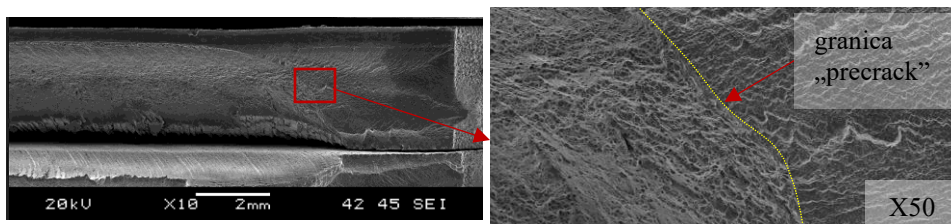
Rys. 6.39. Przełom próbki CT z bazowej stali

Rysunek 6.40 przedstawia przełom próbki CT z bazowego stopu aluminium. Przełom quasi-statycznego pęknięcia miał zbliżony charakter pęknięcia do przełomu próbki aluminiowej opisanego na początku podrozdziału. Pękanie w tych próbkach również następowało pod kątem 45° .



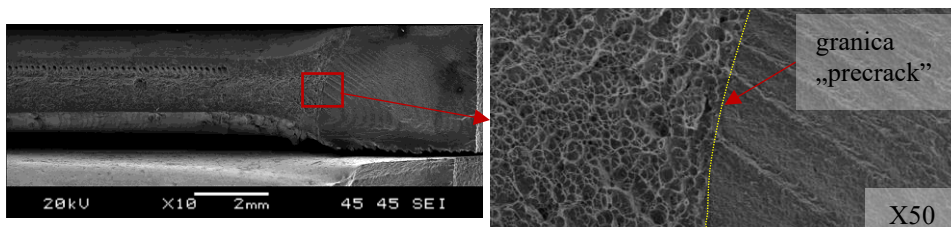
Rys. 6.40. Przełom próbki CT z bazowego stopu aluminium

Rysunek 6.41 przedstawia przełom próbki CT analizowanego połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w interfejsie. Jak można zauważyć, problem niedogrzanania po stronie grani połączenia, choć zminimalizowany, nadal pozostał. Wpłynęło to na kształt obszaru wstępnego pęknięcia zmęczeniowego jak również na obszar pęknięcia quasi-statycznego. Obszar pęknięcia quasi-statycznego charakteryzował się przerwanymi pustkami o średniej wielkości. Pęknięcie w tej strefie propagowało pod kątem 45° , czego nie zaobserwowano w pękniętej w tej strefie próbki poddanej próbie wytrzymałości na rozciąganie.



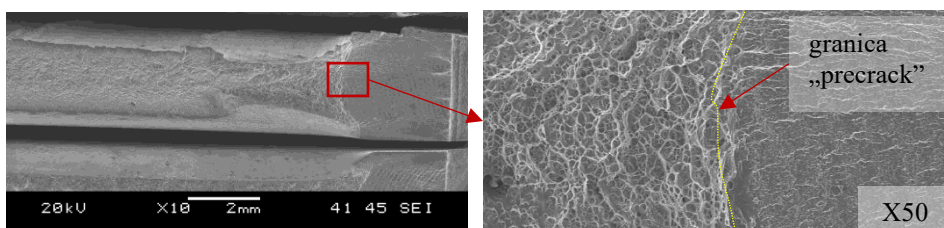
Rys. 6.41. Przełom próbki CT z naciętym karbem mechanicznym w interfejsie

Przełom próbki CT analizowanego połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w jądrze zgrzeiny przedstawia rysunek 6.42. Przełom charakteryzuje się znacznym przewężeniem grubości próbki. Obszar quasi-statycznego pęknięcia charakteryzuje się drobnymi zagłębieniami, będącymi przerwanyimi pustkami charakterystycznymi dla przełomów plastycznych. Można zauważyć związek pomiędzy charakterem tego przełomu a mikrostrukturą jądra zgrzeiny opisaną w punkcie 6.1.2 oraz wynikami badań lokalnych właściwości wytrzymałościowych opisanymi w punkcie 6.3.3.



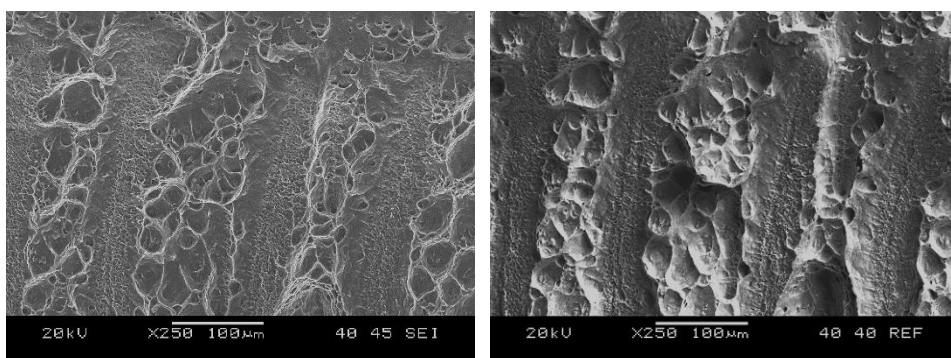
Rys. 6.42. Przełom próbki CT z naciętym karbem mechanicznym w WNZ

