

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WSPÓLNA SZKOŁA DOKTORSKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Wykorzystanie metody FSW w łączeniu komponentów metalowych struktur foteli samochodowych

Mgr inż. Krzysztof Chyła

PROMOTOR: PROF. DR HAB. INŻ. KRZYSZTOF GASKA

Gliwice 2024

Spis treści

Streszczenie.....	5
Wstęp.....	7
1. Przegląd literatury	9
1.1. Charakterystyka procesu FSW.....	9
1.2. Parametry procesu.....	11
1.3. Parametry narzędzia.....	12
1.4. Wady i zalety.....	14
1.5. Budowa złącza FSW.....	17
1.6. Ogólna charakterystyka stopów aluminium wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym.....	19
1.7. Przegląd metod łączenia stopów aluminium.....	21
2. Problem badawczy i metodologia	23
3. Metodyka badawcza	25
3.1. Przygotowanie próbek do zgrzewania tarcowego z przemieszaniem.....	27
3.2. Badania wytrzymałości na rozciąganie.....	30
3.3. Badania twardości	31
3.4. Badanie radiograficzne	33
3.5. Badania metalograficzne.....	33
3.6. Badania chropowatości.....	34
4. Wyniki badań	36
4.1. Wytrzymałość na rozciąganie	36
4.2. Twardość	44
4.2.1 Twardość złącza FSW.....	44
4.2.2 Twardość trzpieni.....	56
4.3. Badania metalograficzne.....	60
4.3.1 Badania makro oraz mikroskopowe.....	60
4.3.2. Profile chropowatości.....	72
4.4. Badanie radiologiczne RT	79
5. Analiza i dyskusja otrzymanych wyników.....	82
6. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	86
7. Literatura.....	88
8. Spis tabel.....	95
9. Spis rysunków.....	97
10. Załączniki.....	100

Streszczenie

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem materiału wydaje się być realną alternatywą metodą łączenia niskoobciążonych elementów metalowych struktur foteli samochodowych. W niniejszej rozprawie zaprojektowano dwa rodzaje narzędzi do zgrzewania tarciovego oraz zbadano wpływ parametrów procesu (prędkości obrotowej narzędzia oraz posuwu) na jakość spoiny. Zgrzewaniu poddano arkusz blachy ze stopu aluminium 2024 T3, zastosowano dziewięć różnych kombinacji prędkości obrotowej oraz prędkości posuwu. Zbadano profil twardości oraz wytrzymałość na rozciąganie aby określić w jaki sposób zmiany parametrów wpływają na właściwości mechaniczne złącza. Zbadano również efektywność złącza oraz profil twardości zaprojektowanych narzędzi ze Stali Vanadis 23. Przeprowadzono również badanie radiograficzne oraz badania metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopu metalograficznego Nikon M z obrazowaniem i profilowaniem 3D oraz makroskopowe z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Olympus X-TR z automatycznym ogniskowaniem wspomaganym komputerowo mające na celu zobrazowanie nieciągłości wewnątrz spoiny. Ponadto przeprowadzono badania mikrostruktury złącza w celu dokładnego zobrazowania potencjalnych wad oraz nieciągłości.

Wyniki badań potwierdziły możliwość zastosowania nowej metody łączenia niskoobciążonych elementów metalowych struktur foteli samochodowych. Najlepsze właściwości mechaniczne złącza oraz prawidłową mikrostrukturę zaobserwowano dla prędkości obrotowej narzędzia 1200 obr/min oraz 50/70 mm/min prędkości posuwu. Jest to obiecująca metoda łączenia materiałów, której potencjał jest analizowany w celu wdrożenia jako metody pilotażowej w łączeniu prototypowych elementów konstrukcyjnych foteli samochodowych.

Abstract

Friction stir welding appears to be a viable alternative method for joining low-load metal components of car seat structures. In this thesis, two types of friction welding tools were designed and the influence of process parameters (tool speed and feed rate) on weld quality was investigated. A sheet of 2024 T3 aluminum alloy sheet was welded and nine different combinations of rotational speed and feed rate were used. The hardness profile and tensile strength were examined to determine how variations in the parameters affect the mechanical properties of the joint. The joint efficiency and hardness profile of the designed Vanadis 23 steel tools were also investigated. Radiographic and metallographic examinations were also carried out using a Nikon M metallographic microscope with 3D imaging and profiling, and

macroscopic examinations using an Olympus X-TR stereo microscope with computer-assisted auto-focus to visualize discontinuities within the weld. In addition, a study of the microstructure of the joints was carried out to accurately visualize potential defects and discontinuities.

The results confirmed the feasibility of the new method for joining low-load metal components of car seat structures. The best joint mechanical properties and correct microstructure were observed for a tool speed of 1200 rpm and 50/70 mm/min feed rate. This is a promising material joining method, the potential of which is being investigated for implementation as a pilot method in joining prototype product series.

Wstęp

Biorąc pod uwagę rosnące obawy związane z emisją gazów cieplarnianych, minimalizacją emisji dwutlenku węgla i zmniejszenie zużycia paliwa w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, staje się to coraz ważniejszym tematem dyskusji w wielu krajach. Wiele branż, w tym motoryzacyjna, ocenia sposoby na zmniejszenie całkowitej masy swoich pojazdów. Nastąpiło odejście od materiałów żelaznych i stali na materiały o niższej gęstości, takie jak aluminium i magnez. Biorąc pod uwagę niską gęstość i doskonałą wytrzymałość mechaniczną stopów aluminium, materiały te dają obiecujące odpowiedzi na zastąpienie stali w przemyśle samochodowym, aby zmniejszyć ogólną wagę produktu. Ta redukcja wagi prowadzi do niższego zużycia paliwa, co z kolei przyczynia się do obniżenia wpływu emisji dwutlenku węgla na środowisko. Jednym z wyzwań w związku z korzystaniem ze stopów aluminium jest sposób ich montażu oraz łączenia. Tradycyjne techniki łączenia takie jak spawanie nie są efektywne ze względu na duże zużycie energii, które przyczynia się do wzrostu emisji CO₂ oraz potencjalne możliwości występowania niezgodności spawalniczych. Warto wspomnieć, że stosowanie mechanicznych metod montażu, takich jak śruby lub nity, zwiększa wagę części oraz koszty konstrukcji odbierając korzyści płynące z zastosowania stopów aluminium. Poza tym, mechaniczne elementy złączne tworzą punkty koncentracji naprężeń w zmontowanej konstrukcji, co niekorzystnie wpływa na trwałość zmęczeniową. Pozostawia to techniki zgrzewania tarcowego w stanie stałym tj. zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem materiału (FSW) jako potencjalny wybór do łączenia stopów Al, takich jak 2024 T3 i innych. Dużą korzyścią tego procesu jest jego realizacja w stanie stałym. To pozwala uniknąć typowych problemów spawalniczych, które mogą wystąpić przy użyciu tradycyjnych metod spawania. Zasada tego podejścia jest prosta: obracające się narzędzie jest wprowadzane w obszar, gdzie mają nastąpić połączenia dwóch materiałów, a następnie przemieszcza się wzdłuż linii styku tych materiałów. Przez to, że jest to stosunkowo nowa metoda, stan wiedzy o technice łączenia wymaga każdorazowo dogłębnej analizy w celu doboru odpowiednich warunków zgrzewania. Kolejnym problemem jest dobór kształtu oraz materiału narzędzi w celu optymalizacji jakości połączenia oraz kosztów procesu. Funkcją narzędzia jest podgrzewanie powierzchni blach, które mają być połączone poprzez tarcie, przy czym temperatura procesu jest niższa od temperatury materiałów, które mają zostać połączone. Ponadto, narzędzie to powoduje powstanie połączenia przez mechaniczne mieszanie materiału z przylegających do siebie blach. Ze względu na mniejsze zużycie energii potrzebnej do przeprowadzenia procesu oraz eliminację gazów spawalniczych (temperatura procesu poniżej

