

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**Wydział Inżynierii Materiałowej**  
**KATEDRA METALURGII I RECYKLINGU**

*Rozprawa doktorska*

**Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW  
na strukturę i właściwości złączy  
ze stopu aluminium EN AW-6082**

**Influence of selected friction stir welding conditions in FSW  
process on the structure and properties of joints  
in aluminum alloy EN AW-6082**

mgr inż. Damian Miara

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Adamiec

Promotor pomocniczy: dr inż. Katarzyna Łyczkowska

Opiekun pomocniczy: dr inż. Adam Pietras

**Katowice, 2024**

## Spis treści

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Wstęp.....                                                                   | 4   |
| 2. Technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny – FSW ..... | 6   |
| 2.1. Charakterystyka metody FSW .....                                           | 6   |
| 2.2. Parametry zgrzewania .....                                                 | 13  |
| 2.3. Zalety i ograniczenia technologii .....                                    | 22  |
| 2.4. Niezgodności w złączach zgrzewanych .....                                  | 25  |
| 3. Charakterystyka stopów aluminium serii 6xxx .....                            | 31  |
| 3.1. Ogólna charakterystyka stopów aluminium serii 6xxx .....                   | 31  |
| 3.2. Skład chemiczny, struktura i właściwości stopu aluminium EN AW-6082 .....  | 33  |
| 3.3. Zastosowanie stopu aluminium EN AW-6082 .....                              | 38  |
| 4. Zgrzewalność stopu aluminium EN AW-6082 .....                                | 40  |
| 4.1. Technologie zgrzewania stopu aluminium przerabianego plastycznie .....     | 40  |
| 4.2. Zgrzewanie metodą FSW stopu aluminium przerabianego plastycznie.....       | 43  |
| 5. Podsumowanie .....                                                           | 52  |
| 6. Teza, cel i zakres badań .....                                               | 55  |
| 7. Materiał do badań.....                                                       | 58  |
| 8. Metodyka badań struktury złącza.....                                         | 60  |
| 8.1. Dobór miejsca pobrania próbki do badań strukturalnych.....                 | 60  |
| 8.2. Sposób przygotowania zglądu metalograficznego .....                        | 61  |
| 8.3. Dobór odczynnika do trawienia chemicznego próbek .....                     | 61  |
| 8.4. Metodyka badań makro- i mikrostruktury.....                                | 63  |
| 9. Analiza pola temperatury i odkształceń złączy FSW .....                      | 67  |
| 10. Próby technologiczne zgrzewania FSW .....                                   | 73  |
| 10.1. Narzędzie do zgrzewania.....                                              | 74  |
| 10.2. Ocena pola temperatury podczas zgrzewania FSW + DTA .....                 | 75  |
| 10.3. Wyniki badań struktury złącza FSW .....                                   | 86  |
| 10.3.1. Ocena wizualna złączy FSW .....                                         | 86  |
| 10.3.2. Ocena makro- i mikrostruktury złączy FSW .....                          | 89  |
| 10.3.4. Tomografia 3D złącza FSW w wybranych obszarach .....                    | 112 |
| 11. Ocena właściwości złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082.....             | 126 |
| 11.1. Badania właściwości mechanicznych złączy FSW .....                        | 126 |
| 11.1.1. Wytrzymałość na rozciąganie złączy FSW .....                            | 127 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1.2. Próba zginania złączy zgrzewanych metodą FSW .....                                                                                  | 135 |
| 11.1.3. Pomiary twardości złączy FSW .....                                                                                                  | 139 |
| 11.2. Ocena odporności złączy FSW na korozję .....                                                                                          | 141 |
| 11.2.1. Badania odporności na korozję wysokotemperaturową w atmosferze<br>symulowanych spalin .....                                         | 141 |
| 11.2.2. Badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej SO <sub>2</sub> .....                                             | 154 |
| 11.2.3. Badania odporności na korozję międzykrystaliczną .....                                                                              | 158 |
| 11.2.4. Badania odporności na korozję w rozpylonej solance .....                                                                            | 161 |
| 12. Analiza wyników i aspekty technologiczne wdrożenia zgrzewania FSW płyt ze stopu<br>aluminium EN AW-6082 w warunkach przemysłowych ..... | 167 |
| 12.1. Analiza wyników badań .....                                                                                                           | 167 |
| 12.2. Wymagania technologiczne dotyczące stosowania technologii FSW w warunkach<br>produkcyjnych.....                                       | 184 |
| 12.3. Wytyczne technologiczne zgrzewania FSW w warunkach produkcyjnych.....                                                                 | 189 |
| 13. Wnioski .....                                                                                                                           | 194 |
| 14. Literatura .....                                                                                                                        | 197 |
| 15. Streszczenie rozprawy doktorskiej.....                                                                                                  | 207 |

## 1. Wstęp

Współczesny przemysł kolejowy i lotniczy koncentruje swoją uwagę na materiałach i technologiach łączenia, które zapewniają powstawanie konstrukcji o jak najmniejszej masie. Oprócz minimalizacji masy konstrukcje powinny się charakteryzować wysoką wytrzymałością i sztywnością oraz odpornością na korozję. Do materiałów stosowanych na tego typu konstrukcje, spełniających powyższe kryteria można zaliczyć m.in. stopy aluminium przerabiane plastycznie.

Istnieje kilka technologii spajania stopów aluminium. Najczęściej są one wykonywane konwencjonalnymi metodami spawania łukowego takimi jak: spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazowej – TIG (z ang. Tungsten Inert Gas) czy spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej – MAG (z ang. Metal Active Gas). Takie złącza spawane charakteryzują się obniżoną wytrzymałością w stosunku do materiału rodzimego nawet o 50% [1, 2]. Występują problemy z odkształceniem konstrukcji z powodu cyklu cieplnego podczas spawania [3, 4]. Czynniki te zmuszają konstruktorów i technologów do poszukiwania nowych, innowacyjnych metod łączenia [5, 6].

Złącza ze stopów aluminium można również wykonywać za pomocą technologii zgrzewania m.in.: zgrzewanie tarciove – FW (z ang. Friction Welding), zgrzewanie ultradźwiękowe – UW (z ang. Ultrasonic Welding), zgrzewanie rezystancyjne – RW (z ang. Resistance Welding) [7, 8, 9]. Nowoczesną, ciągle doskonaloną technologią zgrzewania, jest metoda zgrzewania tarciovego z mieszaniem materiału zgrzeiny FSW (z ang. Friction Stir Welding) [5]. W metodzie tej do podgrzania łączonych materiałów, ich uplastycznienia i do utworzenia zgrzeiny wykorzystuje się ruch obrotowy oraz ruch posuwisty narzędzia [10, 11]. Drobnosiarnista struktura złączy FSW ze stopów aluminium powoduje, że cechują się one wytrzymałością sięgającą nawet 95% wytrzymałości materiału rodzimego [12]. Złącza te są metalicznie ciągłe, szczelne i pozbawione niezgodności. W odróżnieniu od tradycyjnych metod spawania łukowego, w metodzie tej nie występuje faza ciekła (materiał nie topi się), a proces zgrzewania prowadzony jest w temperaturze poniżej solidusu [13].

Proces jest przyjazny dla środowiska i zaliczany jest do tzw. „zielonych technologii” (z ang. green technology). W porównaniu z klasycznymi metodami spawania łukowego, FSW jest techniką ekologiczną, tzn. nie powoduje emisji gazów spawalniczych do atmosfery, nie wywołuje negatywnego wpływu na operatora, nie generuje hałasu i nie powoduje powstawania pola elektromagnetycznego [10].



W przypadku zgrzewania stopów aluminium nie ma konieczności usuwania warstwy tlenków, co często jest wymagane przy spawaniu łukowym i zgrzewaniu rezystancyjnym [10]. Podczas zgrzewania FSW nie jest wymagana osłona gazów obojętnych [4].

Metoda zgrzewania tarcowego FSW stanowi alternatywę dla typowych procesów spawania łukowego oraz niektórych procesów zgrzewania [14]. Wykorzystanie metody FSW do zgrzewania np. stopu aluminium EN AW-6082 pozwala uniknąć typowych niezgodności spawalniczych i zgrzewalniczych [15]. Dla niektórych rodzajów konstrukcji staje się jedyną metodą ich wykonywania z uwagi np. na możliwość zgrzewania skomplikowanych kształtów konstrukcji oraz brak odkształceń zgrzewanych elementów [10].

Zainteresowanie technologią FSW od wielu lat stanowi kierunek badań wielu naukowców i konstruktorów z całego świata [16, 17]. W ciągu zaledwie kilku lat od powstania i opatentowania technologii FSW (1991 rok) [18] wprowadzono szereg innowacji oraz opatentowano wiele nowych rozwiązań związanych z tym procesem. Od wielu lat metoda FSW jest uważana za jeden z najważniejszych kierunków rozwoju technologicznego w dziedzinie łączenia metali, a w szczególności metali lekkich [9, 19].

Technologia FSW posiada jednak kilka wad w tym m.in. konieczność stosowania podpór pod zgrzewanymi materiałami, co w niektórych przypadkach ogranicza pole jej wykorzystania. Ma to związek z wprowadzaniem obrotowego narzędzia pomiędzy zgrzewane materiały, co bez odpowiedniej podpory powoduje odkształcanie materiałów w miejscu zgrzewania. W większości przypadków, technologia stosowana jest do zgrzewania blach płaskich [12, 20].

Aby spełnić wymagania stawiane nowoczesnym konstrukcjom istnieje potrzeba poznania wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopów aluminium, a w szczególności dla stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082. Stop ten, ze względu na właściwości i możliwości stosowania, jest uważany za potencjalnie przyszłościowy [21]. Znajomość warunków zgrzewania FSW pozwoli na uzyskanie złączy o wysokiej wytrzymałości, metalicznie ciągłej strukturze oraz odpornych na korozję. Poznanie warunków zgrzewania umożliwi również opracowanie wytycznych zgrzewania tego stopu za pomocą technologii FSW oraz wdrożenie jej do przemysłu lotniczego oraz kolejowego [16, 17, 22].

Zjawiska strukturalne występujące w złączu FSW wykonanym ze stopu aluminium EN AW-6082, związane z mieszaniem materiału w stanie stałym, nie są w pełni zbadane. Brak jest szczegółowych informacji dotyczących tych zjawisk. Dodatkowo, informacje technologiczne w obszarze wykonywania złączy ze stopów aluminium EN AW-6082 stanowią

strzeżone „know-how” wytwórców elementów konstrukcji [23, 24, 25]. Stało się to podstawą do sformułowania tezy pracy, której celem było określenie wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082.

Do realizacji przyjętych celów pracy opracowano metodykę oceny struktury i właściwości złączy FSW z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych. Badania warunków zgrzewania w szczególności dotyczyły określenia wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania, a także temperatury obszaru zgrzewania, siły w kierunku zgrzewania, siły docisku narzędzia i momentu obrotowego na strukturę złączy. Struktura zgrzeiny decyduje o właściwościach użytkowych powstałego złącza FSW.

Wyniki oceny wpływu warunków technologicznych zgrzewania FSW uzupełniono o badania metalograficzne na mikroskopie świetlnym, skaningowym mikroskopie elektronowym SEM oraz skaningowym mikroskopie elektronowym FIB-SEM, co pozwoliło na opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o możliwości łączenia stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082 metodą FSW. Umożliwiło to także opracowanie wytycznych technologicznych zgrzewania FSW oraz kwalifikowanie technologii zgrzewania co pozwoli na wykorzystanie metody FSW w przemyśle lotniczym i kolejowym.

## **2. Technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny – FSW**

### **2.1. Charakterystyka metody FSW**

Metoda zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) została wynaleziona i opatentowana w 1991 roku przez Wayne’a Thomas’a z Angielskiego Instytutu Spawalnictwa (TWI Ltd, Cambridge) [18]. Metoda FSW umożliwia wykonywanie złączy zgrzewanych z materiałów trudnospawalnych lub niespawalnych. Przykładowo autorzy Kalembski I. oraz Dymek S. [26] przedstawili analizę mikrostruktury stopu aluminium AA7136 (Al-Zn-Mg-Cu) zgrzewanego za pomocą technologii FSW. Określili również przyczyny braku zainteresowania tym materiałem z uwagi na trudności ze spawaniem (z uwagi na odkształcenia materiału), za pomocą tradycyjnych metod spawania łukowego. Wykazano bowiem, że współczesny przemysł oczekuje wiedzy na temat mikrostruktury połączeń, a dopiero w kolejnym etapie wiedzy na temat właściwości połączeń. Autor Blondeau [27] również podkreśla, że nie jest możliwe spawanie niektórych gatunków stopów aluminium serii 2000 i 7000, a przy zastosowaniu technologii FSW odbywa się bez większych przeszkód. Stopy

te podczas spawania są wrażliwe na wysokie temperatury, co powoduje spadek właściwości mechanicznych oraz twardości (zwłaszcza stopów aluminium serii 2000).

Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny jest procesem termomechanicznym, w którym ciepło wytwarzane jest poprzez oddziaływanie narzędzia zgrzewającego [5, 6, 28]. Podczas procesu zgrzewania stopów aluminium temperatura nie przekracza wartości 500°C, co stanowi ok. 75% temperatury topnienia. W tym zakresie temperatur stopy aluminium są plastyczne. Stosowanie niższej temperatury podczas zgrzewania, w porównaniu z konwencjonalnymi procesami spawania łukowego, ogranicza występowanie pęknięć na gorąco i odkształceń. Porównanie odkształceń w stopach aluminium spawanych łukowo oraz zgrzewanych za pomocą technologii FSW pokazano na rys. 1 [14].

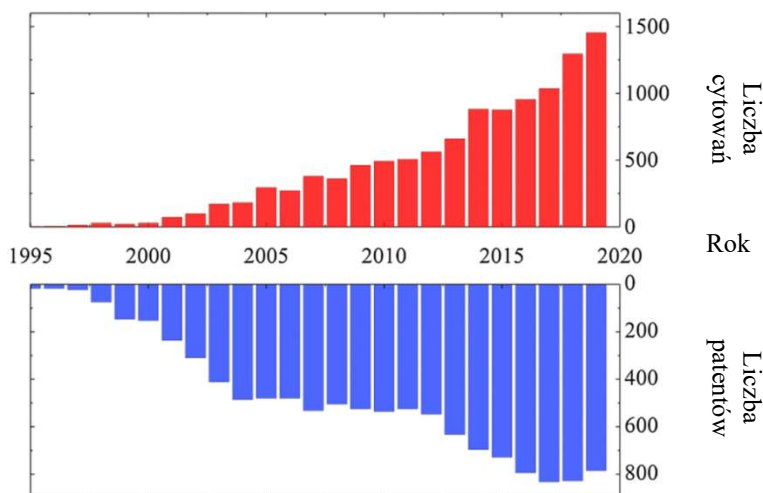


Rys. 1. Porównanie odkształcenia spowodowanego technologią spawania łukowego oraz zgrzewania tarciovego FSW blach ze stopu aluminium o grubości 5 mm [14]

Podobne zalety technologii FSW w stosunku do technologii spawania łukowego wykazali Lomolino i inni w publikacji [29]. Stwierdzili oni, że stosując do łączenia różnych stopów technologię FSW zwiększamy wytrzymałość zmęczeniową oraz niezawodność konstrukcyjną elementów zgrzewanych metodą FSW. Wg autorów brak jest jednak ogólnego przeglądu zaleceń dotyczących stosowania metody FSW. Mogłyby one pomóc projektantom konstrukcji w określeniu projektowych wartości wytrzymałości w zależności od rodzaju materiału lub parametrów procesu.

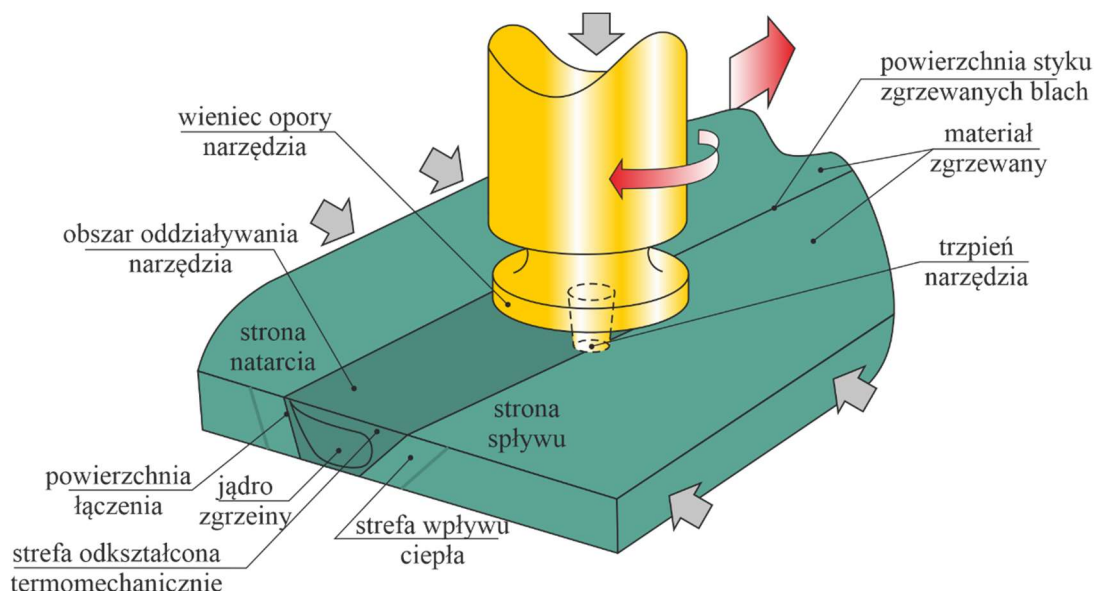
Dzięki ogromnym nakładom finansowym przeznaczonym na rozwój metody FSW znalazła ona zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu w tym kolejowego, lotniczego, motoryzacyjnego [18, 23, 28]. Korzyści płynące z zastosowania tej metody zgrzewania sprawiają, że jej obszar zastosowania rośnie z roku na rok [30, 31, 32]. Jacquin D. oraz Guillemot G. wykazali, że technologia zgrzewania FSW od kilkunastu lat wzbudza ogromne

zainteresowanie wielu gałęzi przemysłu [14]. Autorzy informują, że istnieje ponad 4400 patentów z obszaru technologii FSW zarejestrowanych tylko w ostatnich 10 latach. Jest to wzrost o ponad 70% w stosunku do lat wcześniejszych (rys. 2a). W analogicznym okresie wzrosła również liczba publikacji i cytowań z dziedziny technologii FSW (rys. 2b) [14].



Rys. 2. Rozwój liczby cytowań artykułów oraz zgłoszeń patentowych na całym świecie do procesu zgrzewania tarcowego FSW liczone od 1995 roku [14]

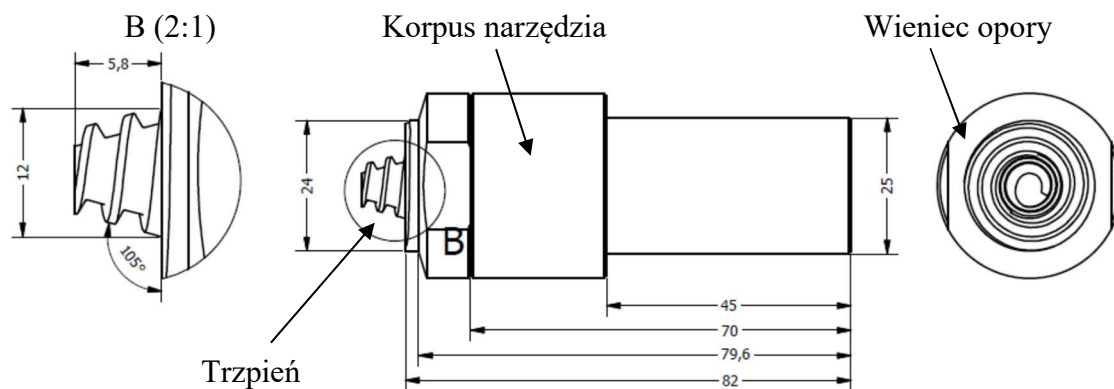
W metodzie FSW elementem podstawowym służącym do nagrzania i uplastycznienia tarcowego materiału jest obracające się narzędzie mieszające. Na rys. 3 przedstawiono schemat zgrzewania FSW wraz z oznaczeniem poszczególnych stref złącza zgrzewanego.



Rys. 3. Schemat zgrzewania metodą FSW [33]

Przykładowy schemat narzędzia do zgrzewania metodą FSW pokazano na rys. 4. Narzędzie składa się z trzcienia (część mieszająca) oraz wieńca opory (część dociskająca).

Podczas zgrzewania jest ono wprowadzane w ruch obrotowy i dociskane do powierzchni materiału zgrzewanego aż do zagłębienia się trzpienia. Nagrzany i uplastyczniony ciepłem tarcia materiał zgrzewanych elementów transportowany jest wokół trzpienia do tyłu, gdzie zostaje zmiękczony, wymieszany i zagęszczony zgniotowo tworząc zgrzeinę. Proces zgrzewania odbywa się w stanie stałym [34, 35].

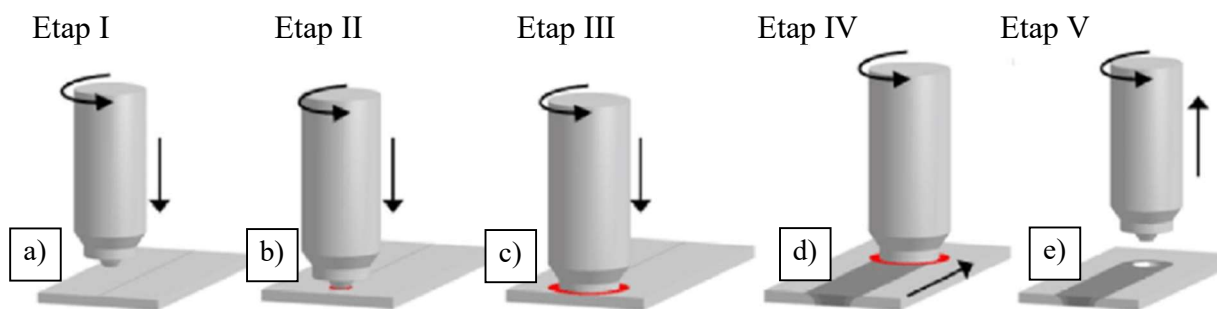


Rys. 4. Schemat przykładowego narzędzia do zgrzewania metodą FSW

Proces zgrzewania FSW można podzielić na pięć etapów [10]:

- **Etap I Rozpoczęcie procesu** - ustawienie oraz dociśnięcie krawędzi łączonych elementów wraz z ich sztywnym zamocowaniem w oprzyrządowaniu.
- **Etap II Penetracja narzędzia w głąb zgrzewanych materiałów** - ustawienie narzędzia zgrzewającego w pozycji początkowej (w linii zgrzewania) oraz wprowadzenie obracającego się narzędzia w obszar styku zgrzewanych materiałów.
- **Etap III Nagrzewanie łączonych materiałów w strefie mieszania** – ruch obrotowy narzędzia w obszarze mieszania w wyniku tarcia trzpienia oraz wieńca opory narzędzia.
- **Etap IV Zgrzewanie** - ruch posuwisty obracającego się narzędzia wzdłuż linii styku łączonych materiałów (trajektoria ruchu narzędzia) wraz z zachowaniem docisku zgrzewającego narzędzia.
- **Etap V Zakończenie procesu zgrzewania** - wyprowadzenie narzędzia z obszaru zgrzewania.

Etapy tworzenia złącza FSW przedstawiono schematycznie na rys. 5.



Rys. 5. Etapy zgrzewania metodą FSW [31]: a) rozpoczęcie procesu zgrzewania FSW (etap I), b) penetracja narzędzia w głąb zgrzewanych materiałów (etap II), c) nagrzewanie łączonych materiałów w strefie mieszania (etap III), d) zgrzewanie - ruch posuwisty narzędzia wzdłuż linii styku łączonych materiałów (etap IV), e) zakończenie procesu zgrzewania - wyprowadzenie narzędzia z obszaru zgrzewania (etap V).

W złączy FSW, wokół powierzchni powstającej zgrzeiny, powstają dwie charakterystyczne tylko dla tej metody strony [36]:

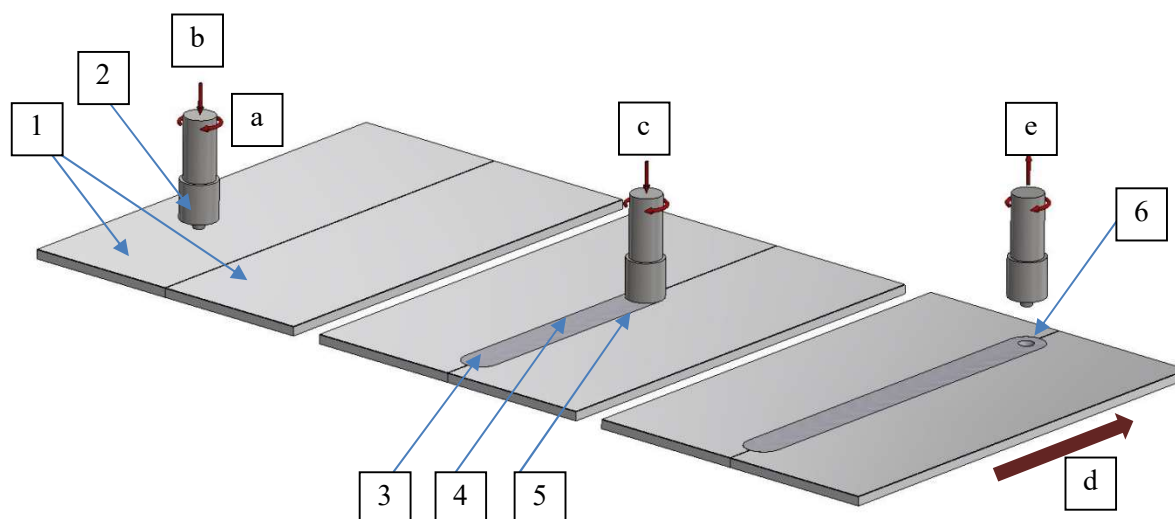
- **strona natarcia** – w której kierunek obrotu narzędzia FSW jest taki sam jak kierunek zgrzewania,
- **strona spływu** - w której kierunek obrotu narzędzia FSW jest przeciwny do kierunku zgrzewania.

W związku z tym, że proces FSW wykorzystuje tarcie do nagrzewania obszaru zgrzewania, temperatura procesu jest niższa od temperatury topnienia łączonych materiałów, a ilość generowanego ciepła jest znacznie mniejsza niż przy metodach spawania łukowego. Wpływa to na zmniejszenie naprężeń wewnętrznych i odkształceń w łączonych elementach. Duże odkształcenie plastyczne, które jest wynikiem działania narzędzia FSW, formuje złącze o drobnoziarnistej i zrekrystalizowanej strukturze, co wpływa na jakość i wytrzymałość złącza. Wynikiem tego jest wysoka jakość złączy w odniesieniu do pełnej ciągłości metalicznej połączenia oraz wytrzymałości na rozciąganie sięgającej min. 70% wytrzymałości materiału podstawowego. Efektem tego jest powstanie złączy o lepszych właściwościach w stosunku do złączy wykonanych konwencjonalnymi metodami spawania łukowego np. MIG lub TIG [1, 2].

Proces zgrzewania FSW powoduje także zmiany struktury materiału wyjściowego w obszarze zgrzeiny w tym zmianę rozmiaru ziaren, charakteru granic ziaren, koagulację i rozpuszczanie wydzielen oraz ich ponowne wydzielenie [14, 17].

W wyniku badań prowadzonych na początku rozwoju technologii FSW sklasyfikowano i zdefiniowano charakterystyczne obszary i części złącza FSW. Ich nazwy wynikają z procesów

zachodzących w obszarach złącza lub są powiązane z innymi procesami spajania np. spawania łukowego (rys. 6) [36].



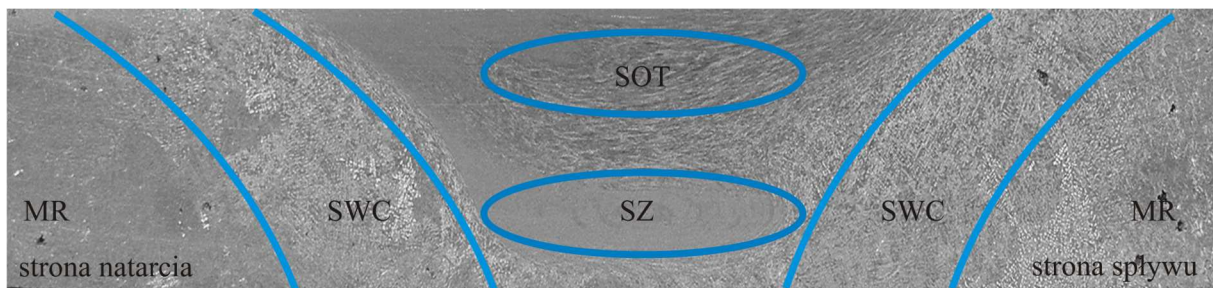
Rys. 6. Podstawowe terminy stosowane do opisu procesu i złącza FSW: 1 – elementy łączzone, 2 – narzędzie, 3 – powierzchnia złącza, 4 – strona natarcia złącza, 5 – strona spływu złącza, 6 – otwór wyjściowy, a – kierunek obrotu narzędzia, b – ruch zagłębienia narzędzia, c – siła osiowa, d – kierunek zgrzewania, e – kierunek wyprowadzenia narzędzia z obszaru zgrzewania [36]

Pierwsza próba klasyfikacji mikrostruktur złączy FSW została podjęta przez Threadgill'a [37]. Prace koncentrowały się wyłącznie na stopach aluminium i prowadzono je z zastosowaniem mikroskopii świetlnej. Kolejne prowadzone prace nad innymi materiałami metalowymi wykazały, że zachowanie stopów aluminium jest inne w stosunku do większości metali i ich stopów. Zaproponowano zmieniony system terminologii charakteryzującej mikrostrukturę złącza FSW i przyjęto go w amerykańskim standardzie D17.3 American Welding Society [36]. Charakterystyczne obszary budowy strukturalnej złącza FSW wg standardu D17.3 pokazano na rys. 7 i są to [36]:

- materiał rodzimy (MR) - materiał oddalony od zgrzeiny, który nie wykazuje zmian struktury wyjściowej i właściwości względem innych obszarów złącza wskutek braku oddziaływania temperatury procesu zgrzewania (MR – z ang. Base Material),
- strefa wpływu ciepła (SWC) – obszar w bezpośrednim sąsiedztwie zgrzeiny, o strukturze wynikającej z cyklu cieplnego zachodzącego podczas zgrzewania metodą FSW (HAZ – z ang. Heat Affected Zone),

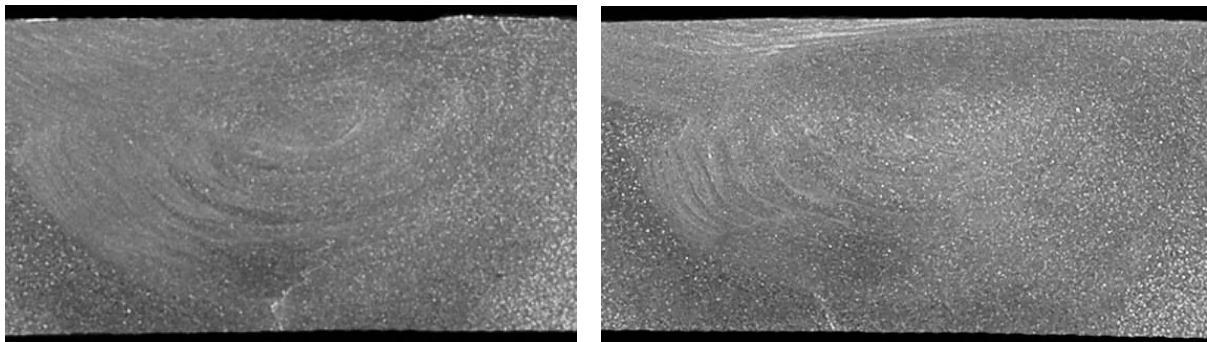


- strefa odkształcona termomechanicznie (SOT) – niejednorodny obszar w zgrzeinie, charakteryzujący się zmienioną strukturą wskutek oddziaływania temperatury procesu FSW (TMAZ – z ang. Thermo Mechanically Affected Zone),
- strefa mieszania (SZ) - tzw. jądro zgrzeiny – obszar o zmienionej strukturze, związanej z oddziaływaniem mechanicznym zarówno trzpienia jak i wieńca opory (SZ – z ang. Stir Zone),



Rys. 7. Charakterystyczne obszary budowy strukturalnej złącza FSW: MR – materiał rodzimy, SWC – strefa wpływu ciepła, SOT – strefa odkształcona termomechanicznie, SZ – strefa mieszania – tzw. jądro zgrzeiny. Pow. 6x [36]

Na wytrawionym zgładzie FSW obszar jądra zgrzeiny to w większości przypadków seria eliptycznych lub kołowych znaków, określanych w literaturze anglojęzycznej terminem „onion rings”, czyli „pierścienie cebuli” (rys. 8) [37, 39].



Rys. 8. Makrostruktura złączy w obszarze jądra zgrzeiny z charakterystycznymi koncentrycznymi kręgami, tzw. „pierścieniami cebuli” [37]

Obecność „pierścieni cebuli” wskazuje na złożony mechanizm procesu zgrzewania metodą FSW, tj. połączenia ruchu obrotowego, wzdłużnego oraz pionowego podgrzanego i zmiękzonego materiału. Pierścienie te powstają w wyniku eliptycznego przepływu materiału przy każdym obrocie narzędzia zgrzewającego. Ich występowanie jest zależne od zastosowanej prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania, a więc od energii dostarczonej do złącza. Odległość oddzielająca poszczególne pierścienie jest z kolei zależna od odległości jaką



pokonuje narzędzie podczas każdego obrotu. Przy stałej prędkości obrotowej narzędzia odległość między pierścieniami wzrasta wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania [37]. Tworzenie się „pierścieni cebuli” nie jest do końca wyjaśnione [40, 41]. Ich występowanie w jądrze zgrzeiny nie powoduje zmian właściwości mechanicznych [39, 41].

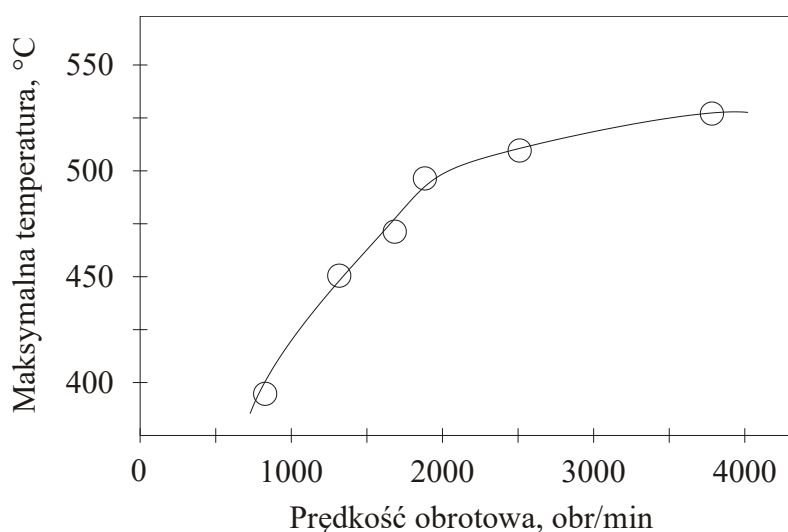
## 2.2. Parametry zgrzewania

W procesie zgrzewania FSW struktura i właściwości złącza są uzależnione od kilku parametrów w tym [28, 42, 43, 44]:

- prędkości obrotowej narzędzia ( $V_o$ ) – prędkości, z jaką obraca się narzędzie FSW, która decyduje o prędkości nagrzewania oraz o temperaturze procesu zgrzewania, wpływa na stopień wymieszania łączonych materiałów, decyduje o usuwaniu warstwy tlenków. W zależności od rodzaju zgrzewanych materiałów wartości prędkości obrotowej należą do przedziału  $180 \div 2000$  obr/min [5],
- siły docisku zgrzewania ( $F_d$ ) – rozumianej jako siła docisku narzędzia do zgrzewanych materiałów. Typowe wartości sił docisku mieszczą się w zakresie  $12 \div 17$  kN [45],
- prędkości zgrzewania ( $V_z$ ) – prędkości, z jaką przesuwane jest narzędzie mieszające wzdłuż trajektorii zgrzewania. Wpływa ona na stopień wzajemnego wymieszania materiału zgrzeiny oraz jej właściwości wytrzymałościowe. Zakres stosowanych prędkości zgrzewania zależy od zgrzewanego materiału i waha się w przedziale  $0,3 \div 1,5$  m/min,
- średnicy wieńca opory – rozumianej jako średnica części roboczej obracającego się narzędzia, mająca bezpośredni kontakt z powierzchnią zewnętrzną materiału zgrzewanego. Decyduje o temperaturze procesu zgrzewania, wpływa na proces formowania zgrzeiny. Średnica wieńca opory dobierana jest w zależności od rodzaju i grubości zgrzewanych materiałów,
- geometrii narzędzia (trzcienia i wieńca opory) – wymiarów trzcienia oraz wieńca opory. Wpływa ona na stopień odkształcenia plastycznego oraz zagęszczania zgniotowego w zgrzeinie.

Spośród parametrów zgrzewania prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania mają największe znaczenie dla jakości powstałego złącza. Parametry te wpływają na strukturę zgrzeiny w tym na stopień uplastycznienia łączonych materiałów oraz wielkość ziarna, a tym samym na jakość i wytrzymałość złączy [34]. Zwiększenie prędkości obrotowej

narzędzia lub zmniejszenie prędkości zgrzewania prowadzi do wprowadzania większej ilości energii do obszaru złącza (rys. 9). Taka kombinacja prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania może przyczynić się do utraty jednorodności złącza oraz korzyści związanych ze zrekrytalizowaną strukturą. Z kolei duże prędkości obrotowe i duże prędkości zgrzewania powodują pojawienie się niezgodności w złączach. Dodatkowo, im wyższa jest prędkość obrotowa, tym bardziej zmienia się budowa złącza. W zależności od zastosowanych parametrów FSW inny udział w tworzeniu złącza mają wieniec opory oraz trzpień narzędzia. Przy niskich prędkościach zgrzewania większy wpływ na nagrzewanie obszaru zgrzewania oraz uplastycznienie materiału wywiera wieniec opory [46, 47].



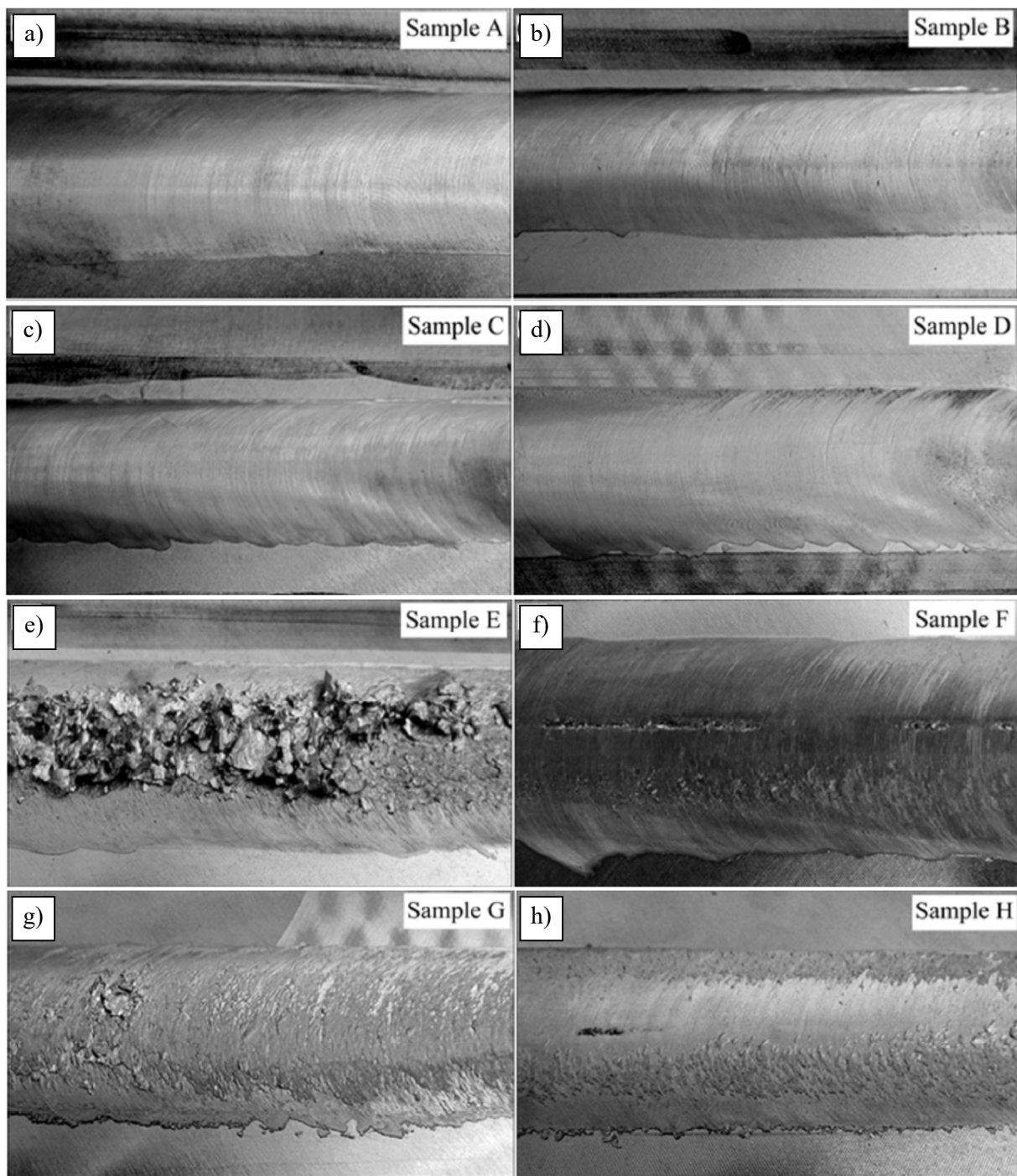
Rys. 9. Zależność temperatury materiału od prędkości obrotowej narzędzia podczas zgrzewania FSW stopu aluminium 6063 [48]

Wszystkie parametry, wpływające na proces zgrzewania FSW, dobierane są w zależności od rodzaju i grubości łączonych materiałów. Parametry te są ze sobą powiązane, np. zwiększając prędkość obrotową najczęściej zwiększa się również prędkość zgrzewania, a zatem i wydajność procesu [34, 44]. Zestawienie przykładowych, głównych parametrów procesu zgrzewania FSW dla różnych stopów aluminium przedstawiono w tabelicy 1 [5].

Tablica 1. Zestawienie przykładowych zestawów głównych parametrów procesu FSW tj. prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania stosowanych do łączenia różnych stopów aluminium [5]

| L.p. | Zgrzewany stop aluminium | Parametry procesu FSW              |                            | Wielkość ziarna, $\mu\text{m}$ |
|------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|      |                          | Prędkość obrotowa narzędzia, $V_o$ | Prędkość zgrzewania, $V_z$ |                                |
| 1.   | EN AW-1000               | 1000                               | 25                         | 8,3                            |
| 2.   | EN AW-1050               | 600                                | 100                        | 9,5                            |
| 3.   |                          | 1000                               | 100                        | 13,4                           |
| 4.   |                          | 1200                               | 100                        | 15,2                           |
| 5.   | EN AW-2139               | 2000                               | 300                        | 6,0                            |
| 6.   | EN AW-2219               | 800                                | 200                        | 2,5                            |
| 7.   | EN AW-5052               | 2000                               | 60                         | 10,5                           |
| 8.   | EN AW-5083               | 430                                | 90                         | 1,6                            |
| 9.   | EN AW-6061               | 800                                | 15                         | 10                             |
| 10.  | EN AW-6082               | 1500                               | 500                        | 19                             |
| 11.  | EN AW-6082               | 850                                | 14                         | 11,6                           |
| 12.  | EN AW-6082               | 1600                               | 40                         | 2,8                            |
| 13.  | EN AW-6082               |                                    | 115                        | 2,0                            |
| 14.  | EN AW-6082               |                                    | 460                        | 2,1                            |
| 15.  | EN AW-7010               | 450                                | 95                         | 6,0                            |
| 16.  | EN AW-7039               | 650                                | 190                        | 7,92                           |
| 17.  | EN AW-7449               | 350                                | 175                        | 10                             |

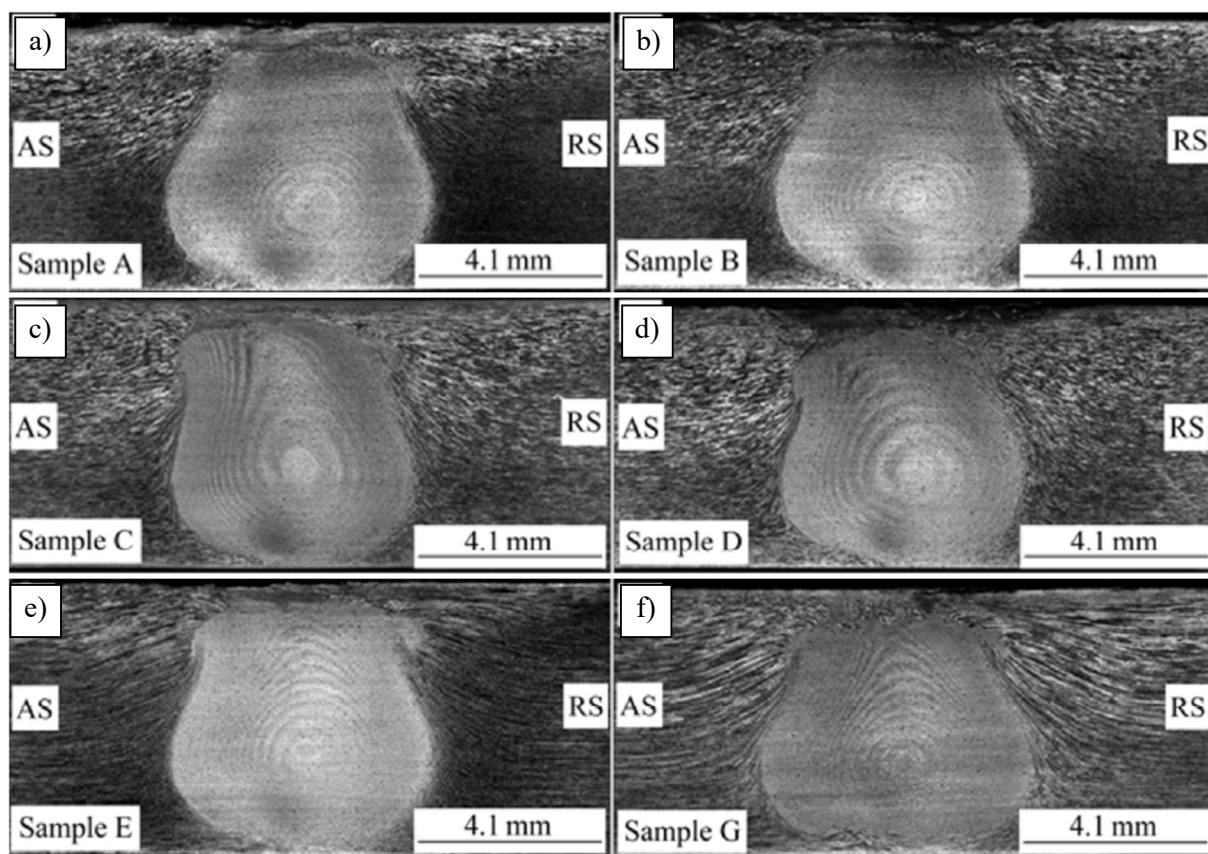
Radisavljevic I., Zivkovic Z. i inni wykazali, że zmieniając prędkość obrotową narzędzia oraz prędkość zgrzewania można znacząco wpływać na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne złącza [49]. Do badań autorzy wykorzystali stop aluminium AA2024-T351, który zgrzewali z zastosowaniem kombinacji prędkości obrotowej narzędzia od 750 do 1180 obr/min oraz prędkości zgrzewania w zakresie od 73 do 150 mm/min. Na rysunku 10 przedstawiono widok zgrzein od strony lica. Przy prędkości obrotowej 750 obr/min powierzchnie wszystkich zgrzein są gładkie i pozbawione niezgodności (rys. 10a - 10d). Przy wyższych prędkościach obrotowych tj. 950 i 1180 obr/min pojawiają się rozwarstwienia powierzchni zgrzein. Zaczynają one przyjmować nieregularny kształt o szorstkich oraz ostrych powierzchniach (rys. 10e - 10h). Widoczna jest m.in. zwiększona ilość materiału wypływu (10e) oraz pustka tunelowa (10f).



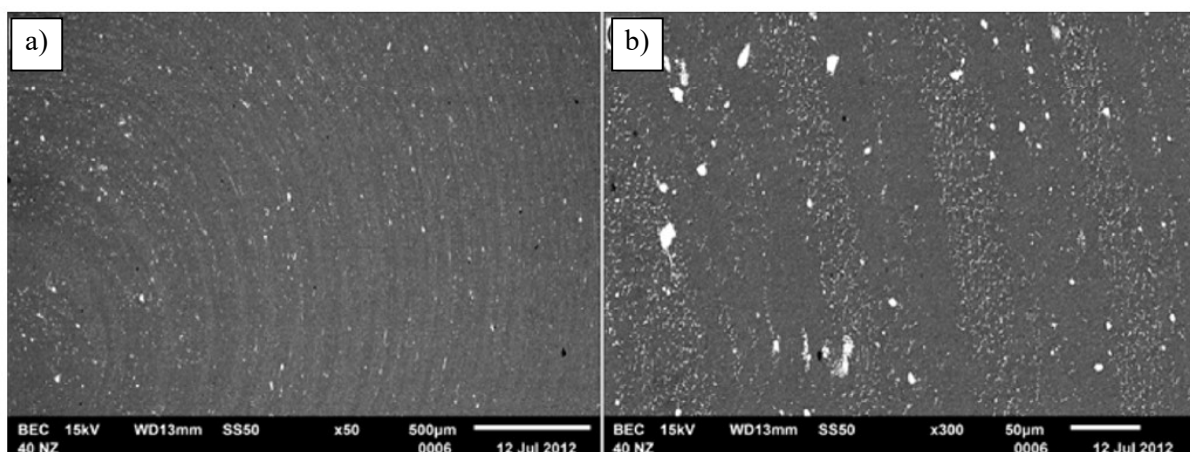
Rys. 10. Widok powierzchni zgrzein ze stopu aluminium AA2024-T351 wykonanych przy zastosowaniu różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz prędkości zgrzewania:

a)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=73$  mm/min, b)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=93$  mm/min,  
c)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=116$  mm/min, d)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=150$  mm/min,  
e)  $V_o=950$  obr/min,  $V_z=93$  mm/min, f)  $V_o=950$  obr/min,  $V_z=190$  mm/min,  
g)  $V_o=1180$  obr/min,  $V_z=116$  mm/min, h)  $V_o=1180$  obr/min,  $V_z=150$  mm/min [49]

Na rysunku 11 przedstawiono makrostruktury na przekroju poprzecznym złączy utworzonych z zastosowaniem różnych parametrów zgrzewania FSW wskazanych przez autorów [49]. Biorąc pod uwagę znaczącą rolę geometrii narzędzia w kształtowaniu złącza FSW, strefę jądra zgrzeiny autorzy podzielili na trzy mniejsze podstrefy. Wskazane strefy to: strefa kształtowana poprzez oddziaływanie wieńca opory (SDZ), strefa kształtowana poprzez oddziaływanie trzpieniem (PDZ) oraz strefa wirowania (SWZ). Strefy SDZ oraz SWZ są mniej lub bardziej widoczne w zależności od zastosowanej prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania. Wyraźnie jest natomiast widoczna szeroka strefa PDZ o strukturze „pierścieni cebuli”. Jej kształt zależy od prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania. Wraz ze zmniejszeniem prędkości zgrzewania (przy tej samej prędkości obrotowej narzędzia) obserwowano mniejsze odstęp między „pierścieniami” [49]. Typową strukturę „pierścieni cebuli” przedstawiono na rys. 12.

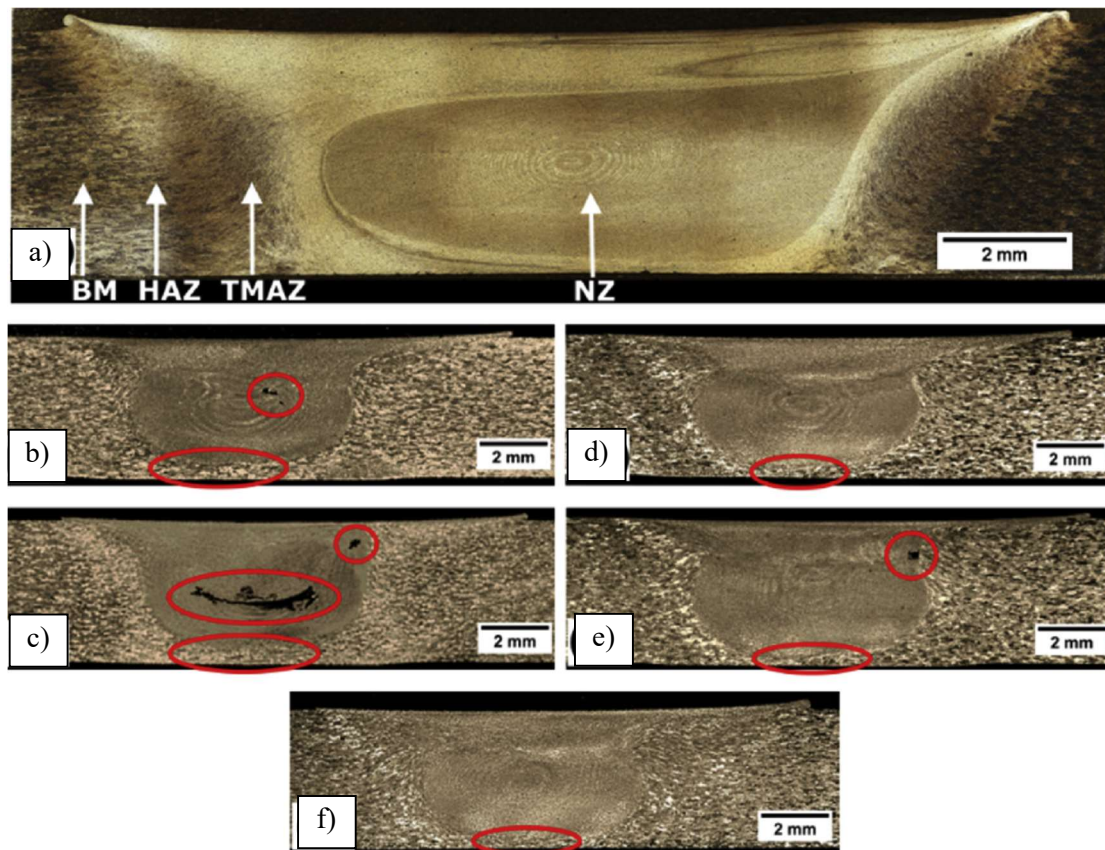


Rys. 11. Makrostruktura złączy AA2024-T351 wykonanych przy zastosowaniu różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz prędkości zgrzewania: a)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=73$  mm/min, b)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=93$  mm/min, c)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=116$  mm/min, d)  $V_o=750$  obr/min,  $V_z=150$  mm/min, e)  $V_o=950$  obr/min,  $V_z=93$  mm/min, f)  $V_o=1180$  obr/min,  $V_z=116$  mm/min [49]



Rys. 12. Struktura SEM obszaru jądra zgrzeiny przy różnych powiększeniach – widoczne „pierścienie cebuli” [49]

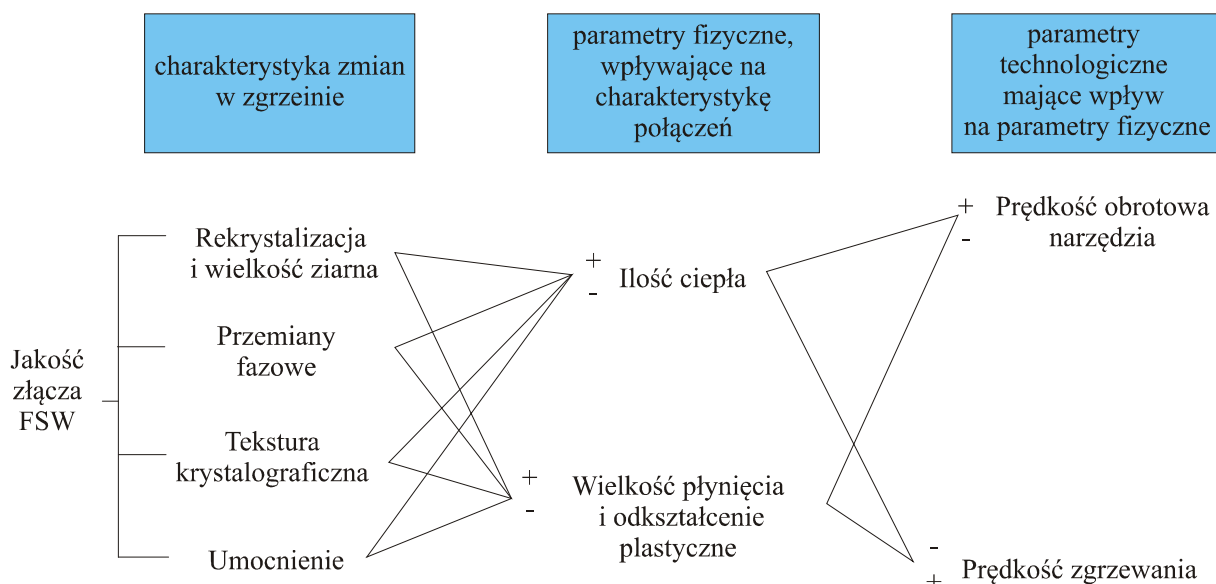
Salih O.S., Neate N. i inni zaobserwowali, że jakość złączy ze stopu aluminium AA6082-T6 w dużym stopniu zależy od dwóch czynników tj. temperatury zgrzewania oraz właściwości płynięcia zmiękzonego materiału w strefie jądra zgrzeiny [39]. Na czynniki te wpływają prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania. Zastosowanie dużej różnicy pomiędzy tymi parametrami prowadzi na powstawania niezgodności w postaci „pustek tunelowych”, pęknięć oraz niepełnej penetracji i tym samym niewystarczającego mieszania się mas łączonych materiałów. Jest to spowodowane odkształceniem plastycznym stopu aluminium, czasem mieszania oraz ilością ciepła w zgrzeinie. Na rys. 13 przedstawiono widok przykładowych makrostruktur złączy ze stopu aluminium AA6082-T6. W większości przypadków nie ujawniono niezgodności (np. rys. 13a). W niektórych złączach obserwowano powstawanie wąskich „pustek tunelowych” (rys. 13b, c, e), pęknięć (rys. 13c), niepełnej penetracji (rys. 13b-f). Powstały one w wyniku niewystarczającej ilości ciepła w obszarze mieszania tj. przy prędkościach zgrzewania 125 i 200 mm/min. Poprawne mieszanie uzyskano poprzez zwiększenie czasu mieszania oraz obniżenie szybkości chłodzenia złącza – obniżenie prędkości zgrzewania [39].



Rys. 13. Makrostruktura wybranych złączy FSW ze stopu aluminium AA6082-T6:  
 a)  $V_o=1100$  obr/min,  $V_z=20$  mm/min, b)  $V_o=800$  obr/min,  $V_z=125$  mm/min,  
 c)  $V_o=800$  obr/min,  $V_z=200$  mm/min, d)  $V_o=1100$  obr/min,  $V_z=125$  mm/min,  
 e)  $V_o=1100$  obr/min,  $V_z=200$  mm/min, f)  $V_o=1500$  obr/min,  $V_z=200$  mm/min [49]

Salih O.S., Neate N. opracowali także diagram zależności poszczególnych zmiennych w procesie FSW bezpośrednio wpływających na jakość powstałych złączy (rys. 14) [39]. Diagram ten przedstawia w jaki sposób parametry technologiczne procesu (prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania) wpływają na parametry fizyczne (np. ilość ciepła czy wielkość płynięcia materiału) kontrolując tym samym jakość złącza. Przykładowo – zwiększając prędkość obrotową narzędzia zwiększamy ilość ciepła wprowadzanego do złącza, ilość przepływającego materiału i wielkość odkształcenia plastycznego, co wpływa na zmiany strukturalne w zgrzeinie [39].



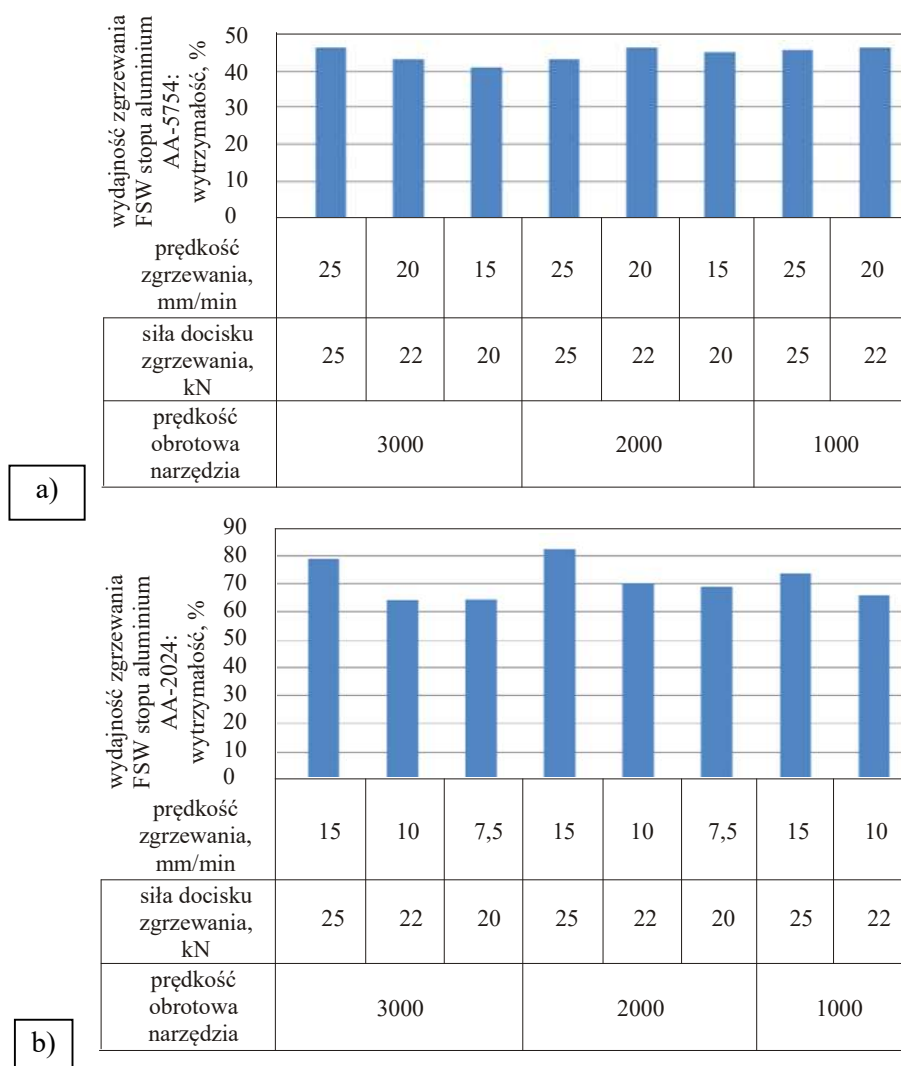


Rys. 14. Diagram interakcji łączący parametry procesu z parametrami fizycznymi i charakterystyką złącza, które mają wpływ na jakość złącza FSW [39]

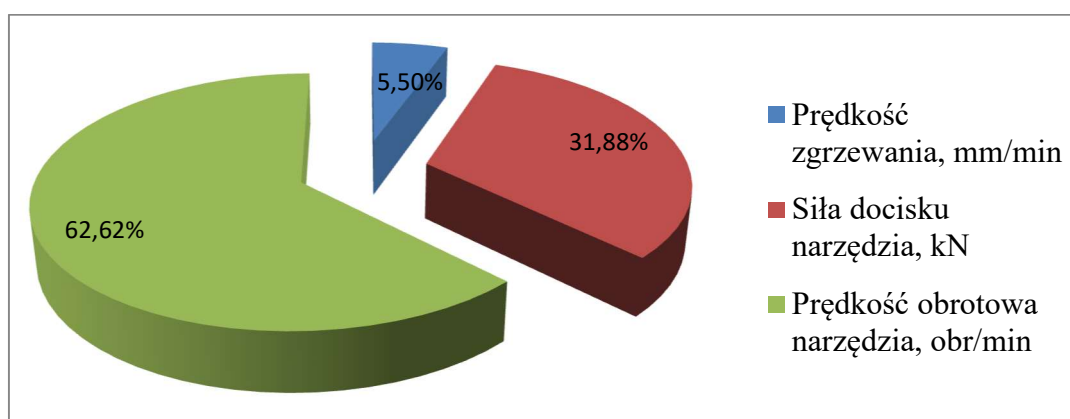
Tiwari S. K., Shukla D.K. i inni wskazali również, że wpływ na jakość złącza FSW mają parametry technologiczne zgrzewania, takie jak prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania [44]. Istotną rolę w procesie odgrywa także geometria narzędzia, kąt pochylenia narzędzia oraz głębokość penetracji. Czynniki te decydują o sposobie mieszania materiału podczas zgrzewania i wpływają na stosowaną prędkość zgrzewania. Autorzy wskazali na złożoność ruchów materiału w zgrzeinie i konieczność prowadzenia dalszych badań w celu wyjaśnienia zjawisk temu towarzyszących. Ruch materiału powoduje intensywne odkształcenie plastyczne w wysokiej temperaturze co wpływa na zmianę struktury złącza tj. rekrystalizację ziaren lub eliminację tlenków. Zastosowanie technologii FSW do zgrzewania różnych stopów aluminium znacznie poprawia wytrzymałość, plastyczność i właściwości zmęczeniowe powstałych złączy w stosunku do konwencjonalnych metod spawania łukowego [44].

Wpływ prędkości obrotowej narzędzia, prędkości zgrzewania oraz siły docisku narzędzia na wytrzymałość powstałych złączy przedstawili w swojej pracy Aditya i Datta [50]. Zaprezentowali oni wyniki badań dotyczące zgrzewania płyt ze stopów aluminium AA2024 oraz AA5754. Autorzy opracowania na podstawie wyników badań określili (za pomocą oprogramowania MINITAB oraz przy zastosowaniu do obliczeń Metody Taguchi) wpływ poszczególnych parametrów na wytrzymałość złączy (rys. 15) [50]. Opisać również procentowy wpływ poszczególnych parametrów na jakość złączy ze stopów aluminium AA2024 oraz AA5754 (rys. 16) [50].





Rys. 15. Analiza analityczna wytrzymałości złączy FSW ze stopów: a) AA2024, b) AA 5754 wykonana za pomocą Metody Taguchi [50]



Rys. 16. Procentowy wpływ poszczególnych parametrów na jakość złączy ze stopów aluminium AA2024 (a) oraz AA5754 (b) – wyniki analizy statystycznej za pomocą oprogramowania MINITAB [50]

Jak wskazują wyniki badań autorów [50] w zależności od rodzaju zgrzewanego materiału różny jest wpływ poszczególnych parametrów na jakość i wytrzymałość złączy FSW.

### **2.3. Zalety i ograniczenia technologii**

Zgrzewanie tarciove FSW, jak każda inna technologia spajania, posiada zarówno zalety jak i wady.

Zalety łączenia metodą FSW można sklasyfikować jako metalurgiczne, technologiczno-konstrukcyjne, środowiskowe oraz energetyczne [10, 28, 51, 52].

Do zalet metalurgicznych należą:

- powstawanie złącza w stanie stałym (uplastycznienie łączonych materiałów),
- stabilność wymiarowa i powtarzalność jakości (brak odkształceń),
- brak utraty składników stopowych (jednorodność składu chemicznego),
- bardzo dobre właściwości mechaniczne złączy (drobnoziarnista, zrekrytalizowana i jednorodna mikrostruktura złącza),
- brak pęknięć gorących (wywoływanych działaniem naprężeń obecnych w materiale).

Zalety technologiczno-konstrukcyjne obejmują:

- możliwość automatyzacji i robotyzacji procesu zgrzewania.
- możliwość obróbki mechanicznej złącza,
- możliwość wykonania złącza w jednym przejściu i prowadzenia procesu w każdej pozycji (w odniesieniu do pozycji spawalniczych),
- niewymagane specjalne przygotowanie krawędzi łączonych elementów (płyty do zgrzewania ukosowane na I),
- redukcję masy konstrukcji (dzięki wyeliminowaniu połączeń spawanych, skręcanych, nitowanych),
- proste przygotowanie i czyszczenie powierzchni do zgrzewania,
- możliwość łączenia ze sobą materiałów różnoimiennych, co pozwala na obniżenie masy konstrukcji (np. łączenie elementów o różnej grubości).

Do zalet związanych z ochroną środowiska należą:

- brak emisji szkodliwych gazów, pyłów, promieniowania,
- ograniczony hałas przy wykonywaniu złączy w porównaniu do innych technologii łączenia (np. zgrzewania ultradźwiękowego).

- wykorzystanie tylko około 2,5% potrzebnej energii w stosunku do ilości energii potrzebnej np. przy spawaniu laserowym,
- obniżenie zużycia paliwa napędowego w lżejszych konstrukcjach lotniczych i pojazdach szynowych dzięki zastosowaniu stopów metali lekkich np. aluminium.

Zalety zgrzewania tarcowego FSW wpływają na obniżenie kosztów konstrukcji zgrzewanych. Metoda FSW jest konkurencyjna w stosunku do innych metod spajania. W tablicy 2 przedstawiono porównanie metod spawalniczych stosowanych do łączenia stopów aluminium [10].

Tablica 2. Porównanie technologii spawalniczych stosowanych do łączenia różnych gatunków stopów aluminium [10]

|                                                            | Metoda spajania |     |            |       |                   |                             |
|------------------------------------------------------------|-----------------|-----|------------|-------|-------------------|-----------------------------|
| Rodzaj złącza, grubość, mm                                 | FSW             | MIG | TIG/Plazma | Laser | Wiązka elektronów | Zgrzewanie punktowe/liniowe |
| Doczołowe 1-5                                              | T               | T   | T          | T     | T                 | T                           |
| Doczołowe 5-12                                             | T               | T   | W          | T     | T                 | N                           |
| Doczołowe 12-25                                            | T               | W   | W          | T     | T                 | N                           |
| Doczołowe >25                                              | T               | W   | W          | T     | T                 | N                           |
| Na zakładkę 1-5                                            | T               | N   | T          | T     | T                 | T                           |
| Na zakładkę 5-12                                           | T               | N   | W          | T     | T                 | N                           |
| Na zakładkę 12-25                                          | T               | W   | W          | N     | T                 | N                           |
| Na zakładkę >25                                            | N               | W   | W          | N     | T                 | N                           |
| T – możliwe, N – niemożliwe, W – połączenie wielowarstwowe |                 |     |            |       |                   |                             |

Podobne porównanie technologii spawalniczych w stosunku do technologii FSW przedstawili autorzy Akinlabi E. oraz Akinlabi A. [52]. Przedstawili oni możliwości zastosowania poszczególnych technologii w odniesieniu do różnych gałęzi przemysłu wskazując jednocześnie pozytywne strony zgrzewania FSW (tabl. 3).

Tablica 3. Możliwości zastosowania poszczególnych technologii spawalniczych w odniesieniu do różnych gałęzi przemysłu [52]

| <b>Przemysł</b>                    | <b>Zastosowanie</b>                               | <b>Proces obecnie stosowany</b>              | <b>Zalety wykorzystania technologii FSW</b>                                                     |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektryczny                        | Radiatory – zgrzewanie laminatów                  | Spawanie gazowe<br>Spawanie MIG/MAG          | Wyższa gęstość pletw - lepiej przewodność cieplna                                               |
| Elektryczny                        | Szafy i obudowy sterownicze, szyny prądowe        | Spawanie MIG/MAG                             | Redukcja kosztów wykonania, możliwość łączenia materiałów różnoimiennych                        |
| Militarny                          | Wykonywanie elementów czołgów, wyrzutni rakiet    | Spawanie MIG/MAG                             | Redukcja kosztów                                                                                |
| Okrętowy, budowa statków i jachtów | Okucia, połączenia obwodowe i o długich wymiarach | Spawanie MIG/MAG                             | Wyższa jakość - mniej wycieków, niższy czas wykonania (takt time)                               |
| Lotniczy                           | Podłogi, skrzydła i kadłuby samolotów             | Nitowanie                                    | Wyższa jakość połączeń, niższy koszt wykonania, brak konieczności wykonywania otworów           |
| Motoryzacyjny                      | Felgi, wahacze, elementy silników, karoserii      | Spawanie MIG/MAG<br>Zgrzewanie rezystancyjne | Lepsza integralność złącza, w niektórych przypadkach jedyna technologia możliwa do zastosowania |
| Kolejowy                           | Podłogi, ściany boczne, elementy poszycia, drzwi  | Spawanie MIG/MAG                             | Wyższa jakość powstałych złączy                                                                 |

Metoda zgrzewania FSW posiada także ograniczenia [10, 28, 51, 52]:

- wysokie koszty początkowe inwestycji – konieczny jest zakup urządzenia do zgrzewania FSW (dedykowanego lub tańszego w postaci adaptacji frezarki), a także dodatkowych uchwytów mocujących i usztywniających zgrzewane elementy,
- konieczność stosowania podparcia w miejscu zgrzewania albo poprzez stosowanie podpór technologicznych lub poprzez zaprojektowanie konstrukcji zgrzewanej zawierającej podpory,
- dla popularnych gatunków stali, metoda FSW nie zapewnia odpowiedniej prędkości zgrzewania,
- problemy z pełną penetracją zgrzewanych materiałów, od strony grani złącza, w wyniku oddziaływania narzędzia do zgrzewania.

## 2.4. Niezgodności w złączach zgrzewanych

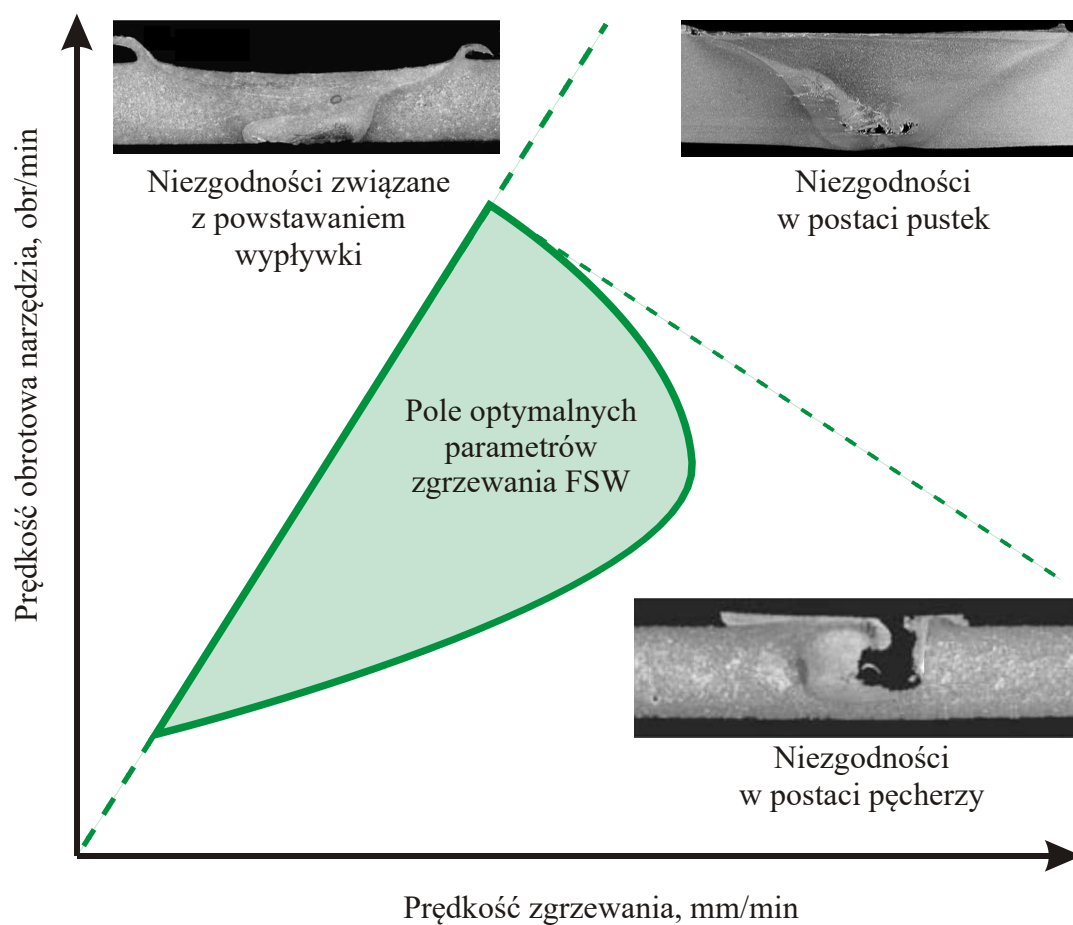
W metodzie FSW niezgodności dotyczą głównie struktury zgrzeiny. W większości przypadków ujawniają się one w obszarze grani oraz na styku odkształconych obszarów zgrzeiny. W złączach FSW, z powodu niewłaściwego doboru parametrów procesu, może wystąpić kilka grup niezgodności.

W zależności od warunków zgrzewania FSW przyczyny powstawania niezgodności są następujące [20, 53, 54]:

- zbyt duża ilość ciepła w zgrzeinie,
- niewystarczająca ilość ciepła w zgrzeinie,
- nieprawidłowe mieszanie łączonych materiałów.

Najczęściej występujące w złączach FSW niezgodności są następujące (rys. 17):

- **niezgodności związane z powstawaniem wypłytki** – niezgodności powstałe w wyniku zbyt dużej energii zgrzewania (lewa strona pola optymalnych parametrów procesu FSW) (rys. 17). Niezgodności te pojawiają się, gdy prędkość obrotowa jest znacznie wyższa niż prędkość zgrzewania. Zgrzewane materiały są mocno podgrzane i odkształcone plastycznie. Wytwarzane nadmierne ciepło uplastycznia materiał blisko oddziaływania narzędzia i odkłada go na zewnątrz w postaci wypłytki w wyniku wysokiego docisku wieńca opory,
- **niezgodności w postaci pustek** – niezgodności powstałe w wyniku zbyt małej energii zgrzewania (prawa dolna strona pola optymalnych parametrów procesu FSW). Niezgodności te pojawiają się, gdy prędkość zgrzewania jest znacznie wyższa niż prędkość obrotowa narzędzia. Duża prędkość zgrzewania może prowadzić do powstawania pustek po stronie natarcia na granicy jądra zgrzeiny. Dalsze zwiększanie prędkości zgrzewania prowadzi do powstawania tzw. „pustek tunelowych”. Jest to związane z niewystarczającym „płynięciem” uplastycznionego materiału, co powoduje brak wypełnienia zgrzeiny (rys. 17),
- **niezgodności w postaci pęcherzy** – niezgodności powstają z powodu niewystarczającego mieszania (prawa górna strona pola optymalnych parametrów procesu FSW). Niezgodności tego rodzaju zwykle pojawiają się przy zbyt dużych prędkościach obrotowych i dużych prędkościach zgrzewania. Wynika to z różnicy temperatur między górną, a dolną częścią zgrzeiny, co powoduje nieciągłość przepływu materiału,



Rys. 17. Pole optymalnych parametrów procesu FSW i odpowiadające mu wybrane niezgodności w złączach [55]

W tablicy 4 przedstawiono wykaz niezgodności najczęściej występujących w złączach zgrzewanych metodą FSW wraz z określeniem obszaru i przyczyny ich występowania.

Tablica 4. Wykaz najczęściej spotykanych, szczegółowych niezgodności występujących w złączach zgrzewanych [37, 56]

| Rodzaj niezgodności                   | Obszar występowania                            | Przyczyna występowania                                                                                                           |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pustka                                | Na krawędzi jądra zgrzeiny po stronie natarcia | Zbyt mały docisk narzędzia, za duża prędkość zgrzewania, źle zamocowane elementy zgrzewane                                       |
| Pustka przypowierzchniowa             | Pod powierzchnią zgrzeiny                      | Za duża prędkość liniowa zgrzewania, mały docisk wieńca opory                                                                    |
| Pozostałość po linii złącza           | W obszarze jądra zgrzeiny                      | Nie usunięte tlenki z krawędzi łączonych elementów                                                                               |
| Pustka w grani                        | W obszarze jądra zgrzeiny                      | Za krótki trzpień, nieodpowiednia głębokość zanurzenia trzpienia, niewłaściwe usytuowanie łączonych elementów względem trzpienia |
| Zbyt duże pocienienie blachy w złączu | Lico zgrzeiny                                  | Konstrukcja narzędzi                                                                                                             |

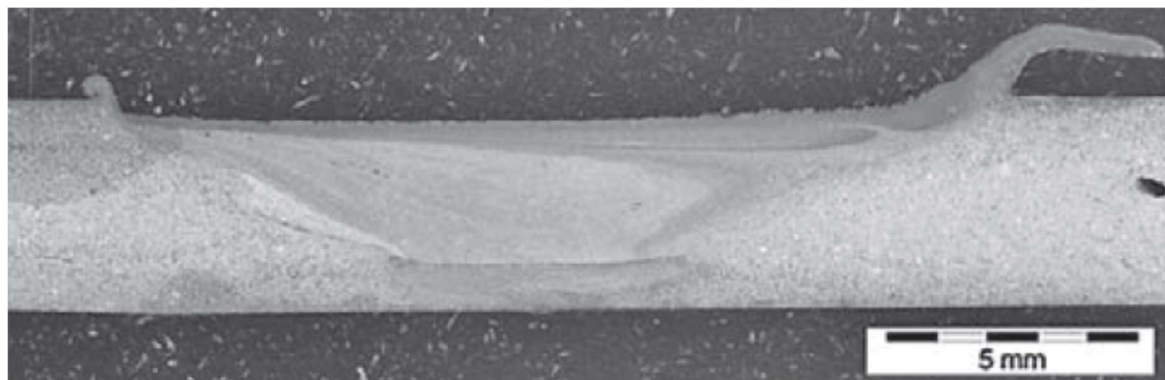
Klobčar, Podržaj i inni wskazali w swoim opracowaniu [20], że istnieje możliwość podziału niezgodności ze względu na różną ilość energii dostarczanej do złącza. Oprócz parametrów takich jak prędkość obrotowa narzędzia, prędkość zgrzewania wpływ na ilość energii ma także kąt pochylenia narzędzia, który odpowiada za opór jaki stawia materiał podczas zgrzewania. W przypadku niezgodności występujących od strony lica autorzy Klobčar, Podržaj sklasyfikowali je następująco [20]:

- zbyt duża wielkość wypływki,
- wgłębienie w zgrzeinie w postaci rowka,
- pustka w zgrzeinie.

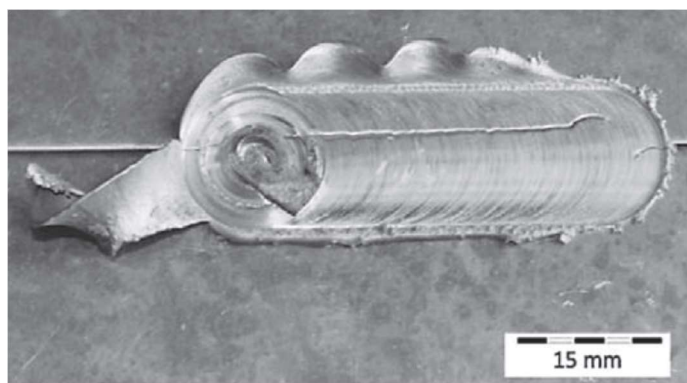
Przykładowy widok nadmiernej wypływki, spowodowany zbyt dużą ilością energii w zgrzeinie przedstawiono na rys. 18. Mimo tego, iż wytrzymałość złączy z nadmierną wypływką nie spada, istnienie tego rodzaju niezgodności jest niedopuszczalne [57]. Przykład drugiego typu niezgodności tj. wgłębienia w zgrzeinie w postaci rowka (wraz ze zbyt dużą



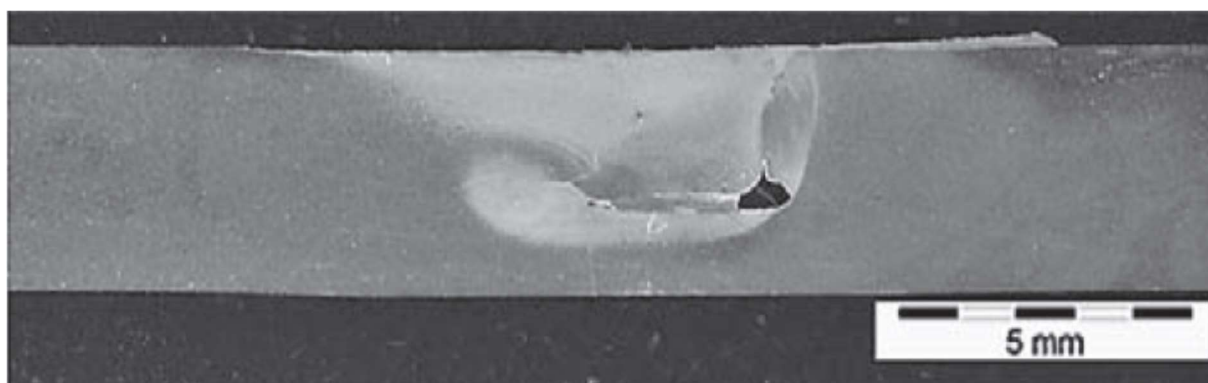
wielkością wypływki) przedstawiono na rys. 19. Z kolei na rys. 20 pokazano makrostrukturę złącza zgrzewanego z widoczną pustką w zgrzeinie [20].