Przełom próbki CT analizowanego połączenia FSW z naciętym karbem mechanicznym w strefie cieplno-plastycznej przedstawia rysunek 6.43. Przełom ten, w obszarze quasi-statycznego pęknięcia, posiadał największe przewężenie próbki spośród analizowanych stref zgrzeiny. Przełom jest przełomem plastycznym czego przejawem jest występowanie licznych zagłębień po przerwanych pustych przestrzeniach.



Rys. 6.43. Przełom próbki CT z naciętym karbem mechanicznym w TMAZ

Obserwacje mikrofraktograficzne powierzchni pęknięcia, przebiegającego przez strefę jądra zgrzeiny, w mniejszym lub większym stopniu ujawniły jej pasmowy charakter. Występują tu naprzemiennie ułożone warstwy, uległego dekohezji materiału, cechujące się różnym rozmiarem dołków powstałej struktury plastowej przełomu plastycznego (rysunek 6.44). Przyczyn tego zjawiska należy upatrywać w występujących w jądrze zgrzeiny i opisanych w literaturze [82] pasmach naprzemiennie silnie rozdrobionych oraz grubych wydzieleniach fazy równowagowej. Ponieważ wielkość wydzieleni obecnych w strukturze materiału determinuje rozmiar dołków uzyskiwanych podczas jego dekohezji, tak i w tym wypadku analizowana, pasmowa, budowa przełomu jest wynikiem różnic w morfologii wydzieleni fazy równowagowej pomiędzy warstwami jądra zgrzeiny.



Rys. 6.44. Naprzemiennie ułożone warstwy uległego dekohezji materiału w jądrze zgrzeiny.

Analiza fraktografii obserwowanych przełomów potwierdziła poprawność wyboru metody całki J do analizy porównawczej odporności na pękanie. Wszystkie analizowane przełomy w obszarze quasi-statycznego pęknięcia posiadały liczne zagłębienia, będące przerwanyimi pustkami charakterystycznymi dla przełomów plastycznych. Rozmiar powstałych zagłębieni oraz ich ułożenie było uwarunkowane m.in. czynnikami takimi jak zróżnicowanie mikrostrukturalne w strefie przemieszania, niezgodność w zgrzeinie typu „kissing bonds” oraz pasma naprzemiennie silnie rozdrobionych i grubych wydzieleni fazy równowagowej w jądrze zgrzeiny [82].

7. WNIOSKI

7.1. WNIOSKI Z BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej, zrealizowanych badań oraz analizy ich wyników sformułowano wnioski dotyczące podjętego w pracy problemu badawczego i przyjętych celów badawczych.

1. Opracowane w ramach pracy oprzyrządowanie do kontrolowania wartości przesunięcia trzpienia względem linii styku łączonych elementów umożliwiło wykonanie metodą FSW próbnych złączy połączenia doczołowego stali S355 i stopu aluminium AA6061-T6 o przyjętych wartościach parametru offset.
2. Eksperymentalna analiza wpływu przyjętego zakresu parametrów technologicznych zgrzewania, tj prędkości obrotowej, prędkości posuwu i wartości parametru offset na właściwości mechaniczne połączenia FSW S355/AA606-T6 umożliwiła wybór parametrów zgrzewania skutkujących uzyskaniem połączenia o właściwościach wytrzymałościowych spełniających postawione kryteria.
3. Spośród analizowanego zakresu parametrów zgrzewania najkorzystniejsze właściwości wytrzymałościowe uzyskały połączenia wykonywane dla prędkości obrotowej 350 obr/min, wartości parametru offset 0,4 mm oraz prędkości posuwu 50 mm/min.
4. Wybrane parametry procesowe pozwoliły wykonać połączenie charakteryzujące się średnią wytrzymałością na rozciąganie $R_m=178,4$ MPa oraz średnią wartością umownej granicą plastyczności $R_{0,2}=123,2$ MPa. Zestawienie uzyskanych wyników z wymaganiami stawianymi złączu spawanemu ze stopu aluminium AA6061-T6 przez towarzystwa klasyfikacyjne [75,76], pozwala stwierdzić, iż uzyskane połączenia FSW S355/AA6061-T6 jest zdolne do przenoszenia obciążeń i może być stosowane w odpowiedzialnych konstrukcjach.
5. Makro i mikrostruktura połączenia FSW S355/AA6061-T6 charakteryzowała się typowymi strefami z ciągłą warstwą związków intermetalicznych w strefie interfejsu zgrzeiny o grubości od 2 μm do 3 μm , która zgodnie ze źródłami [45] klasyfikowana jest jako pozytywne i pożądane zjawisko w tym obszarze.