temperatury topienia materiałów łączonych) metoda ta istotnie wpływa na redukcję zanieczyszczeń przez co wydaje się świetną alternatywą do tradycyjnych wysokoenergetycznych metod łączenia tj. spawanie (Mig, Mag, Tig, Laserowe), zgrzewanie oporowe i tym podobne.

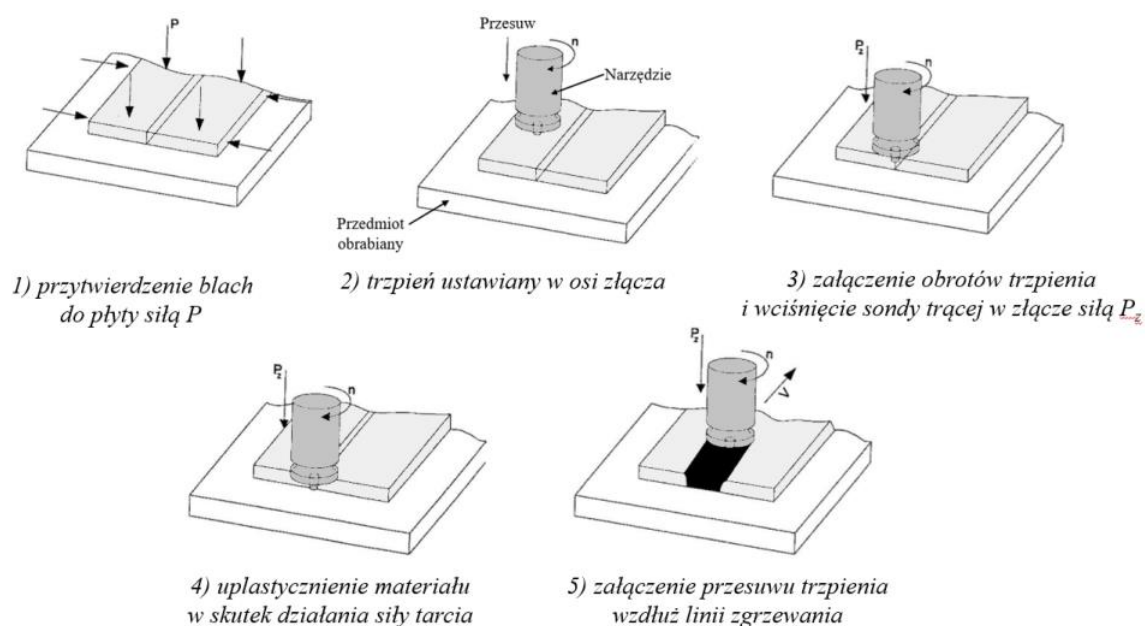
W pracy przedstawiono koncepcję użycia metody FSW do łączenia niskoobciążonych elementów foteli samochodowych wykonanych ze stopów aluminium. Zaprojektowano i wykonano narzędzia do zgrzewania FSW ze stali Vanadis 23. W celu optymalizacji oraz zredukowania kosztów procesu zgrzewania przeprowadzono szereg badań mających na celu dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania.

2. Przegląd literatury

2.1. Charakterystyka procesu FSW

Zgrzewanie tarciove to jeden z głównych procesów spawania w stanie stałym. Po dwudziestu latach rozwoju zgrzewanie tarciove z przemieszaniem (FSW) stało się realną i ważną alternatywą produkcyjną lub elementem produkcyjnym, szczególnie w zastosowaniach lotniczych i kosmicznych z udziałem stopów aluminium (Murr, 2010; Mendez et Eager, 2001; Burford et al. 2007;). Chociaż FSW zaczynało jako alternatywa do łączenia stopów aluminium, obecnie znajduje również zastosowania do łączenia materiałów o wyższych temperaturach topnienia, w tym stali nierdzewnych, tytanu i stopów tytanu (Sanders et al. 2007; Lütjering et al. 2007). Wzrosło również zainteresowanie zastosowaniem FSW do łączenia różnych metali i stopów, w szczególności tych, które są trudne lub niemożliwe do łączenia za pomocą spawania konwencjonalnego, termicznego (Sanders et al. 2008; Meran et al. 2007). Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym (Jacquin et al., 2021). Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak optymalnego doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia i prędkości posuwu (Kumar et al., 2008). Metoda ta została opracowana i opatentowana w 1991 roku przez angielski Instytut Spawalnictwa FSW do zastosowań w stopach aluminium (Thomas et al., 1991). Jest to ekonomiczna i wydajna metoda łączenia materiałów, polegająca na zastosowaniu specjalnego narzędzia obrotowego z cylindrycznym występem i profilowanym sworzniem nie podlegającym zużyciu. Ruch trzpienia w kierunku liniowym w miejscu powstania linii szwu powoduje mieszanie miękkiego metalu i zapewnianie połączenia w procesie. Metoda pozwala na wykonywanie wysokiej jakości połączeń materiałów metalowych. Analizując mikrostrukturę zgrzeiny wykazują one drobne ziarna i ograniczoną strefę wpływu ciepła ograniczającą rozwój pęknięć (Wang et al., 2008). Oczywiście korzyści wynikające z wykorzystania tej technologii łączenia blach różnych materiałów metalicznych powoduje, że jest ona szeroko wykorzystywana przez przemysł samochodowy, lotniczy i kosmiczny (Terra et al., 2021). Najlepsze efekty łączenia uzyskuje się prowadząc proces zgrzewania z kontrolowaną siłą docisku i z zachowaniem odpowiedniego ustawienia kąta pochylenia oraz głębokości jego zanurzenia materiale (Su et al., 2013). Na skuteczność otrzymanego połączenia mają wpływ parametry geometryczne, wysokość i kształt trzpienia oraz powierzchnia oporowa narzędzia. Powyższe czynniki mają wpływ zarówno na płynięcie metalu, jak i wytwarzanie ciepła pod wpływem sił tarcia (Rambabu et al., 2015). W celu uzyskania efektywnych połączeń należy odpowiednio dobrać prędkość obrotową i posuw