Rys. 18. Makrostruktura złącza FSW z odlewniczego stopu aluminium EN AC-44200 przedstawiająca zbyt dużą wypływkę od strony lica [20]

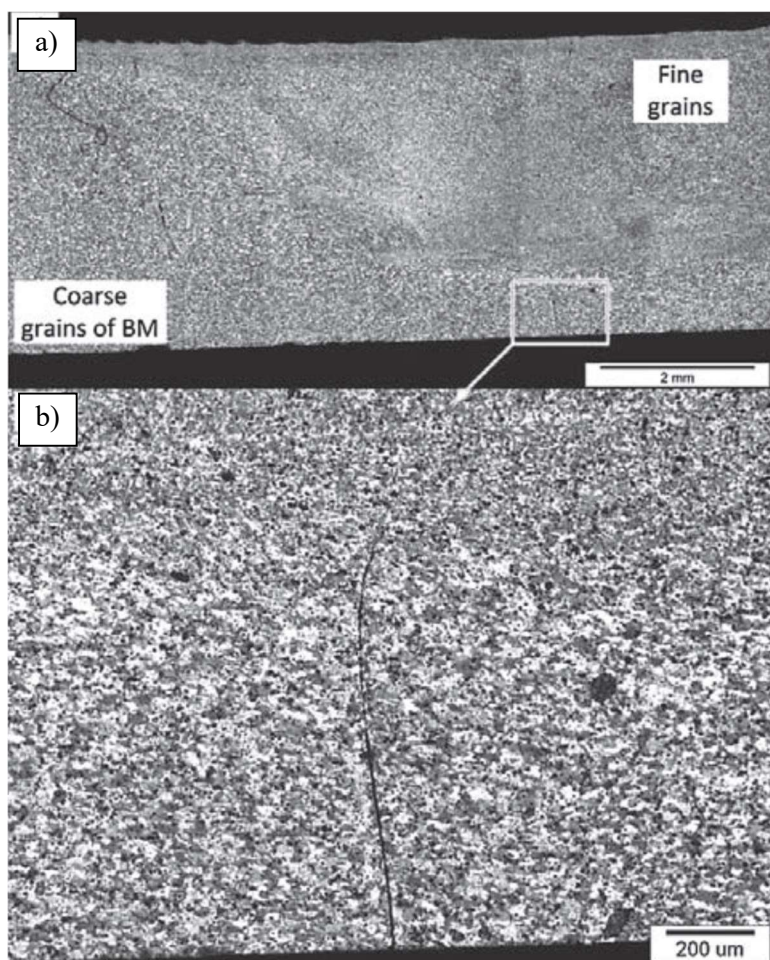


Rys. 19. Widok złącza FSW z odlewniczego stopu aluminium EN AC-44200 przedstawiający rowek w zgrzeinie od strony lica [20]



Rys. 20. Makrostruktura złącza FSW z odlewniczego stopu aluminium EN AC-44200 przedstawiająca pustkę w zgrzeinie [20]

Klobčar, Podržaj predstavili ponadto niezgodność w postaci linii „braku zgrzania” od strony grani (rys. 21). Niezgodność przedstawiono dla zgrzeiny wykonanej ze stopu aluminium AA5083. W mikrostrukturze zgrzeiny obserwowano wyraźną różnicę w wielkości ziarna pomiędzy materiałem rodzimym, a strefą mieszania. Drobne ziarna w tej strefie oznaczają większą plastyczność i dobre wymieszanie łączonego materiału. Pojawiająca się od strony grani niezgodność w postaci krzywej „braku zgrzania” jest niedopuszczalna z uwagi na gorszą wytrzymałość złącza, w szczególności w przypadku obciążeń dynamicznych. Tego rodzaju niezgodności są bardzo trudne do wykrycia metodami nieniszczącymi.



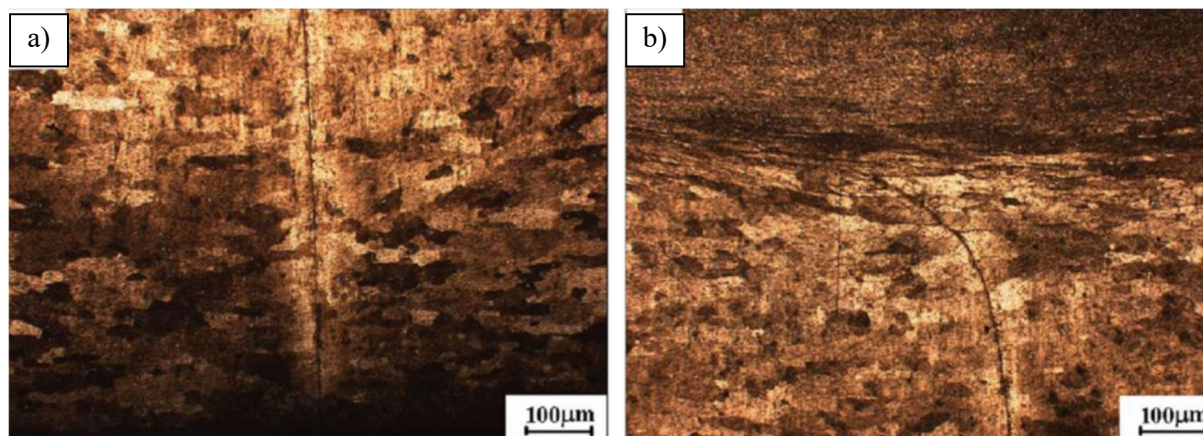
Rys. 21. Mikrostruktura złącza FSW ze stopu aluminium AA5083 przedstawiająca linię „braku zgrzania” (z ang. kissing bond) [20]

Autorzy Klobčar, Podržaj stwierdzili również, że zaprezentowane typy niezgodności dotyczące technologii FSW występują przy zastosowaniu niewłaściwej kombinacji parametrów procesu zgrzewania. Dotyczy to przede wszystkim prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania. Powoduje to dostarczenie nadmiernej lub niewystarczającej ilości

energii do zgrzeiny. Jednak nawet w przypadku odpowiedniego ich doboru, kluczową rolę odgrywa kąt pochylenia narzędzia oraz geometria narzędzia [20].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na powstawanie niezgodności (mimo prawidłowo dobranych parametrów głównych czyli prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania) jest stosowanie różnych czasów trwania zagłębiania narzędzia w obszar zgrzewania lub czas przerwy pomiędzy zagłębieniem narzędzia, a uruchomieniem posuwu [20].

Kah P., Rajan R. i inni wskazali w swojej publikacji [54] na częste występowanie od strony grani niezgodności w postaci krzywej tzw. „braku zgrzania”. Kluczową rolę w zapobieganiu tego typu niezgodności odgrywa właściwa kombinacja głównych parametrów procesu FSW tj. prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania. Niezgodności tego rodzaju powstają wskutek zbyt dużej lub niewystarczającej ilości energii w zgrzeinie lub z powodu niepełnego rozpadu warstw powierzchniowych tlenków [54]. Występowanie takich niezgodności może być również spowodowane zbyt małą długością trzpienia oraz zależy od kąta pochylenia narzędzia względem zgrzewanych blach. Przykład takiej niezgodności w postaci różnych kształtów krzywej „braku zgrzania” (przypominającej pęknięcie) przedstawiono na rys. 22.



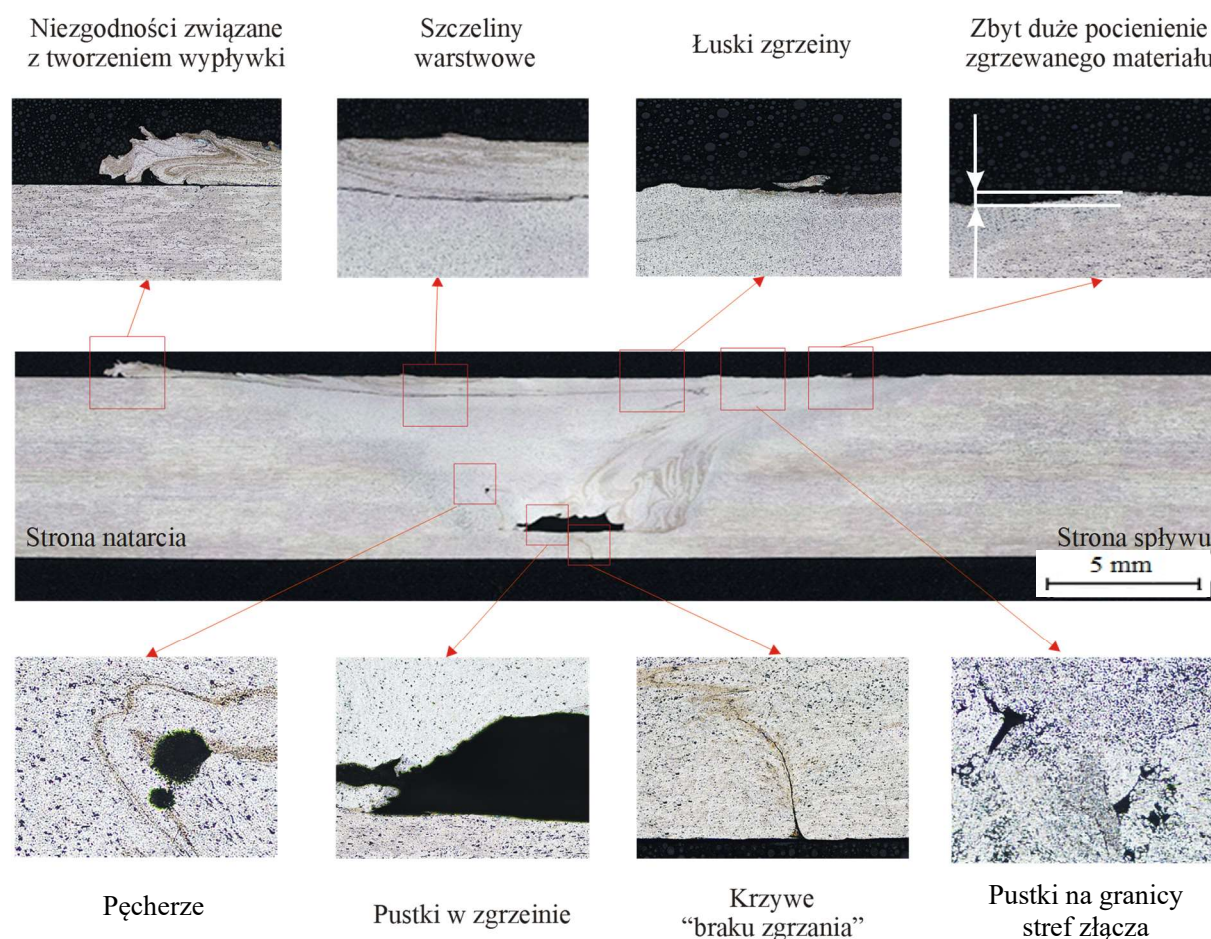
Rys. 22. Mikrostruktura złącza FSW ze stopu aluminium AA7075 przedstawiająca krzywą „braku zgrzania” (z ang. kissing bond) [54]

Kah P., Rajan R. określili także przyczyny powstawania niezgodności w postaci pustek w zgrzeinie. Wg nich niezgodność ta należy do wad związanych ze zmiennym kierunkiem płynięcia plastycznego mas zgrzewanych materiałów. Kah P., Rajan R. wskazali ponadto, że na strukturę złącza FSW i jego wytrzymałość ma wpływ dobrze uplastyczniony materiał zgrzeiny. Jest to wynikiem osiągnięcia odpowiedniej temperatury w zgrzeinie



w efekcie zastosowania odpowiedniej kombinacji głównych parametrów procesu FSW czyli prędkości obrotowej oraz prędkości zgrzewania [54].

Na podstawie przedstawionych w literaturze ujawnianych w złączach FSW niezgodności oraz na podstawie wyników badań własnych opracowano autorską klasyfikację najczęściej pojawiających się niezgodności. Niezgodności te przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Klasyfikacja własna najczęściej pojawiających się niezgodności w złączach FSW

### 3. Charakterystyka stopów aluminium serii 6xxx

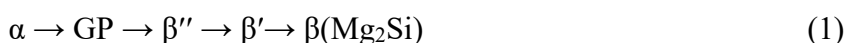
#### 3.1. Ogólna charakterystyka stopów aluminium serii 6xxx

Stopy aluminium serii 6xxx są stopami przerabianymi plastycznie i należą do grupy stopów umacnianych wydzieleniowo (przesycanych i starzonych), dzięki czemu uzyskują dobre właściwości wytrzymałościowe. Proces przesycania polega na nagraniu stopu do temperatury wyższej o ok.  $30\div 50^{\circ}\text{C}$  od temperatury granicznej rozpuszczalności w celu rozpuszczenia faz międzymetalicznych. Następnie po wygrzaniu w tej temperaturze i szybkim chłodzeniu otrzymujemy strukturę jednofazową. Starzenie z kolei polega na nagraniu stopu

uprzednio przesyconego do temperatury niższej od granicznej rozpuszczalności, wygrzaniu w tej temperaturze i studzeniu. W czasie starzenia następuje wydzielanie w przesyconym roztworze stałym składnika znajdującego się w nadmiarze, w postaci faz o wysokiej dyspersji. Powoduje to wydzielanie się w przesyconym roztworze np. twardych i kruchych faz, które zwiększają twardość i wytrzymałość stopu przy jednoczesnym obniżeniu plastyczności [59, 60, 61, 62].

Stopy aluminium serii 6xxx zawierają niewielką ilość (do 1%) magnezu (Mg) i krzemu (Si), a także dodatki manganu (Mn), miedzi (Cu), cynku (Zn) oraz chromu (Cr). Dodatek krzemu powoduje wzrost własności wytrzymałościowych i odporności korozyjnej. Z magnezem i krzemem aluminium tworzy pseudopodwójny układ Al-Mg<sub>2</sub>Si. Faza międzymetaliczna Mg<sub>2</sub>Si jest odpowiedzialna za występowanie i przebieg zjawiska utwardzania dyspersyjnego. W stopach tej serii mogą także występować fazy AlMg<sub>2</sub>Mn, Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, CuAl<sub>2</sub> (w zależności od zawartości składników stopowych). Stopy serii 6xxx są zaliczane do stopów aluminium o ograniczonej spawalności, także z uwagi na niskie właściwości plastyczne i możliwość występowania pęknięć podczas spawania [59, 60, 61, 62].

Mechanizm wydzielania faz międzymetalicznych z przesyconego roztworu  $\alpha$ -Al jest podstawą uzyskania dobrych właściwości mechanicznych. Umacnianie stopów AlMgSi następuje wskutek wydzielania się metastabilnych faz przejściowych oraz tworzenia się stabilnych faz równowagowych [59, 60, 61, 62]. Edwards i inni [61, 62] zaproponowali następujący schemat procesu rozpadu przesyconego roztworu stałego:

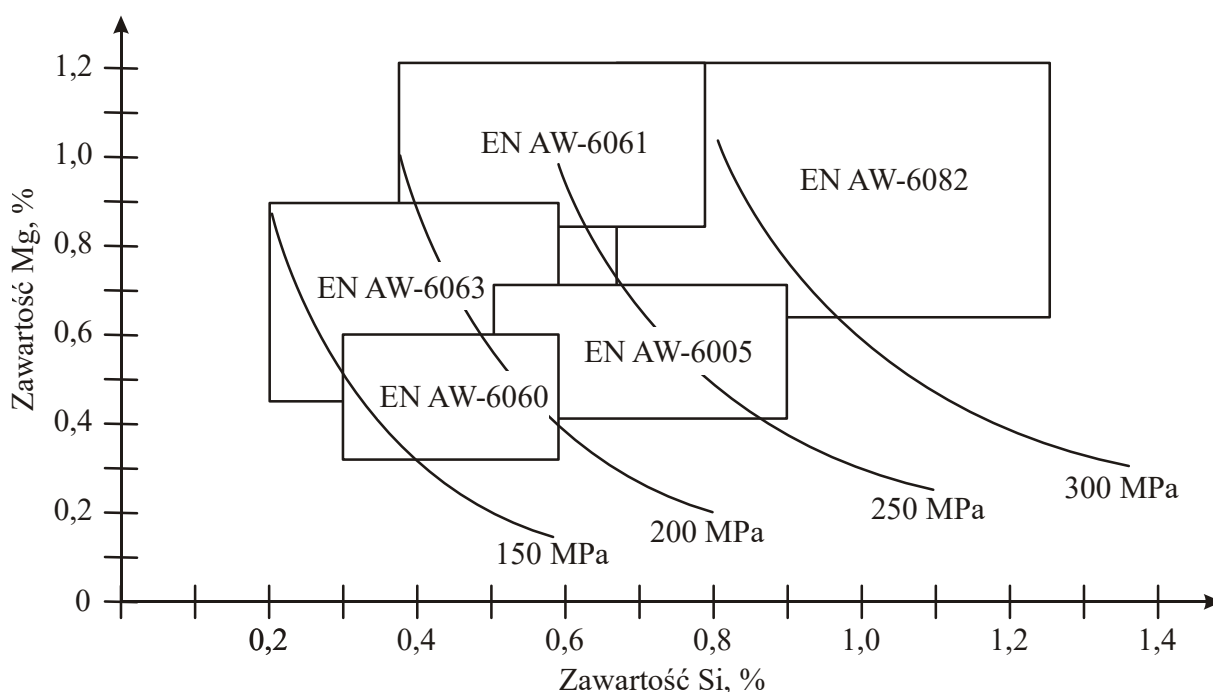


gdzie:  $\alpha$  – przesycony roztwór stały, GP – strefy Guiniera-Prestona,  $\beta''$  i  $\beta'$  – metastabilne fazy przejściowe,  $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$  – faza stabilna, równowagowa.

Autorzy Mrówka-Nowotnik, Sieniawski J. i inni [64] podjęli badania w celu określenia oddziaływania składu chemicznego oraz warunków prowadzenia procesu umacniania wydzieleniowego (temperatury i czasu) na sekwencję wydzielania faz umacniających z przesyconych stopów AlMgSi. Stwierdzili, że procesy wydzielania cząstek faz umacniających z przesyconego roztworu stałego stopów aluminium serii 6xxx zależą od ich składu chemicznego w tym głównie od zawartości pierwiastków tworzących fazy umacniające (Mg, Si i Cu). Procesy te zależą także od warunków prowadzenia obróbki cieplnej tj. szybkości nagrzewania, temperatury i czasu wygrzewania oraz szybkości chłodzenia, a proces wydzielania faz umacniających w stopach EN AW-6005 i EN AW-6082 zachodzi według przedstawionego wcześniej schematu (1). Autorzy stwierdzili także, że zwiększenie zawartości

pierwiastków stopowych prowadzi do obniżenia temperatury  $T_m$  (temperatury maksymalnej piku) wydzielania się cząstek faz  $\beta''$ ,  $\beta'$  i  $\beta$ , natomiast zwiększenie szybkości nagrzewania zmniejsza czas do wydzielania się metastabilnych i równowagowych faz umacniających. Jednocześnie zwiększenie szybkości nagrzewania prowadzi do nieznacznego podwyższenia temperatury wydzielania  $T_m$  cząstek faz  $\beta''$ ,  $\beta'$ ,  $Q'$ ,  $\theta'$  i  $\beta$ . Energia aktywacji procesu wydzielania faz umacniających w stopach aluminium grupy 6xxx zależy od zawartości głównych pierwiastków stopowych [64].

Na rys. 24 przedstawiono przykłady stopów aluminium serii 6xxx o różnych zawartościach Mg i Si oraz odpowiadające im granice plastyczności po obróbce cieplej T6 (przesycanie + starzenie) [65].



Rys. 24. Zawartość Mg i Si w składzie chemicznym popularnych stopów aluminium serii 6xxx oraz odpowiadające im wartości granicy plastyczności po obróbce cieplej T6 [65]

### 3.2. Skład chemiczny, struktura i właściwości stopu aluminium EN AW-6082

W przemyśle coraz częściej wykorzystywany jest stop aluminium przerabiany plastycznie EN AW-6082 (AlSi1MgMn). Stop ten jest stopem o średniej wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 300 MPa i cechuje się dobrą odpornością na korozję. Posiada największą wytrzymałość na rozciąganie spośród wszystkich stopów serii 6xxx (rys. 24), co powoduje, że zastępuje on stop EN AW-6061 w wielu aplikacjach.

W tablicy 5 przedstawiono skład chemiczny stopu aluminium EN AW-6082 wg normy PN-EN 573-3:2019-12 [66].

Tablica 5. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-6082 [66]

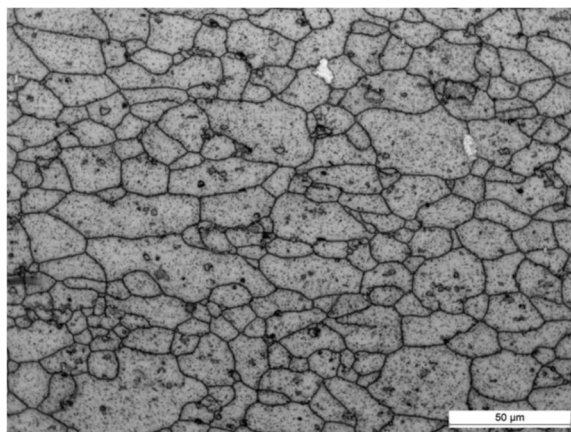
| Oznaczenie          | Skład chemiczny, [%] |      |         |         |      |      |       |      |        |
|---------------------|----------------------|------|---------|---------|------|------|-------|------|--------|
|                     | Si                   | Cu   | Mg      | Mn      | Fe   | Ti   | Cr    | Zn   | Al     |
| EN AW-6082<br>(PA4) | 0,7-1,3              | ≤0,1 | 0,6-1,2 | 0,4-1,0 | ≤0,5 | ≤0,1 | ≤0,25 | ≤0,2 | reszta |

Spośród dodatków stopowych największą rolę, w stopach aluminium EN AW-6082, odgrywa Mg i Si, jednakże pozostałe składniki również wpływają na jego finalne właściwości. W tablicy 6 przedstawiono ogólny wpływ pierwiastków stopowych na właściwości stopu aluminium EN AW-6082.

Tablica 6. Wpływ pierwiastków stopowych na właściwości stopu aluminium EN AW-6082 [67]

| Składnik stopowy | Wpływ na właściwości stopu                                                                                    |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mg               | Zwiększenie wytrzymałości i twardości stopu. Zwiększenie odporności na korozję oraz poprawa warunków spawania |
| Si               | Poprawa warunków obróbki cieplnej po połączeniu z Mg. Zwiększenie odporności na korozję.                      |
| Mn               | Wyhamowanie rekrytalizacji. Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie oraz odporność na korozję.               |
| Zn               | Zwiększenie wytrzymałości i twardości. Poprawa warunków obróbki cieplnej w połączeniu z Mg.                   |
| Fe               | Zanieczyszczenie                                                                                              |
| Cr               | Wyhamowanie rekrytalizacji.                                                                                   |
| Cu               | Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i twardości. Zmniejszenie odporność na korozję.                      |

Struktura stopu aluminium EN AW-6082 po obróbce cieplnej składa się z ziaren roztworu stałego o średnicy ok 20÷40 μm z drobnymi wydzieleniami faz międzymetalicznych (rys. 25) [68].

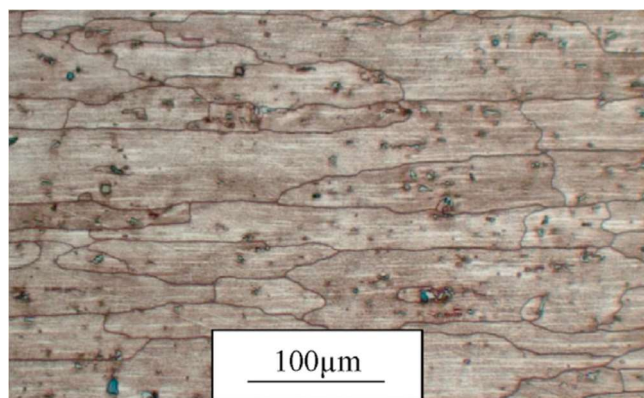


Rys. 25. Struktura materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082: Twardość HV<sub>0,1</sub>=115. Wytrzymałość na rozciąganie =323 MPa. Granica plastyczności =257 MPa. Wydłużenie =6,3% [68]

Jak wskazują badacze Shennawy, Abdel-Aziz i inni w publikacji [69], struktura materiału rodzimego to drobne dendryty aluminium roztworu stałego. Autorzy wskazują, że istnieje kilka różnych metod obróbki cieplnej stopu aluminium EN AW-6082, które znacząco poprawiają wybrane właściwości mechaniczne stopu. Jedną z najczęściej stosowanych jest obróbka cieplna T6 obejmująca przesycanie, a następnie sztuczne starzenie w celu zwiększenia wytrzymałości stopu. Obróbkę cieplną w roztworze przeprowadza się najpierw w temperaturze 500°C w celu uzyskania przesyconego roztworu stałego  $\alpha$ . Sztuczne starzenie uzyskuje się przez ogrzewanie do około 200°C w różnych okresach czasu i prowadzi się aż do wydzielania się różnych faz (prowadząc do stabilnej fazy  $\beta$ ). Autorzy wskazują, że o twardości i wytrzymałości materiału decyduje rodzaj i gęstość powstających faz umacniających [50].

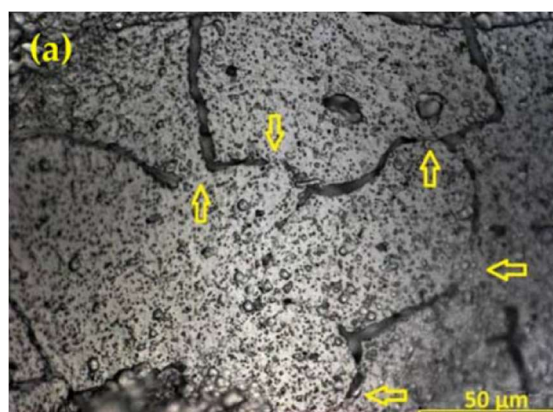
Badania struktury stopu aluminium EN AW-6082 przeprowadzili także badacze Msomi V. oraz Mabuwa S. [70]. W swojej publikacji wskazali oni, że struktura materiału rodzimego badanego stopu to wydłużone ziarna o średniej średnicy ok. 65,1  $\mu\text{m}$  (rys. 26). Potwierdzili, że istnieje kilka metod obróbki cieplnej badanego stopu aluminium, które znacząco zmniejszają wielkość ziarna i korzystnie wpływają przede wszystkim na właściwości mechaniczne stopu.





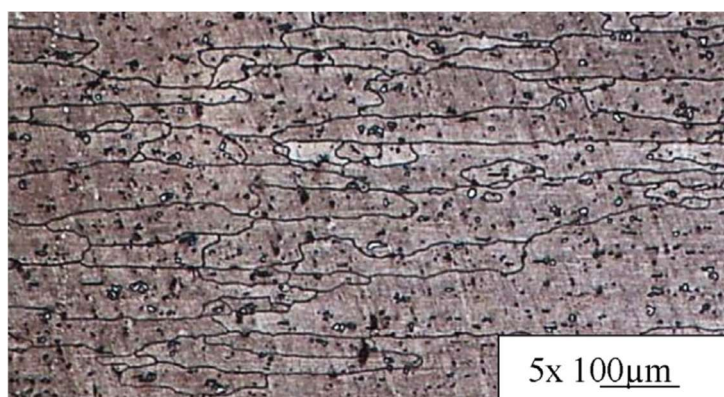
Rys. 26. Struktura materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 [70]

W publikacji [71] autorzy Tamadon A., Pons D.J. i inni wskazali, że stop aluminium EN AW-6082 po obróbce cieplnej T6 wykazuje wydłużony kształt ziaren o średniej średnicy ok. 100 μm (rys. 27). Wykazali, że zjawisko rozrostu ziaren podczas obróbki cieplnej T6 może zmieniać kształt i położenie granic ziaren (bez konieczności przyłożenia naprężenia ścinającego). Można to zaobserwować jako pojawiające się „nieciągłe linie” lub „rozłączenia” po granicach ziaren. Autorzy wskazali, że takie ułożenie ziaren w kierunku walcowania może wpływać na znaczne zmniejszenie ich wielkości podczas prowadzenia np. procesu zgrzewania FSW. Efekt zmniejszenia wielkości ziarna przynosi wymierne korzyści ze stosowania tej metody do zgrzewania stopu aluminium EN AW-6082 oraz do zmiany struktury materiału.



Rys. 27. Struktura materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 wraz z określeniem ruchu płaszczyzn po granicach ziaren [71]

Muribwathoho O. i inni [72] prowadząc badania nad wpływem m.in. technologii modyfikacji struktury materiału FSP (z ang. Friction Stir Processing) na strukturę stopu aluminium EN AW-6082 wskazali na podobną wielkość ziarna materiału rodzimego na poziomie ok. 125 μm (rys. 28) w stosunku do wcześniej przedstawionych wyników badań.



Rys. 28. Struktura materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 o średniej średnicy ziarna ok. 125  $\mu\text{m}$  [72]

W tablicy 7 przedstawiono wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne stopu.

Tablica 7. Wybrane właściwości stopu aluminium EN AW-6082 [66]

|                                        |                    |       |
|----------------------------------------|--------------------|-------|
| Gęstość:                               | $\text{g/cm}^3$    | 2,71  |
| Moduł sprężystości E:                  | MPa                | 70000 |
| Temperatura krzepnięcia:               | $^{\circ}\text{C}$ | 575   |
| Temperatura płynięcia:                 | $^{\circ}\text{C}$ | 650   |
| Ciepło właściwe:                       | $\text{J/kgK}$     | 894   |
| Współczynnik rozszerzalności cieplnej: | $\mu\text{m/mK}$   | 23,1  |
| Opór właściwy:                         | $\text{nWm}$       | 37    |
| Przewodność cieplna:                   | $\text{W/mK}$      | 185   |
| Przewodność elektryczna:               | %IACS              | 47    |
| Umowna granica plastyczności           | $R_{p0,2}$ , MPa   | 255   |
| Wytrzymałość na rozciąganie            | $R_m$ , MPa        | 300   |
| Wydłużenie                             | $A_{50}$ , %       | 9     |
| Twardość                               | HB                 | 94    |

### 3.3. Zastosowanie stopu aluminium EN AW-6082

Dobre właściwości zapewniają stopom aluminium EN AW-6082 szerokie stosowanie w wielu gałęziach przemysłu motoryzacyjnego, kolejowego oraz lotniczego [59, 60, 61, 62]. Jednak jak podkreślają Zhouli X., Huijuan W. i inni [73], w ostatnich latach przy coraz bardziej rygorystycznych przepisach dotyczących zużycia energii i redukcji emisji zanieczyszczeń proces produkcji stopów aluminium w dalszym ciągu jest zbyt skomplikowany. W związku z powyższym nadal prowadzi się badania nad minimalizowaniem czasu wytwarzania stopów oraz zapewnienia przy tym coraz lepszych właściwości mechanicznych stopu.

Stop aluminium EN AW-6082 wykorzystywany jest przy wykonywaniu konstrukcji gdzie wymagania wytrzymałościowe są wyższe niż dla stopów serii 5000. Ze względu na swoje właściwości i pomimo ograniczeń spawalności stop aluminium EN AW-6082 może być stosowany w każdym rodzaju konstrukcji. Stosowany jest na elementy nośne w przemyśle motoryzacyjnym m.in. w budowie ciężarówek, autobusów [74]. Wykorzystywany jest w budowie wagonów kolejowych na elementy poszycia, dachów, układów hydraulicznych, elementów zbiorników [74, 75]. Przykładem konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 są panele ściennie i podłogowe w pociągu ekspresowym Harmony CRH3 w Chinach (rys. 29) [76]. Wykonuje się z niego elementy zbiorników, masztów, belek, nadbudówek, przybudówek do budowy statków i łodzi (rys. 30). [19, 76, 77]. Stop aluminium EN AW-6082 z powodzeniem może być także stosowany do budowy różnego rodzaju zbiorników do magazynowania wodoru (rys. 31), a także do wykonywania obudów silników elektrycznych w samochodach osobowych czy autobusach [78]. Stop jest także wykorzystywany na poszycia największego na świecie samolotu osobowego Airbus A380 m.in. do budowy paneli dolnego kadłuba, a także do grodzi ciśnieniowej umieszczonej pod kokpitem w przedniej części samolotu (rys. 32).



Rys. 29. Pociąg ekspresowy Harmony CRH3 w Chinach zbudowany z paneli ściennych i podłogowych ze stopu aluminium EN AW-6082 [76]

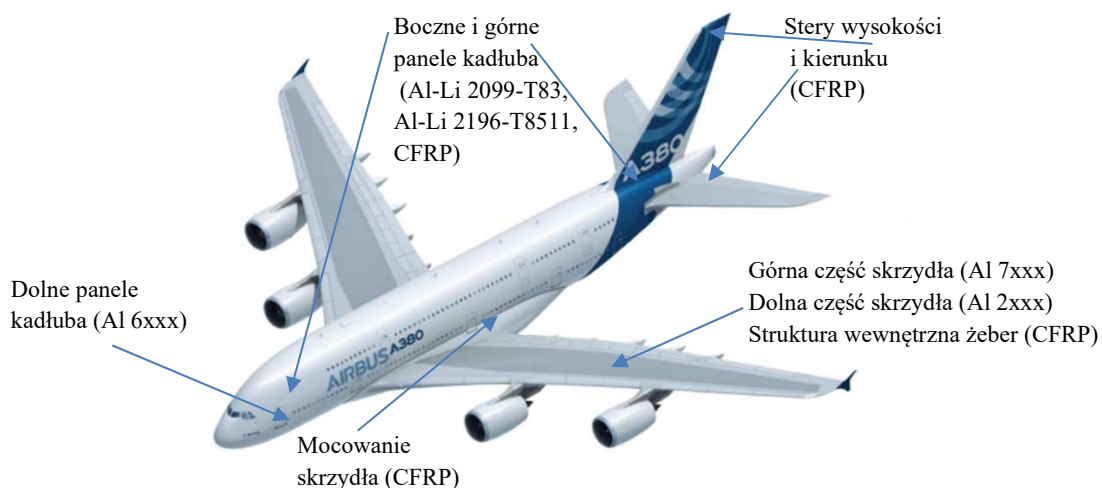


Rys. 30. Jacht Smeralda zbudowany ze m.in. ze stopu aluminium EN AW-6082 przez australijską firmę SilverYachts [79]



Rys. 31. Przykład zbiornika ze stopu aluminium EN AW-6082 z zintegrowanym wymiennikiem ciepła [78]





Rys. 32. Samolot pasażerski Airbus A380, w którym panele dolnego kadłuba wykonano m.in. ze stopu aluminium EN AW-6082 [80]

Stop aluminium EN AW-6082 jest stopem spawalnym konwencjonalnymi metodami spawania łukowego. Złącza spawane cechują się obniżoną wytrzymałością w stosunku do materiału rodzimego do nawet 50% [69].

#### 4. Zgrzewalność stopu aluminium EN AW-6082

Istnieje kilka technologii spawalniczych, umożliwiających łączenie blach lub płyt ze stopu aluminium przerabianego plastycznie EN-AW-6082. Niestety nie wszystkie z nich pozwalają na wykonanie złączy o zakładanych właściwościach użytkowych m.in. o dobrej plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie czy odporności na korozję.

##### 4.1. Technologie zgrzewania stopu aluminium przerabianego plastycznie

Wśród technologii zgrzewania, jedną z najstarszych i jednocześnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych (w szczególności w przemyśle motoryzacyjnym) jest technologia zgrzewania rezystancyjnego punktowego RW (z ang. Resistance Welding). Od lat 30. XX wieku jest ona ciągle wykorzystywana przez producentów samochodów. Technologia zgrzewania rezystancyjnego jest prostym w przeprowadzeniu i energooszczędnym procesem. Składa się z trzech etapów. W pierwszym kroku następuje docisk elementów (blach) łączonych z użyciem odpowiednio ukształtowanych elektrod (najczęściej ze stopów miedzi) o wysokiej przewodności elektrycznej i cieplnej. Po ustabilizowaniu się siły docisku wywieranej z użyciem serwomechanicznego lub pneumatycznego układu docisku następuje włączenie prądu

zgrzewania. W wyniku przepływu prądu na rezystancjach łączonych blach, a w szczególności w styku pomiędzy łączonymi blachami, generowane jest ciepło zgodnie z prawem Joule’a – Lenza:

$$Q=RI^2t \quad (2)$$

gdzie: Q – ilość wydzielonego ciepła, I – natężenie prądu elektrycznego, R – opór elektryczny przewodnika, t – czas przepływu prądu.

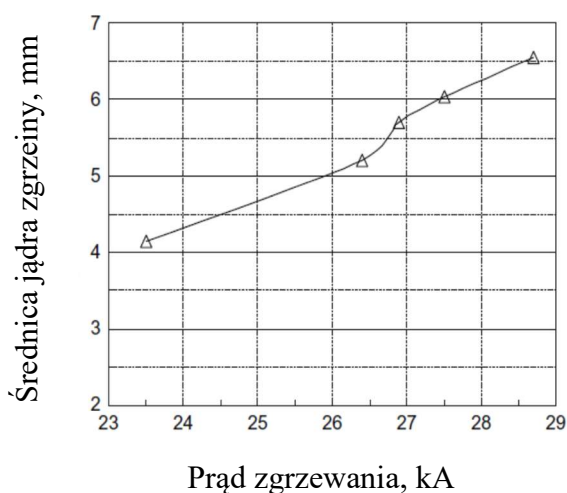
Wraz z upływem czasu zgrzewania, który najczęściej wyrażony jest w ms, rzadziej w okresach (1 okres = 20 ms), następuje nagrzewanie łączonych mas metali, aż do uzyskania stopionego jądra zgrzeiny o założonych wymiarach (średnicy). Po ustaniu przepływu prądu zgrzewania następuje etap chłodzenia złącza pod dociskiem elektrod, które odprowadzają ciepło. W trakcie studzenia następuje krystalizacja jądra zgrzeiny, a po jego całkowitej krystalizacji następuje odciążenie elektrod [9, 81].

W większości przypadków metoda służy do łączenia materiałów ze stali. Z uwagi jednak na ciągle dążenie do obniżania masy konstrukcji (im mniejsza masa, tym mniejsze zużycie energii i emisja CO<sub>2</sub>) zaczęto się także interesować zgrzewaniem RW stopów aluminium. Zgrzewanie RW aluminium jest jednak dużym wyzwaniem. Pod względem właściwości różni się ono znacznie od zgrzewania stali. O ile stal topi się w temperaturze ok. 1500°C, to warstwa utleniona Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, która powleka aluminium, dopiero przy 2000°C. Natomiast samo aluminium topi się już w około 670°C. To spowodowało, że przeprowadzono jedynie tylko kilka badań możliwości zgrzewania stopów aluminium EN AW-6082 [9, 81].

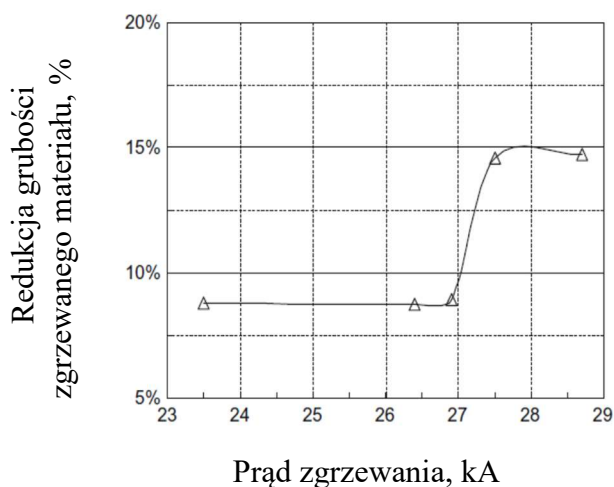
Pierwsze próby zgrzewania przeprowadzili autorzy Muhayat N., Putra B. Triyono B. [81]. Autorzy przedstawili mikrostrukturę zgrzein oraz wyniki pomiarów twardości, statycznej próby rozciągania oraz próby wyluskania zgrzein. Sprawdzone także wpływ natężenia prądu zgrzewania na wielkość jądra zgrzeiny, jednorodność struktury oraz właściwości wytrzymałościowe. W ramach badań autorzy przeprowadzili próby zgrzewania blach ze stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082 o grubości 1 mm z zastosowaniem różnych wartości parametrów procesu zgrzewania rezystancyjnego.

Autorzy publikacji [81] wykazali, że istnieje ścisły związek pomiędzy średnicą jądra zgrzeiny RW, a prądem zgrzewania i czasem przepływu prądu. Wpływ tych parametrów na wielkość jądra zgrzeiny przedstawiono na rys. 33a. Widok przykładowej mikrostruktury zgrzeiny RW przedstawiono na rys. 34. Wykazano, że średnica jądra zgrzeiny zwiększa się do pewnej maksymalnej wartości. Można to powiązać z większą ilością ciepła i przebiega analogicznie jak przy zgrzewaniu materiałów ze stali [81]. Autorzy wspomnieli także

o pewnym maksymalnym progu prądu zgrzewania, powyżej którego średnica jądra zgrzeiny zaczyna się zmniejszać wskutek powstawania wyprysku ciekłego metalu. Uzyskane w publikacji wyniki badań pozwoliły określić, że próg ten przy zgrzewaniu blach ze stopu aluminium EN AW-6082 nie został osiągnięty. Mimo iż podczas zgrzewania obserwowano wypryski ciekłego metalu nie doszło do zmniejszenia średnicy jądra zgrzeiny dla żadnej z badanych zgrzein RW. Można wpłynąć na ilość wyprysków poprzez zwiększenie siły docisku elektrod. Powoduje to jednak zwiększenie odcisku od elektrod (wskutek ich docisku do zgrzewanych materiałów), co z kolei zmienia wymiary złącza.

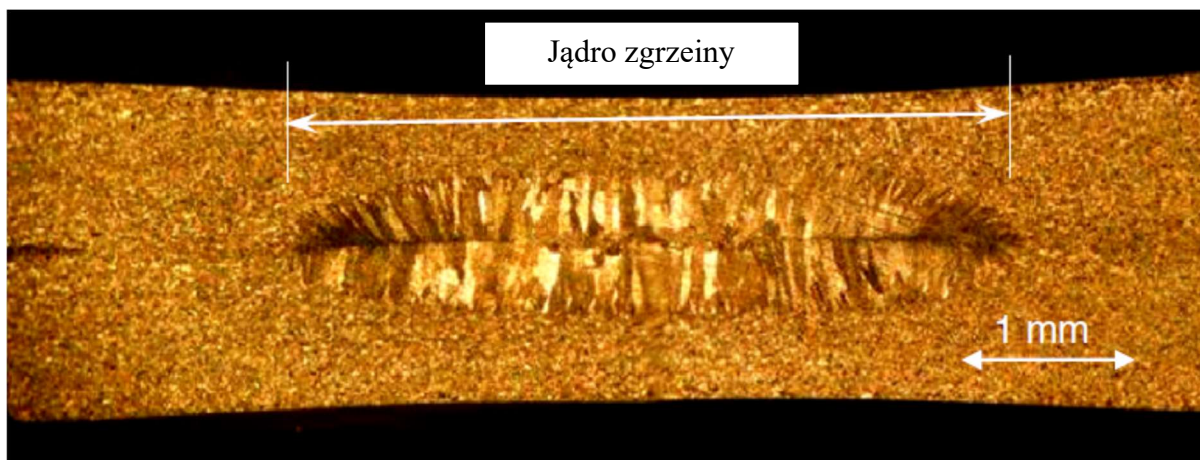


a)



b)

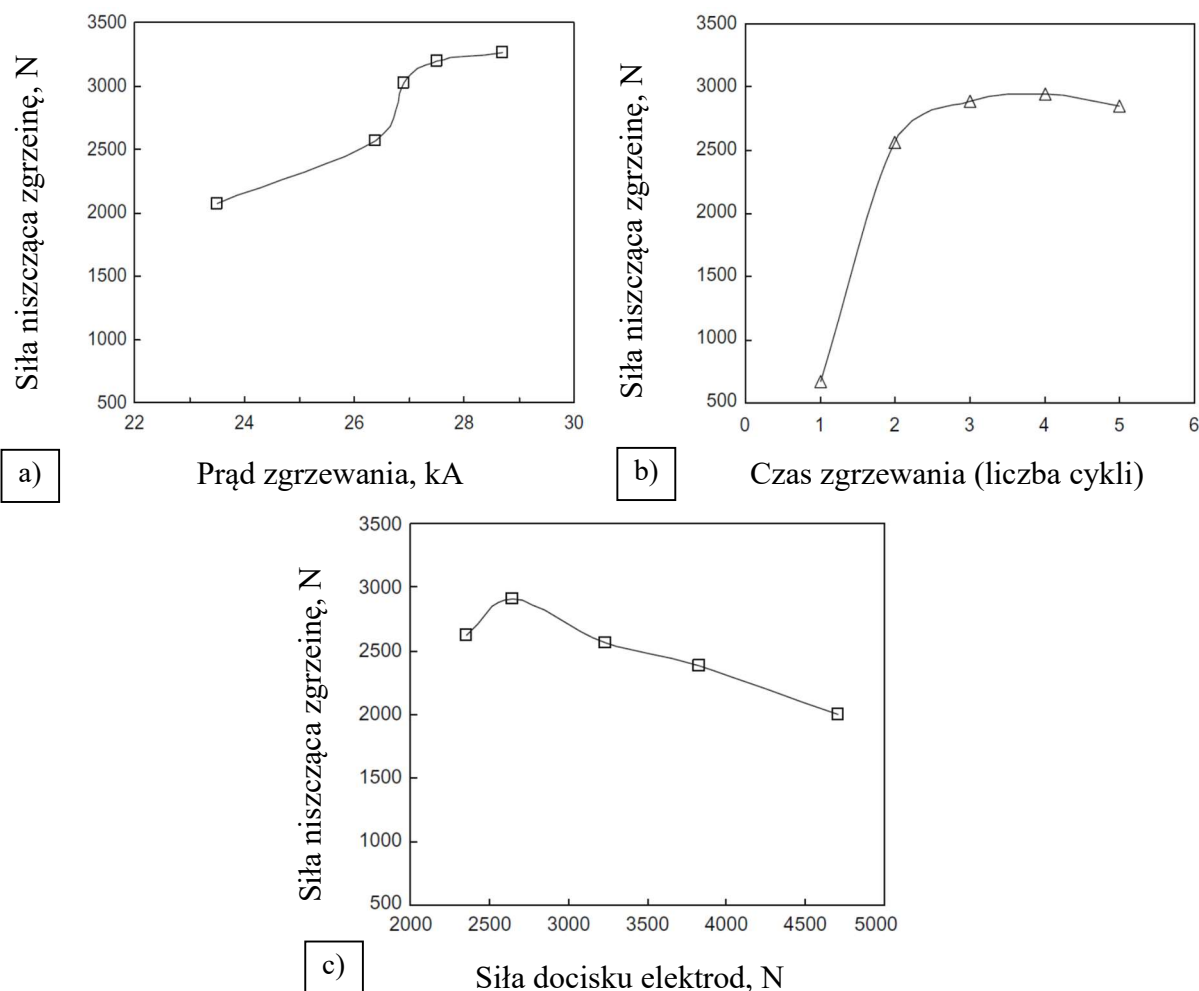
Rys. 33. Wpływ prądu zgrzewania na: a) średnicę jądra zgrzeiny; b) redukcję grubości zgrzewanych materiałów wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6082. Liczba cykli zgrzewania 2, siła docisku elektrod 3237 N [81]



Rys. 34. Mikrostruktura zgrzeiny RW ze stopu aluminium EN AW-6082. Liczba cykli zgrzewania 2, siła docisku elektrod 3237 N, prąd zgrzewania 23,5 kA [81]



Stwierdzono, że zwiększenie prądu i czasu zgrzewania spowodowało zwiększenie średnicy jądra zgrzeiny i powstanie gruboziarnistej struktury zgrzeiny. Towarzyszył temu spadek twardości w centralnym obszarze zgrzeiny. Na rys. 35 przedstawiono zależność sił niszczących zgrzeinę w zależności od prądu zgrzewania, czasu zgrzewania oraz siły niszczącej zgrzeinę w statycznej próbie rozciągania.

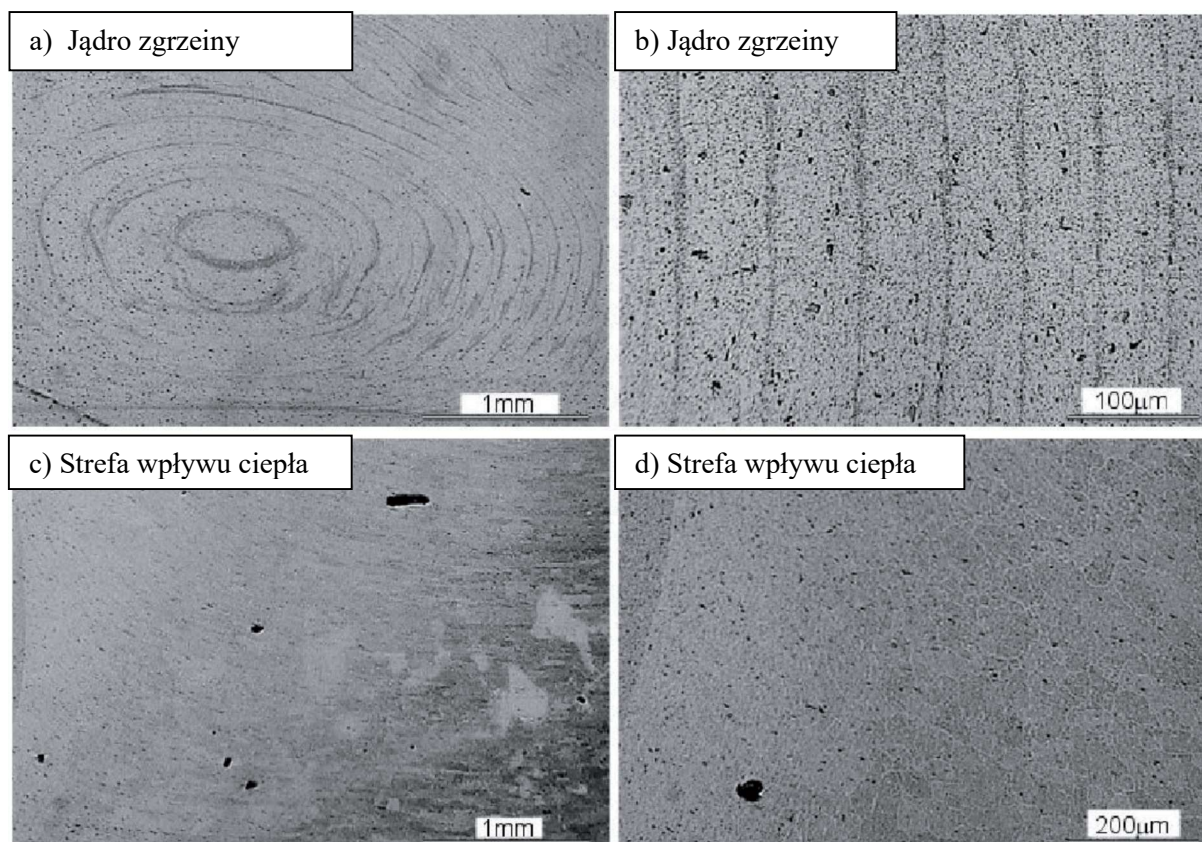


Rys. 35. Wpływ prądu zgrzewania (a), czasu zgrzewania (b) oraz siły docisku elektrod (c) na siłę niszczącą zgrzeinę w próbie ścinania [81]

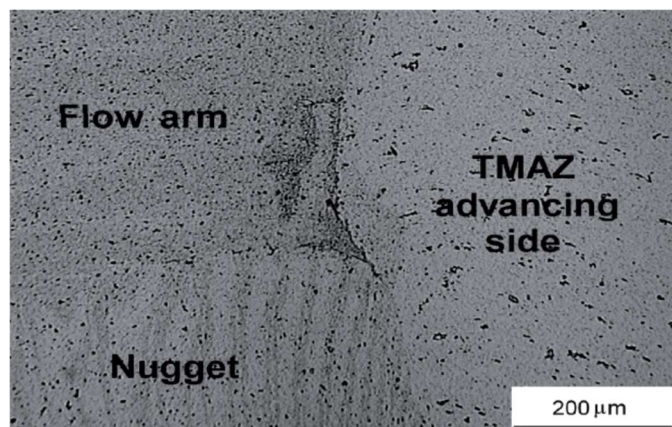
#### 4.2. Zgrzewanie metodą FSW stopu aluminium przerabianego plastycznie

Zastosowanie metody zgrzewania FSW do zgrzewania stopów aluminium EN AW-6082 umożliwia wykonywanie wysokiej jakości złączy. Badania nad tą technologią prowadzili m.in. autorzy Adamowski i Szkodo [15]. Do zgrzewania wykorzystywali oni różne zestawienia prędkości obrotowej narzędzia  $V_o$  w zakresie 330÷1700 obr/min oraz prędkości zgrzewania  $V_z$  w zakresie 115÷585 obr/min. Mikrostrukturę poszczególnych stref złącza FSW

przedstawiono na rys. 36. Autorzy wskazali na obecność występowania w materiale rodzimym wydłużonych ziaren. W jądrze zgrzeiny ziarna te były równoosiowe o średniej średnicy  $1\div 5\text{ }\mu\text{m}$ . Rozdrobienie ziaren w tej strefie zgrzeiny jest wynikiem dynamicznej rekrytalizacji tj. połączeniem wysokiej prędkości odkształcania oraz podwyższonej temperatury [9, 15]. Taka zrekrystalizowana struktura charakteryzuje się bardzo niskim poziomem naprężeń szczątkowych, a powstałe złącze cechuje doskonała ciągliwość i bardzo dobre właściwości mechaniczne – znacznie lepsze niż w strefie wpływu ciepła. W jądrze zgrzeiny dostrzeżono obecność tzw. „pierścieni cebuli” będących wynikiem złożonego mechanizmu ruchu obrotowego narzędzia, wzdłużnego materiału oraz pionowego ruchu mas uplastycznianego materiału zgrzewanego. Struktura strefy wpływu ciepła jest zbliżona do struktury materiału rodzimego. Na granicy jądra zgrzeiny oraz strefy odkształconej termomechanicznie po stronie natarcia (SOT), stwierdzono występowanie niezgodności w postaci pustki tunelowej (rys. 37). Autorzy wskazują, że występowanie tego rodzaju niezgodności jest związane ze zgrzewaniem ze zbyt wysoką prędkością obrotową narzędzia w zestawieniu ze zbyt niską siłą docisku zgrzewania. W takim przypadku zgrzewane materiały nie mogą być prawidłowo wymieszane, a „pustka tunelowa” występuje najczęściej na całej długości zgrzeiny [15].



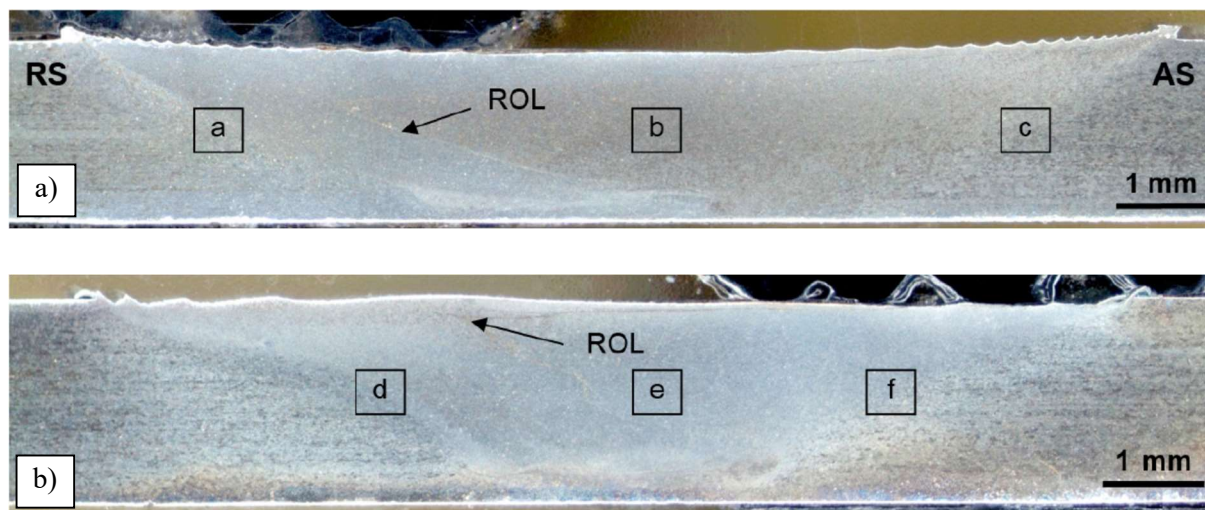
Rys. 36. Mikrostruktura złącza FSW w różnych strefach oraz przy różnych powiększeniach [15]



Rys. 37. Początkowy etap tworzenia niezgodności w postaci pustki tunelowej [15]

Adamowski i Szkodo [15] wykazali ponadto, że wytrzymałość na rozciąganie powstałych złączy jest proporcjonalna do prędkości zgrzewania oraz, że spadek twardości w strefie wpływu ciepła jest większy po stronie natarcia. Określili także, że odporność mechaniczna złączy próbnych wzrasta wraz ze zwiększaniem prędkości zgrzewania przy niezmienniej prędkości obrotowej narzędzia. Obserwowali także uplastycznienie i zmiękczenie materiału w centralnym obszarze zgrzeiny oraz w strefie wpływu ciepła zarówno po stronie natarcia jak i po stronie spływu. Stwierdzili, że wraz ze zwiększaniem prędkości zgrzewania obserwuje się wzrost wytrzymałości złączy na rozciąganie [15].

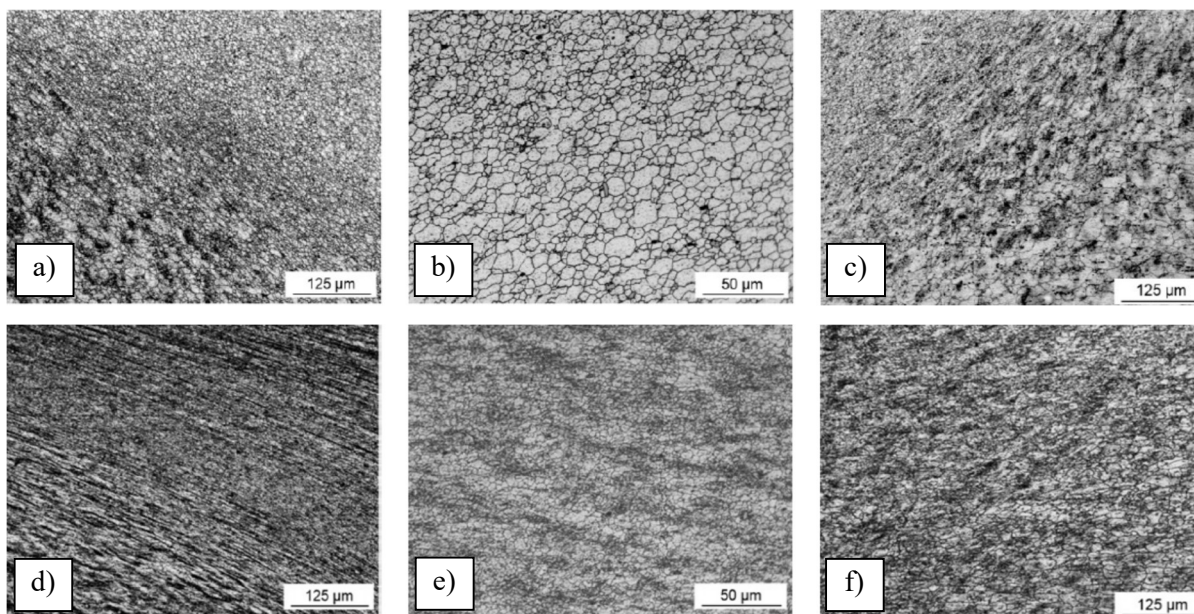
Badania nad technologią zgrzewania FSW płyt ze stopu aluminium EN AW-6082 prowadzili także autorzy Naumov, Morozova i inni [82]. Celem ich pracy było zbadanie wpływu wysokiej prędkości zgrzewania na strukturę złącza oraz jego właściwości mechaniczne. W ramach badań prowadzono badania nad zgrzewaniem doczołowym blach o grubościach 2,0 mm zarówno przy zgrzewaniu z małymi (200 mm/min) jak i dużymi (2500 mm/min) prędkościami zgrzewania. Autorzy wykazali m.in., że wraz ze zwiększaniem prędkości zgrzewania zmniejsza się wielkość ziarna. Zawężeniu ulegała także strefa odkształcania mas łączonych materiałów. Badania wykazały także, że wraz ze zwiększaniem prędkości zgrzewania wzrasta wytrzymałość złączy na rozciąganie, a zmniejsza się wydłużenie. Nie miało to jednak wpływu na granicę plastyczności złącza. Na rys. 38 przedstawiono typowe makrostruktury przekroju poprzecznego badanego złącza FSW.



Rys. 38. Makrostruktury złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania: a) prędkość obrotowa narzędzia  $V_o=200$  obr/min, prędkość zgrzewania  $V_z=710$  mm/min; b) prędkość obrotowa narzędzia  $V_o=2500$  obr/min, prędkość zgrzewania  $V_z=2100$  mm/min [82]

Makrostruktura złączy FSW pozwoliła badaczom [82] na ujawnienie różnic w strukturze zgrzeiny w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Wraz ze zmianą prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania wyraźna jest różnica w budowie zgrzeiny, w tym w rozmiarze i kształcie poszczególnych stref złącza takich jak strefa odkształcona termomechanicznie, jądro zgrzeiny czy strefa wpływu ciepła. Dodatkowo, przy małej prędkości zgrzewania ( $V_z=200$  mm/min) wyraźnie widoczna jest pozostająca linia tlenków (ROL) np.  $Al_2O_3$  (rys. 38a). Przy wyższej prędkości zgrzewania linia ta zmienia kształt na „zygnakowaty” i jest przesunięta w stronę jądra zgrzeiny (rys. 38b). Autorzy przeprowadzili także badania mikrostrukturalne wykonanych złączy FSW. Pozwoliły one m.in. na określenie wielkości ziarna w badanych obszarach. Wyniki badań mikrostruktury złączy w oznaczonych punktach przedstawiono na rys. 39.





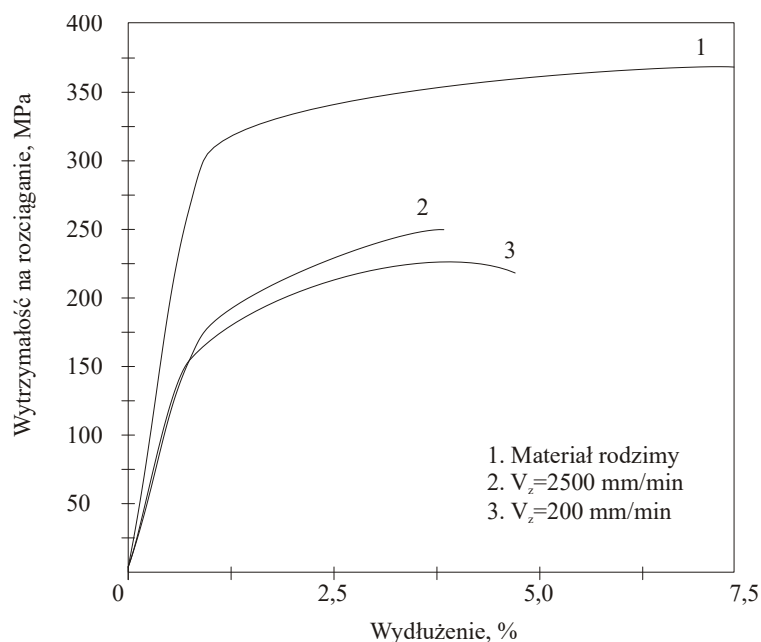
Rys. 39. Mikrostruktura wybranych obszarów złączy FSW (z rys. 38) zgrzewanych z niską prędkością zgrzewania  $V_z=200$  mm/min: a) strefa odkształcona termomechanicznie po stronie spływu, b) strefa jądra zgrzeiny, c) strefa odkształcona termomechanicznie po stronie natarcia; oraz zgrzewanych z wysoką prędkością zgrzewania  $V_z=2500$  mm/min, strefa odkształcona termomechanicznie po stronie spływu, e) jądro zgrzeiny, f) strefa odkształcona termomechanicznie po stronie natarcia [82]

Wyniki badań mikrostruktury zgrzein w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania ujawniły znaczące różnice w strefach odkształconych termomechanicznie oraz w jądrach zgrzein. Przykładowo przy zgrzewaniu z wysokimi prędkościami zgrzewania, w jądrze zgrzeiny po stronie spływu widoczne jest znaczne zdeformowanie ziarna oraz jego odkształcenie. W efekcie tego, granica pomiędzy strefą jądra zgrzeiny, a strefą wpływu ciepła jest bardzo wyraźna. Materiał gwałtownie zmienia swoją strukturę na granicy tych stref (rys. 39d) [82].

Mikrostruktura strefy jądra zgrzeiny badanych złączy miała postać bardzo drobnych, równoosiowych ziaren. Ich kształt wynikał z procesu rekrytalizacji. Zaobserwowano różnice w wielkości i rozkładzie ziaren w strukturze badanych złączy w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Średnica ziarna przy niskiej prędkości zgrzewania  $V_z=200$  mm/min (rys. 39b) oscylowała w przedziale  $1\div 16$   $\mu\text{m}$ . Średnia średnica ziarna wynosiła natomiast 6,1  $\mu\text{m}$ . Przy dużej prędkości zgrzewania  $V_z=200$  mm/min (rys. 39e) średnia średnica ziarna jest prawie dwukrotnie mniejsza i wynosi ok. 3,8  $\mu\text{m}$ . Wskazuje to na znacznie większe rozdrabnianie ziarna (w tym znaczący udział oddziaływania narzędzia FSW) przy zgrzewaniu

z wyższymi prędkościami zgrzewania ( $V_z=2500$  mm/min). Struktura w strefie jądra zgrzeiny jest bardziej drobna i wykazuje jednorodny rozkład ziaren [82].

Badacze przeprowadzili także porównawcze badania wytrzymałości powstałych złączy na rozciąganie. Wyniki tych badań przedstawiono w formie wykresu na rys. 40 [82].



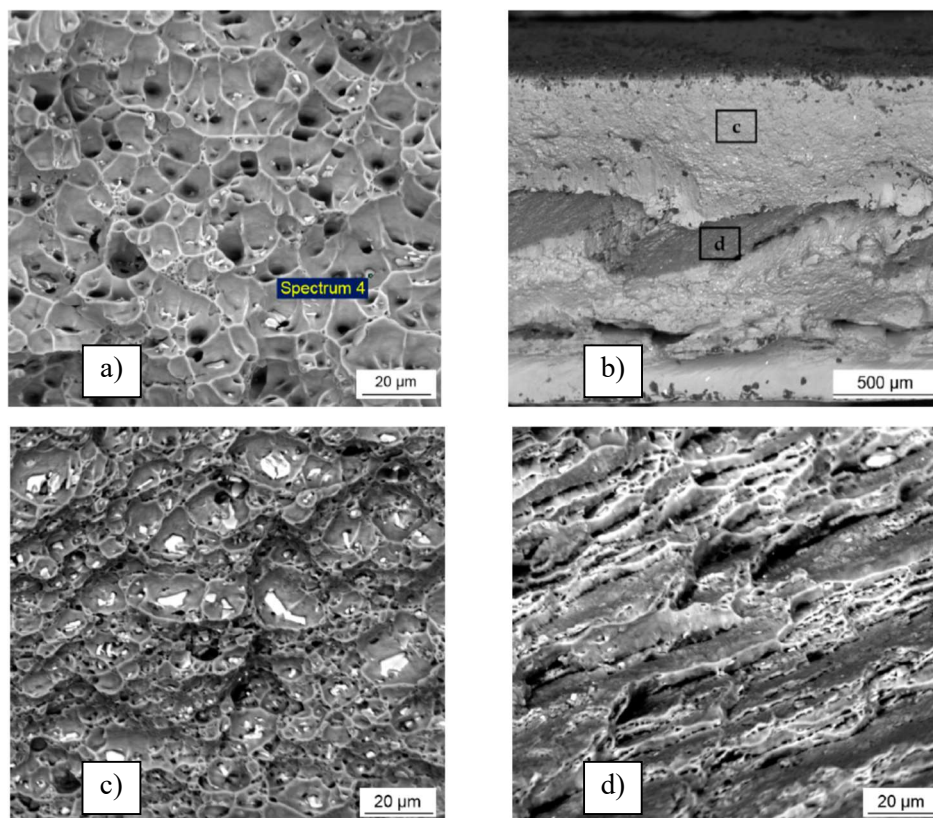
Przełom próbki nr 2



Przełom próbki nr 3

Rys. 40. Wytrzymałość na rozciąganie próbek ze stopu aluminium EN AW-6082 oraz odpowiadające im przełomy [82]

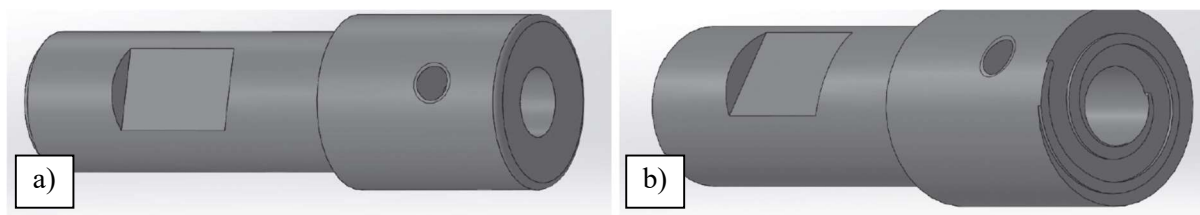
Przeprowadzone dodatkowe badania na skaningowym mikroskopie elektronowym pozwoliły określić, że powierzchnia pęknięcia próbki zgrzewanej z niższą prędkością zgrzewania była plastyczna i ciągliwa. Występowały obszary zarówno ciągliwe jak i kruche, nie spowodowało to jednak obniżenia właściwości wytrzymałościowych (rys. 41) [82].



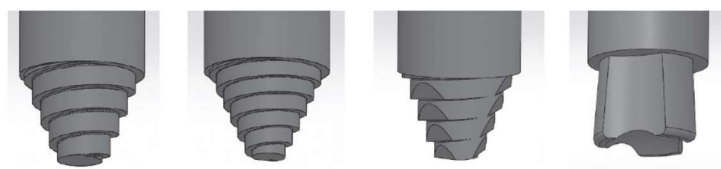
Rys. 41. Struktura SEM przełomu po próbie rozciągania: a) plastyczny charakter pęknięć z cząstkami międzymetalicznymi wewnątrz wgłębień, b) przekrój pęknięcia złącza, c) pęknięcie wewnątrz materiału, d) pęknięcie warstwowe [82]

Jak wskazują Mazurkiewicz i Bober [83] duży wpływ na jakość powstałych złączy FSW wywiera rodzaj narzędzia stosowanego do zgrzewania. W ramach badań autorzy zaprojektowali i wykonali modułowe narzędzia o różnej geometrii zarówno powierzchni wieńca opory jak i trzpienia narzędzia. Określali oni, wykonując złącza zakładkowe, jak zmienia się jakość złącza FSW od strony lica. Schematy przykładowych konstrukcji narzędzi stosowanych do badań w odniesieniu do powierzchni wieńca opory jak i trzpienia narzędzia przedstawiono odpowiednio na rys. 42 oraz rys. 43.





Rys. 42. Narzędzia FSW o różnej geometrii powierzchni wieńca opory: a) wklęsła, b) helisoidalna [83]

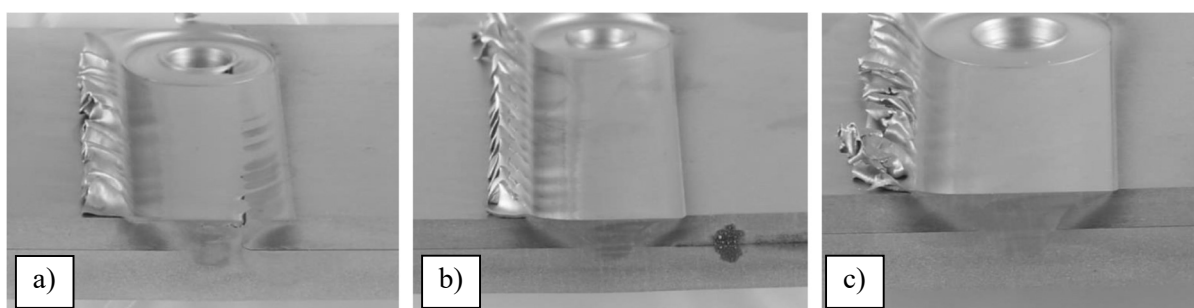


Rys. 43. Trzpienie narzędzia: a) helisoidalny 7 mm, b) helisoidalny 6 mm, c) helisoidalny ścięty, d) trójramienny [83]

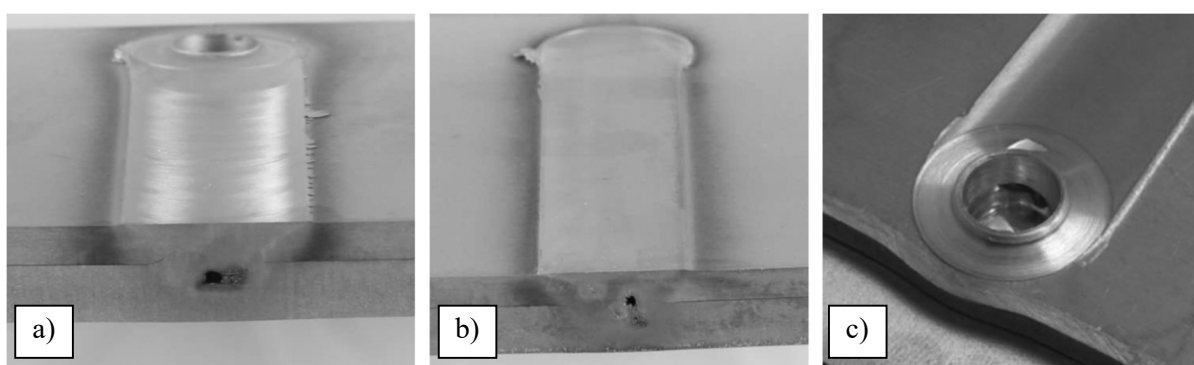
Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy publikacji [83] ocenili, że wybór poprawnej geometrii powierzchni wieńca opory istotnie wpływa na wygląd lica zgrzeiny. Zastosowanie wieńca opory z płaską powierzchnią tarcia prowadzi do otrzymania złączy zgrzewanych o znacznie wyższej estetyce (rys. 44a) niż przy zastosowaniu wieńca z powierzchnią w kształcie helisy (rys. 44b). Z kolei trzpienie o spiralnych nacięciach na geometrii nie zapewniają właściwego mieszania materiału w wyniku czego w centralnym obszarze zgrzeiny pojawiały się niezgodności w postaci pustek (rys. 45a). Ścięcie helisy z trzech stron poprawia jakość złącza (rys. 46b i c). Bardzo dobrą jakość lica zgrzeiny można otrzymać stosując trzpienie trójramienne. Jednakże we wnętrzu zgrzein występują niezgodności w postaci pustek i przyklejeń (rys. 46). Autorzy stwierdzili, że można poprawić jakość złączy FSW poprzez modyfikację trzpienia o kształcie helisoidalnym poprzez trójstronne ścięcie bocznej części trzpienia narzędzia. Poprawia to jakość lica zgrzeiny i sprawia, że powstałe zgrzeiny cechują się pełną ciągłością metaliczną [83].



Rys. 44. Widok powierzchni lica zgrzeiny wykonanej z zastosowaniem wieńca opory o kształcie powierzchni: a) wklęsłej, b) helisoidalnej [83]



Rys. 45. Przekrój poprzeczny złączy FSW wykonanych z zastosowaniem trzpienia: a) helisoidalnego o długości 6 mm, b) helisoidalnego ściętego trójstronnie o długości 6 mm, c) helisoidalnego ściętego trójstronnie o długości 7 mm. Widoczne niezgodności budowy wewnętrznej (a) oraz budowy zewnętrznej (b i c) [83]



Rys. 46. Widok złączy zgrzewanych metodą FSW wykonanych trzpieniem trójramiennym: a) złącze doczołowe na podkładce, b) złącze nakładkowe, c) obszar wyjścia narzędzia [83]

## 5. Podsumowanie

Technologie łączenia trwałego są podstawowymi metodami wytwarzania konstrukcji, poczynając od małych elementów wykorzystywanych np. w branży motoryzacyjnej aż po duże konstrukcje np. w budowie kadłubów statków czy wagonów kolejowych [74, 76, 77]. Przy doborze materiału na takie konstrukcje bierze się pod uwagę zarówno jego właściwości wytrzymałościowe, masę jak również odporność na korozję. W związku z tym coraz częściej, do budowy zaawansowanych konstrukcji, wykorzystuje się stopy aluminium, np. stopy serii 6xxx. Stopy aluminium serii 6xxx najczęściej łączone są metodami spawania łukowego. Do takich metod można zaliczyć np. spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazowej – TIG lub spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu – MIG. Złącza takie charakteryzują się jednak obniżoną wytrzymałością w stosunku do materiału rodzimego nawet o ok. 50% [1]. Stopy aluminium można także zgrzewać za pomocą technologii zgrzewania rezystancyjnego. Technologia ta ze względu na problemy z warstwą tlenków  $Al_2O_3$  na powierzchni nie znajduje szerokiego zastosowania do zgrzewania stopów aluminium [81].

Do łączenia konstrukcji ze stopów aluminium coraz częściej wykorzystywana jest technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny – FSW [5]. Metoda ta zapewnia wyższą wytrzymałość złączy w stosunku do złączy spawanych metodami klasycznymi (TIG, MIG). Metodą FSW w sposób powtarzalny, wykonuje się złącza, które są metalicznie ciągłe, szczelne i nie powodują odkształcenia konstrukcji. Autorzy publikacji [10, 52] wielokrotnie wskazują, że metoda zgrzewania FSW mogłaby z powodzeniem zastąpić szereg tradycyjnych technik łączenia zarówno stopów aluminium, magnezu czy stali. Jest to związane m.in. z bardzo dobrymi i powtarzalnymi właściwościami mechanicznymi złączy, bezpieczeństwem operatora, a także brakiem negatywnego wpływu na środowisko naturalne [5].

W metodzie zgrzewania FSW o jakości złączy decydują kształt i wymiary narzędzia do zgrzewania, kąt pochylenia narzędzia oraz dwa główne parametry technologiczne procesu tj. prędkość obrotowa narzędzia do zgrzewania oraz prędkość zgrzewania [28, 43]. Wpływają one na strukturę złączy, która zależy także od cyklu cieplnego i tym samym od stopnia uplastycznienia łączonych materiałów podczas zgrzewania. Poza tym na jakość złączy FSW wpływa również stopień nagrzania początkowego zgrzewanych blach [34, 44, 49]. Przeprowadzona analiza literatury nie rozwiązuje w pełni zagadnienia oceny wpływu parametrów zgrzewania FSW na jakość złączy. Brak jest pełnych informacji oraz wyników badań pozwalających na opracowanie wytycznych jakości złączy FSW.

Technologia FSW posiada także ograniczenia, które mogą prowadzić do powstawania niezgodności złączy. Niezgodności te dotyczą głównie budowy strukturalnej [20, 53, 54]. W większości przypadków powstają w obszarze grani oraz w obszarze styku odkształconych obszarów zgrzeiny tj. liniach styku strefy odkształconej termomechanicznie ze stroną natarcia oraz stroną spływu [33]. Do najczęściej występujących niezgodności można zaliczyć m.in. niezgodności w postaci pustek oraz pęcherzy, a także tzw. linię „brak zgrzania” w obszarze grani złącza [37, 56]. Niezgodności te są związane ze zbyt dużą lub niewystarczającą ilością ciepła w zgrzeinie oraz z nieprawidłowym mieszaniem łączonych materiałów. Potwierdzają to wyniki badań złączy różnych materiałów konstrukcyjnych zgrzewanych metodą FSW [53, 54]. Wpływ na powstawanie niezgodności mają także główne parametry zgrzewania FSW czyli prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania [20, 54]. Brak jest jednak danych literaturowych w pełni opisujących wpływ tych warunków zgrzewania (w tym wpływ kilku warunków jednocześnie) na jakość złączy FSW.

Jednym ze stopów aluminium serii 6xxx o dużym potencjale zastosowania na konstrukcje wysokowytrzymałe jest stop EN AW-6082. Stop ten (zawierający niewielką ilość magnezu i krzemu do 1%, a także dodatki Mn, Cu, Zn, Cr) charakteryzuje się największą wytrzymałością na rozciąganie z całej serii stopów serii 6xxx (rys. 24, tabl. 5) [65]. Jest on stosowany na odpowiedzialne konstrukcje w różnych gałęziach przemysłu np. do budowy elementów nośnych w samochodach ciężarowych lub na elementy poszycia, dachów w pojazdach szynowych [21, 74, 75].

Analiza stosowanych technologii spajania stopu aluminium EN AW-6082 wskazuje, że nie wszystkie z nich umożliwiają łączenia elementów odpowiedzialnych konstrukcji. Dotyczy to właściwości mechanicznych oraz założonych właściwości użytkowych połączenia, w tym wysokiej wytrzymałości złączy na rozciąganie oraz odporności na korozję [1, 14, 81]. Przeprowadzona analiza zagadnienia świadczy o dużym potencjale jaki niesie wykorzystanie technologii FSW do łączenia konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082. Zjawiska, związane z mieszaniem materiału w stanie stałym, występujące w złączu FSW wykonanym ze stopu aluminium EN AW-6082 nie są w pełni zbadane. Brak jest szczegółowych informacji dotyczących opisu tych zjawisk i ich kinetyki. Informacje technologiczne dotyczące wykonywania złączy ze stopów aluminium EN AW-6082 stanowią strzeżone „know-how” wytwórców elementów konstrukcji, a dostępne dane są bardzo ogólne [23, 24, 25]. Znajomość warunków zgrzewania FSW, w tym zjawisk towarzyszących powstawaniu złącza, umożliwi wytwarzanie bezpiecznych konstrukcji w sposób efektywny i powtarzalny oraz zapewni, że powstałe złącza będą pozbawione niezgodności.

Zaplanowane w ramach realizacji doktoratu zadania (w tym zadania wdrożeniowe) w stosunku do obecnego stanu wiedzy obejmują m.in.:

- opracowanie własnej metodyki badań struktury złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082,
- ocenę wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy,
- określenie założeń i wytycznych technologicznych wykonywania konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082,
- opracowanie technologii zgrzewania FSW wytypowanego złącza i jej weryfikacja z zastosowaniem metod obliczeniowych symulacji numerycznej oraz procedury kwalifikowania technologii zgrzewania wg normy PN-EN ISO 25239-4:2021-01 [106].

Technologią zgrzewania tarcowego FSW jest zainteresowanych w Polsce kilka firm zajmujących się wytwarzaniem różnych konstrukcji m.in. elementów poszycia pociągów czy samolotów ale także elementów jachtów i statków. Część z nich jest na etapie oceny kosztów potencjalnej inwestycji, inne są na etapie przeprowadzania prób zgrzewania w warunkach laboratoryjnych polskich jednostek badawczych. Brak jest jednak danych na temat zaleceń konstrukcyjnych dotyczących stosowania metody FSW w warunkach produkcyjnych oraz wytycznych technologicznych służących określeniu projektowych wartości wytrzymałości złączy w zależności od rodzaju zgrzewanego materiału lub różnych warunków zgrzewania. Współczesny przemysł wytwórczy oczekuje nie tylko wiedzy o jakości złączy FSW ale także poszukuje informacji o mikrostrukturze tych złączy, która na tę jakość bezpośrednio wpływa.

## 6. Teza, cel i zakres badań

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

O właściwościach złączy zgrzewanych tarciovo metodą FSW decydują zjawiska strukturalne podczas mieszania materiału w stanie stałym, co pozwala na otrzymanie złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 o wytrzymałości co najmniej 70% wytrzymałości materiału rodzimego i porównywalnej do materiału rodzimego odporności na korozję. Umożliwia to zastosowanie tych złączy w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz kolejowym.

Dla weryfikacji tezy pracy przyjęto następujące cele badań:

- cel metodyczny:
  - opracowanie metodyki oceny struktury i właściwości złączy FSW z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych umożliwiających opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o ich właściwościach.
- cele poznawcze:
  - określenie wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania na strukturę i właściwości mechaniczne złączy ze stopu aluminium EN AW-6082,
  - określenie czynników strukturalnych decydujących o odporności na korozję złącza.
- cel użytkowy:
  - opracowanie wytycznych technologicznych zgrzewania tarcioowego z mieszaniem materiału zgrzeiny FSW i kwalifikowanie technologii zgrzewania.

Zakres pracy obejmował analizę literaturową zagadnienia w której opisano technologię zgrzewania tarcioowego FSW oraz przeprowadzono charakterystykę stopu aluminium serii EN AW-6xxx, a w szczególności stopu EN AW-6082. Opisano problemy związane ze zgrzewaniem tego materiału. Pozwoliło to na sformułowanie tezy pracy oraz celu i zakresu.

Kolejnym etapem badań był dobór materiału do badań. Przeprowadzono charakterystykę stopu aluminium EN AW-6082 w tym wykonano badania strukturalne materiału, badania właściwości mechanicznych oraz badania właściwości użytkowych.

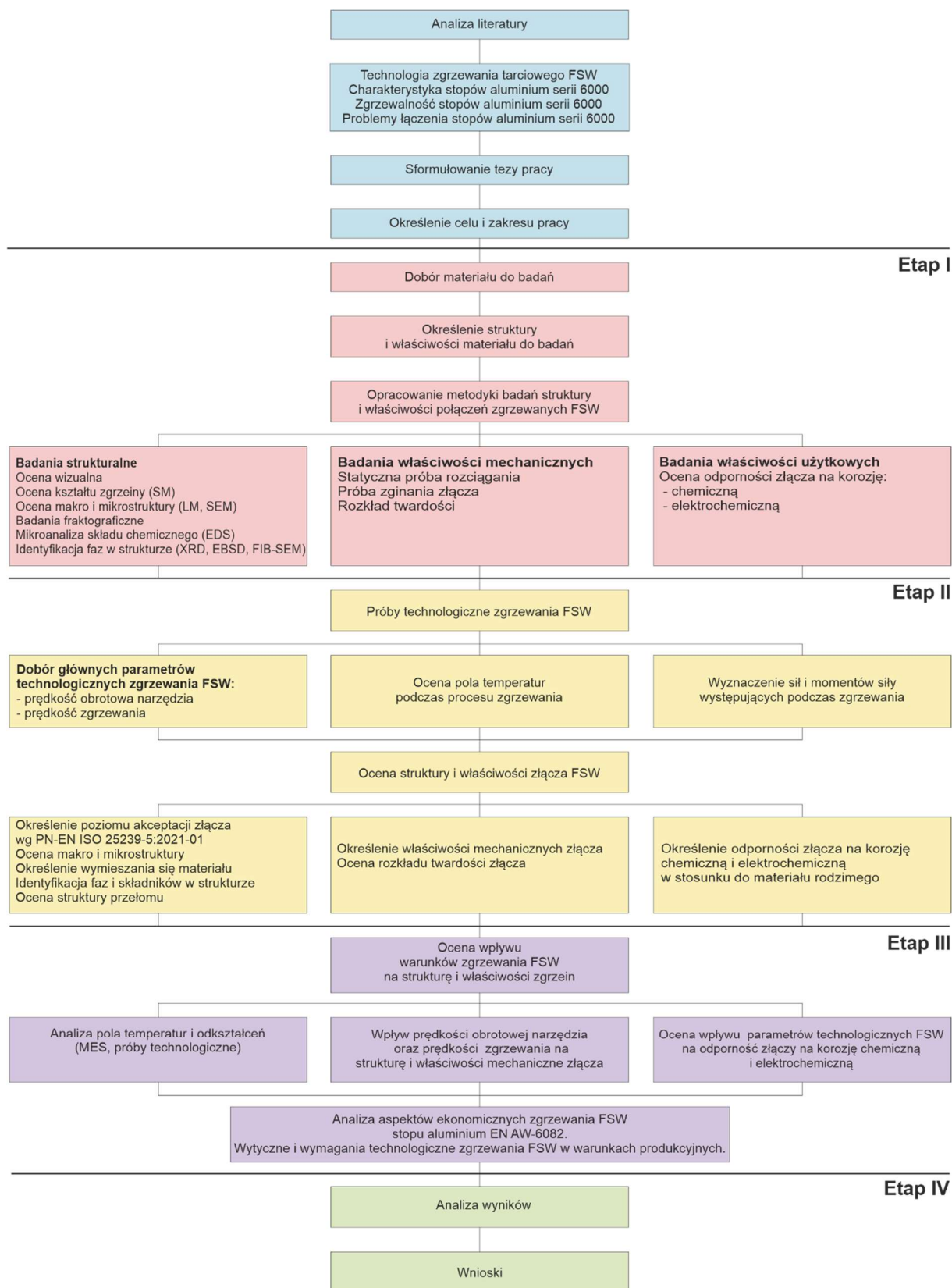
Próby technologiczne zgrzewania obejmowały dobór parametrów technologicznych zgrzewania FSW, w tym w szczególności prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania, ocenę pola temperatur podczas procesu zgrzewania oraz wyznaczenie sił i momentów występujących w procesie.