6. Rozkład mikrotwardości w przekroju poprzecznym zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6 cechuje się 50% spadkiem twardości w jądrze zgrzeiny względem bazowego stopu aluminium. Znaczne rozdrobnienie ziaren aluminium pod wpływem rekrytalizacji dynamicznej nie rekompensuje skutków rozpuszczania i przestarzenia fazy umacniającej wywołanych działaniem temperatury procesu.
7. Przeprowadzona analiza porównawcza odporności na pękanie metodą całki J wybranych stref zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6 wykazała wyższe średnie wartości J_Q dla każdej z nich w odniesieniu do średniej wartości J_Q bazowego stopu aluminium. Dla interfejsu oraz jądra zgrzeiny wyznaczone średnie wartości J_Q wyniosły odpowiednio 187,9 kJ/m² i 189,8 kJ/m² natomiast dla strefy cieplno-plastycznej było to 124 kJ/m². Na tej podstawie można stwierdzić, iż proces FSW nie wpłynął negatywnie na odporność na pękanie powstałej zgrzeiny.
8. Analizując różnice w odporności na pękanie badanych stref zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6, jej najniższą wartość równą 124 kJ/m² odnotowano w strefie cieplno-plastycznej. Strefa ta okazała się niewralgiczna w kontekście odporności na pękanie w obszarze zgrzewania. Do podobnych wniosków doszli autorzy pracy naukowej [47] analizując odporność na pękanie połączenia FSW z stopu aluminium AA6013-T6.
9. Analiza odkształceń ε_y w strefie wierzchołka pęknięcia dla jądra zgrzeiny i strefy cieplno-plastycznej wykazała asymetrię odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia. Zjawisko to ma związek z różnicami mikrostrukturalnymi zgrzeiny a co za tym idzie zmianami lokalnych właściwości mechanicznych, w tym, wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz umownej granicy plastyczności $R_{0.2}$.
10. Wszystkie przełomy próbek powstałe podczas badania wytrzymałości na rozciąganie oraz odporności na pękanie charakteryzowały się plastycznym charakterem pęknięcia co potwierdzono analizą faktograficzną. Różnice w obrazach przełomów plastycznych były spowodowane zróżnicowaniem mikrostrukturalnym w zgrzeinie oraz potwierdzonym także niejednorodnym rozkładem twardości w przekroju poprzecznym połączenia.

7.2. WNIOSKI DO DALSZYCH BADAŃ

Przeprowadzone badania oraz analiza właściwości mechanicznych, odporności na pękanie i faktografii przełomów oraz przegląd literaturowy pozwoliły na sformułowanie wniosków mogących być punktem wyjścia do dalszych badań.

1. Analiza literatury oraz przeanalizowana macierz wybranych parametrów procesowych pokazuje wyraźny wpływ zmiany ich wartości na właściwości mechaniczne stalowo-aluminiowych połączeń doczołowych wykonanych metodą FSW. Próba korelacji parametrów procesowych z właściwościami mechanicznymi różnych stalowo-aluminiowych para materiałów może przyczynić się do opracowania ogólnych wytycznych ułatwiających projektowanie i wykonywanie tego typu połączeń.
2. Podczas przeprowadzonych analiz wyników badań połączenia FSW S355/AA6061-T6 zaobserwowano, że pomimo opracowania eksperymentalnie zweryfikowanego zestawu parametrów procesowych umożliwiającego wykonanie zgrzeiny zdolnej do przenoszenia odpowiedzialnych obciążeń zaobserwowano, że nie zniwelowano niezgodności w postaci niedogrzenia po stronie grani (niezgodność typu „kissing bonds”) a jedynie ją zminimalizowano. Rozwiązaniem tego problemu może być analiza rozszerzonej macierzy wybranych parametrów procesowych.
3. Biorąc pod uwagę zróżnicowanie mikrostrukturalne zgrzein oraz znaczne różnicę statycznych lokalnych właściwości mechanicznych i mikrotwardości w strefie zgrzeiny zasadnym jest podjęcie badań nad szybkością propagacji pęknięcia prostopadle do kierunku zgrzewania.
4. Autorzy przytoczonych w pracy artykułów naukowych przedstawionych podczas analizy literaturowej zwrócili uwagę na brak badań nad trwałością zmęczeniową zgrzein FSW St/Al. Zasadnym jest przeprowadzenie analizy trwałości zmęczeniowej połączenia FSW S355/AA6061-T6.