(Fratini et al., 2006). W zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem (FSW) narzędzie obrotowe o danym profilu porusza się do przodu wzdłuż linii zgrzewania (Threadgill et al., 2009). Styk cierny pomiędzy narzędziem FSW, a przedmiotem obrabianym oraz odkształcenie plastyczne są odpowiedzialne za wytwarzanie ciepła i zmiękczenie materiału (Shigematsu et al., 2003). W miarę przesuwania się narzędzia do przodu powstaje spoina przez mieszanie materiału rodzimego (Vilaca et al., 2011), (Rys. 2.1).



Rysunek 2. 1. Przebieg procesu zgrzewania tarciovego z mieszaniem metalu zgrzeiny.

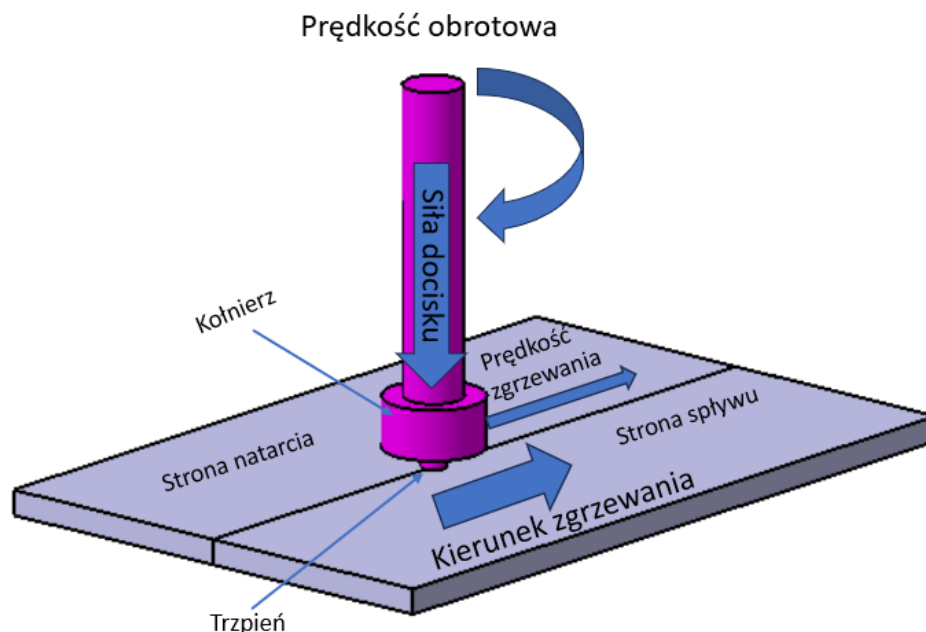
Zautomatyzowany proces zgrzewania wymaga użycia właściwie sztywnego sprzętu. Przedmioty poddane zgrzewaniu muszą być mocno przymocowane i ściśnięte wzajemnie aby zapobiec odkształceniom w trakcie procesu spajania. Kołnierz narzędzia wprowadzony w ruch obrotowy prowadzi do ogrzewania elementów w wyniku działania tarcia. Trzpień roboczy wykonuje jednocześnie kombinację ruchu obrotowego oraz prostoliniowego wzdłuż styku elementów łączonych co prowadzi do wymieszania materiałów z obu elementów i stworzenia spoiny. W czasie tego procesu, materiał jest mechanicznie mieszany i poddawany intensywnej plastycznej deformacji w podwyższonej temperaturze (Gibson et al., 2013). Charakter procesu sprawia, że spoina jest różna po obu stronach. Stronę, gdzie materiał przemieszcza się zgodnie z ruchem trzpienia, określa się jako stronę natarcia lub wyprzedzania, a stronę, gdzie przepływ materiału jest przeciwny do ruchu narzędzia, jako stronę spływu lub cofania. Różnice w mikrostrukturze, odkształceniach i naprężeniach własnych po obu stronach spoiny mogą znacząco wpływać na właściwości antykorozyjne i zmęczeniowe materiału (Dialami et al., 2017).

W oparciu o mikrostrukturę obszar zgrzewany FSW dzieli się na cztery obszary, a mianowicie obszar nienaruszony, strefę wpływu ciepła, strefa oddziaływania termomechanicznego, strefa mieszania. Region nienaruszony to obszar, w którym ciepło nie ma wpływu na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne. Strefa wpływu termomechanicznego to obszar, w którym ciepło wpływa na właściwości mechaniczne. Strefa mieszania to obszar, w którym ciepło wpływa na pierwotne granice ziaren (Prasad et al., 2022). Chociaż zwykle uważa się, że poziom naprężeń własnych powstających w stopach aluminium w procesie FSW jest nieco niższy w porównaniu z tradycyjnymi technikami spawania (Hatamleh et al., 2007), takimi jak zgrzewanie, wykazano, że naprężenia własne odgrywają główną rolę we wzroście pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach zgrzewanych tarciovo z przemieszaniem (James et al. 2007). Zaobserwowano również zachowanie wybożeniowe konstrukcji zgrzewanych uzyskanych przy użyciu FSW. Dlatego też, aby zrozumieć i kontrolować ewolucję naprężeń termicznych i szczątkowych powstających w wyniku FSW, w literaturze opisano wiele prac nad modelowaniem procesu (Murphy et al., 2007).

2.2. Parametry procesu

Kluczowe parametry zgrzewania tarciovo z mieszaniem, które wpływają na jakość spoiny, jej mikrostrukturę oraz wytrzymałość, obejmują (Rys. 2.2), (Weis et al., 2008):

- Prędkość obrotowa narzędzia [obr/min], która waha się od 300 do 3000 obr/min, zależnie od rodzaju materiałów zgrzewanych,
- Siła docisku narzędzia [N], gdzie adekwatnie wysoki docisk zmniejsza ilość uplastycznionego materiału wydostającego się poza strefę zgrzewania; typowe wartości siły docisku oscylują w granicach od 12 do 17 N,
- Prędkość zgrzewania [m/min], która jest zależna od rodzaju i grubości łączonych materiałów, przy czym dla zgrzewania blach aluminiowych w przemyśle motoryzacyjnym, wartości te mieszczą się w zakresie od 0,3 do 1,5 m/min,
- Kąt nachylenia powierzchni oporowej narzędzia względem powierzchni zgrzewanej blachy.