Oceny jakości powstałych złączy dokonano w oparciu o badania jakości złączy. Określono poziom akceptacji złączy na podstawie oceny makro i mikrostruktury złączy oraz struktury przełomu. Określono właściwości mechaniczne oraz odporność złączy na korozję w stosunku do materiału rodzimego. Dokonano także oceny wpływu warunków zgrzewania FSW na strukturę i właściwości złączy. Wykonano to w oparciu o analizę pola temperatur oraz odkształceń.

Przeprowadzono analizę aspektów ekonomicznych stosowania zgrzewania FSW do wykonywania złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 oraz wykonano Wstępną Instrukcję Technologiczną Zgrzewania (WPS) przydatną w zastosowaniu produkcyjnym.

W końcowym etapie pracy przeprowadzono analizę wyników badań oraz sformułowano wnioski. Szczegółowy schemat programu badań pracy przedstawiono na rys. 47.



Rys. 47. Schemat programu badań pracy z oznaczonymi etapami realizacji

## 7. Materiał do badań

Do badań wykorzystano blachy o wymiarach 500 mm x 110 mm x 6 mm ze stopu aluminium EN AW-6082 (AlSi1MgMn) po obróbce cieplnej T651 (PN-EN 573-3:2019-12 [66]). Stan umocnienia aluminium T651 oznacza, że materiał jest przesycany i odprężony przez rozciąganie z kontrolowanym odkształcaniem trwałym 1,5% do 3% i sztucznie starzony, co redukuje naprężenia w materiale. Dla stopu aluminium EN AW-6082 przesycanie prowadzi się w temperaturze 540°C w czasie 10÷12 godzin, a starzenie w temperaturze 175°C w czasie 6 godzin.

Skład chemiczny materiału zweryfikowano na spektrometrze emisyjnym ze wzbudzeniem iskrowym Q4 Tasman firmy BRUKER. Jako kryterium odniesienia przyjęto wymagania dla stopu EN AW-6082 wg PN-EN 573-3:2019-12 [66] oraz atest materiałowy nr 17.111282. Wyniki analizy składu chemicznego przedstawiono w tablicy 8.

Tablica 8. Wyniki analizy składu chemicznego blach ze stopu aluminium EN AW-6082 T651

| Oznaczenie stopu aluminium | Norma Analiza               | Skład chemiczny, [%] |          |         |         |         |          |         |          |       |       |       |        |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|
|                            |                             | Si                   | Fe       | Cu      | Mn      | Mg      | Cr       | Zn      | Ti       | Ni    | Zr    | Pb    | Al     |
| EN AW-6082 (T651)          | PN-EN 573-3:2019-12         | 0,7-1,3              | max 0,5  | max 0,1 | 0,4-1,0 | 0,6-1,2 | max 0,25 | max 0,2 | Max 0,1  | -     | -     | -     | reszta |
|                            | Protokół z badań nr 18/2020 | 1,19                 | 0,29     | 0,06    | 0,40    | 0,62    | 0,05     | 0,13    | 0,05     | 0,002 | 0,002 | 0,005 | reszta |
|                            | Atest nr 17.111282          | 0,90                 | max 0,26 | 0,05    | 0,50    | 0,80    | 0,07     | 0,06    | max 0,06 | -     | -     | -     | reszta |

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że badane blachy spełniają wymagania normy PN-EN 573-3:2019-12 [66] dla stopu aluminium EN AW-6082 w zakresie składu chemicznego.

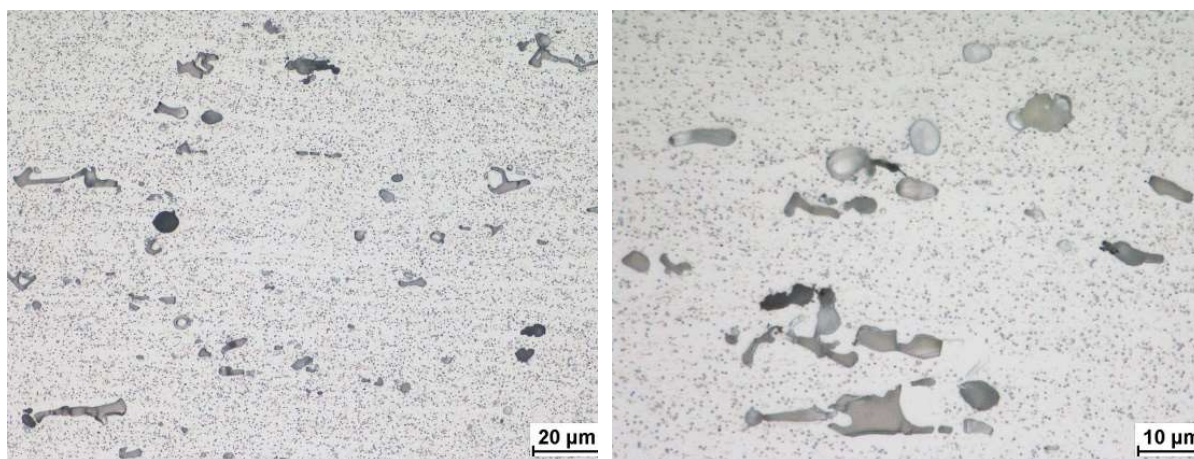
Uzupełnieniem procedury weryfikacji materiału do badań była ocena jego właściwości mechanicznych. Wykonano statyczną próbę rozciągania wg normy PN-EN ISO 4136:2013-05E [84] oraz pomiary twardości Vickersa wg normy PN-EN ISO 14271:2011 [85]. Wyniki tych badań zestawiono w tablicy 9.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że badany materiał spełnia wymagania normy PN-EN 485-2:2018-12 [86] w zakresie właściwości mechanicznych dla stopu aluminium EN AW-6082 w stanie utwardzenia T651.

Tablica 9. Właściwości mechaniczne badanego stopu aluminium EN AW-6082 T651

| Gatunek stopu aluminium | Norma / Analiza                                | Minimalne właściwości   |                      |                     |             |
|-------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|-------------|
|                         |                                                | R <sub>p0,2</sub> , MPa | R <sub>m</sub> , MPa | A <sub>50</sub> , % | Twardość HV |
| EN AW-6082 (T651)       | PN-EN 485-2:2018-12                            | 255                     | 300                  | 9                   | 95          |
|                         | Raport z badań pracy ST-31/20/ZR (Bb-132) [33] | 315                     | 327                  | 12                  | 81          |
|                         | Atest nr 17.111282                             | 300                     | 319                  | 11,5                | 104         |

Badania strukturalne blach ze stopu aluminium EN AW-6082 ujawniły typową strukturę ziarnistą z wydzieleniami faz międzymetalicznych w układzie pasmowym, charakterystyczną dla materiału po procesie walcowania (rys. 48).



Rys. 48. Struktura stopu aluminium EN AW-6082 w stanie utwardzenia T651.

Stwierdzono, że struktura materiału jest typowa i zgodna z danymi literaturowymi opisującymi budowę stopu aluminium EN AW-6082 [70].

## 8. Metodyka badań struktury złącza

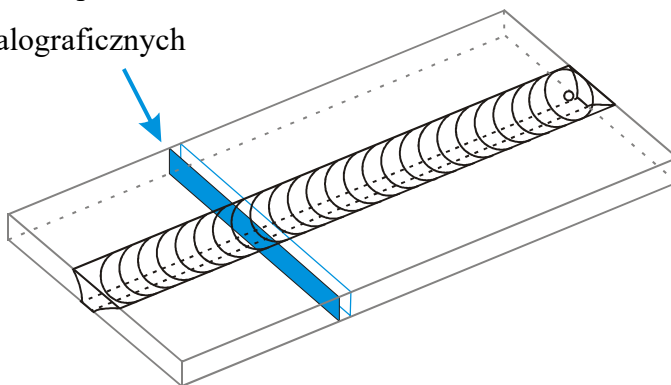
W celu realizacji programu badań opracowano metodykę badań strukturalnych złącza FSW, która obejmowała: dobór miejsca pobrania próbki, sposób przygotowania zglądu metalograficznego i ujawnienia struktury, dobór metody obserwacji makro i mikrostruktury oraz metody mikroanalizy składu chemicznego i analizy składu fazowego.

### 8.1. Dobór miejsca pobrania próbki do badań strukturalnych

Liczba pobranych do badań próbek oraz sposób ich pobierania z materiału są ściśle zależne od powtarzalności składu chemicznego oraz struktury obszaru złącza w ramach tego samego detalu oraz całej konstrukcji. Założono, że proces FSW, przy stałych parametrach jest powtarzalny (pełna automatyzacja procesu) i tym samym struktura złącza jest powtarzana w kierunku zgrzewania. Jednak budowa złącza w kierunku prostopadłym do kierunku zgrzewania jest zróżnicowana i składa się z materiału podstawowego (materiał rodzimy), strefy wpływu ciepła po stronie natarcia i po stronie spływu, strefy odkształconej termomechanicznie oraz strefy mieszania (rys. 7).

Na tej podstawie stwierdzono, że w przypadku złączy zgrzewanych metodą FSW, próbki do badań strukturalnych należy pobierać prostopadle do kierunku zgrzewania (rys. 49).

Miejsce pobrania próbki  
do badań metalograficznych



Rys. 49. Schemat wraz z oznaczeniem obszaru wycięcia próbki do badań metalograficznych złączy zgrzewanych metodą FSW ze stopu aluminium EN AW-6082

Takie miejsce pobrania próbki do badań strukturalnych zapewnia analizę wszystkich, charakterystycznych dla złącza zgrzewanego obszarów. Podczas pobierania próbek do badań metalograficznych należy zastosować taką metodę cięcia, aby zapobiec przegrzaniu badanego obszaru. W przeciwnym wypadku próbki do badań należy pobrać w odległości co najmniej 20 mm od SWC wzdłuż kierunku zgrzewania.

## **8.2. Sposób przygotowania zglądu metalograficznego**

Metodyka przygotowania zglądów do badań metalograficznych powinna gwarantować uzyskanie lustrzanej powierzchni bez artefaktów. Opracowany sposób przygotowania zglądu zakłada dwuetapowy proces cięcia tj. cięcie zgrubne z dokładnością do 0,5 mm oraz cięcie precyzyjne z dokładnością do 0,1 mm. Podczas cięcia próbkę należy chłodzić tak, aby zapobiec zmianom strukturalnym. Cięcie zgrubne blach ze stopu aluminium EN AW-6082 wykonano na przecinarce Delta Abrasimer Cutter firmy Buehler, natomiast cięcie precyzyjne przeprowadzono z wykorzystaniem przecinarki Isomet 5000 firmy Buehler. Do chłodzenia podczas cięcia zastosowano chłodziwo Coolmet firmy Buehler. Parametry cięcia wynosiły: prędkość obrotowa tarczy 4000 obr/min, a prędkość liniowa cięcia była w zakresie od 12 do 15 mm/min.

Kolejnym etapem jest inkludowanie, tj. zatopienie próbki w przewodzącej fenolowej żywicy termoutwardzalnej, która zapewnia prawidłowe umocowanie materiału podczas szlifowania i polerowania oraz możliwość obserwacji struktury na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM).

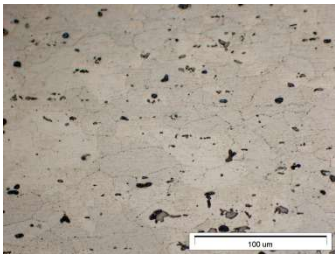
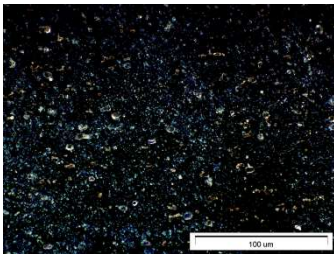
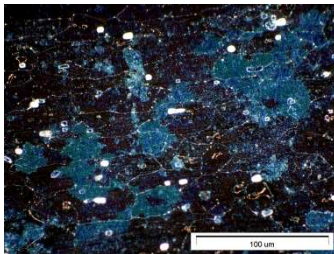
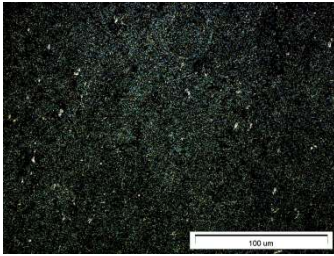
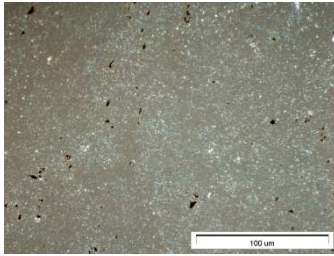
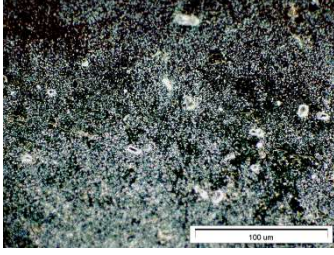
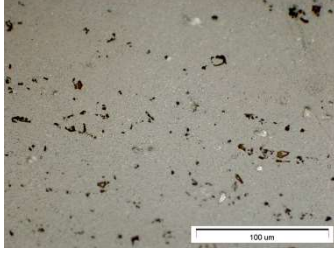
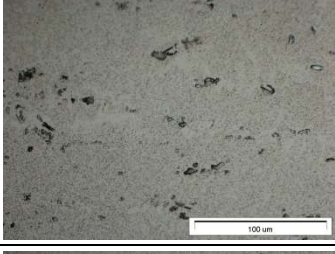
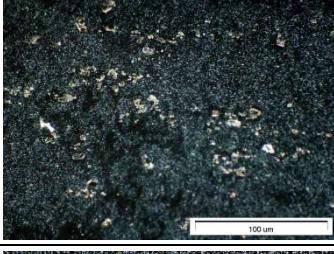
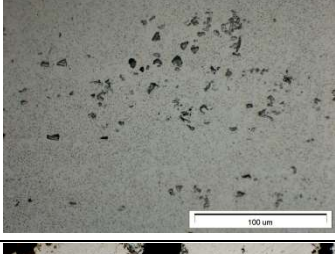
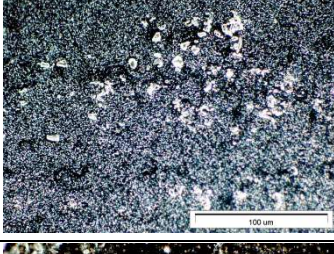
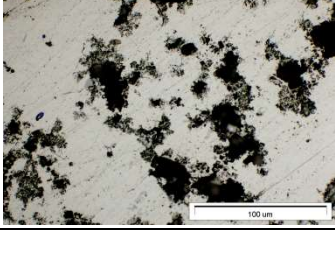
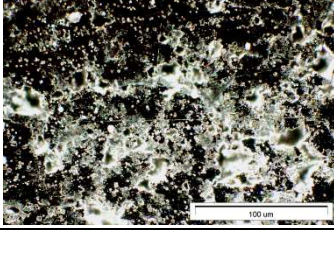
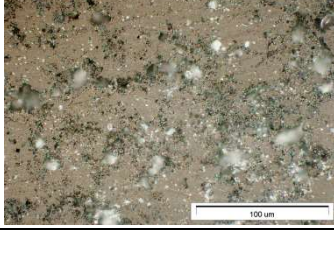
Tak przygotowane zglądy szlifowano, a następnie polerowano na pastach diamentowych z prędkością obrotową tarczy 150 obr/min (ruch próbki zgodny z kierunkiem obrotu tarczy) w czasie 3 minut. Zastosowano płótno firmy Struers oraz zawieszinę diamentową 6  $\mu\text{m}$  i 3  $\mu\text{m}$  Metadi Supreme na bazie oleju. Przedstawiona procedura zapewnia uzyskanie lustrzanej powierzchni próbki bez artefaktów w akceptowalnym czasie ok. 10 minut.

## **8.3. Dobór odczynnika do trawienia chemicznego próbek**

Dobór odczynnika do trawienia zglądów metalograficznych decyduje o możliwości ujawnienia struktury, a tym samym o jakości badań metalograficznych. Efekt trawienia zależy od wielu czynników, do których zaliczyć można: skład chemiczny badanego materiału, strukturę powstającą w procesie wytwarzania, segregacje w materiale zarówno składu chemicznego, jak również faz oraz parametry trawienia. Na podstawie przeglądu literatury [87] dobrano 6 odczynników do trawienia chemicznego oraz elektrochemicznego. Przykładowe ujawnione struktury stopu aluminium EN AW-6082 w procesie trawienia przedstawiono w tablicy 10. Wyniki badań pozwoliły na określenie, że najlepszym odczynnikiem ujawniania struktury stopu aluminium EN AW-6082 jest odczynnik Kellera (Pozycja nr 4 z tablicy 10).



Tablica 10. Struktura stopu aluminium EN AW-6082 T651 ujawniona różnymi odczynnikami chemicznymi

| Zastosow-<br>any<br>odczynnik |                                                                                    | Zdjęcie w polu jasnym                                                               | Zdjęcie w polu ciemnym                                                               | Zdjęcie w świetle<br>spolaryzowanym                                                   |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.                            | NaOH<br>4 g NaOH<br>+ 96 ml H <sub>2</sub> O                                       |    |    |    |
| 2.                            | HF + H <sub>2</sub> O<br>0,5 ml HF<br>+ 99,5 ml H <sub>2</sub> O                   |    |    |    |
| 3.                            | Barker<br>5 ml HBF <sub>4</sub><br>+ 200 ml H <sub>2</sub> O                       |   |   |   |
| 4.                            | Keller: 2 ml HF +<br>5 ml HNO <sub>3</sub> + 3 ml<br>HCl + 190 ml H <sub>2</sub> O |  |  |  |
| 5.                            | Kroll:<br>2 ml HF + 6 ml<br>HNO <sub>3</sub> + 9 ml H <sub>2</sub> O               |  |  |  |
| 6.                            | 10 ml HCl + 100<br>ml H <sub>2</sub> O Napięcie<br>5V, czas 12 s                   |  |  |  |

#### **8.4. Metodyka badań makro- i mikrostruktury**

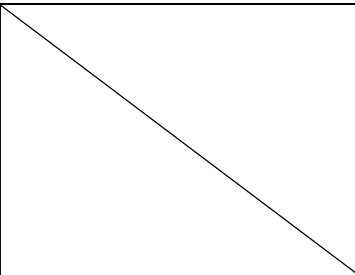
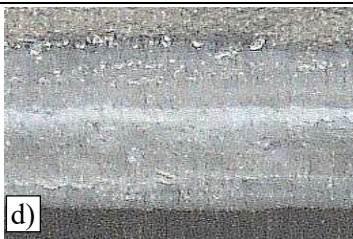
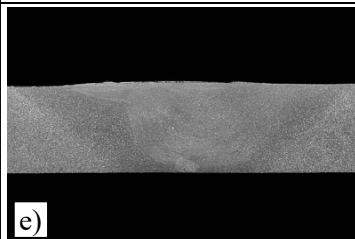
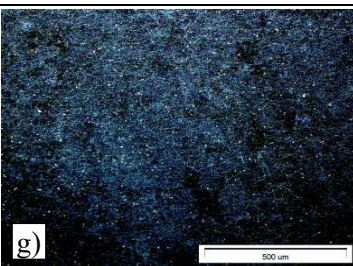
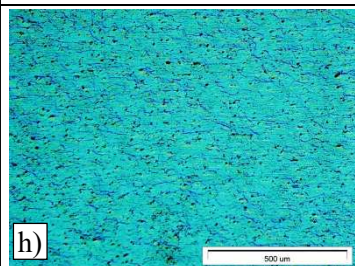
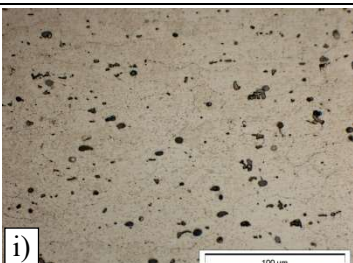
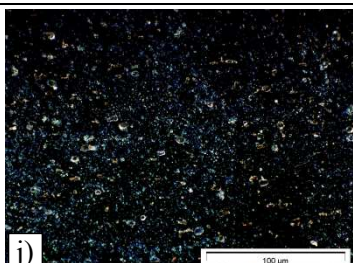
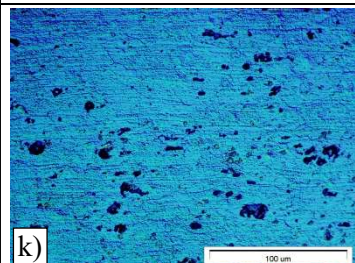
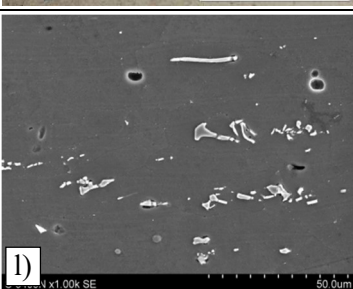
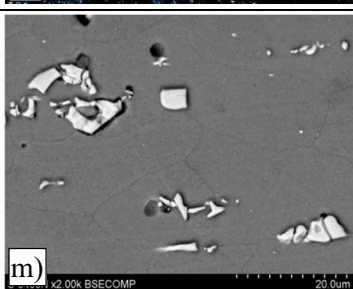
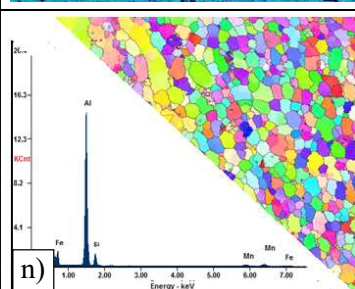
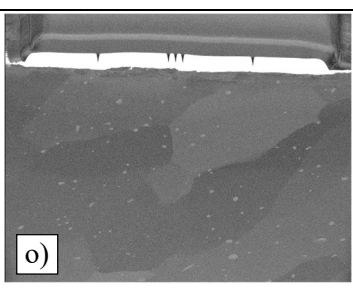
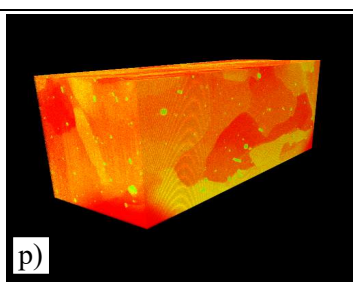
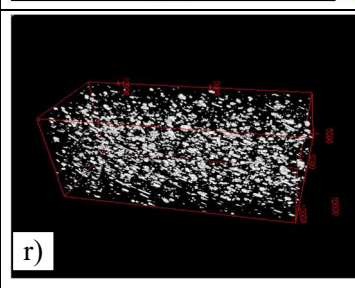
Badania wizualne prowadzone w celu określenia jakości lica zgrzeiny oraz grani zostały przeprowadzone na stanowisku do badań budowy złącza. Do rejestracji obrazu wykorzystano aparat fotograficzny (tablica 11).

Do badań makrostruktury złącza przy powiększeniach do 50x wykorzystano mikroskop stereoskopowy (SM) SZX9 firmy Olympus. Badania prowadzono w technice pola ciemnego. Ujawnione struktury pokazano w tablicy 11. Do obserwacji mikrostruktury zastosowano mikroskop świetlny (LM) Olympus GX71. Badania prowadzono przy powiększeniach do 500x, w technice pola jasnego, pola ciemnego oraz światła spolaryzowanego (tablica 11). Uzupełnieniem badań metalograficznych na mikroskopach świetlnych były obserwacje mikrostruktury na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) Hitachi S 3400N oraz Joel JCM 6000 Neoscope. Obserwacje prowadzono w technice rejestracji elektronów wtórnych (SE) oraz elektronów wstecznie rozproszonych (BSE). Obrazy SE dobrze ujawniają topografię powierzchni natomiast obrazy BSE pokazują różnice w składzie chemicznym na powierzchni badanej próbki. Mikroskop SEM był wyposażony w detektor EDS (z ang. Energy Dispersive Spectroscopy), co umożliwia mikroanalizę składu chemicznego w poszczególnych punktach oraz wzdłuż zdefiniowanej linii np. granicy przejść pomiędzy strefą wpływu ciepła, a centralnym obszarem zgrzeiny. Dodatkowo wykonano również mapy rozkładu pierwiastków w poszczególnych obszarach złącza. badania struktury krystalograficznej złącza metodą EBSD (z ang. Electron BackScatter Diffraction) oraz przeprowadzono identyfikację faz w strukturze za pomocą tej metody.

Do obserwacji przy bardzo dużych powiększeniach, wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy SEM oraz FIB-SEM. Badania prowadzono na cienkich foliach wyciętych z różnych stref złącza w tym z materiału rodzimego, z SWC po stronie natarcia, z SWC po stronie spływu, z jądra zgrzeiny oraz ze strefy odkształconej termomechanicznie. Przykładowe struktury złączy wykonane za pomocą różnych technik badawczych przedstawiono w tablicy 11.



Tablica 11. Przykładowe wyniki obserwacji makro i mikrostruktury złączy ze stopu aluminium EN AW-6082

|                                             |  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|---------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Widok<br>złączy, aparat<br>fotograficzny    |  |    |                                                                                     |    |                                                                                      |    |                                                                                       |
| Mikroskop<br>stereoskopowy,<br>SM           |  |    |                                                                                     |    |                                                                                      |    |                                                                                       |
| Mikroskop światłny, LM                      |  | 100x                                                                                |   |                                                                                      |   |                                                                                       |   |
|                                             |  | 50x                                                                                 |  |                                                                                      |  |                                                                                       |  |
| Skaningowy<br>mikroskop<br>elektronowy, SEM |  |  |                                                                                     |  |                                                                                      |  |                                                                                       |
| Rekonstrukcja 3D<br>złącza FSW, FIB-SEM     |  |  |                                                                                     |  |                                                                                      |  |                                                                                       |

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że do oceny wizualnej powierzchni złącza najlepszą metodą rejestracji obrazu jest stanowisko wyposażone w aparat fotograficzny. Ten etap badań zapewnia wykonanie prawidłowej obserwacji powierzchni złącza zarówno od strony lica jak również od strony grani (tablica 11, poz. a, b). Badania lica zgrzeiny oraz grani zgrzeiny należy prowadzić przy powiększeniach nie większych niż 5x w technice pola jasnego. Jako kryterium oceny jakości połączenia należy przyjąć wymagania normy [90].

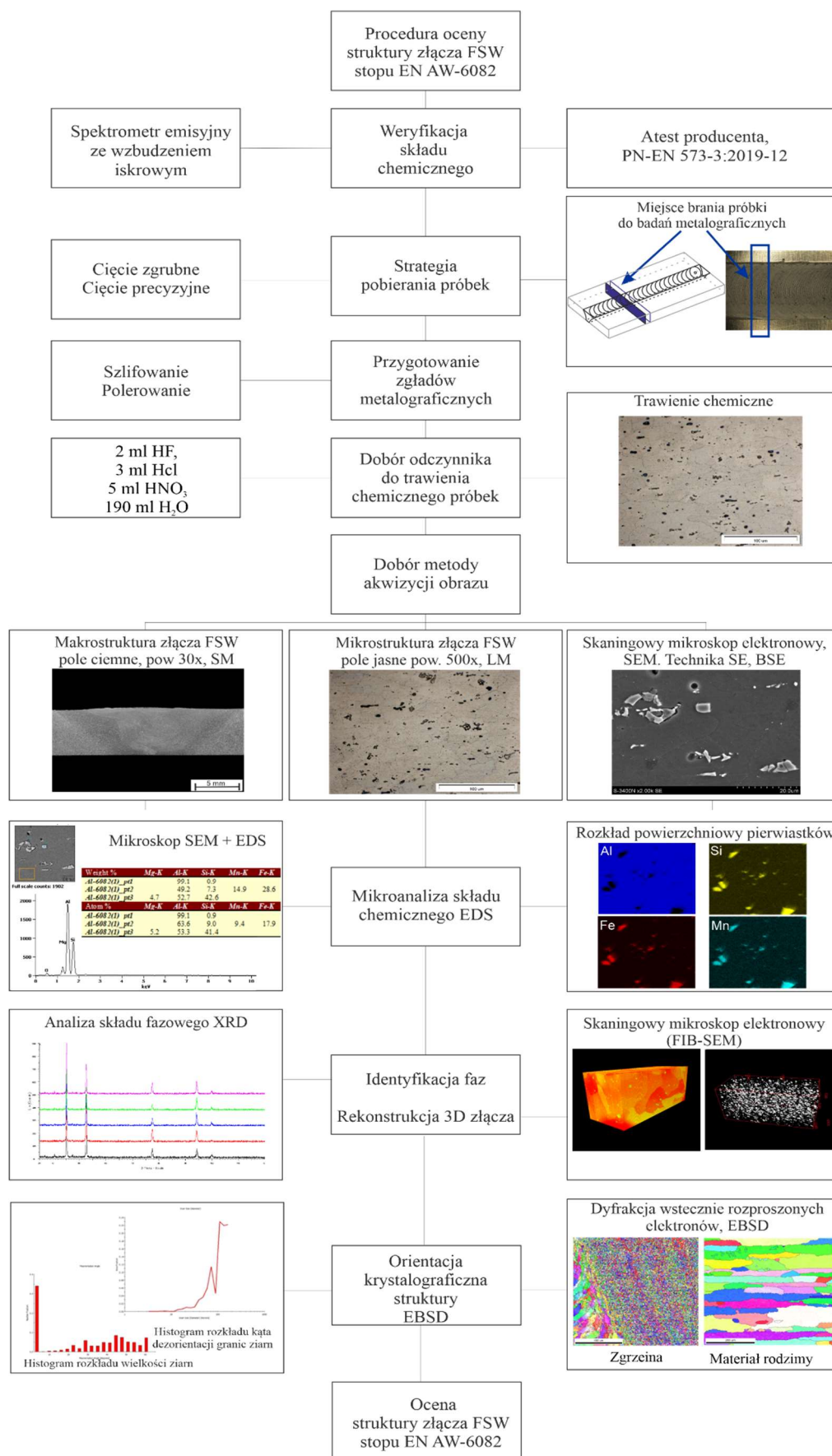
Badania makrostruktury złącza oraz ocena kształtu zgrzeiny powinna być wykonana na zglądach trawionych na powierzchni prostopadłej do kierunku zgrzewania przy powiększeniach do 30x w polu ciemnym na mikroskopie stereoskopowym (tablica 11, poz. c÷e). Na tym etapie badań można ocenić jakość połączenia przyjmując kryteria dla makrostruktury wg poziomów akceptacji opisanych w PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najlepszym sposobem trawienia stopu aluminium EN AW-6082 jest wykorzystanie odczynnika Kellera.

Obserwacje mikrostruktury należy rozpocząć od wykorzystania mikroskopu świetlnego przy powiększeniu 100x, a w celu przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy struktury materiału należy zastosować powiększenie do 500x i obserwacje prowadzić w polu jasnym.

Następnie należy prowadzić obserwacje na skaningowym mikroskopie elektronowym w elektronach wtórnych (SE) oraz w elektronach wstecznie rozproszonych (BSE) co pozwala na ujawnienie topografii struktury materiału. Mikroskop ten można także wykorzystać do przeprowadzenia mikroanalizy składu chemicznego za pomocą przystawki EDS zarówno punktowo jak i liniowo i powierzchniowo. Skaningowy mikroskop elektronowy może być także wyposażony w przystawkę EBSD co pozwala na wyznaczenie mapy orientacji krystalograficznej, mapy granic ziaren, rozkładu kąta dezorientacji oraz rozkładu wielkości ziarna.

Uzupełnieniem tych badań była identyfikacja faz metodą XRD oraz EBSD, a szczegółową analizę fazową należy prowadzić z wykorzystaniem skaningowo mikroskopu elektronowego FIB-SEM.

Całość procedury badawczej pokazano w formie schematu na rys. 50, natomiast metodyki poszczególnych badań eksperymentalnych przedstawiono w poszczególnych rozdziałach.



Rys. 50. Procedura oceny struktury stopu aluminium EN AW-6082

## 9. Analiza pola temperatury i odkształceń złączy FSW

W ramach realizacji pracy, za pomocą oprogramowania SYSWELD, opracowano model numeryczny MES złącza zgrzewanego metodą FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Model ten zweryfikowano w oparciu o dobrane, na podstawie wstępnych prób technologicznych i badań własnych [88, 89], parametry zgrzewania FSW tj. prędkość obrotową narzędzia oraz prędkość zgrzewania, a także wyniki badań metalograficznych oraz pomiarów mocy źródła ciepła. Model skalibrowano z zastosowaniem różnych iteracji, aż do pełnego dopasowania do założonych warunków procesu, a następnie zwalidowano w oparciu o wyniki pomiarów temperatury oraz odkształceń na rzeczywistych złączach FSW. W badaniach zastosowano model 3D o ilości elementów nieliniowych, typu HEXA oraz PENTA, wynoszącej 46 386. Ilość węzłów wynosiła 207 098.

Symulacje procesu zgrzewania FSW płyt ze stopu aluminium EN AW-6082 podzielono na symulacje pola temperatury obszaru zgrzewania oraz symulacje pola odkształceń złączy FSW podczas zgrzewania. Symulacje MES przeprowadzono dla parametrów zgrzewania FSW, zestawionych w tablicy 12. Do obliczeń zastosowano przesuwające się źródło ciepła, w postaci walca o średnicy  $\varnothing 26$  mm z trzpieniem o średnicy  $\varnothing 12$  mm, odwzorowujące generowanie ciepła w wyniku oddziaływania narzędzia zgrzewającego (rys. 56). Moc źródła ciepła została obliczona ze wzoru (3) z kolei energię liniową obliczono ze wzoru (4):

$$P = \frac{2 \pi}{60} V_o \cdot M \quad (3)$$

gdzie:

$P$  - moc, W

$V_o$  - prędkość obrotowa, obr/min,

$M$  - moment obrotowy, Nm.

$$E = P \cdot t \quad (4)$$

gdzie:

$E$  – ilość energii liniowej wprowadzonej do zgrzeiny,

$t$  – czas zgrzewania

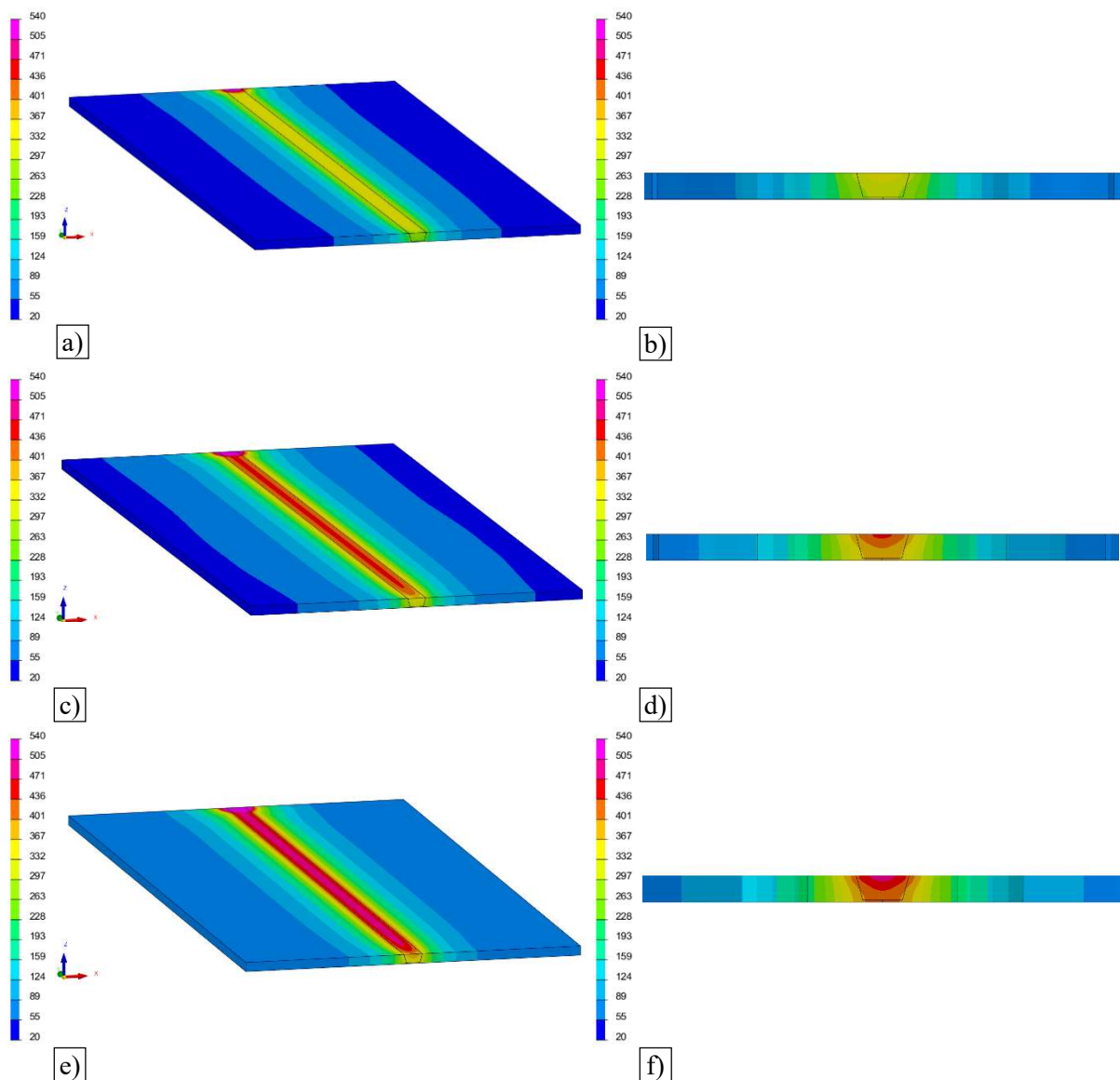


Tablica 12. Parametry symulacji dla poszczególnych modeli

| Lp. | Oznaczenie modelu | Parametry zgrzewania              |                                                       | Moment obrotowy, Nm | Moc P, W | Energia liniowa E, J/mm |
|-----|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------|-------------------------|
|     |                   | Prędkość obrotowa $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania (posuwu narzędzia) $V_z$ , mm/min |                     |          |                         |
| 1.  | Model nr 1        | 450                               | 450                                                   | 110                 | 5184     | 691                     |
| 2.  | Model nr 2        | 900                               |                                                       | 54                  | 5089     | 678                     |
| 3.  | Model nr 3        | 1800                              |                                                       | 28                  | 5278     | 704                     |
| 4.  | Model nr 4        | 450                               | 900                                                   | 100                 | 4712     | 314                     |
| 5.  | Model nr 5        | 900                               |                                                       | 65                  | 6126     | 408                     |
| 6.  | Model nr 6        | 1800                              |                                                       | 36                  | 6786     | 452                     |

Do przeprowadzenia symulacji MES przyjęto sześć warunków brzegowych. Były to trzy warunki utwierdzenia, które umożliwiły swobodne odkształcanie się elementu (nie wywoływały efektu zapobiegania odkształceniom elementu). Warunki te jednocześnie umiejscawiały odkształcany element w przestrzeni (również po odkształceniu w wyniku zgrzewania). Kolejne trzy warunki symulowały oddziaływanie oprzyrządowania (uchwytów mocujących i blokujących) użytego w procesie zgrzewania i które oddziaływały na model jedynie w procesie zgrzewania oraz części procesu studzenia, następnie zostały zwalniane umożliwiając swobodne odkształcanie się zgrzewanych elementów. Ostatnim warunkiem był warunek związany z zablokowaniem zgrzewanych elementów przez szczęki ściskające je w kierunku poprzecznym do kierunku zgrzewania.

W ramach analizy temperatury określono pola temperatury maksymalnej w całym obszarze zgrzewania oraz w przekroju złącza FSW co pokazano na rys. 51.



Rys. 51. Przykładowe wyniki MES pola temperatury maksymalnej w całym obszarze zgrzewania oraz w przekroju złącza FSW. Parametry zgrzewania: a)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 4 - cały obszar), b)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 4 - przekrój złącza), c)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 5 - cały obszar), d)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 5 - przekrój złącza), e)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 6 - cały obszar), f)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min (model 6 - przekrój złącza)

Wyniki rozkładu temperatury maksymalnej w całym obszarze złącza FSW, przy prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min, wskazują, że zmienia się ona wraz ze zmianą prędkości obrotowej narzędzia w taki sposób, że im mniejsza prędkość obrotowa narzędzia tym większa temperatura (rys. 51 a, c, e). Przy najmniejszej prędkości obrotowej tj.  $V_o=450$  obr/min maksymalna temperatura w obszarze zgrzewania to ok.  $330^{\circ}\text{C}$ , a maksymalna wartość temperatury na poziomie ok.  $540^{\circ}\text{C}$  była w obszarze zakończenia zgrzewania (rys. 51a). Przy

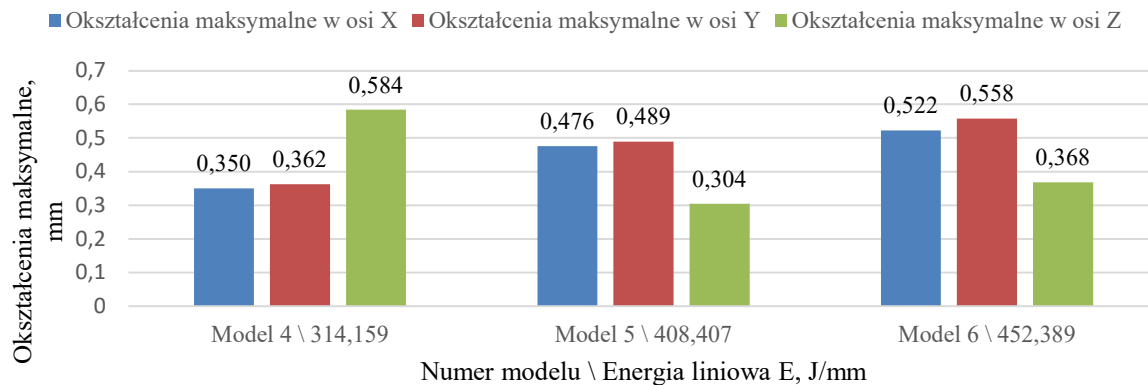
prędkości obrotowej  $V_o=900$  obr/min maksymalna temperatura w złączu jest większa i wynosi ok.  $430^{\circ}\text{C}$  (rys. 51c). Z kolei przy największej prędkości obrotowej narzędzia tj.  $V_o=1800$  obr/min maksymalna temperatura w osi złącza jest na poziomie ok.  $540^{\circ}\text{C}$  (rys. 51e). W każdym przypadku, wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia, wartość temperatury maksymalnej, w całym obszarze zgrzewania, rośnie w kierunku grani złącza (rys. 51b, d, f). Różnice w rozkładzie temperatury w poszczególnych modelach są związane z ilością wprowadzanej energii, która jest różna i zależy zarówno od prędkości obrotowej narzędzia jak i prędkości zgrzewania (tablica 12).

W ramach symulacji MES przeprowadzono także obliczenia, których wynikiem były prognozy odkształceń płyt próbnych podczas zgrzewania, które były efektem oddziaływania temperatury.

W tablicy 13 zestawiono wyniki obliczeń minimalnych i maksymalnych odkształceń płyt w poszczególnych kierunkach oraz sumę przemieszczeń bezwzględnych wartości minimalnych i maksymalnych. Na rys. 52 pokazano zależność energii liniowej od odkształcenia w kierunkach X, Y i Z dla złączy wykonanych z prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min.

Tablica 13. Wyniki wartości przemieszczeń maksymalnych i minimalnych w kierunkach X, Y i Z w oparciu o pola przemieszczeń

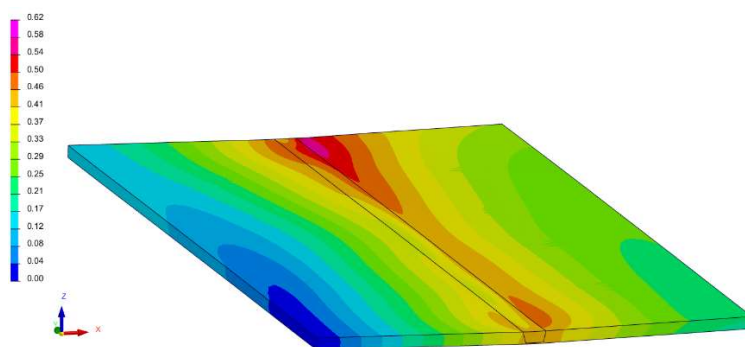
| Nr modelu | Przemieszczenia, mm |       |        |                  |       |        |                  |       |        |                  |
|-----------|---------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|------------------|
|           | Wypad-kowe          | Xmin  | Xmax   | Xmin  +<br> Xmax | Ymin  | Ymax   | Ymin  +<br> Ymax | Zmin  | Zmax   | Zmin  +<br> Zmax |
| 1         | 1,388               | 0,085 | -0,681 | 0,766            | 0,075 | -0,689 | 0,764            | 0,756 | -1,071 | 1,827            |
| 2         | 1,341               | 0,080 | -0,670 | 0,750            | 0,070 | -0,668 | 0,738            | 1,182 | -0,099 | 1,281            |
| 3         | 1,434               | 0,091 | -0,691 | 0,782            | 0,079 | -0,711 | 0,790            | 1,274 | -0,106 | 1,380            |
| 4         | 0,622               | 0,033 | -0,317 | 0,350            | 0,041 | -0,321 | 0,362            | 0,058 | -0,526 | 0,584            |
| 5         | 0,522               | 0,026 | -0,450 | 0,476            | 0,067 | -0,422 | 0,489            | 0,043 | -0,261 | 0,304            |
| 6         | 0,616               | 0,024 | -0,498 | 0,522            | 0,079 | -0,479 | 0,558            | 0,268 | -0,100 | 0,368            |



Rys. 52. Zależność energii liniowej wprowadzonej do złącza FSW od odkształcenia w kierunkach osi X, Y i Z

Wyniki badań rozkładu przemieszczeń maksymalnych i minimalnych wskazują, że najmniejszymi przemieszczeniami wypadkowymi na poziomie 0,522 mm cechuje się złącze zamodelowane w warunkach prędkości obrotowej  $V_o=900$  obr/min oraz prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min (tablica 13 poz. 5). Przy tych parametrach zgrzewania maksymalne naprężenia pozostające w złączu są na poziomie 245 MPa.

Pole przemieszczeń wypadkowych ulega zmianie wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia tylko przy zgrzewaniu z prędkością  $V_z=900$  mm/min (tablica 13). Przemieszczenia te są największe na początku i na końcu układu przy najmniejszej prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=450$  obr/min i są rozłożone równomiernie po obu stronach złącza co przedstawiono na rys. 53.

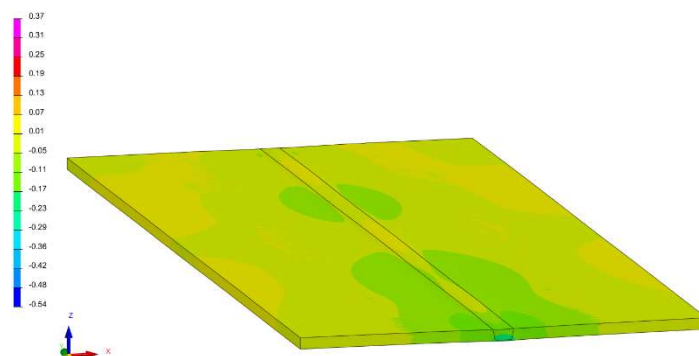


Rys. 53. Model 4, pole przemieszczeń wypadkowych, odkształcenie elementu przeskalowane 5-krotnie, mm

Przy większej prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min przemieszczenia zwiększają się wraz z przesuwaniem się układu podczas zgrzewania. Większe przemieszczenia obserwuje się po stronie płyty nieuszywnionej tj. po stronie spływu (rys. 53).

Charakter rozkładu przemieszczeń elementów w kierunku osi Y jest podobny jak w kierunku osi X. Przemieszczenia zmniejszają się wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia. Przemieszczenia te są najwyższe na końcu układu tj. w końcowej części złącza (w zakresie  $0,54 \div 0,52$  mm)

Charakter rozkładu przemieszczeń elementów w kierunku osi Z jest również podobny do tych, które obserwowano w przypadku przemieszczeń w kierunku osi X oraz Y. Przy większej prędkości zgrzewania tj.  $V_z=900$  mm/min. Przy najniższej prędkości obrotowej  $V_o=450$  obr/min przemieszczenia są najwyższe (na poziomie 0,584 mm) i ulegają obniżeniu wraz z dalszym zwiększaniem tej prędkości do  $V_o=1800$  obr/min. Układ ulega stabilizacji przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min gdzie przemieszczenia są na poziomie ok. 0,2 mm (rys. 54) czyli na poziomie najbardziej akceptowalnym. Wartość ta wynika z możliwości zastosowania obróbki maszynowej złącza po procesie zgrzewania co zapewnia zwiększenie odporności złącza na zmęczenie i możliwość uzyskania gładkiej jego powierzchni [101, 102].

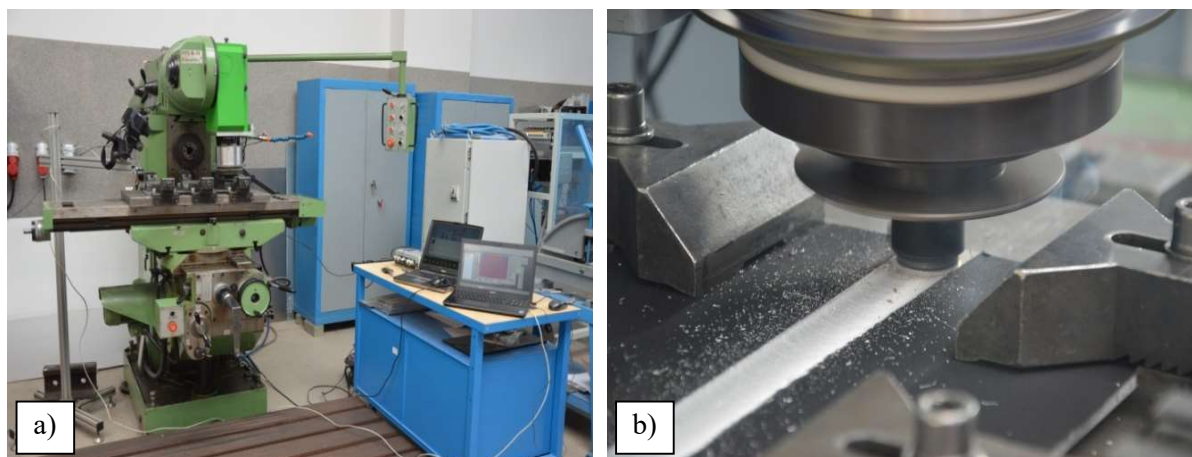


Rys. 54. Model 5, pole przemieszczeń w kierunku Z, odkształcenie elementu przeskalowane 5-krotnie, mm

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że najlepsze parametry do zgrzewania FSW stopu aluminium EN AW-6082, przyjmując jako kryterium rozkład temperatury oraz poziom odkształceń, to prędkość obrotowa 900 obr/min oraz prędkość zgrzewania  $V_z=900$  mm/min. Dla głównych parametrów zgrzewania FSW na tym poziomie maksymalna wartość odkształceń w kierunku osi Z to 0,304 mm, w kierunku osi Y to 0,489 mm, natomiast w kierunku osi X wartość ta wynosi 0,476 (rys. 52).

## 10. Próby technologiczne zgrzewania FSW

Proces zgrzewania FSW prowadzono na zgrzewarce zbudowanej na bazie frezarki konwencjonalnej FYF32 JU2 firmy JAFO. Stanowisko badawcze wykorzystane do zgrzewania FSW przedstawiono rys. 55a.



Rys. 55. Stanowisko do zgrzewania metodą FSW: a) zgrzewarka FSW zbudowana na bazie frezarki FYF32 JU2 firmy JAFO, b) widok procesu zgrzewania FSW stopu aluminium EN AW-6082

Zgrzewanie FSW blach ze stopu aluminium EN AW-6082 o grubości 6 mm, przeprowadzono w sześciu wariantach parametrów technologicznych tj. przy zastosowaniu trzech prędkości obrotowych narzędzia  $V_o=450, 900$  oraz  $1800$  obr/min w zestawieniu z dwiema prędkościami zgrzewania  $V_z=450$  i  $900$  mm/min (tabl. 14, rys. 55 b)

Podczas prób zgrzewania FSW prowadzono pomiary sił i momentu obrotowego z wykorzystaniem przyrządu pomiarowego LOWSTIR. Przyrząd ten, pozwala na monitorowanie procesu zgrzewania oraz rejestrowanie następujących przebiegów parametrów zgrzewania:

- siły docisku odpowiadającej za utrzymanie położenia wieńca opory na odpowiednim poziomie w czasie zgrzewania,
- siły w kierunku zgrzewania, działającej równolegle do ruchu narzędzia,
- momentu obrotowego, którego wartość zależy od siły docisku i współczynnika tarcia.

Szczegółowy zakres zastosowanych parametrów procesu zgrzewania wraz z danymi obliczeniowymi sił oraz momentu przedstawiono w tablicy 14. Parametry te były wykorzystane do wykonania symulacji numerycznej procesu zgrzewania FSW (Rozdział 9 pracy).

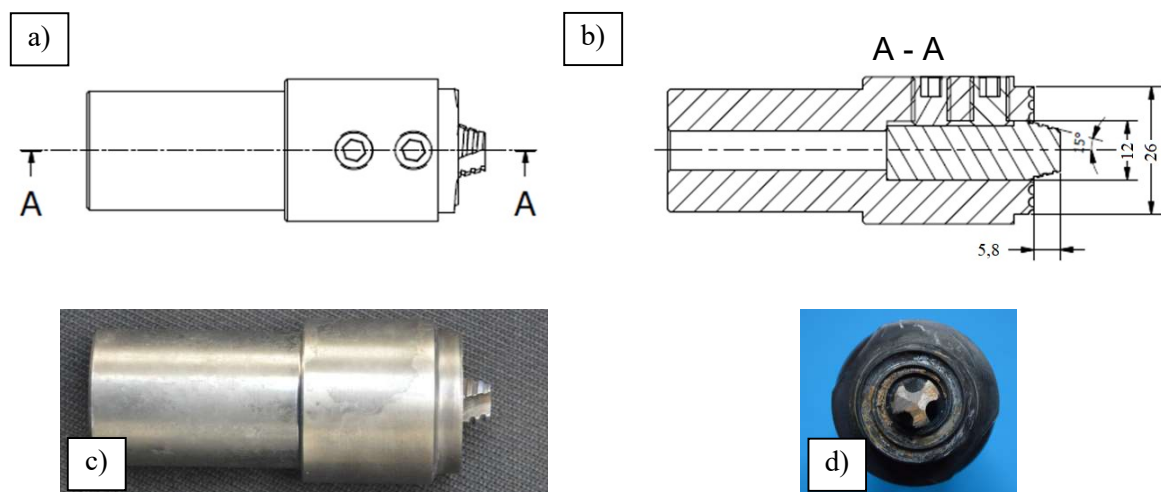


Tablica 14. Stosowane główne parametry zgrzewania stopu aluminium EN AW-6082 T651 oraz wyniki pomiarów sił i momentu

| Lp. | Parametry zgrzewania     |                         | Siła w kierunku zgrzewania, kN | Siła docisku zgrzewania, kN | Moment obrotowy, Nm |
|-----|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|
|     | V <sub>o</sub> , obr/min | V <sub>z</sub> , mm/min |                                |                             |                     |
| 1.  | 450                      | 450                     | 1,3                            | 21,4                        | 110                 |
| 2.  | 900                      |                         | 1,0                            | 20,8                        | 54                  |
| 3.  | 1800                     |                         | 2,1                            | 17,0                        | 28                  |
| 4.  | 450                      | 900                     | 5,4                            | 26,0                        | 100                 |
| 5.  | 900                      |                         | 1,9                            | 17,2                        | 65                  |
| 6.  | 1800                     |                         | 2,3                            | 15,0                        | 36                  |

### 10.1. Narzędzie do zgrzewania

Na podstawie badań własnych [33, 58], związanych ze zgrzewaniem różnych materiałów konstrukcyjnych, wybrano do zgrzewania FSW narzędzie stożkowe typu Triflute<sup>Tm</sup> [91] (rys. 56). Narzędzie to charakteryzuje się stożkowym kształtem trzpienia mieszającego z trzema wycięciami ułatwiającymi mieszanie materiału podczas trwania procesu zgrzewania. Ukształtowane w taki sposób narzędzie przemieszcza podczas zgrzewania mniej materiału co umożliwia zwiększenie prędkości zgrzewania przy zachowaniu wysokiej jakości złącza. Dodatkowo, wycięcia w trzpieniu lepiej „zrywają” materiał w strefie zgrzewania co powoduje większe wydzielanie się ciepła. Narzędzie zostało zmodyfikowane względem klasycznego narzędzia Triflute<sup>Tm</sup> wprowadzając dodatkowo kształt stożka. Zmiana kształtu narzędzia ułatwiła mieszanie materiałów podczas zgrzewania oraz zabezpieczyła narzędzie przed nadmiernym działaniem obciążeń. Powierzchnię tarcia wieńca opory narzędzia nachylono pod kątem 1,5° do powierzchni zgrzewanych płyt. Schemat zastosowanego narzędzia oraz jego widok przedstawiono na rys. 56.

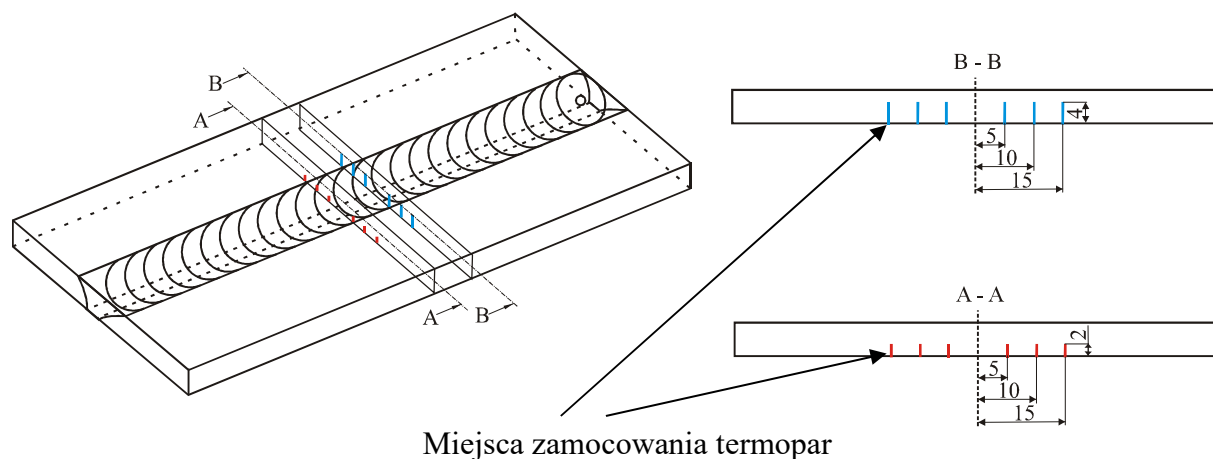


Rys. 56. Narzędzie stożkowe typu Triflute wykorzystane do wykonania złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082: a) schemat narzędzia, b) przekrój narzędzia - rysunek techniczny, c) widok ogólny z boku narzędzia, d) widok od strony trzpienia

## 10.2. Ocena pola temperatury podczas zgrzewania FSW + DTA

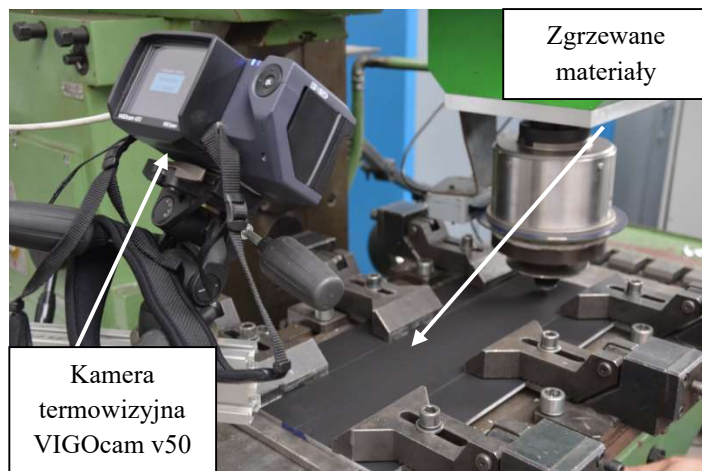
Pomiar temperatury podczas zgrzewania metodą FSW wykonano za pomocą termopar typu K oraz za pomocą kamery termowizyjnej. Pomiary temperatury prowadzono w całym zakresie parametrów zgrzewania.

Termopary umiejscowiono wewnątrz złącza w odległościach 5, 10 oraz 15 mm od osi złącza oraz na głębokościach 2 i 4 mm od grani złącza. Rozmieszczenie termopar pokazano na rys. 57.



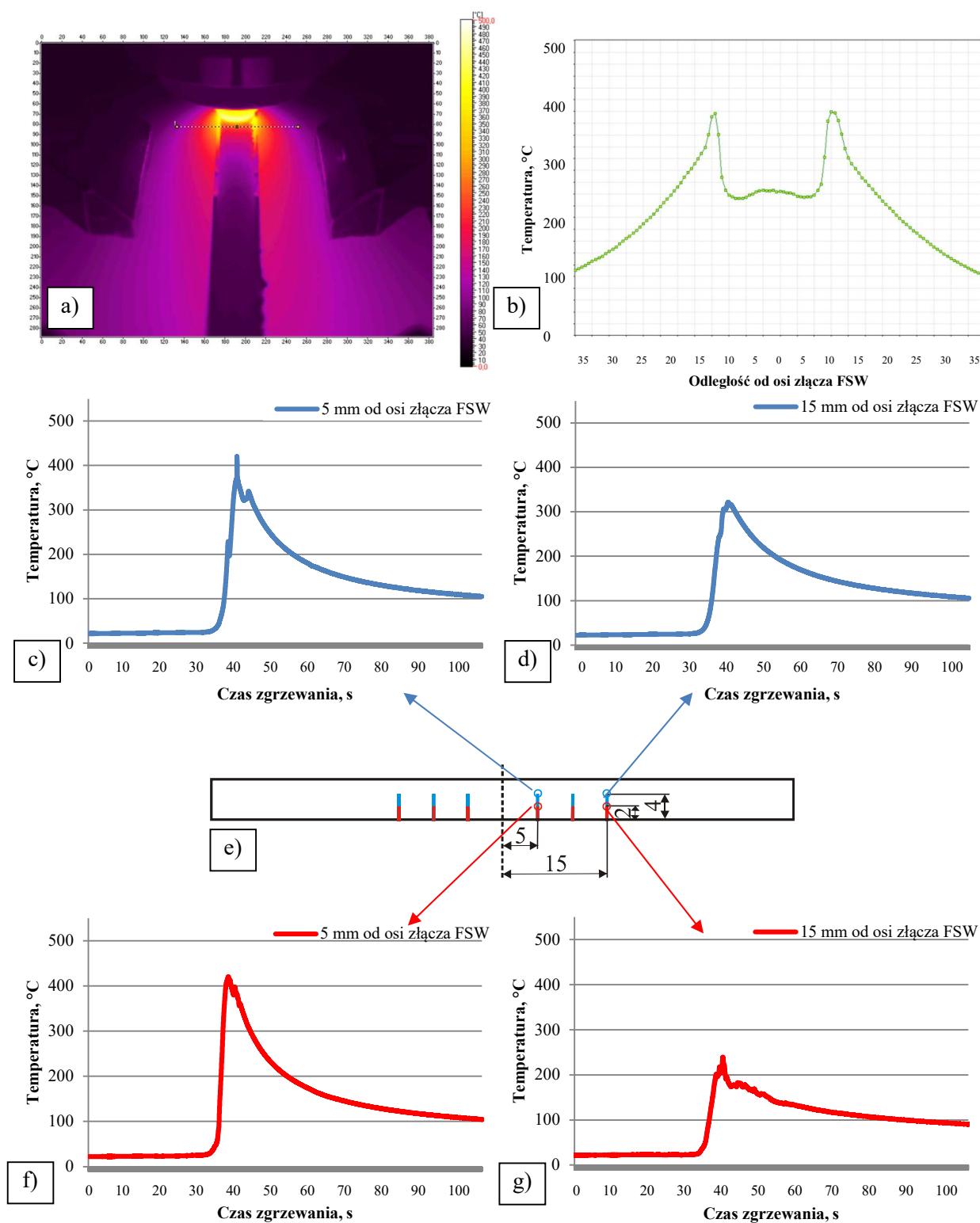
Rys. 57. Schemat usytuowania termopar do pomiaru temperatury wewnątrz złącza FSW

Do pomiaru rozkładu temperatury na górnej powierzchni złącza FSW tj. lica złącza wykorzystano kamerę termowizyjną VIGOcam v50 (rys. 58). Uzyskane wyniki pomiarów wykorzystano do określenia rozkładu temperatury w obszarze zgrzewania i weryfikacji wyników symulacji numerycznej procesu zgrzewania.

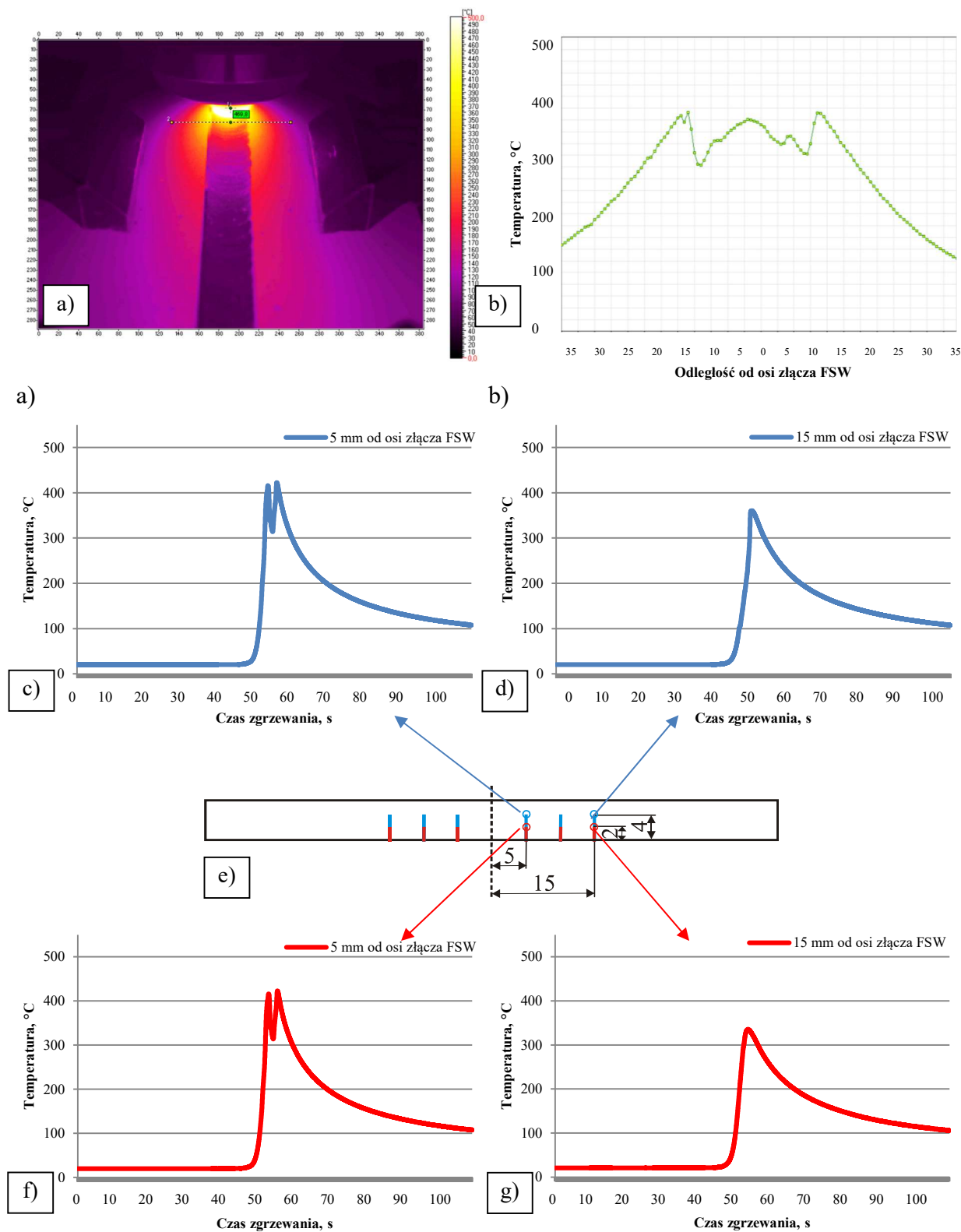


Rys. 58. Stanowisko do pomiaru temperatury górnej powierzchni złącza FSW za pomocą kamery termowizyjnej VIGOcam v50

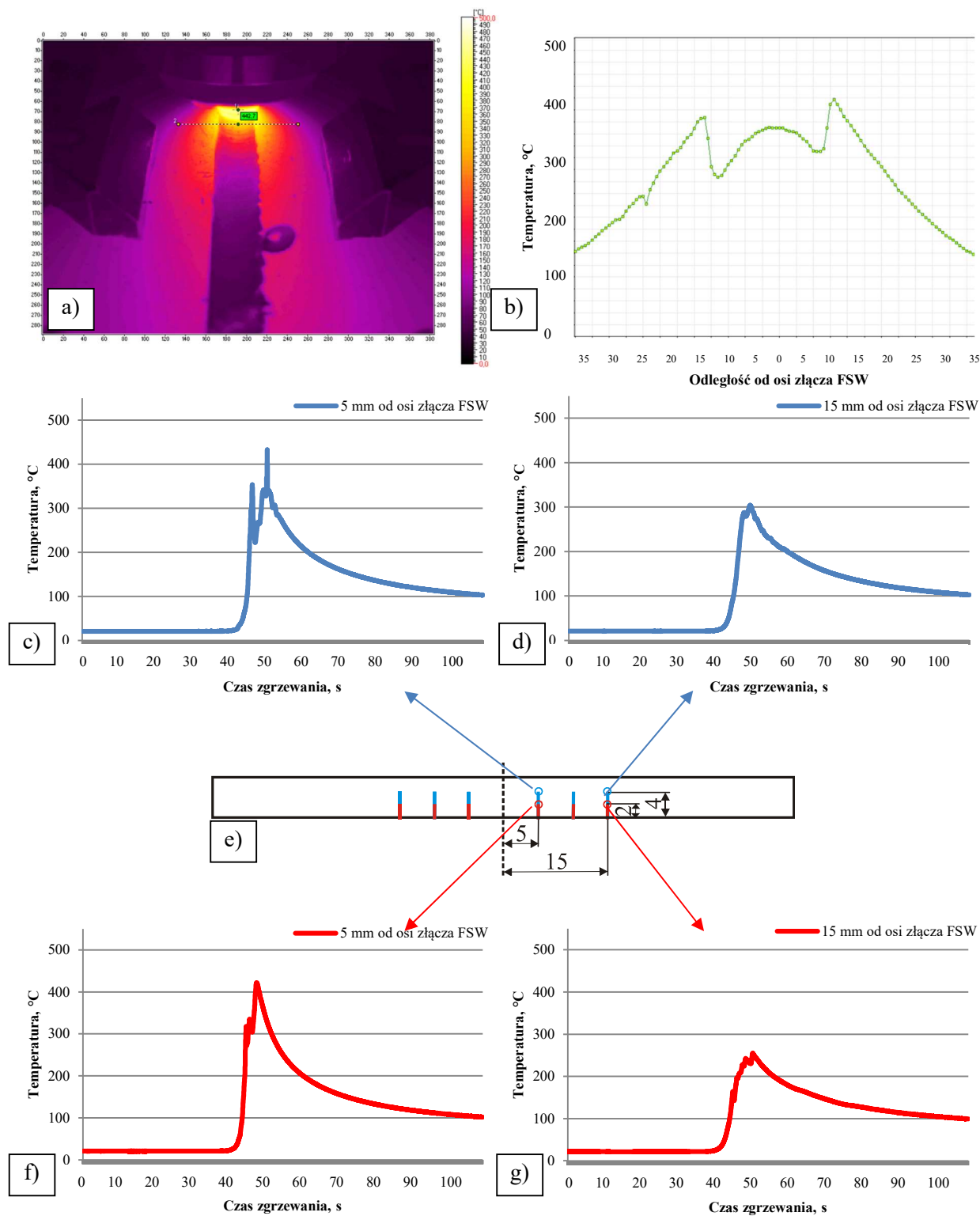
Na rysunkach od 59 do 64 przedstawiono zarejestrowane temperatury na górnej powierzchni złącza FSW oraz temperatury w centralnym obszarze złącza.



Rys. 59. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość 4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min ,  $V_z=450$  mm/min

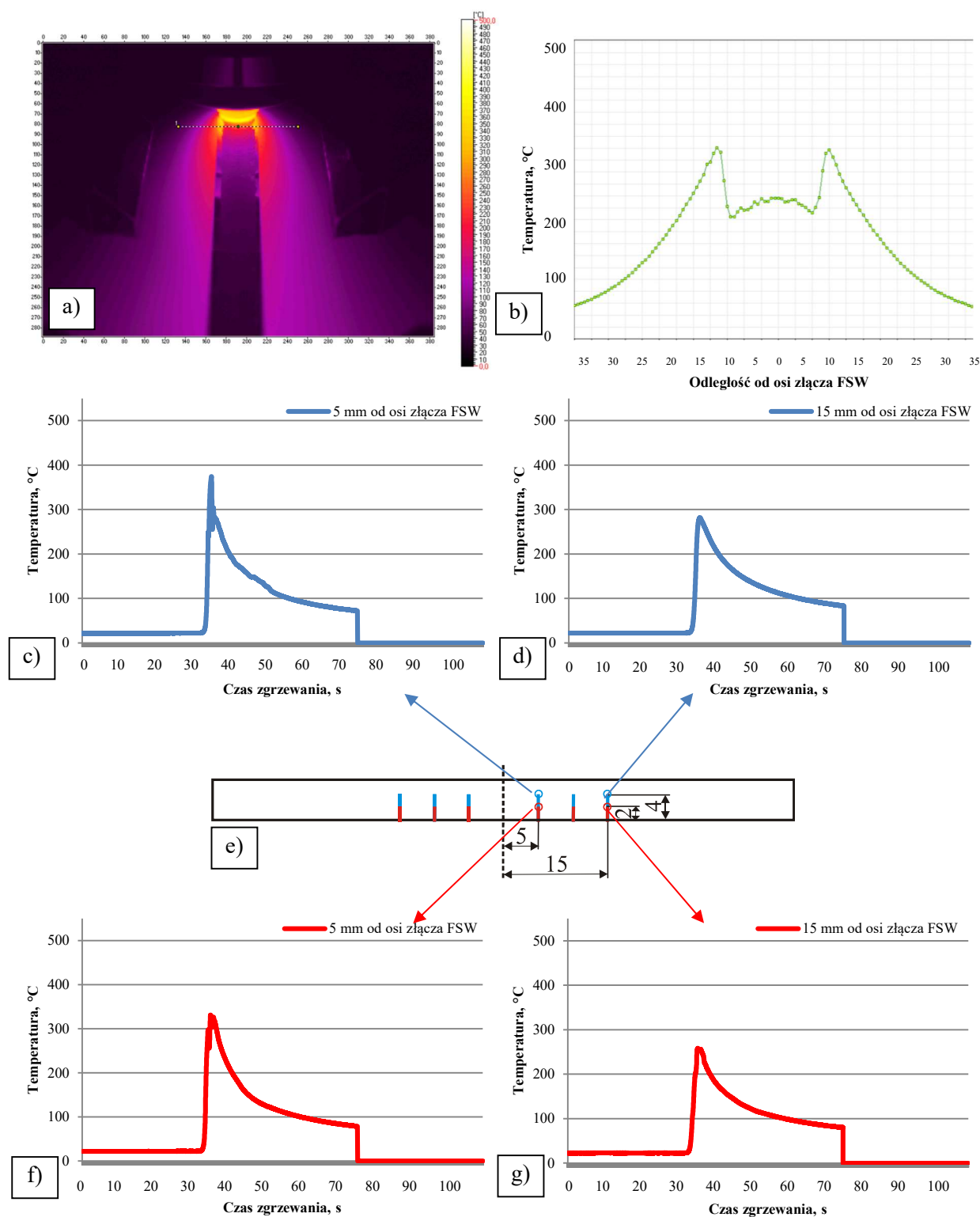


Rys. 60. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość 4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_0=900$  obr/min ,  $V_z=450$  mm/min

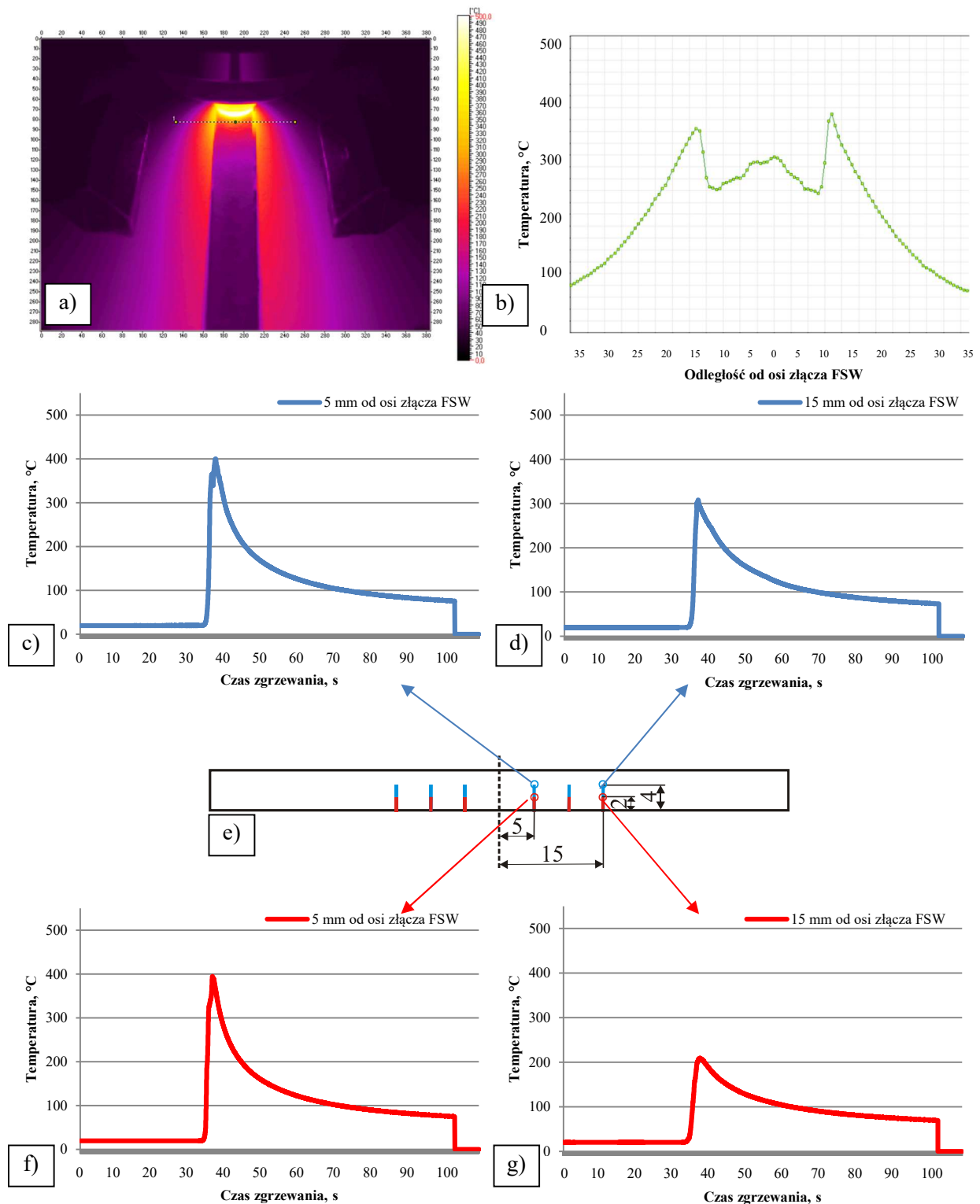


Rys. 61. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość 4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min ,  $V_z=450$  mm/min

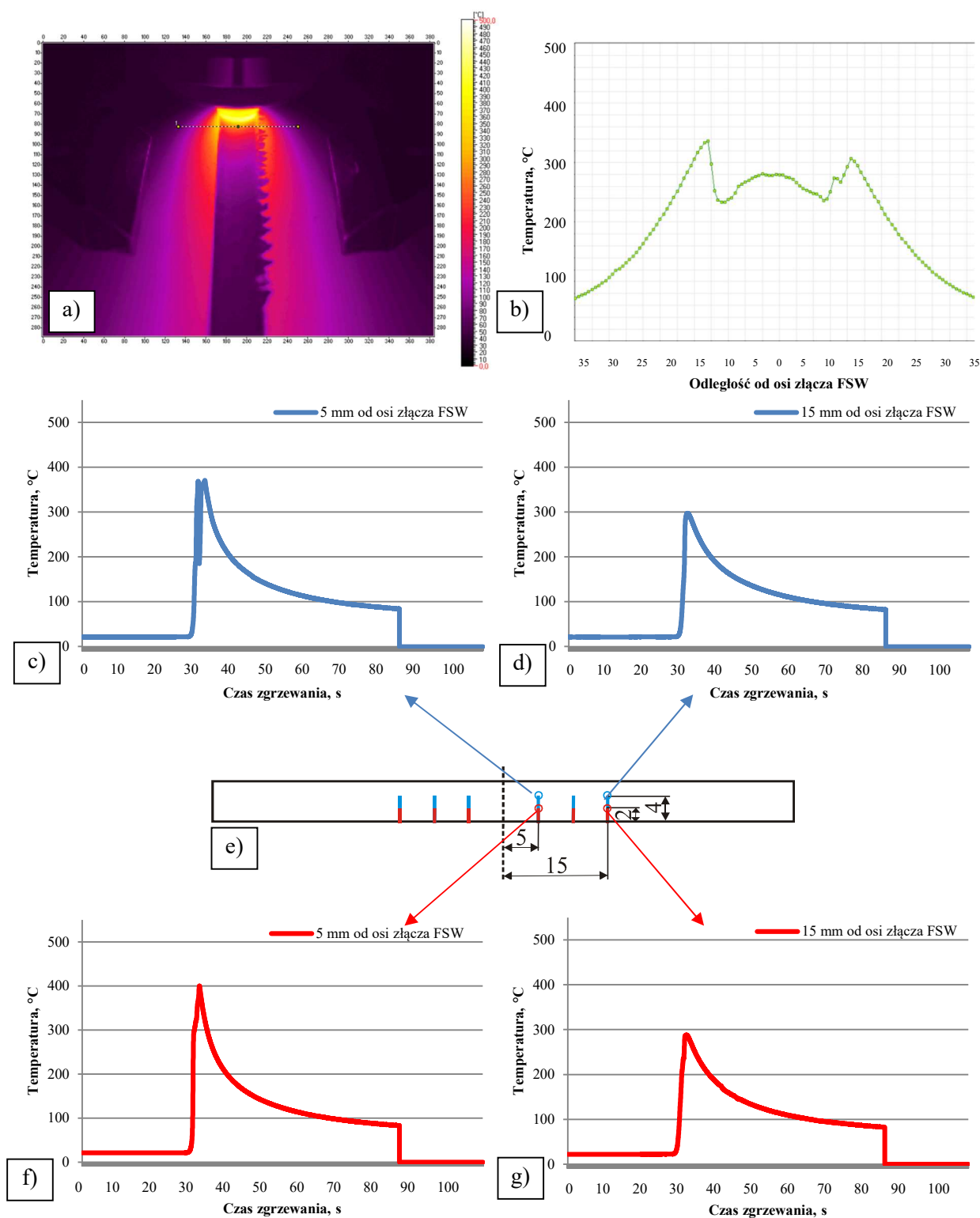




Rys. 62. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość 4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min



Rys. 63. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość 4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min



Rys. 64. Wyniki rozkładu temperatury na powierzchni złącza FSW oraz wewnątrz złącza:  
a) termogram obszaru zgrzewania, b) temperatura aktywnego obszaru zgrzewania,  
c) głębokość 2 mm, odległość 5 mm, d) głębokość 2 mm, odległość 15 mm,  
e) miejsca zamocowania termopar, f) głębokość 4 mm, odległość 5 mm, g) głębokość  
4 mm, odległość 15 mm. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min ,  $V_z=900$  mm/min

Na podstawie przeprowadzonych badań rozkładu temperatury w obszarze zgrzewania stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia nie zmienia się temperatura w środku złącza FSW. W każdym przypadku, zarówno przy zgrzewaniu z prędkością zgrzewania  $V_z=450$  mm/min (rys. 59÷61) jak i  $V_z=900$  mm/min (rys. 62÷64) średnia temperatura była na poziomie ok. 400°C. Niewielkie różnice w wartości temperatury na poziomie ok. kilkunastu °C mogą wynikać z różnic w usytuowaniu termopar wewnątrz złącza FSW.

Stwierdzono także, że wraz ze wzrostem odległości od osi złącza temperatura w każdym przypadku maleje. Niezależnie od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania tj. zarówno przy zgrzewaniu z prędkością  $V_z=450$  mm/min (rys. 59÷61) jak i z prędkością  $V_z=900$  mm/min (rys. 62÷64) obserwowano spadek temperatury o ok. 100°C wraz z oddaleniem się od osi złącza z 5 do 15 mm.

Analiza rozkładu temperatury, w zależności od parametrów zgrzewania FSW wskazuje, że nie ma znaczącej różnicy w temperaturze w zależności od głębokości usytuowania termopar wewnątrz złącza FSW (np. rys. 60).

Na podstawie wyników pomiaru temperatury na powierzchni złącza FSW stwierdzono, że pole temperatury po stronie lica i po stronie grani jest symetryczne (np. rys. 61). Ze względu na symetryczny rozkład temperatury obszaru zgrzewania wyniki przedstawiono tylko dla strony spływu złącza FSW (rys. 61). Nie stwierdzono zmian pola temperatury w obszarach, w których usytuowano uchwyty mocujące zgrzewane elementy.