LITERATURA

- [1] Kumar N., Yuan W., i Mishra R.S., 2015. Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2014-0-01707-8>.
- [2] ISO/TR 25901-3:2016 - Welding and Allied Processes - Vocabulary - Part 3: Welding Processes.
- [3] Khedr, M., Hamada, A., Järvenpää, A., Elkatatny, S., i Abd-Elaziem, W., 2022. Review on the Solid-State Welding of Steels: Diffusion Bonding and Friction Stir Welding Processes. *Metals* 2023, Vol. 13, Page 54, 13(1), p. 54. <https://doi.org/10.3390/MET13010054>.
- [4] Kah, P., Jukka, M., i Madan, S., 2013. Trends in Joining Dissimilar Metals by Welding. *Applied Mechanics and Materials*, 440, pp. 269–276. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.440.269>.
- [5] Liu, L., Ren, D., i Liu, F., 2014. A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys. *Materials*, 7(5), p. 3735. <https://doi.org/10.3390/MA7053735>.
- [6] Akca, E., i Gursel, A., 2016. Solid State Welding and Application in Aeronautical Industry. *PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES*, 4(1). <https://doi.org/10.21533/pen.v4i1.46>.
- [7] Coronado J. J., i Cerón C., 2010. Fracture Mechanisms of CTOD Samples of Submerged and Flux Cored Arc Welding. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 53(2), pp. 145–151. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2010.03.008>.
- [8] Martinsen K., Hu S. J., i Carlson B. E., 2015. Joining of Dissimilar Materials. *CIRP Ann Manuf Technol*, 64(2), pp. 679–699. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2015.05.006>.
- [9] Greenberg, B. A., Ivanov, M. A., Kuz'min, S. V., i Lysak, V. I., 2019. Explosive Welding: Processes and Structures. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429340550>.
- [10] Zhang, C., Li, H., Liu, Q., Huang, C., i Zhou, K., 2022. Ultrasonic Welding of Aluminum to Steel: A Review. *Metals (Basel)*, 13(1), p. 29. <https://doi.org/10.3390/MET13010029>.
- [11] Khedr, M., Hamada, A., Järvenpää, A., Elkatatny, S., i Abd-Elaziem, W., 2022. Review on the Solid-State Welding of Steels: Diffusion Bonding and Friction Stir Welding Processes. *Metals (Basel)*, 13(1), p. 54. <https://doi.org/10.3390/MET13010054>.
- [12] Mehdi H., i Mishra R.S., 2017. Mechanical and Microstructure Characterization of Friction Stir Welding for Dissimilar Alloy-A Review. *International Journal of Research in Engineering and Innovation*, 1(5), pp. 57–67.

- [13] Sipokazi M., i Velaphi M., 2020. Review on Friction Stir Processed TIG and Friction Stir Welded Dissimilar Alloy Joints. *Metals (Basel)*, 10(1), p. 142. <https://doi.org/10.3390/MET10010142>.
- [14] Mehta, K. P., i Badheka, V. J., 2016. A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(3), pp. 233–254. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025971>;JOURNAL:JOURNAL:LMMP 18;CTYPE:STRING:JOURNAL.
- [15] Mahto, R. P., Rout, M., i Pal, S. K., 2021. Mechanism of Microstructure Evolution and Grain Growth in Friction Stir Welding of AA6061-T6 and AISI304 in Air and Water Media. *Mater Chem Phys*, 273, p. 125081. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.125081>.
- [16] Tanaka Tsutomu, Nezu Masayuki, Uchida Sohei, i Hirata Tomotake, 2020. Mechanism of Intermetallic Compound Formation during the Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum and Steel. *J Mater Sci*, 55(7), pp. 3064–3072. <https://doi.org/10.1007/S10853-019-04106-2>/FIGURES/9.
- [17] Watanabe Takehiko, Takayama Hirofumi, i Yanagisawa Atsushi, 2006. Joining of Aluminum Alloy to Steel by Friction Stir Welding. *J Mater Process Technol*, 178(1–3), pp. 342–349. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2006.04.117>.
- [18] Dehghani M., Amadeh A., i Akbari Mousavi S. A.A., 2013. Investigations on the Effects of Friction Stir Welding Parameters on Intermetallic and Defect Formation in Joining Aluminum Alloy to Mild Steel. *Mater Des*, 49, pp. 433–441. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.01.013>.
- [19] Jabraeili Reza, Jafarian Hamid Reza, Khajeh Rasoul, Park Nokeun, Kim Yejin, Heidarzadeh Akbar, i Eivani Ali Reza, 2021. Effect of FSW Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of the Dissimilar AA2024 Al Alloy and 304 Stainless Steel Joints. *Materials Science and Engineering: A*, 814, p. 140981. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2021.140981>.
- [20] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C. ; M. M. G., Temple-Smith, P., i Dawes, C. J., 1991. Friction Stir Butt Welding. International patent application PCT/GB92/02203.
- [21] Ding, S., Shi, Q., i Chen, G., 2021. Flow Stress of 6061 Aluminum Alloy at Typical Temperatures during Friction Stir Welding Based on Hot Compression Tests. *Metals (Basel)*, 11(5), p. 804. <https://doi.org/10.3390/MET11050804>.
- [22] Gałaczyński T., i Luty G., 2018. Zgrzewanie Tarciove Liniowe z Przemieszaniem (FSW – Friction Stir Welding).
- [23] Materiały Reklamowe Firmy SAPA 2013.
- [24] ISO 25239-1:2020 - Friction Stir Welding - Aluminium - Part 1: Vocabulary.
- [25] Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S., i Wanjara, P., 2012. Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3),