Rysunek 2. 2. Schemat procesu FSW.

2.3. Parametry narzędzia

Badania wykazały, że konstrukcja narzędzia wpływa na charakter płynięcia plastycznego materiału wokół końcówki narzędzia, co z kolei wpływa na jakość spoiny (Venkateswarlu, et al., 2019). Kształt końcówki narzędzia wpływa zarówno na temperaturę, jak i mieszanie materiału wzdłuż linii złącza (tab. 2.1),(Arora et al., 2011).

Tabela 2. 1. Wybrane rodzaje narzędzi FSW.

Narzędzie	Cylindryczne	Whorl TM	MX triflute TM	Flared triflute TM	A - Skew TM	Re – Stir TM
Rysunek poglądowy						
Kształt trzpienia	Cylindryczny gwintowany	Stożkowy gwintowany	Stożkowy gwintowany z trzema rowkami	Trój rowkowy z zakończeniem rowków na poszerzonej końcówce	Pochylony, cylindryczny, gwintowany	Stożkowy gwintowany
Stosunek objętości trzpienia do cylindrycznej	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4

objętości trzpienia						
Stosunek objętości podczas trzpienia do objętości samego trzpienia	1.1	1.8	2.6	2.6	Zależy od kąta trzpienia	1.8
Zmiana kierunku obrotu	nie	nie	nie	nie	nie	tak
Zastosowanie	Zgrzewanie doczołowe, nie do zgrzein nakładkowych	Zgrzewanie doczołowe z obniżonym momentem obrotowym podczas zgrzewania	Zgrzewanie doczołowe z dalszym obniżeniem momentu obrotowego podczas procesu	Zgrzewanie nakładkowe z niższym pocienieniem górnej płyty	Zgrzewanie nakładkowe z niższym pocienieniem górnej płyty	Kiedy wymagana jest minimalna asymetria w właściwościach zgrzeiny

Profil narzędzia lub geometria narzędzia ma krytyczny wpływ na jakość spoiny i szybkość zużycia narzędzia. Kształt narzędzia FSW ma wpływ na:

- generowanie temperatury podczas zgrzewania,
- wytworzenie tej samej siły osiowej w obszarze spoiny,
- osiągnięcie dobrej prędkości spawania,
- uzyskanie odpowiedniego przepływu metalu w strefie mieszania oraz uzyskanie jednorodnej struktury ziaren (Khodir et al., 2012; Choi et al., 2011). Szybkość odkształcenia plastycznego strefy mieszania zależy również od profilu narzędzia, a nie od prędkości obrotowej narzędzia i prędkości zgrzewania.

Istotnymi czynnikami, które należy wziąć pod uwagę przed zaprojektowaniem narzędzia, są:

- grubość zgrzewanych materiałów,
- rodzaj zgrzewanego materiału,
- materiał narzędzia (Abbasi et al., 2012).

2.4. Wady i zalety procesu

FSW ma wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi procesami spawania (łukowe. Mag/Mig, Tig). Do najważniejszych należą: brak potrzeby stosowania topnika/spoiwa/gazu osłonowego w przypadku stopu; możliwość pracy w dowolnej pozycji (poziomej, pionowej, nachylonej itp.); zmniejszenie skurczu ze względu na niższą temperaturę; zmniejszenie zapotrzebowania na wysoko wykwalifikowanych pracowników (spawaczy) ponadto mniejsze zużycie energii w porównaniu z innymi procesami łączenia materiałów (Dixit et al., 2020) Ogólnie zalety procesu przedstawiono w tabeli 2.2 ,(Bhardwaj et al., 2019).

Tabela 2. 2. Ogólne zalety procesu.

Metalurgiczne	<ul style="list-style-type: none"> • Drobna mikrostruktura • Brak pęknięć • Metoda fazy stałej • Brak utraty pierwiastków stopowych podczas procesu. • Niskie odkształcenia i skurcz, nawet przy długich spoinach • Dobra stabilność wymiarowa i powtarzalność • Doskonałe właściwości metalurgiczne złącza spawanego • Zastępuje wiele części połączonych łącznikami
<u>Środowiskowe</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminacja odpadów szlifierskich • Gaz osłonowy nie jest wymagany • Nie wymaga czyszczenia powierzchni • Eliminacja rozpuszczalników do odtłuszczania • Nie są wymagane żadne materiały eksploatacyjne, takie jak dywaniki, druty lub inne gazy

Energetyczne	<ul style="list-style-type: none"> • Ulepszone wykorzystanie materiałów pozwala na zmniejszenie masy (np. łączenie różnych grubości) • Bardzo mniej potrzebnej energii (około 2,5% energii potrzebnej do spawania laserowego) • Zmniejszone zużycie paliwa ze względu na zastosowania w lekkich samolotach, motoryzacji, konstrukcjach i statkach
Właściwości mechaniczne	<ul style="list-style-type: none"> • Spoina jest odporna na naprężenia zmęczeniowe. • Minimalne odkształcenie łączonych części
<u>Bezpieczeństwo</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Wysoka wytrzymałość spoiny • Brak łuku spawalniczego i oparów • Brak promieniowania UV • Brak odprysków

W tabeli 2.3. przedstawiono zalety dla zgrzewania tarcowego dla aluminium (Kah et al., 2015).

Tabela 2. 3. Zalety dla zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału aluminium.

Spawalność	<p>Niektóre stopy aluminium, które albo nie nadają się do spawania, albo są trudne do spawania ze względu na problemy związane z tworzeniem się kruchej fazy i pękaniem, można obecnie spawać metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, ponieważ jest to proces w stanie stałym.</p>
------------	--

Zniekształcenie	Odształcenia wzdłużne i poprzeczne są minimalizowane w procesie FSW ze względu na niższą temperaturę szczytową w FSW w porównaniu do procesów spawania łukowego.
Wymagania dotyczące materiału wypełniającego	W przypadku niektórych materiałów aluminiowych nie jest dostępny odpowiedni materiał wypełniający odpowiadający wytrzymałości materiału podstawowego do procesów spawania łukowego. FSW nie wymaga wypełniacza do łączenia metali.
Odporność na zmęczenie	Spoiny FSW wykazują zwiększoną odporność zmęczeniową w cyklicznych warunkach obciążenia ze względu na niższą temperaturę szczytową i mniejsze naprężenia własne.
Zmienne procesowe	Stosunkowo niewiele parametrów procesu i łatwa kontrola sprawiają, że FSW jest procesem stosunkowo stabilnym.