Aby określić przemiany strukturalne podczas zgrzewania FSW przeprowadzono termiczną analizę różnicową (DTA – z ang. Differential Thermal Analysis).

Badania DTA wykonano na analizatorze termicznym SETSYS firmy Setaram. W celu przeprowadzenia badania wykorzystano głowicę TG-DTA dokonując pomiaru temperatury przemian fazowych w trakcie nagrzewania i chłodzenia stopu aluminium EN AW-6082. Do termicznej analizy różnicowej wykorzystano termoparę typu „S” Pt-Rh /Pt-Rh 10%. Materiał znajdował się w atmosferze obojętnej argonu (Ar 99,999%). Maksymalne temperatury nagrzewania oraz warunki badania ustalono wg następujących danych:

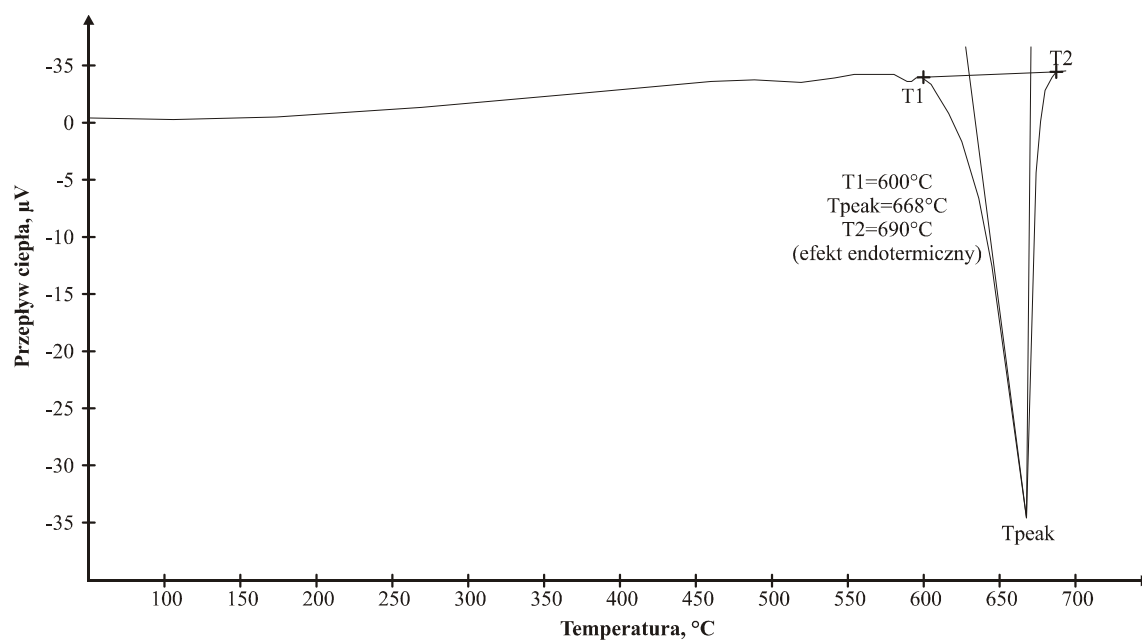
- temperatura nagrzewania: 700°C,
- szybkość nagrzewania: 10°C/min,
- atmosfera: Argon 99,999%,
- szybkość przepływu gazu: 1,35 l/h,
- rodzaj termopary piecowej: typ S (Pt-Rh 10%).

Pomiary temperatury początku i końca przemiany przeprowadzono metodą przecięcia dwóch stycznych („one set point”), zgodnie z przyjętą metodyką analizy DTA [92].

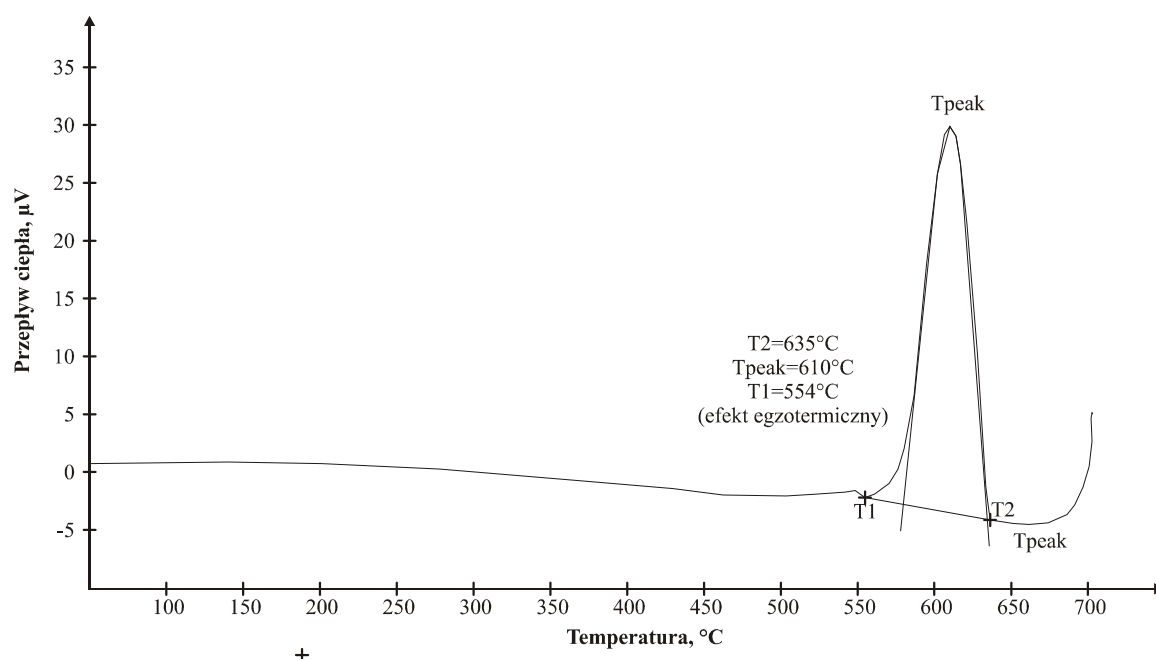
Badanie DTA polegało na pomiarze różnicy temperatury pomiędzy próbką badaną, a próbką wzorcową (w eksperymencie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) podczas nagrzewania i chłodzenia. Aparat wyposażony był w dwie termopary typu S o zakresie temperatury badania od 0 do 1600°C, który służyły do pomiaru różnicy temperatury obu próbek oraz temperatury w komorze pieca. Zmiany temperatur analizowano za pomocą sensora, a następnie w postaci sygnału elektrycznego przekazywano do układu pomiarowego. Wynikiem pomiaru jest krzywa termicznej analizy różnicowej (krzywa DTA). Pik endotermiczny powstaje wówczas, gdy temperatura badanej próbki jest niższa niż wzorcowa, zaś egzotermiczny pojawia się wtedy, gdy temperatura próbki badanej wzrasta powyżej temperatury próbki wzorcowej [92].

Dla badanego złącza wyznaczono charakterystyczne przemiany zachodzące w trakcie nagrzewania i chłodzenia. W trakcie nagrzewania zarejestrowano na krzywych DTA pik związany z początkiem pojawienia się kryształów fazy ciekłej (utrata stabilności) stopu ( $T_1$ ) w trakcie nagrzewania, temperaturę likwidus tj. początek topnienia odpowiadający maksimum na piku endotermicznym ( $T_{\text{peak}}$ ) oraz temperaturę topnienia stopu ( $T_2$ ) (rys. 65 i 66). Charakterystyczne temperatury przemian badanego stopu aluminium przedstawiono w tabelicy 15.

W trakcie nagrzewania widoczny jest niewielki pik występujący zaraz przed przemianą endotermiczną i odwrotnie w trakcie chłodzenia pik zaraz za przemianą egzotermiczną. Występowanie pików jest wynikiem powstawania faz np.  $\text{Mg}_2\text{Si}$  oraz  $\text{Al}_{0.095}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.74}\text{Si}_{1.606}$ .



Rys. 65. Krzywa DTA dla nagrzewania stopu aluminium EN AW-6082



Rys. 66. Krzywa DTA dla chłodzenia stopu aluminium EN AW-6082



Tablica 15.Charakterystyczne temperatury przemian badanego stopu poddanego chłodzeniu i nagrzewaniu

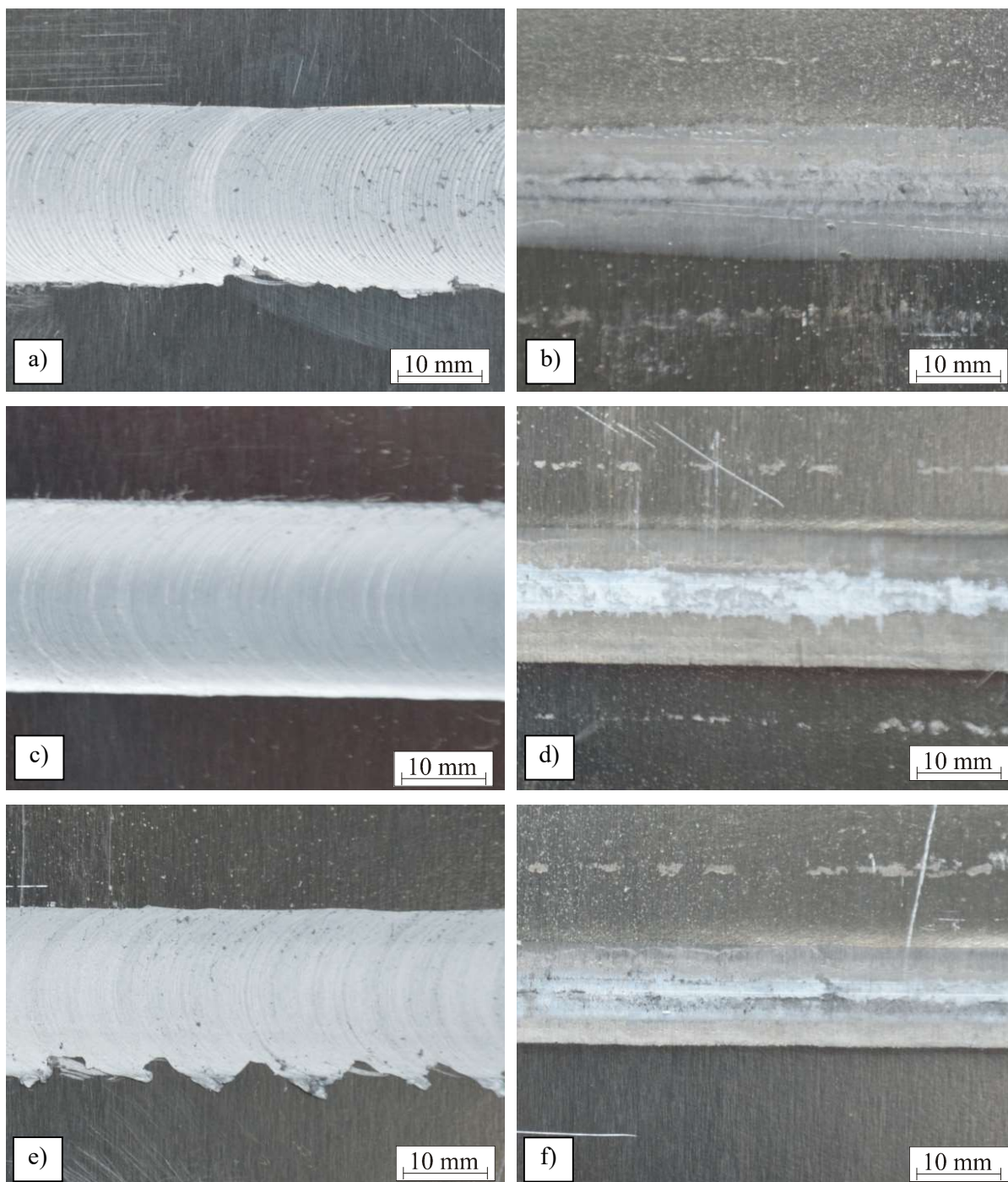
| Oznaczenie stopu aluminium | Temperatura początku pierwszej endotermicznej przemiany przy nagrzewaniu, °C, (-)               | Temperatura końca pierwszej endotermicznej przemiany przy nagrzewaniu, °C,(-)         | Temperatura początku pojawiania się fazy ciekłej, przy nagrzewaniu, °C, (T1) | Temperatura likwidus, (początku topnienia), przy nagrzewaniu, °C, T(peak) Tlik. | Temperaturę topnienia stopu przy nagrzewaniu (T2)                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| EN AW-6082                 | 570                                                                                             | 580                                                                                   | 600                                                                          | 668                                                                             | 690                                                                         |
|                            | Temperatura początku pojawiania się pierwszych kryształów fazy stałej przy chłodzeniu, °C, (T2) | Temperatura pocz. krzepnięcia (max. szybkości przemiany przy chłodzeniu, °C, (Tpeak.) | Temperatura solidus (końca krzepnięcia) przy chłodzeniu, °C, (Tsol./T1)      | Temperatura początku drugiej przemiany egzotermicznej przy chłodzeniu, °C, (-)  | Temperatura końca drugiej przemiany egzotermicznej przy chłodzeniu, °C, (-) |
| EN AW-6082                 | 635                                                                                             | 610                                                                                   | 554                                                                          | 552                                                                             | 545                                                                         |

Na podstawie wyników badań stwierdzono wydzielanie się faz międzymetalicznych które są wynikiem przemian stopu aluminium EN AW-6082 podczas nagrzewania i chłodzenia.

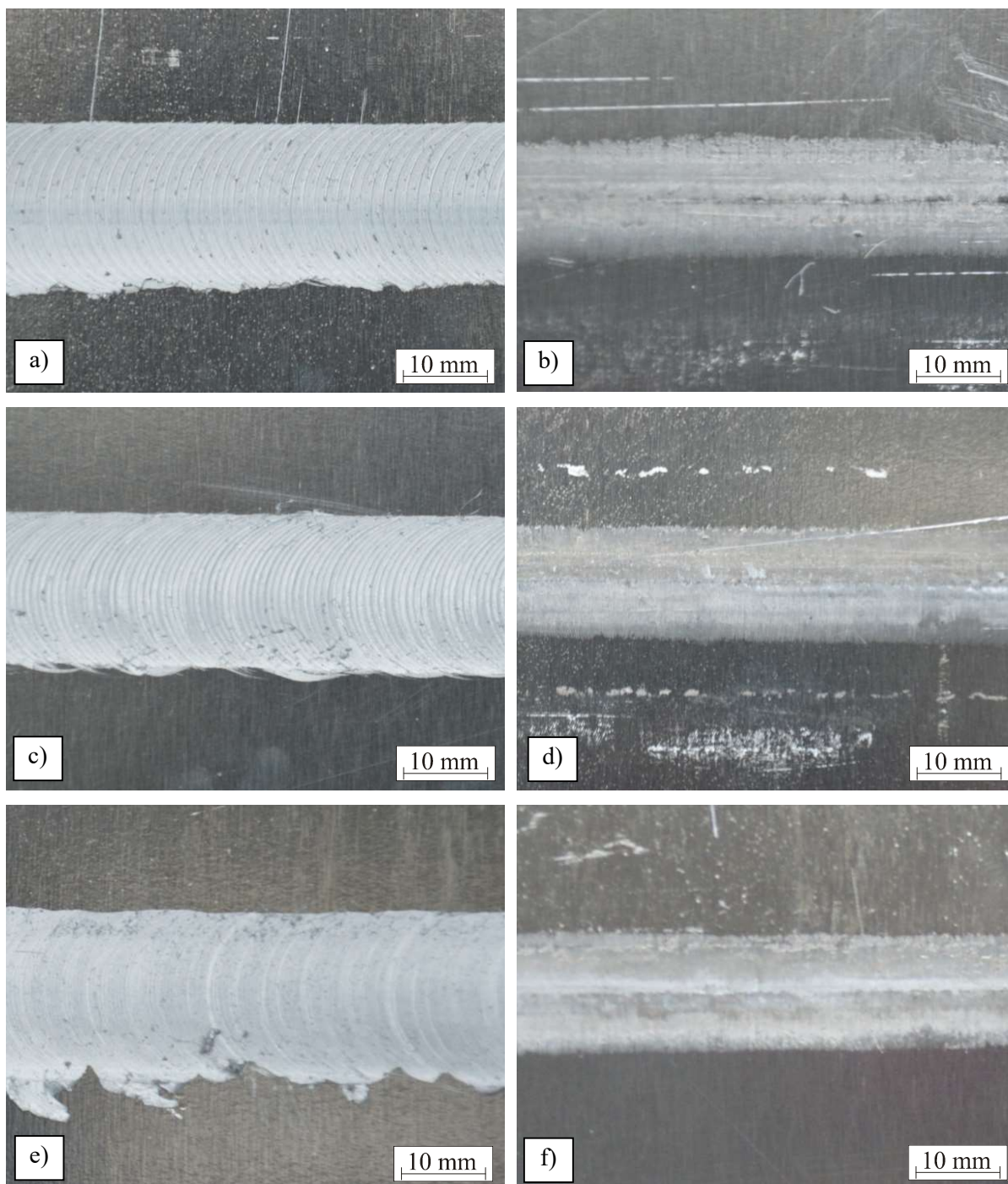
### 10.3. Wyniki badań struktury złącza FSW

#### 10.3.1. Ocena wizualna złączy FSW

Badania wizualne złączy FSW od strony lica i od strony grani przeprowadzono okiem nieuzbrojonym przy natężeniu światła powyżej 500 lx zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57]. Obserwowano obszar przyległy do złącza tj. obszar w odległości 50 mm od osi złącza, zarówno po stronie natarcia jak i po stronie spływu. Badania wykonano w celu określenia poziomu akceptacji złączy oraz oceny wpływu prędkości obrotowej narzędzia i prędkości zgrzewania na kształt złączy FSW. Przykładowe wyniki badań wizualnych dla różnych parametrów zgrzewania pokazano na rys. 61 oraz 62.



Rys. 67. Złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 wykonane z prędkością zgrzewania  $V_z=450$  mm/min: a) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=450$  obr/min, b) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=450$  obr/min, c) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=900$  obr/min, d) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=900$  obr/min, e) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=1800$  obr/min, f) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=1800$  obr/min



Rys. 68. Złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 wykonane z prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min: a) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=450$  obr/min, b) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=450$  obr/min, c) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=900$  obr/min, d) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=900$  obr/min, e) lico złącza, prędkość obrotowa  $V_o=1800$  obr/min, f) grań złącza, prędkość obrotowa  $V_o=1800$  obr/min,

Wyniki badań wizualnych świadczą o prawidłowym ukształtowaniu złączy FSW z nielicznymi niezgodnościami sklasyfikowanymi zgodnie z rys. 23. Lica złączy różnią się od siebie w zależności od prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania. Przy prędkościach obrotowych narzędzia 450 i 1800 obr/min pojawiła się większa wypływka po stronie spływu. Wypływkę obserwowano zarówno przy zgrzewaniu z prędkością 450 jak i 900 mm/min. Złącza te pokazano na rys. 67a, e oraz na rys. 68a, e. Złącza, które wykonano z prędkością obrotową narzędzia 900 obr/min cechowały się brakiem wypływki (rys. 67c) lub wypływka była najmniejsza ze wszystkich złączy (rys. 68c). Stwierdzono, że im większa prędkość obrotowa narzędzia tym materiał wypływki jest bardziej oddalony od końcowego obszaru oddziaływania wieńca opory po stronie spływu. Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia (energii zgrzewania) wpływa na stopień uplastycznienia zgrzewanego materiału, a tym samym na zwiększenie wielkości wypływki oraz odległości na którą odkłada się materiał poza strefę oddziaływania wieńca opory (rys. 67e, 68e).

Badania wizualne złączy od strony lica wskazują na lokalne występowanie łusek (rys. 67a, 68e). Nie wpływa to negatywnie na jakość złączy. Jest to związane z miejscowym „wyciskaniem” zgrzewanego materiału spod narzędzia zgrzewającego. We wszystkich badanych złączach nie obserwowano występowania niezgodności typu zbyt duże pocienienie zgrzewanego materiału (rys. 67 i 68).

Zwiększenie prędkości zgrzewania z 450 do 900 mm/min wpłynęło na odległość pomiędzy kolejnymi półokręgami na licu złącza co świadczy, że charakter powstawania wypływek jest podobny dla każdej porównywanej prędkości obrotowej narzędzia (rys. 67a, 68a, 67e, 68e).

W przypadku wszystkich złączy FSW grań złącza jest prawidłowa (rys. 67b, d, f, rys. 68b, d, f) i spełnia wymagania poziomu akceptacji „B” wg PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57]. Nie stwierdzono wpływu parametrów procesu FSW tj. prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania na budowę grani złączy oraz na szerokość strefy wpływu ciepła (rys. 67b, 68b).

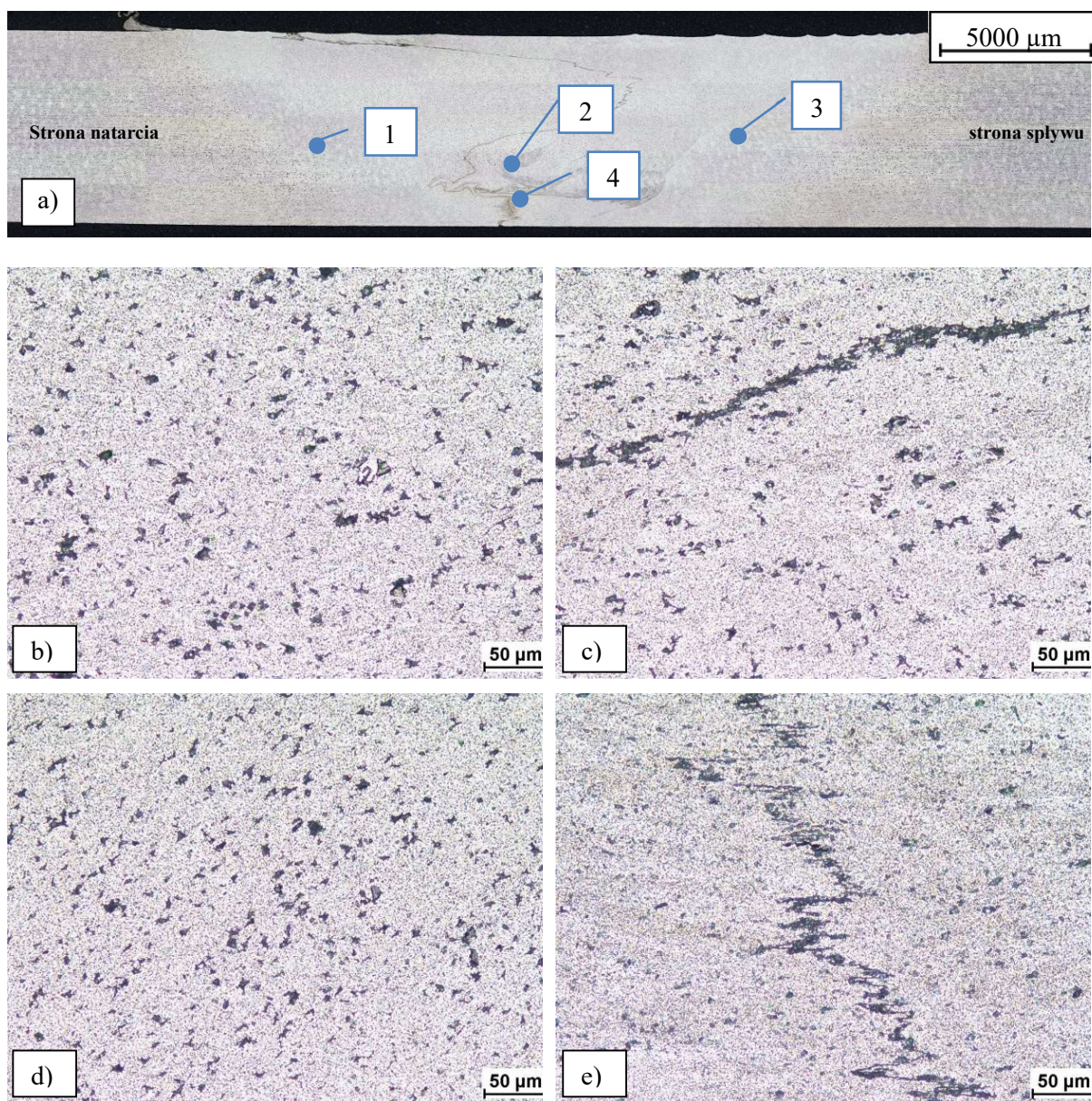
Wszystkie wykonane złącza FSW zakwalifikowano, zgodnie z normą PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57], do poziomu akceptacji „B”.

### **10.3.2. Ocena makro- i mikrostruktury złączy FSW**

Badania makro i mikrostruktury wykonano na zglądach poprzecznych do kierunku zgrzewania, zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 8. Badania prowadzono według zaleceń PN-EN ISO 17639:2022-07 [90] na mikroskopie świetlnym Eclipse MA200 firmy Nikon.

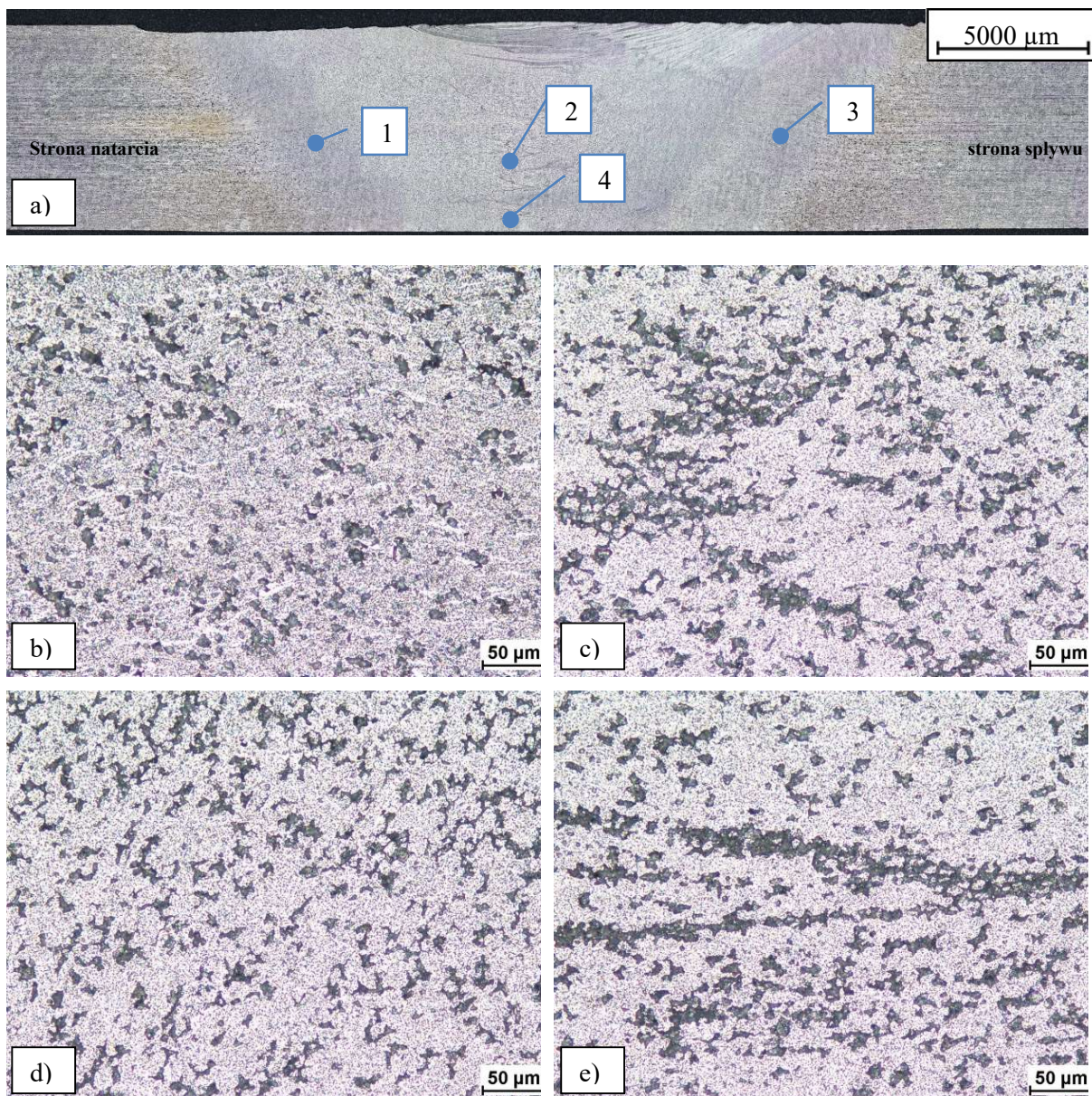


W celu ujawnienia struktury zgłądy trawiono chemicznie w odczynniku na bazie kwasu odczynnika Kellera. Na rys. 69 - 74 przedstawiono przykładowe wyniki badań metalograficznych makro i mikrostruktury złączy FSW.



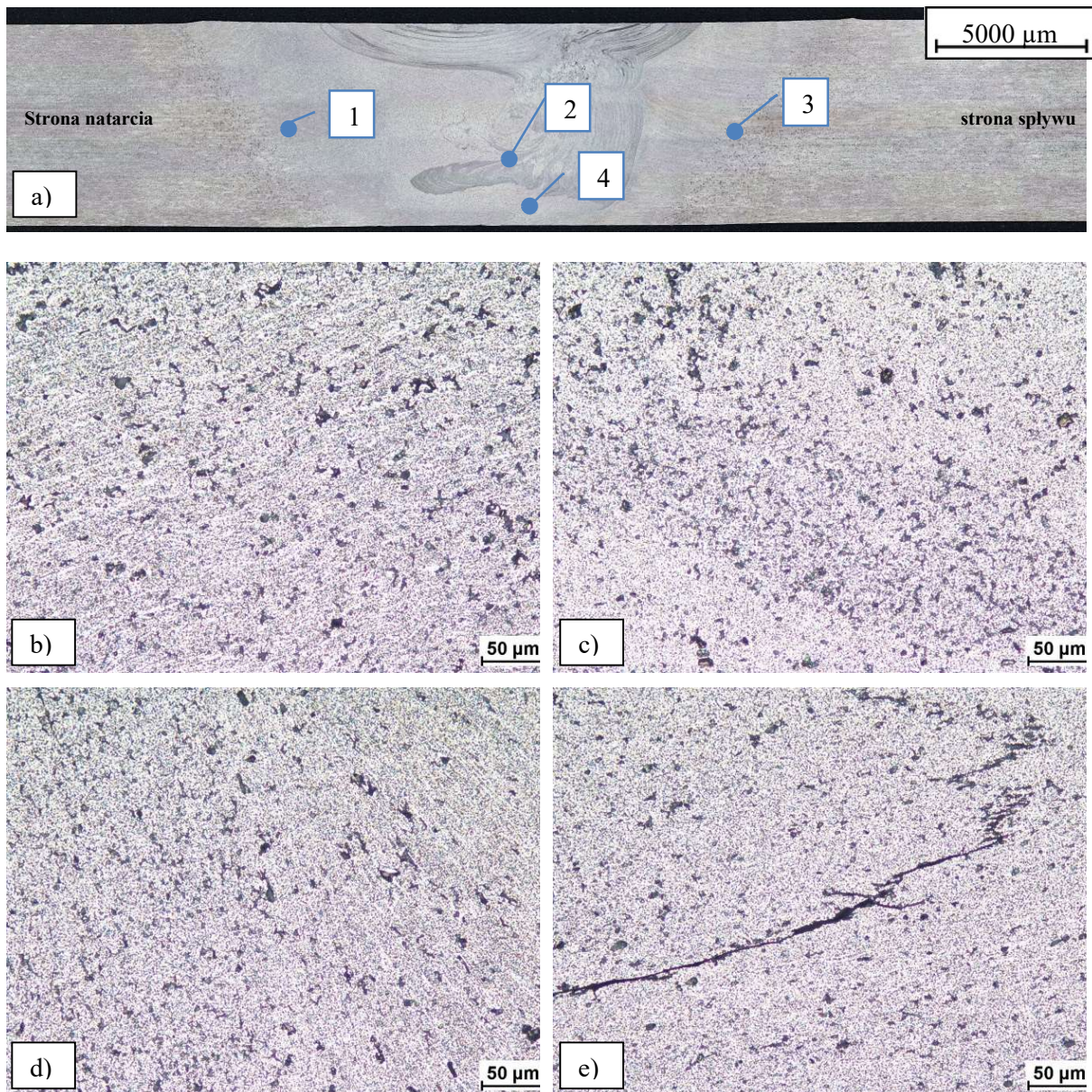
Rys. 69. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)





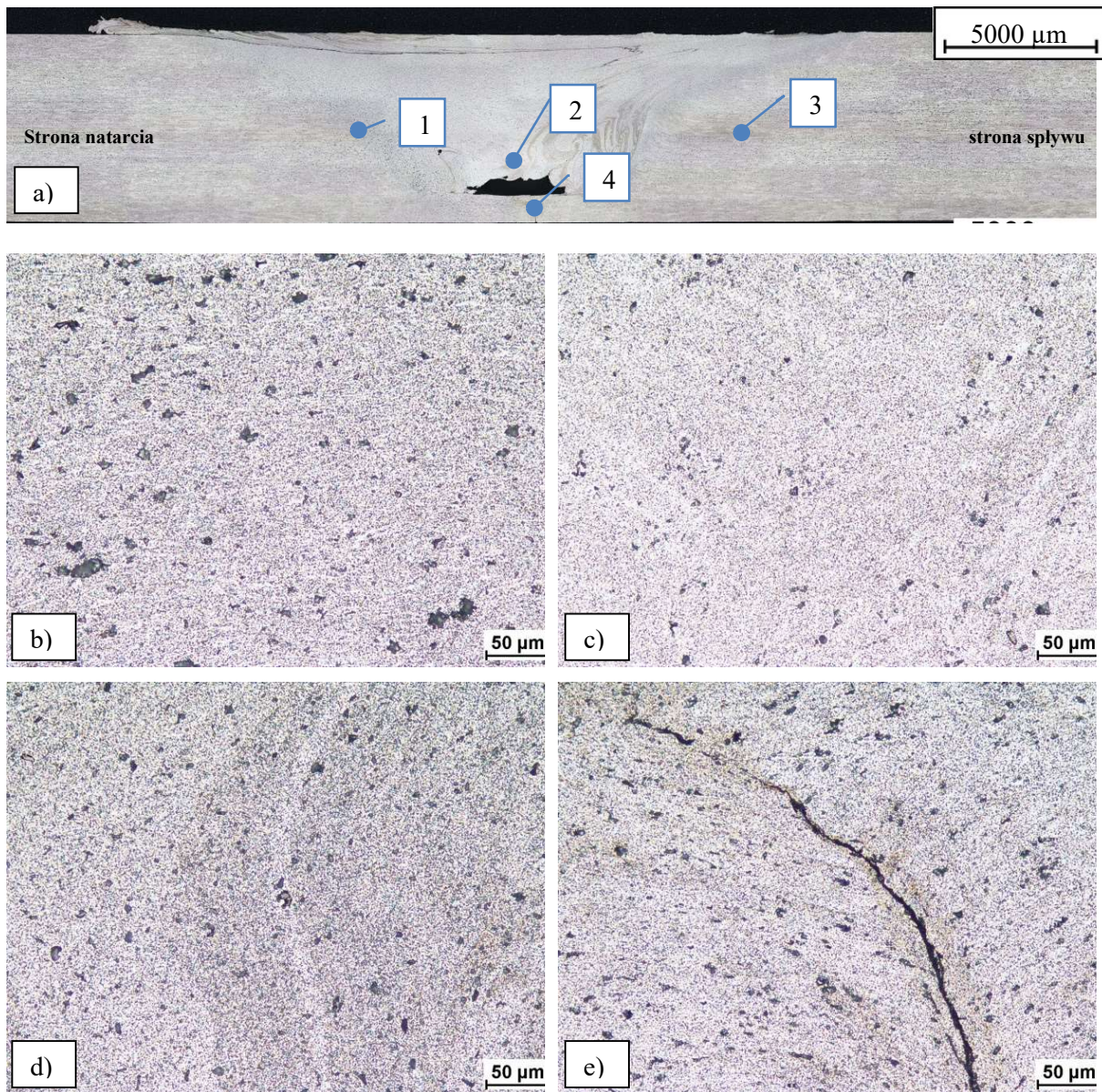
Rys. 70. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)





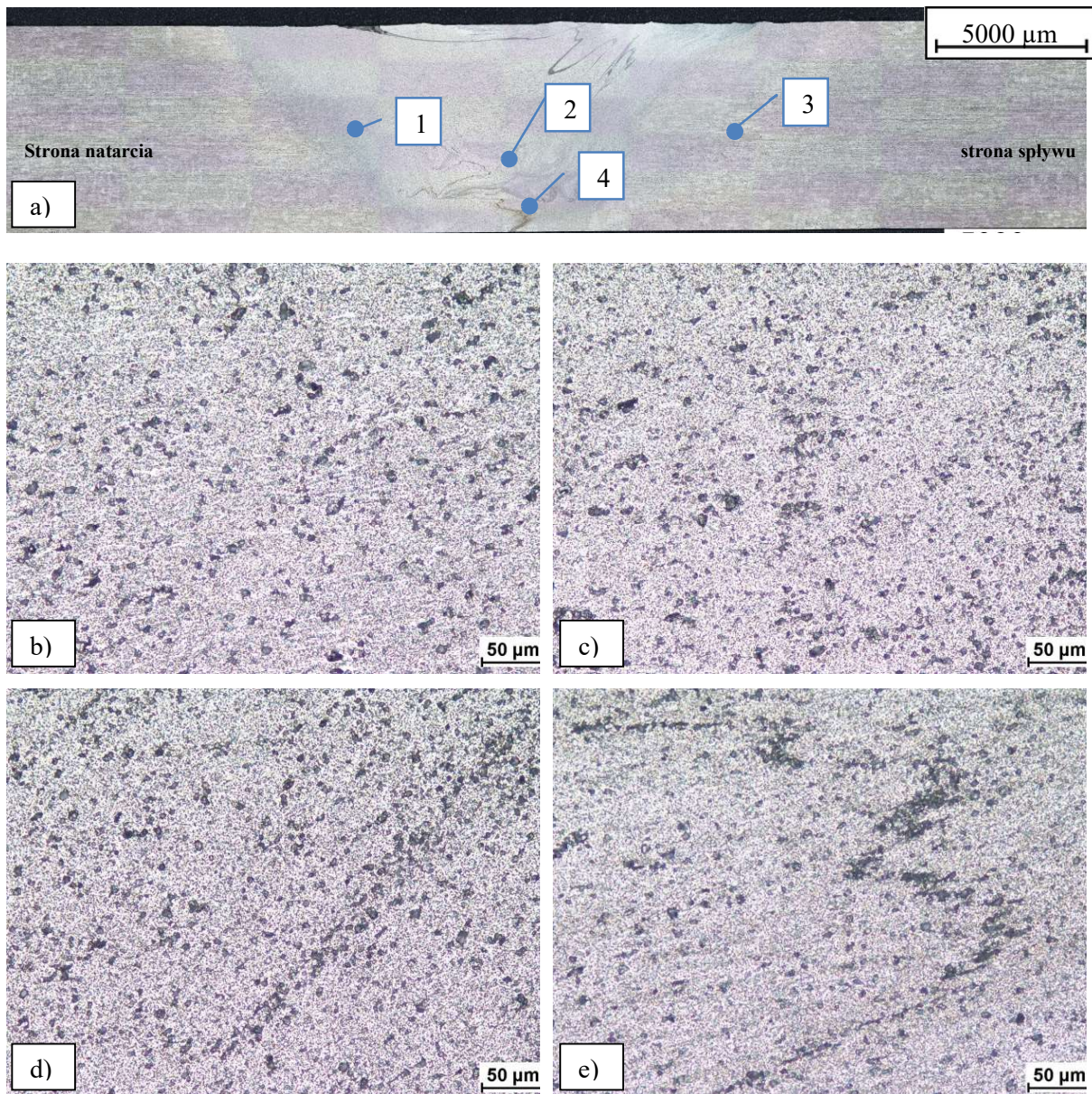
Rys. 71. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)





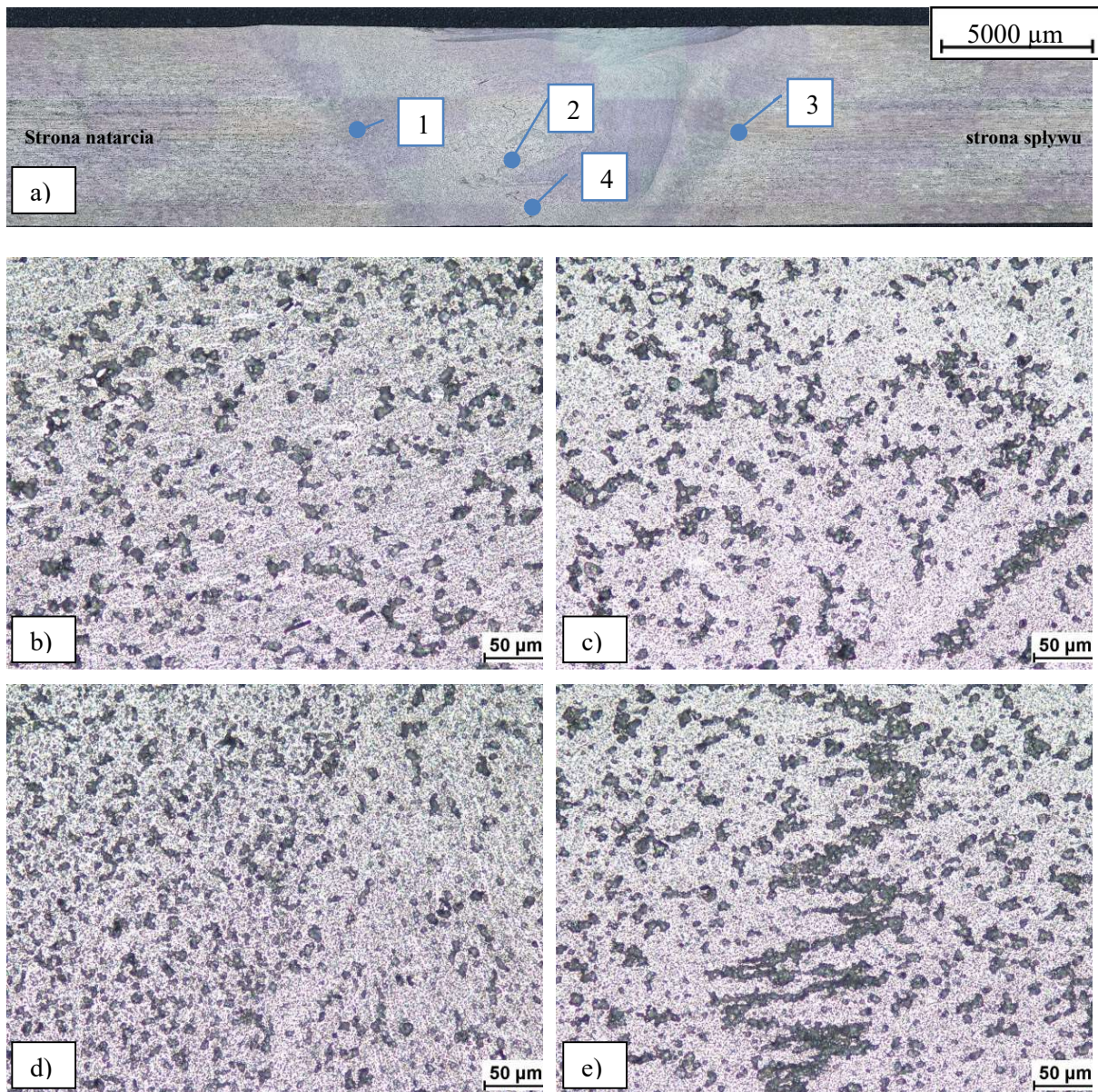
Rys. 72. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)





Rys. 73. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)





Rys. 74. Struktura złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) makrostruktura całego złącza, b) mikrostruktura SWC po stronie natarcia (1), c) mikrostruktura jądra zgrzeiny (2), d) mikrostruktura SWC po stronie spływu (3), e) mikrostruktura obszaru grani złącza (4)

Wyniki badań makrostruktury złączy FSW ujawniły różnice w strukturze w poszczególnych obszarach złącza w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Przy prędkości zgrzewania  $V_z=450$  mm/min oraz przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=450$  obr/min struktura strefy wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 69b) i po stronie spływu (rys. 69c) jest podobna i rozdrobniona w stosunku do struktury materiału podstawowego. W strefie jądra zgrzeiny pojawia się linia tlenków związana z odkładaniem się

kolejnych partii materiału zgrzeiny (rys. 69c). Struktura jądra zgrzeiny jest podobna do struktury w strefie wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 69b) oraz w strefie wpływu ciepła po stronie spływu (rys. 69d). Obszar grani jest najbardziej rozdrobnionym obszarem tego złącza (rys. 69e). Ujawniono zygzakowatą linię tlenków związaną z oddziaływaniem końcowej części trzpienia narzędzia (z ang. kissing bonds). Ten rodzaj niezgodności budowy wewnętrznej złącza jest niezgodnością łączenia w stanie stałym, w którym dwa materiały stykają się, ale nie ma połączenia trwałego.

Przy większej prędkości obrotowej narzędzia ( $V_o=900$  obr/min) struktura złącza jest mniej rozdrobniona przy czym w obszarze strefy wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 70b) i po stronie spływu (rys. 70d) struktura jest podobna. W strefie jądra zgrzeiny struktura złącza charakteryzuje się budową amorficzną (rys. 70c). W grani nie ujawniono śladów niezgodności w postaci linii „braku zgrzania” materiałów. Obserwowano przeplatające się linie odkładania poszczególnych partii mieszanego materiału (rys. 70e).

Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia do 1800 obr/min powoduje zwiększenie ziarna w porównaniu do złączy wykonanych z mniejszymi prędkościami obrotowymi narzędzia (rys. 69 i rys. 70). Struktura złącza w obszarach strefy wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 71b), w jądrze zgrzeiny (rys. 71c) oraz strefy wpływu ciepła po stronie spływu (rys. 71d) jest podobna. Ziarna są zbliżonej wielkości przy czym charakter ułożenia ziaren w każdej ze stref jest inny. Po stronie grani złącza ujawniono niezgodność w postaci występowania linii tlenków, której szerokość zwiększa się w kierunku grani (rys. 71e). Jest to związane z brakiem dostatecznego wymieszania łączonych materiałów. Prędkość obrotowa 1800 obr/min rozdrabnia strukturę materiału ale jest zbyt duża do pełnego uplastycznienia łączonych materiałów.

Wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej narzędzia zwiększa się wielkość ziarna przy stałej prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min (rys. 72 - 74). Przy najmniejszej prędkości obrotowej narzędzia tj. 450 obr/min w dolnej części jądra zgrzeiny ujawniono pustkę (rys. 72a). Jej występowanie jest związane ze zbyt płytkim zagłębieniem narzędzia podczas zgrzewania, co spowodowało nadlew materiału na powierzchni złącza (rys. 72a). W strefie wpływu ciepła po stronie natarcia pojawiają się obszary o większym ziarnie (rys. 72b). Struktura jądra zgrzeiny jest jednorodna i drobnoziarnista (rys. 72c). Po stronie spływu ujawniono pionowe obszary przejścia struktury centralnego obszaru zgrzeiny w strefę wpływu ciepła po stronie spływu (rys. 72d). W grani złącza ujawniono linię „braku zgrzania” (rys. 72e).

Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia do 900 obr/min wpłynęło na ujednorodnienie struktury w złączu. W strefie wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 73b),

w jądrze zgrzeiny (rys. 73c) oraz w strefie wpływu ciepła po stronie spływu (rys. 73d), struktura złącza jest gruboziarnista w porównaniu ze zgrzewaniem z prędkością obrotową narzędzia 450 obr/min (rys. 72b-d). Po stronie spływu widoczne jest przejście centralnego, uplastycznionego obszaru zgrzewania w strefę wpływu ciepła (rys. 73d). W tym obszarze grani pojawia się zygzakowata linia tlenków związana z niepełnym uplastycznieniem łączonych materiałów (rys. 73e).

Przy największej prędkości obrotowej narzędzia (1800 obr/min) zwiększa się ziarno (np. rys. 74b) w stosunku do wielkości ziarna w złączach wykonanych z mniejszymi prędkościami obrotowymi narzędzia 450 i 900 obr/min (rys. 72b i 73b). W przypadku tych złączy struktura materiału w strefie wpływu ciepła po stronie natarcia oraz w jądrze zgrzeiny jest podobna (rys. 74b i c). W strefie wpływu ciepła po stronie spływu widoczna jest linia przejścia pomiędzy centralnym obszarem złącza (struktura gruboziarnista), a strefą wpływu ciepła (drobnoziarnista) (rys. 74d). W złączu po stronie spływu obserwowano najszerszą, zygzakowatą linię tlenków, co może świadczyć o nieprawidłowym wymieszaniu materiałów (rys. 74e).

Analiza makrostruktur wykazała, że zmienia się struktura złączy wraz ze zwiększeniem prędkości zgrzewania z  $V_z=450$  mm/min do  $V_z=900$  mm/min. Przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=450$  obr/min i wyższej prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min obserwowano zmniejszenie wielkości ziarna w każdym z badanych obszarów złącza. Widoczna jest także różnica w kształcie linii tzw. „braku zgrzania”. W przypadku niższej prędkości zgrzewania  $V_z=450$  mm/min jest ona zygzakowata (rys. 69a), z kolei przy wyższej prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min przybiera ona kształt krzywej (np. rys. 72a).

Przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min widoczna jest różnica w budowie strukturalnej złączy. Przy zgrzewaniu z niższą prędkością zgrzewania  $V_z=450$  mm/min wyraźnie widoczne są obszary mieszania i odkładania się partii zgrzewanych materiałów (rys. 70), co jest mało widoczne w przypadku złącza zgrzewanego z wyższą prędkością zgrzewania tj.  $V_z=900$  mm/min (rys. 73). Nie obserwowano natomiast różnic w budowie złączy na zdjęciach mikrostruktur w tych samych porównywanych obszarach złącza.

Zgrzewanie z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min uwidacznia wyraźną różnicę w budowie złącza FSW. Przy niskiej prędkości zgrzewania tj.  $V_z=450$  mm/min obserwowano wyraźnie mniejsze ziarno co jest związane z cyklem cieplnym zgrzewania przy wysokiej prędkości obrotowej narzędzia i niskiej prędkości zgrzewania. Widoczne są charakterystyczne obszary złącza, takie jak np. jądro zgrzeiny (rys. 71). Zwiększenie prędkości

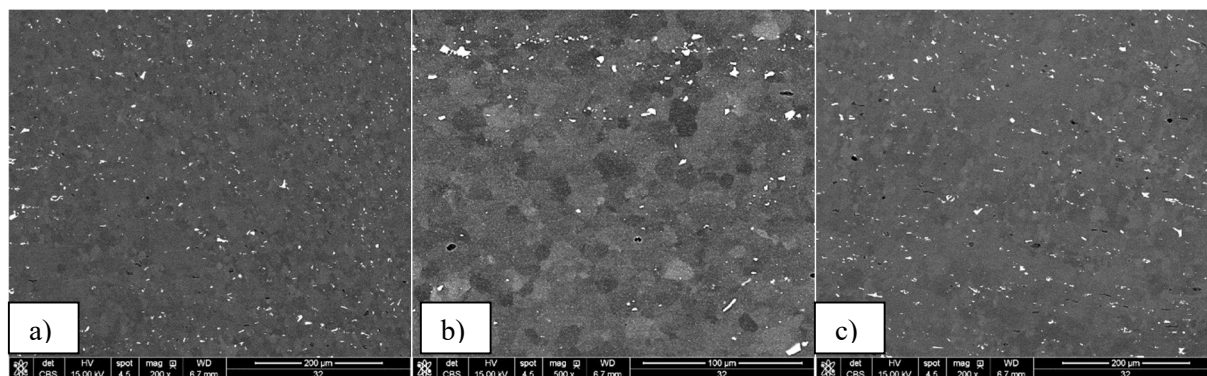


zgrzewania do  $V_z=900$  mm/min uwidoczniło strukturę złącza w postaci większych ziaren w każdej z badanych stref złącza (rys. 74).

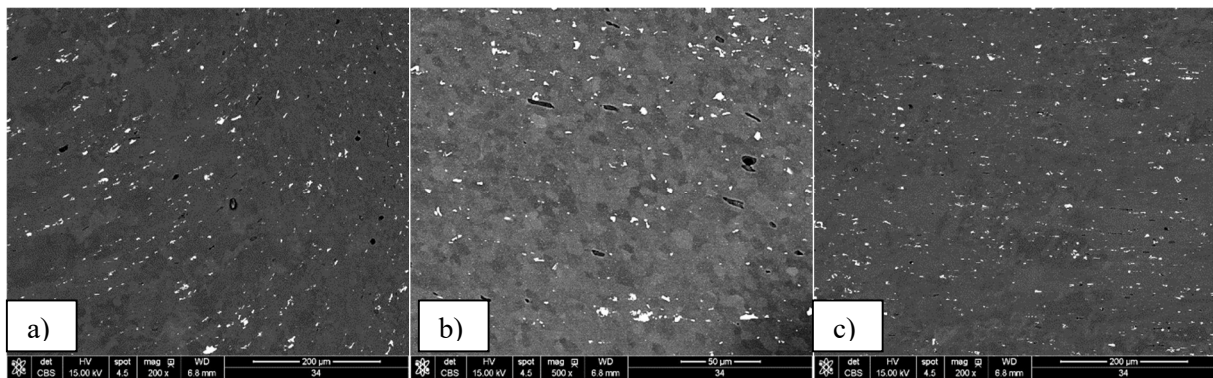
**Analiza struktur złączy FSW wykonanych z zastosowaniem dwóch prędkości zgrzewania (450 i 900 mm/min) oraz trzech prędkości obrotowych narzędzia (450, 900 i 1800 obr/min) wskazuje, że najlepszą strukturą charakteryzuje się złącze wykonane prędkością zgrzewania 900 mm/min oraz prędkością obrotową narzędzia 900 obr/min (rys. 73).**

Uzupełnieniem badań strukturalnych wykonanych na mikroskopie świetlnym były badania na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Przykładowe wyniki badań mikrostruktury SEM wybranych złączy FSW pokazano na rys. 75÷77.

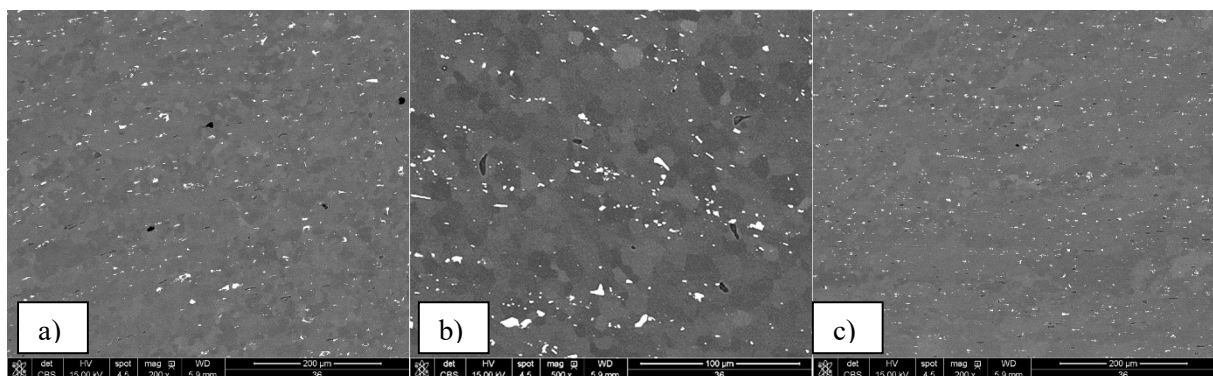
W celu ilościowego opisu wielkości i kształtu ziaren w złączach, na przygotowanych wybranych próbkach przeprowadzono obserwacje z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Hitachi SU-70, przy napięciu 5 kV. Analiza ilościowa mikrostruktury obejmowała wyznaczenie średniej wielkości ziaren ( $d_2$ ) w każdym z analizowanych obszarów (rys. 78). Do oceny średniej wielkości ziaren przyjęto średnią średnicę ekwiwalentną (odpowiednik średnicy koła o powierzchni równej powierzchni analizowanego ziarna). W przypadku próbek z obszarów o strukturze pasmowej do analizy stereologicznej wyznaczano średnią szerokość pasm ( $d_p$ ). Przykładowe zdjęcia mikrostruktury wraz z wynikami średniej wielkości ziaren i pasm zamieszczono w tablicy 16.



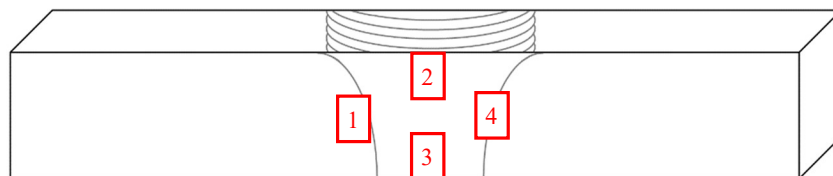
Rys. 75. Mikrostruktura wybranego złącza FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min: a) strona natarcia, b) strefa mieszania; c) strona spływu



Rys. 76. Mikrostruktura wybranego złącza FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) strona natarcia, b) strefa mieszania; c) strona spływu



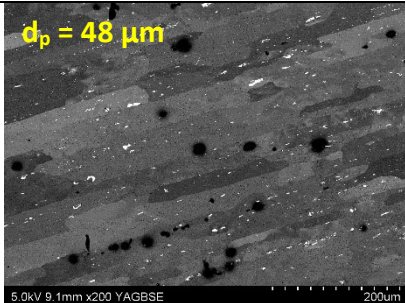
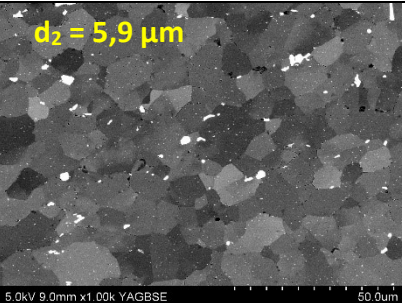
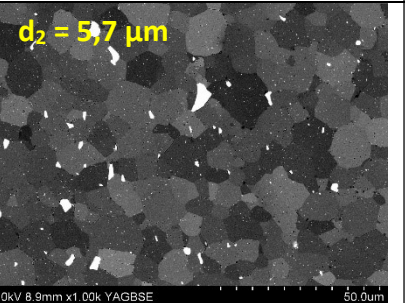
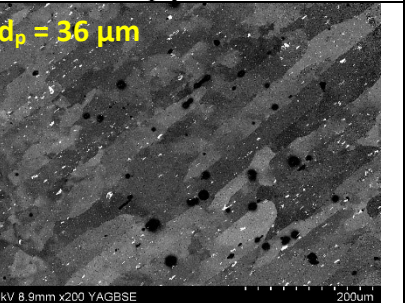
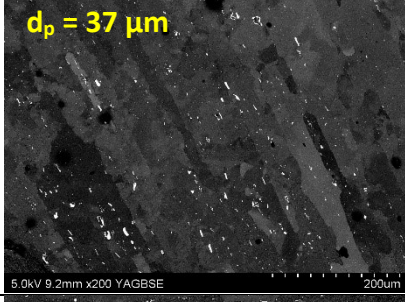
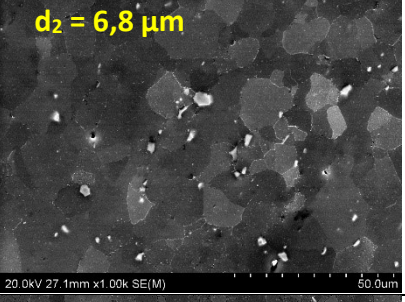
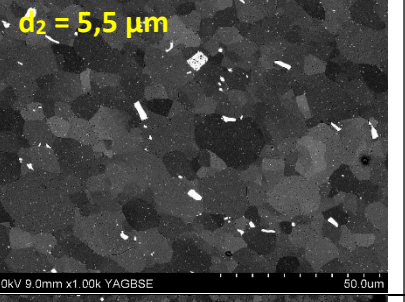
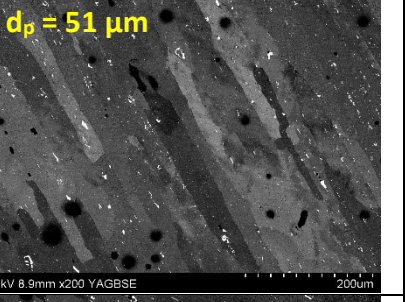
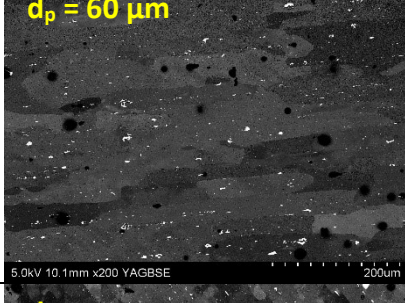
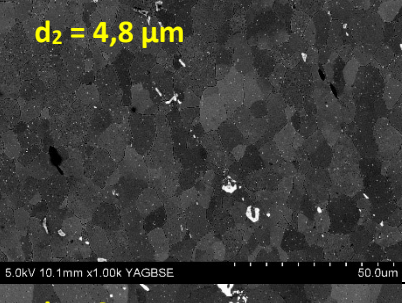
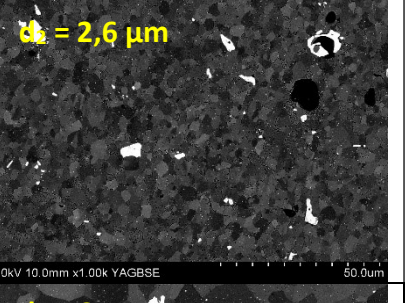
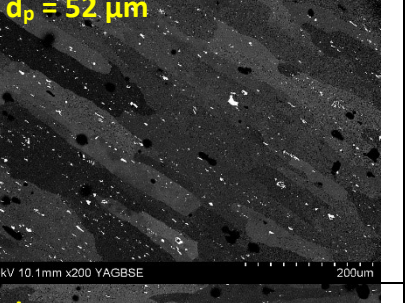
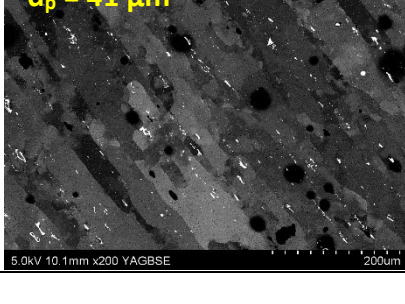
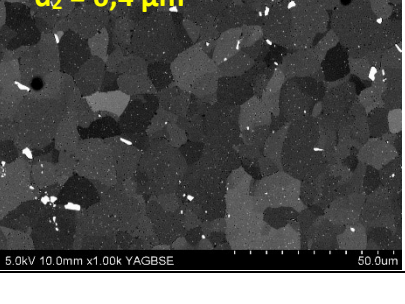
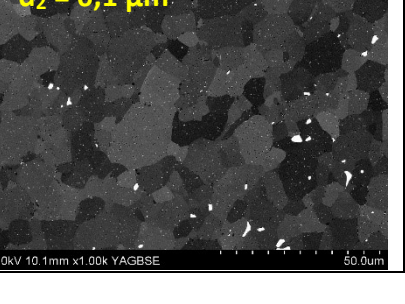
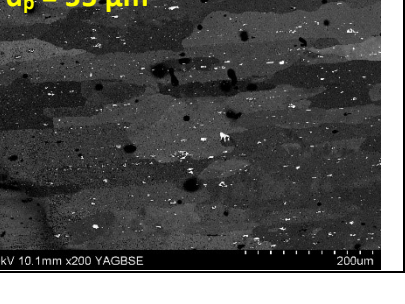
Rys. 77. Mikrostruktura wybranego złącza FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) strona natarcia, b) strefa mieszania; c) strona spływu



Rys. 78. Schemat próbki przeznaczonej do badań z oznaczeniem miejsc wykonanych pomiarów, (1 – strefa wpływu ciepła po stronie natarcia, 2 – strefa odkształcona termomechanicznie, 3 – strefa mieszania, 4 – strefa wpływu ciepła po stronie spływu)



Tabela 16. Wyniki ilościowej oceny wielkości ziaren w złączach FSW w zależności od wybranego zakresu parametrów

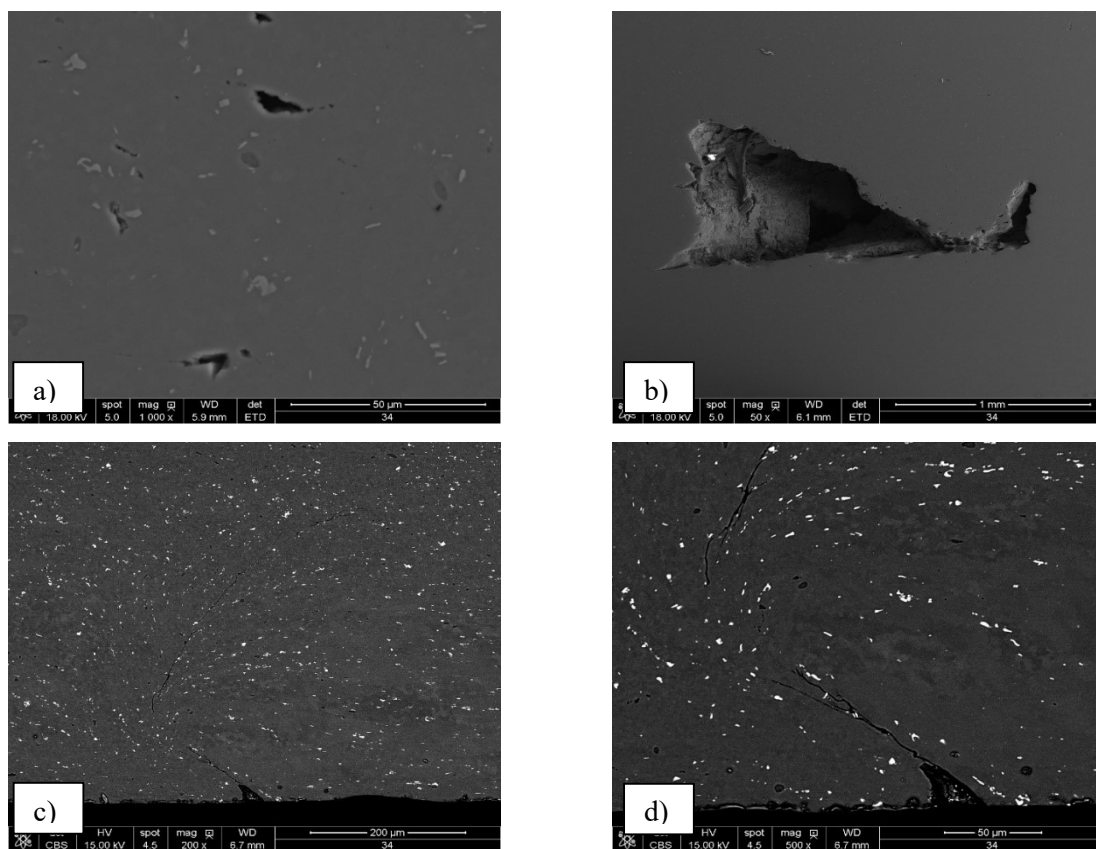
|                                              | 1 – strefa wpływu ciepła po stronie natarcia                                                            | 2 – strefa odkształcona termomechanicznie                                                                 | 3 – strefa mieszania                                                                                       | 4 – strefa wpływu ciepła po stronie spływu                                                                |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| p36, $V_o=1800$ obr/min,<br>$V_z=900$ mm/min | <br>$d_p = 48 \mu m$   | <br>$d_2 = 5,9 \mu m$   | <br>$d_2 = 5,7 \mu m$   | <br>$d_p = 36 \mu m$   |
| p35, $V_o=900$ obr/min,<br>$V_z=900$ mm/min  | <br>$d_p = 37 \mu m$   | <br>$d_2 = 6,8 \mu m$   | <br>$d_2 = 5,5 \mu m$   | <br>$d_p = 51 \mu m$   |
| p34, $V_o=450$ obr/min,<br>$V_z=900$ mm/min  | <br>$d_p = 60 \mu m$  | <br>$d_2 = 4,8 \mu m$  | <br>$d_2 = 2,6 \mu m$  | <br>$d_p = 52 \mu m$  |
| p32, $V_o=900$ obr/min,<br>$V_z=450$ mm/min  | <br>$d_p = 41 \mu m$ | <br>$d_2 = 6,4 \mu m$ | <br>$d_2 = 6,1 \mu m$ | <br>$d_p = 55 \mu m$ |

Analiza wyników obserwacji struktury złączy FSW ujawniła w strefie wpływu ciepła od strony natarcia oraz strony spływu wydłużone, znacznie odkształcone ziarna z wydzieleniami faz międzymetalicznych, które zostały przemieszczone zgodnie z kierunkiem odkształcenia materiału (rys. 75a÷77a). Analiza stereologiczna pasm wskazuje na ich średnią szerokość w zakresie  $35\div 60\text{ }\mu\text{m}$ , natomiast struktura pasmowa jest niejednorodna (rys. 78, pkt. 1 i 4, tablica 16). Na podstawie przeprowadzonych obserwacji można zauważyć wyraźne pasmowe ułożenie wydzielen pierwotnych wzdłuż pasm, widoczne są również miejsca fragmentacji wydzielen pierwotnych, także uporządkowane wzdłuż pasm (tablica 16). W strefie odkształconej termomechanicznie oraz strefie mieszania złącza obserwowane ziarna są równoosiowe, mniejsze niż w materiale rodzimym z licznymi wydzieleniami faz międzymetalicznych, które można skwalifikować w dwóch grupach wielkości wydzielen, tj. duże wydzielania oraz rozmieszczone równomiernie bardzo drobne wydzielania (rys. 75b÷77b). Analiza mikrostruktury w tych strefach (rys. 78, pkt. 2 i 3, tablica 16) wykazała zanik struktury pasmowej, widoczne są ziarna zbliżone do równoosiowych. Dla każdej z próbek mikrostruktura jest jednorodna o średniej wielkości ziaren ok  $5\div 6\text{ }\mu\text{m}$ . Wyznaczone wartości  $d_2$  wskazują na mniejszą wielkość ziarna w strefie mieszania (rys. 78, pkt. 3, tablica 16). W przypadku próbki p34 odnotowano znacznie mniejsze wielkości ziaren w strefie mieszania ( $2,6\text{ }\mu\text{m}$ ) w porównaniu do pozostałych stanów materiału. W obszarze strefy mieszania obserwuje się znacznie mniej obszarów fragmentacji dużych wydzielen.

Natomiast od strony spływu struktura złącza FSW składa się wydłużonych, rozdrobnionych ziaren roztworu stałego oraz rozdrobnionych wydzielen faz międzymetalicznych (rys. 75c÷77c). Nie ujawniono znaczących różnic w strukturze pomiędzy złączami wykonanymi w badanym zakresie parametrów technologicznych.

Obserwowano również we wszystkich złączach drobne nieciągłości strukturalne związane z brakiem połączenia poszczególnych ziaren podczas procesu (rys. 75÷77). Długość tych pustek nie przekraczała  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Potwierdzają to również szczegółowe wyniki badań na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Przykładowe nieciągłości w złączach FSW pokazano na rys. 79. Obserwowano drobne nieciągłości pomiędzy poszczególnymi ziarnami w strukturze (rys. 79a), jednak ich długość nie była większa niż  $10\text{ }\mu\text{m}$ , co wskazuje, że nie mają istotnego wpływu na wytrzymałość całego połączenia. Ujawniona na dolnej powierzchni linia „braku zgrzania” świadczy o niepełnym wymieszaniu materiału podczas zgrzewania (rys. 79d). Linia styku nie wymieszanego materiału rodzimego złącza jest ułożona po linii śrubowej, zgodnie z obracającym i przemieszczającym się narzędziem (rys. 79c, d). Tego typu

brak pełnego wymieszania jest związany z wykorzystaniem do zgrzewania zbyt krótkiego trzpienia narzędzia FSW.



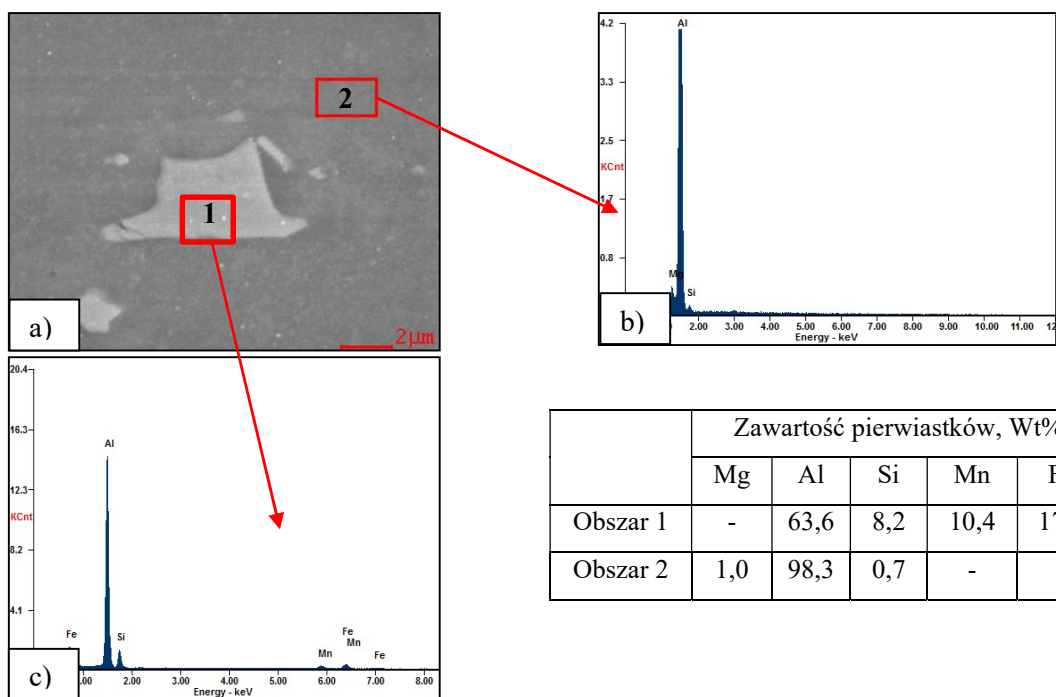
Rys. 79. Nieciągłości materiałowe w złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

W celu identyfikacji obserwowanych w złączy faz międzymetalicznych wykonano mikroanalizę składu chemicznego EDS ujawnionych wydzieli. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 80. Uzupełnieniem punktowych analiz EDS były mapy rozkładu pierwiastków, które pokazano na rys. 81.

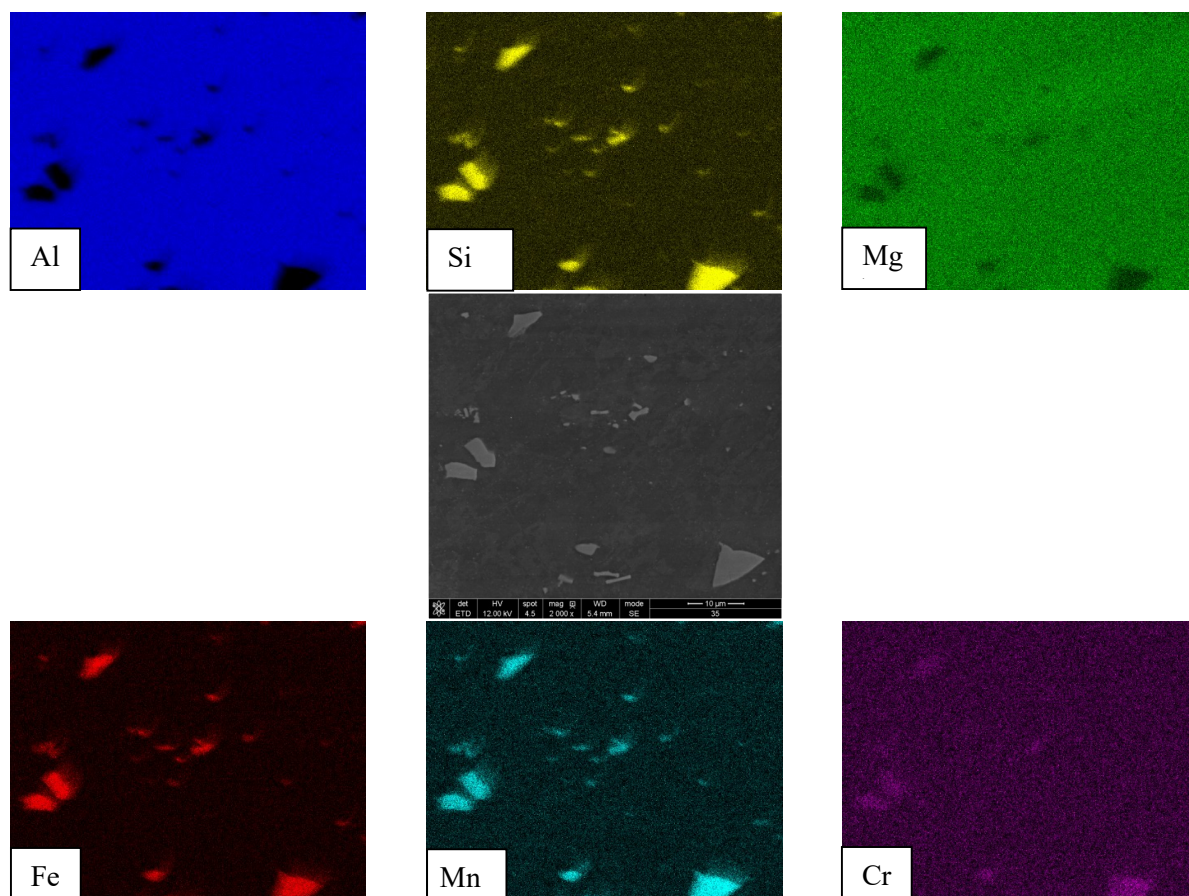
Zarówno w materiale rodzimym, jak i w obszarze złącza badanych próbek obserwowano wydzielania zawierające m.in. aluminium, magnez, krzem. Na rys. 80 przedstawiono wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS ujawnionych faz w obszarze mieszania złącza FSW. Wykonane mapy rozkładu pierwiastków wybranego obszaru strefy mieszania potwierdzają obecność tych pierwiastków (rys. 81).

Wyniki analizy EDS wykazały, że ujawnione fazy są bogate w żelazo, mangan i krzem, a nie zawierają magnezu (rys. 80). Na mapie rozkładu pierwiastków widoczny jest jeszcze w tych wydzielinach chrom. Ujawnione fazy to prawdopodobnie fazy  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$ ,  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{FeCr})_3\text{Si}$  oraz  $\text{Mg}_2\text{Si}$  [64]. W celu dokładnej identyfikacji faz wykonano analizę fazową metodą XRD (rys. 82).





Rys. 80. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego metodą EDS z obszaru złącza FSW, parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min: a) mikrostruktura strefy mieszania, b) wyniki EDS z obszaru osnowy (1), c) wyniki EDS z ujawnionej fazy (2)



Rys. 81. Mapa rozkładu pierwiastków w wybranym obszarze strefy mieszania złącza. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min



Dyfraktogramy przedstawiono w zakresie kątowym  $30\text{-}100^\circ 2\theta$  dla lepszej czytelności wyników. W zakresie kątowym  $15 - 30^\circ 2\theta$  nie zarejestrowano linii dyfrakcyjnych. Uzyskane wyniki identyfikacji fazowej na podstawie analizy dyfraktogramów pokazanych na rys. 82 zestawiono w tablicy 17.

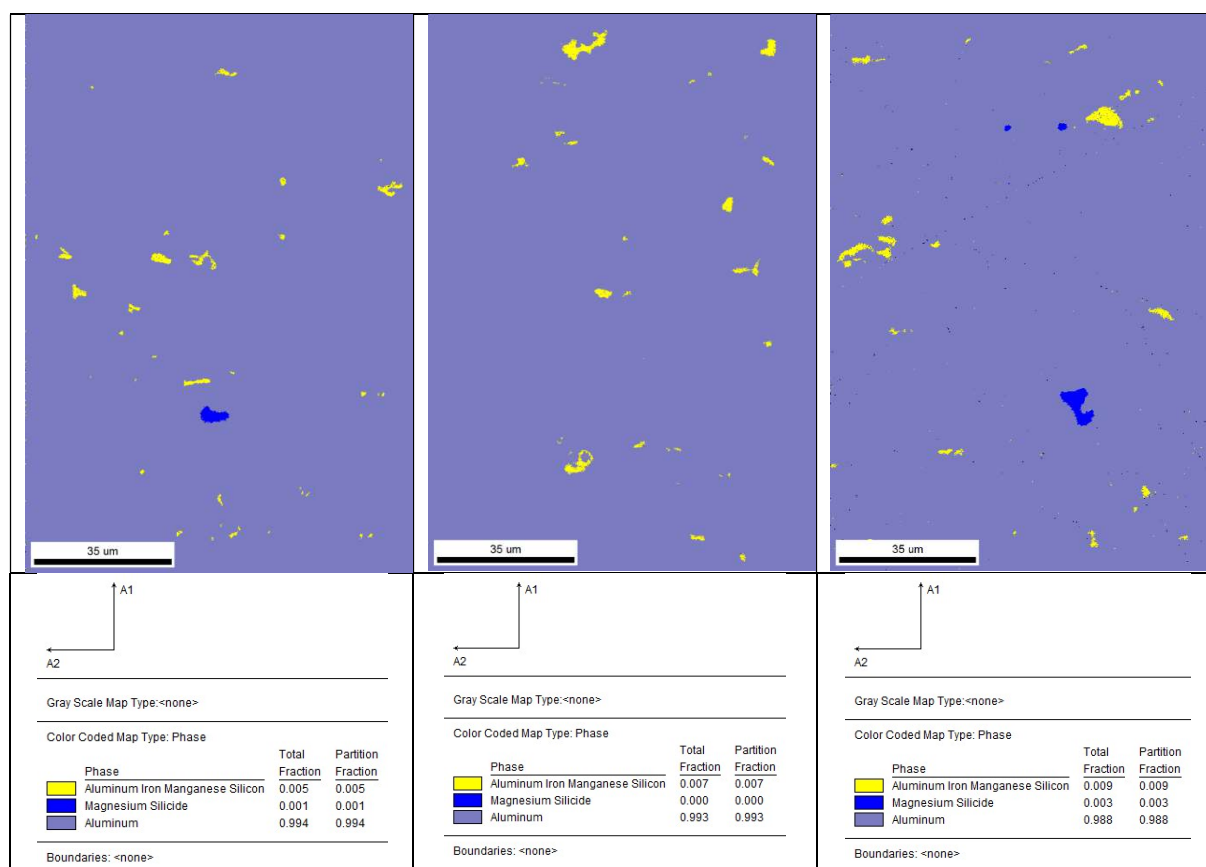
Tablica 17. Wyniki jakościowej analizy fazowej XRD z obszaru materiału rodzimego i złącza FSW ze strefy mieszania

| Nr próbki            | Zidentyfikowane składniki fazowe                                                                                       |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 – Materiał rodzimy | $\text{Mg}_2\text{Si}$ ; $\text{Al}_{0.095}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.74}\text{Si}_{1.606}$ ; $\text{Al}_3\text{Mg}$ |
| 5 – Złącze           | $\text{Mg}_2\text{Si}$ ; $\text{Al}_{0.095}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.74}\text{Si}_{1.606}$ ; $\text{Al}_3\text{Mg}$ |

W celu weryfikacji wyników identyfikacji fazowej metodą XRD wykonano badania EBSD (ang. Electron Backscattered Diffraction). Badania zostały wykonane z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego JSM 7200F firmy Jeol. Mikroskop wyposażony jest w detektor EDS (Octane Elite Super) do mikroanalizy składu chemicznego oraz kamerę EBSD (Hikari Plus) firmy EDAX. Badania EBSD obejmowały identyfikację fazową ujawnionych w materiale składników strukturalnych. Dla zapewnienia wyników badań o najwyższej jakości zastosowano metodę akwizycji EBSD z jedoczesną analizą składu chemicznego z wykorzystaniem detektora EDS. Podczas badania przeprowadzono analizę obszaru o wymiarach  $\sim 100\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$ , przy zastosowanym kroku  $0,2\text{ }\mu\text{m}$ . Otrzymane wyniki badań opracowane zostały z wykorzystaniem oprogramowania OIM. Analiza fazowa została przeprowadzona z wykorzystaniem metody Chi Scan, która pozwala na powiązanie składu chemicznego obserwowanych składników strukturalnych z identyfikacją fazową. Następnie zastosowano procedurę czyszczenia danych stosując dostępne metody oprogramowania: Cleanup - Grain CI Standardization (tolerance 2.0, min size 5, Multi Row 0) oraz Cleanup - Dilation: 18546 points changed (tolerance 2.0, min size 5, Multi Row 0, Iteration Fraction 0.01). Przykładowe wyniki analizy EBSD z badanych obszarów pokazano na rys. 83 w miejscach pokazanych na rys. 78. Badania przeprowadzono dla obszaru 1, 3 i 4. Analiza fazowa wykonana metodą EDSD wykazała osnowę, którą jest roztwór stały aluminium oraz potwierdzono obecność trzech faz międzymetalicznych tj.:  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$  oraz  $\text{Al}_3\text{Mg}$ . Podobne wyniki uzyskano dla materiału rodzimego złącza.