- pp. 250–261.
<https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015;WGROU:STRING:PUBLICATION>.
- [26] Mishra, R. S., i Ma, Z. Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1–2), pp. 1–78.
<https://doi.org/10.1016/J.MSER.2005.07.001>.
 - [27] Mishra R.S., i Mahoney M.W., 2007. Friction Stir Welding and Processing. ASM International.
 - [28] Tasić P., Hajro I., Hodžić D., i Dobraš D., 2013. Energy Efficient Welding Technology: FSW. *Materiały Konferencyjne: I International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology*, University of Banja Luka.
 - [29] Akinlabi, E. T., i Akinlabi, S. A., 2012. Friction Stir Welding Process : A Green Technology. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0046-6>.
 - [30] Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J., i Suoranta, R., 2015. Investigation of Weld Defects in Friction-Stir Welding and Fusion Welding of Aluminium Alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(1).
<https://doi.org/10.1186/S40712-015-0053-8>.
 - [31] AbuShanab, W. S., i Moustafa, E. B., 2018. Detection of Friction Stir Welding Defects of AA1060 Aluminum Alloy Using Specific Damping Capacity. *Materials* 2018, Vol. 11, Page 2437, 11(12), p. 2437.
<https://doi.org/10.3390/MA11122437>.
 - [32] Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., i Withers, P. J., 2009. Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *International Materials Reviews*, 54(2), pp. 49–93. <https://doi.org/10.1179/174328009X411136>.
 - [33] Friction Stir Welding of Aluminium Ships - TWI. Strona internetowa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-ships-june-2007>.
 - [34] Wang, G., Zhao, Y., i Hao, Y., 2018. Friction Stir Welding of High-Strength Aerospace Aluminum Alloy and Application in Rocket Tank Manufacturing. *J Mater Sci Technol*, 34(1), pp. 73–91.
<https://doi.org/10.1016/J.JMST.2017.11.041>.
 - [35] TWI Welding Technology Used for Historic SpaceX Launch - TWI. Strona internetowa: <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2020/twi-technology-used-for-historic-spacex-launch>.
 - [36] Integralność Spoin Tarcowych i Przemysł Taboru Kolejowego – TWI. Strona internetowa: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-weld-integrity-and-its-importance-to-the-rolling-stock-industry?utm_source=chatgpt.com.

- [37] Dział Integracji Technologii NIPPON SHARYO. Strona internetowa: https://www.n-sharyo.co.jp/business/tetsudo_e/technology/i_manufacturing.html?utm_source=chatgpt.com.
- [38] RIFTEC - Our Products and References. Strona internetowa: https://www.riftec.de/en/products-references.html?utm_source=chatgpt.com.
- [39] Wan, L., i Huang, Y., 2018. Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys and Steels: A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(5–8), pp. 1781–1811. <https://doi.org/10.1007/S00170-018-2601-X/METRICS>.
- [40] Das, U., i Toppo, V., 2018. Effect of Tool Rotational Speed on Temperature and Impact Strength of Friction Stir Welded Joint of Two Dissimilar Aluminum Alloys. *Mater Today Proc*, 5(2), pp. 6170–6175. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.223>.
- [41] Sashank, J. S., Sampath, P., Krishna, P. S., Sagar, R., Venukumar, S., i Muthukumaran, S., 2018. Effects of Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of 6063 Aluminium Alloy. *Mater Today Proc*, 5(2), pp. 8348–8353. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.527>.
- [42] Jacquin, D., i Guillemot, G., 2021. A Review of Microstructural Changes Occurring during FSW in Aluminium Alloys and Their Modelling. *J Mater Process Technol*, 288. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2020.116706>.
- [43] Kimapong Kittipong, i T Watanabe, 2004. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel. *Weld J*, 83, pp. 277–282.
- [44] Patel, M. M., i Badheka, V. J., 2024. A Review on Friction Stir Welding (FSW) Process for Dissimilar Aluminium to Steel Metal Systems. *Welding International*, 38(2), pp. 91–115. <https://doi.org/10.1080/09507116.2023.2291064;CTYPE:STRING:JOURNAL>.
- [45] Beygi, R., Galvão, I., Akhavan-Safar, A., Pouraliakbar, H., Fallah, V., i da Silva, L. F. M., 2023. Effect of Alloying Elements on Intermetallic Formation during Friction Stir Welding of Dissimilar Metals: A Critical Review on Aluminum/Steel. *Metals (Basel)*, 13(4), p. 768. <https://doi.org/10.3390/MET13040768>.
- [46] Chen, T. P., i Lin, W. B., 2010. Optimal FSW Process Parameters for Interface and Welded Zone Toughness of Dissimilar Aluminium-Steel Joint. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(4), pp. 279–285. <https://doi.org/10.1179/136217109X12518083193711;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:YSTW20;WGROU:STRING:PUBLICATION>.
- [47] Derry, C. G., i Robson, J. D., 2008. Characterisation and Modelling of Toughness in 6013-T6 Aerospace Aluminium Alloy Friction Stir Welds. *Materials Science and Engineering: A*, 490(1–2), pp. 328–334. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2008.01.044>.