Wady

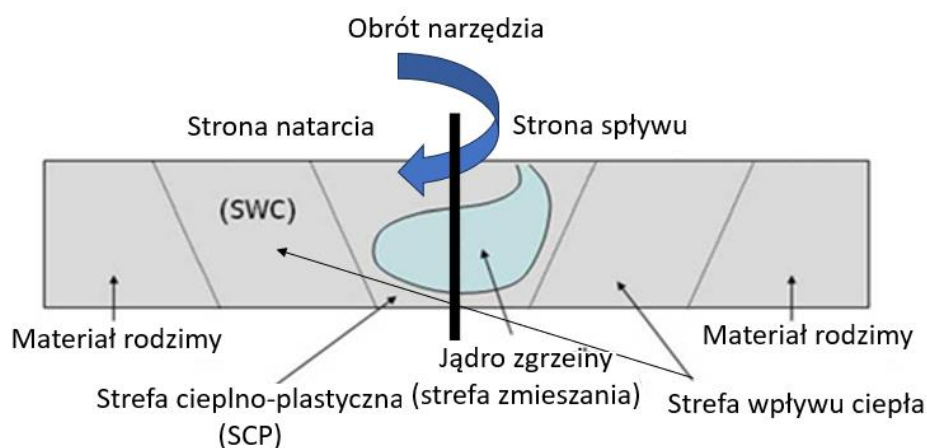
Obecnie FSW stała się jedną z dominujących w przemyśle metod łączenia stopów aluminium (Msomi et al., 2020; Xu et al. 2021; Hu et al. 2021). Rozważając twarde metale, takie jak stal, FSW nadal nie osiąga tej samej wykonalności w porównaniu do stopów aluminium (Karami et al. 2021; Padmanaban et al. 2020). Ograniczenia zgrzewania tarcowego stali z przemieszaniem są następujące:

- do zgrzewania stali wymagane jest bardzo trwałe narzędzie,
- temperatura wytwarzana przez narzędzie nie będzie wystarczająca do uplastycznienia metali,
- prędkości spawania są dużo mniejsze, niż w przypadku stopów aluminium ze względu na dużą twardość stali,

- stopień uszkodzenia narzędzi jest bardzo duży (Mohan et al. 2021 (a); Mohan et al. 2021 (b)).

2.5. Budowa złącza

W wyniku interakcji narzędzia z łączonym materiałem tworzy się stabilne połączenie. Proces przemieszczania się materiału wokół obracającego się narzędzia jest procesem skomplikowanym, który jest kształtowany przez parametry procesu i rodzaj narzędzia. W kierunku poprzecznym w tworzonej zgrzeinie obserwuje się istotny gradient deformacji i temperatury (Kossakowski et al., 2019). Te różnice w temperaturze i deformacji powodują powstanie złożonej mikrostruktury, która istotnie wpływa na właściwości mechaniczne spoiny. Mikrostruktura ta jest kształtowana przez takie procesy jak zdrowienie i rekrytalizacja oraz koagulacja i deformacja (Rys. 2.3),(Magalhaes et al., 2017). Wydzielone obszary w materiale ilustrują termochemiczną ścieżkę przepływu materiału spoiny. Kluczową zaletą mikrostruktury uzyskanej w wyniku zgrzewania z mieszaniem materiału jest drobnokrystaliczne, równoosiowe ziarno w jądrze spoiny, które powstaje w wyniku intensywnej deformacji plastycznej na skutek podwyższonej temperatury. Niestety, wadą jest niejednorodność lokalnej mikrostruktury. Dobre właściwości zmęczeniowe, mechaniczne i zwiększona plastyczność spoiny wynikają z tej drobnokrystalicznej mikrostruktury (Cam., 2011).

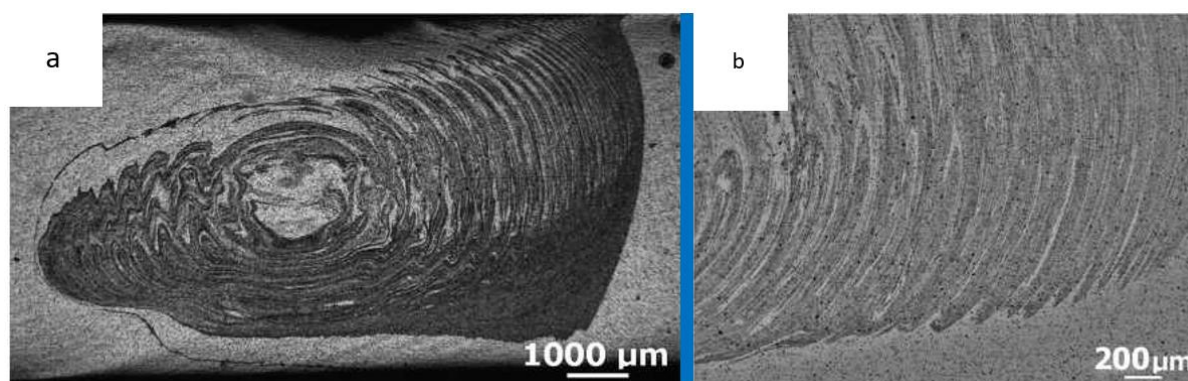


Rysunek 2. 3. Schemat przekroju poprzecznego zgrzeiny FSW wraz z poszczególnymi strefami mikrostrukturalnymi.

W materiale zgrzewanym metodą FSW wyróżniamy strefy (Bach et al., 2014):

- Materiał rodzimy (MR): to obszar materiału, który nie został odkształcony podczas zgrzewania i znajduje się najdalej od centrum spoiny, gdzie ciepło z tarcia dociera w ograniczonym stopniu, nie wpływając znacząco na mikrostrukturę czy właściwości mechaniczne.

- Strefa wpływu ciepła (SWC): to obszar bezpośredniego kontaktu z spoiną, który znacznie doświadczył wpływu ciepła, prowadząc do zmian w mikrostrukturze i właściwościach mechanicznych, ale nie uległ deformacji podczas tworzenia spoiny.
- Strefa cieplno-plastyczna (SCP): w tej strefie materiału występuje deformacja plastyczna indukowana ruchem narzędzia i znaczącym wpływem ciepła dostarczanemu dzięki tarcia występującym podczas procesu zgrzewania. Materiały takie jak aluminium mogą ulegać plastycznej deformacji bez rekrytalizacji. Zwykle obserwuje się wyraźną granicę między obszarami odkształconymi cieplno-plastycznie a obszarem zrekrystalizowanym, który stanowi jądro spoiny.
- Jądro spoiny (JZ) lub strefa zmieszania: to obszar, gdzie obracające się narzędzie bezpośrednio zmienia materiał, a jego mikrostruktura ulega całkowitej rekrytalizacji, dzięki temu w tej strefie występują drobne, równoosiowe ziarna (Zifčák et al., 2014). W przypadku stopów aluminium, nominalny rozmiar ziaren zawiera się w kilku mikrometrach. Podczas zgrzewania stopów aluminium w jądrze spoiny można zauważyć pojawienie się charakterystycznej struktury zwaną „pierścieniami cebuli” (Rys.2.4), (Su et al., 2014).