Dla wszystkich charakterystycznych stref w złączu wykonanym z zastosowaniem prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=450\text{ obr/min}$  oraz prędkości zgrzewania  $V_z=900\text{ mm/min}$  wykonano dodatkową analizę EBSD (rys. 84÷89). Dla każdego obszaru wyznaczono mapę orientacji krystalograficznej, mapę granic ziaren (granice niskiego kąta  $<15^\circ$  stopni zaznaczono

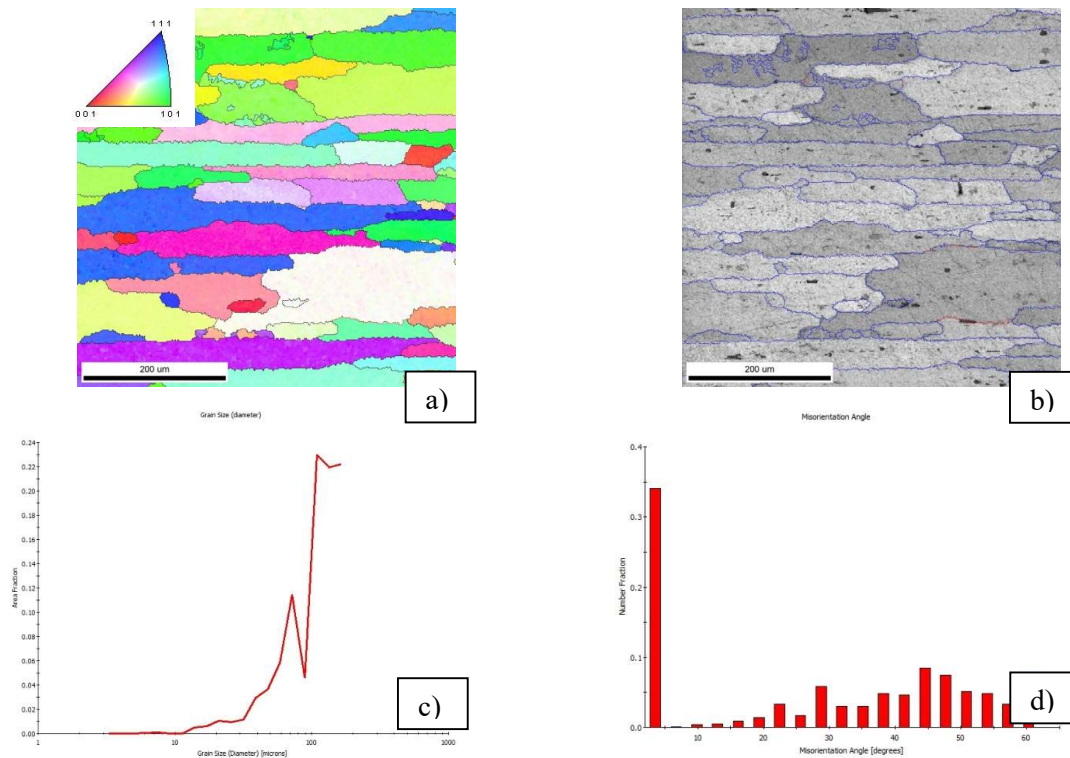
kolorem czerwonym, a granice wysokiego kąta >15 stopni kolorem czarnym lub niebieskim), rozkład kąta dezorientacji i rozkład wielkości ziarna.



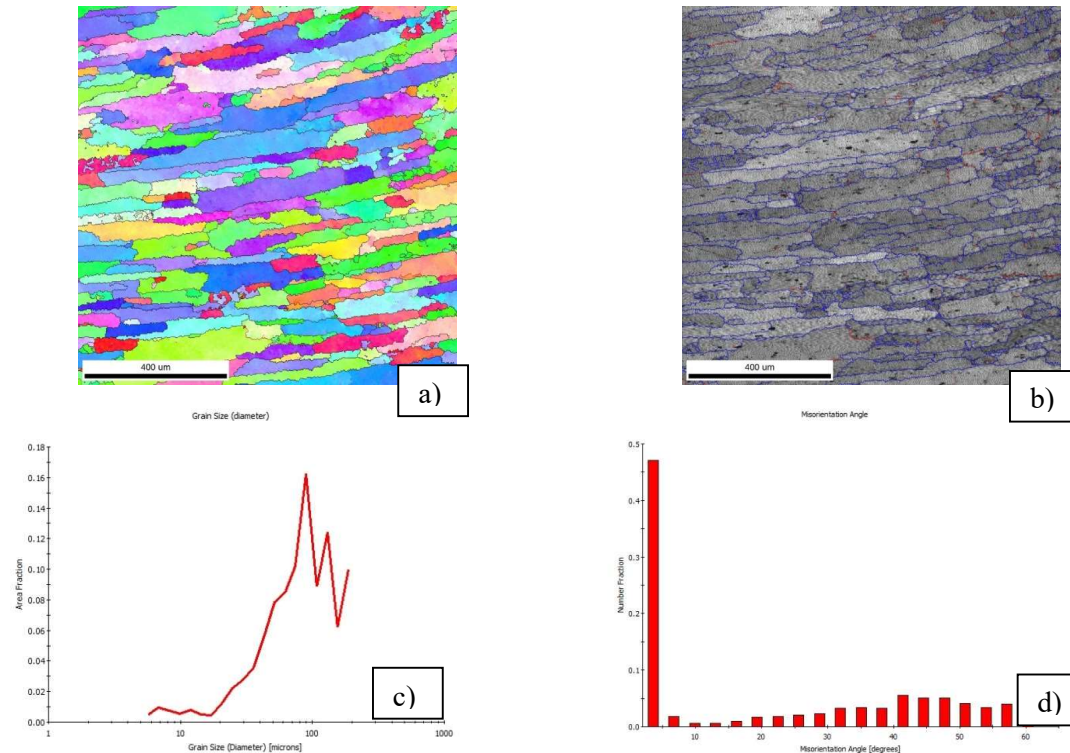
Rys. 83. Wyniki analizy EBSD z poszczególnych stref złącza FSW zgodnie z rys. 78: a) obszar SWC od strony natarcia (1), b) strefa mieszania (3), c) obszar SWC od strony spływu (4)

Przykładowe wyniki analizy EBSD materiału wyjściowego przedstawiono na rys. 84. Materiał rodzimy stopu aluminium EN AW-6082 charakteryzuje się wydłużonymi ziarnami o średniej średnicy od 10 do powyżej 100 µm. W materiale rodzimym przeważają granice wysokiego kąta (rys. 84b). Na rys. 85 pokazano wyniki analizy EBSD strefy wpływu ciepła po stronie natarcia (rys. 78, pkt. 1). Wyniki analizy EBSD strefy wpływu ciepła po stronie natarcia przedstawione na rys. 85, wskazują, że struktura charakteryzuje się wydłużonymi ziarnami, których średnia średnica jest na poziomie ok. 100 µm. Rozkład granic ziaren jest zbliżony do rozkładu w materiale rodzimym (rys. 84b). Dane z analizy EBSD dla strefy mieszania pokazane na rys. 86 wskazują, że w strefie tej ziarna są równoosiowe i drobne o średniej średnicy ok. 10 µm. Udział granic niskiego i wysokiego kąta jest równomierny (rys. 86b). Potwierdza to wyniki uzyskane podczas oceny ilościowej na skaningowym mikroskopie elektronowym (tablica 16).



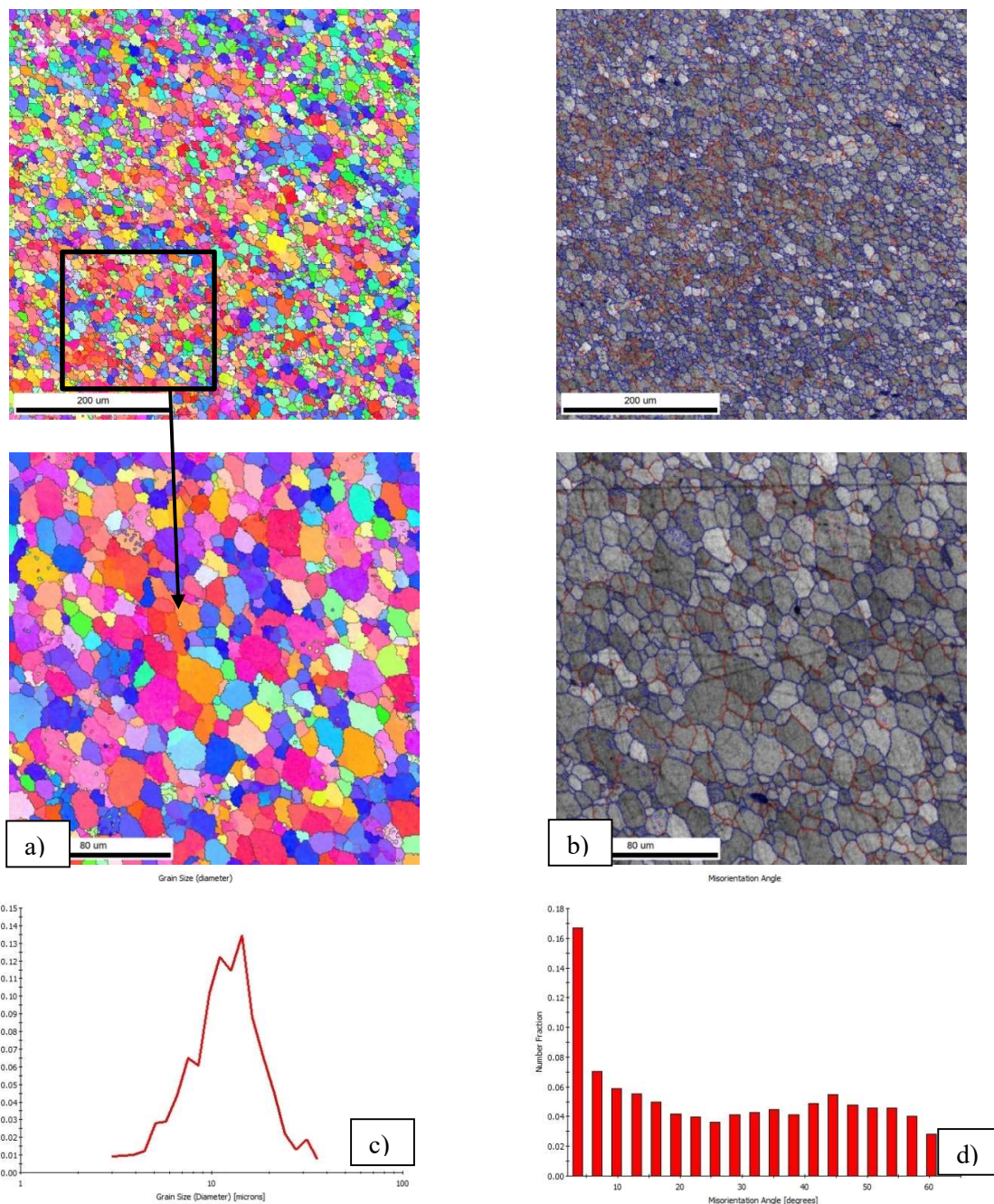


Rys. 84. Wyniki analizy EBSD materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082: a) mapa orientacji krystalograficznej; b) mapa z granicami ziaren; c) histogram rozkładu wielkości ziaren; d) histogram rozkładu kąta dezorientacji granic ziaren



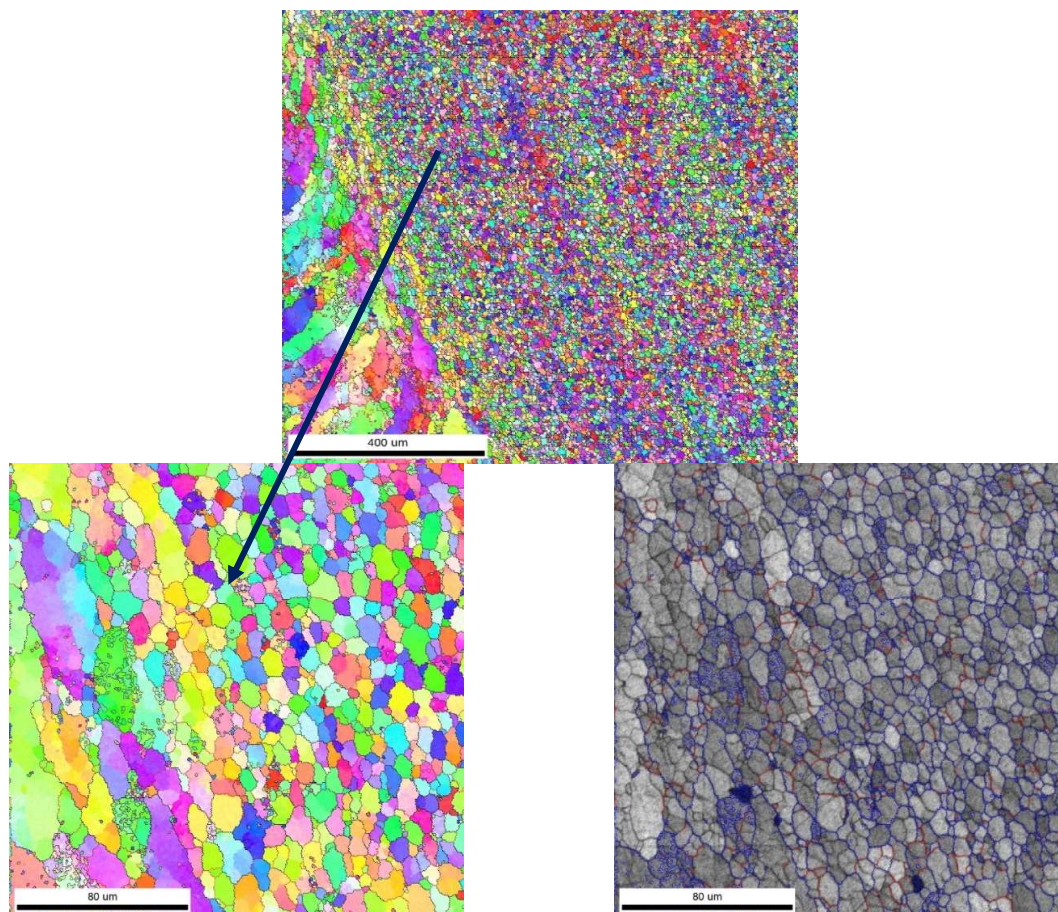
Rys. 85. Wyniki analiza EBSD strefy wpływu ciepła po stronie natarcia: a) mapa orientacji krystalograficznej; b) mapa z granicami ziaren; c) histogram rozkładu wielkości ziaren; d) histogram rozkładu kąta dezorientacji granic ziaren





Rys. 86. Wyniki analiza EBSD strefy mieszania: a) mapa orientacji krystalograficznej; b) mapa z granicami ziaren; c) histogram rozkładu wielkości ziaren; d) histogram rozkładu kąta dezorientacji granic ziaren

Analiza EBSD strefy mieszania ujawniła wyraźne przejście ze strefy odkształconej termomechanicznie do strefy mieszania (rys. 87). Ponadto na mapie EBSD obserwowano znaczne różnice w kształcie i wielkości ziaren w poszczególnych strefach. Na rys. 88 przedstawiono wyniki analizy EBSD strefy wpływu ciepła po stronie spływu. Ujawniono kształt odkładania się partii zgrzewanych materiałów, a udział granic niskiego i wysokiego kąta jest równomierny (rys. 88b).

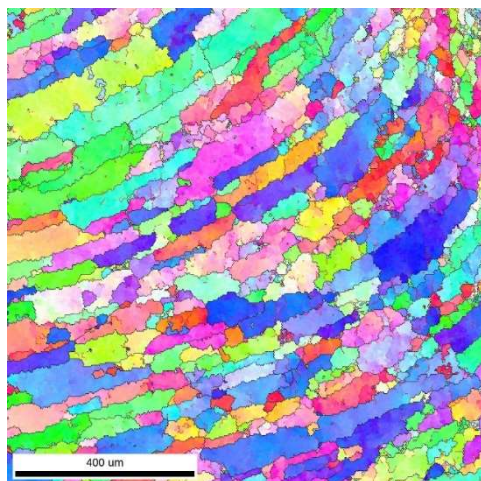


Rys. 87. Mapa orientacji krystalograficznej z mapą z granicami ziaren dla wybranego obszaru w powiększeniu

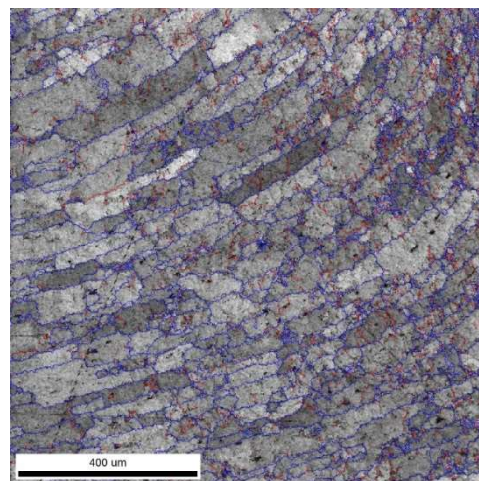
Przeprowadzona analiza EBSD strefy odkształconej termomechanicznie po stronie natarcia wskazała na obecność ziaren wydłużonych zgodnie z kierunkiem ruchu narzędzia FSW. Średnia średnica ziaren wynosi  $100\ \mu\text{m}$  (rys. 89a), podobnie jak dla sąsiadującej strefy wpływu ciepła (rys. 88a). Zauważalna jest różnica w rozkładzie kąta dezorientacji granic ziaren. W strefie odkształconej termomechanicznie zwiększył się udział granic niskiego kąta ( $<15$  stopni) (rys. 89b).

Wyniki EBSD granicy pomiędzy strefą odkształconą termomechanicznie, a strefą mieszania i strefą odkształconą termomechanicznie po stronie spływu przedstawia rys. 89. Granica ta nie jest tak wyraźna jak po stronie natarcia. W analizowanym obszarze widoczne są ziarna o zróżnicowanym kształcie i wielkości. Średnia średnica ziarna mieści się w przedziale  $5 - 100\ \mu\text{m}$  (rys. 89a). Rozkład granic międzyziarnowych jest podobny jak w strefie odkształconej termomechanicznie po stronie natarcia, ale po stronie spływu udział granic niskiego kąta jest większy (rys. 89b).

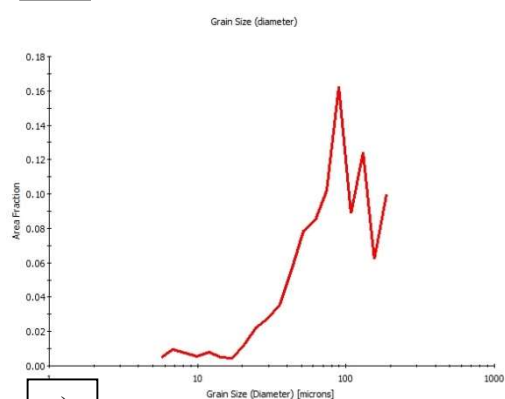




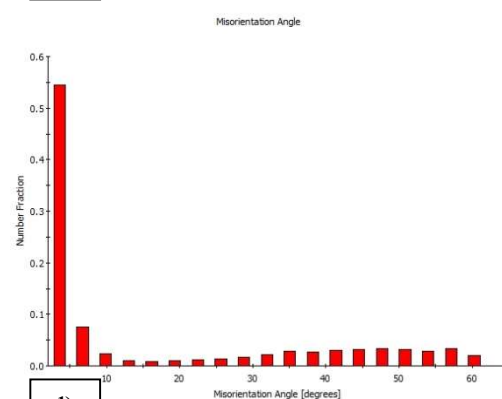
a)



b)

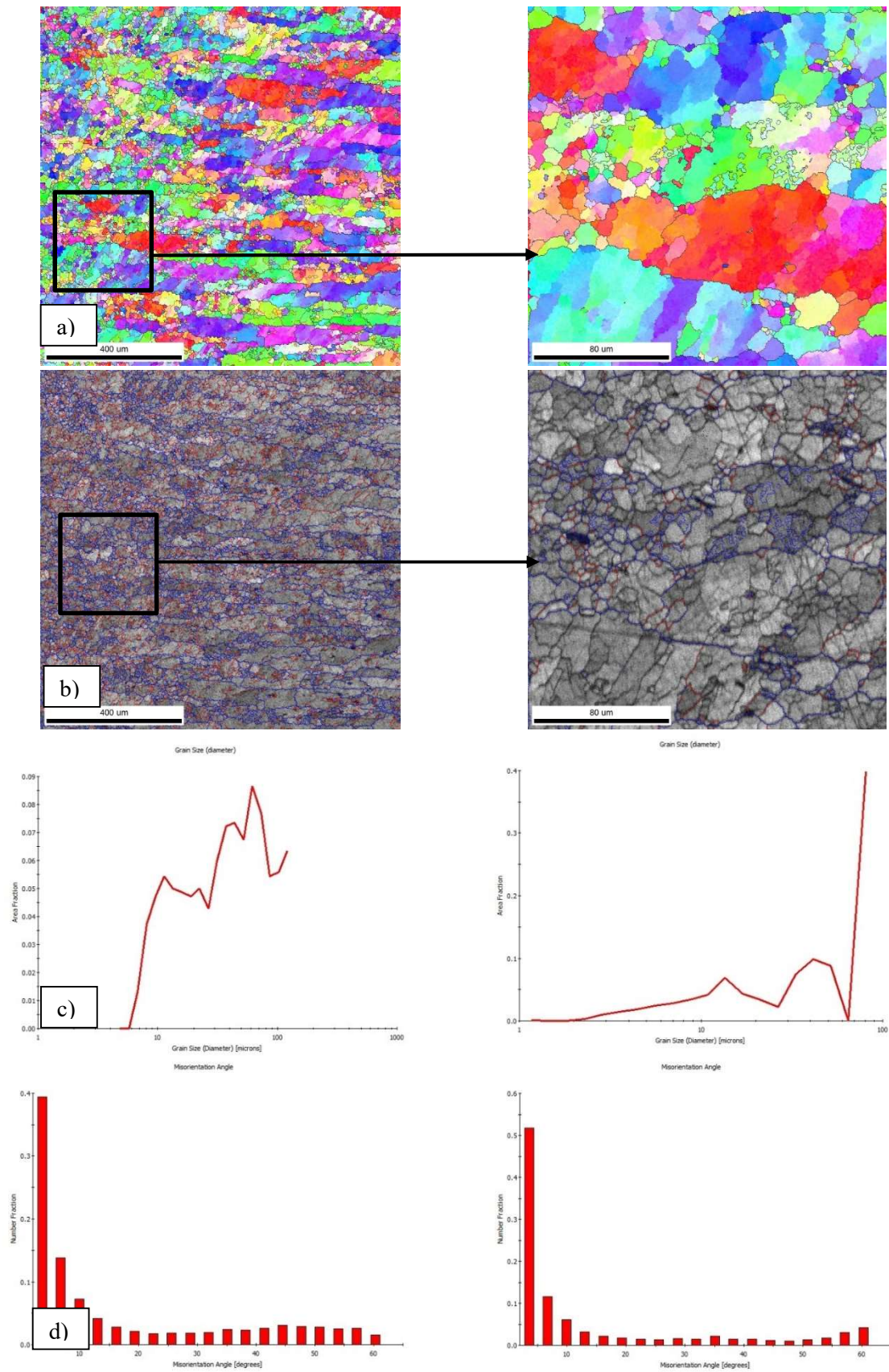


c)



d)

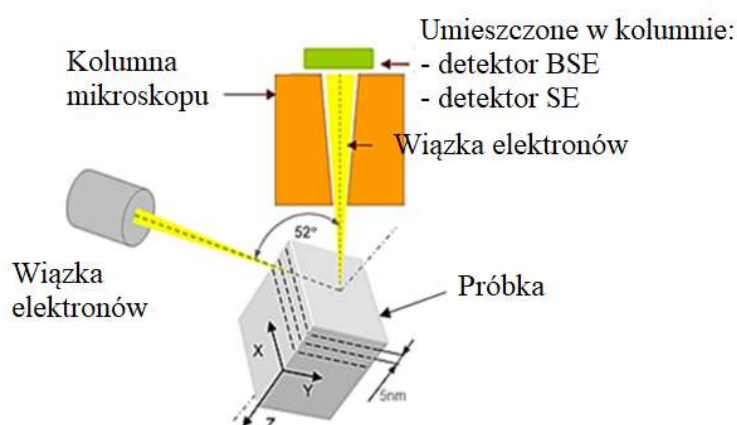
Rys. 88. Analiza EBSD strefy wpływu ciepła po stronie spływu: a) mapa orientacji krystalograficznej; b) mapa z granicami ziaren; c) histogram rozkładu wielkości ziaren; d) histogram rozkładu kąta dezorientacji granic ziaren



Rys. 89. Analiza EBSD dla obszaru strefy odkształconej termomechanicznie po stronie natarcia: a) mapa orientacji krystalograficznej; b) mapa z granicami ziaren; c) histogram rozkładu wielkości ziaren; d) histogram rozkładu kąta dezorientacji granic ziaren

#### 10.3.4. Tomografia 3D złącza FSW w wybranych obszarach

W ramach badań strukturalnych wykonano tomografię elektronową złącza FSW, co umożliwiło stworzenie przestrzennej rekonstrukcji 3D ziaren i wydzielen. Badania przeprowadzono z zastosowaniem techniki FIB-SEM. Celem badania było porównanie morfologii przestrzennej wydzielen występujących w różnych obszarach złącza FSW. Technika FIB-SEM polega na sekwencyjnym usuwaniu warstwy badanego materiału za pomocą skupionej wiązki galu, a następnie na obrazowaniu za pomocą wiązki elektronów. Do obrazowania wykorzystywane są detektory SE oraz BSE. Badania wykonano z wykorzystaniem urządzenia Crossbeam 350 firmy Zeiss. Jest to wysokorozdzielczy mikroskop FIB-SEM wyposażony w kolumnę jonową (jonów galu). Schematycznie technikę badania FIB-SEM przedstawiono na rys. 90.



Rys. 90. Schemat techniki tomografii FIB-SEM

Proces tomografii FIB-SEM złącza FSW składał się z następujących etapów:

- przygotowanie próbki do badań – w podobny sposób jak zglądu metalograficznego,
- naniesienie ochronnej warstwy platyny,
- wykonanie podcięć zgrubnych w obszarze badania,
- sekwencyjne usuwanie warstwy badanego materiału za pomocą wiązki galu oraz obrazowanie za pomocą detektorów SE oraz BSE.

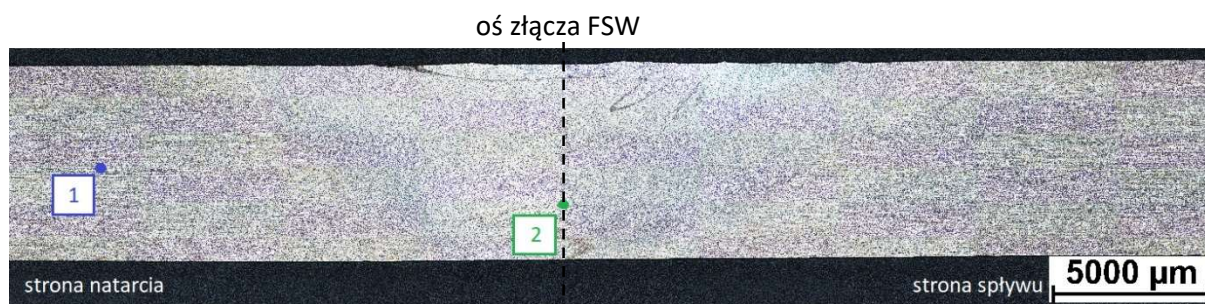
Po procesie akwizycji obrazów, kolejnym etapem była analiza zebranych wyników, która polegała na:

- korekcji przesunięcia zarejestrowanych obrazów,
- segmentacji (przyporządkowania wokseli (trójwymiarowych pikseli) do poszczególnych składników mikrostrukturalnych),



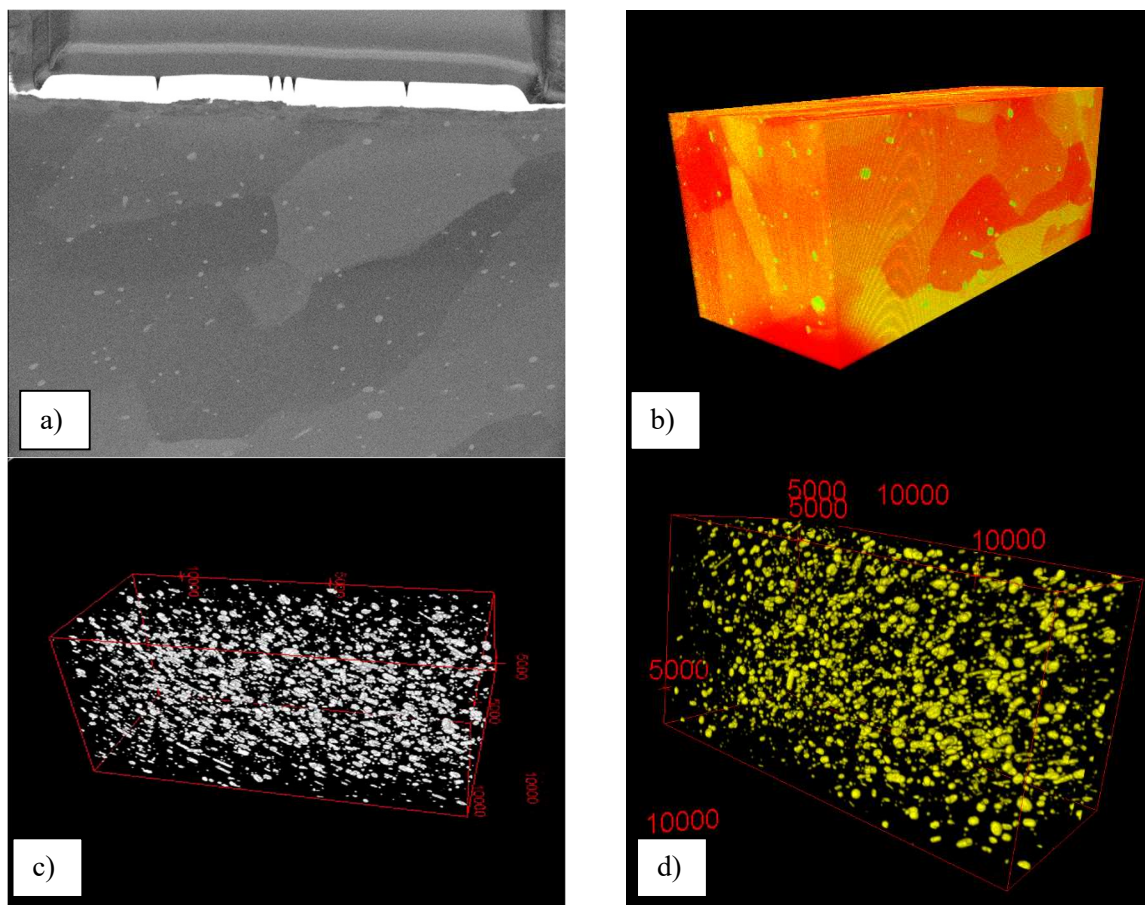
- rekonstrukcji przestrzeni trójwymiarowej (3D),
- wizualizacji oraz pomiarach w przestrzeni 3D z zastosowaniem programów ImageJ oraz Avizo.

Badania struktury metodą tomografii FIB-SEM przeprowadzono w dwóch obszarach złącza tj. w materiale rodzimym oraz w strefie mieszania. Wyniki badań przedstawiono dla złącza FSW zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min. Obszary z których przygotowano próbki do badań FIB-SEM przedstawiono na rys. 91.



Rys. 91. Obszary badawcze rekonstrukcji 3D ziaren i wydziieleń w złączy FSW: Obszar nr 1 – materiał rodzimy, Obszar nr 2 – strefa mieszania złącza

Badania techniką FIB-SEM w obszarze materiału rodzimego przeprowadzono przy wielkości weksla  $10 \times 10 \times 10$  nm. Na rys. 92 przedstawiono widok jednego z obrazów poddanych dalszej akwizycji topograficznej w celu opracowania rekonstrukcji 3D, a także przykładowe wizualizacje przestrzenne zrekonstruowanego obszaru badawczego (rys. 92b-d). Na rys. 92b widoczne są poszczególne wydzielena usytuowane wewnątrz różnej wielkości ziaren. Na rys. 92c przedstawiono rozmieszczenie ujawnionych wydzieli w rekonstruowanej przestrzeni. Objętość względna wydzieli w tym obszarze wynosi  $V_v=0,68 \pm 0,16\%$ . Natomiast na rys. 92d przedstawiono fragment obszaru z wydzieleniami, w którym oznaczono przejścia pomiędzy poszczególnymi ziarnami. Powyższe wizualizacje wskazują na obecność dużej ilości małych wydzieli o wydłużonych kształtach.

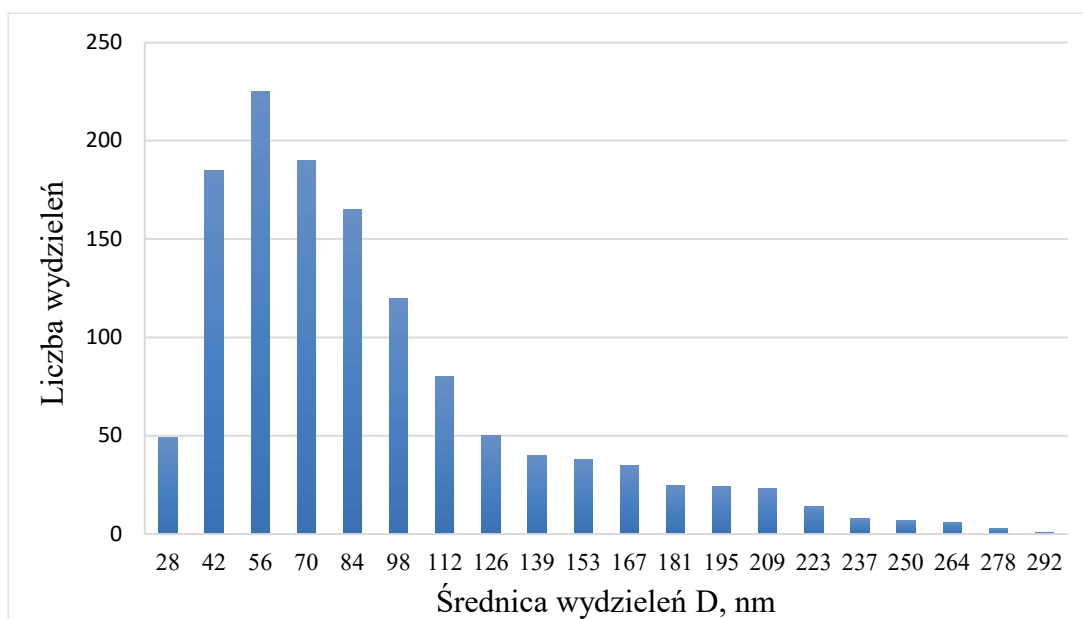


Rys. 92. Przykładowe rekonstrukcje struktury z obszaru materiału rodzimego złącza FSW:  
 a) przykładowy pojedynczy obraz struktury przeznaczony do dalszej rekonstrukcji,  
 b) rekonstrukcja struktury w badanej objętości z uwzględnieniem ziaren, c) rozkład wydzieleń w strukturze, d) rozkład wydzieleń w strukturze z uwzględnieniem granic ziaren

W celu określenia ilościowego rozkładu wydzieleń opracowano histogram rozkładu średnicy zastępczej wydzieleń (określającej długość hipotetycznej średnicy elementu niekołowego) w obszarze rekonstruowanym, który przedstawiono na rys. 93. W analizie nie uwzględniono wydzieleń przeciętych przez ściany rekonstruowanego prostopadłościanu oraz wzięto pod uwagę wydzielania o łącznej objętości 0,63%.

Na podstawie opisanych danych liczbowych stwierdzono, że w badanym obszarze jest ponad 200 wydzieleń o średniej średnicy ok. 58 nm, a także łącznie ok. 1260 wydzieleń o średniej średnicy w zakresie  $42 \div 84$  nm, natomiast wydzieleń, których średnia średnica przekracza 140 nm, jest łącznie ok. 700 (rys. 93).

Na rys. 94 przedstawiono wizualizację rozkładu wielkości wydzieleń w przestrzeni w rekonstruowanej objętości oraz histogram rozkładu wielkości (objętości) wydzieleń.

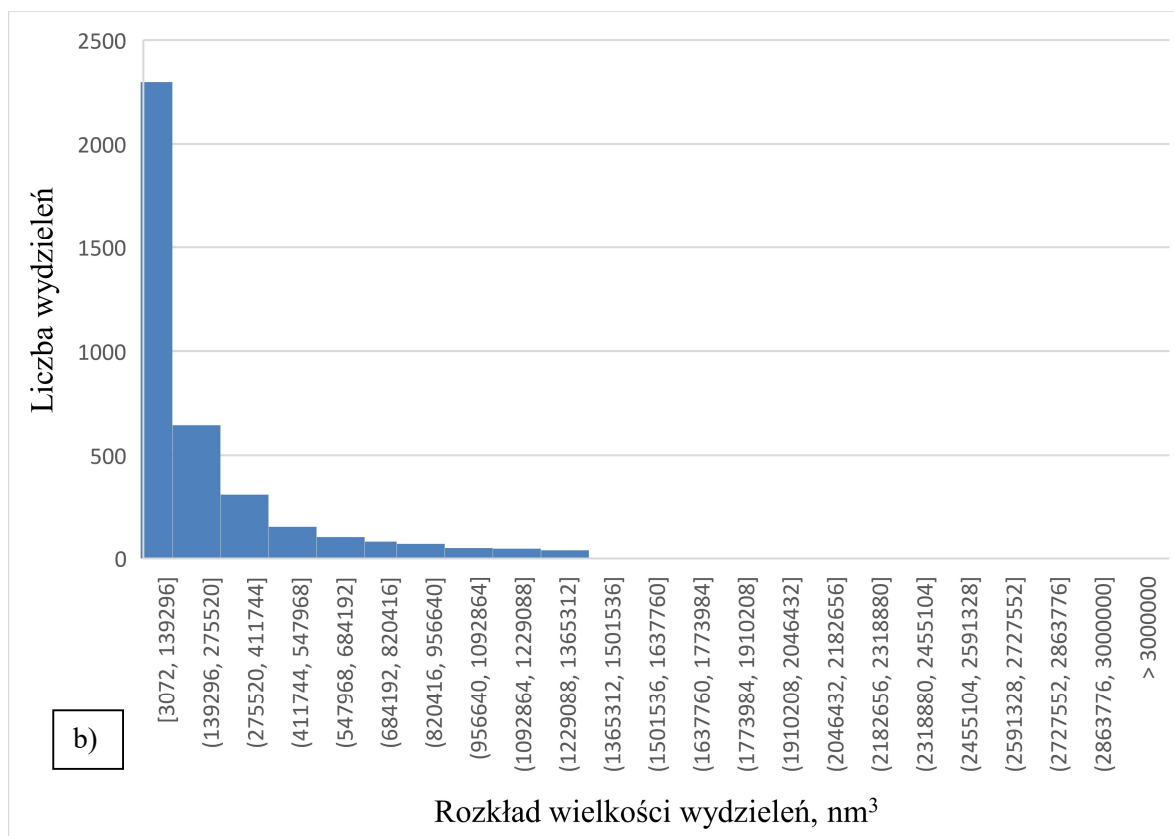
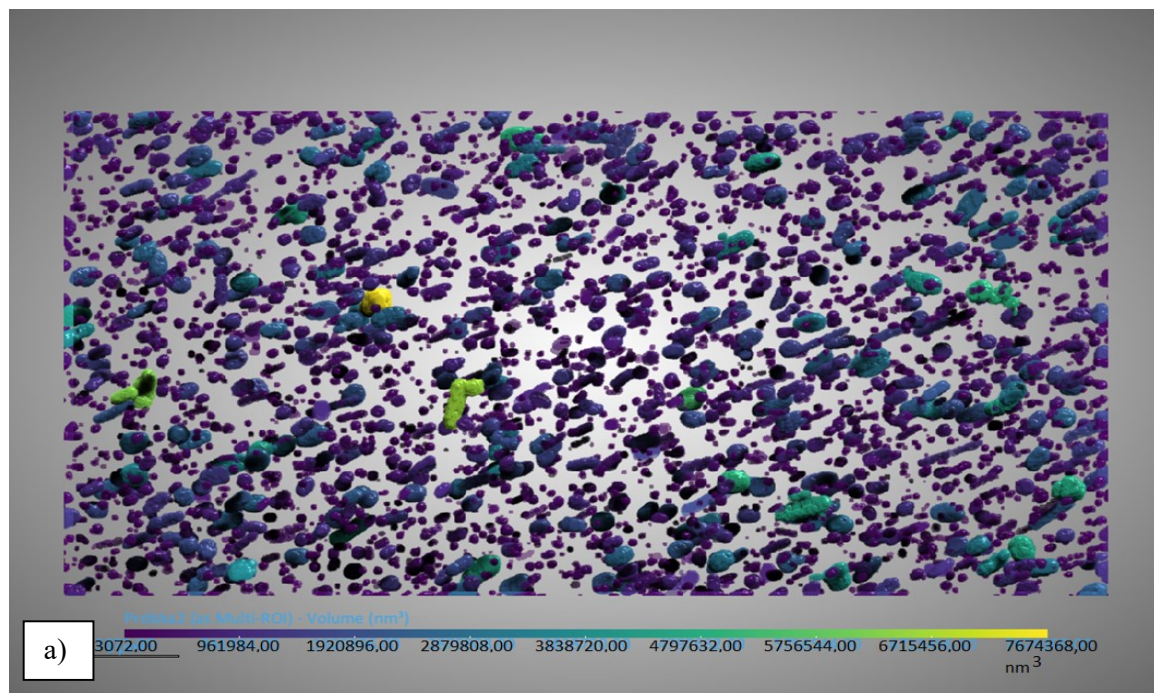


Rys. 93. Histogram rozkładu średnicy zastępczej wydzieliń w obszarze materiału rodzimego

Na podstawie analizy rozkładu wydzieliń oraz wyników pomiarów objętości wydzieliń określono, że w badanym obszarze materiału rodzimego ponad połowa wydzieliń, tj. ok. 2300 charakteryzuje się rozmiarem w przedziale wielkości nieprzekraczającej  $3072 \text{ nm}^3$ . Wydzielenia te oznaczono kolorem fioletowym (rys. 94a). Ujawniono również kilka wydzieliń, których średnia średnica przekraczała wielkość  $1637760 \text{ nm}^3$ . Wydzielenia te oznaczono kolorem zielonym (rys. 94a). W badanym obszarze dostrzeżono tylko jedno wydzielenie o średniej wielkości ok.  $7674368 \text{ nm}^3$ . Wydzielenie te oznaczono kolorem żółtym (rys. 94a).

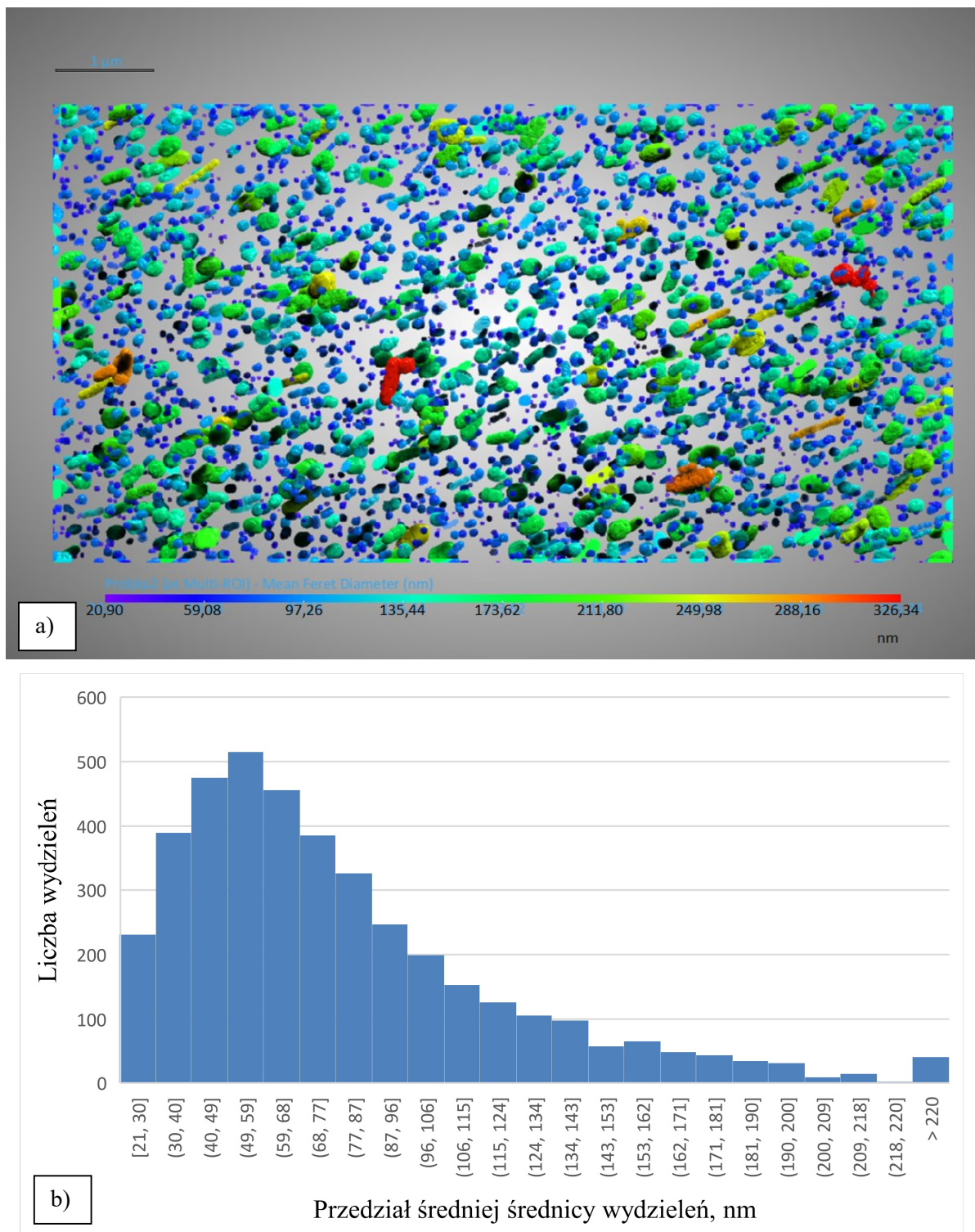
W badanym obszarze rekonstrukcji materiału rodzimego określono również średnią średnicę Fereta z każdego wydzielenia czyli oceniono wydłużenie wydzieliń w przestrzeni. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 95 w postaci wizualizacji przestrzennej oraz histogramu średniej średnicy Fereta.

Wyniki badań rozkładu średniej średnicy Fereta wydzieliń w obszarze materiału rodzimego wskazują, że ponad 500 wydzieliń ma średnią średnicę Fereta w przedziale  $49 \pm 59 \text{ nm}$ , a ponad 50% wszystkich wydzieliń cechuje się średnią średnicą Fereta na poziomie do  $77 \text{ nm}$  (rys. 95b).



Rys. 94. Rozkład wielkości wydzieleń (objętości wydzieleń) w badanym obszarze materiału rodzimego: a) wizualizacja przestrzenna rozkładu wielkości wydzieleń, b) histogram rozkładu wielkości wydzieleń



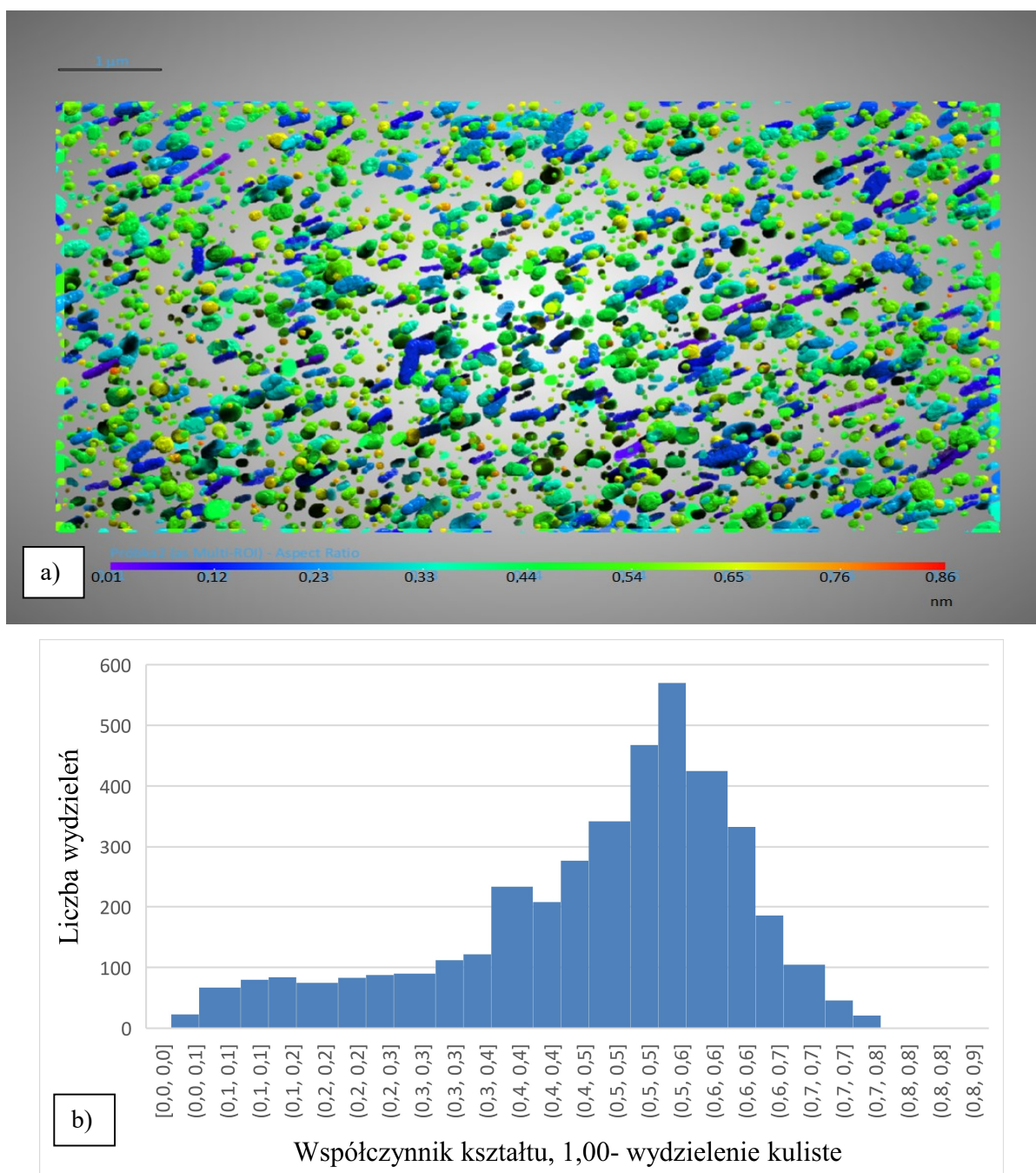


Rys. 95. Rozkład średniej średnicy Fereta wydzieleń w badanym obszarze materiału rodzimego: a) wizualizacja przestrzenna średniej średnicy Fereta wydzieleń, b) histogram rozkładu średniej średnicy Fereta wydzieleń

W zrekonstruowanym obszarze materiału rodzimego obliczono także współczynnik kształtu poszczególnych wydzieleń, rozumiany jako stosunek średnicy maksymalnej do



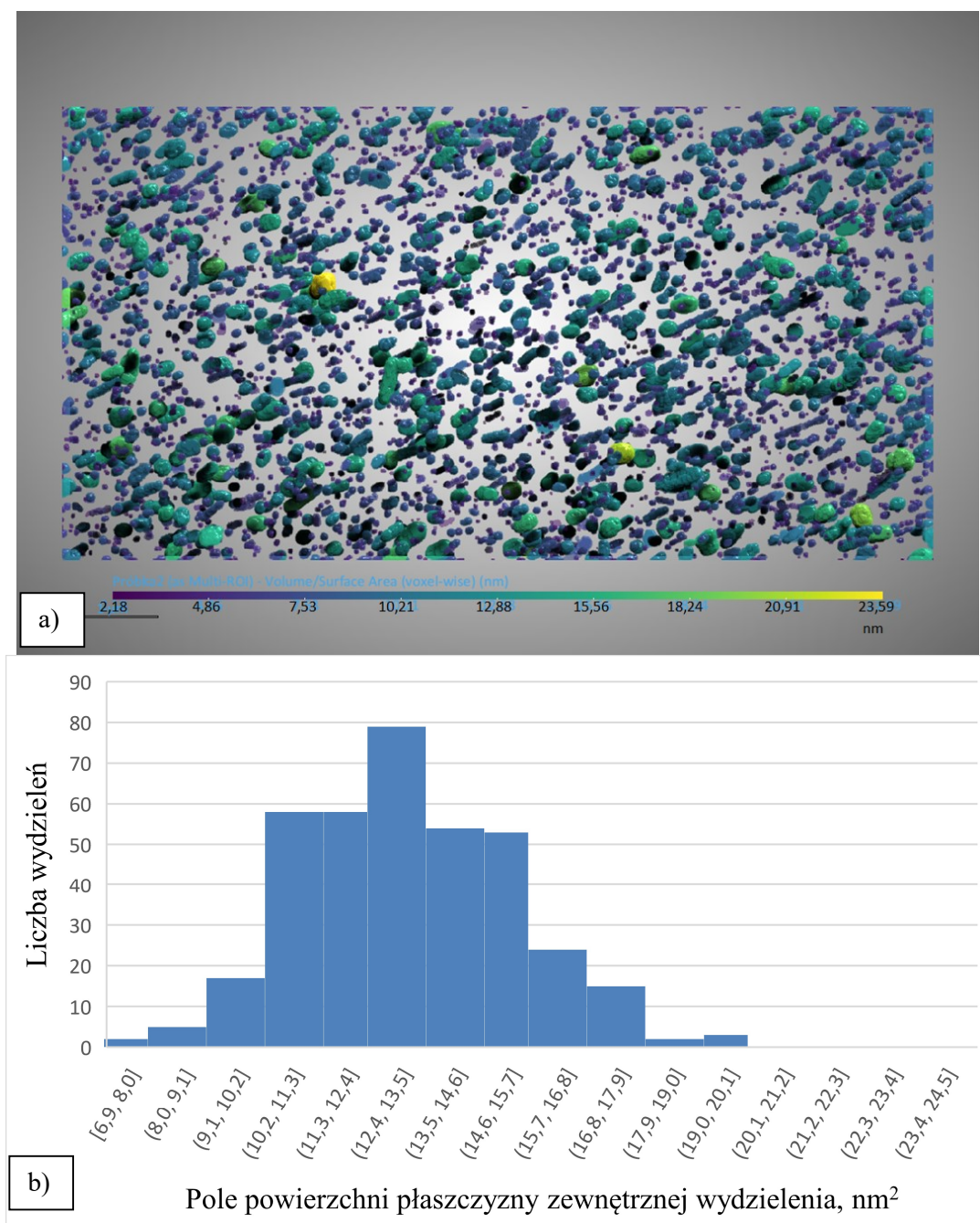
minimalnej. Kolorem czerwonym oznaczono wydzielienia idealnie kuliste. Wyniki tych obliczeń w postaci wizualizacji oraz histogramu współczynnika kształtu wydzieleń przedstawiono na rys. 96.



Rys. 96. Rozkład współczynnika kształtu wydzieleń w obszarze materiału rodzimego:  
a) wizualizacja przestrzenna współczynnika kształtu wydzieleń, b) histogram rozkładu współczynnika kształtu wydzieleń

Wyniki analizy geometrycznego współczynnika kształtu w obszarze materiału rodzimego wskazują, że nie ma wydzieleń o kształcie idealnym kulistym. Spośród wszystkich

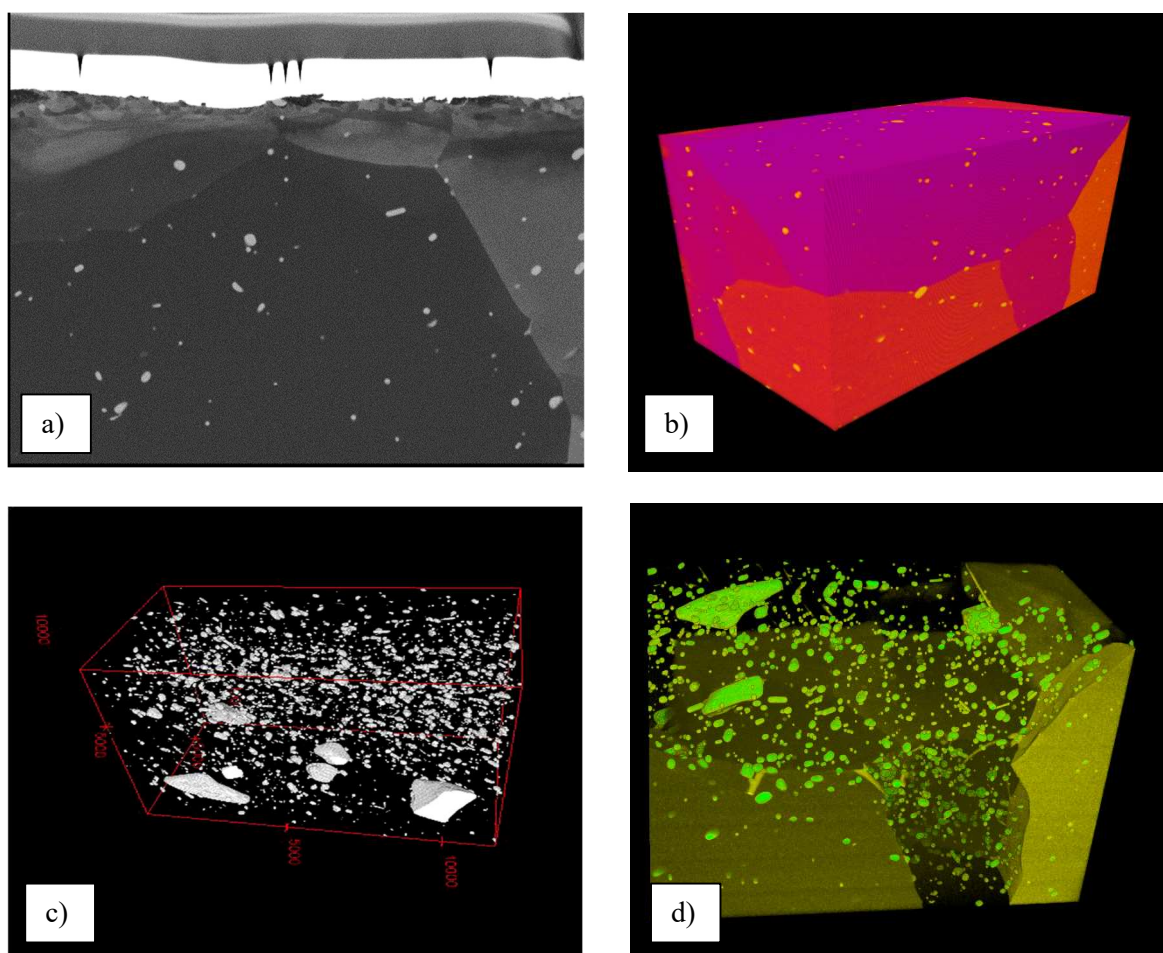
wydzieleni prawie 600 z nich cechuje się kształtem wydłużonym, zbliżonym w ok. 50% do kształtu kulistego lub posiada zaokrąglone części. Większość pozostałych wydzieleni cechuje się kształtem zbliżonym do kulistego (rys. 96b).



Rys. 97. Rozkład pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieleni w obszarze materiału rodzimego: a) wizualizacja przestrzenna pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieleni, b) histogram rozkładu pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieleni

Na podstawie zrekonstruowanego obszaru materiału rodzimego obliczono także pole powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieliń. Wyniki tych badań przedstawiono w postaci wizualizacji oraz histogramu na rys. 97. Stwierdzono, że w obszarze materiału rodzimego blisko 80 wydzieliń charakteryzuje się polem powierzchni płaszczyzny zewnętrznej w zakresie  $12,4 \pm 13,5 \text{ nm}^2$ , a łącznie ponad 265 wydzieliń posiada pole powierzchni w zakresie  $10,0 \div 15,7 \text{ nm}^2$ . Łącznie wszystkie te wydzielenia stanowią ok. 80% wszystkich wydzieliń dla których przeprowadzono pomiary w całej objętości zrekonstruowanego obszaru badawczego.

Badania struktury metodą tomografii elektronowej 3D techniką FIB-SEM przeprowadzono także w obszarze strefy mieszania. Na rys. 98 przedstawiono przykładowe wizualizacje przestrzenne zrekonstruowanego obszaru badawczego w strefie mieszania złącza FSW.

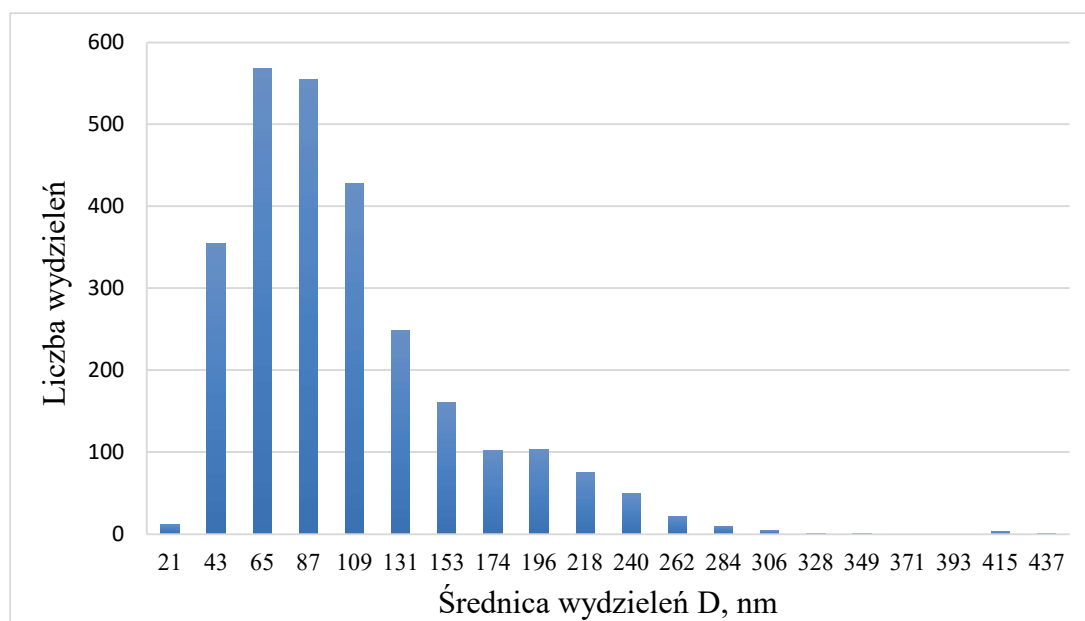


Rys. 98. Przykładowe obrazy zrekonstruowanego obszaru 3D złącza FSW w strefie mieszania:

- a) przykładowy obraz struktury złącza FSW wykorzystany do rekonstrukcji 3D,
- b) rekonstrukcja ziarna i rozmieszczenia wydzieliń, c) rozmieszczenie i wielkość wydzieliń w przestrzeni 3D, d) rekonstrukcja 3D wydzieliń z uwzględnieniem granic ziaren



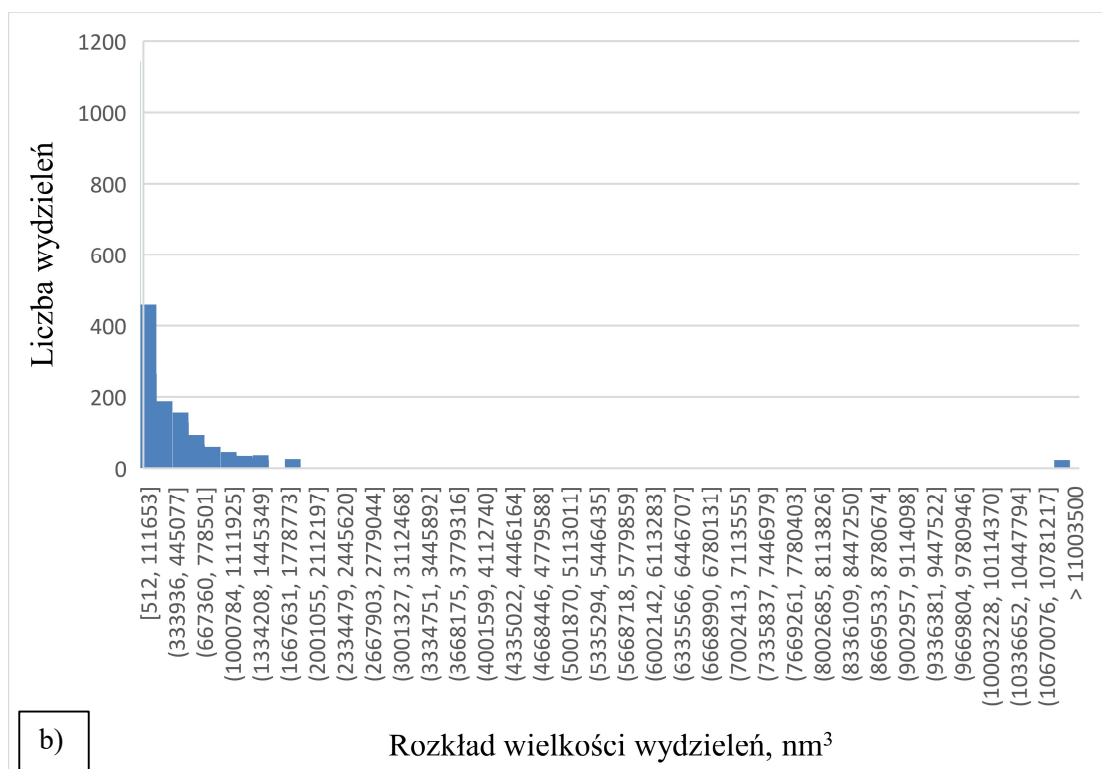
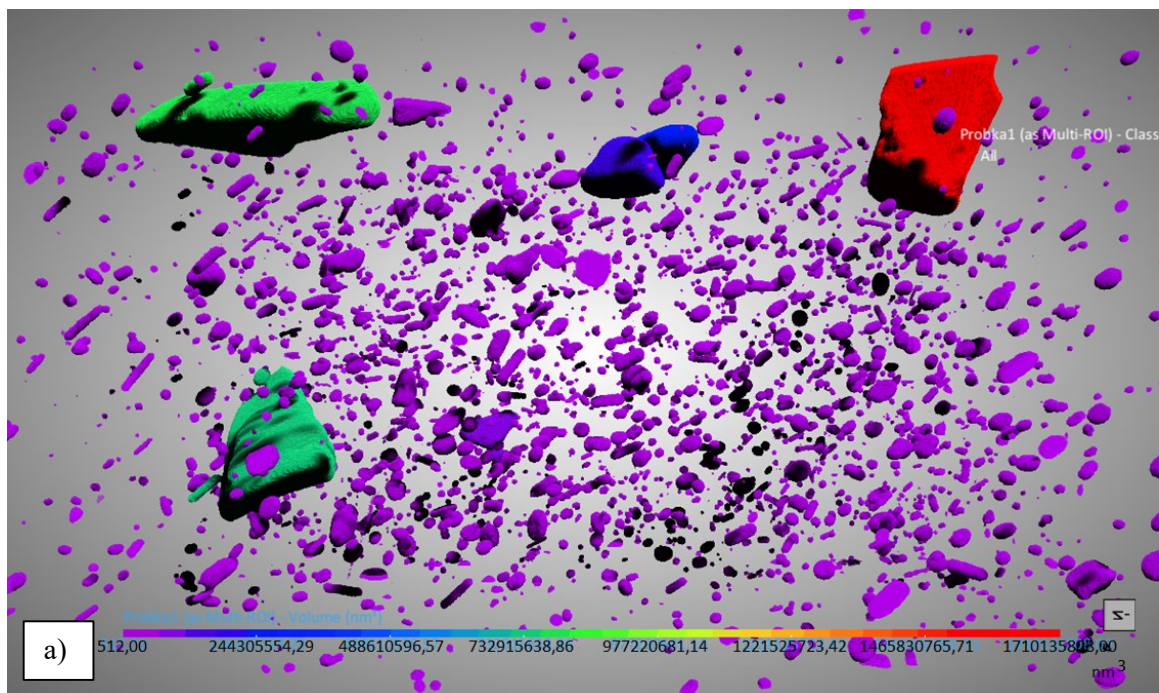
Obliczono, że objętość względna wydzieleń w tym obszarze wynosi  $V_v=1,19\pm0,96\%$  (rys. 98c). W badanym obszarze ujawniono dużą liczbę małych wydzieleń w ziarnach, a także kilka dużych wydzieleń. Aby szczegółowo określić wielkość wydzieleń w zrekonstruowanym obszarze opracowano histogram rozkładu średnicy zastępczej wydzieleń, który przedstawiono na rys. 99. W analizie nie uwzględniono wydzieleń przeciętych przez ściany rekonstruowanego prostopadłościanu oraz wzięto pod uwagę wydzielienia o łącznej objętości 0.78%.



Rys. 99. Histogram rozkładu średnicy zastępczej wydzieleń w obszarze mieszania złącza

Wyniki obliczeń rozkładu średnicy zastępczej wydzieleń wskazują, że średnia średnica wydzieleń w strefie mieszania waha się w przedziale  $D=94,7\pm62,2$  nm. W badanym obszarze znajduje się ponad 550 wydzieleń o średniej średnicy ok. 65nm, a także kilka wydzieleń, których średnia średnica przekracza 250 nm (rys. 99). W celu pełnej prezentacji wyników rozkładu wydzieleń na rys. 100 przedstawiono wizualizację rozmieszczenia wydzieleń w badanej przestrzeni oraz histogram rozkładu wielkości w strefie mieszania złącza FSW.

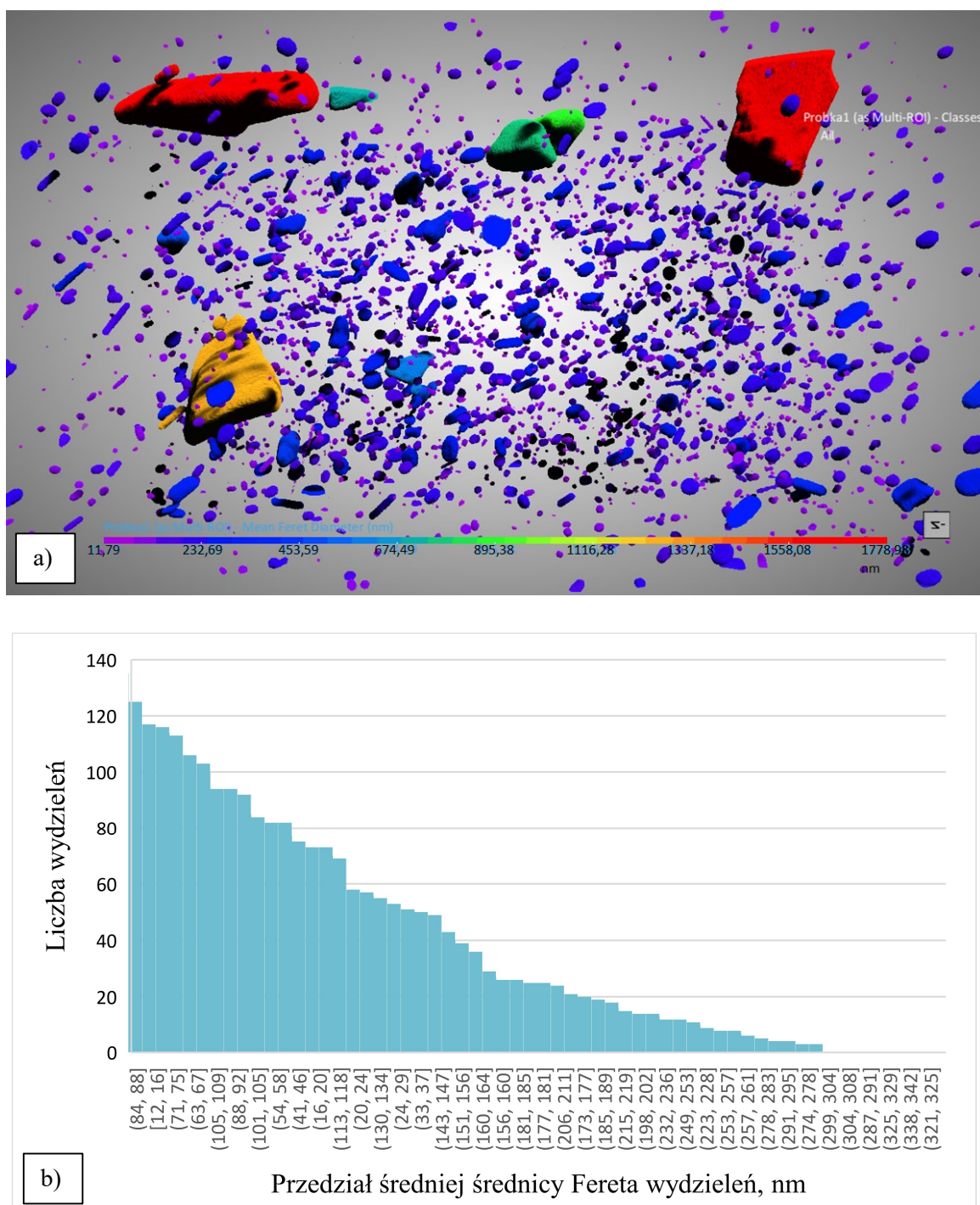
Na podstawie wyników rozkładu wielkości wydzieleń oraz ich pomiarów stwierdzono, że w badanym obszarze strefy mieszania ponad połowa wydzieleń (prawie 1200) jest w przedziale  $512\pm111653$  nm<sup>3</sup> – wydzielienia te oznaczono kolorem fioletowym (rys. 100a). W środkowym przedziale  $5668718\pm5779859$  nm<sup>3</sup>, praktycznie brak jest wydzieleń, które powinny być oznaczone na żółto (rys. 100b). Ujawniono cztery wydzielienia o objętości przekraczającej 11003500 nm<sup>3</sup>. Wydzielienia te w zależności od wielkości oznaczono na czerwono, zielono i niebiesko (rys. 100a).



Rys. 100. Rozkład wielkości wydzieleń (objętości wydzieleń) w badanym obszarze strefy mieszania: a) wizualizacja przestrzenna rozkładu wydzieleń, b) histogram rozkładu wielkości wydzieleń



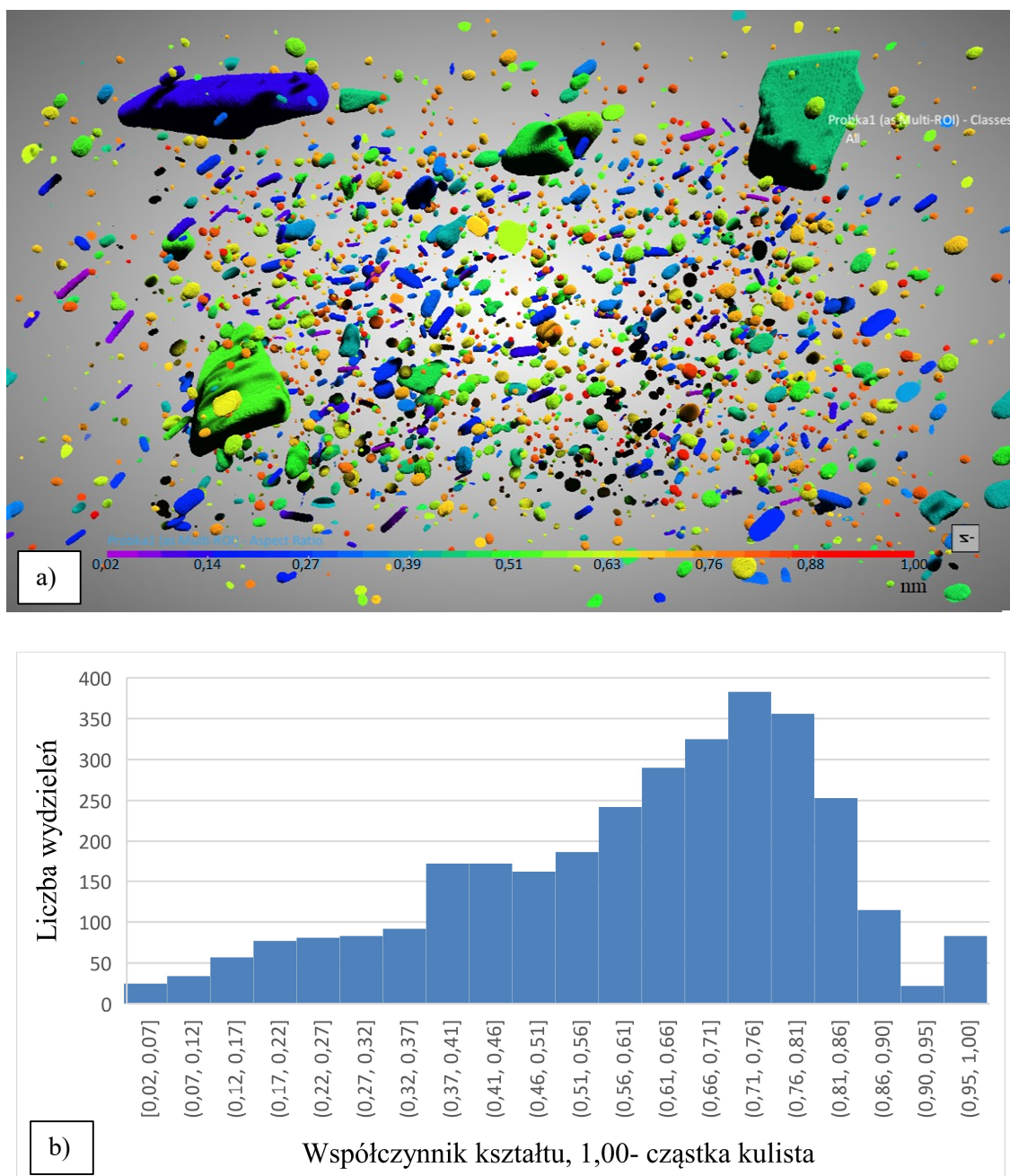
W obszarze strefy mieszania wykonano także pomiary średniej średnicy Fereta każdego wydzielenia. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 101 w postaci wizualizacji przestrzennej oraz histogramu średniej średnicy Fereta.



Rys. 101. Rozkład średniej średnicy Fereta wydzieleń w obszarze mieszania złącza FSW:  
a) wizualizacja przestrzenna średniej średnicy Fereta wydzieleń, b) histogram rozkładu średniej średnicy Fereta wydzieleń

Wyniki badań rozkładu średniej średnicy Fereta wydzieleń w strefie mieszania wskazują, że ok. 140 z nich ma średnią średnicę Fereta w przedziale  $84 \pm 88$  nm, a ok. 90% wszystkich wydzieleń cechuje się średnią średnicą Fereta na poziomie do 185 nm (rys. 101b).

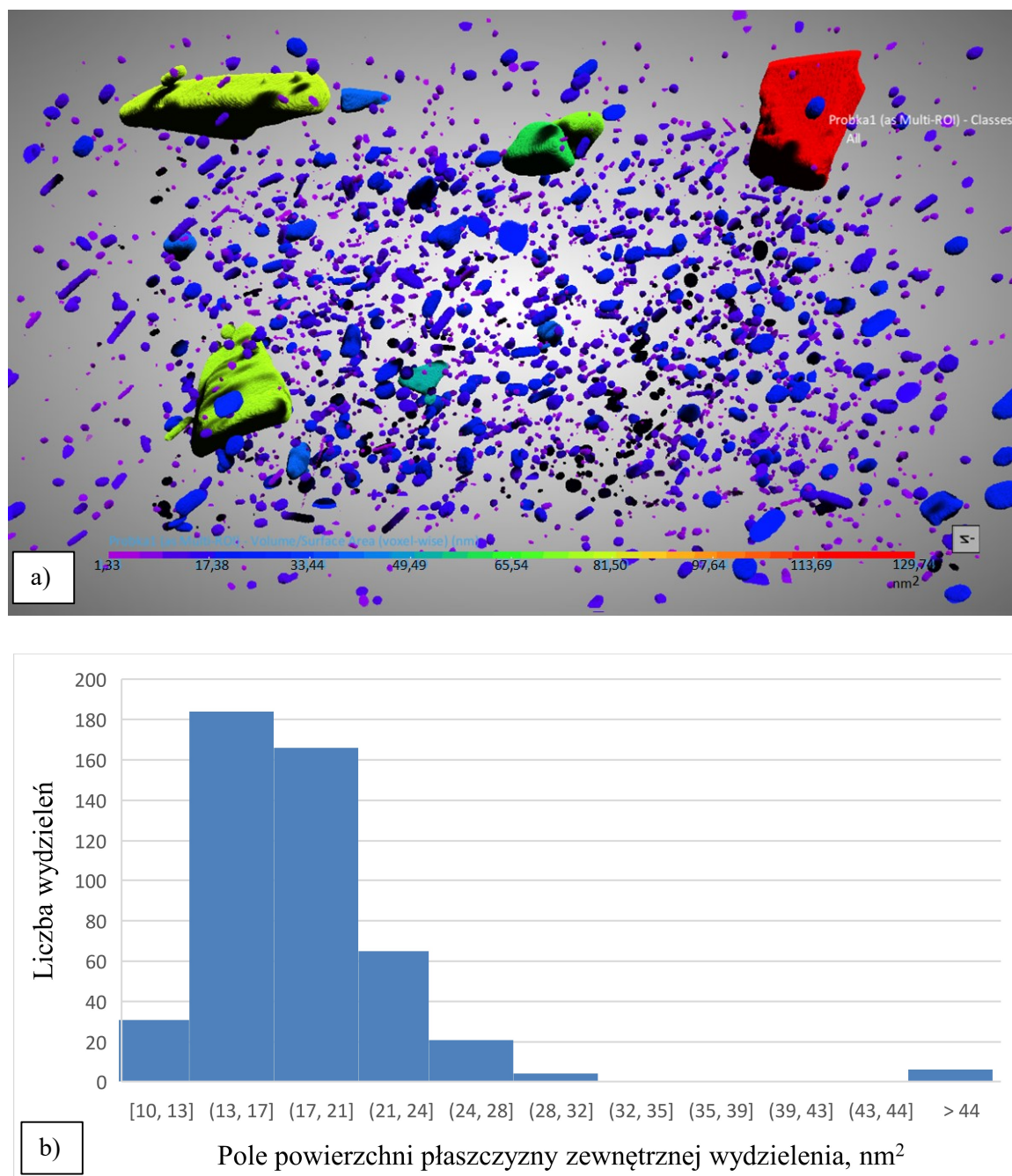
Natomiast na rys. 102 przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika kształtu poszczególnych wydzieleń. Wyniki te przedstawiono w postaci wizualizacji oraz histogramu współczynnika kształtu wydzieleń.



Rys. 102. Rozkład współczynnika kształtu wydzieleń w obszarze strefy mieszania:  
a) wizualizacja przestrzenna rozmieszczenia wydzieleń z zaznaczonym kolorem kryterium kształtu, b) histogram rozkładu współczynnika kształtu wydzieleń



Ocena rozkładu geometrycznego współczynnika kształtu wskazuje, że liczba wydzieli o kształcie zbliżonym do kulistego to ok. 80. Spośród wszystkich wydzieli ponad 350 charakteryzuje się kształtem zbliżonym w ok. 75% do kształtu kulistego. Pozostałe ok. 70% wydzieli cechuje się kształtem wydłużonym (rys. 102b). Uzupełnieniem opisu wydzieli było również wyznaczenie pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieli. Wyniki tych badań przedstawiono w postaci na rys. 103.



Rys. 103. Rozkład pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieli w strefie mieszania:

- a) wizualizacja przestrzenna pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieli,
- b) histogram rozkładu pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzieli

Wyniki badań rozkładu pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzielen wykazały, że w strefie mieszania ponad 180 wydzielen charakteryzuje się polem powierzchni płaszczyzny zewnętrznej w zakresie  $13 \pm 17 \text{ nm}^2$ , a ponad 160 wydzielen posiada pole powierzchni w zakresie  $17 \pm 21 \text{ nm}^2$ . Łącznie wszystkie te wydzielenia stanowią ok. 80% wszystkich wydzielen dla których przeprowadzono pomiary w całej objętości zrekonstruowanego obszaru badawczego.

Wyniki rekonstrukcji 3D wybranego obszaru złącza FSW wskazują na różną budowę strukturalną w obszarach materiału rodzimego oraz strefy mieszania. W strefie mieszania złącza obserwowano prawie dwukrotnie więcej wydzielen o średnicy zastępczej w przedziale  $50 \pm 100 \text{ nm}$  (rys. 99) w porównaniu do średnicy wydzielen w obszarze materiału rodzimego (rys. 93). Wydzielenia te są także znacznie mniejsze w porównaniu do materiału rodzimego. W obszarze strefy mieszania ujawniono kilka dużych wydzielen związanych z występowaniem faz, których nie obserwowano w materiale rodzimym. Różnicę pomiędzy budową wydzielen opisuje także średnia średnica Fereta. W obszarze materiału rodzimego liczba wydzielen o średnicy Fereta w przedziale  $49 \pm 59 \text{ nm}$  wynosi ponad 500 (rys. 95). Z kolei liczba tych wydzielen w obszarze strefy mieszania w tym samym przedziale średnicy wynosi tylko ok. 110 (rys. 101). Wyniki badań rozkładu współczynnika kształtu wskazują, że większość wydłużonych wydzielen jest w materiale rodzimym (rys. 96). W strefie mieszania większa część wydzielen uległa rozdrobnieniu na mniejsze o kształtach bardziej zbliżonych do kulistego (rys. 102). Jest to spowodowane oddziaływaniem trzpienia narzędzia mieszającego, które rozdrabnia strukturę złącza. Potwierdzają to również wyniki obliczeń pola powierzchni płaszczyzny zewnętrznej wydzielen, która różni się w obszarze materiału rodzimego oraz w strefie mieszania.

## **11. Ocena właściwości złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082**

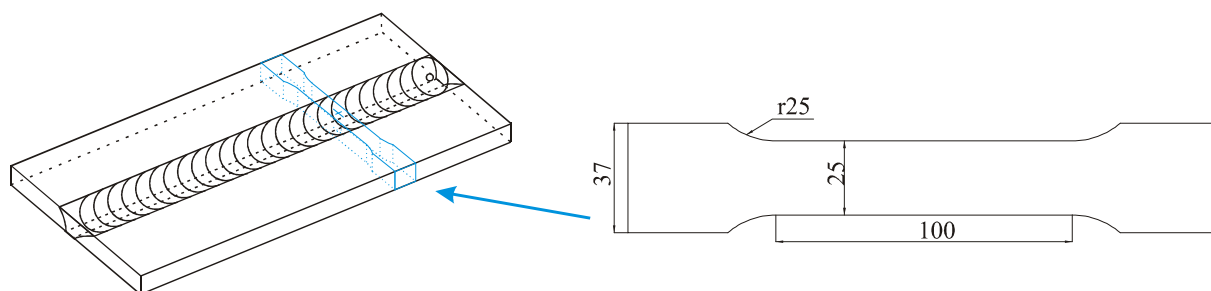
### **11.1. Badania właściwości mechanicznych złączy FSW**

Do badań właściwości mechanicznych zakwalifikowano tylko te złącza, które spełniały wymagania normy PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57] w zakresie poziomu akceptacji „B” tj. dla których nie ujawniono niezgodności takich jak pęknięcia, pęcherze, odkształcenia złączy i niezgodności budowy zewnętrznej złącza FSW.



### 11.1.1. Wytrzymałość na rozciąganie złączy FSW

W celu określenia właściwości wytrzymałościowych złączy doczołowych wykonanych metodą FSW przeprowadzono próby rozciągania złączy wg PN-EN ISO 4136:2013-05E [84]. Z każdego złącza pobrano po cztery próbki tak, aby zgrzeina znajdowała się w środkowej części ich bazy pomiarowej o długości 100 mm (rys. 104). Próbę jednoosiowego rozciągania wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4210. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia, z prędkością odkształcania 5 mm/min.



Rys. 104. Miejsce wycięcia oraz wymiary próbki do przeprowadzenia badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW

Do szczegółowej analizy wyników badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW zastosowano wnioskowanie statystyczne oparte na odchyleniu standardowym ( $\sigma$ ), które określa o ile wszystkie wartości wytrzymałości na rozciąganie różnią się średnio od średniej arytmetycznej badanej zmiennej. Dodatkowo, do analizy wyników badań wytrzymałości na rozciąganie, zastosowano wnioskowanie statystyczne oparte na estymacji przedziałowej parametrów rozkładu jednej zmiennej, której podstawowym narzędziem jest współczynnik zmienności czyli przedział, do którego z pewnym prawdopodobieństwem należy szukana wartość.