- [48] Mochizuki, M., Inuzuka, M., Nishida, H., Nakata, K., i Toyoda, M., 2006. Fracture Toughness of Structural Aluminium Alloy Thick Plate Joints by Friction Stir Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(3), pp. 366–370. <https://doi.org/10.1179/174329306X107719>.
- [49] Parasuraman, P., Sonar, T., i Rajakumar, S., 2022. Microstructure, Tensile Properties and Fracture Toughness of Friction Stir Welded AA7075-T651 Aluminium Alloy Joints. *Materialpruefung/Materials Testing*, 64(12), pp. 1843–1850. <https://doi.org/10.1515/MT-2022-0212/MACHINEREADABLECITATION/RIS>.
- [50] Kłysz S., 2015. Podstawy Mechaniki Pękania i Wytrzymałości Zmęczeniowej Materiałów. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.
- [51] Neimitz A., 1998. Mechanika Pękania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [52] BROEK D., 1982. Elementary Engineering Fracture Mechanics, MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, Boston.
- [53] ASTM E1820: Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- [54] Wen Zheng, Kai-Ye Xiao, Hai Xu, i Zhi-Wei Guo, 2019. Test Method for Plane Stress Fracture Toughness of Thin Sheet Metal. *Materials, Mechanics and Manufacturing*, 7.
- [55] Zhu, X.-K., i Joyce, J. A., 2012. Review of Fracture Toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) Testing and Standardization. *Eng Fract Mech*, pp. 1–46. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>.
- [56] 2023. Guidelines for the Evaluation of the Plane Stress Fracture Toughness of Advanced High Strength Steel Sheets in the Frame of Fracture Mechanics. CEN/WS ToughSteel.
- [57] Singh, V. P., Patel, S. K., Ranjan, A., i Kuriachen, B., 2020. Recent Research Progress in Solid State Friction-Stir Welding of Aluminium–Magnesium Alloys: A Critical Review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), pp. 6217–6256. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.01.008>.
- [58] Chandran, R., Ramaiyan, S., Shanbhag, A. G., Santhanam, S. K. V., Chandran, R., Ramaiyan, S., Shanbhag, A. G., i Santhanam, S. K. V., 2018. Optimization of Welding Parameters for Friction Stir Lap Welding of AA6061-T6 Alloy. *Modern Mechanical Engineering*, 8(1), pp. 31–41. <https://doi.org/10.4236/MME.2018.81003>.
- [59] Venkateswaran, P., i Reynolds, A. P., 2012. Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welds between Aluminum and Magnesium Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 545, pp. 26–37. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2012.02.069>.

- [60] Singh, K., Singh, G., i Singh, H., 2018. Review on Friction Stir Welding of Magnesium Alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(4), pp. 399–416. <https://doi.org/10.1016/J.JMA.2018.06.001>.
- [61] Gharavi, F., Matori, K. A., Yunus, R., Othman, N. K., i Fadaeifard, F., 2015. Corrosion Behavior of Al6061 Alloy Weldment Produced by Friction Stir Welding Process. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(3), pp. 314–322. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2015.01.007>.
- [62] Ziółkowski, W., Boroński, D., Skibicki, A., Stachowiak, R., Kosturek, R., iŚnieżek, L., 2023. Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar S355/AA6061-T6 FSW Butt Joints. *Materials*, 16(17), p. 5950. <https://doi.org/10.3390/MA16175950>.
- [63] PN-EN ISO 6892-1:2020-02: Próba Rozciągania - Część 1: Metoda Badania w Temperaturze Pokojowej .
- [64] “PN-EN ISO 6507-1:2018-06: Pomiar Twardości Sposobem Vickersa - Część 1: Metoda Badań.”
- [65] Boroński D., 2015. Testing Low-Cycle Material Properties with Micro-Specimens. *Materialpruefung/Materials Testing*, 57(2), pp. 165–170. <https://doi.org/10.3139/120.110693>.
- [66] Boroński D., 2020. Local Mechanical Properties of Explosively Welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V Layered Material. *Welding in the World*, 64(12), pp. 2083–2099. <https://doi.org/10.1007/S40194-020-00984-2>.
- [67] Boroński D., Kotyk M., . Maćkowiak P., 2018. Crack Initiation and Growth Analysis in Explosively Welded AA2519–AA1050–Ti6Al4V Layered Material in Ambient and Cryogenic Conditions. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, 232(8), pp. 1470–1480. <https://doi.org/10.1177/0954406217741516>.
- [68] Sołtysiak R., Boroński D., i Kotyk M., 2016. Experimental Verification of the Crack Opening Displacement Using Finite Element Method for CT Specimens Made of Ti6Al4V Titanium Alloy. *AIP Conf Proc*, 1780. <https://doi.org/10.1063/1.4965953>.
- [69] Krishnan, M., i Subramaniam, S. K., 2018. Investigation of Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Stir Corner Welded Dissimilar Thickness AA5086-AA6061 Aluminium Alloys. *Materials Research*, 21(4), p. e20171045. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1045>.
- [70] Etter, A. L., Baudin, T., Fredj, N., i Penelle, R., 2007. Recrystallization Mechanisms in 5251 H14 and 5251 O Aluminum Friction Stir Welds. *Materials Science and Engineering: A*, 445–446, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2006.09.036>.
- [71] Krishnan, K. N., 2002. On the Formation of Onion Rings in Friction Stir Welds. *Materials Science and Engineering: A*, 327(2), pp. 246–251. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01474-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01474-5).