Rysunek 2. 4. Charakterystyczna mikrostruktura jądra zgrzeiny tzw. „pierścienie cebuli” w stopie 6101, a) małe powiększenie, b) duże powiększenie.

Proces powstawania tej unikatowej struktury nie został jeszcze całkowicie zrozumiany, a badania mające na celu zrozumienie przyczyn jej tworzenia wciąż trwają. Większość naukowców stara się powiązać obecność tej struktury z ciepłem wydzielanym podczas procesu. Zauważono, że struktura „pierścieni cebuli” pojawia się częściej podczas formowania się tzw. spoin „gorących” niż „zimnych” (Hamilton et al., 2008). Z innych badań wynika, że kluczowy wpływ na jej powstawanie ma dobór parametrów zgrzewania, zwłaszcza wyższa prędkość obrotowa przy niższej prędkości zgrzewania. Formowanie się „pierścieni cebuli” podczas zgrzewania z mieszaniem materiału zależy także od geometrii używanego narzędzia, a więc od sposobu, w jaki materiał przemieszcza się wokół trzpienia i od ruchu tego trzpienia (Packer et

al., 2013,). Wielkość i budowa spoiny, jak również rozmiary poszczególnych stref materiału, zależą od kształtu i rozmiarów używanego narzędzia (Kumar et al., 2022).

2.6 Ogólna charakterystyka stopów aluminium wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym

Stopy aluminium są szeroko stosowane w przemyśle ze względu na wiele istotnych zalet. Aluminium wyróżnia się brakiem odmian alotropowych, masą atomową równą 26,9815 oraz liczbą atomową 13. Temperatura topnienia aluminium wynosi około 660°C. Charakteryzuje się niską gęstością, 2,6989 g/cm³, co klasyfikuje je jako lekki metal. Posiada również wysoką przewodność elektryczną, około 65% przewodności miedzi, oraz dobrą przewodność cieplną. Jest to metal łatwo obrabialny i formowalny, odporny na różne typy korozji, takie jak korozja atmosferyczna, oraz na działanie wody, stężonego kwasu azotowego, siarkowodoru i licznych kwasów organicznych. Dla zwiększenia odporności na korozję aluminium poddaje się procesowi anodowania (Huda et al. 2009; Askeland 2003).

Właściwości wytrzymałościowe czystego aluminium zaprezentowano w poniższej tabeli (tab. 2.4), (Huang et al., 2015).

Tabela.2.4. Właściwości mechaniczne oraz fizyczne czystego aluminium w stanie wyżarzonym

Właściwości		Symbol	Jednostka	Wartość
Fizyczne	Gęstość (20°C)	ρ	g/cm ³	2,6989
	Przewodność cieplna	λ	W/m·°C	237
	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	α	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	24
	Ciepło właściwe	C_w	J/g·°C	0,896
	Temperatura topnienia	T_t	°C	660,37
Mechaniczne	Moduł sprężystości Younga	E	GPa	72
	Wytrzymałość na rozciąganie ¹⁾	R_m	MPa	70–120
	Umowna granica plastyczności ¹⁾	$R_{p0,2}$	MPa	20–40
	Twardość ¹⁾	HB		15–30
	Wydłużenie (A_{10}) ¹⁾	A	%	30–45
	Współczynnik Poissona	ν		0,35
¹⁾ w stanie wyżarzonym				

Mimo że podstawowe właściwości wytrzymałościowe czystego aluminium są stosunkowo niskie, zazwyczaj stosuje się jego stopy, dodając do czystego aluminium różne pierwiastki stopowe, co zmniejsza jego masę właściwą i zwiększa wytrzymałość w stosunku do ciężaru. Stopy aluminium, w porównaniu do stali, mają również lepszą udarność, która nie zmienia się z temperaturą. Jednakże, mają one stosunkowo niską wytrzymałość zmęczeniową (Lee et al., 2003).

Podział stopów aluminium może być dokonany na podstawie technologii przetwarzania oraz składu chemicznego. Ze względu na technologię przetwarzania dzielimy je na odlewnicze, do przeróbki plastycznej i otrzymywane metodami metalurgii proszków. Z kolei ze względu na skład chemiczny na dwuskładnikowe i wieloskładnikowe (. Stopy aluminium przeznaczone do przeróbki plastycznej najczęściej są wieloskładnikowe i zawierają około 5-6% pierwiastków chemicznych. Główne pierwiastki stopowe to miedź (do 6%), magnez (do 6%) i mangan (do 1,5%). Mniej często dodaje się lit, cynk, chrom, krzem i czasami tytan. Stopy Al-Mn zawierają od około 1% do 1,5% manganu, są one bardzo dobrze odporne na korozję, plastyczne i dobrze spawalne, a używane są głównie w przemyśle spożywczym i chemicznym oraz w produkcji wyrobów wymagających odporności na agresywne środowisko. Stopy Al-Mg, zawierające do 5,6% magnezu, są odporne na działanie wody morskiej, łatwe w obróbce plastycznej i nadają się do głębokiego tłoczenia (Steuer et al., 2006).

Stopy Al-Cu-Mg, znane jako durale, dzielą się na niskostopowe, średniostopowe i wysokostopowe w zależności od zawartości pierwiastków stopowych. Charakteryzują się one niską odpornością na korozję, co ogranicza ich zastosowanie. Są powszechnie wykorzystywane w przemyśle lotniczym, mechanicznym i budowlanym. Z kolei stopy Al-Zn-Mg-Cu o zawartości do 8% cynku, 3.2% magnezu, 2.8% miedzi, maksymalnie do 0.6% manganu, niekiedy z dodatkami chromu oraz tytanu nazywane są duralami cynkowymi, posiadają one wyższe właściwości mechaniczne niż durale, ale również są podatne na korozję (Singh et al., 2018).