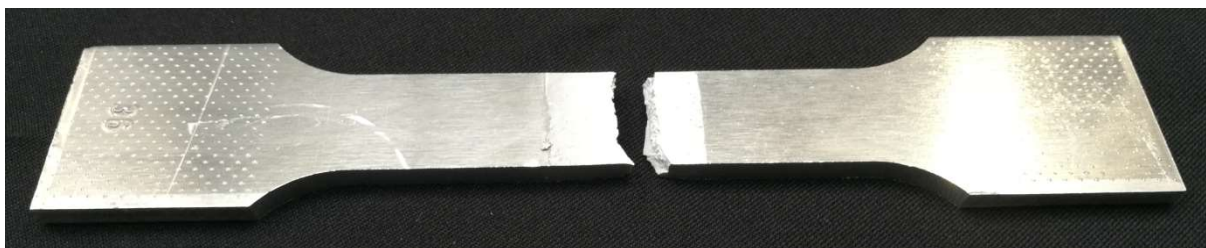
Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW przedstawiono w tablicy 18 oraz w tablicy 19 odpowiednio dla złączy zgrzewanych z prędkością  $V_z=450$  mm/min oraz  $V_z=900$  mm/min. Przykładową próbkę po próbie rozciągania przedstawiono na rys. 105.

Tablica 18. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6082. Prędkość zgrzewania  $V_z=450$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa | Miejsce zniszczenia                 | Średnia wytrzymałość na rozciąganie $R_{m\bar{s}r}$ , MPa | Odchylenie standardowe, $\sigma$ | Współczynnik zmienności |
|------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1.   | 450                                         | 237                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   | 234                                                       | 2,13                             | 0,01                    |
| 2.   |                                             | 235                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 3.   |                                             | 232                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 4.   |                                             | 235                                     | Zerwanie w osi złącza               |                                                           |                                  |                         |
| 5.   | 900                                         | 228                                     | Zerwanie w osi złącza               | 230                                                       | 0,77                             | 0,00                    |
| 6.   |                                             | 230                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 7.   |                                             | 230                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 8.   |                                             | 230                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 9.   | 1800                                        | 204                                     | Zerwanie w osi złącza               | 208                                                       | 30,35                            | 0,15                    |
| 10.  |                                             | 234                                     | Zerwanie w złączu - strona natarcia |                                                           |                                  |                         |
| 11.  |                                             | 226                                     | Zerwanie w osi złącza               |                                                           |                                  |                         |
| 12.  |                                             | 166                                     | Zerwanie w osi złącza               |                                                           |                                  |                         |

Tablica 19. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6082. Prędkość zgrzewania  $V_z=900$  mm/min

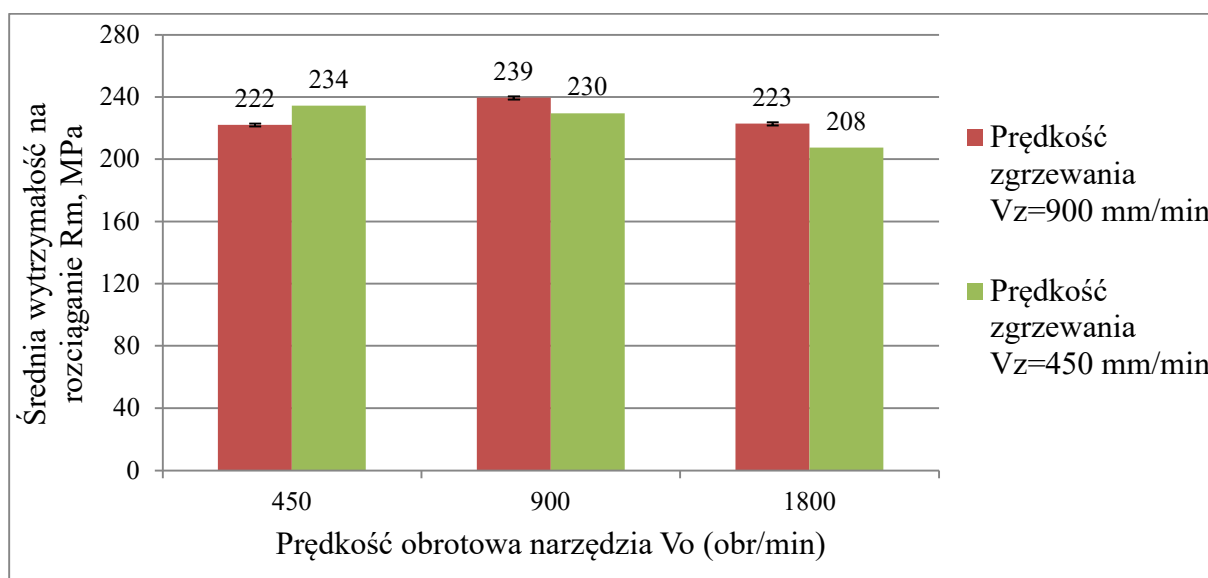
| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa | Miejsce zniszczenia                 | Średnia wytrzymałość na rozciąganie $R_{m\bar{s}r}$ , MPa | Odchylenie standardowe, $\sigma$ | Współczynnik zmienności |
|------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1.   | 450                                         | 240                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   | 222                                                       | 22,89                            | 0,10                    |
| 2.   |                                             | 189                                     | Zerwanie w osi złącza               |                                                           |                                  |                         |
| 3.   |                                             | 235                                     | Zerwanie w osi złącza               |                                                           |                                  |                         |
| 4.   |                                             | 225                                     | Zerwanie w osi zgrzeiny             |                                                           |                                  |                         |
| 5.   | 900                                         | 242                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   | 239                                                       | 2,49                             | 0,01                    |
| 6.   |                                             | 239                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 7.   |                                             | 237                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 8.   |                                             | 240                                     | Zerwanie w złączu - strona spływu   |                                                           |                                  |                         |
| 9.   | 1800                                        | 166                                     | Zerwanie w osi złącza               | 223                                                       | 38,14                            | 0,17                    |
| 10.  |                                             | 239                                     | Zerwanie w złączu - strona natarcia |                                                           |                                  |                         |
| 11.  |                                             | 245                                     | Zerwanie w złączu - strona natarcia |                                                           |                                  |                         |
| 12.  |                                             | 241                                     | Zerwanie w złączu - strona natarcia |                                                           |                                  |                         |



Rys. 105. Przykładowa próbka po statycznej próbie rozciągania. Parametry zgrzewania:  
 $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min

Na rysunku 106 przedstawiono średnią wytrzymałość złączy FSW na rozciąganie w zależności od zastosowanej prędkości obrotowej narzędzia. Wyniki przedstawiono dla dwóch prędkości zgrzewania tj.  $V_z=450$  mm/min oraz 900 mm/min.

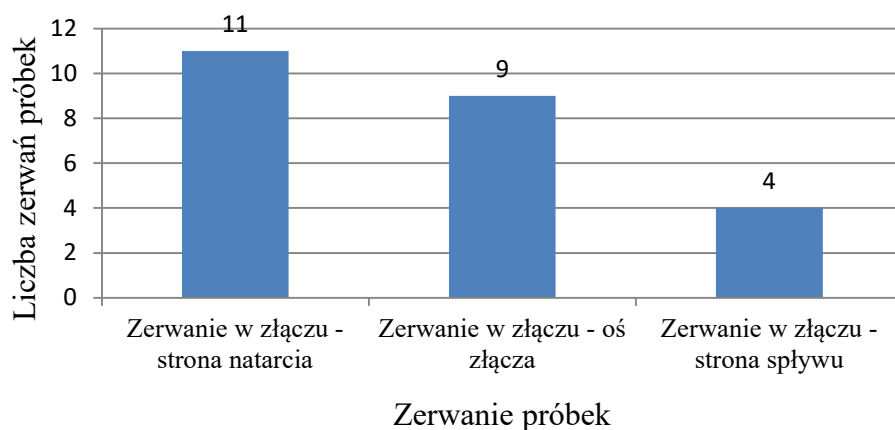
Średnia, zmierzona na podstawie 4 prób, wytrzymałość na rozciąganie materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 wynosiła 328 MPa.



Rys. 106. Zależność średniej wytrzymałości na rozciąganie  $R_{m\bar{s}r}$  od prędkości obrotowych. Wyniki dla dwóch prędkości zgrzewania  $V_z=450$  oraz 900 mm/min

Na rys. 107 przedstawiono miejsca zniszczenia tj. zniszczenie w osi złącza, zniszczenie po stronie natarcia, zniszczenie po stronie spływu w całkowitej liczbie zerwanych złączy FSW.





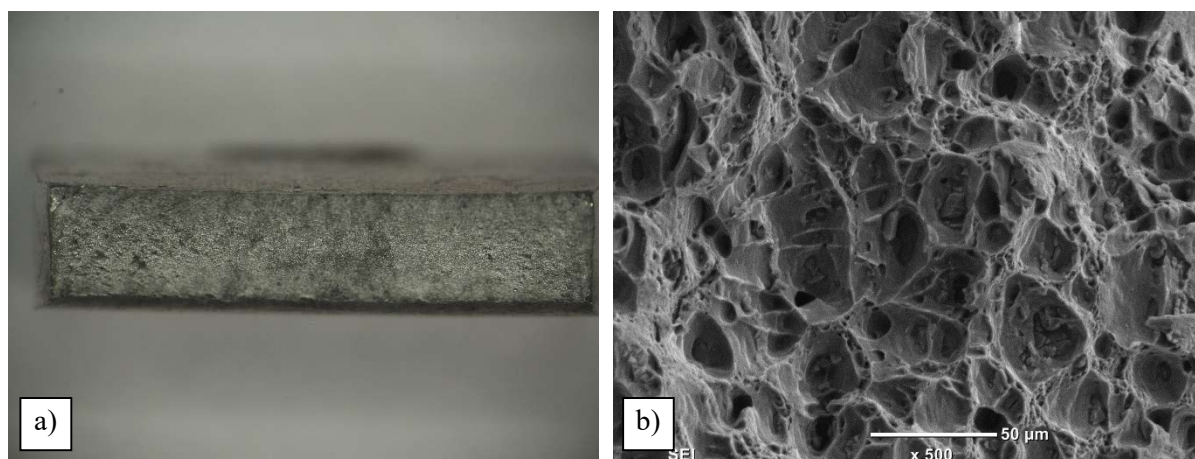
Rys. 107. Liczba zerwań próbek wytrzymałościowych po stronie natarcia, w osi zgrzeiny oraz po stronie spływu

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW wskazują, że istnieją różnice w wytrzymałości w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Wytrzymałość złączy jest w przedziale od 208 do 239 MPa. Przy prędkości zgrzewania 450 mm/min wytrzymałość na rozciąganie spada wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia i wynosi 234 MPa przy prędkości 450 obr/min, 230 MPa przy prędkości 900 obr/min oraz 208 MPa prędkości 1800 obr/min (rys. 106). Przy zgrzewaniu z wyższą prędkością tj. 900 mm/min wytrzymałość na rozciąganie początkowo rośnie wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia z 450 na 900 obr/min i wynosi odpowiednio 222 oraz 239 MPa. Następnie obserwowano spadek wytrzymałości do poziomu 223 MPa przy prędkości obrotowej narzędzia 1800 obr/min (rys. 106). Zestawienie największej prędkości obrotowej narzędzia 1800 obr/min z najniższą prędkością zgrzewania 450 mm/min negatywnie wpływa na jakość połączenia w wyniku odkładania zbyt dużej partii materiału poza zgrzeinę w postaci wypływki co powoduje obniżenie wytrzymałości złącza. Średnia wytrzymałość na rozciąganie dla złączy FSW to ok. 224 MPa oraz 228 MPa odpowiednio dla tych, które wykonano z prędkością zgrzewania  $V_z=450$  mm/min oraz  $V_z=900$  mm/min (rys. 106).

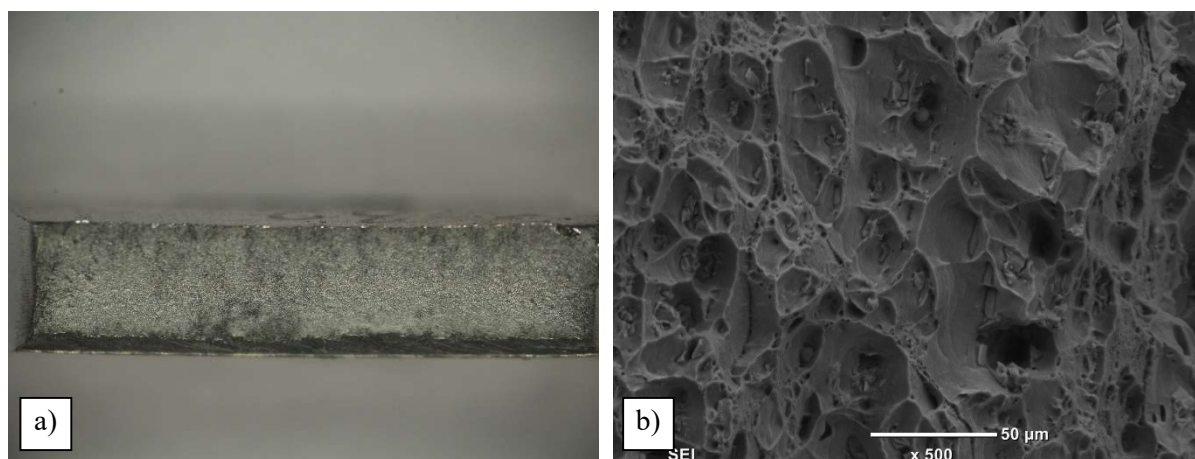
### Wyniki badań fraktograficznych

Oceny charakteru zniszczenia próbek dokonano na przełomach, które uległy zniszczeniu podczas prowadzenia badania wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW. Badania fraktograficzne przeprowadzono dla złączy FSW w pełnym zakresie parametrów procesu zgrzewania (rys. 108 - 113). Badania wykonano dla tych obszarów złącza, w których

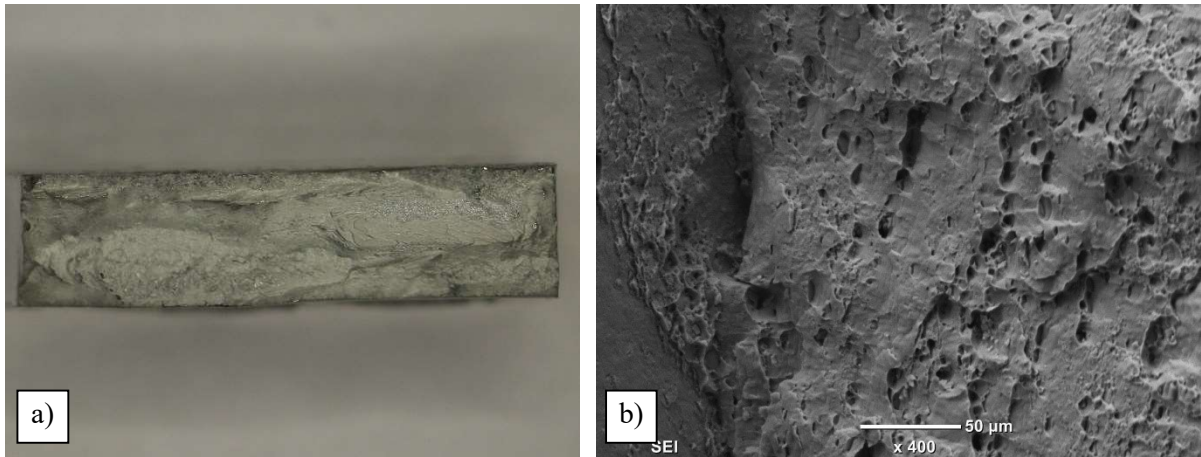
najczęściej dochodziło do zniszczenia złącza podczas prowadzenia badania wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW.



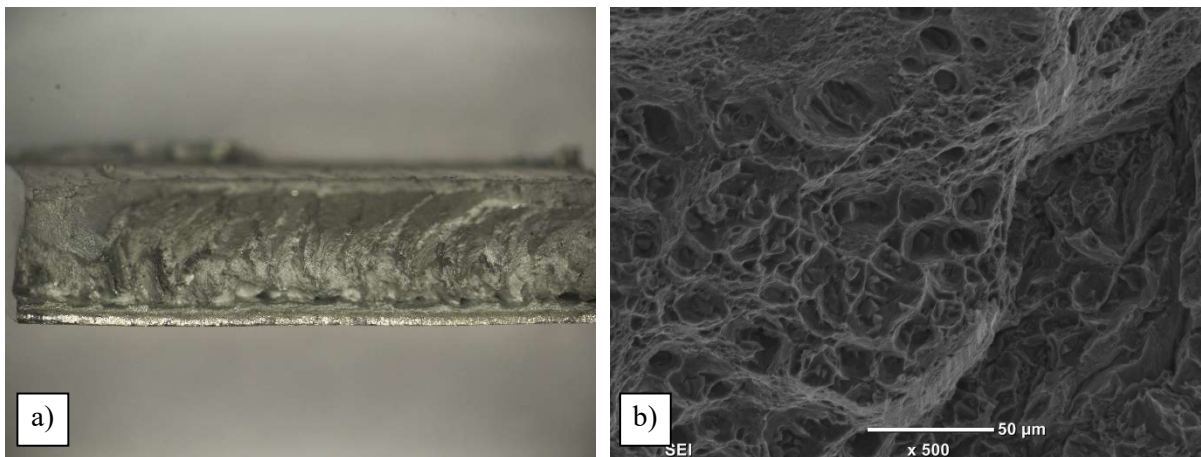
Rys. 108. Przełom próbki FSW po stronie spływu: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min.



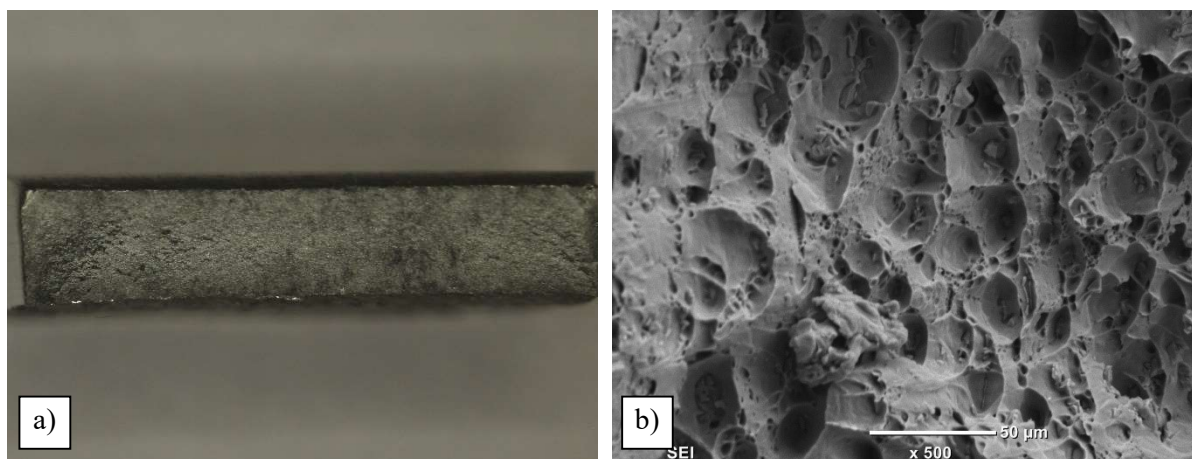
Rys. 109. Przełom próbki FSW po stronie spływu: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min.



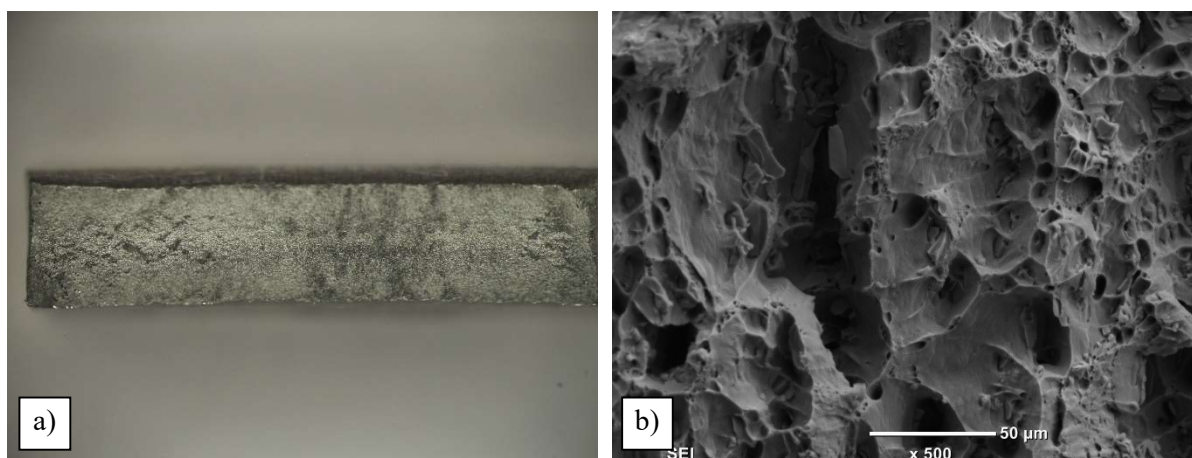
Rys. 110. Przełom próbki FSW w osi złącza: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min



Rys. 111. Przełom próbki FSW w osi złącza: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min



Rys. 112. Przełom próbki FSW po stronie spływu: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min



Rys. 113. Przełom próbki FSW po stronie natarcia: a) obserwacja na mikroskopie stereoskopowym (SM), b) obserwacja na mikroskopie skaningowym (SEM). Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

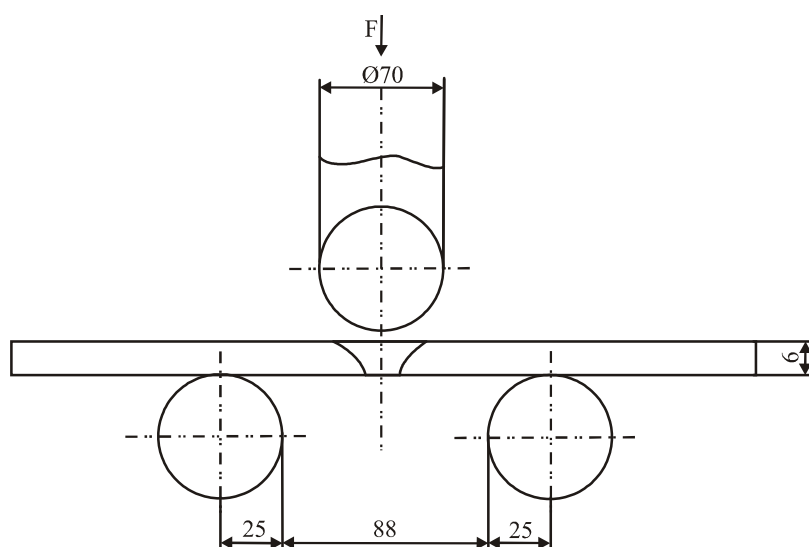
Badania przełomów złączy wykazały, że mają one w większości charakter plastyczny. Na dwóch przełomach, o charakterze plastycznym, obserwowano rozwarstwienia (rys. 110 i 111). Średnie przewężenie próbek po badaniu wytrzymałości na rozciąganie mieści się w przedziale  $23,1 \div 23,4$  mm, co stanowi odpowiednio 92,3% oraz 93,6% szerokości pomiarowej próbki. W zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania, zniszczenie próbek następowało w różnych strefach. Na rys. 111 widoczne jest charakterystyczne odkładanie się partii zgrzewanych materiałów spowodowane niską prędkością obrotową narzędzia tj.  $V_o=450$  obr/min przy zgrzewaniu z wysoką prędkością tj.  $V_z=900$  mm/min. Materiał w tym obszarze wykazuje ślady braku dostatecznego wymieszania stąd widoczne rozwarstwienia. Na każdym z badanych przełomów nie



obserwowano innych rodzajów niezgodności takich jak pęknięcia, zbyt duże pocienienie zgrzewanych materiałów, pustki w zgrzeinie, pęcherze czy pustki na granicy stref złącza.

### 11.1.2. Próba zginania złączy zgrzewanych metodą FSW

Próby zginania złączy FSW wykonano w temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4210 zgodnie z normą PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012 [93], co jest zapisane w podanej normie jako „badanie na zginanie”. Próby wykonywano do momentu zniszczenia próbki lub do osiągnięcia umownej wartości kąta zgięcia 90°. Jako kryterium przyjęto brak pęknięć dla podanego kąta. Schemat próby zginania dla złączy FSW przedstawiono na rys. 114. Wyniki prób zginania złączy przedstawiono w tablicach 20÷25.



Rys. 114. Schemat próby zginania złącza FSW

Tablica 20. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.   | 450                                         | 450                                 | Lico złącza           | pozytywny             |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 6.   |                                             |                                     | Grań złącza           | pozytywny             |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny             |

Tablica 21. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi               |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1.   | 900                                         | 450                                 | Lico złącza           | pozytywny                           |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pęknięcie w SWC po stronie natarcia |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pęknięcie w SWC po stronie natarcia |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pęknięcie w SWC po stronie natarcia |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pęknięcie w SWC po stronie natarcia |
| 6.   |                                             |                                     | Grań złącza           | pozytywny                           |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                           |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                           |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                           |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny                           |

Tablica 22. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi  |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1.   | 1800                                        | 450                                 | Lico złącza           | pęknięcie w osi złącza |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pęknięcie w osi złącza |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 6.   |                                             |                                     | Grań złącza           | pozytywny              |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny              |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny              |

Tablica 23. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.   | 450                                         | 900                                 | Lico złącza           | pozytywny             |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 6.   |                                             |                                     | Grań złącza           | pozytywny             |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny             |

Tablica 24. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.   | 900                                         | 900                                 | Lico złącza           | pozytywny             |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 6.   |                                             |                                     | Grań złącza           | pozytywny             |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny             |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny             |

Tablica 25. Wyniki badań zginania złączy FSW. Parametry zgrzewania:  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

| L.p. | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , obr/min | Zginana strona złącza | Wynik badania / uwagi         |
|------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1.   | 1800                                        | 900                                 | Lico złącza           | pozytywny / rysy w osi złącza |
| 2.   |                                             |                                     |                       | pozytywny / rysy w osi złącza |
| 3.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 4.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 5.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 6.   |                                             |                                     | Grąń złącza           | pozytywny                     |
| 7.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 8.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 9.   |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |
| 10.  |                                             |                                     |                       | pozytywny                     |

Analiza wyników badań wytrzymałości złączy FSW na zginanie wykazała, że złącza, wykonane z prędkością zgrzewania 450 mm/min oraz prędkością obrotową narzędzia 450 obr/min spełniły założone kryterium badania (kąt zgięcia  $90^\circ$ ). Wartość kąta osiągnięto zarówno przy zginaniu złączy od strony lica jak i grani. Przy zgrzewaniu z prędkością obrotową narzędzia 900 obr/min aż cztery z pięciu próbek uległy pęknięciu w strefie wpływu ciepła złącza po stronie natarcia (tablica 21). Może to być powiązane z brakiem łagodnego przejścia materiału pomiędzy strefą wpływu ciepła, a centralnym obszarem zgrzeiny. Przy większej prędkości obrotowej tj. 1800 obr/min dwie próbki uległy zniszczeniu w osi złącza podczas gięcia od strony lica (tablica 22).

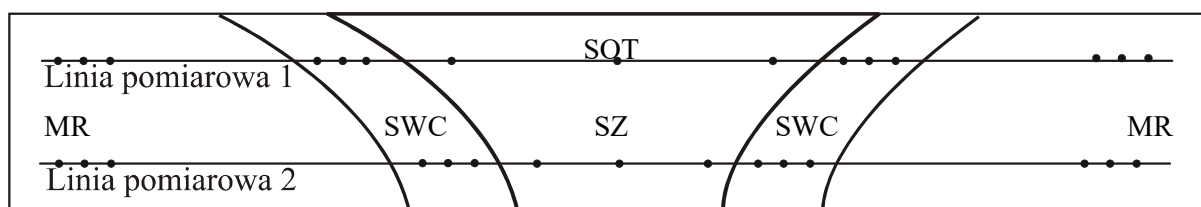
Pozytywny wynik próby zginania dla wszystkich badanych próbek otrzymano przy zgrzewaniu z większą prędkością tj. 900 mm/min oraz z prędkością obrotową narzędzia 450 i 900 obr/min (tablica 23 i 24). Przy zgrzewaniu z prędkością obrotową narzędzia 1800 obr/min w dwóch próbkach ujawniono pęknięcia powierzchniowe w obszarze osi złącza. Nie wpłynęło to na wynik badania, który zakwalifikowano jako pozytywny z uwagi na osiągnięty bez zniszczenia próbki kąt zgięcia  $90^\circ$  (tablica 25).

Analizując wyniki badań wytrzymałości złączy na zginanie stwierdzono, że żadne z badanych złączy nie uległo zniszczeniu podczas gięcia od strony grani. Świadczy to o poprawnie przeprowadzonym procesie zgrzewania tj. bez linii „braku zgrzania”, która może inicjować pękanie złącza podczas próby.



### 11.1.3. Pomiary twardości złączy FSW

Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa, zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-2:2016-04 [94], przy obciążeniu 9,81N (HV1). Pomiary wykonano na twardościomierzu KB50BYZ-FA, na powierzchni zglądu metalograficznego, po trzy punkty w każdej ze stref złącza na dwóch liniach pomiarowych (rys. 115).

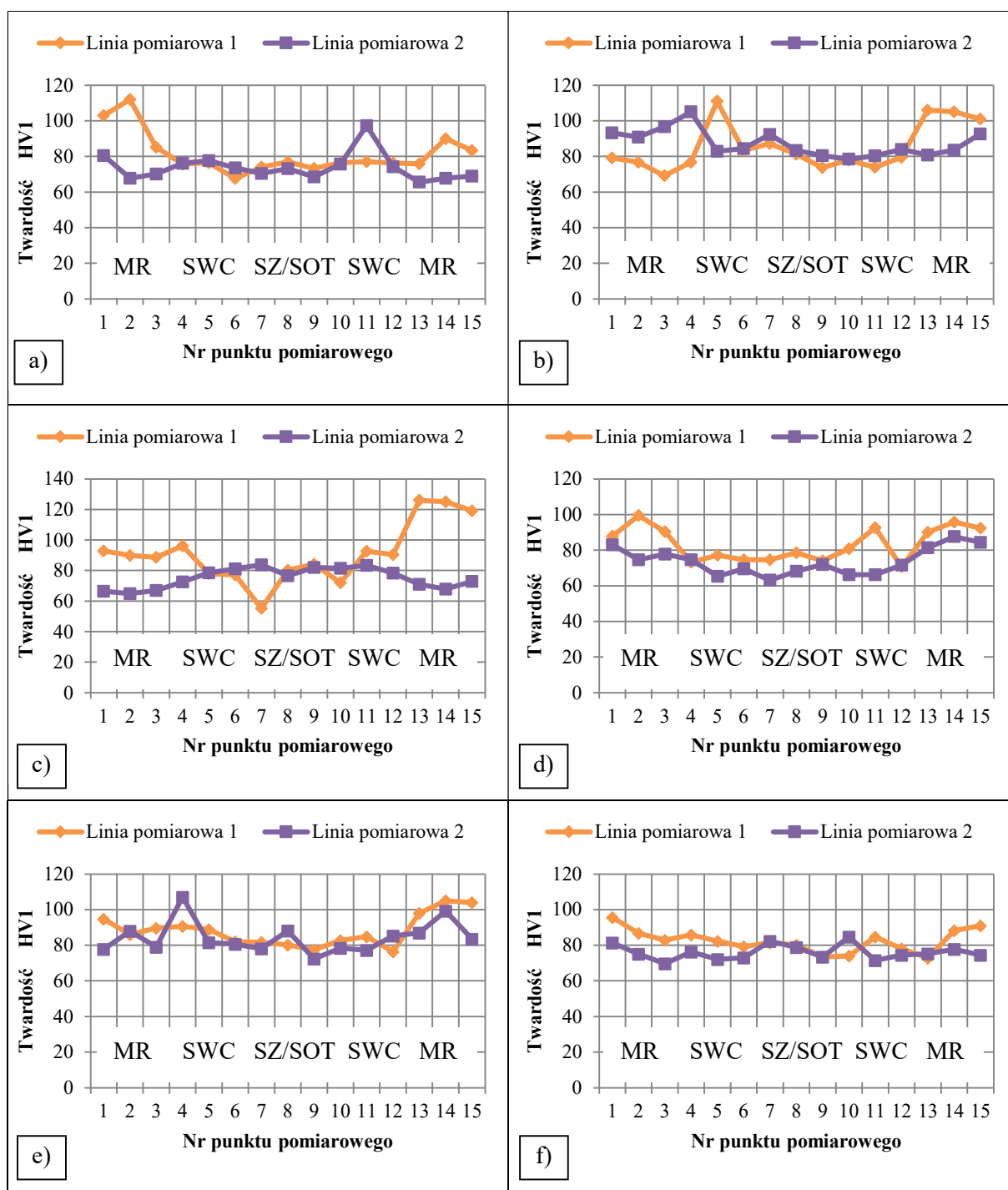


Rys. 115. Schemat pomiaru twardości HV1 złącza ze stopu aluminium EN AW-6082 z oznaczonymi liniami oraz punktami pomiarowymi

Średnie wyniki pomiarów twardości złączy FSW w zależności od prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania przedstawiono w tablicy 26.

Tablica 26. Średnie wyniki pomiarów twardości złączy FSW w zależności od prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania

| L.p.    | Prędkość obrotowa narzędzia $V_o$ , obr/min | Prędkość zgrzewania $V_z$ , mm/min | MR po stronie natarcia | SWC po stronie natarcia | SOT SZ | SWC po stronie spływu | MR po stronie spływu |
|---------|---------------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------|-----------------------|----------------------|
| 1.      | 450                                         | 450                                | 86                     | 74                      | 73     | 79                    | 75                   |
| 2.      | 900                                         |                                    | 84                     | 91                      | 83     | 79                    | 95                   |
| 3.      | 1800                                        |                                    | 78                     | 81                      | 77     | 83                    | 97                   |
| 4.      | 450                                         | 900                                | 85                     | 72                      | 72     | 75                    | 89                   |
| 5.      | 900                                         |                                    | 86                     | 88                      | 80     | 81                    | 96                   |
| 6.      | 1800                                        |                                    | 82                     | 78                      | 78     | 78                    | 80                   |
| ŚREDNIA |                                             |                                    | 84                     | 81                      | 77     | 79                    | 89                   |



Rys. 116. Rozkład twardości na przekroju złącza zgrzewanego FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 dla parametrów zgrzewania: a)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min, b)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min, c)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min, d)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min, e)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min, f)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

Wyniki pomiarów twardości dla złączy FSW, wykonanych przy zastosowaniu różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz zgrzewanie z różnymi prędkościami wskazują na typowy

rozkład twardości dla złączy FSW. Średnia twardość w materiale rodzimym po stronie natarcia wynosi 84 HV1, natomiast po stronie spływu 89 HV1. Średnia twardość w SWC po stronie natarcia to 81 HV1 i jest zbliżona do średniej twardości w SWC po stronie spływu, która wynosi 79 HV1. Najmniejszą twardość zaobserwowano w centralnej części złącza i wynosi ona 77 HV1. Wartości poszczególnych twardości są podobne niezależnie od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania (tablica 26).

### **11.2. Ocena odporności złączy FSW na korozję**

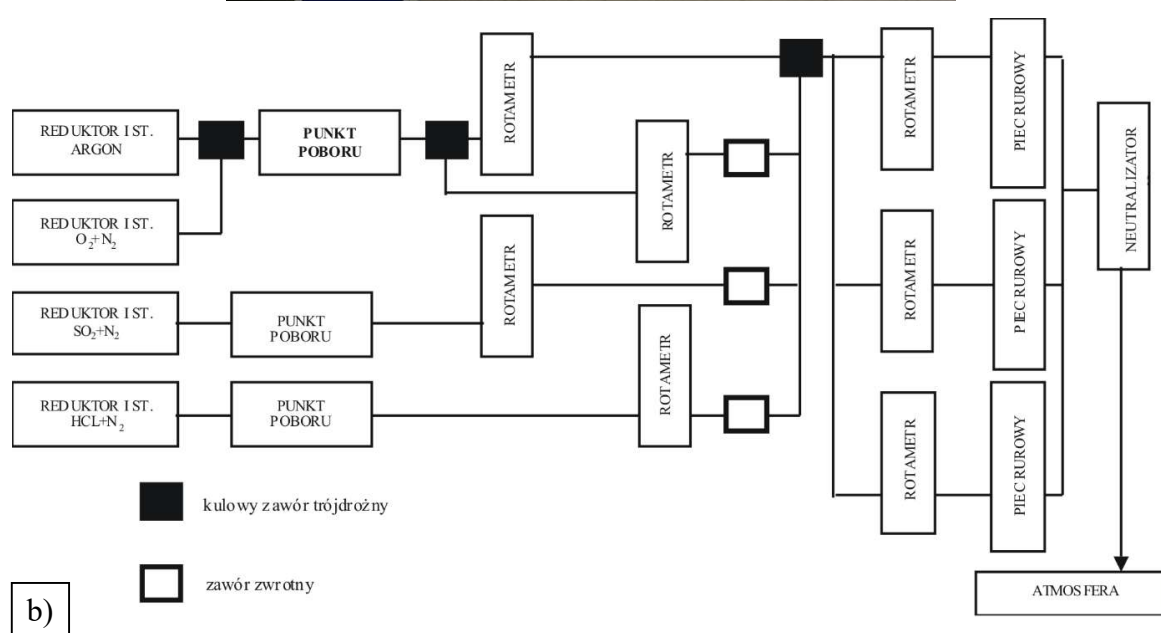
Stop aluminium EN AW-6082 może pracować w różnych warunkach temperatury i może być stosowany w wielu gałęziach przemysłu motoryzacyjnego, kolejowego oraz innych. Różne warunki pracy elementów konstrukcji z tego rodzaju materiału powodują, że może on być narażony na niezamierzoną degradację w środowiskach korozji chemicznej, elektrochemicznej oraz w wysokich temperaturach. Tego typu zagrożenia w szczególności mogą występować w przemyśle motoryzacyjnym np. przy wykonywaniu metodą FSW obudów silników wysokoprężnych lub nowoczesnych silników elektrycznych ze stopu aluminium EN AW-6082. W ramach badań przeprowadzono następujące rodzaje badań odporności złączy FSW na korozję:

- badania odporności na korozję wysokotemperaturową w atmosferze symulowanych spalin,
- badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej SO<sub>2</sub>,
- badania odporności na korozję międzykrystaliczną,
- badania odporności na korozję w rozpylonej solance.

#### **11.2.1. Badania odporności na korozję wysokotemperaturową w atmosferze symulowanych spalin**

Badania odporności na korozję wysokotemperaturową złączy FSW w atmosferze symulowanych spalin silnika diesla wykonano w Katedrze Metalurgii i Recyklingu Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej w Katowicach.

Stanowisko badawcze zbudowane z pieców rurowych z zabudowanymi rurami kwarcowymi i ceramicznymi, reduktorów, punktów poboru gazu z rotametrami, układu neutralizującego oraz butli z gazami wchodzącymi w skład symulowanej mieszaniny gazów pokazano na rys. 117. Do badań wycięto próbki ze złączy FSW i materiału rodzimego. Wymiary próbki wynosiły 5 mm x 5 mm x 6 mm. Tak przygotowane próbki umieszczono w tygielkach badawczych z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i zamocowano w komorze badawczej pieca rurowego.



Rys. 117. Stanowisko do badań odporności na korozję wysokotemperaturową: a) widok stanowiska zbudowanego w Katedrze Metalurgii i Recyklingu na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, b) schemat stanowiska

Jako mieszaninę gazów testowych stosowano mieszaninę o składzie  $9\% O_2 + 0,02\% SO_2 + 7\% CO_2 + 0,15\% NO_2$  w azocie ( $N_2$ ), której skład odpowiada typowym spalinom w pojazdach samochodowych z silnikiem diesla [95, 96]. Badania odporności na korozję wysokotemperaturową złączy FSW i materiału rodzimego przeprowadzono w temperaturze  $210^\circ C$  i  $300^\circ C$ .

Procedurę eksperymentu podzielono na trzy etapy:

- nagrzewanie wsadu pieca w atmosferze argonu, aż do zadanej temperatury (210°C lub 300°C), w celu uniknięcia procesu utleniania próbek;
- wytrzymanie próbek w atmosferze korozyjnej o zadanych stężeniach gazów przy zadanej temperaturze i przepływie mieszaniny gazów zapewniającym jednokrotną wymianę atmosfery w czasie czterech godzin;
- chłodzenie wsadu pieca w atmosferze argonu, aż do temperatury 20°C.

Jako miarę odporności na korozję wysokotemperaturową złączy FSW przyjęto zmianę masy próbki po badaniach. Uzyskane wyniki odniesiono do materiału rodzimego tj. stopu aluminium EN AW- 6082.

Badania odporności na korozję przeprowadzono w czasie do 1000 godzin, wykonując pomiary przyrostu masy produktów korozji. Dla każdej z próbek wykonywano po trzy pomiary masy, które zostały uśrednione. Odchylenie standardowe od średniej było poniżej 1%. Wyniki badań odporności na korozję w temperaturze 210°C dla wybranego złącza wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min oraz prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min, przedstawiono w tablicach 27. Z kolei w tablicy 28 przedstawiono wyniki badań prowadzonych w temperaturze 300°C. Obejmują one dane dla różnych miejsc pobrania próbek do badań tj. z materiału rodzimego, ze strefy wpływu ciepła po stronie natarcia, z osi złącza oraz ze strefy wpływu ciepła po stronie spływu.



Tablica 27. Wyniki badań korozji wysokotemperaturowej próbek FSW prowadzonych w temperaturze 210°C

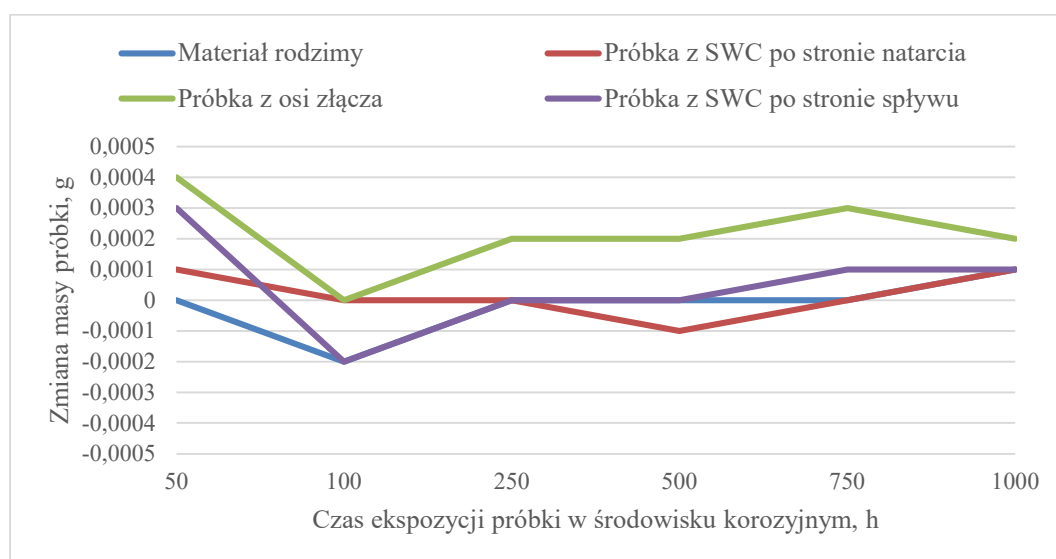
| Wyniki badań próbek wyciętych z materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082   |                    |                |            |                       |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,3908         | 0,3908     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,3993         | 0,3995     | -0,0002               | -0,05%                |
| 3.                                                                               | 250                | 0,3872         | 0,3872     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,3972         | 0,3972     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,3992         | 0,3992     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,3905         | 0,3904     | 0,0001                | 0,03%                 |
| Wyniki badań próbek wyciętych ze strefy wpływu ciepła po stronie natarcia złącza |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,4315         | 0,4314     | 0,0001                | 0,02%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,4286         | 0,4286     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,4289         | 0,4289     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,4320         | 0,4321     | -0,0001               | -0,02%                |
| 5.                                                                               | 750                | 0,4264         | 0,4264     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,4258         | 0,4257     | 0,0001                | 0,02%                 |
| Wyniki badań próbek wyciętych z osi złącza FSW                                   |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,4326         | 0,4323     | 0,0003                | 0,07%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,4300         | 0,4300     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,4302         | 0,4300     | 0,0002                | 0,05%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,4292         | 0,4290     | 0,0002                | 0,05%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,4305         | 0,4302     | 0,0003                | 0,07%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,4294         | 0,4292     | 0,0002                | 0,05%                 |
| Wyniki badań próbek wyciętych ze strefy wpływu ciepła po stronie spływu          |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,4195         | 0,4192     | 0,0003                | 0,07%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,4134         | 0,4137     | -0,0003               | -0,07%                |
| 3.                                                                               | 250                | 0,4142         | 0,4142     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,4210         | 0,4210     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,4173         | 0,4172     | 0,0001                | 0,02%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,4129         | 0,4128     | 0,0001                | 0,02%                 |

Tablica 28. Wyniki badań korozji wysokotemperaturowej próbek FSW prowadzonych w temperaturze 300°C

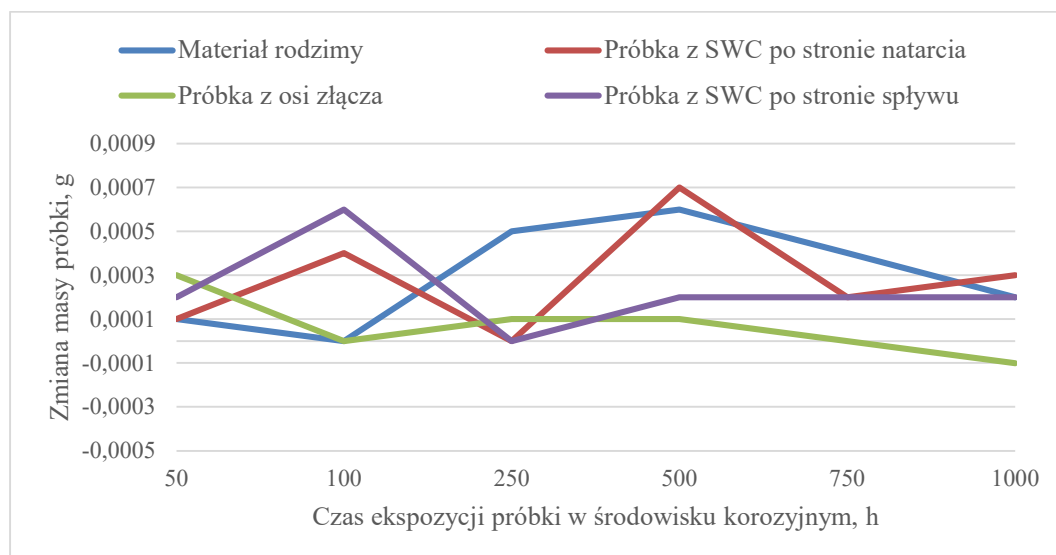
| Wyniki badań próbek wyciętych z materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082   |                    |                |            |                       |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 1,1619         | 1,1618     | 0,0001                | 0,01%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,8250         | 0,8250     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,9223         | 0,9218     | 0,0005                | 0,05%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,8462         | 0,8456     | 0,0006                | 0,07%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,9519         | 0,9515     | 0,0004                | 0,04%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 1,1586         | 1,1584     | 0,0002                | 0,02%                 |
| Wyniki badań próbek wyciętych ze strefy wpływu ciepła po stronie natarcia złącza |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,7058         | 0,7057     | 0,0001                | 0,01%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,8736         | 0,8732     | 0,0004                | 0,05%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,8620         | 0,8620     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,8698         | 0,8691     | 0,0007                | 0,08%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 1,0501         | 1,0499     | 0,0002                | 0,02%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,9820         | 0,9817     | 0,0003                | 0,03%                 |
| Wyniki badań próbek wyciętych z osi złącza FSW                                   |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,8197         | 0,8194     | 0,0003                | 0,04%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,7509         | 0,7509     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,8801         | 0,8800     | 0,0001                | 0,01%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 0,7882         | 0,7881     | 0,0001                | 0,01%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,8769         | 0,8769     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 0,7707         | 0,7708     | -0,0001               | -0,01%                |
| Wyniki badań próbek wyciętych ze strefy wpływu ciepła po stronie spływu          |                    |                |            |                       |                       |
| L.p.                                                                             | Czas ekspozycji, h | Masa próbki, g |            | Zmiana masy próbki, g | Zmiana masy próbki, % |
|                                                                                  |                    | Przed korozją  | Po korozji |                       |                       |
| 1.                                                                               | 50                 | 0,6661         | 0,6659     | 0,0002                | 0,03%                 |
| 2.                                                                               | 100                | 0,7284         | 0,7278     | 0,0006                | 0,08%                 |
| 3.                                                                               | 250                | 0,8127         | 0,8127     | 0,0000                | 0,00%                 |
| 4.                                                                               | 500                | 1,0248         | 1,0246     | 0,0002                | 0,02%                 |
| 5.                                                                               | 750                | 0,8355         | 0,8353     | 0,0002                | 0,02%                 |
| 6.                                                                               | 1000               | 1,0067         | 1,0065     | 0,0002                | 0,02%                 |

Na rys. 118 przedstawiono wykres zmiany masy próbek w zależności od czasu ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym w temperaturze 210°C. Z kolei na rys. 119

przedstawiono wyniki badań w temperaturze 300°C. Wyniki te przedstawiono dla wybranego złącza FSW wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min oraz prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min.



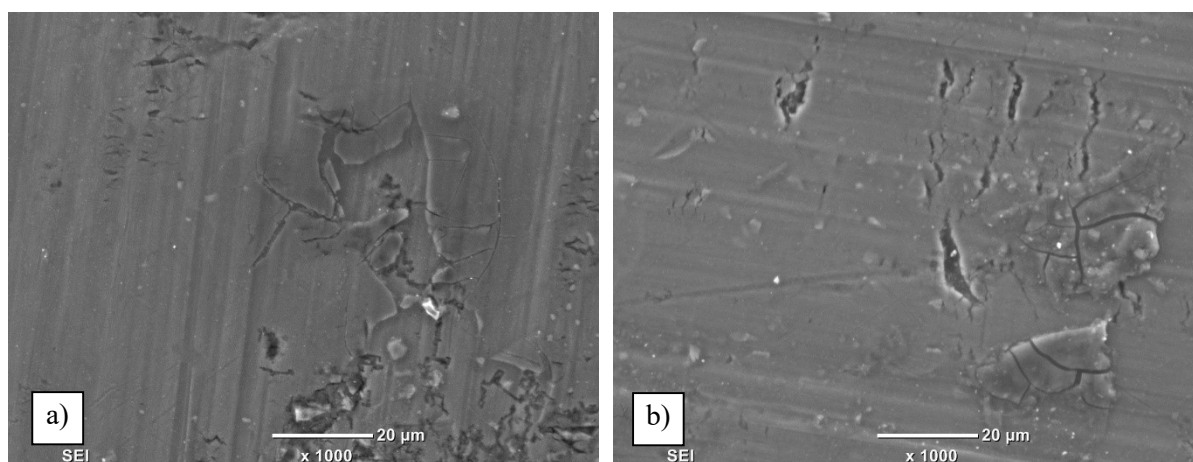
Rys. 118. Zmiana masy próbek w zależności od czasu ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym w temperaturze 210°C dla wybranego złącza FSW wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min oraz prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min



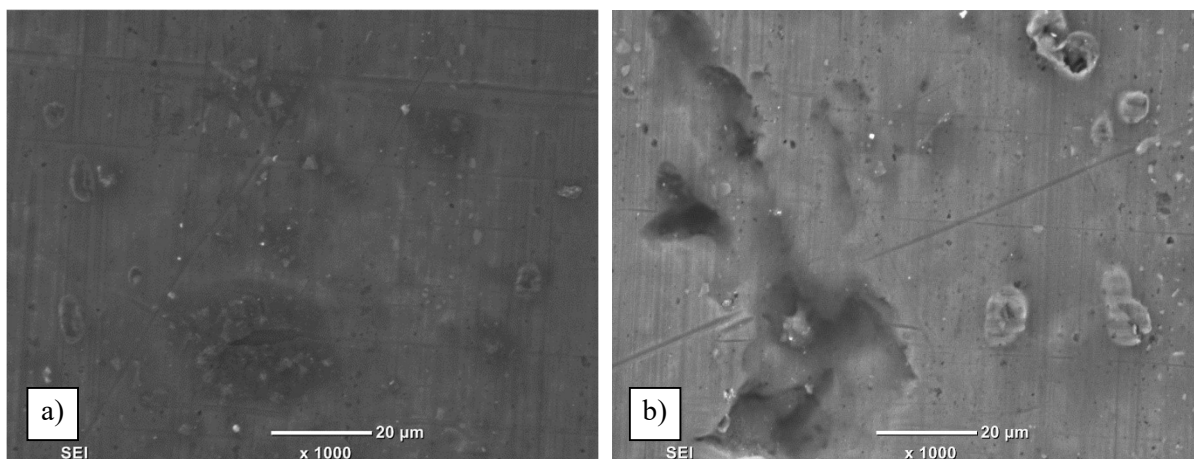
Rys. 119. Zmiana masy próbek w zależności od czasu ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym w temperaturze 300°C dla wybranego złącza FSW wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min oraz prędkością zgrzewania  $V_z=900$  mm/min

Dla złącza ze stopu aluminium EN AW-6082, niezależnie od miejsca pobrania próbek oraz czasu ekspozycji w temperaturze 210 oraz 300°C, masa próbek wyjętych odpowiednio po 50, 100, 250, 500, 750 oraz 1000 godzin praktycznie nie ulegała zmianie. Niewielkie różnice w masie próbek (na poziomie ok.  $0 \div 0,07\%$ ) można uznać za pomijalne i stanowią błąd pomiarowy, który założono na poziomie 0,1%. Stwierdzono, że zarówno stop aluminium EN AW-6082 jak również złącze FSW z tego materiału charakteryzują się podobną odpornością na działanie spalin w temperaturze do 210°C. Wskazuje to, że technologia zgrzewania FSW może być z powodzeniem stosowana do łączenia elementów w przemyśle motoryzacyjnym.

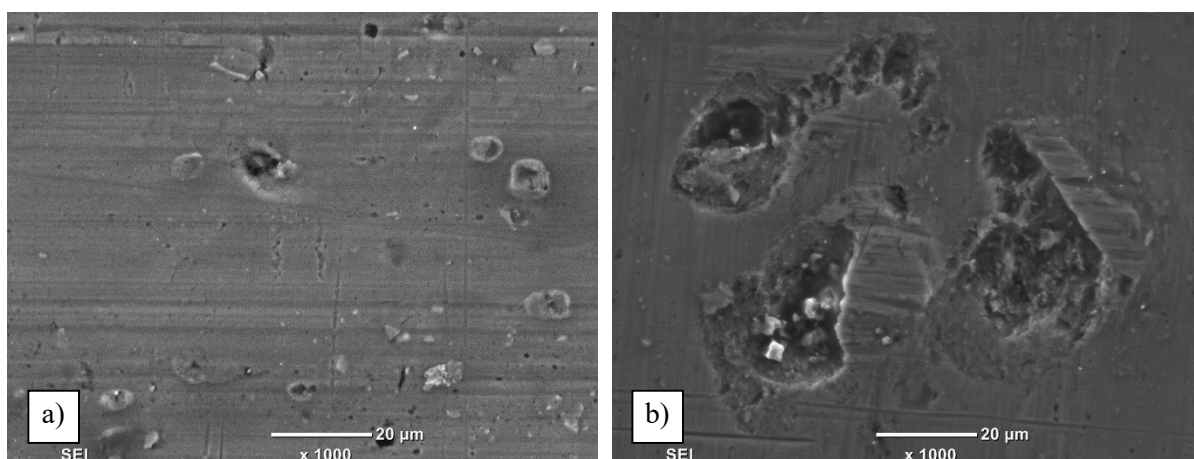
Uzupełnieniem badań odporności złączy na korozję wysokotemperaturową były badania metalograficzne. Wybrane powierzchnie próbek obserwowano na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). W celu identyfikacji produktów korozji przeprowadzono mikroanalizę składu chemicznego EDS. Uzyskane wyniki pozwoliły określić mechanizm korozji. Na rys. 120 ÷ 123 przedstawiono powierzchnię złączy w wybranych obszarach po różnych czasach ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym. Badania wykonano dla próbek wykonanych z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min i zgrzewanych z prędkością  $V_z=900$  mm/min.



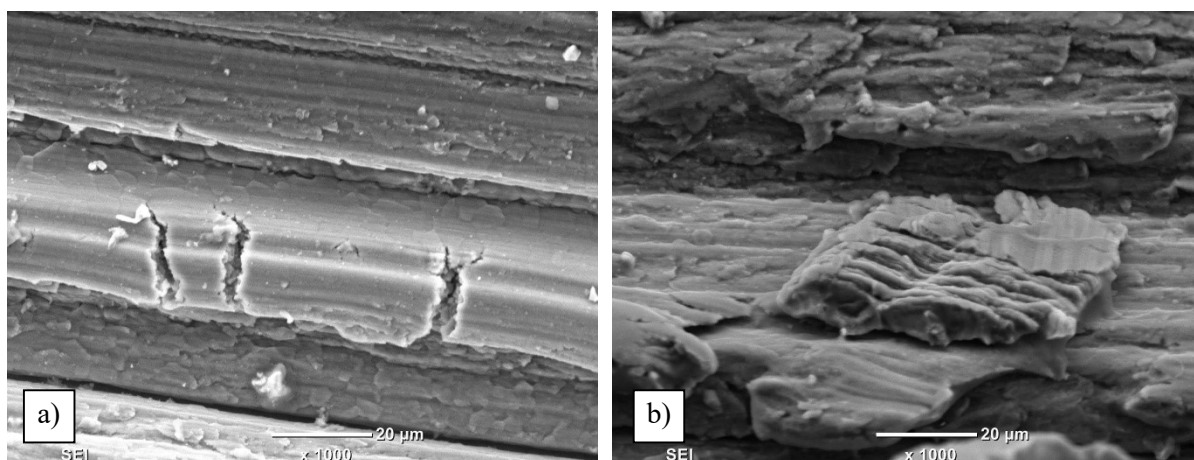
Rys. 120. Struktura SEM złącza FSW, poddanego działaniu środowiska korozyjnego, w obszarze materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082: a) po 50 h ekspozycji, b) po 500 h ekspozycji



Rys. 121. Struktura SEM złącza FSW, poddanego działaniu środowiska korozyjnego, w obszarze strefy wpływu ciepła po stronie natarcia: a) po 50 h ekspozycji, b) po 500 h ekspozycji



Rys. 122. Struktura SEM złącza FSW, poddanego działaniu środowiska korozyjnego, w obszarze strefy wpływu ciepła po stronie spływu: a) po 100 h ekspozycji, b) po 1000 h ekspozycji



Rys. 123. Struktura SEM złącza FSW, poddanego działaniu środowiska korozyjnego, w obszarze lica złącza FSW: a) po 250 h ekspozycji, b) po 1000 h ekspozycji

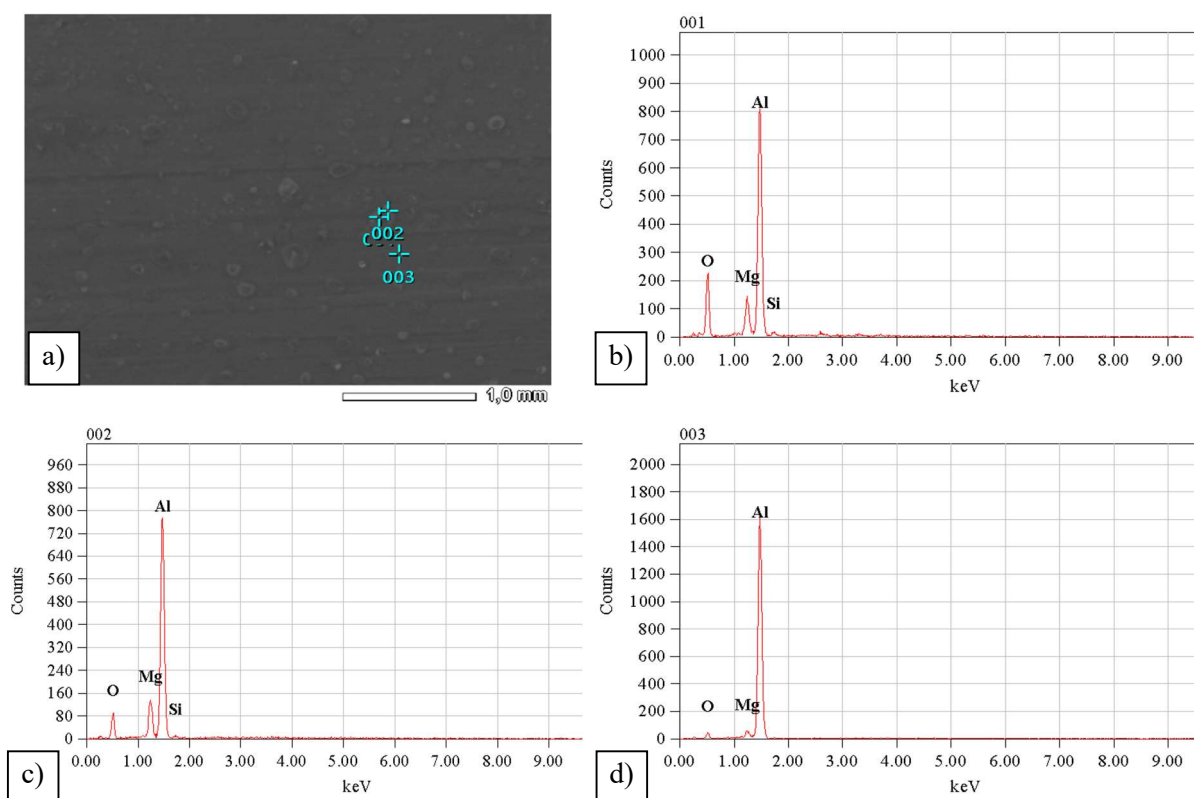


Powierzchnia złącza FSW po stronie materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 zmienia się w miarę wydłużania czasu ekspozycji w środowisku korozyjnym. Po czasie 250 h widoczne są niewielkie rozwarstwienia materiału (rys. 120). Nie stwierdzono występowania ognisk czy wżerów korozyjnych.

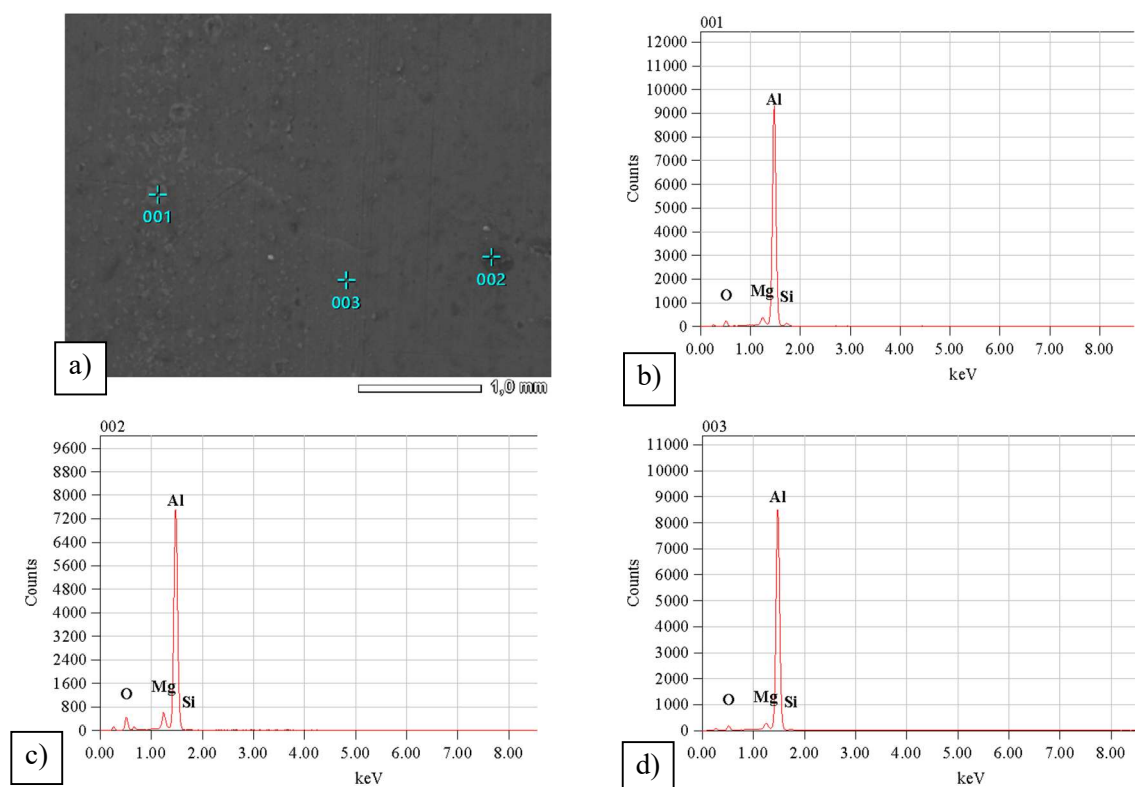
W strefie wpływu ciepła złącza po stronie natarcia po czasie 500 h można już zaobserwować ogniska korozji co jest związane z segregacją pierwiastków w osnowie materiału (rys. 121). W strefie wpływu ciepła po stronie spływu już po 100 h badania obserwowano występowanie ognisk korozyjnych (rys. 122a). Przy dalszym wydłużaniu czasu badania do 1000 h liczba ognisk korozyjnych uległa powiększeniu (rys. 122b).

W obszarze lica złącza FSW widoczne są postrzępione obszary związane z odkładaniem się poszczególnych warstw materiału podczas zgrzewania FSW (rys. 123). Charakter kształtu złącza w obszarze lica nie zmienia się. Nie obserwowano w tych obszarach śladów występowania ognisk korozyjnych.

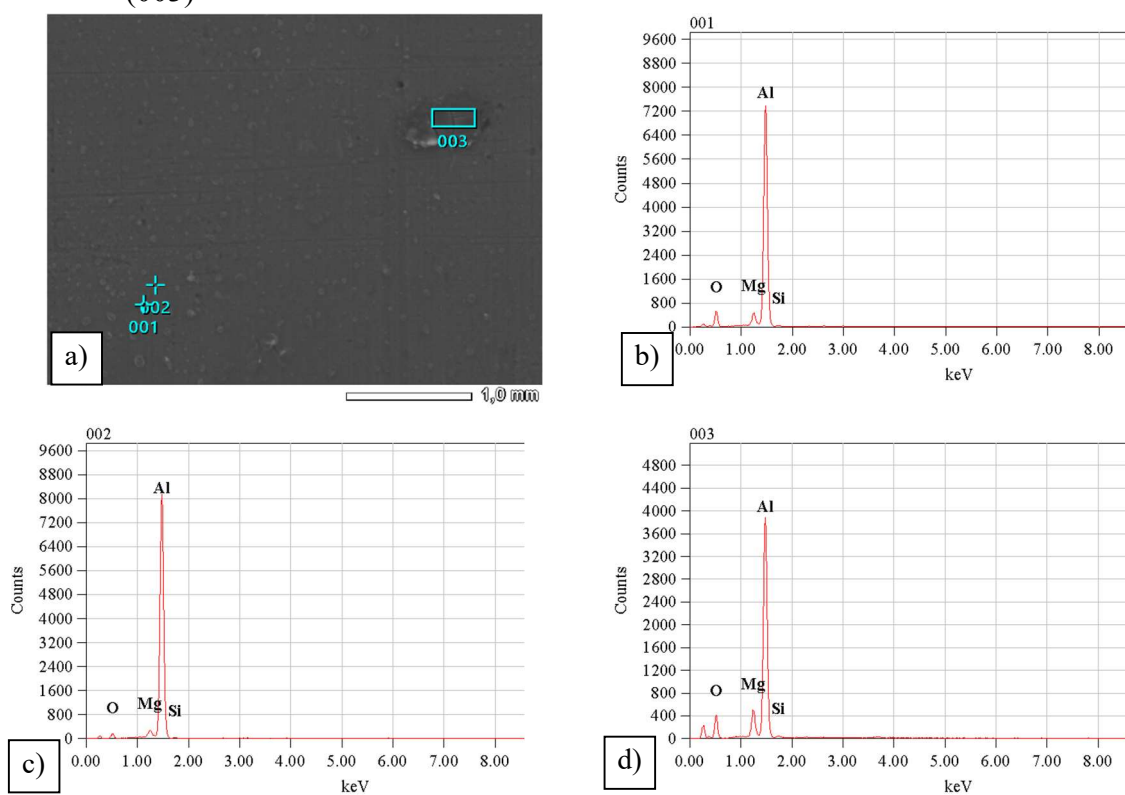
Aby określić skład chemiczny produktów korozji w wybranych obszarach złącza przeprowadzono analizę EDS dla wybranych próbek po 1000 h ekspozycji w środowisku korozyjnym (rys. 124 - 127).



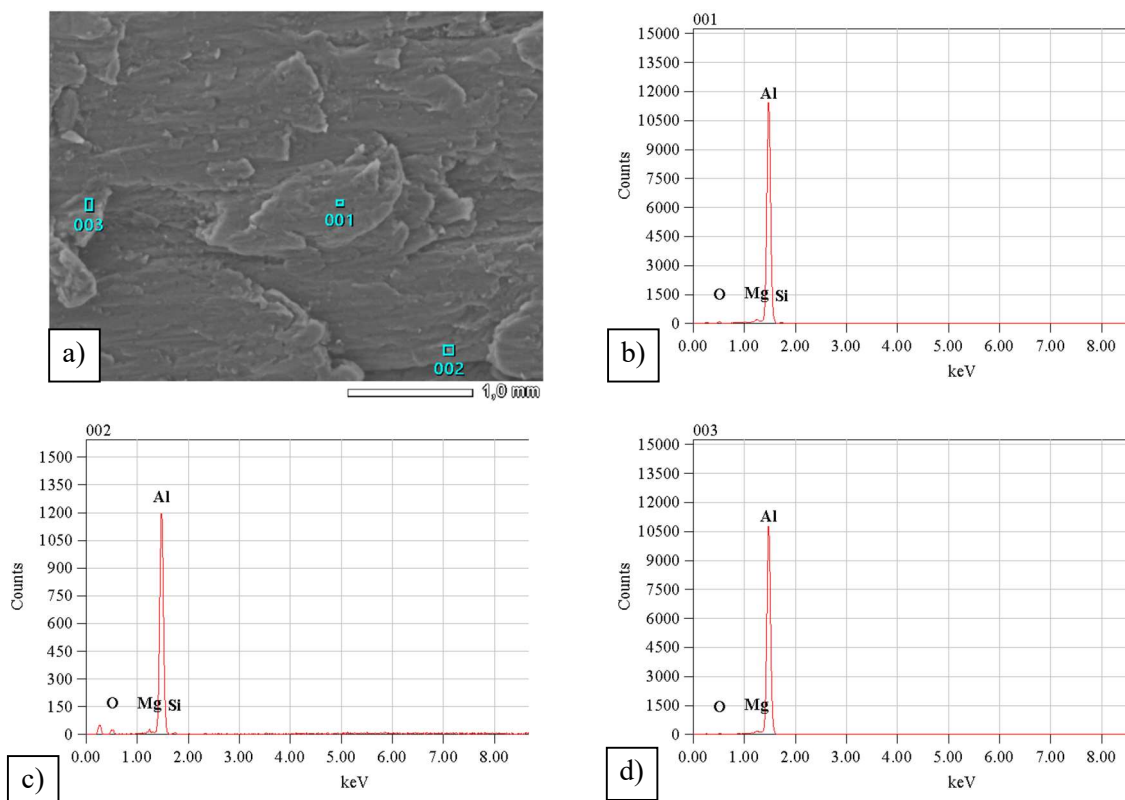
Rys. 124. Analiza EDS z obszaru osnowy i fazy w obszarze materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082: a) mikrostruktura obszaru, b) analiza EDS fazy (001), c) analiza EDS fazy (002), d) analiza EDS osnowy (003)



Rys. 125. Analiza EDS z obszaru strefy wpływu ciepła po stronie natarcia: a) mikrostruktura obszaru, b) analiza EDS fazy (001), c) analiza EDS fazy (002), d) analiza EDS fazy (003)

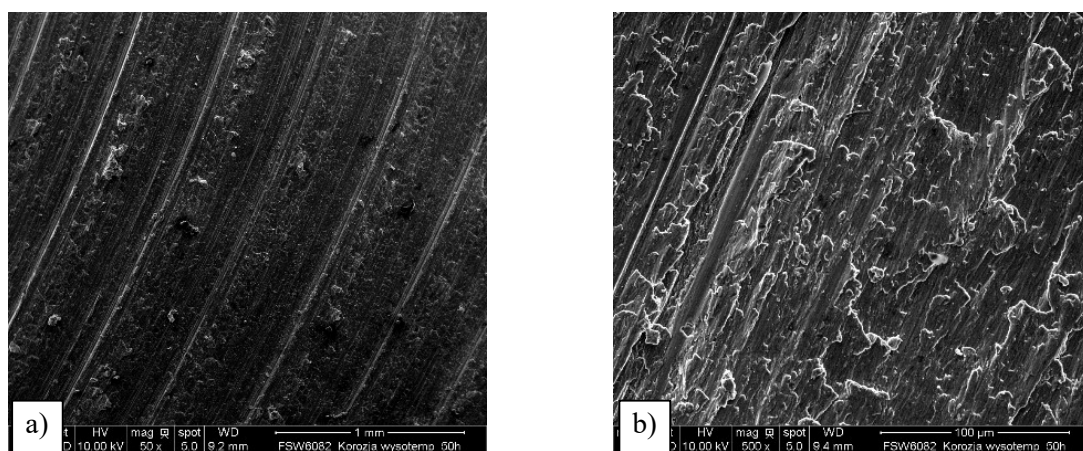


Rys. 126. Analiza EDS z obszaru strefy wpływu ciepła po stronie spływu: a) mikrostruktura obszaru, b) analiza EDS fazy (001), c) analiza EDS fazy (002), d) analiza EDS fazy (003)

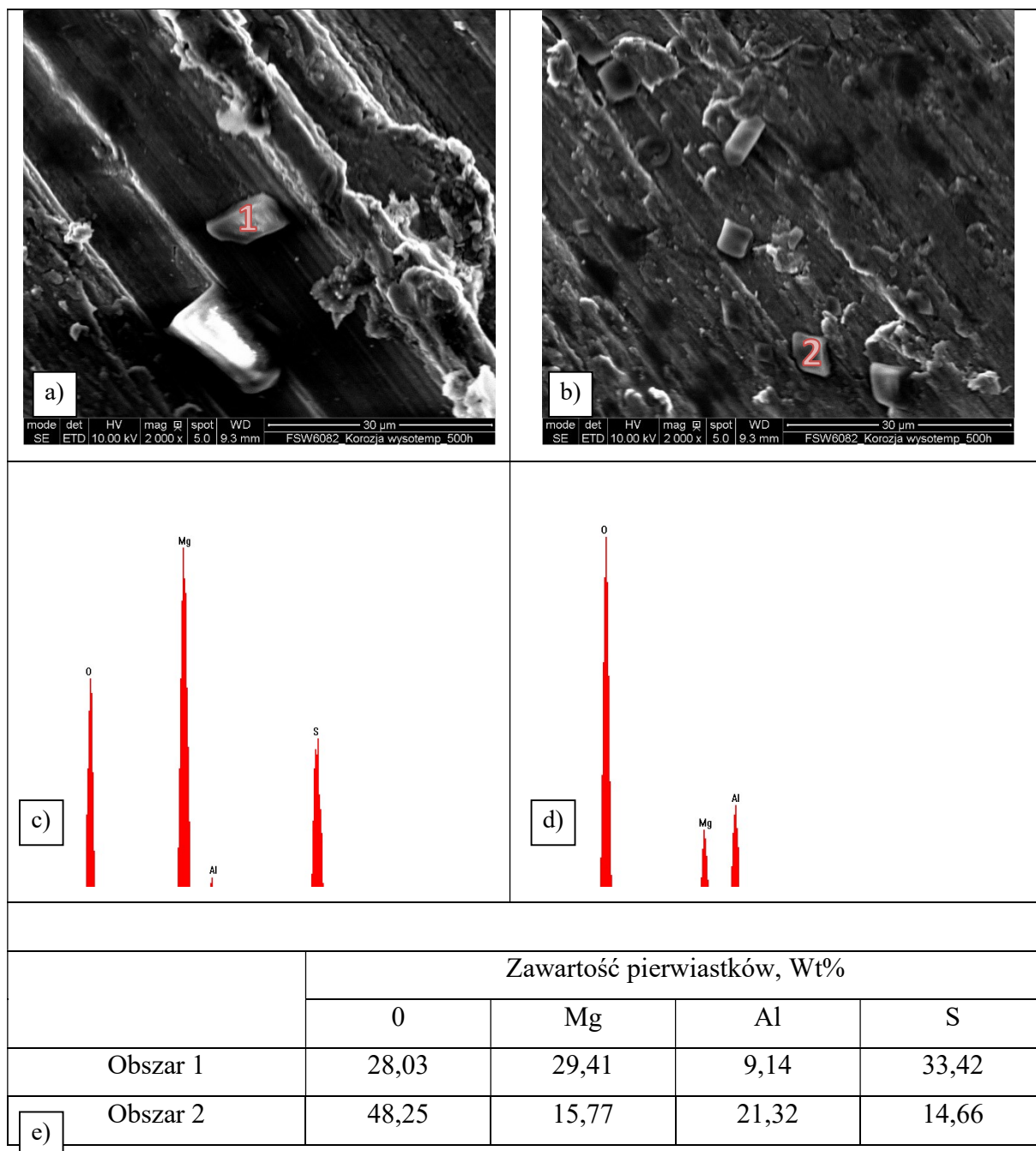


Rys. 127. Analiza EDS z obszaru lica złącza: a) mikrostruktura obszaru, b) analiza EDS osnowy (001), c) analiza EDS osnowy (002), d) analiza EDS osnowy (003)

Aby określić skład chemiczny produktów korozji po badaniu w temperaturze 300°C w wybranych obszarach złącza przeprowadzono analizę EDS dla wybranych próbek po 50, 500 oraz 1000 h ekspozycji w środowisku korozyjnym (rys. 128 - 130). Zdjęcia powierzchni i analizę składu chemicznego wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect S50 z detektorem EDS dla złącza FSW wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min, zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min.

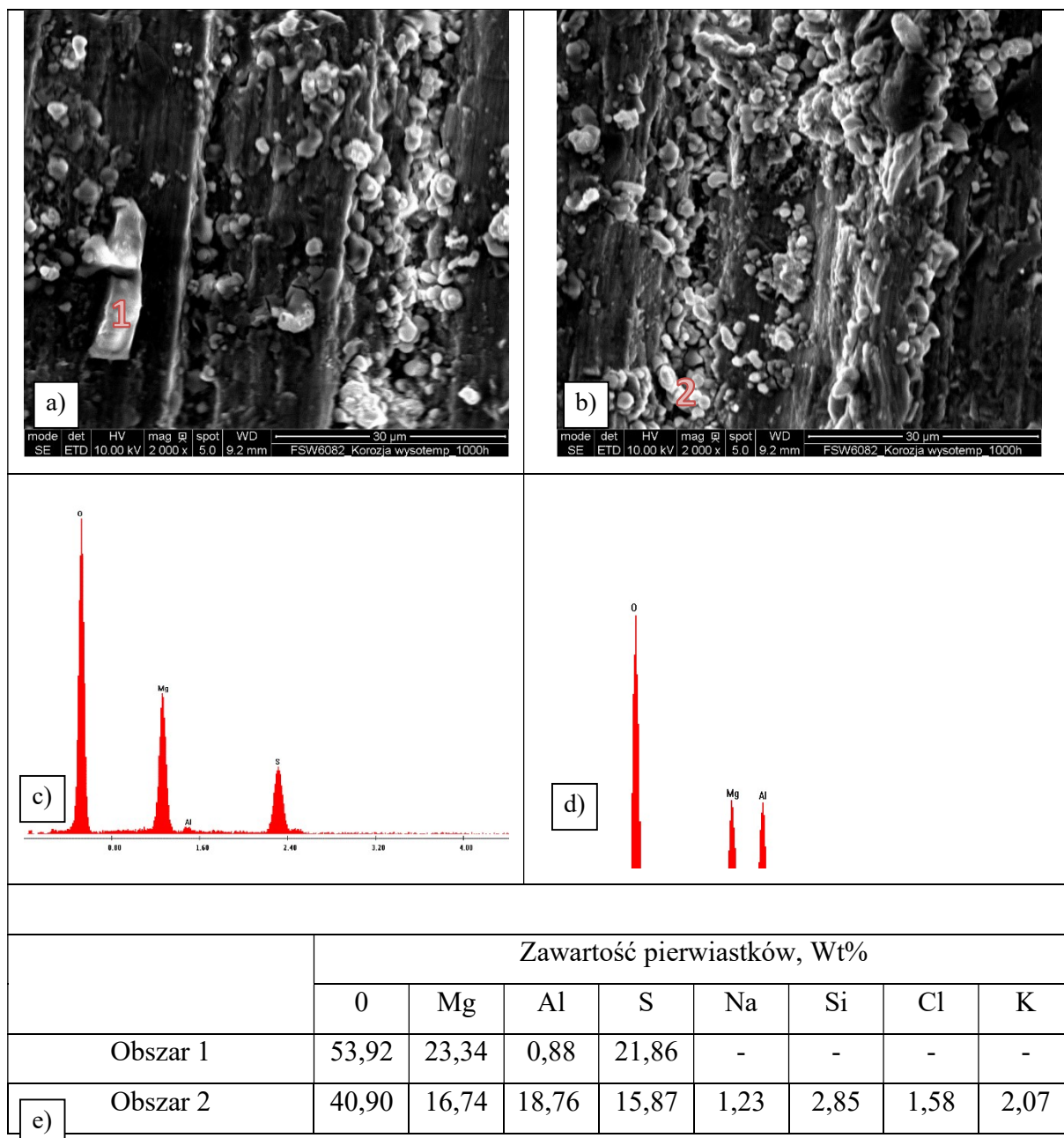


Rys. 128. Analiza powierzchni lica złącza FSW wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=900$  obr/min, zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min po 50 h ekspozycji w środowisku korozyjnym



Rys. 129. Widok powierzchni próbki (a, b), analiza EDS wybranych obszarów powierzchni próbki (c, d) oraz zawartość pierwiastków w badanych obszarach złącza po 500 h ekspozycji w środowisku korozyjnym (e). Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min





Rys. 130. Widok powierzchni próbki (a, b), analiza EDS wybranych obszarów powierzchni próbki (c, d) oraz zawartość pierwiastków w badanych obszarach (e) złącza po 1000 h ekspozycji w środowisku korozyjnym (e). Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

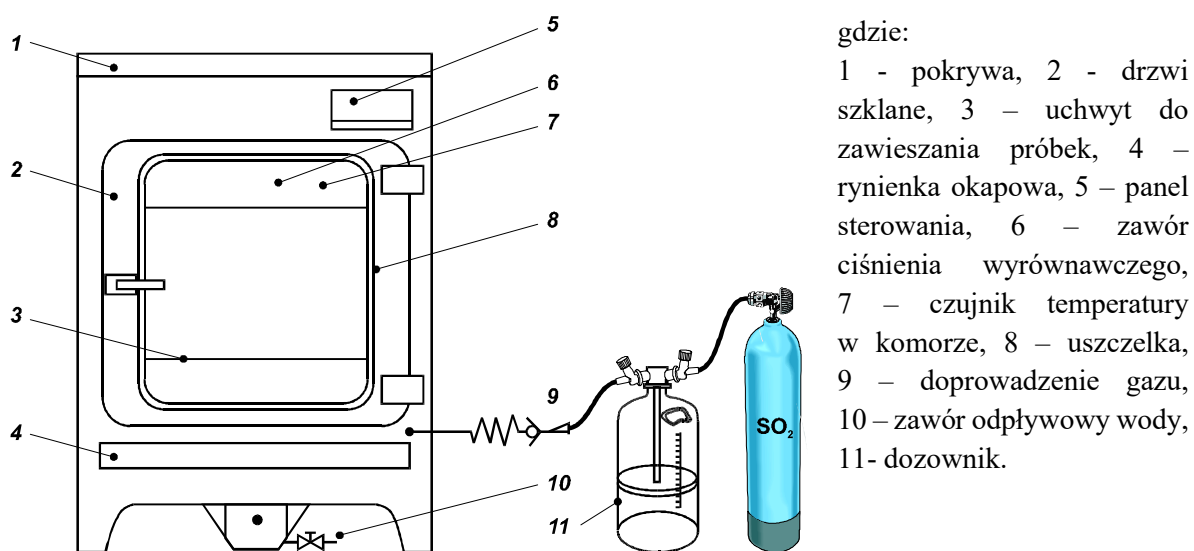
Wyniki badań powierzchni łączy złącza po ekspozycji w środowisku korozyjnym w temperaturze 300°C wskazują, że jedynie po 50 h nie występują produkty korozji (rys. 128). W przypadku próbki po 500 h ekspozycji na jej powierzchni znajduje się znikoma ilość wydzieliń o prostokątnym kształcie. Wydzielenia te bogate są m.in. w tlen, magnez oraz siarkę (rys. 129). Natomiast w przypadku próbki po 1000 h ekspozycji w środowisku korozyjnym na



powierzchni obserwowano znaczną ilość wydzielen. Analiza EDS obserwowanych wydzieleni wykazała, że zawierają one tlen, magnez, siarkę, krzem oraz sód. Obserwowano także niewielki udział chloru oraz potasu (rys. 130).