- [72] 6061 T6 Aluminium - Właściwości, Zastosowania i Korzyści - LangHe Industry. Strona internetowa: <https://langhe-industry.com/pl/6061-t6-aluminum>.
- [73] 6061-T6 Aluminum. Strona internetowa: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6061-T6-Aluminum/>.
- [74] PN-EN 10025-2:2019-11 - Wyroby Walcowane Na Gorąco Ze Stali Konstrukcyjnych - Część 2: Warunki Techniczne Dostawy Stali Konstrukcyjnych Niestopowych.
- [75] IACS, 2006. Guidelines on Welding Procedure Qualification Tests of Aluminium Alloys for Hull Construction and Marine Structures.
- [76] Lloyd's Register Group Limited, 2020. Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials.
- [77] MacMaster, F. J., Chan, K. S., Bergsma, S. C., i Kassner, M. E., 2000. Aluminum Alloy 6069 Part II: Fracture Toughness of 6061-T6 and 6069-T6. *Materials Science and Engineering: A*, 289(1–2), pp. 54–59. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00918-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00918-7).
- [78] P. S. Shinde, K. K. Singh, V. K. Tripathi, P. K. Sarkar, i P. Kumar, 2012. Critical J-Integral of Thin Aluminium Sheets Employing a Modified Single Edge Plate Specimen. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(3), pp. 1360–1365.
- [79] Ma.seong, Y.-W., Lee, H., i Yoon, K.-B., 2011. Evaluation of Fracture Toughness Using Small Punch Test for Aluminum 6061-T6 Type-3 Cylinder Liner. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 15(4), pp. 21–26. <https://doi.org/10.7842/KIGAS.2011.15.4.021>.
- [80] Brinckmann, S., Strombeck, A. v, Schilling, C., Santos, J. F. dos, Kocak, M., i Lohwasser, D., 2000. Mechanical and Toughness Properties of Robotic-FSW Repair Welds in 6061-T6 Aluminium Alloys.
- [81] Dumont, D., Deschamps, A., i Brechet, Y., 2003. On the Relationship between Microstructure, Strength and Toughness in AA7050 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 356(1–2), pp. 326–336. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00145-X).
- [82] Kosturek, R., Śnieżek, L., Torzewski, J., i Wachowski, M., 2019. Research on the Friction Stir Welding of Sc-Modified AA2519 Extrusion. *Metals* 2019, Vol. 9, Page 1024, 9(10), p. 1024. <https://doi.org/10.3390/MET9101024>.

STRESZCZENIE

Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciowo metodą FSW

mgr inż. Wojciech Ziółkowski

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarciove z przemieszaniem, połączenia spajane aluminiowo-stalowe, właściwości mechaniczne, odporność na pękanie, faktografia przełomów

Dążenie do lekkich, tanich w produkcji i przyjaznych środowisku konstrukcji to jedno z głównych celów nowoczesnego przemysłu. Coraz wyższe wymagania stawiane obecnym konstrukcją skłaniają inżynierów do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań. Dużą popularność w ostatnim czasie zyskało łączenie materiałów różnoimiennych. Połączenie elementów o odmiennych właściwościach fizyko-chemicznych metodami spajania w stanie stałym pozwala m.in. obniżyć masę konstrukcji nie wpływając przy tym na jej parametry wytrzymałościowe. Jedną z takich metod jest zgrzewanie tarciove z przemieszaniem.