Podział durali na podstawie występowania pierwiastków stopowych:

1. Niskostopowe.(Cu 2,2-3%, Mg 0,2-0,5%, Mn 0,3-0,5%)
2. Średniostopowe.(Cu 3,8-4,8%, Mg 0,4-0,8%, Mn 0,4-0,8%)
3. Wysokostopowe.(Cu 2,6-3,2%, Mg 2-2,4%, Mn 0,45-0,7%)

Następną grupą są odlewnicze stopy aluminium o maksymalnej zawartości do 25% pierwiastków stopowych wśród, których wyróżnić można siluminy, które zawierają od 11 do 14% krzemu mają największe znaczenie w przemyśle dzięki bardzo dobrym właściwościom

odlewniczym, takim jak dobra lejność przy minimalnym skurczu i niskiej skłonności do pęknięcia, stosowane są w produkcji skomplikowanych odlewów (Elangovan et al., 2018). Siluminy są powszechnie stosowane do wytwarzania skomplikowanych odlewów w przemyśle okrętowym, chemicznym i motoryzacyjnym, przy czym proces odlewania odbywa się w temperaturach od 680°C do 780°C. Siluminy dzielą się na (Abbass et al., 2015):

1. Podeutektyczne, z zawartością krzemu około 10,5%,
2. Eutektyczne, gdzie zawartość krzemu mieści się w zakresie 10-13%,
3. Nadeutektyczne, z zawartością krzemu przekraczającą 15%.

Zdolności żarowytrzymałe siluminów eutektycznych i nadeutektycznych umożliwiają ich zastosowanie w produkcji tłoków i głowic do silników spalinowych. Stopy Al-Cu, zawierające do około 5% miedzi i czasem wzbogacone o dodatek tytanu dla poprawy lejności, są mniej odporne na mikropęknięcia w porównaniu do siluminów, ale zapewniają zwiększoną wytrzymałość na rozciąganie, twardość i żaroodporność (Liu et al., 2012, Gao et al., 2015). Są one często używane w przemyśle lotniczym i samochodowym do wytwarzania odlewów przeznaczonych do pracy pod wysokim obciążeniem i o małych gabarytach. Stopy Al-Mg, które są najbardziej odporne na korozję i mają najniższą gęstość spośród wszystkich stopów odlewniczych aluminium, są idealne do pracy w trudnych warunkach i odporne na działanie wody morskiej (Kubit et al., 2012, Venkat et al., 2021). Zawartość magnezu w tych stopach waha się od 2,5% do 10,5%, a domieszki innych pierwiastków zazwyczaj nie przekraczają 1%. Charakteryzują się one dobrymi właściwościami obróbki ubytkowej, umożliwiając wytwarzanie różnorodnych odlewów, zarówno z form piaskowych, jak i ciśnieniowych. Najczęściej wykorzystuje się je do produkcji elementów okrętowych, wagonów, pociągów oraz dekoracji (Elangovan et al., 2008, Chi-Hui Chien et al., 2011, Packer et al., 2013).

2.7 Przegląd metod łączenia stopów aluminium

Stopy aluminium mogą być łączone przy użyciu wielu technik, takich jak zgrzewanie tarciove, spawanie, klejenie, lutowanie i zgrzewanie oporowe. Wybór metody zależy od rodzaju stopu aluminium, wymaganej wytrzymałości połączenia oraz możliwości produkcyjnych. Najlepiej spawalne są stopy z serii 3xxx z dodatkiem manganu oraz czyste aluminium. Stopy z magnezem (Al-Mg) są również dobrze spawalne, choć są bardziej podatne na pęknięcie. Zwiększona zawartość magnezu w stopach z serii 5xxx przyspiesza ich utlenianie, co negatywnie wpływa na spawalność. Stopy zawierające powyżej 0,25% miedzi (2xxx) są

trudne w spawaniu z powodu tendencji do pęknięć, podobnie jak stopy z serii 6xxx z magnezem i krzemem oraz stopy serii 7xxx, które są podatne na pęknięcia podczas spawania (Parshin et al., 2010). Główne metody spawania aluminium i jego stopów to: (Lucian et al. 2018).

- MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) – spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych,
- TIG/GTAW (Tungsten Inert Gas / Gas Tungsten Arc Welding) – spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazów ochronnych.

Inne, mniej popularne metody to spawanie gazowe oraz łukowe elektrodami otulonymi. Spawanie plazmowe, choć szybsze od metody TIG, oraz spawanie laserowe i wiązką elektronów, które dają dobre rezultaty, są kosztowne i wymagają specjalnych warunków, jak próżnia dla spawania wiązką elektronów (Kannan et al., 2015).

Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału spoiny (FSW) jest jedną z najnowszych i najskuteczniejszych metod łączenia trudno spawalnych stopów aluminium. Ta technika jest stosowana tam, gdzie wymagana jest wysoka jakość połączenia. Zgrzewanie FSW generuje mniej ciepła, co minimalizuje wewnętrzne naprężenia i zapobiega tworzeniu niepożądanych struktur dendrytycznych i faz. Ponadto, dzięki braku emisji gazów spawalniczych i braku zużycia oraz pola magnetycznego, jest uznawana za metodę ekologiczną. Mikrostruktura zgrzeiny charakteryzuje się drobnym ziarnem, co eliminuje większość wad tradycyjnego spawania (Murphy et al., 2017). Metoda ta jest szeroko stosowana także dla stopów po obróbce cieplnej oraz stopów umacnianych wydzieleniowo. Badania nad procesem FSW są nadal prowadzone, by lepiej zrozumieć wszystkie aspekty tej techniki i wpływ różnych czynników na jakość połączenia.

Stopy aluminium mogą być zgrzewane wieloma metodami, między innymi stosuje się (Mukuna et al., 2019):

- Zgrzewanie tarciove
- Zgrzewanie elektronowe
- Zgrzewanie ultradźwiękowe
- Zgrzewanie wybuchowe
- Zgrzewanie iskrowe

3. Problem badawczy i zakres pracy

Utylitarnymi celami pracy jest dobór odpowiednich parametrów procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału (prędkość zgrzewania oraz prędkość obrotowa narzędzia) aby uzyskać zadawalające właściwości mechaniczne złącza oraz analiza wpływu kąta przyłożenia kołnierza narzędzia roboczego na jakość spoiny. Na podstawie analizy literatury oraz dostępnej wiedzy sformułowano następujący problem badawczy pracy.

Problem badawczy dotyczy uzyskania efektywność złącza na poziomie co najmniej 70%. Aby tego dokonać przeprowadzono szereg prób przy użyciu różnych parametrów procesu zgrzewania za pomocą dwóch autorskich narzędzi do zgrzewania wykonanych ze stali Vanadis 23.

Istotą zaproponowanych badań jest zbadanie właściwości mechanicznych oraz mikrostruktury złączy stopów aluminium 2024 T3 wykonanych metodą (FSW) zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału.