### 11.2.2. Badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej SO<sub>2</sub>

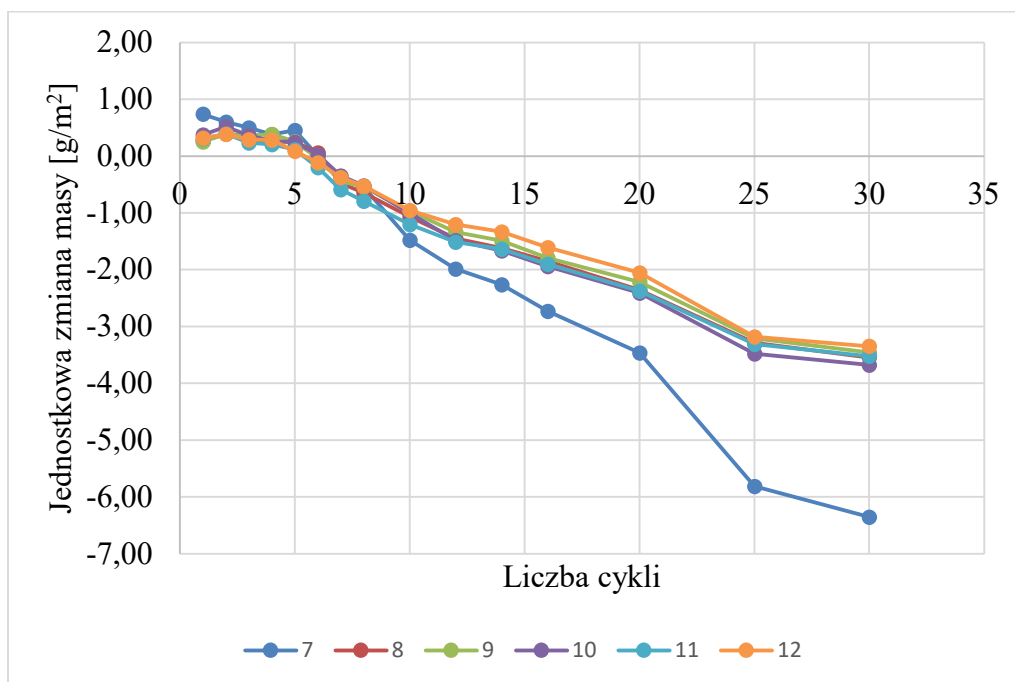
Test korozyjny prowadzono zgodnie z normą EN ISO 6988 [97]. Do badań użyto komorę Koesternicha Hygrotherm model 519 firmy Erichsen. Stanowisko badawcze przedstawiono schematycznie na rys. 131.



Rys. 131. Schemat stanowiska badawczego do badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej SO<sub>2</sub>

Podczas badań określano odporność materiałów na działanie wilgotnej atmosfery zawierającej SO<sub>2</sub>. Próby prowadzono w cyklach dobowych. Jeden cykl dobowy obejmował 8 h ekspozycji próbek w zamkniętej komorze oraz 16 h ekspozycji w atmosferze otoczenia. Na jeden cykl badawczy do komory o objętości roboczej 300 dm<sup>3</sup> wlewano 2 dm<sup>3</sup> wody destylowanej oraz dozowano 0,2 dm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>. W czasie ekspozycji w zamkniętej komorze utrzymywano temperaturę 40±2°C. Wygląd próbek oceniano w toku badań co 24h (jeden cykl). W celu określenia jednostkowych zmian masy w trakcie trwania testu przeprowadzono badania grawimetryczne: co 1 cykl dobowy do 8 cyklu badań, co 2 cykle dobowe w przedziale od 8 do 16 cyklu badań i co 5 cykli dobowych w przedziale od 16 do 30 cyklu badań. Przed pomiarem masy nie usuwano z powierzchni produktów korozji. Pomiary masy dokonano na trzech próbkach każdego rodzaju. Wynik końcowy stanowi średnia z tych pomiarów.

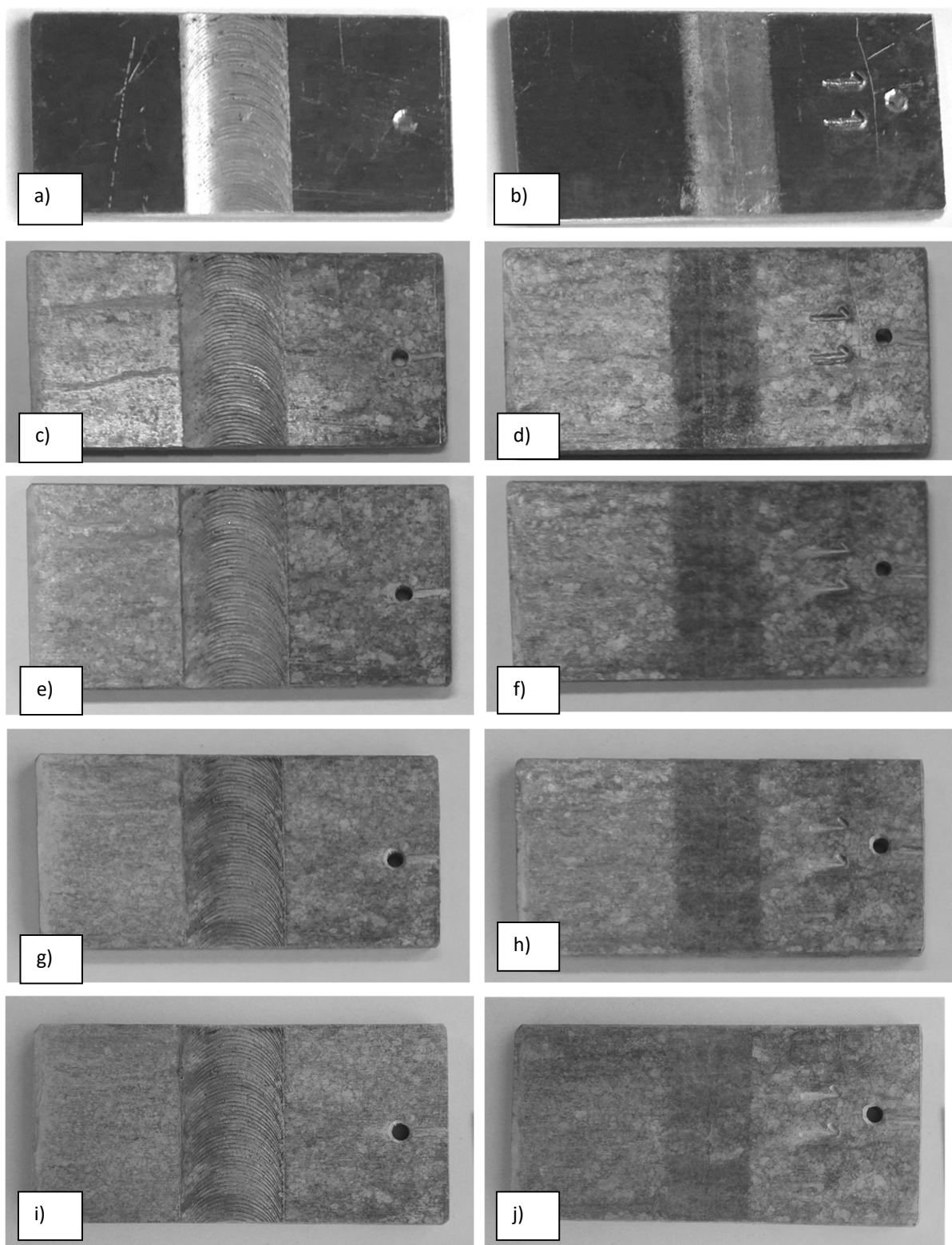
Badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej  $\text{SO}_2$  przeprowadzono dla złączy FSW wykonanych w kombinacji trzech prędkości obrotowych narzędzia (450, 900 1800 obr/min) oraz dwóch prędkości zgrzewania (450, 900 mm/min). Na rys. 132 przedstawiono wyniki badań odporności złączy na korozję tj. wyniki pomiaru ubytku masy próbek wyciętych do badań złączy FSW w funkcji czasu ekspozycji próbek na czynnik korozyjny.



Rys. 132. Wyniki badań odporności złączy na korozję w wilgotnej atmosferze  $\text{SO}_2$ . Parametry zgrzewania. Próbkę nr: 7)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 8)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 9)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 10)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min; 11)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min; 12)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min;

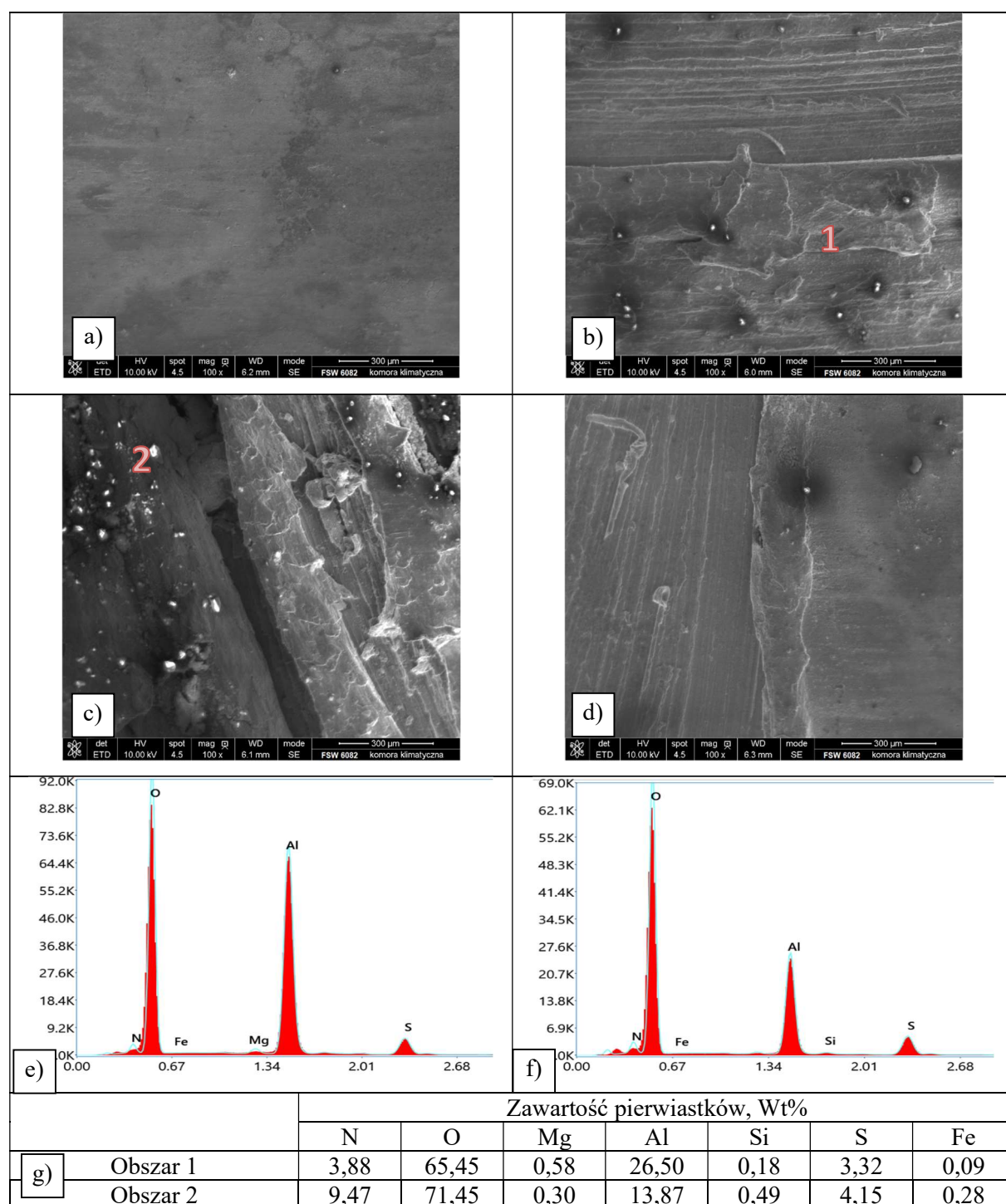
Widok przykładowych złączy FSW po badaniach odporności złączy na korozję w wilgotnej atmosferze  $\text{SO}_2$  przedstawiono na rys. 133. Wyniki te przedstawiono dla złącza zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min. Wraz z upływem czasu ekspozycji próbek w środowisku korozyjnym widoczne są ślady korozji w postaci zmiany barwy próbek.

Największy spadek jednostkowej masy próbki zanotowano dla złącza nr 7 wykonanego z prędkością obrotową narzędzia  $V_o=450$  obr/min oraz prędkością zgrzewania  $V_z=450$  mm/min. Średni spadek jednostkowej masy obserwuje się na poziomie ok  $6 \text{ g/m}^2$ . W przypadku pozostałych złączy spadek ten jest podobny i waha się w przedziale pomiędzy 3, a  $4 \text{ g/m}^2$  próbki (rys. 132).



Rys. 133. Widok przykładowych złączy FSW (zgrzewanych z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min) poddanych badaniom odporności złączy na korozję w wilgotnej atmosferze  $SO_2$ : a) lico przed badaniem, b) grań przed badaniem, c) lico po 8 cyklach, d) grań po 8 cyklach, e) lico po 16 cyklach, f) grań po 16 cyklach, g) lico po 25 cyklach, h) grań po 25 cyklach, i) lico po 32 cyklach, j) grań po 32 cyklach

Aby określić skład chemiczny, wybranych obszarów złącza FSW przeprowadzono analizę EDS. Badania wykonano dla wybranej próbki zgrzewanej z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min (rys. 134).



Rys. 134. Złącze FSW po badaniu w wilgotnej atmosferze zawierającej  $\text{SO}_2$ : a) widok powierzchni próbki w obszarze materiału rodzimego, b) widok powierzchni próbki w centralnym obszarze złącza, c) widok powierzchni próbki po stronie natarcia, d) widok powierzchni po stronie spływu, e) - f) analiza EDS wybranych obszarów powierzchni próbki z rys. b) i c), g) zawartość pierwiastków w badanych obszarach. Parametry zgrzewania:  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min

Złącza FSW były ekspozowane w wilgotnej atmosferze zawierającej  $\text{SO}_2$ . Próby te wykonano na złączach eksploatacyjnych tj. nie poddanych dodatkowej obróbce mechanicznej np. w postaci szlifowania. W pierwszym etapie badań stwierdzono pokrywanie się próbek szarym osadem – będącym produktem korozji w skład którego wchodzi m.in. aluminium, magnez, krzem, żelazo, co jest typowe dla tego gatunku materiału tj. stopu aluminium EN AW-6082 (rys. 134b, c). Ujawniono także obecność siarki, która występowała w tlenku siarki. Wraz z upływem czasu nie obserwowano istotnych zmian na powierzchni badanych próbek co świadczy o wysokiej odporności złączy na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej  $\text{SO}_2$ . Potwierdzają to wyniki pomiaru ubytku masy próbek wyciętych do badań złączy FSW (rys. 132). Wysoką odporność na ten rodzaj korozji obserwowano zarówno na powierzchni materiału rodzimego jak i złączy, po stronie lica i stronie grani co oznacza, że złącza te z powodzeniem mogą być stosowane w przemyśle (rys. 133a-j).

### **11.2.3. Badania odporności na korozję międzykrystaliczną**

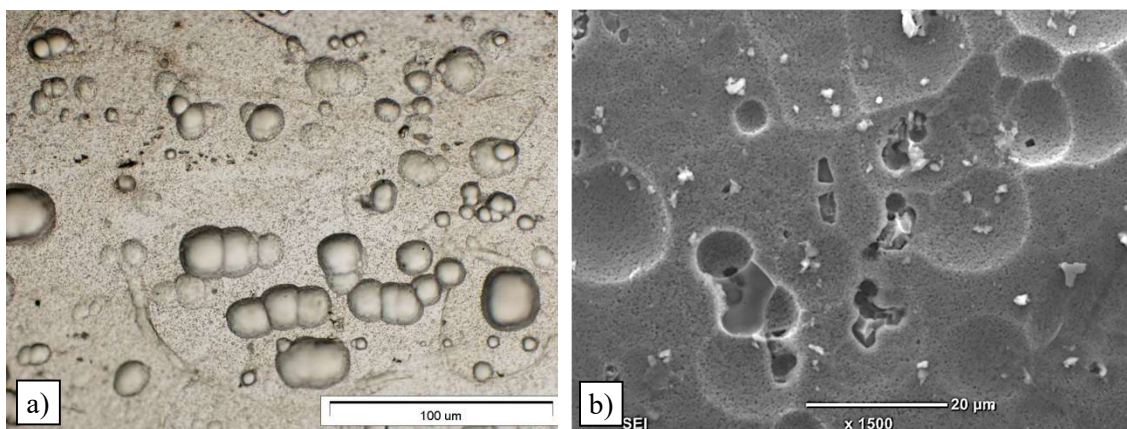
Badania odporności na korozję międzykrystaliczną złączy FSW przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 11846:2011 [98]. Próbki do testów wycięto z materiału podstawowego (wymiary próbek 30×30 mm) oraz obszaru złącza (wymiary próbek 20×40 mm), prostopadłe do kierunku zgrzewania. Następnie ich powierzchnię przemyto acetonem i umieszczono na 240 sekund w 7% roztworze wodorotlenku sodu NaOH, w temperaturze 55°C. W celu usunięcia osadu powstałego w poprzednim etapie, próbki przemyto bieżącą wodą i zanurzono na 120 sekund w stężonym kwasie azotowym  $\text{HNO}_3$  ( $\rho=1,4$  g/ml). Powierzchnię próbek przepłukano wodą destylowaną i umieszczono na 24 godziny w 30 g/l roztworze chlorku sodu NaCl i 10 ml stężonego kwasu solnego HCl ( $\rho=1,19$  g/ml) w temperaturze pokojowej (Metoda B wg [98]). Po badaniu próbki opłukano pod bieżącą wodą. Za pomocą szczotki z tworzywa sztucznego oczyszczono produkty korozji oraz ponownie wypłukano w wodzie destylowanej i pozostawiono do wyschnięcia.

Powierzchnię badanych próbek obserwowano w stanie nietrawionym. Obserwacje metalograficzne prowadzono na mikroskopie stereoskopowym (SM) przy powiększeniu 10x, na mikroskopie świetlnym (LM) do 500x i skaningowym mikroskopie elektronowym przy powiększeniu do 2000x (SEM) (rys. 135÷137).

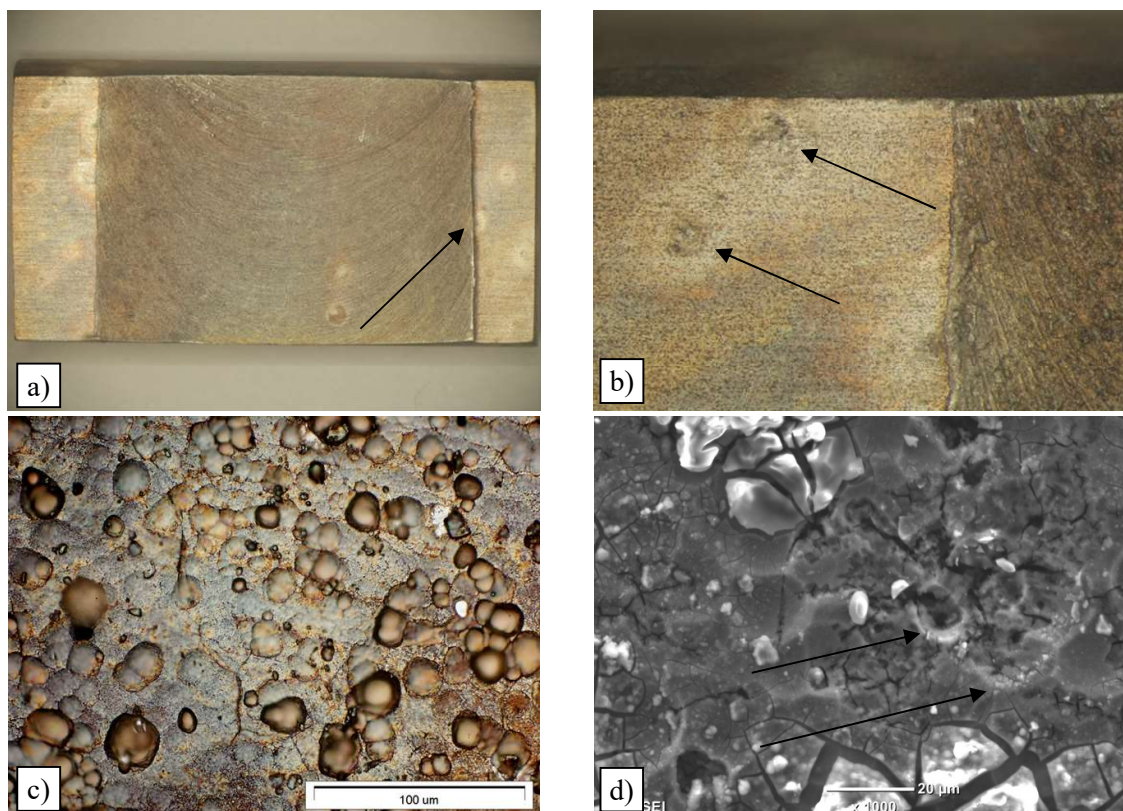


Korozja międzykrystaliczna w stopach aluminium jest silnie uzależniona od obecności czynnika korozyjnego, co powoduje możliwość ciągłego wytrącania się związków międzymetalicznych tak, że korozja międzykrystaliczna może postępować. Na ten rodzaj korozji szczególnie narażone są stopy aluminium utwardzane wydzieleniowo (stop aluminium EN AW-6082) z uwagi na to, że skład granic ziaren i przylegających do nich obszarów znacząco różni się od składu chemicznego osnowy. Różnica ta może powstać właśnie na skutek procesów wydzieleniowych zachodzących na granicach ziaren bądź z powodu segregacji składników stopu aluminium [100].

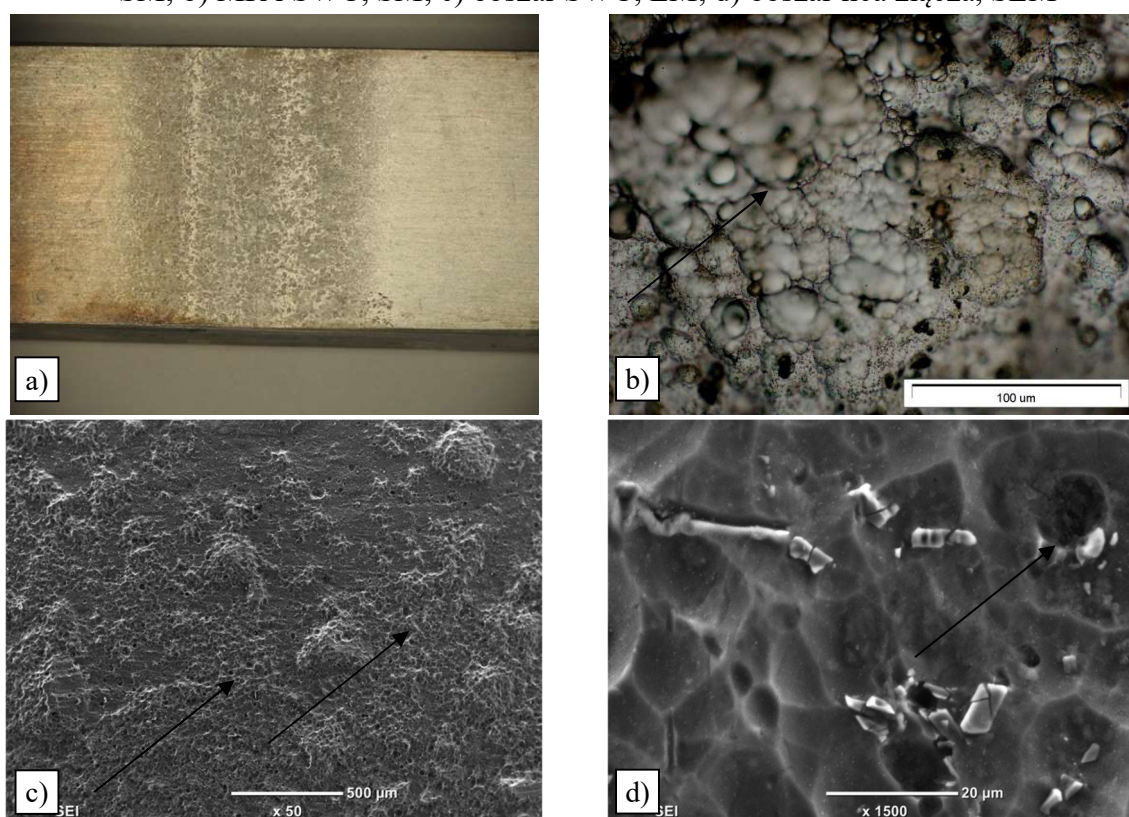
Dokonano oceny struktury materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 (rys. 135) jak również wybranego złącza FSW (rys. 136 – lico złącza, rys. 137 – grań złącza) po ekspozycji w agresywnym środowisku korozyjnym.



Rys. 135. Materiał rodzimy stopu aluminium EN AW-6082 po badaniu odporności na korozję międzykrystaliczną: a) widok próbki po badaniu na LM, b) widok próbki po badaniu na SEM.



Rys. 136. Złącze FSW po badaniu odporności na korozję międzykrystaliczną: a) lico próbki, SM; b) MR i SWC, SM; c) obszar SWC, LM; d) obszar lica złącza, SEM



Rys. 137. Złącze FSW po badaniu odporności na korozję międzykrystaliczną: a) grań próbki, SM; b) obszar SWC z licznymi wżerami i śladami korozji międzykrystalicznej, LM; c) przejście pomiędzy MR a SWC, SEM; d) wżer korozyjny w obszarze grani, SEM

Przeprowadzone badania metalograficzne złączy po ocenie odporności na korozję międzykrystaliczną na skaningowym mikroskopie elektronowym wskazują na obecność żelaza w części powstających wżerów. Jednak zawartość Fe jest zbyt duża w stosunku do składu chemicznego badanego materiału. Może to świadczyć o ścieraniu się narzędzia podczas prowadzenia procesu zgrzewania w tym o odkładaniu się wydzieleni żelaza na całej objętości złącza FSW.

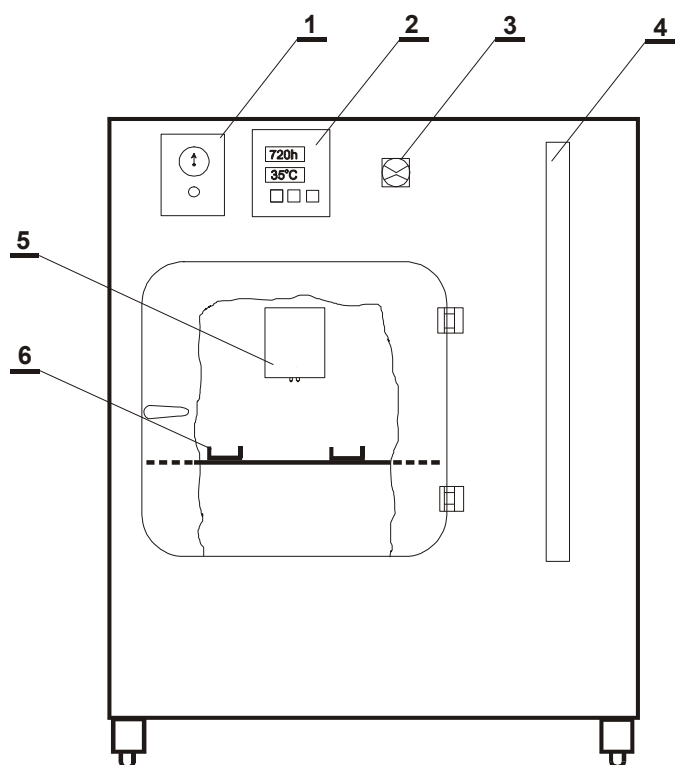
W badanych obszarach próbek ujawniono typowe wżery korozyjne o przekroju owalnym, typowym dla korozji wżerowej stopów aluminium. Powierzchnia próbek w obszarze materiału rodzimego wykazuje liczne skupiska wżerów korozyjnych ze śladami korozji międzykrystalicznej po granicach ziarn. Wżery te widoczne są zarówno przy badaniu za pomocą mikroskopii świetlnej LM jak i mikroskopii skaningowej SEM (rys. 135a i b).

Na granicy materiału rodzimego oraz SWC także obserwuje się ogniska korozji. Są one widoczne na rysunkach 136a oraz 136b. Na powierzchni próbek obserwuje się liczne wżery korozyjne. Widoczne są także większe skupiska obszarów skorodowanych, które powstały w wyniku łączenia się wżerów i dalszego roztwarzania materiału (rys. 136c). Obserwowano także inne produkty korozji w postaci widocznej, popękanej warstwy tlenków na powierzchni próbki (rys. 136d).

Na powierzchni grani złącza FSW ujawniono także wżery korozyjne oraz liczne ślady korozji międzykrystalicznej (rys. 137a i b). Wżery te są pojedyncze i o różnej głębokości (rys. 137c i d).

#### **11.2.4. Badania odporności na korozję w rozpylonej solance**

Test korozyjny w rozpylonej solance prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06 [99]. Do badań użyto komory solnej CORROTHERM Model 610 firmy Erichsen. W komorze o pojemności 400 dm<sup>3</sup> rozpylano mgłą 5% roztworu NaCl w wodzie destylowanej, którego pH mieściło się w granicach 6,8÷7,2. Szybkość kondensacji mgły na powierzchni płaskiej 8000 mm<sup>2</sup> wynosiła 1,5±0,5 ml/h. W czasie badań w komorze utrzymywano temperaturę 35°C. Stanowisko badawcze do badania odporności na korozję w rozpylonej solance przedstawiono schematycznie na rys. 138.



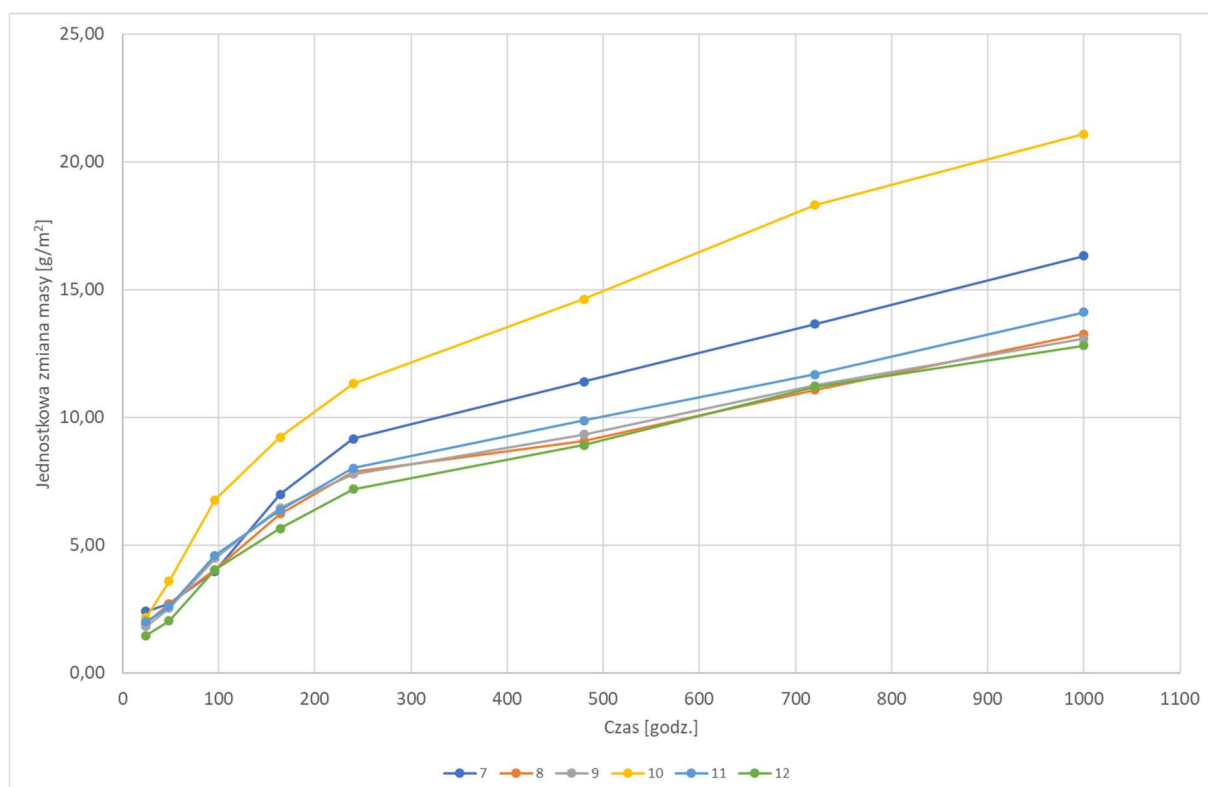
gdzie:

- 1-regulacja gęstości mgły solnej,
- 2-panel sterowania,
- 3- wyłącznik,
- 4-zbiornik na solankę,
- 5-rozpylacz,
- 6-uchwyt próbek

Rys. 138. Schemat stanowiska badawczego do badania odporności na korozję w rozpylonej solance

Kryterium oceny odporności korozyjnej określono jako jednostkową zmianę masy próbek. Podczas testu prowadzono badania grawimetryczne po 24, 48, 96, 168, 240, 480, 720 i 1000 h ekspozycji próbek w komorze. Przed pomiarem masy nie usuwano z powierzchni produktów korozji. Pomiaru masy dokonano na trzech próbkach każdego rodzaju. Wynik końcowy stanowiła średnia pomiarów. Wykres jednostkowej zmiany masy w czasie badań w komorze solnej przedstawiono na rys. 139.

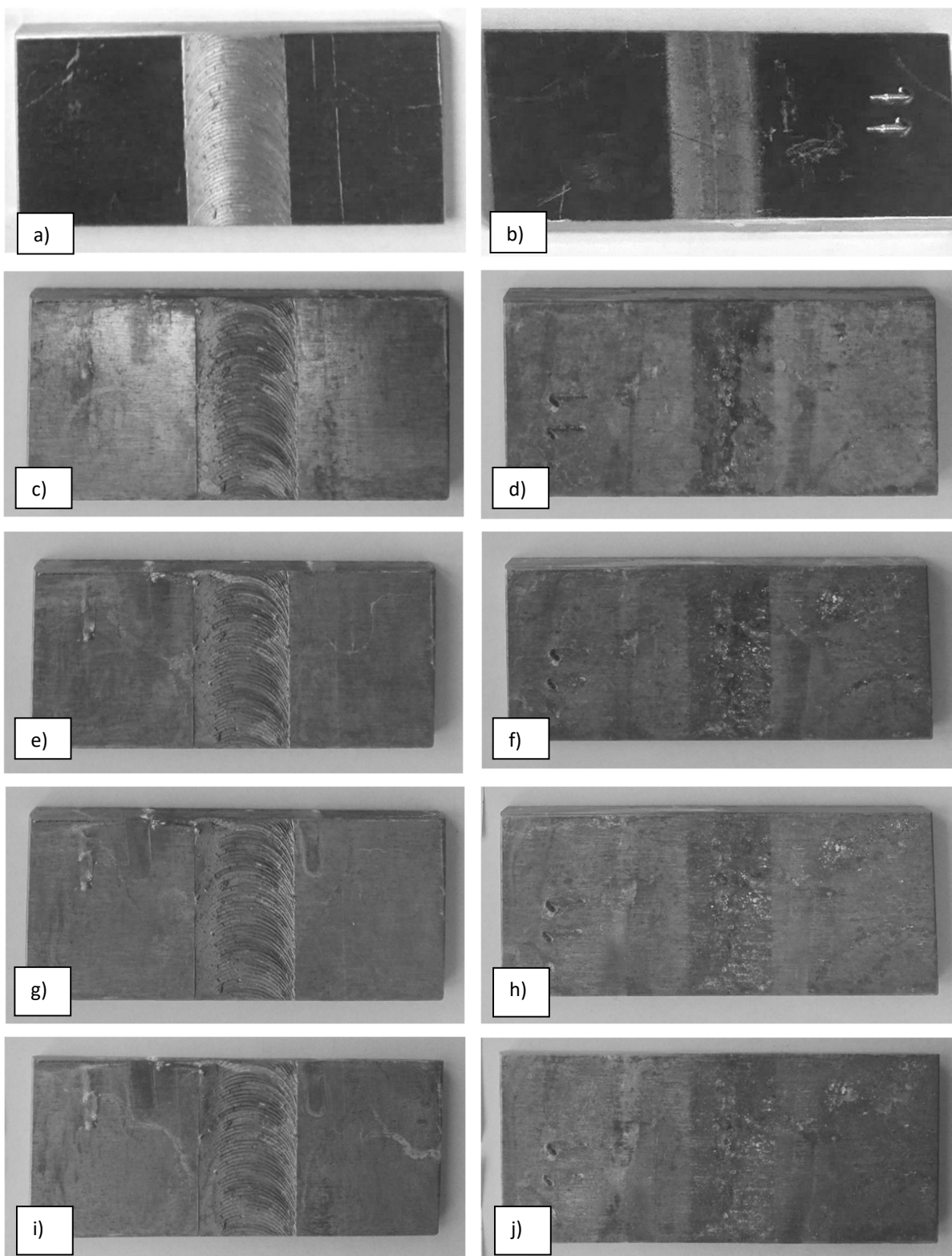




Rys. 139. Wykres jednostkowej zmiany masy próbek w czasie badań w komorze solnej. Parametry zgrzewania: 7)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 8)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 9)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=450$  mm/min; 10)  $V_o=450$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min; 11)  $V_o=900$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min; 12)  $V_o=1800$  obr/min,  $V_z=900$  mm/min;

Ocenę powierzchni próbek prowadzono co 24 h. Dokumentację fotograficzną wykonano przed rozpoczęciem badań oraz po 240, 480, 720 oraz po 1000 h badań. Próbkę po badaniach odporności na korozję w rozpylonej solance, przedstawiono dla wybranego złącza FSW zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min, na rys. 140.

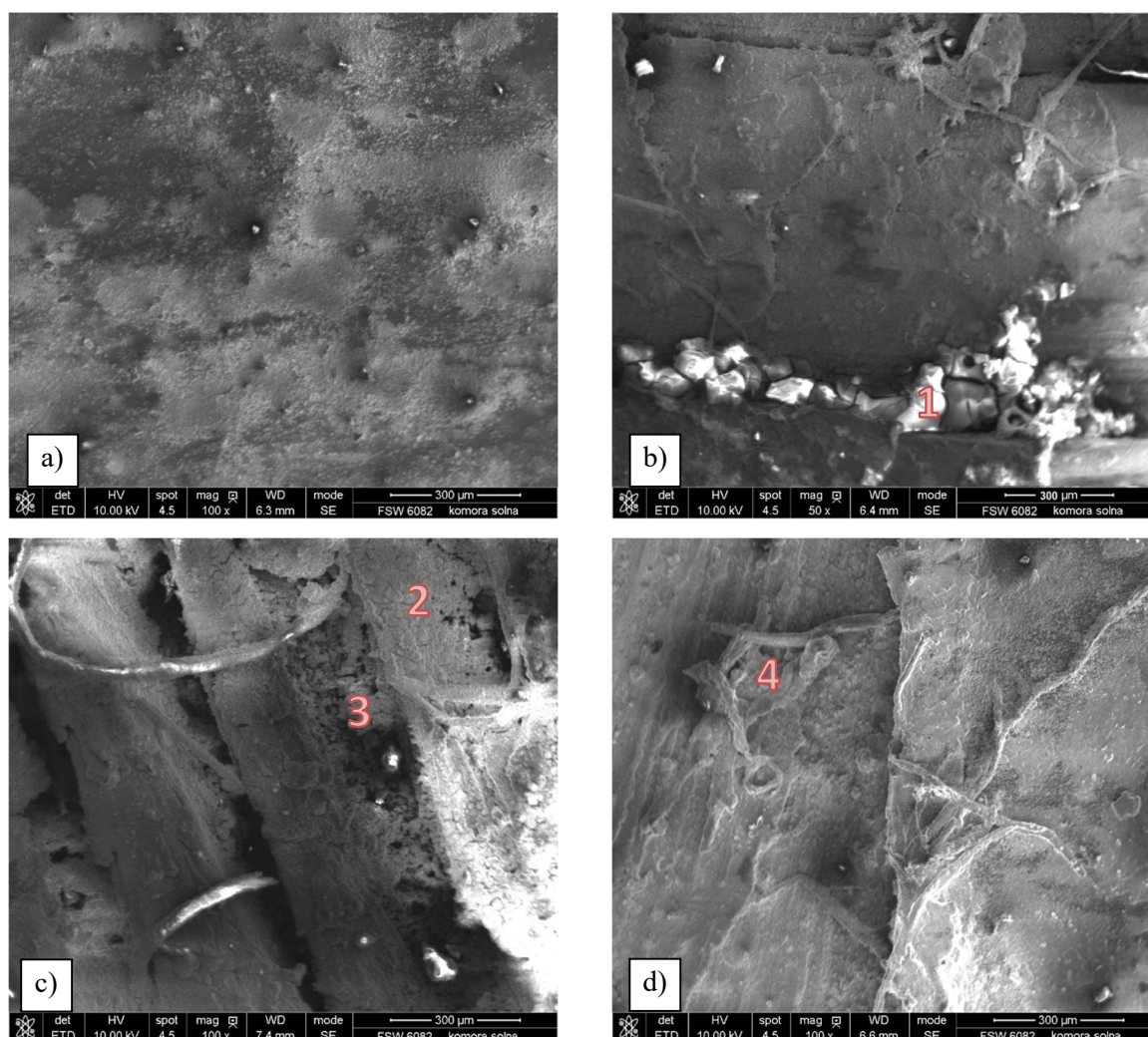




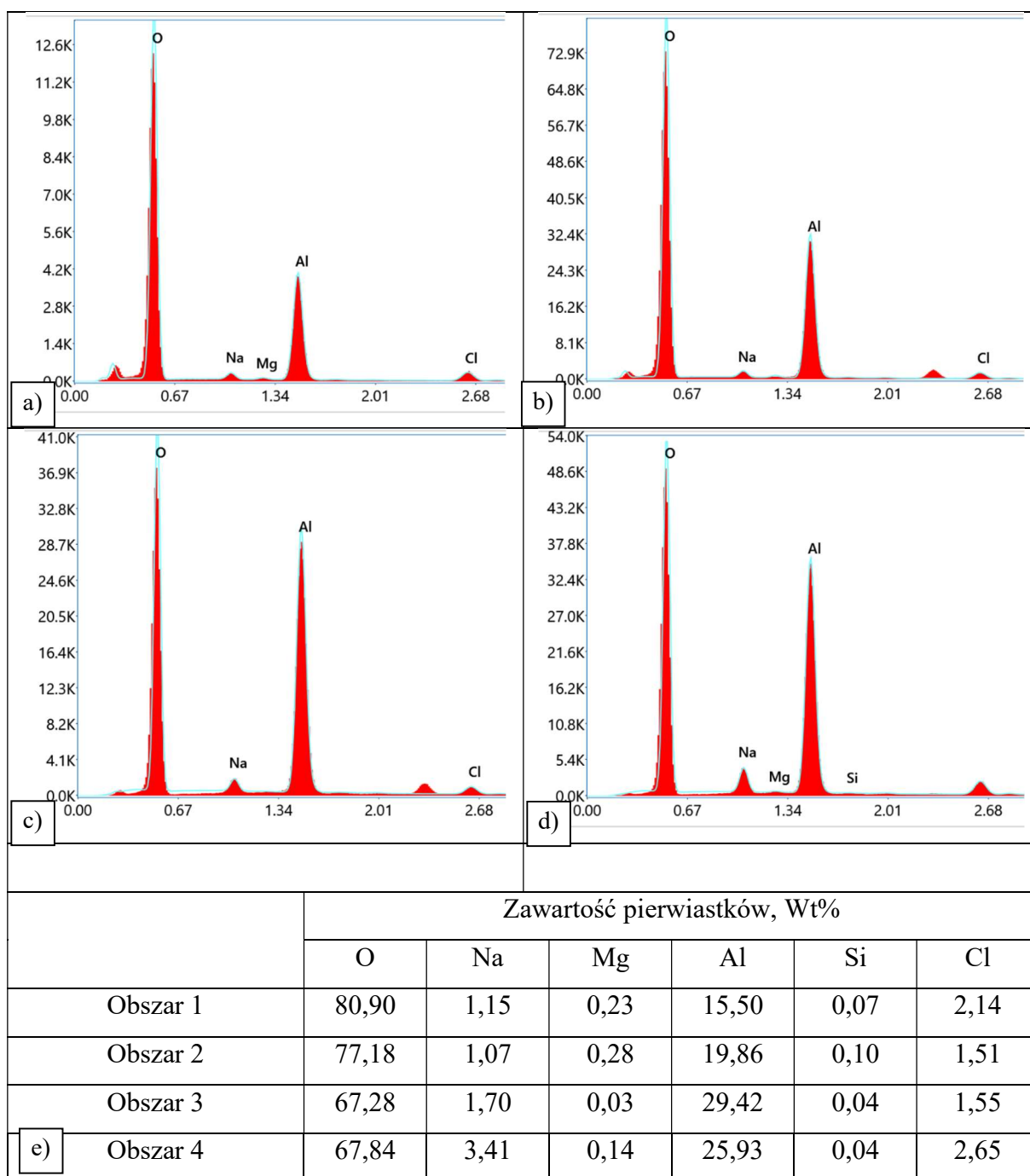
Rys. 140. Widok przykładowych złączy FSW (zgrzewanych z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min) poddanych badaniom odporności złączy na korozję w rozpylonej solance: a) lico przed badaniem, b) grań przed badaniem, c) lico po 240 h badania, d) grań 240 h badania, e) lico po 480 h badania, f) grań 480 h badania, g) lico po 720 h badania, h) grań 720 h badania, i) lico po 1000 h badania, j) grań 1000 h badania

Wraz z wydłużaniem czasu ekspozycji w środowisku korozyjnym, niezależnie od rodzaju złącza, w tym niezależnie od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania obserwowano podobne zmiany w wyglądzie próbek. Widoczne są tylko niewielkie zmiany wizualne złączy (rys. 140).

W celu określenia składu chemicznego wybranych obszarów złącza zgrzewanego z prędkością  $V_z=900$  mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min, przeprowadzono analizę EDS wybranej próbki po 1000 h ekspozycji w rozpylonej solance. Na rys. 141 przedstawiono widok powierzchni próbki ze złącza FSW po badaniu w rozpylonej solance w różnych obszarach złącza. Z kolei na rys. 142 przedstawiono wyniki analizy EDS wybranych obszarów powierzchni próbki z rys. 141 oznaczonych numerami 1÷4.



Rys. 141. Widok powierzchni próbki ze złącza FSW po badaniu w rozpylonej solance w obszarach: a) materiału rodzimego, b) centralnego obszaru złącza, c) po stronie natarcia, d) po stronie spływu



Rys. 142. Analiza EDS wybranych obszarów powierzchni próbki z rys. 141: a) punkt nr 1, b) punkt nr 2, c) punkt nr 3, d) punkt nr 4

Wyniki badań złączy wskazują na obecność ognisk korozji, w zagłębieniach po oddziaływaniu narzędzia FSW, które są związane z obecnością tlenków aluminium. Ogniska te w miarę upływu badań nie ulegały rozwojowi (rys. 141b, c). Ujawniono obecność magnezu, chloru, sodu i krzemu, co jest związane przede wszystkim z atmosferą korozyjną. Są to prawdopodobnie fazy w postaci cienkiej warstwy NaCl, która gromadzi się w obszarach zagłębień od narzędzia i podczas odparowania krystalizuje się w postaci kryształów (rys. 141c).

W miarę upływu czasu nie obserwowano istotnych różnic na powierzchni badanych próbek. Wysoką odporność korozyjną, związaną z brakiem rozwoju ognisk korozji, potwierdzają wyniki jednostkowej zmiany masy próbek w czasie badań w komorze solnej (rys. 139). Wysoką odporność obserwowano w każdym obszarze złącza tj. w materiale rodzimym, na powierzchni złącza po stronie lica jak i po stronie grani (rys. 140a-j).

## **12. Analiza wyników i aspekty technologiczne wdrożenia zgrzewania FSW płyt ze stopu aluminium EN AW-6082 w warunkach przemysłowych**

### **12.1. Analiza wyników badań**

Stopy aluminium, jako materiał konstrukcyjny są powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu. Wzrost zużycia tych materiałów jest związany z ciągłym rozwojem konstrukcji, które stają się coraz bardziej złożone i którym stawia się coraz większe wymagania eksploatacyjne [108, 109]. Stosowanie stopów aluminium jest związane z koniecznością obniżania masy i kosztów wykonywania konstrukcji, przy założeniu odpowiedniej wytrzymałości i sztywności oraz odporności na korozję. Światowe zużycie stopów aluminium przekroczyło 146 mln ton w 2022 roku i przewiduje się dalsze zwiększanie zużycia w oparciu o średnią roczną stopę wzrostu CAGR (z ang. compound annual growth rate) na poziomie 5,24% w latach 2023 – 2028 [110].

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że wśród materiałów spełniających powyższe wymagania można wyróżnić stop aluminium EN AW-6082. Dobre właściwości tego materiału, w tym wysoka odporność na korozję sprawiają, że posiada on szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu motoryzacyjnego, kolejowego oraz lotniczego [59, 60, 61, 62]. Stop aluminium EN AW-6082 wykorzystywany jest wszędzie tam, gdzie wymagania wytrzymałościowe są wyższe niż dla stopów serii 5xxx. Spośród najczęściej wykorzystywanych stopów aluminium serii 6xxx to właśnie stop EN AW-6082 cechuje się najwyższą wytrzymałością (rys. 24).

Wykorzystanie stopów aluminium w tym stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082 wymaga odpowiednich metod ich łączenia. Do wykonywania konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 można zastosować kilka technologii zarówno spawania jak i zgrzewania. W przypadku technologii spawania łukowego takich jak spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazowej – TIG lub spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazowej – MAG wykonane złącza cechują się obniżoną wytrzymałością w stosunku do materiału rodzimego nawet do 50% [1, 2]. Zgrzewanie tego gatunku stopu aluminium jest utrudnione

m.in. z powodu konieczności usuwania warstwy tlenków oraz z uwagi na problemy ze spadkiem twardości w strefie złącza zgrzewanego [81].

Nowoczesną, ciągle doskonaloną technologią zgrzewania, jest metoda zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny FSW (z ang. Friction Stir Welding) (rys. 3) [10]. Opracowanie jej pozwoliło na znaczne rozszerzenie możliwości łączenia materiałów konstrukcyjnych, w tym zarówno materiałów jedno- jak i różnoimiennych. Wyniki badań wskazują, że złącza FSW cechują się bardzo jednorodnymi właściwościami i spełniają wymagania konstruktorów m.in. w zakresie wytrzymałości [1, 2]. W metodzie tej do utworzenia złącza wykorzystuje się ruch obrotowy oraz posuwisty narzędzia, które wprowadzone pomiędzy łączone materiały uplastycznia je, miesza i tworzy trwałe połączenie w stanie stałym [10, 11]. Drobnziarnista struktura powstałych złączy FSW oraz obecność drobnych związków międzymetalicznych w tym m.in.  $Mg_2Si$  powoduje, że złącza te charakteryzują się wytrzymałością na poziomie nawet 95% wytrzymałości materiału rodzimego [12]. Złącza są metalicznie ciągłe i szczelne [13]. Metoda zgrzewania FSW jest ciągle rozwijana, wzrasta również liczba materiałów, które można połączyć za jej pomocą [14].

Do podstawowych zalet zgrzewania FSW można zaliczyć m.in. powstawanie złącza w stanie stałym, dużą stabilność wymiarową, bardzo dobre i powtarzalne właściwości mechaniczne czy możliwość automatyzacji i robotyzacji procesu. Ograniczenia metody to wysokie koszty początkowe inwestycji, konieczność stosowania podpór oraz stosunkowo niewielka prędkość zgrzewania (dla niektórych materiałów) [10, 28]. Podczas zgrzewania FSW mogą się pojawiać niezgodności. Większość z nich stanowią niezgodności związane ze strukturą i budową złączy, które najczęściej ujawniają się w obszarze grani oraz na styku odkształconych obszarów złącza. W ramach realizacji pracy opracowano autorską klasyfikację najczęściej pojawiających się niezgodności, którą przedstawiono na rys. 23. Jak wskazują wyniki badań własnych nad technologią FSW, ze zgrzewaniem jest także związane powstawanie otworu technologicznego w miejscu wyprowadzenia narzędzia do zgrzewania. Dla potencjalnych odbiorców technologii może to stanowić problem. Można temu zaradzić stosując płyty dobiegowe i wybiegowe, zaślepiając otwór technologiczny za pomocą zgrzewania tarcowego albo spawania łukowego lub pozostawić otwór technologiczny poza trajektorią zgrzewania. Każde z przedstawionych rozwiązań eliminuje ten problem [38].

Metoda FSW stanowi alternatywę dla typowych procesów spawania łukowego [1, 2]. Wykorzystanie metody FSW do zgrzewania stopów aluminium przerabianych plastycznie pozwala uniknąć typowych niezgodności spawalniczych i wyeliminować wady innych



technologii spajania, jest łatwa do zastosowania, a dla niektórych materiałów (np. odlewniczych stopów metali) jest jedyną możliwością ich łączenia [7-10].

Podczas zgrzewania FSW największy wpływ na jakość złącza mają m.in. kształt i rodzaj narzędzia do zgrzewania (w tym średnica wieńca opory, średnica i długość trzpienia) oraz dwa główne parametry technologiczne procesu tj. prędkość obrotowa narzędzia do zgrzewania oraz prędkość zgrzewania [28, 43]. Decydują one o cyklu cieplnym zgrzewania i stopniu uplastycznienia łączonych materiałów, a tym samym wpływają na strukturę i właściwości złącza [42, 44]. Do aspektów bezpośrednio wpływających na jakość złączy FSW należy również kąt pochylenia narzędzia [34, 44, 49, 104]. W odróżnieniu od technologii spawania łukowego, zastosowanie narzędzia bez zewnętrznego źródła ciepła (w postaci np. łuku elektrycznego) prowadzi do znacznego obniżenia kosztów zgrzewania technologii FSW [104].

Analiza literaturowa dotycząca technologii FSW wykazała, że nie jest możliwe pełne rozwiązanie zagadnienia oceny wpływu podstawowych parametrów zgrzewania FSW na jakość złączy ze stopu aluminium EN AW-6082. Wyniki badań są niekompletne, nieczytelne lub brak jest pełnych informacji na temat oceny struktury złączy pozwalających na opracowanie wytycznych i wymagań dotyczących możliwości wdrożenia technologii FSW do zgrzewania stopu aluminium EN AW-6082 w warunkach produkcyjnych [23, 24, 25, 29].

Celem pracy było określenie wpływu wybranych parametrów zgrzewania FSW na strukturę i właściwości złączy wykonanych ze stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082. Ustalony zakres pracy pokazano na rys. 47.

W ramach pracy wykonano próby zgrzewania FSW blach ze stopu aluminium EN AW-6082. Próby przeprowadzono na zgrzewarce zbudowanej na bazie frezarki konwencjonalnej FYF32 JU2 firmy JAFO. Przyjęto sześć kombinacji parametrów zgrzewania, które dobrano na podstawie wstępnych badań własnych [33, 38, 58]. Prędkość obrotowa  $V_o$  wynosiła 450, 900 oraz 1800 obr/min, prędkość zgrzewania  $V_z$  wynosiła 450 i 900 mm/min (tablica 14).

O jakości złączy decyduje nie tylko materiał oraz jego struktura i właściwości mechaniczne ale także parametry zgrzewania FSW tj. prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania. Czynniki te mają bezpośredni wpływ na odkształcenie plastyczne i powiązane z nim dynamiczne płynięcie zgrzewanych mas łączonych materiałów, co z kolei wpływa na właściwości wytrzymałościowe powstałych złączy (rys. 106).

Czynnikiem wpływającym na jakość złączy FSW jest pole temperatury obszaru zgrzewania co można potraktować jako cykl cieplny zgrzewania FSW. Źródłem ciepła jest praca jaką wykonuje narzędzie podczas ruchu obrotowego i liniowego. W pierwszej fazie

procesu tj. podczas zagłębiania narzędzia w łączone materiały ciepło wydziela się w wyniku tarcia powierzchni narzędzia o zgrzewane materiały. Powoduje to wzrost ich temperatury oraz plastyczności, co z kolei wpływa na pojawienie się dynamicznego płynięcia mas łączonych materiałów. Sam proces zgrzewania FSW prowadzony jest jednak w stanie stałym, w rozumieniu braku krystalizacji jako zjawiska, które tworzy złącze FSW.

Wyniki pomiaru temperatury wewnątrz złącza FSW wskazują m.in., że niezależnie od zastosowanych parametrów procesu temperatura maksymalna w strefie złącza jest na podobnym poziomie (np. rys. 59÷61). Przykładowo przy wyższej prędkości obrotowej narzędzia tj. 900 obr/min obserwowano mniejszy gradient temperatury (rys. 62) w porównaniu do dwukrotnie mniejszej prędkości obrotowej narzędzia tj. 450 obr/min (rys. 59). Maksymalna wartość temperatury w złączach jest w granicach 400°C, co wskazuje na to, że w złączu nie powinny powstawać nowe fazy. Potwierdzają to również wyniki analizy DTA (rys. 66). Analiza krzywych DTA ujawniła po dwa piki na krzywej nagrzewania stopu oraz dwa piki na krzywej chłodzenia. Jednak piki te pojawiają się w temperaturach powyżej 550°C, a więc znacznie wyżej w stosunku do zmierzonych temperatur w złączach FSW, niezależnie od parametrów technologicznych zgrzewania.

Wyniki pomiaru rozkładu temperatury podczas zgrzewania zarówno uzyskane z termopar, jak również z analizy obrazów kamery termowizyjnej oraz wstępne próby technologiczne zgrzewania zostały wykorzystane do opracowania i zwalidowania modelu MES złącza FSW. Opracowany model umożliwił określenie pola temperatury i odkształceń dla zakładanych warunków zgrzewania (tablica 12). Na tej podstawie, przyjmując jako kryterium jak najbardziej równomierny rozkład temperatury (rys. 51) oraz najmniejsze odkształcenia (rys. 54) stwierdzono, że najkorzystniejsze parametry zgrzewania powinny być na poziomie: prędkość obrotowa narzędzia 900 obr/min, prędkość zgrzewania powinna wynosić 900 mm/min. Wyniki badań wskazały, że energia liniowa zgrzewania jest na podobnym poziomie wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia z 450 do 1800 obr/min, przy prędkości zgrzewania 450 mm/min i nieznacznie wrasta wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia przy prędkości zgrzewania 900 mm/min (tablica 12). Jest to związane ze zmianą stosunku prędkości obrotowej narzędzia do prędkości zgrzewania i powiązaną z nim objętością nagrzewanego materiału zmieniającą się wraz ze zmianą prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania.

Na tej podstawie przyjęto zakres parametrów technologicznych zgrzewania FSW stopu aluminium EN AW-6082: prędkość obrotowa narzędzia  $V_o$  na poziomie od 450, przez 900 do 1800 obr/min w powiązaniu z dwiema prędkościami zgrzewania  $V_z=450$  i 900 mm/min. To

dało sześć kombinacji parametrów procesu FSW (tablica 14). Podczas zgrzewania mierzono, oprócz temperatury (rys. 57 i 58), także siłę docisku narzędzia oraz moment obrotowy (tablica 14). Zgrzewanie prowadzono za pomocą narzędzia typu Triflute<sup>TM</sup> z trzpieniem w kształcie stożka (rys. 56). Jako podstawowe kryterium poprawności wykonanego złącza przyjęto poziom akceptacji „B” wg PN-EN ISO 25239-5:2021-01. Stwierdzono, że wszystkie wykonane złącza spełniają to kryterium, jednak lica wykonanych zgrzein różniły się między sobą. Wyniki badań wizualnych złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 wskazują, że zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia (energii zgrzewania) wpływa na uplastycznienie zgrzewanego materiału. Mała prędkość obrotowa na poziomie 450 obr/min, podobnie jak zbyt duża prędkość obrotowa narzędzia (1800 obr/min) powodowała większą wypływkę od strony spływu (rys. 67a,e, rys. 68a,e). Złącza zgrzewane z prędkością obrotową narzędzia wynoszącą 900 obr/min były pozbawione wypływki (rys. 68c). Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia powoduje większe nagrzewanie obszaru zgrzewania, a tym samym łatwiejsze wyciskanie materiału poza strefę oddziaływania wieńca opory narzędzia. Natomiast prędkość zgrzewania wpływa na rozmieszczenie półokręgów widocznych na licu złącza FSW. Wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania zwiększa się odległość między tymi półokręgami, jednak odległość ta nie wpływa istotnie na jakość połączenia (rys. 67a,e, rys. 68a,e). We wszystkich badanych złączach nie obserwowano występowania niezgodności w postaci zbyt dużego pocienienia zgrzewanego materiału (np. rys. 67 i 68). Grań złączy miała podobny kształt, niezależnie od zastosowanych parametrów zgrzewania FSW tj. prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania (rys. 67b i 68b). Najlepsze rezultaty zgrzewania, przyjmując jako kryterium wyniki oceny wizualnej złączy, uzyskano dla prędkości obrotowej narzędzia 900 obr/min i prędkości zgrzewania 900 mm/min, co potwierdzają wyniki symulacji procesu metodą elementów skończonych (rys. 52).

W celu szczegółowego opisanie makro i mikrostruktury złącza FSW oraz jej opisu w pracy opracowano metodykę badań strukturalnych, która oprócz badań wizualnych, prowadzonych zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57], obejmowała: dobór miejsca pobrania próbki (rys. 49), sposób przygotowania zglądu metalograficznego oraz ujawnienia struktury (tablica 10), dobór akwizycji obrazu makro i mikrostruktury (tablica 11), metodę identyfikacji składu fazowego za pomocą metody XRD oraz EBSD, metodę mikroanalizy składu chemicznego (EDS) ujawnionych wydzielen oraz tomografię 3D złącza FSW w wybranych obszarach. Szczegółowy opis metodyki oceny struktury złącza FSW stopu aluminium EN AW-6082 pokazano na rys. 50. Na szczególne podkreślenie zasługuje metodyka tomografii komputerowej z zastosowaniem techniki

FIB-SEM. Jest to unikalna metodyka pozwalająca na opis wydzielen w jednostce objętości. Wykorzystanie opracowanej metodyki badawczej umożliwiło prawidłową ocenę struktury i jakości złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 przy akceptowalnej pracochłonności i czasochłonności badań.

Analiza wyników badań makro struktury wskazuje, że pomimo podobnego rozkładu temperatury maksymalnej w poszczególnych strefach złączy FSW oraz powstania złączy metalicznie ciągłych struktura złączy jest różna w każdym z badanych obszarów. Wynika to z faktu, iż mikrostruktura w pobliżu lica jest tworzona głównie poprzez oddziaływanie wieńca opory, natomiast w strefie środkowej tj. w strefie mieszania na strukturę wpływa głównie trzpień narzędzia FSW. Wpływ na rodzaj struktury w złączu FSW mają także główne parametry zgrzewania tj. prędkość obrotowa oraz prędkość zgrzewania, które decydują o ilości ciepła obszaru zgrzewania.

We wszystkich złączach FSW ujawniono typowe dla tej metody zgrzewania strefy złącza, tj. strefa odkształcona termomechanicznie, strefa mieszania oraz strefy wpływu ciepła (rys. 69÷74). W złączach obserwuje się również linię tlenków w strefie mieszania, co jest związane z odkładaniem się kolejnych warstw materiału (rys. 69e÷74e). W przypadku złączy wykonanych z najniższą prędkością obrotową narzędzia, struktury po stronie natarcia i po stronie spływu są znacznie rozdrobnione w stosunku do materiału rodzimego. Podobne struktury obserwowano w strefie mieszania (rys. 69c). Wzrost prędkości obrotowej narzędzia skutkuje mniejszym rozdrobnieniem struktury (rys. 70), a najbardziej gruboziarnistą strukturę złącza obserwowano przy prędkości obrotowej narzędzia na poziomie 1800 obr/min, jednak nawet przy tej prędkości obrotowej narzędzia struktura jest znacznie bardziej rozdrobniona w stosunku do materiału rodzimego (rys. 71). Jest to charakterystyczne dla procesu mieszania materiału w stanie stałym, a jest związane ze zmniejszającą się objętością nagrzewanego materiału wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej narzędzia.

Wyniki badań wskazują, że zwiększanie prędkości obrotowej narzędzia od 450 do 1800 obr/min nie powoduje, jak wskazują dane literaturowe [5], zwiększenia oddziaływania wieńca opory czego efektem jest zmiana makroskopowej budowy złącza na przekroju poprzecznym w tym brak klasycznego jądra zgrzeiny oraz warstwowe ułożenie materiałów w osi złącza. Obserwowano także, że wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania struktura złącza jest mniej rozdrobniona, co może powodować jej niecałkowite uplastycznienie, w efekcie czego pojawiają się pustki od strony grani złącza (rys. 72a). Pojawienie się pustki wskazuje na zbyt niski stosunek prędkości obrotowej narzędzia do prędkości zgrzewania i narzędzie nie jest w stanie zapewnić wystarczającej wartości temperatury niezbędnej do płynięcia materiału na

odpowiednim poziomie. Prawdopodobną przyczyną tworzenia się tego typu niezgodności jest gwałtowna zmiana kierunków płynięcia przeciwnie przemieszczających się strumieni zgrzewanych materiałów – często z wykorzystaniem narzędzia o zbyt krótkim trzpieniu [5].

Na podstawie analizy makrostruktury wykonanych złączy FSW potwierdzono, że najlepsze parametry zgrzewania stopu aluminium EN AW-6082 to prędkość obrotowa narzędzia 900 obr/min i prędkość zgrzewania 900 mm/min.

Analiza mikrostruktury poszczególnych stref złączy ujawniła zróżnicowaną wielkość ziaren (tablica 16). Stwierdzono, że w strefie wpływu ciepła po stronie natarcia są wydłużone ziarna o szerokości pasm od 37  $\mu\text{m}$  do 60  $\mu\text{m}$ , podobnie jak w strefie wpływu ciepła po stronie spływu, gdzie szerokość pomiędzy pasmami wynosiła od 36  $\mu\text{m}$  do 55  $\mu\text{m}$ . Natomiast w strefie odkształconej termomechanicznie i strefie mieszania ziarna były równoosiowe i rozdrobnione w stosunku do materiału rodzimego, a ich średnia średnica mieściła się w zakresie od 2,6  $\mu\text{m}$  do 6,8  $\mu\text{m}$  (tablica 16). W strukturze badanych złączy obserwowano również liczne drobne wydzielения faz międzymetalicznych (tablica 16, rys. 79), wzbogaconych w mangan, krzem i żelazo (rys. 80 i 81). Na podstawie wyników badań XRD stwierdzono, że są to fazy  $\text{Al}_{0.095}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.74}\text{Si}_{1.606}$  oraz faza  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (rys. 82). Ujawniono również fazę  $\text{Al}_3\text{Mg}$  (tablica 17). Wyniki identyfikacji faz metodą XRD zostały również potwierdzone na podstawie rezultatów badań EBSD (rys. 83). Metoda EBSD potwierdziła również rozkład i wielkość ziaren w poszczególnych strefach złącza (rys. 84÷86). Uzyskane mapy rozkładu orientacji krystalograficznej oraz mapy granic ziaren czytelnie pokazują zróżnicowanie ziaren na płaskim przekroju złącza FSW (rys. 87). Analiza wyników dla materiału rodzimego ujawniła wydłużone ziarna o średniej średnicy od 10 do 100  $\mu\text{m}$  z przeważającą liczbą granic ziaren wysokiego kąta (rys. 84). W strefie wpływu ciepła po stronie natarcia, gdzie materiał jest odkształcany zgodnie z kierunkiem ruchu narzędzia średnica ziaren była na poziomie 100  $\mu\text{m}$ , podobnie jak w strefie wpływu ciepła po stronie spływu (rys. 85, 87). Natomiast w strefie mieszania złącza FSW, potwierdzono znaczne rozdrobnienie ziarna, średnia średnica jest na poziomie 10  $\mu\text{m}$ , a udział granic ziaren wysokiego i niskiego kąta jest podobny (rys. 86). Wskazuje to m.in. na pośredni udział rekrytalizacji dynamicznej w budowie mikrostruktury złącza w strefie mieszania i strefie odkształcenia termomechanicznego w wyniku dużego stopnia i prędkości odkształcenia oraz podwyższonej temperatury. Ten rodzaj rekrytalizacji umożliwia uzyskanie nowych rozmiarów i orientacji ziaren, co może zapobiec propagacji pęknięć. Uzyskane wyniki badań są odmienne od prezentowanych w literaturze, gdzie rekrytalizację dynamiczną wskazuje się jako jedyny mechanizm zmian struktury w złączach FSW w tym w strefie mieszania [115÷117].



O właściwościach złącza FSW decyduje nie tylko wielkość i kształt ziaren roztworu stałego materiału aluminium ale także kształt, liczba i rozmieszczenie faz międzymetalicznych w strukturze. W celu określenia tych parametrów wykonano specjalistyczne badania za pomocą techniki tomografii FIB-SEM. Jest to jedna z technik badawczych umożliwiającą pokazanie rozmieszczenia wydzielen i faz międzymetalicznych w przestrzeni poprzez wykonanie rekonstrukcji 3D złącza. Analiza uzyskanych wyników z materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082 oraz strefy mieszania złącza FSW potwierdziła istotną różnicę w strukturze. Udział objętościowy wydzielen w materiale rodzimym jest na poziomie 0,68% (rys. 92). W badanym prostopadłościanie jest najwięcej wydzielen o średniej średnicy od 42 do 84 nm, a dużych wydzielen powyżej 140 nm jest tylko 700 (rys. 93). Na rys. 94÷97 pokazano rozmieszczenie wydzielen, klasyfikowanych wg parametrów stereologicznych. Najwięcej wydzielen jest o objętości nie przekraczającej  $139296 \text{ nm}^3$  (rys. 94) i średniej średnicy Fereta na poziomie od 30 do 77 nm (rys. 95), natomiast wydzielenia są nieznacznie wydłużone, co jest typowe dla procesu walcowania blachy (rys. 96). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wydzielenia są równomiernie rozmieszczone w całej objętości stopu, a struktura materiału rodzimego jest jednorodna.

Wyniki badań tomografii FIB-SEM obszaru mieszania wykazały, że udział objętościowy wydzielen jest na poziomie 1,19% (rys. 98), czyli prawie dwa razy więcej w stosunku do materiału rodzimego. Stwierdzono również nieznaczny wzrost wielkości wydzielen. Średnia średnica wydzielenia była na poziomie 94,7 nm, jednak najwięcej wydzielen obserwowano w zakresie 43-87 nm. Ujawniono również kilka dużych wydzielen o średnicy znacznie przekraczającej 250 nm (rys. 98, 99). Analiza rozkładu wielkości wydzielen pokazana na rys. 100b wskazuje, że prawie 1200 wydzielen charakteryzuje się objętością poniżej  $111653 \text{ nm}^3$ , a cztery duże wydzielenia są o objętości ponad  $11003500 \text{ nm}^3$  (rys. 100). Analiza EDS tych wydzielen ujawniła znaczący udział żelaza w składzie chemicznym, co wskazuje, że pochodzą one z materiału narzędzia (rys. 80). Stwierdzono także, że w tej strefie wydzielenia są bardziej globularne, a wskaźnik kształtu większości wydzielen jest powyżej 0,7 (rys. 102). Taki rozkład wydzielen oraz ich kształt może decydować o zwiększeniu właściwości mechanicznych połączenia FSW w stosunku do złącza spawanego, co jest opisywane w literaturze [44]. Jak wskazują wyniki badań, mechanizm zmian struktury stopu aluminium EN AW-6082 zgrzewanego za pomocą technologii FSW w wyniku odkształcenia plastycznego i płynięcia materiału jest bardzo złożony. W górnych warstwach złącza osnowa ulegała zmianom w wyniku oddziaływania wieńca opory. Z kolei w strefie mieszania przeważa rekrytalizacja.

W celu oceny wpływu parametrów zgrzewania tarcowego na właściwości mechaniczne wykonano statyczne próby rozciągania, które pozwoliły na określenie wytrzymałości złączy, próby zginania, które pozwoliły na ocenę plastyczności wykonanych połączeń oraz pomiary twardości.

Ocena wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW wskazuje, że wytrzymałość na rozciąganie zależy od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Najmniejszą wytrzymałością ( $R_m=208$  MPa) charakteryzowało się złącze FSW wykonane z prędkością obrotową narzędzia 1800 obr/min oraz prędkością zgrzewania 450 mm/min (tablica 18). Jednak trzy z czterech badanych próbek uległy zniszczeniu w osi złącza (rys. 110). Stwierdzono, że przy stałej prędkości zgrzewania na poziomie 450 mm/min, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej narzędzia spada wytrzymałość złącza FSW (rys. 106). Ograniczona wytrzymałość złącza może być związana ze zbyt dużym oddziaływaniem wieńca opory przy zwiększającej się prędkości obrotowej narzędzia.

Natomiast przy prędkości zgrzewania wynoszącej 900 mm/min najlepsze rezultaty osiągnięto dla prędkości obrotowej narzędzia 900 obr/min, wytrzymałość połączenia wynosiła ( $R_m=239$  MPa) (tablica 19) i stanowi prawie 80% wytrzymałości materiału rodzimego, co w porównaniu do złączy spawanych jest znaczącym wzrostem [44]. Ten wzrost wytrzymałości złącza można tłumaczyć rozdrobnieniem struktury oraz wielkością i rozmieszczeniem wydzielen międzymetalicznych w obszarze mieszania w stosunku do dendrytycznej struktury złącza spawanego. Analiza miejsc zerwania jednoznacznie wskazuje, że obszarem uprzywilejowanym, w którym dochodzi do zniszczenia połączenia FSW jest strona natarcia (rys. 107).

Przeprowadzono także badania właściwości plastycznych złączy FSW w próbie zginania. Badania te są jednym z najostrzejszych kryteriów dla złączy zarówno zgrzewanych jak i spawanych ze stopów aluminium. Jako kryterium wytrzymałości przyjęto osiągnięcie kąta zgięcia na poziomie min. 90° (tablica 25). Największą liczbę złączy, które osiągnęły założony kąt zgięcia na poziomie 90° osiągnięto dla zgrzewania z prędkością 900 mm/min i prędkością obrotową narzędzia 450 oraz 900 obr/min (tablice 23 i 24). Należy podkreślić, że żadne z badanych złączy nie zostało zniszczone w próbie zginania od strony grani. Świadczy to o wykonaniu złączy bez niezgodności od strony grani tzw. „braku zgrzania”. Osiągnięcie założonej wartości kąta zgięcia stanowi „bardzo ostrą” próbę i zaleca się po uzgodnieniu z konstruktorem oraz użytkownikiem złączyć z wymagań.

Analiza rozkładów twardości w badanych złączach FSW nie ujawniła istotnych zmian twardości w poszczególnych strefach połączenia (rys. 116). Twardość złączy zgrzewanych

z prędkością liniową 450 mm/min była w zakresie od 73 HV1 do 97 HV1, niezależnie od prędkości obrotowej narzędzia (tablica 26). Podobne rezultaty otrzymano dla złączy wykonanych z prędkością zgrzewania 900 mm/min. Największą twardość zmierzono w materiale rodzimym po stronie spływu złącza 96 HV1, a najmniejszą 72 HV1 w strefie natarcia i strefie mieszania (tablica 26). Uzyskane wyniki świadczą o jednorodności rozkładu twardości i braku utwardzenia w poszczególnych strefach złącza, niezależnie od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania. Jest to związane z niską temperaturą procesu, która nie przekracza 400°C oraz krótkim czasem zgrzewania, co nie powoduje zmian w wyniku przemian strukturalnych, a ujawnione zmiany kształtu i rozmieszczenia ziaren i wydzielen, w tym zakresie nie wpływają na wzrost lub spadek twardości w poszczególnych strefach złącza.

Uzyskane wyniki badań właściwości mechanicznych oraz badań strukturalnych wskazują, że technologia FSW może być z powodzeniem stosowana do łączenia stopu aluminium EN AW-6082, umożliwiając otrzymanie złączy na poziomie akceptacji „B” wg PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57], o wytrzymałości na rozciąganie na poziomie min. 70% wytrzymałości materiału rodzimego, co jest znacznie lepszym wynikiem w stosunku do konwencjonalnych metod spawania łukowego [1, 2]. Jednak o możliwości stosowania tego typu złączy w konstrukcjach, m.in. przeznaczonych dla przemysłu lotniczego, kolejowego lub motoryzacyjnego konieczne było określenie odporności na korozję wysokotemperaturową w atmosferze symulowanych spalin oraz wilgotnej atmosferze zawierającej SO<sub>2</sub>.

Wyniki badań odporności na korozję wysokotemperaturową w temperaturze 210°C w atmosferze zawierającej 9% O<sub>2</sub> + 0,02% SO<sub>2</sub> + 7% CO<sub>2</sub> + 0,15% NO<sub>2</sub> w azocie (N<sub>2</sub>) potwierdzają wysoką odporność korozyjną złączy FSW. Stwierdzono, że zmiana masy próbek niezależnie od czasu ekspozycji złącza jest na podobnym poziomie, nawet po 1000 h eksperymentu (rys. 118 i 119). Na powierzchni złącza, niezależnie od miejsca badania (strefy złącza) ujawniono podobny mechanizm pasywacji (rys. 122 i 123), tj. pokrywania się powierzchni złącza cienką warstwą Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (rys. 124÷127), która zabezpiecza materiał przed dalszą korozją. Jest to mechanizm powszechnie opisany w literaturze [100]. Bardzo podobne wyniki uzyskano w badaniach odporności na korozję wysokotemperaturową w temperaturze 300°C (zalecana temperatura pracy stopu AW-6082 nie przekracza 100°C). Na powierzchni próbek ujawniono warstwę pasywną zbudowaną głównie z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (rys. 129). Na powierzchni warstwy pasywnej obserwowano fazy bogate w magnez oraz w siarkę, prawdopodobnie są to tlenki magnezu MgO oraz tlenki siarki SO<sub>2</sub>. (rys. 130 i 131). Te wyniki jednoznacznie wskazują, że w zakresie temperatur eksploatacyjnych dla stopu AW-6082 złącza zgrzewane

FSW, w atmosferze spalin samochodowych charakteryzują się podobnymi właściwościami co materiał rodzimy i mogą być z powodzeniem wykorzystywane w tego typu konstrukcjach.

Drugim ważnym kryterium decydującym o możliwości wykorzystania złączy FSW stopu aluminium EN AW-6082 jest ich odporność na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki i w mgłę solnej. Warunki te symulują eksploatację pojazdów w transporcie. Wyniki tych badań, pokazane na rys. 133, wskazują na ubytek masy próbki po 30 cyklach eksperymentu na poziomie ok.  $3,5 \text{ g/m}^2$ , jedynie w przypadku złącza zgrzewanego z prędkością 450 mm/min i przy prędkości obrotowej narzędzia 450 obr/min ubytek masy był prawie dwa razy większy. Było to prawdopodobnie spowodowane niezgodnościami występującymi w złączach, które powstają z powodu zbyt małego stopnia uplastycznienia materiału. Jednak w przypadku zalecanych parametrów zgrzewania, tj. prędkość liniowa zgrzewania 900 mm/min i prędkość obrotowa narzędzia 900 obr/min odporność na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki jest porównywalna z materiałem rodzimym. Natomiast podczas ekspozycji złączy FSW w mgłę solnej nastąpił przyrost masy próbek (rys. 140). Stwierdzono, że w warunkach ekspozycji próbek w mgłę solnej na powierzchni próbek pojawia się warstwa NaCl, co prowadzi do wzrostu masy próbki, która podczas dłuższej ekspozycji ustala się na stałym poziomie, co świadczy o wysokiej odporności całego złącza na korozję w mgłę solnej.

Uzupełnieniem badań odporności na korozję złączy FSW była ocena odporności na korozję międzykrystaliczną. Zaobserwowano, że głównym mechanizmem korozji jest powstawanie wżerów (rys. 136). Stwierdzono, że odporność złącza w warunkach korozji międzykrystalicznej jest podobna do materiału rodzimego. Wyniki badań i potencjalne warunki pracy konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 wskazują na konieczność wzięcia pod uwagę możliwość wystąpienia tego rodzaju korozji w warunkach agresywnego środowiska korozyjnego.

Na podstawie wyników badań odporności na korozję stwierdzono, że najlepszymi parametrami do wykonania prawidłowego złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082, jest prędkość obrotowa narzędzia  $V_o = 900 \text{ obr/min}$  oraz prędkość zgrzewania  $V_z = 900 \text{ mm/min}$ .

**Technologią zgrzewania tarcowego FSW jest zainteresowanych w Polsce kilka firm zajmujących się wytwarzaniem różnych konstrukcji m.in. elementów poszycia pociągów czy samolotów, a także obudów silników elektrycznych w przemyśle motoryzacyjnym. Część z nich jest na etapie oceny kosztów potencjalnej inwestycji, inne są na etapie przeprowadzania prób zgrzewania w warunkach laboratoryjnych polskich jednostek badawczych. Brak jest jednak danych dotyczących aspektów ekonomicznych**

**technologii, zaleceń konstrukcyjnych oraz wytycznych technologicznych służących określeniu projektowych wartości wytrzymałości złączy w zależności od rodzaju zgrzewanego materiału lub różnych warunków zgrzewania. Współczesny przemysł wytwórczy oczekuje nie tylko wiedzy o jakości złączy FSW ale także poszukuje informacji o mikrostrukturze tych złączy, która na tę jakość bezpośrednio wpływa.**

Zgrzewanie FSW, podobnie jak spawanie za pomocą metod łukowych, można przeprowadzić na trzy różne sposoby: manualnie, półautomatycznie oraz na stanowisku zrobotyzowanym. Zwykle decyzja o zastosowaniu danej techniki opiera się na czynnikach ekonomicznych i technicznych. Czynniki ekonomiczne obejmują koszt technologii, jej produktywność i wydajność. Czynniki techniczne obejmują wymagania dotyczące odpowiedniej sztywności układu oraz wymagań związane z czujnikami i stosowanymi układami sterowania. Mogą więc wpłynąć na to, że cena zgrzewarki FSW waha się w przedziale od 600 000 złotych do kilku milionów złotych [103]. W związku z tym stosunkowo często buduje się stanowiska do zgrzewania w oparciu o frezarki stacjonarne wyposażone w dedykowaną głowicę FSW. Takie rozwiązanie może dodatkowo obniżyć koszt stanowiska do zgrzewania o kwotę nawet 300 000 zł. Można również stosować stanowiska zrobotyzowane do zgrzewania metodą FSW. Zastosowanie robotów zwiększa elastyczność produkcji przy znacznie niższych kosztach produkcji [104]. Technologia FSW dopiero niedawno stała się procesem zrobotyzowanym na skalę produkcyjną w związku z możliwością zapewnienia odpowiednich sił docisku i sztywności systemów. Obecnie dostępne są roboty, które osiągają siły docisku na poziomie do 4,5 kN, co umożliwia zgrzewanie elementów o małej i średniej grubości. Można uznać, że stanowiska zrobotyzowane w niedługim czasie poszerzą zakres zgrzewanych materiałów oraz możliwości zastosowania w różnych gałęziach przemysłu.

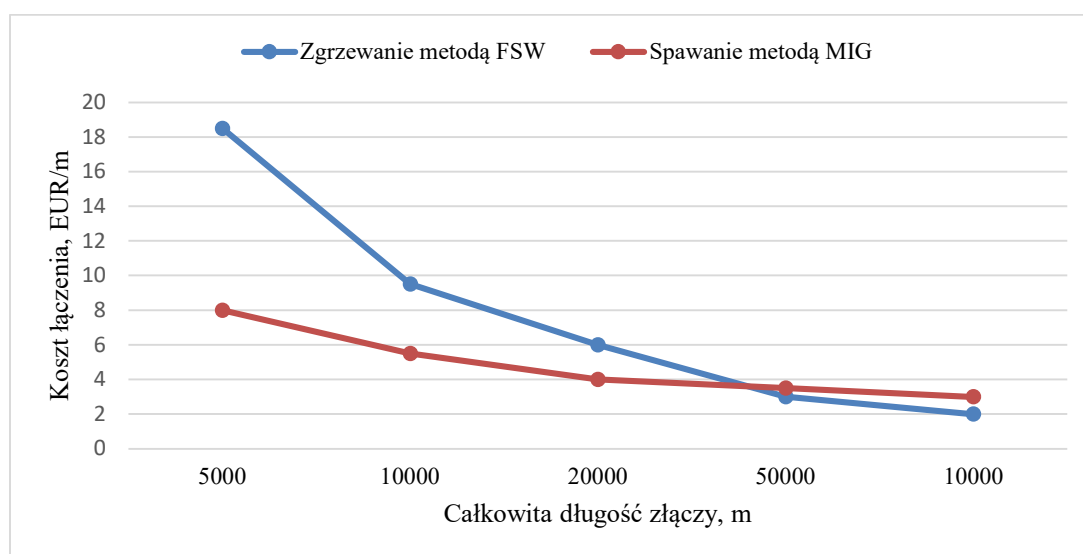
Z ekonomicznego punktu widzenia technologii FSW istnieje kilka kluczowych wad stosowania jej w warunkach przemysłowych. W przeciwieństwie do konwencjonalnych procesów spawalniczych, gdzie dla każdego materiału i konfiguracji złącza znane są zalecenia i sprawdzone kombinacje parametrów (natężenie prądu, napięcie, prędkość spawania, rodzaj gazu osłonowego, rodzaj elektrody i wiele innych), w technologii FSW takich uniwersalnych warunków jeszcze nie określono. Często bowiem, nawet po opracowaniu technologii FSW, nie jest możliwe odtworzenie warunków i parametrów zgrzewania na innym stanowisku do zgrzewania – mimo zastosowania tej samej konfiguracji zgrzewanych materiałów. Ponadto, nadal prowadzone są intensywne badania zachowania się złączy FSW narażonych na różnego rodzaju warunki korozyjne, zmęczenie i pełzanie [104].



Aspekty ekonomiczne stosowania technologii, poprzez porównanie jej z konwencjonalną technologią spawania łukowego metodą MIG, wskazali autorzy publikacji [105]. Dokonali oni porównania kosztów w oparciu m.in. o czas produkcji, inwestycję w urządzenia do zgrzewania i spawania, koszty materiałów eksploatacyjnych czy koszty oprzyrządowania. Autorzy wykazali, że zmierzone przez nich czasy wykonania złączy za pomocą technologii zgrzewania FSW oraz spawania metodą MIG znacznie się różnią. Wskazali oni znaczne korzyści finansowe po stronie technologii FSW. Wynika to głównie z:

- wydłużonego czasu poświęconego na usuwanie tlenków w spawaniu metodą MIG,
- stosowania niższych prędkości spawania w metodzie MIG,
- wydłużonego czasu poświęconego ochronie personelu oraz konieczności poniesienia kosztów środków ochrony osobistej.

Autorzy publikacji [105] wskazali, że całkowity czas wykonania złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6005 o długości 4m to w przypadku technologii FSW 19:40 min (zgrzewanie z prędkością 1500 mm/min) oraz 24:00 minuty w przypadku spawania metodą MIG (spawanie z prędkością 540 mm/min). W czasie tym uwzględniono czasy samego zgrzewania i spawania, czasy pozycjonowania łączonych elementów, usuwania tlenków (w przypadku spawania MIG) oraz czas niezbędny do założenia środków ochrony osobistej [105]. Autorzy wskazali, że spawanie metodą MIG jest bardziej opłacalne w produkcji małoseryjnej, a wraz ze wzrostem rocznej wielkości produkcji to zgrzewanie FSW staje się bardziej ekonomiczne. Przykładowe koszty zgrzewania FSW i spawania metodą MIG dla różnych rocznych wielkości produkcji przedstawiono schematycznie na rys. 143.