Celem badań omówionych w pracy była analiza odporności na pękanie w wybranych strefach zgrzeiny doczołowego połączenia FSW stopu aluminium AA6061-T6 i stali S355. Ponadto celem pracy było opracowanie technologii z kontrolowaną wartością przesunięcia trzpienia względem linii styku łączonych elementów i dobór parametrów procesowych doczołowego zgrzewania połączeń różnoimiennych wykonanych metodą FSW wraz z analizą właściwości mechanicznych wykonanych zgrzein.

Praca składa się z części teoretycznej oraz przedstawienia wyników badań własnych wraz z ich analizą. Część teoretyczna porusza zagadnienia metody zgrzewania tarciovego z przemieszaniem oraz zastosowań połączeń FSW w przemyśle. Przedstawia również analizę literaturową pod kątem aluminiowo-stalowych połączeń FSW oraz metody analizy odporności na pękanie.

Przedstawienie wyników badań własnych obejmują opis metod, wyniki i ich analizę dla materiałów bazowych oraz połączeń doczołowych FSW S355/AA6061-T6. Prace badawcze obejmują między innymi analizę właściwości mechanicznych materiałów bazowych oraz połączeń FSW S355/AA6061-T6 celem oceny wpływu parametrów procesowych, analizę odporności na pękanie materiałów bazowych i wybranego połączenia, analizę pól naprężeń w strefie wierzchołka pęknięcia oraz fraktografię powstałych przełomów. Podczas realizacji programu badań własnych zastosowano liczne metody badawcze

obejmujące próby statyczne i quasi-statyczne, pomiary rozkładów odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu, obrazowanie makro i mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopii optycznej i elektronowej, pomiary mikrotwardości, pomiary naprężeń własnych metodą trepanacji otworowej z tensometrycznym pomiarem odkształceń oraz analizę przełomów z zastosowaniem elektronowej mikroskopii skaningowej.

Analiza wyników badań potwierdziła, że zaproponowana technologia kontroli wartości przesunięcia trzpienia względem linii styku łączonych elementów oraz dobrane parametry technologiczne pozwalają na wykonanie powtarzalnego połączenia zdolnego przenosić znaczne obciążenia, które spełnia wymagania postawione przez towarzystwa klasyfikacyjne. Przeprowadzona w rozprawie analiza odporności na pękanie połączenia FSW S355/AA6061-T6 w wybranych strefach zgrzeiny udowadnia, że proces zgrzewania tarciovego z przemieszaniem nie wpływa negatywnie na jej wartości.

ABSTRACT

Analysis of fracture toughness of S355/AA6061-T6 friction stir welded butt joints

mgr inż. Wojciech Ziółkowski

Key words: friction stir welding, aluminium-steel welded joints, mechanical properties, fracture toughness, fractography

The pursuit of lightweight, cost-effective, and environmentally friendly structures is one of the key objectives of modern industry. Increasingly stringent requirements imposed on current designs encourage engineers to seek innovative solutions. In recent years, the joining of dissimilar materials has gained significant attention. The bonding of elements with different physical and chemical properties by means of solid-state welding methods enables, among other benefits, a reduction in structural weight without compromising mechanical performance. One such method is friction stir welding.

The purpose of the research discussed in this paper was to analyze fracture toughness in selected zones of the butt joint made by FSW method between AA6061-T6 aluminum alloy and S355 steel. In addition, the aim of the work was to develop a technology with a controlled of the pin offset relative to the interface line of the joined materials and to determine process parameters for butt welded dissimilar joints made using the FSW with an analysis of the mechanical properties of the resulting welds.

The thesis consists of a theoretical part and an experimental section presenting original research and its analysis. The theoretical section covers the issues of friction stir welding and its industrial applications. It also provides a literature review focused on aluminum–steel FSW joints and the methods applied in fracture toughness assessment.

The experimental part includes a description of the methods employed, results obtained, and their analysis for both the base materials and the FSW butt joints of S355/AA6061-T6. The research encompassed the evaluation of the mechanical properties of the base materials and of the S355/AA6061-T6 FSW joints in order to determine the influence of process parameters. Furthermore, it involved fracture toughness testing of the base materials and a selected joint, stress field analysis in the crack tip region, and fractography of the resulting fracture surfaces. During the implementation of the own research program, including static and quasi-static testing, strain distribution measurements using digital image correlation, macro and microstructural characterization by optical and electron microscopy, microhardness profiling, residual stress measurements using the hole

trepanation method with strain gauge measurement, and fracture surface analysis using scanning electron microscopy.

The analysis of the results confirmed that the proposed technology for controlling tool pin offset relative to the interface, combined with appropriately selected process parameters, enables the production of reproducible joints capable of carrying substantial loads and fulfilling the requirements of classification societies. Moreover, the fracture toughness analysis of the S355/AA6061-T6 FSW butt joint in selected weld zones demonstrated that the friction stir welding process does not adversely affect its values.