Rys. 143. Przykładowe koszty zgrzewania FSW i spawania metodą MIG dla różnych rocznych wielkości produkcji [105]

Do wyznaczenia kosztów zgrzewania FSW lub spawania metodą MIG można zastosować złożony, komputerowy model, który może obejmować dużą liczbę czynników wpływających na wysokość kosztów produkcji. Można też stworzyć proste arkusze kalkulacyjne, ułatwiające prowadzenie obliczeń. Analiza literaturowa zagadnienia wykazała, że na koszty zgrzewania FSW oraz spawania metodą MIG ma wpływ duża liczba czynników, jednakże najważniejsze z nich to:

- koszt inwestycji w urządzenie do zgrzewania / spawania,
- stawka godzinowa wynagrodzenia pracownika,
- koszt narzędzia (tylko zgrzewanie FSW),
- koszt materiału dodatkowego (tylko spawanie MIG).
- koszty gazu osłonowego (tylko spawanie MIG).

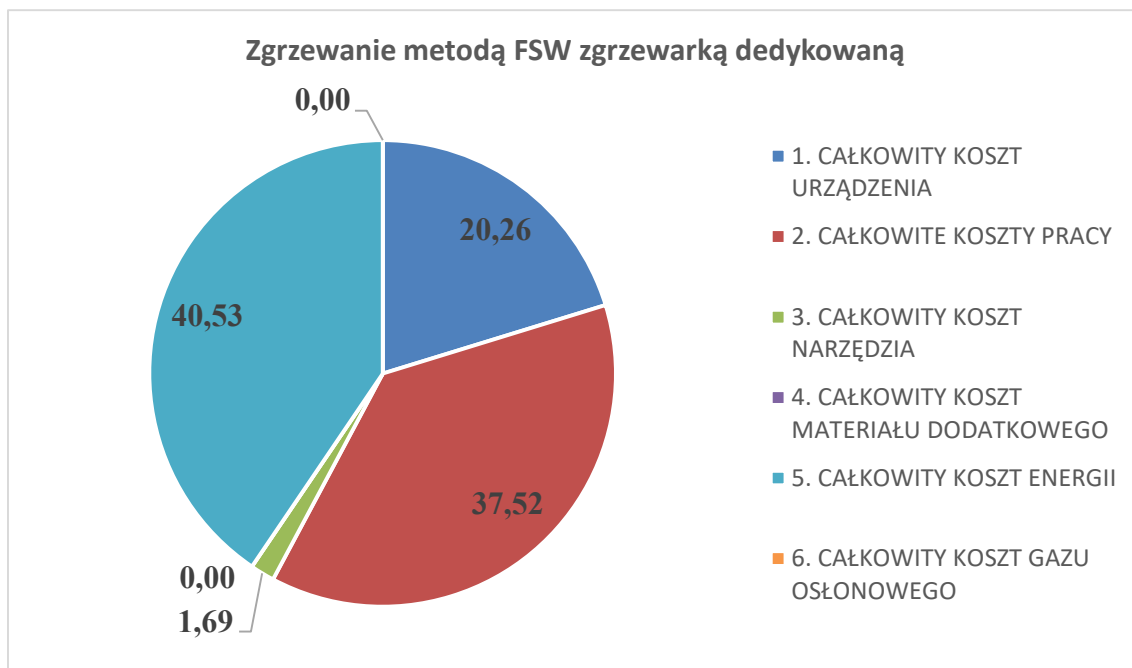
Literatura wskazuje ponadto, że uproszczone modele obliczeniowe tworzy się na bazie dwóch podstawowych metod analizy [111÷114]:

- analiza kosztów zgrzewania/spawania w przeliczeniu na element,
- analiza kosztów w przeliczeniu na metr bieżący złącza.

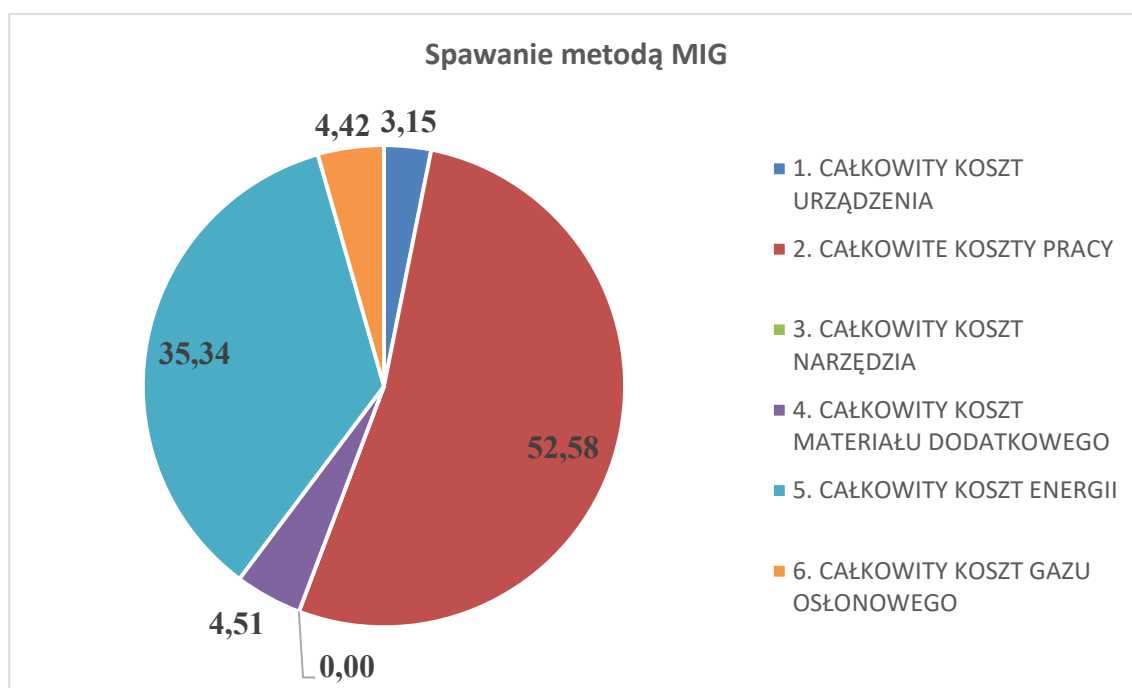
Przywołane dane literaturowe dotyczące aspektów ekonomicznych nie rozwiązują w pełni możliwości interpretacji czynników wpływających na koszty metod spajania. W związku z powyższym wykonano szczegółową kalkulację kosztów stosowania technologii zgrzewania FSW oraz spawania metodą MIG w przeliczeniu na metr bieżący złącza za pomocą dedykowanych urządzeń zgrzewania oraz spawania. Do przeprowadzenia obliczeń założono łączenie paneli ze stopu aluminium EN AW-6082 o grubości 6,0 mm oraz o całkowitej wielkości produkcji 50 000 metrów złączy/rok. Do szczegółowych wyliczeń podzielono technologię FSW na dwa warianty tj. biorąc pod uwagę wyliczenia przy zgrzewaniu zarówno za pomocą dedykowanej zgrzewarki FSW oraz frezarki stacjonarnej – której zastosowanie może obniżyć finalne koszty produkcji. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tablicy 29. Dodatkowo, na rys. 144÷146 przedstawiono procentowy udział poszczególnych składników wpływających na finalne koszty produkcji zarówno dla technologii spawania metodą MIG oraz dwóch wariantów technologii zgrzewania metodą FSW tj. za pomocą dedykowanej zgrzewarki FSW oraz zgrzewarki na bazie frezarki.

Tablica 29. Kalkulacja kosztów produkcji paneli ze stopu aluminium EN AW-6082 o grubości 6,0 mm, zgrzewanych metodą FSW oraz spawanych metodą MIG

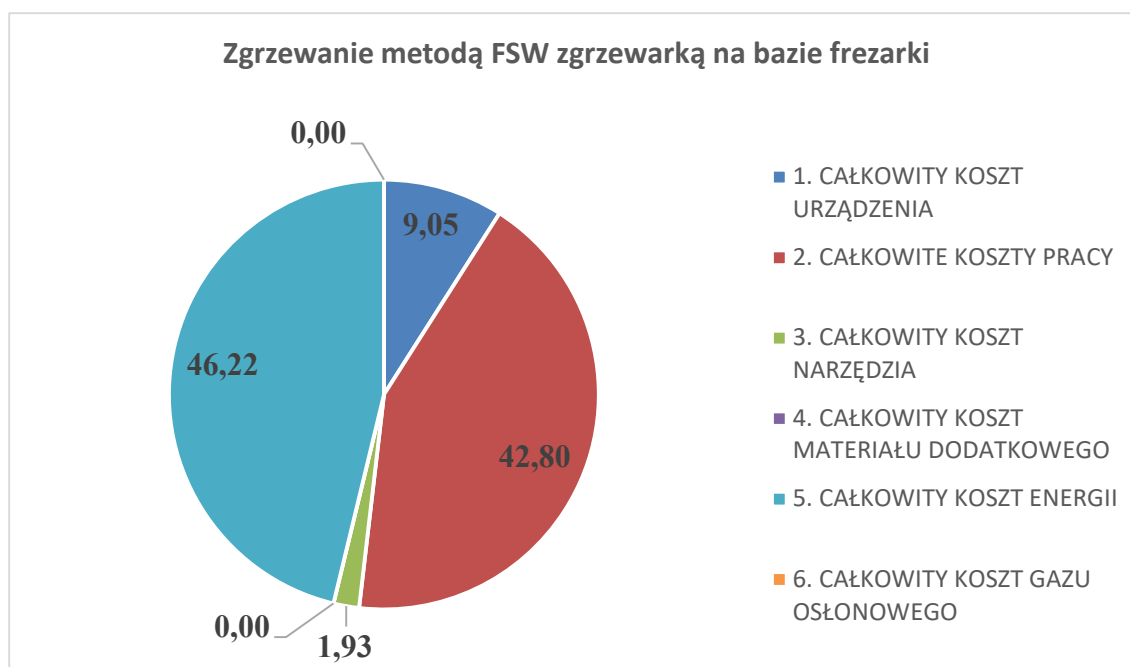
|                                                 | Jednostka          | Zgrzewanie metodą FSW zgrzewarką dedykowaną | Spawanie metodą MIG | Zgrzewanie metodą FSW zgrzewarką na bazie frezarki |
|-------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
| Koszt urządzenia                                | PLN                | 508800,00                                   | 127200,00           | 199280,00                                          |
| Okres amortyzacji                               | rok                | 5                                           | 5                   | 5                                                  |
| Roczny koszt utrzymania urządzenia              | PLN                | 4240,00                                     | 4240,00             | 4240,00                                            |
| Roczna długość złączy                           | m/rok              | 50 000                                      | 50 000              | 50 000                                             |
| Prędkość spajania                               | m/min              | 1,5                                         | 0,5                 | 1,5                                                |
| Cykl pracy                                      | -                  | 0,25                                        | 0,35                | 0,25                                               |
| Roczny koszt pracy urządzenia                   | PLN                | 127200,00                                   | 36342,86            | 49820,00                                           |
| Roczny czas obsługi urządzenia                  | h                  | 2 222                                       | 4 762               | 2 222                                              |
| Koszt urządzenia na godzinę                     | PLN                | 57,24                                       | 7,63                | 22,42                                              |
| Czas zgrzewania                                 | h                  | 556                                         | 1667                | 556                                                |
| <b>1. CAŁKOWITY KOSZT URZĄDZENIA</b>            | PLN/m              | 2,54                                        | 0,73                | 1,00                                               |
| Stawka godzinowa                                | PLN/h              | 106,00                                      | 127,20              | 106,00                                             |
| <b>2. CAŁKOWITE KOSZTY PRACY</b>                | PLN/m              | 4,71                                        | 12,11               | 4,71                                               |
| Koszt narzędzia do zgrzewania FSW               | PLN                | 424,00                                      | 0,00                | 424,00                                             |
| Częstotliwość wymiany narzędzia                 | m                  | 2 000                                       | 2 000               | 2 000                                              |
| <b>3. CAŁKOWITY KOSZT NARZĘDZIA</b>             | PLN/m              | 0,21                                        | 0,00                | 0,21                                               |
| Ilość materiału dodatkowego do spawania MIG     | kg/m               | -                                           | 1                   | -                                                  |
| Koszt materiału dodatkowego                     | PLN/kg             | -                                           | 21,20               | -                                                  |
| <b>4. CAŁKOWITY KOSZT MATERIAŁU DODATKOWEGO</b> | PLN/m              | 0,00                                        | 1,04                | 0,00                                               |
| Moc urządzenia                                  | kW                 | 5                                           | 8                   | 5                                                  |
| Koszt energii elektrycznej                      | PLN/kWh            | 1,02                                        | 1,02                | 1,02                                               |
| <b>5. CAŁKOWITY KOSZT ENERGII</b>               | PLN/m              | 5,09                                        | 8,14                | 5,09                                               |
| Prędkość podawania gazu osłonowego              | l/min              | -                                           | 20                  | -                                                  |
| Cena gazu osłonowego                            | PLN/m <sup>3</sup> | -                                           | 25,44               | -                                                  |
| Zużycie gazu                                    | m <sup>3</sup>     | -                                           | 0,04                | -                                                  |
| <b>6. CAŁKOWITY KOSZT GAZU OSŁONOWEGO</b>       | PLN/m              | 0,00                                        | 1,02                | 0,00                                               |
| <b>CAŁKOWITY KOSZT TECHNOLOGII NA 1m ZŁĄCZA</b> | <b>PLN/m</b>       | <b>12,56</b>                                | <b>23,04</b>        | <b>11,01</b>                                       |



Rys. 144. Procentowy udział poszczególnych składników wpływających na finalne koszty zgrzewania metodą FSW zgrzewarką dedykowaną



Rys. 145. Procentowy udział poszczególnych składników wpływających na finalne koszty spawania metodą MIG



Rys. 146. Procentowy udział poszczególnych składników wpływających na finalne koszty zgrzewania metodą FSW zgrzewarką na bazie frezarki

Jak wskazują wyniki obliczeń kosztów przykładowej wielkości produkcji, proces łączenia FSW ma ogromne korzyści ekonomiczne w porównaniu z konwencjonalną technologią spawania łukowego MIG. Czas wykonywania złączy jest znacznie krótszy, a więc i zużycie energii elektrycznej jest wielokrotnie mniejsze, co prowadzi do tego, że połączenia zgrzewane są tańsze w wykonaniu. Wyniki kalkulacji kosztów, wykonania paneli ze stopu aluminium EN AW-6082 o grubości 6,0 mm, wskazują, że zastosowanie technologii FSW jest o prawie dwukrotnie tańsze niż alternatywne zastosowanie technologii spawania metodą MIG (tablica 29). W przypadku zastosowania zgrzewarki FSW zbudowanej na bazie frezarki stacjonarnej, zamiast wskazanej dedykowanej zgrzewarki FSW, możliwe jest dalsze obniżenie kosztów technologii. Zgrzewanie metodą FSW nie wymaga bowiem stosowania profesjonalnych zgrzewarek FSW, a wybór odpowiedniego urządzenia do zgrzewania jest podyktowany potrzebami potencjalnego inwestora. Dodatkowo możliwa jest automatyzacja i robotyzacja procesu, a tym samym zwiększenie jakości złącza zgrzewanego i powtarzalności jego wykonywania z uwagi na brak procesu typowo ręcznego oraz zmniejszenie kosztów i energii elektrycznej potrzebnej do badania gotowego wyrobu.

Z ekonomicznego punktu widzenia, a także możliwości zastosowania zgrzewania FSW w przemyśle, istnieją dodatkowe zalety w porównaniu z konwencjonalnymi metodami łączenia. Dotyczy to możliwości zastosowania technologii do różnych konfiguracji



materiałowych oraz możliwości zastosowania do nich różnych geometrii narzędzi. Daje to możliwość zgrzewania blach o grubości nawet do 50 mm w jednym przejściu narzędzia, co w przypadku konwencjonalnych technologii spawania wymaga zastosowania spawania wielościegowego czyli poniesienia bardzo dużych nakładów finansowych i czasowych.

Biorąc pod uwagę wyniki obliczeń – w metodzie FSW największy udział w całości kosztów technologii mają koszty pracy oraz koszty energii – odpowiednio 37,5% oraz 40,5% (rys. 144). Z kolei w przypadku technologii spawania udział ten wynosi, dla kosztów pracy i kosztów energii odpowiednio 52,5% i 35%. Ponad połowa całości kosztów stanowią więc, w przypadku technologii spawania metodą MIG, ww. koszty pracy (rys. 145). Dość znaczącą różnicę w całkowitych kosztach produkcji wskazano także dla kosztu urządzenia do zgrzewania FSW oraz spawania metodą MIG. W przypadku spawania udział ten wynosi zaledwie 3% (rys. 145), z kolei w przypadku technologii FSW udział ten to ponad 20% (rys. 144). Pozostałe koszty, takie jak koszt gazu osłonowego, koszt materiału dodatkowego – w przypadku spawania metodą MIG oraz koszt narzędzia w przypadku technologii FSW stanowią już niewielki udział w całości kosztów i są zależne od danej technologii spajania.

Biorąc pod uwagę powyższe obliczenia dla technologii zgrzewania FSW w dwóch wariantach oraz technologii spawania metodą MIG – zgrzewanie FSW wykazuje ogromną wartość dodaną, mimo iż w niektórych przypadkach początkowy koszt inwestycji w urządzenie jest znacząco wyższy aniżeli koszt zakupu spawarki. Jak jednak wskazują wyniki badań zawarte w niniejszej pracy uzasadnione staje się stwierdzenie, że technologia FSW w wielu obszarach może zastąpić tradycyjnie stosowane metody spawania łukowego.

## **12.2. Wymagania technologiczne dotyczące stosowania technologii FSW w warunkach produkcyjnych**

Wyniki badań właściwości złączy FSW ze stopu aluminium EN AW-6082 są istotnym aspektem w obszarze technologii, a ich znajomość umożliwia wdrożenie jej w warunkach produkcyjnych głównie przemysłu lotniczego, kolejowego oraz motoryzacyjnego. Opracowanie takiej technologii zgrzewania, poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych warunków procesu zgrzewania w tym prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania pozwala na wykonywanie złączy doczołowych ze stopu aluminium przerobionego plastycznie (np. EN AW-6082) o określonych właściwościach użytkowych złączy, w tym przede wszystkim właściwości wytrzymałościowych oraz odporności na korozję.

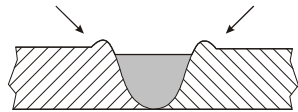
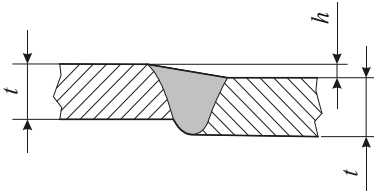
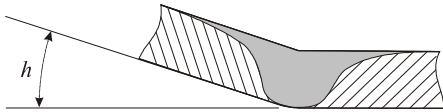
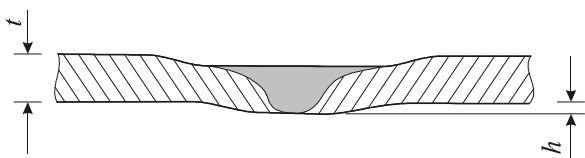
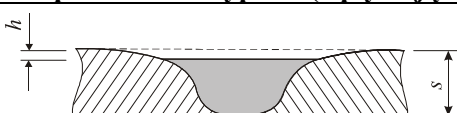
Na podstawie dotychczasowych badań własnych, doświadczeń we współpracy z przemysłem oraz informacji zawartych w normach PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57] oraz

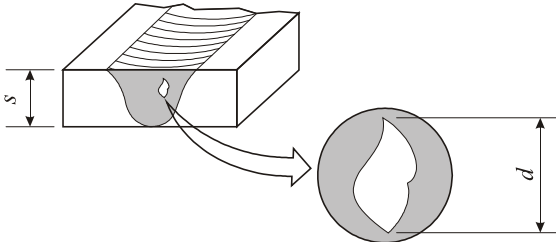
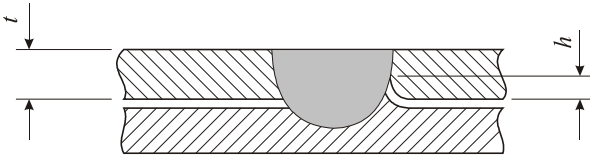
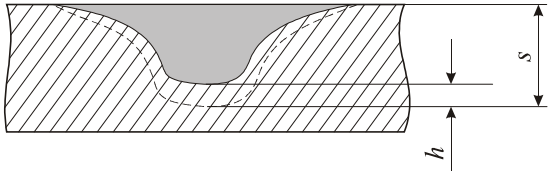
PN-EN ISO 25239-4:2021-01 [106], określono wymagania technologiczne łączenia konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 za pomocą technologii FSW. Do wymagań koniecznych do wdrożenia technologii FSW w warunkach produkcyjnych należy zaliczyć:

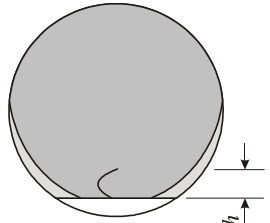
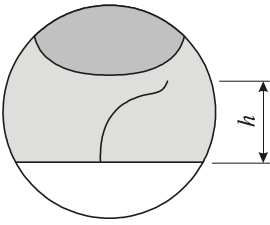
- dostępność doświadczonego personelu spawalniczego do planowania, wykonywania oraz nadzorowania prac związanych ze zgrzewaniem FSW,
- dostępność kompetentnego personelu do planowania, wykonywania i nadzorowania czynności kontrolnych podczas produkcji, zgodnie z określonymi wymaganiami,
- dostępność personelu wykonującego badania nieniszczące złączy (w tym badania wizualne oraz do wyboru badania radiograficzne, penetracyjne, ultradźwiękowe),
- dostępność personelu badań niszczących złącza (w tym do wyboru próba rozciągania, próba na zginanie, badania twardości, badania przełomu, badania geometrii złącza np. w zakresie kształtu wypływk, badania metalograficzne),
- zapewnienie możliwości konserwacji sprzętu zgrzewalniczego (np. zgrzewarki, narzędzia FSW, systemy sterowania, osprzęt mocujący zgrzewane elementy),
- zapewnienie dostępności aktualnych Instrukcji Technologicznych Zgrzewania (tzw. WPS) oraz innych dokumentów wymaganych przez normy branżowe,
- przeprowadzenie procedury kwalifikowania technologii zgrzewania poprzez opracowanie dokumentu WPQR.
- zapewnienie zgodności zgrzewanego materiału ze specyfikacją,
- zagwarantowanie możliwości przeprowadzenia wstępnej, międzysciegowej lub końcowej obróbki cieplnej złącza, jeśli taka będzie wymagana zgodnie z WPS,
- zapewnienie identyfikacji i identyfikowalności materiałów i urządzeń do zgrzewania,
- konieczność prowadzenia kontroli procesu przed, w trakcie i po zgrzewaniu,
- konieczność określenia sposobu postępowania z wadliwie wykonanym wyrobem,
- konieczność określania poziomu akceptacji złączy w odniesieniu do normy PN EN ISO 6520-1:2009 [107] oraz PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57].

W ramach określenia poziomu akceptacji złączy, w odniesieniu do normy PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [57], opracowano karty potencjalnie występujących niezgodności w procesie zgrzewania FSW (tablica 30). Wskazane niezgodności odniesiono także do ogólnej klasyfikacji geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach, które zawiera norma PN-EN ISO 6520-1:2009 [107].

Tablica 30. Karty niezgodności potencjalnie występujących w procesie FSW

| Odniesienie do normy PN-EN ISO 6520-1 :2009                                               | Oznaczenie niezgodności            | Uwagi                                                                                | Testowanie i badanie zgodnie z ISO 25239-4 | Poziom akceptacji <sup>a</sup>                                |                                                               |                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                                                           |                                    |                                                                                      |                                            | D                                                             | C                                                             | B                                                             |
| Niezgodności powierzchni typu I (nie wpływające na grubość przekroju złącza) <sup>d</sup> |                                    |                                                                                      |                                            |                                                               |                                                               |                                                               |
| —                                                                                         | Nadmierna wypływka                 |    | VT, ME                                     | — <sup>b</sup>                                                |                                                               |                                                               |
| 507                                                                                       | Niewspółosiowość liniowa           |    | VT, ME                                     | $h < 0,3t$ lub 4 mm, w zależności od tego które jest mniejsze | $h < 0,2t$ lub 2 mm, w zależności od tego które jest mniejsze | $h < 0,1t$ lub 1 mm, w zależności od tego które jest mniejsze |
| 508                                                                                       | Niewspółosiowość kątowa            |    | VT, ME                                     | Nie dotyczy                                                   | $h \leq 3^\circ$                                              | $h \leq 2^\circ$                                              |
| —                                                                                         | Deformacja obszaru zgrzewania      |   | VT, ME                                     | $h < 0,5t$ lub 4 mm, w zależności od tego które jest mniejsze | $h < 0,4t$ lub 2 mm, w zależności od tego które jest mniejsze | — <sup>b</sup>                                                |
| 514                                                                                       | Nieregularna powierzchnia zgrzeiny | Nadmierna chropowatość powierzchni                                                   | VT                                         | — <sup>b</sup>                                                |                                                               |                                                               |
| Niezgodności powierzchni typu II (wpływające na grubość przekroju złącza) <sup>d</sup>    |                                    |                                                                                      |                                            |                                                               |                                                               |                                                               |
| —                                                                                         | Niedopełnienie                     |  | VT, ME                                     | — <sup>b</sup>                                                | $h \leq 0,2 + 0,1s$                                           | $h \leq 0,1s$                                                 |
| —                                                                                         | Nieregularna powierzchnia          | Nadmierna chropowatość powierzchni                                                   | VT, ME                                     | Nie dotyczy                                                   |                                                               |                                                               |

| Odniesienie do normy PN-EN ISO 6520-1 :2009 | Oznaczenie niezgodności | Uwagi                                                                                                                                                                                                                   | Testowanie i badanie zgodnie z ISO 25239-4 | Poziom akceptacji <sup>a</sup> |                                                                                               |                                                                                               |
|---------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |                         |                                                                                                                                                                                                                         |                                            | D                              | C                                                                                             | B                                                                                             |
| Nie zgodności wewnętrzne                    |                         |                                                                                                                                                                                                                         |                                            |                                |                                                                                               |                                                                                               |
| 200                                         | Pustka                  | <div></div> <p>Dwie sąsiadujące pustki w odległości mniejszej niż „d” z mniejszej pustki należy traktować jako pojedyncza pustka.</p> | ME, RT, UT                                 | — <sup>b</sup>                 | $d \leq 0,2s$ lub 4 mm, w zależności od tego które jest mniejsze                              | Nie dotyczy                                                                                   |
| -                                           | Niezgodność hakowa      | <div></div>                                                                                                                           | ME                                         | — <sup>b</sup>                 | $h \leq 0,2 + 0,1t$<br>(brane pod uwagę tylko wtedy gdy zmniejsza przekrój poprzeczny złącza) | $h \leq 0,2 + 0,1t$<br>(brane pod uwagę tylko wtedy gdy zmniejsza przekrój poprzeczny złącza) |
| 402                                         | Brak przetopu           | <div></div> <p>penetracja mniejsza niż wymagana lub określona</p>                                                                   | ME, RT, UT                                 | — <sup>b</sup>                 | $h \leq 0,2s$                                                                                 | Nie dotyczy                                                                                   |
| 300                                         | Wtrącenie stałe         | <p>Wielokrotne wtrącenia stałe znalezione w jednym przekroju zostaną zsumowane: <math>l=l_1+l_2+...</math><br/>Nie należy brać pod uwagę wtrąceń mniejszych niż 0,2 mm</p>                                              | ME, RT, UT                                 | — <sup>b</sup>                 | $l \leq 0,2s$                                                                                 | Nie dotyczy                                                                                   |

| Odniesienie do normy PN-EN ISO 6520-1 :2009                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Oznaczenie niezgodności  | Uwagi                                                                                            | Testowanie i badanie zgodnie z ISO 25239-4 | Poziom akceptacji <sup>a</sup>                                                                              |                |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                          |                                                                                                  |                                            | D                                                                                                           | C              | B              |
| Niezgodności grani zgrzeiny                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | związana grań złącza     |                | ME, próba na zginanie                      | — <sup>b</sup>                                                                                              |                |                |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | niezwiązana grań złącza  |                | ME, próba na zginanie, PT, UT              | $h \leq 0,2t$<br>niezgodności krótkie i niesystematyczne                                                    | — <sup>b</sup> | Nie dotyczy    |
| Łączenie się niezgodności                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Niezgodności łączące się | Połączenie wielu niezgodności w jednym przekroju z wyłączeniem „Niezgodności powierzchni typu I” | - / -                                      | Suma wszystkich pojedynczych niezgodności zmniejszających grubość przekroju złącza nie powinna przekraczać: |                |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                          |                                                                                                  |                                            | 0,5s                                                                                                        | 0,3s           | — <sup>b</sup> |
| Gdzie:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• d - maksymalny wymiar przekroju poprzecznego pustki (mm), h - wysokość lub kąt niezgodności (mm lub °), s - nominalna grubość złącza (penetracja) (mm), t - nominalna grubość materiału rodzimego (mm). Jeżeli w tym samym złączu występuje więcej niż jedna grubość, odpowiednią grubość należy określić w specyfikacji projektowej.</li><li>• ME - Badania makroskopowe, VT – Badania wizualne, PT – Badania penetracyjne, RT – Badania radiograficzne, UT – Badania ultradźwiękowe</li></ul> |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| <sup>a</sup> Gdy jest to wymagane, badania nieniszczące należy przeprowadzać zgodnie z ISO 3452-1 (badanie penetracyjne), ISO 17636 (badanie radiograficzne) i ISO 17640 (badanie ultradźwiękowe). Testowanie i badanie innych niezgodności oraz ich poziomy akceptacji powinny być zgodne z odpowiednimi wymaganiami lub specyfikacją projektową.                                                                                                                                                                                      |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| <sup>b</sup> Poziomy akceptacji powinny mieścić się w określonym limicie odpowiednich wymagań lub specyfikacji projektu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |
| <sup>d</sup> Obowiązują wymagania projektowe.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                          |                                                                                                  |                                            |                                                                                                             |                |                |



### 12.3. Wytyczne technologiczne zgrzewania FSW w warunkach produkcyjnych

W zakresie prac wdrożeniowych określono wytyczne zgrzewania FSW bezpośrednio wpływające na przebieg procesu zgrzewania oraz na jakość powstałych złączy. Wytyczne te są związane z zapewnieniem prowadzenia zgrzewania FSW w sposób powtarzalny i dokładnie definiują sposób postępowania w zakresie zgrzewania konkretnego rozwiązania technologicznego. Wytyczne te zestawiono w postaci Wstępnej Instrukcji Technologicznej Zgrzewania (tzw. pWPS) dla technologii zgrzewania FSW (zgodnie z normą PN-EN ISO 25239-5:2021-01 [106]) płyt o wymiarach 500x110x6 mm ze stopu aluminium EN AW-6082 (Tablica 31). Wytyczne te w szczególności dotyczą następujących zagadnień:

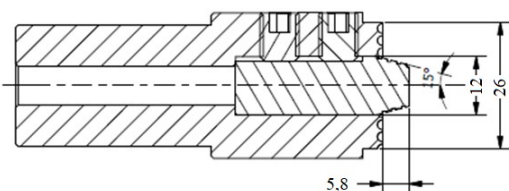
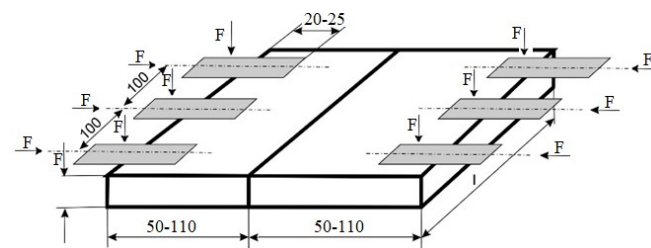
- odniesienie do właściwego dokumentu dotyczącego kwalifikowanej technologii zgrzewania (WPQR),
- określenie imienia i nazwiska operatora stanowiska do zgrzewania,
- określenie rodzaju, gatunku materiału podstawowego do zgrzewania oraz jego wymiarów,
- określenie rodzaju i wymiarów narzędzia do zgrzewania w tym wymiarów wieńca opory oraz trzpienia w tym rysunek narzędzia,
- identyfikacja urządzenia do zgrzewania,
- określenie konieczności stosowania dodatkowego oprzyrządowania mocującego zgrzewane elementy w tym rysunek oprzyrządowania,
- określenie sposobu przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do zgrzewania,
- określenie wszystkich niezbędnych parametrów zgrzewania FSW w tym trajektoria ruchu narzędzia, prędkość obrotowa narzędzia, prędkość zgrzewania, głębokość penetracji wieńca opory, głębokość penetracji trzpienia, kąt pochylenia narzędzia, czas zagłębiania narzędzia, czas zgrzewania, prędkość zgrzewania, czas wyjścia narzędzia z obszaru zgrzewania,
- określenie danych dotyczących postępowania ze złączem po zakończeniu zgrzewania,
- dane identyfikujące złącze FSW.

W ramach kwalifikowania technologii zgrzewania FSW opracowano przykładowy Protokół Kwalifikowania Technologii Zgrzewania – tzw. WPQR (z ang. Welding Procedure Qualification Record), który przedstawiono w tablicy 32.

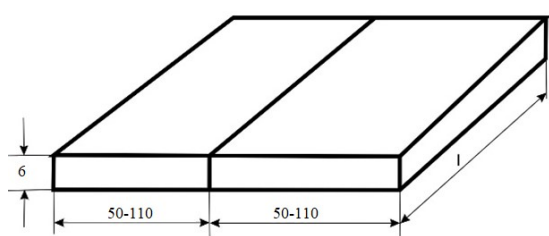
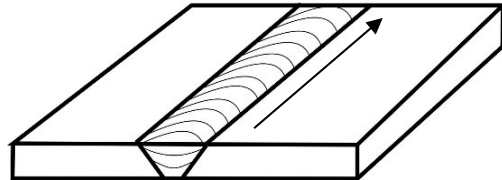
Tablica 31. Wstępna Instrukcja Technologiczna Zgrzewania FSW (pWPS) płyt o wymiarach 500x110x6 mm ze stopu aluminium EN AW-6082

|                                                                                |                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Nr pWPS producenta:                                                            | pWPS SR/01/2024                                                                    |
| Numer WPQR producenta:                                                         | -----                                                                              |
| Nazwisko operatora zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW): | Damian Miara                                                                       |
| Rodzaj materiału rodzimego, stan i norma(y) odniesienia:                       | Stop aluminium oznaczenie wg PN-EN 573-3:2019-12: EN AW-6082, Stan umocnienia T651 |
| Grubość materiału rodzimego (mm):                                              | 6,0 mm, długość l=500 mm                                                           |
| Identyfikacja zgrzewarki (model, numer seryjny i producent):                   | Zgrzewarka FSW zbudowana na bazie frezarki stacjonarnej FYF32 JU2 firmy JAFO.      |

#### Narzędzie do zgrzewania i układ mocowania:

|                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Narzędzie do zgrzewania: stożkowe typu Triflute<br/>Średnica wieńca opory (a) np. 26,0 mm<br/>Średnica trzpienia (b) np. 12,0 mm</p> <p>A - A</p>  | <p>Schemat mocowania zgrzewanych elementów</p>  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Projektowanie złącza:

|                                                                                                                          |                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Projekt i konfiguracja złącza</p>  | <p>Kolejność i kierunek zgrzewania</p>  <p>Jeden ścieg wzdłużny</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

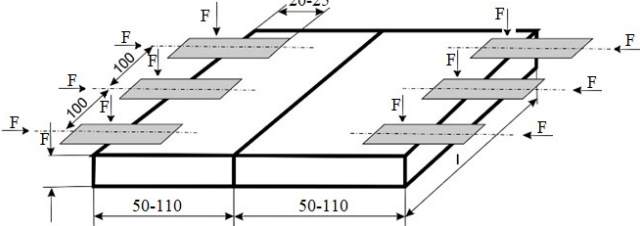
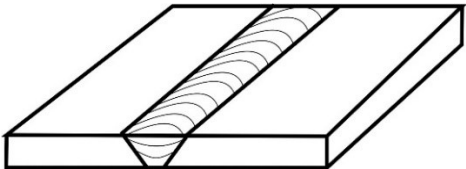
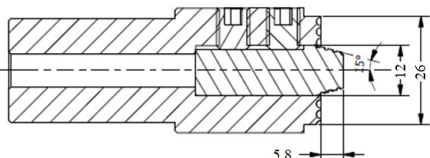
Sposoby przygotowania i czyszczenia złącza: frezowanie powierzchni płyt

#### Szczegóły dotyczące zgrzewania:

| Nr złącza                                         | Ruch narzędzia, prędkość obrotowa (obr/min) | Głębokość penetracji wieńca opory (kN lub mm)                                                                                   | Głębokość penetracji trzpienia (mm) | Kąt pochylenia narzędzia (°) | Czas zagłębiania narzędzia (s) | Czas zgrzewania (s) | Prędkość zgrzewania (mm/min) | Czas wyjścia narzędzia z obszaru zgrzewania (s) |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1.                                                | Wzdłużny, 900                               | 0,1 mm                                                                                                                          | 5,90                                | 1,5                          | 6                              | 33                  | 900                          | 2                                               |
| Pozycja zgrzewania:                               |                                             | Podolna PA                                                                                                                      |                                     |                              |                                |                     |                              |                                                 |
| Obróbka po zgrzewaniu:                            |                                             | Nie zaleca się PWHT (post welding heat treatment)<br>W szczególnych przypadkach zaleca się obróbkę T6 wg ustaleń z Zamawiającym |                                     |                              |                                |                     |                              |                                                 |
| Tolerancje po zgrzewaniu: długości/osiowa, kątowa |                                             | Nie określono                                                                                                                   |                                     |                              |                                |                     |                              |                                                 |
| Inne Informacje:                                  |                                             | Nie dotyczy                                                                                                                     |                                     |                              |                                |                     |                              |                                                 |
| Opracował: mgr inż. Damian Miara                  |                                             |                                                                                                                                 |                                     |                              | Akceptował/a: -----            |                     |                              |                                                 |
| Data i podpis.....                                |                                             |                                                                                                                                 |                                     |                              | Data i podpis.....             |                     |                              |                                                 |

Tablica 32. Przykładowy Protokół Kwalifikowania Technologii Zgrzewania – tzw. WPQR

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                 | NAZWA JEDNOSTKI EGZAMINUJĄCEJ /<br>NAME OF EXAMINING BODY                                             | Strona/stron:<br><b>1/3</b>                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                 | Protokół kwalifikowania technologii zgrzewania<br><b>Welding Procedure Qualification Record</b>       | WPQR                                                                                                      |
| Uznanie technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny - Świadectwo badania<br><i>Friction Stir Welding Procedure Qualification - Test Certificate</i>                                                                                                                                                              |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
| WPQR wytwórcy / <i>Manufacturer's WPQR</i> nr/No.: <b>IS/SR/01/24</b>                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
| 1. Wytwórca:<br><i>Manufacturer:</i><br><b>Sieć Badawcza Łukasiewicz –<br/>Górnośląski Instytut Technologiczny</b>                                                                                                                                                                                                                    |                                                 | 2. Jednostka egzaminująca:<br><i>Examining Body:</i><br>-                                             |                                                                                                           |
| 3. Adres:<br><i>Address:</i> -                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                 | 4. Nr rejestr. zamówienia<br><i>Reference No.:</i> -                                                  |                                                                                                           |
| 5. Nr pWPS Wytwórcy:<br><i>Manufacturer's pWPS No.:</i><br><b>pWPS SR/01/2024</b>                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                 | 6. Norma dotycząca badań:<br><i>Code/Testing Standard:</i><br><b>PN-EN ISO 25239-4:2021-01</b>        |                                                                                                           |
| 7. Data zgrzewania:<br><i>Date of Welding:</i><br><b>02.09.2024 r.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                 | 8. Imię i nazwisko operatora:<br><i>Friction stir welding operator's name:</i><br><b>Damian Miara</b> |                                                                                                           |
| Urządzenie do zgrzewania<br><i>Welding equipment / machine</i>                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
| 9. Rodzaj materiału zgrzewanego, norma:<br><i>Parent material type and reference standard:</i><br><b>PN-EN 573-3:2019-12</b>                                                                                                                                                                                                          |                                                 | 10. Grubości materiałów zgrzewanych:<br><i>Parent material thicknesses:</i><br><b>6,0 + 6,0 mm</b>    |                                                                                                           |
| 11. Rodzaj obróbki cieplnej po zgrzewaniu:<br><i>Post-weld heat treatment:</i><br><b>Nie dotyczy, not applicable</b>                                                                                                                                                                                                                  |                                                 | 12. Inne informacje:<br><i>Other information:</i><br><b>Nie dotyczy, not applicable</b>               |                                                                                                           |
| Urządzenie do zgrzewania<br><i>Welding equipment / machine</i>                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
| 13. Producent:<br><i>Manufacturer:</i><br><b>JAFO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                 | 14. Typ:<br><i>Type:</i><br><b>FYF32-JU2</b>                                                          |                                                                                                           |
| 15. Niniejszym stwierdza się, że złącza próbne przygotowano, zgrzewano i badano zgodnie z<br>wymaganiami normy wskazanych powyżej i uzyskano wynik pozytywny.<br><i>Certified that test weld was prepared, welded and tested satisfactorily in accordance with the<br/>requirements of the code testing standard indicated above.</i> |                                                 |                                                                                                       |                                                                                                           |
| 16. Miejscowość:<br><i>Location:</i><br>-                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 17. Data wydania:<br><i>Date of issue:</i><br>- | 18. Jednostka egzaminująca:<br><i>Examining body:</i><br>-                                            | 19. Egzaminator imię i nazwisko:<br><i>Examiner name:</i><br>Data i podpis:<br><i>Date and signature:</i> |

|                                                                                                 |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| NAZWA JEDNOSTKI EGZAMINUJĄCEJ /<br>NAME OF EXAMINIG BODY                                        |                                                                                                    | Strona/stron:<br>2/3                                                                       |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| Protokół kwalifikowania technologii zgrzewania<br><b>Welding Procedure Qualification Record</b> |                                                                                                    | WPQR                                                                                       |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| Protokół wykonania złącza próbnego<br>Record of Weld Test                                       |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| WPQR wytwórcy / Manufacturer's WPQR nr/No.: IS/ZR/01/24                                         |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| 11. Konfiguracja ułożenia materiałów do zgrzewania/ joint configuration:                        |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
|               |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| Schemat złącza/ Joint design:                                                                   |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
|               |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| Narzędzie do zgrzewania/ Welding tool:                                                          |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
|             |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| Szczegóły dotyczące zgrzewania<br>Welding details                                               |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |
| 12.<br>Nr<br>złącza<br>/no of<br>joint                                                          | 13.<br>Ruch narzędzia,<br>prędkość<br>obrotowa/ Tool<br>movement,<br>rotational speed<br>(obr/min) | 14.<br>Głębokość<br>penetracji<br>wieńca opory/<br>Shoulder<br>plunge depth<br>(kN lub mm) | 15.<br>Głębokość<br>penetracji<br>wieńca<br>opory/<br>Shoulder<br>plunge depth<br>(mm) | 16.<br>Kąt<br>pochylenia<br>narzędzia/<br>Tilt angle<br>(°)                                                     | 17.<br>Czas<br>zagłębiania<br>narzędzia/<br>Tool<br>insertion time<br>(s) | 18.<br>Czas<br>zgrzewania/<br>Welding<br>time (s) | 19. Prędkość<br>zgrzewania/<br>Welding<br>speed<br>(mm/min) |
| 1.                                                                                              | Wzdłużny,<br>900                                                                                   | 0,1                                                                                        | 5,90                                                                                   | 1,5                                                                                                             | 6                                                                         | 33                                                | 900                                                         |
| 20. Pozycja zgrzewania:<br>Welding position:<br>Nie dotyczy, not applicable                     |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        | 21. Rodzaj wstępnej obróbki cieplnej:<br>Pre-weld heat treatment:<br>Nie dotyczy, not applicable                |                                                                           |                                                   |                                                             |
| 22. Gaz osłonowy:<br>Shielding gas (°C):<br>Nie dotyczy, not applicable                         |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        | 23. Rodzaj wstępnej obróbki cieplnej po zgrzewaniu:<br>Post-weld heat treatment:<br>Nie dotyczy, not applicable |                                                                           |                                                   |                                                             |
| 24. Inne/ Others: Nie dotyczy/ not applicable                                                   |                                                                                                    |                                                                                            |                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                           |                                                   |                                                             |

|                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NAZWA JEDNOSTKI EGZAMINUJĄCEJ /<br>NAME OF EXAMINIG BODY                                                        |                                                                                                         | Strona/stron: 3/3                                                                      |                                |
| Protokół kwalifikowania technologii zgrzewania<br>Welding Procedure Qualification Record                        |                                                                                                         | WPQR                                                                                   |                                |
| Protokół wykonania złącza próbnego<br>Record of Weld Test                                                       |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| WPQR wytwórcy / Manufacturer's WPQR nr/No.: IS/ZR/01/24                                                         |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| Badania wizualne/ Visual testing                                                                                |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 25. Zaakceptowano TAK/NIE:<br>Acceptable YES/NO:<br><b>TAK, YES</b>                                             | 26. Rodzaj niezgodności:<br>Imperfections:<br><b>Niezgodności nie stwierdzono,<br/>No imperfections</b> | 27. Protokół nr:<br>Report No.:<br><b>VT/01/02/24</b>                                  |                                |
| Badania makroskopowe/ Macroscopic examination                                                                   |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 28. Zaakceptowano TAK/NIE:<br>Acceptable YES/NO:<br><b>TAK, YES</b>                                             | 29. Rodzaj niezgodności:<br>Imperfections:<br><b>Niezgodności nie stwierdzono,<br/>No imperfections</b> | 30. Protokół nr:<br>Report No.:<br><b>DT/SR/1/2024</b>                                 |                                |
| 31. Makrostruktura próbki Fot. Nr: 1. Macrostructure Fig No.: 1                                                 |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
|                              |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| Badania niszczące/ Destructive tests                                                                            |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 32. Badania wytrzymałości na rozciąganie wymagane, TAK/NIE:<br>Tensile tests required. YES/NO: <b>TAK, YES</b>  |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 33. L.p.<br>No.:                                                                                                | 34. Wytrzymałość na rozciąganie, Rm (MPa)<br>Rm (MPa)                                                   | 35. Lokalizacja zniszczenia<br>Fracture location                                       | 36. Wynik badania/ test result |
| 1.                                                                                                              | 242                                                                                                     | Zerwanie w złączu - po stronie natarcia/<br>Break in the joint - on the advancing side | pozytywny, acceptable          |
| 2.                                                                                                              | 239                                                                                                     | Zerwanie w złączu - po stronie natarcia/<br>Break in the joint - on the advancing side | pozytywny, acceptable          |
| 3.                                                                                                              | 237                                                                                                     | Zerwanie w złączu - po stronie natarcia/<br>Break in the joint - on the advancing side | pozytywny, acceptable          |
| 4.                                                                                                              | 240                                                                                                     | Zerwanie w złączu - po stronie natarcia/<br>Break in the joint - on the advancing side | pozytywny, acceptable          |
| 37. Inny wymagany rodzaj testu, TAK/NIE:<br>Other tests required, YES/NO:<br><b>Nie dotyczy, not applicable</b> |                                                                                                         | 38. Uwagi:<br>Remarks:<br><b>Nie dotyczy, not applicable</b>                           |                                |
| 39. Wynik badań/Test result:<br><b>Pozytywny, Acceptable</b>                                                    |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 40. Badania prowadzono w obecności egzaminatora/ Tests Carried out in the Presence of examiner: <b>TAK/YES</b>  |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 41. Jednostka egzaminująca i egzaminator/ Examining Body and Examiner: -                                        |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 42. Imię i nazwisko egzaminatora: Name of Examiner: -                                                           |                                                                                                         |                                                                                        |                                |
| 43. Data i podpis/ Date and Signature: -                                                                        |                                                                                                         |                                                                                        |                                |



Aspekty ekonomiczne stosowania technologii FSW, wymagania jakościowe dotyczące zgrzewania oraz wytyczne zgrzewania mogą posłużyć do opracowania konkretnego i innowacyjnego rozwiązania technologicznego, które będzie ekonomiczne i będzie zapewniało prowadzenie zgrzewania w sposób powtarzalny. Finalnie założenia te, określane jako założenia wdrożeniowe, posłużą do wdrożenia u klienta nowej technologii spajania, jaką jest technologia zgrzewania FSW, zamiast dotychczas stosowanej technologii spawania łukowego. Mogą także umożliwić udoskonalenie technologii FSW stosowanej już u klienta za pomocą wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań lub ulepszeń np. poprzez dobór oraz optymalizację parametrów zgrzewania FSW.

### 13. Wnioski

Przedstawione w pracy wyniki badań potwierdziły przyjętą tezę, że „o właściwościach złączy zgrzewanych tarciovo metodą FSW decydują zjawiska strukturalne podczas mieszania materiału w stanie stałym, co pozwala na otrzymanie złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 o wytrzymałości co najmniej 70% wytrzymałości materiału rodzimego i porównywalnej do materiału rodzimego odporności na korozję”. Umożliwia to zastosowanie tych złączy w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz kolejowym. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników potwierdzono zrealizowanie założonych celów pracy i sformułowano następujące wnioski:

- Opracowano kompleksową metodykę badań, pozwalającą na określenie wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082. Procedura ta obejmuje m.in. metodykę badań struktury złącza, która zakłada ocenę wizualną złączy FSW oraz ocenę struktury złącza zarówno jakościową jak i ilościową. Ocenę jakościową struktury złącza należy rozpocząć od badań makroskopowych w technice pola ciemnego przy powiększeniu 50x, na zglądzie trawionym wyciętym prostopadle do kierunku zgrzewania. Do oceny jakościowej mikrostruktury należy wykorzystać badania na mikroskopie świetlnym, w technice pola jasnego, a szczegółowe badania należy wykonać na skaningowym mikroskopie elektronowym w technice rejestracji elektronów wtórnych i wstecznie rozporoszonych. W celu identyfikacji faz zaleca się analizę XRD uzupełnioną analizą EBSD. Do oceny ilościowej struktury złączy, w tym opisu wydzieleń dobrym narzędziem jest tomografia elektronowa z wykorzystaniem techniki FIB-SEM. Metodyka ta pozwala na określenie ilości, wielkości i rozmieszczenia wydzieleń.

W celu oceny właściwości złączy FSW należy przeprowadzić badania właściwości mechanicznych, w tym badania wytrzymałości na rozciąganie, próby zginania, pomiary twardości. Jako kryterium oceny jakości złącza FSW zaleca się przyjęcie poziomu akceptacji zgodnie z normą PN-EN ISO 25239-5:2021-01 (w pracy przyjęto poziom akceptacji „B”).

- Struktura badanych złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 jest charakterystyczna dla metody zgrzewania FSW. W złączach można wyróżnić obszar materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła, strefę odkształconą termomechanicznie oraz strefę mieszania. Materiał rodzimy składa się z wydłużonych ziaren o średniej średnicy w zakresie  $10\div 100\text{ }\mu\text{m}$  z wydzieleniami faz. W strefach wpływu ciepła po stronie natarcia oraz po stronie spływu ujawniono obecność wydłużonych ziaren o średniej średnicy na poziomie ok.  $100\text{ }\mu\text{m}$ , podobnie jak w strefie odkształconej termomechanicznie, przy czym w strefie tej kierunek ułożenia ziaren jest zgodny z kierunkiem odkładania się materiału podczas zgrzewania. W strefie mieszania ujawniono równoosiowe i rozdrobnione ziarna o średniej średnicy ok.  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Struktura złącza w tym obszarze ujawniła obecność faz takich jak  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$  oraz  $\text{Al}_3\text{Mg}$ , co potwierdziły wyniki badań XRD oraz EBSD.
- Rozdrobnienie struktury złącza FSW w strefie mieszania było związane z dużym odkształceniem materiału wskutek oddziaływania narzędzia w podwyższonej temperaturze. Stopień odkształcenia jest zależny od cyklu cieplnego zgrzewania oraz stopnia wymieszania mas łączonych materiałów, na co mają wpływ główne parametry zgrzewania FSW tj. prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania. Im większa prędkość obrotowa tym większe odkształcenie struktury złącza. Natomiast wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania struktura złącza jest mniej rozdrobniona i mogą pojawiać się niezgodności budowy złącza takie jak np. niezwiązana grań złącza.
- Opracowano model numeryczny złącza FSW, który został zwalidowany. Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono zgodność rzeczywistych pomiarów temperatury oraz odkształceń z wynikami symulacji. Stwierdzono, że najlepsze parametry do zgrzewania FSW stopu aluminium EN AW-6082, przyjmując jako kryterium rozkład temperatury oraz najmniejszy poziom odkształceń, to prędkość obrotowa  $V_o=900\text{ obr/min}$  oraz prędkość zgrzewania  $V_z=900\text{ mm/min}$ .
- Wytrzymałość złączy FSW na rozciąganie jest zależna od głównych parametrów procesu FSW tj. zarówno od prędkości obrotowej narzędzia jak i prędkości zgrzewania.

Stwierdzono, że przy prędkości obrotowej 900 obr/min i prędkości zgrzewania 450 mm/min wytrzymałość złączy jest na poziomie 230 MPa, natomiast przy zgrzewaniu z prędkością 900 mm/min wytrzymałość złącza jest na poziomie 239 MPa. Uzyskane wytrzymałości są na poziomie odpowiednio 70% oraz 73% wytrzymałości materiału rodzimego stopu aluminium EN AW-6082. Potwierdza to, że złącza FSW spełniają kryterium wytrzymałości na poziomie powyżej 70% wytrzymałości materiału rodzimego.

- Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia do 1800 obr/min, przy prędkości zgrzewania 450 mm/min obniża wytrzymałość powstałych złączy do 63% wytrzymałości materiału rodzimego. Przy tak wysokiej prędkości obrotowej narzędzia materiał nie jest wystarczająco dobrze wymieszany, co wpłynęło na obniżenie wytrzymałości złącza.
- Stwierdzono, że tylko złącza wykonane z prędkością zgrzewania 900 mm/min spełniają założone kryteria badania w próbie zginania tj. osiągnięcie kąta zgięcia na poziomie min. 90° oraz brak pęknięć na powierzchni rozciąganej. Przy niższej prędkości zgrzewania tj. 450 mm/min obserwowano pęknięcia w strefie wpływu ciepła oraz w osi złącza. Może to być powiązane z brakiem łagodnego przejścia materiału pomiędzy strefą wpływu ciepła, a strefą mieszania.
- Złącza FSW należy wykonywać z zastosowaniem prędkości obrotowej narzędzia  $V_o=900$  obr/min oraz prędkości zgrzewania  $V_z=900$  mm/min, co zapewnia uzyskanie poziomu akceptacji „B” zgodnie z normą PN-EN ISO 25239-5:2021-01. Opracowane wytyczne i wymagania technologiczne są podstawą do kwalifikowania technologii zgrzewania FSW, co umożliwia wdrożenie technologii FSW np. do produkcji obudów silników elektrycznych w przemyśle motoryzacyjnym.
- Właściwości użytkowe złączy FSW w warunkach korozji wysokotemperaturowej, w atmosferze symulowanych spalin sinika diesla w temperaturze 210 i 300 °C, są na takim samym poziomie jak dla materiału rodzimego. Zarówno materiał rodzimy jak i złącza FSW pokrywają się warstwą  $Al_2O_3$ , a różnica masy próbek nie przekraczała 0,07%. Podobne wyniki uzyskano dla badania odporności na korozję w wilgotnej atmosferze zawierającej związki siarki. Złącza pokryły się również warstwą  $Al_2O_3$ , w której obserwowano dodatkowo fazy wzbogacone w magnez i siarkę. W przypadku korozji w mgie solnej, tj. w atmosferze typowej dla warunków zimowych na drogach, stwierdzono podobny poziom odporności na korozję złączy w stosunku do materiału

rodzimego. Zmiana masy próbek po 30 cyklach ekspozycji nie przekraczała 3,5 g/m<sup>2</sup>. Zatem, złącza FSW charakteryzują się podobną odpornością na korozję jak materiał rodzimy i mogą być stosowane w konstrukcjach ze stopu aluminium EN AW-6082.

- Zastosowanie metody zgrzewania FSW do wykonywania elementów konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 zmniejsza koszty produkcji seryjnej o ponad 50% w stosunku do metody spawania łukowego metodą MIG, co potwierdziła przeprowadzona analiza ekonomiczna. Dalsza redukcja kosztów produkcji jest możliwa poprzez zastosowanie do zgrzewania stacjonarnych frezarek (wyposażonych tylko w dedykowane głowice do zgrzewania FSW) lub stanowisk zrobotyzowanych znacznie przyspieszających proces zgrzewania.

#### 14. Literatura

- [1]. Thakur N., Harvinder L.: Experimental Comparison of Tig and Friction Stir Welding Processes for Aluminium 6063-T6, International Journal on Emerging Technologies, nr 6 (2), str. 189÷194. 2015 r.
- [2]. Singh G., Kang A. S., Singh K., Singh J.: Experimental comparison of friction stir welding process and TIG welding process for 6082-T6 Aluminium alloy, Materials Today Proceedings, nr 4 (2), str. 3590÷3600. 2017 r.
- [3]. Kumara R., Dilthey U., Dwivedi D.K., Ghosh P.K.: Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding, Materials & Design, nr 30 (2), str. 306÷313. 2009 r.
- [4]. Ruan Y., Qiu X.M., Gong W.B., Sun D.Q., Li Y.P.: Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO<sub>2</sub> flux, Materials & Design, nr 35, str. 20÷24. 2012 r.
- [5]. Mroczka K.: Charakterystyka mikrostruktury i właściwości zgrzein FSW wybranych stopów aluminium, Wydawnictwo naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie, Kraków 2014 r.
- [6]. Bhadeshia H.K.D.H.: Friction Stir Welding. Cambridge, 2002 r.
- [7]. Muralimohan C.H., Haribabu S., Hariprasada Reddy Y., Muthupandi V., Sivaprasad K.: Joining of AlSi 1040 Steel to 6082-T6 Aluminium Alloy by Friction Welding, Journal of Advances in Mechanical Engineering and Science, nr 1 (1), str. 57÷64. 2015 r.

- [8]. Zhu Z., Gou G., Zhang Z., Ma C., Gao W.: Evaluate welding residual of 6082-T6 aluminum alloy welded plate by using ultrasonic method, *International Journal of Modern Physics*, nr 33 (01n03), str. 253÷261, 2019 r.
- [9]. Pereira A.M., Ferreira J.M., Loureiro A.J., Costa D.M., Bártolo P.J., Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy, *Materials & Design*, nr 31 (5), str. 2454÷2463, 2010 r.
- [10]. Praca zbiorowa pod redakcją Jana Pilarczyka: Poradnik Inżyniera, Spawalnictwo Tom 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2007 r.
- [11]. Scialpi A., Filipp L.A.C. D., Cavaliere P.: Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, *Materials & Design*, nr 28 (4), str. 1124÷1129, 2007 r.
- [12]. Babu G.R, Murti K. G. K., Ranga Janardhana G.R: An experimental study on the effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA 6082-T6 friction stir welded butt joints, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, nr 3 (5), str. 68÷74. 2008 r.
- [13]. Verma S., Meenu J., Misra P., Study on temperature distribution during Friction Stir Welding of 6082 aluminum alloy, *Materials Today: proceedings*, nr 4 (2), str. 1350÷1356, 2017 r.
- [14]. Jacquin D., Guillemot G.: A review of microstructural changes occurring during FSW in aluminium alloys and their modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, nr 288 (2021), str. 1÷46, 2020 r.
- [15]. Adamowski J., Szkodo M.: Friction Stir Welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Nr 20 (1-2). Str. 403÷406. 2007 r.
- [16]. Materiały informacyjne firm KIA, FORD, PSA, Meiller Polska.
- [17]. Lohwasser D., Chen Z.: Opracowanie pt. Friction Stir Welding - From Basics to Applications. Wydawnictwo Woodhead Publishing, 2010 r.
- [18]. Thomas W.M.: Friction stir butt welding. GB patent nr 9125978, 6.12.1991. Międzynarodowe zgłoszenie patentowe nr PCT/GB92/02203, 6.12.1991 r.
- [19]. Svensson L.E., Karlsson L., Larsson H., Karlsson B., Fazzini M., Arlsson J.: Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloys with special reference to AA 5083 and AA 6082, *Science and Technology of Welding and Joining*, nr 5 (5), str. 285÷296, 2013 r.



- [20]. Podrżaj P., Jerman B., Klobčar D.: Welding defects at friction stir welding, *Metalurgija*, nr 54 (2), str. 387÷389, 2015 r.
- [21]. Krasnowski K., Sedek P., Łomozik M., Pietras A.: Impact of selected FSW process parameters on mechanical properties of 6082-t6 aluminium alloy butt joints, *Metallurgy and Materials*, nr 56, str. 965÷973. 2011 r.
- [22]. Mroczka K., Pietras A., FSW characterization of 6082 aluminium alloys sheets., *Archives of Materials Science and Engineering*, nr 40 (2), str. 104÷109. 2009 r.
- [23]. Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T., Nakata K.: Effect of welding parameters on microstructure in the stir zone of FSW joints of aluminum die casting alloy, *Materials Letters*, nr 60, str. 3830÷3837, 2006 r.
- [24]. Thomas W.M., Nicholas E.D.: Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, nr 18 (4-6), str. 269÷273. 1997 r.
- [25]. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J.: Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *International Materials Reviews*, nr 54 (2), str. 49÷93. 2009 r.
- [26]. Kalembe I., Dymek S.: Microstructure and properties of friction stir welded aluminium alloys, *Welding International*, nr 30 (1), str. 38÷42, 2015 r.
- [27]. Blondeau R.: Opracowanie: Metallurgy and Mechanics of Welding. Wydawnictwo ISTE Ltd oraz LAVOISIER. 2008 r.
- [28]. Mishra R.S., Mahoney M.W.: Opracowanie pt. Friction Stir Welding and Processing, Center for Friction Stir Processing, University of Missouri, Rockwell Scientific Company, 2007 r.
- [29]. Lomolino S., Tovo R., Santos J.: On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys, *International Journal of Fatigue*, nr 27 (3), str. 305÷316, 2005 r.
- [30]. Das U., Toppo V.: Effect of tool rotational speed on temperature and impact strength of Friction Stir Welded joint of two dissimilar aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings*, nr 5 (2), str. 6170÷6175, 2018 r.
- [31]. Sashanka J.S., Sampatha P., Krishna P.S, Sagara R., Venukumara S., Muthukumaran S.: Effects of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of 6063 aluminium alloy, *Materials Today: Proceedings*, nr 5 (2), str. 8348÷8353. 2018 r.
- [32]. Omesh R., Dolas D.: Optimization of Process Parameters of Friction Stir Welding—Critical Review, *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, nr 3 (1), str. 235÷239. 2016 r.

- [33]. Miara D., Matusiak J., Pietrzak J., Bryk R.: Opracowanie procesu zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny prowadzonego z dużymi prędkościami zgrzewania, przydatnego w zastosowaniu produkcyjnym, Praca badawcza nr ST-31/20/ZR (Bb-132). Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. 2020 r.
- [34]. Bakshi D., Prakash C., Singh S., Kumar R., Ashri D.: A Detailed Study on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing, International Journal of Industrial Engineering & Technology, nr 4 (1), str. 1-22, 2014 r.
- [35]. Mashinini P.M.: Process window for friction stir welding of 3 mm Titanium (Ti-6Al-4V), M. Tech Dissertation, Faculty of Engineering Built Environment and Information Tech., Nelson Mandela Met. University, Port Elizabeth, 2010.
- [36]. Luty G., Gałaczyński T.: Technologie łączenia struktur lotniczych, cz. 2, Zgrzewanie tarcowe liniowe z przemieszaniem (FSW), Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, nr 11 (134), 2018 r.
- [37]. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J.: Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. International Materials Reviews, nr 54 (2), str. 49÷93. 2009 r.
- [38]. Miara D., Matusiak J., Węglowska A., Pietrzak J., Bryk R.: Rozpoznawcze badania odporności na korozję złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 zgrzewanych tarcowo metodą FSW, Praca badawcza nr ST-31/21/ZR (Bb-134). Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. 2021 r.
- [39]. Salih O.S., Neate N., Ou H., Sun W.: Influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical characterisations of friction stir welded Al-Mg-Si alloy, Journal of Materials Processing Technology, nr 275 (2020), str. 1÷14, 2020 r.
- [40]. Krishnan K.N.: On the formation of onion rings in friction stir welds; Material Science Engineering, nr 327, str. 246÷251. 2002 r.
- [41]. Biallas G., Braun R., Dalle Donne C., Staniek G., Kaysser W.A.: Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T3; 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, USA, Kanada, 1999 r.
- [42]. Aditya S.K., Majumdar M.D.N.: Characterization And Study of Friction Stir Welding of AA6101 Aluminum Alloy, International Journal of Engineering Research and Application, nr 6 (5), str. 57÷60, 2016 r.
- [43]. Aditya S.K., Datta A.: Analysis of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys and Optimization of Welding Parameters for Maximum Tensile Strength, nr 5 (5), str. 36÷43, 2015 r.

- [44]. Tiwari S.K., Shukla D.K., Chandra R.: Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Review, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, nr 7 (12), str. 2403÷2408. 2013 r.
- [45]. Pietras A., Zadroga L.: Rozwój metody zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania; *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 5 (2003), str. 148÷156, 2003 r.
- [46]. Pietras A., Rams B., Węglowska A.: Zgrzewanie tarcowe metodą FSW stopów aluminium serii 6000, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, nr 27, str. 93÷99, 2007 r.
- [47]. Węglowski M.St., Pietras A., Bogucki R., Węglowska A.: Własności złączy FSW ze stopów aluminium; *Rudy i Metale Nieżelazne*, nr 53 (11), str. 739÷742. 2008 r.
- [48]. Sato Y., Urata M., Kokawa H.: Parameters controlling microstructure and hardness during friction stir welding of precipitation hardenable aluminum alloy 6063, *Metallurgical and Materials Transactions A*, nr 33 (3), str. 625÷631. 2002 r.
- [49]. Radisavljevic I., Zivkovic Z., Radovic N., Grabulov V.: Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, nr 23, str. 3525÷3539. 2013 r.
- [50]. D17.3/D17.3:2016. Opracowanie pt. Specification for friction stir welding of aluminum alloys for aerospace applications, *American Welding Society*, 2016 r.
- [51]. Tasić P., Hajro I., Hodžić D., Dobraš D.: Energy efficient welding technology: FSW, *Materiały konferencyjne: I International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology*, University of Banja Luka, 2013 r.
- [52]. Akinlabi E.T., Akinlabi A.: Friction Stir Welding Process: A Green Technology, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, nr 71, str. 1536÷1538. 2012 r.
- [53]. AbuShanab W. S., Moustafa E. B.: Detection of Friction Stir Welding Defects of AA1060 Aluminum Alloy Using Specific Damping Capacity, *Materials (Basel)*, nr 11 (12), str. 1÷14, 2018 r.
- [54]. Kah P., Rajan R., Martikainen J., Suoranta R.: Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, nr 10 (26), str. 1÷10, 2015 r.
- [55]. Dialami N., Cervera M., Chiument M.: Defect formation and material flow in Friction Stir Welding, *European Journal of Mechanics / A Solids*, nr 80, str. 1÷13, 2019 r.
- [56]. Santos T., Vilaça P., Quintino L.: Developments in ndt for detecting imperfections in friction stir welds in aluminium alloys, *Welding in the World*, nr 52, str. 30÷37, 2008 r.

- [57]. PN-EN ISO 25239-5:2021-01. Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału - Aluminium - Część 5: Wymagania dotyczące jakości i kontroli.
- [58]. Miara D., Matusiak J., Pietras A., Badania wpływu warunków zgrzewania na strukturę i własności złączy ze stopu aluminium przerabianego plastycznie przy wysokowydajnym zgrzewaniu metodą FSW, Praca badawcza nr ST-366/17/ZR (Bb-125). Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. 2018 r.
- [59]. Gupta A. K., Lloyd D. J., Court S. A.: Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si. *Materials Science and Engineering: A*, nr 316 (1-2), str. 11÷17, 2001.
- [60]. Gupta A. K., Lloyd D. J., Court S. A.: Precipitation hardening processes in Al-0.4% Mg-1.3% Si-0.25% Fe aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, nr 301 (2), str. 140÷146, 2001 r.
- [61]. Edwards G. A., Stiller K., Dunlop G. L., Couper M. J.: The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*, nr 46 (11), str. 3893÷3904. 1998 r.
- [62]. Siddiqui R. A., Abdullah H. A., Al-Belushi K. R.: Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, nr 102, str. 234÷240, 2000 r.
- [63]. Ravi C., Wolverton C.: First-principles study of crystal structure and stability of Al–Mg–Si–(Cu) precipitates. *Acta Materialia*, nr 52, str. 4213÷4227, 2004 r.
- [64]. Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J., Wierzbńska M., Nowotnik A., Procesy wydzielania cząstek faz umacniających z przesyconych stopów AlMgSi. *Inżynieria Materiałowa*, nr 6 (208), str. 376÷380. 2015 r.
- [65]. Polmear I.: *Light Alloys - From traditional Alloys to Nanocrystals*; Butterworth-Heinenmann, Wydawnictwo Linacre House, Oxford, *Aeronautical Journal - New Series*, nr 110 (1108), str. 394÷395, 2006 r.
- [66]. PN-EN 573-3+A1:2022-11 - wersja angielska. Aluminium i stopy aluminium -- Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie -- Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów
- [67]. Jakobsen J.V.: *Microstructure and Mechanical Properties of Welded AA6082 Aluminium Alloys*, Praca badawcza Norweskiego Uniwersytetu Nauki i Technologii (NTNU). Trondheim, 2016 r.
- [68]. Naumov A., Morozova J., Isupov F., Golubev I.: Temperature Influence on Microstructure and Properties Evolution of Friction Stir Welded Al-Mg-Si Alloy, *Key Engineering Materials*, nr 822, str. 122÷128. 2019 r.

- [69]. Omar A., Abdel-Aziz K., E;-Shennawy M.: Metallurgical and Mechanical Properties of Heat Treatable Aluminum Alloy AA6082 Welds, *International Journal of Applied Engineering Research*, nr 12 (11), str. 2832÷2839. 2017 r.
- [70]. Msomi V., Mabuwa S.: Analysis of material positioning towards microstructure of the friction stir processed AA1050/AA6082 dissimilar joint, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, nr 1 (2020), str. 1÷9. 2020 r.
- [71]. Tamadon A., Pons D.J., Sued K., Clucas D.: Thermomechanical Grain Refinement in AA6082-T6 Thin Plates under Bobbin Friction Stir Welding. *Metals*. Nr 8 (375). Str. 1÷20. 2018 r.
- [72]. Muribwathoho O., Msomi V., Mabuwa S., Motshwanedi S.S.: Impact of multi-pass friction stir processing on microhardness of AA1050/AA6082 dissimilar joints, *Materials Today: Proceedings*, nr 46 (1), str. 651÷657, 2021 r.
- [73]. Zhouli X., Huijuan Ma., Ning Z., Zhili H.: Investigation on Compressive Formability and Microstructure Evolution of 6082-T6 Aluminum Alloy, *Metals*, nr 10, str. 1÷11. 2020 r.
- [74]. Bilmont B.: Opracowanie Europejskiego Stowarzyszenia ds. Aluminium AISBL pt. Aluminium in commercial Vehicles. 2011 r.
- [75]. Tiago M., Martins R. F., Neves L. L.: Failure analysis of fuel tanks of a lightweight ship, *Engineering Failure Analysis*, nr 35, str. 272÷285. 2013 r.
- [76]. Strona internetowa: <https://aluminiuminsider.com>, 2020 r.
- [77]. Hai Xu Z., Ding C. R., Shan D. B.: Application of Electric Field during the Heat Treatment: The Device Development and the Effect on Mechanical Properties of AA 6082, *Materials Science Forum*, nr 950, str. 75÷79, 2019 r.
- [78]. Urbańczyk R., Peinecke K., Felderhoff M., Hauschild K., Kersten W., Peil S., Bathen D.: Aluminium alloy based hydrogen storage tank operated with sodium aluminium hexahydride  $\text{Na}_3\text{AlH}_6$ , *International Journal of Hydrogen Energy*, nr 39, str. 17118÷17128. 2014 r.
- [79]. Strona internetowa: <https://silveryachts.com>, 2019 r.
- [80]. Zheng K., Politis D.J., Wang L., Lin J., *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. Nr 1 (2018). Str. 55÷80. 2018 r.
- [81]. Muhayat N., Putra B. P., Triyono B.: Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Spot Welded 6082-T6 Aluminium Alloy Joint, *MATEC Web of Conferences*, IIW, nr 269. 2019 r.



- [82]. Naumov A., Morozova I., Rylkov E., Obrosof A., Isupov F., Michailov V., Rudskoy A.: Metallurgical and Mechanical Characterization of High-Speed Friction StirWelded AA 6082-T6 Aluminum Alloy, *Materials*, nr 12, str. 1÷16. 2019 r.
- [83]. Mazurkiewicz K., Bober M.: Wpływ kształtu narzędzia w metodzie zgrzewania FSW stopu Al na jakość zgrzein, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 90 (8), str. 13÷17, 2018 r.
- [84]. PN-EN ISO 4136:2022-12 - wersja angielska. Badania niszczące złączy spawanych metali -- Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [85]. PN-EN ISO 14271:2017-11 - wersja angielska. Zgrzewanie rezystancyjne -- Badanie twardości metodą Vickersa (przy małym obciążeniu i mikrotwardości) zgrzein rezystancyjnych punktowych, garbowych i liniowych.
- [86]. PN-EN 485-2+A1:2018-12 - wersja angielska. Aluminium i stopy aluminium -- Blachy, taśmy i płyty -- Część 2: Własności mechaniczne
- [87]. Liu J., Wang L.L., Lee J., Chen R., El-Fakira O., Chen L., Lin J., Dean T.A.: Size-dependent mechanical properties in AA6082 tailorwelded specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, nr 224 (2015), str. 1÷12, 2015 r.
- [88]. Miara D., Matusiak J., Kubik K., Pietrzak J., Bryk R.: Badanie i analiza struktur oraz analiza numeryczna naprężeń i odkształceń złącza FSW ze stopu aluminium EN AW-6082, Praca badawcza nr ST-31/22/ZR (Bb-135). Ministerstwo Edukacji i Nauki. 2022 r.
- [89]. Miara D., Matusiak J., Kubik K., Węglowska A., Pietrzak J., Bryk R.: Wpływ przygotowania powierzchni blach z wybranych stopów aluminium na wytrzymałość złączy klejowych oraz analiza struktury złączy FSW ze stopu EN AW-6082, Praca badawcza nr S0-B016/2023. Ministerstwo Edukacji i Nauki. 2023 r.
- [90]. PN-EN ISO 17639:2022-07 – wersja angielska. Badania niszczące spawanych złączy metali -- Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
- [91]. Lacki P., Derlatka A., Zastosowanie technologii FSW w strukturach aluminiowych, *Obróbka Plastyczna Metali*, nr 24 (3), str. 205÷218, 2013 r.
- [92]. Brown E.M., Gallagher P.K., *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Recent Advances, Techniques and Applications Vol. 6*, Wydawnictwo Elsevier Pub Co, 2018 r.
- [93]. PN-EN ISO 5173:2023-06 - wersja angielska. Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -- Badanie na zginanie.
- [94]. PN-EN ISO 9015-2:2016-04 - wersja angielska. Badania niszczące złączy spawanych metali -- Badanie twardości -- Część 2: Badanie mikrotwardości złączy spawanych łukowo.

- [95]. Reşitoğlu I. A.: The pollutant emissions from diesel engine vehicles and exhaust aftertreatment systems, *Clean Technologies and Environmental Policy*, nr 1 (17), str. 15-27, 2015 r.
- [96]. Aakko-Saksa P., Roslund P., Development and validation of comprehensive emission measurement methods for alternative fuels at VTT. VTT Technical Research Centre of Finland, Raport z badań nr VTT-R-04494-16. 2016 r.
- [97]. PN-EN ISO 6988:2000. Powłoki metalowe i inne nieorganiczne -- Próba z dwutlenkiem siarki z ogólną kondensacją wilgoci.
- [98]. PN-EN ISO 11846:2011. Korozja metali i stopów -- Określanie odporności na korozję międzykrystaliczną przesyconych stopów aluminium.
- [99]. PN-EN ISO 9227:2017-06. Badania korozyjne w sztucznych atmosferach -- Badania w rozpylonej solance.
- [100]. Vargel C., Corrosion of aluminium, Wydawnictwo Elsevier, Edycja nr 2, 2020 r.
- [101]. Joshi A., Gope A., Gope P.C., Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth behaviour of friction stir welded 7075-T651 Al alloy, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, nr 123 (2023) 103714, str. 1÷15, 2023 r.
- [102]. Bevilacqua M., Ciarapica F.E., D'Orazio A., Forcellese A., Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets, *Procedia CIRP*, nr 62 (2017), str. 529÷534. 2017 r.
- [103]. Tasic P., Pandzic A., Hajro I., Economical aspects of industrial FSW application. Materiały konferencyjne, 37 International Conference „NEW TECHNOLOGIES NT-2016" Development and Application, str. 128÷134. 2016 r.
- [104]. Zhang Z., Li W., Li J., Estimating Friction Coefficient and Fraction of Sliding in Friction Stir Welding, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, nr 7 (3), str. 192÷195. 2014 r.
- [105]. Mononen J., Siren M., Hänninen H., Cost comparison of FSW and MIG welded aluminium panels, *Welding in The World*, nr 11 (12), str. 31÷35. 2003 r.
- [106]. PN-EN ISO 25239-4:2021-01. Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału - Aluminium - Część 4: Specyfikacja i kwalifikowanie technologii zgrzewania.
- [107]. PN-EN ISO 6520-1:2009. Spawanie i procesy pokrewne -- Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach -- Część 1: Spawanie.
- [108]. Rajan R., Kah P., Väst H., Mvola B., Martikainen J., Trends in Aluminium Alloy Development and Their Joining Methods, *Reviews on Advanced Materials Science*, nr 44 (4), str. 383÷397. 2016 r.

- [109]. Sivasankaran S., Aluminium alloys – recent trends in processing, characterization, mechanical behavior and applications, Intech, Open Access book publisher, 2017 r.
- [110]. Opracowanie pt. Global Aluminum Market 2023-2028. Triton Market Research, 2022 r.
- [111]. Chayoukhi S., Bouaziz Z., Zghal A., Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model, Journal of Materials Processing Technology, nr 199 (1), str. 402÷411. 2008 r.
- [112]. Mert T., Gultekin N., Experimental cost analysis of double gas shielded GMAW (DMAG) compared with conventional GMAW in welding of carbon steel T-joints, Materiały konferencyjne, 2013 International Conference on Advanced Materials and Information Technology Processing, nr 87, str. 275÷286. 2014 r.
- [113]. Pitchipoo P., Sundaran S., Optimization of GMAW Parameters to Improve the Mechanical Properties, Materiały konferencyjne, International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering, str. 813÷814. 2015 r.
- [114]. Thakur A., Gebrelibanos H., Gabrey T., Arc Welding Process Selection through a Quality and Costs, International Journal of Current Engineering and Technology, nr 9 (3), str. 383÷394. 2019 r.
- [115]. Fratini L., Buffa G., Palmeri D., Using a neural network for predicting the average grain size in friction stir welding processes, Computers & Structures, nr 87 (17), str. 1166÷1174. 2009 r.
- [116]. Dumont M., Steuwer A., Deschamps A., Microstructure mapping in friction stir welds of 7449 aluminium alloy using SAXS, Acta Materialia, nr 54, str. 4793÷4801, 2006 r.
- [117]. Liu H.J., Zhang H.J., Yu L., Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, Materials & Design, nr 32 (3), str. 1548÷1553. 2011 r.

## 15. Streszczenie rozprawy doktorskiej

Współczesny przemysł kolejowy i lotniczy koncentruje swoją uwagę na materiałach i technologiach łączenia, które zapewniają powstawanie konstrukcji o jak najmniejszej masie. Oprócz minimalizacji masy konstrukcje powinny się charakteryzować wysoką wytrzymałością i sztywnością oraz odpornością na korozję. Do materiałów stosowanych na tego typu konstrukcje, spełniających powyższe kryteria można zaliczyć m.in. stopy aluminium przerabiane plastycznie. Jedną najbardziej innowacyjnych technologii umożliwiających łączenie stopów aluminium przerabianych plastycznie w tym stopu EN AW-6082 jest technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny – FSW. W metodzie tej do podgrzania łączonych materiałów, ich uplastycznienia i do utworzenia zgrzeiny wykorzystuje się ruch obrotowy oraz ruch posuwisty narzędzia. Wykorzystanie metody FSW do zgrzewania np. stopu aluminium EN AW-6082 pozwala uniknąć typowych niezgodności spawalniczych i zgrzewalniczych, a dla niektórych rodzajów konstrukcji staje się jedyną metodą ich wykonywania z uwagi np. na możliwość zgrzewania skomplikowanych kształtów konstrukcji oraz brak odkształceń zgrzewanych elementów.

Zjawiska strukturalne występujące w złączu FSW wykonanym ze stopu aluminium EN AW-6082, związane z mieszaniem materiału w stanie stałym, nie są w pełni zbadane. Dodatkowo, informacje technologiczne w obszarze wykonywania złączy ze stopów aluminium EN AW-6082 stanowią strzeżone „know-how” wytwórców elementów konstrukcji. Stało się to podstawą do sformułowania tezy pracy. Celem tezy było określenie wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium.

Niniejsza dysertacja składa się ze wstępu, jedenastu rozdziałów oraz zakończenia. We wstępie, będącym rozdziałem pierwszym pracy, określono problem badawczy, cel oraz wskazano metody analizy naukowej. W rozdziale drugim dokonano przeglądu literatury z zakresu możliwości łączenia stopów aluminium różnymi metodami spajania. W trzecim scharakteryzowano stopy aluminium w tym stop aluminium EN AW-6082. W rozdziale czwartym dokonano oceny możliwości łączenia tego materiału za pomocą różnych technologii spajania. W rozdziale piątym dokonano podsumowania części teoretycznej pracy. W rozdziale szóstym wskazano tezę, cele pracy w tym cel metodyczny, cele poznawcze i cel użytkowy oraz zakres badań. W ramach rozdziału siódmego określono skład chemiczny i opisano podstawowe właściwości stopu aluminium EN AW-6082. W rozdziale ósmym określono metodykę badań struktury złączy w tym dobór miejsca pobierania próbek do badań strukturalnych. W rozdziale dziewiątym dokonano analizy pola temperatury i odkształceń w złączach FSW, a powstały model MES zwalidowano w oparciu o wyniki pomiarów temperatury oraz odkształceń na

rzeczywistych złączach FSW. W rozdziale dziesiątym opisano próby technologiczne zgrzewania FSW tym wskazano parametry zgrzewania FSW, narzędzie do zgrzewania, dokonano oceny pola temperatury obszaru zgrzewania, a także przedstawiono wyniki badań struktury złącza w tym wyniki badań metalograficznych za pomocą mikroskopii świetlnej, skaningowej. Dokonano także rekonstrukcji 3D złącza za pomocą techniki FIB-SEM. W rozdziale jedenastym określono właściwości złączy FSW m.in. w statycznej próbie rozciągania, próbie zginania oraz podczas prowadzenia badań oceny odporności złączy FSW na różne rodzaje korozji.

W zakończeniu dokonano podsumowania analizowanych treści, przedstawiono wymagania technologiczne zgrzewania FSW oraz wytyczne technologiczne zgrzewania w warunkach produkcyjnych. Przeprowadzono także analizę ekonomiczną zasadności stosowania technologii FSW, a także opracowano karty potencjalnie występujących niezgodności w procesie zgrzewania FSW.

W wyniku realizacji pracy stwierdzono wpływ głównych parametrów procesu zgrzewania FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082. Oceniono ponadto, że przedstawione rozwiązanie może być z powodzeniem stosowane w warunkach przemysłu motoryzacyjnego, kolejowego oraz innych. Pracę zakończono sformułowaniem wniosków.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny, FSW, aluminium, stop aluminium przerabiany plastycznie, stop EW AW-6082.



## Summary of the dissertation

Today's rail and aerospace industries are focusing their attention on materials and joining technologies that ensure the formation of structures with the lowest possible weight. In addition to minimizing weight, structures should be characterized by high strength and stiffness, as well as corrosion resistance. Materials used for such structures that meet the above criterias include wrought aluminum alloys. One of the most innovative technologies enabling the joining of wrought aluminum alloys including EN AW-6082 alloy is friction stir welding - FSW. In this method, a rotary motion and a reciprocating motion of the tool are used to heat the materials to be joined, to plasticize them and to form a weld. The use of the FSW method for welding, for example, aluminum alloy EN AW-6082 avoids typical welding incompatibilities, and for some types of structures it becomes the only method of their execution due to the possibility of welding complex shapes of structures and the lack of deformation of welded elements.

The structural phenomena occurring in a FSW joint made of aluminum alloy EN AW-6082, related to the mixing of the material in the solid state, are not fully studied. In addition, technological information in the area of making EN AW-6082 aluminum alloy joints is the guarded “know-how” of the structural component manufacturers. This became the basis for the formulation of the thesis of this work, the purpose of which was to determine the effect of selected FSW friction welding conditions on the structure and properties of aluminum alloy joints.

Dissertation consists of an introduction, eleven chapters and a conclusion. The introduction, which is the chapter one of the dissertation, defines the research problem, the purpose and indicates the methods of scientific analysis. The second chapter reviews the literature of the possibilities of joining aluminum alloys by various welding methods. The third chapter characterizes aluminum alloys including aluminum alloy EN AW-6082. The fourth chapter evaluates the possibility of joining this material using various welding technologies. The fifth chapter summarizes the theoretical part of the work. Chapter six indicates the thesis, the objectives of the work including the methodological objective, the cognitive and utilitarian objectives, and the scope of the study. Within the framework of the seventh chapter, the chemical composition was determined and the basic properties of aluminum alloy EN AW-6082 were described. In the eighth chapter, the methodology for testing the structure of the joints was determined, including the selection of the sampling site for structural testing. In chapter nine the temperature and strain field in FSW joints were analyzed. Resulting FEM

model was validated against the temperature and strain measurements on the actual FSW joints. Chapter ten describes the technological tests of FSW welding including the parameters of FSW welding, the welding tool, evaluating the temperature field of the welding area, and presenting the results of the joint structure including the results of metallographic studies by the light and scanning microscopy. A 3D reconstruction of the joint using the FIB-SEM technique was also carried out. In the eleventh chapter, the properties of FSW joints were determined, among others, in the static tensile test and bending test as well as the resistance of FSW joints to various types of corrosion was assessed.

The conclusion summarizes the analyzed contents, presents the technological requirements of FSW welding and technological guidelines for welding in production conditions. An economic analysis of the legitimacy of the use of FSW technology was also carried out, and charts of potentially occurring inconsistencies in the FSW welding process were developed.

As a result of the work, the influence of the main parameters of the FSW welding process on the structure and properties of EN AW-6082 aluminum alloy joints was found. It was further assessed that the presented solution can be successfully applied in the conditions of the automotive, railroad and other industries. The work was completed with the formulation of conclusions.

**Keywords:** friction stir welding, FSW, aluminum, wrought aluminum alloy, EN AW-6082 alloy.

KONIEC