Cele badawcze:

1. Wzrost efektywności procesu spajania elementów metalowych struktur foteli samochodowych, poprzez zastąpienie aktualnego procesu nową metodą zgrzewania aluminium (zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem materiału). Aktualne metody to spawanie mag, tig.
2. Zaprojektowanie autorskich narzędzi do zgrzewania FSW (stal Vanadis 23) oraz analiza wpływu kąta przyłożenia kołnierza narzędzia na jakość spoiny.

Układ logiczny pracy:

1. Przegląd literatury dotyczącej procesu FSW, ogólnej charakterystyka stopów aluminium wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz przegląd metod łączenia stopów aluminium.
2. Opis metodyki badawczej.
3. Analiza otrzymanych wyników badań, w tym:
 - a. wytrzymałości na rozciąganie,
 - b. twardości,
 - I. spoiny,
 - II. trzpieni ze stopu Vanadis 23,
 - c. radiograficzne RT,
 - d. badania metalograficzne,
 - e. chropowatości
4. Dyskusja otrzymanych wyników badań.
5. Podsumowanie i wnioski końcowe.

4. Metodyka badawcza

4.1. Przygotowanie próbek do zgrzewania tarcowego z przemieszaniem.

Materiałem użytym w tym badaniu był stop aluminium 2024 T3, najważniejsze dodatki stopowe to magnez, miedź oraz mangan o stężeniu odpowiednio, 1.2-1.8%, 3.8-4.9% oraz 0.3-0.9%. Dokładny skład chemiczny stopu przedstawiono zgodnie europejską normą EN 573-1 w tabeli 4.1 (Michael et al., 2003).

Tabela 4. 1. Skład chemiczny stopu 2024.

Mg [%]	Mn [%]	Fe [%]	Si [%]	Si+Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]	Cr [%]	Mn+Cr [%]
1,20 - 1,80	0,30 - 0,90	≤0,50	≤0,50	-	3,80 - 4,90	≤0,25	≤0,10	-
Bi [%]	Ni [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zr [%]	Zr+Ti [%]	Inne [%]	Inne razem [%]	Al reszta
-	-	-	-	-	≤0,20	≤0,05	≤0,15	-

Stop ten ma bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe. (wytrzymałość na rozciąganie oraz dobra wytrzymałość zmęczeniowa), nie nadaje się do obróbki ubytkowej ponieważ jego wiór jest długi oraz posiada tendencję do ciągliwości. Posiada umiarkowana odporność na korozję oraz niską podatność na spawanie. Cechuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi zależne od obróbki cieplnej oraz wielkości odkształcenia tabela 4.2. Stany w jakich najczęściej występuje (Merati, 2005):

- O – wyżażony
- T3 – przesycony, a następnie odkształcony na zimno i poddany procesowi. naturalnego starzenia
- T351 – poddany obróbce cieplnej, odprężony i naturalnie starzony.

Tabela 4. 2. Właściwości mechaniczne stopu 2024-T3

<i>Właściwość</i>	<i>Wartość liczbowa</i>	<i>Jednostka</i>
Gęstość	2790	kg/cm ³
Ciepło właściwe	874	J/kgK
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	23,1	μm/mK
Liczba Poissona	0,33	-

Temperatura krzepnięcia	500	°C
Temperatura płynięcia	640	°C
Moduł sprężystości podłużnej E	73	GPa
Moduł sprężystości poprzecznej G	27,4	GPa
Granica plastyczności R ₀₂	290	MPa
Wytrzymałość na rozciąganie R _m	435	MPa
Wydłużenie A _{50mm}	14	%
Twardość	124	HB

Najczęstsze zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym oraz lotniczym. Badany materiał dostarczony został w postaci walcowanych. na zimno płyt o grubości 2.5 mm. Przed procesem FSW płyty, zostały oczyszczone. etanolem, a następnie wysuszone. Próbki FSW zostały następnie przygotowane przez zgrzewanie doczołowe dwóch podobnych arkuszy materiału (przy użyciu zmodyfikowanej frezarki (rys. 4.1.) i odpowiedniego systemu mocowania (rys. 4.2.).

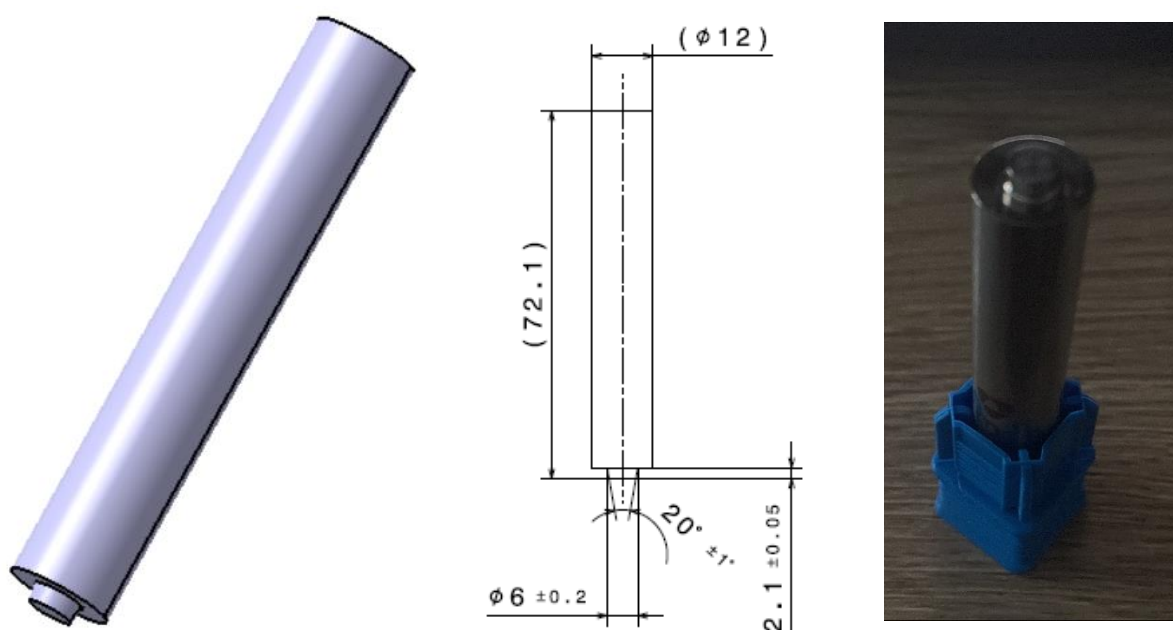


Rysunek 4. 1. Frezarka uniwersalna FWF 32J2 JAROCIN ze zmodyfikowanym stołem roboczym.



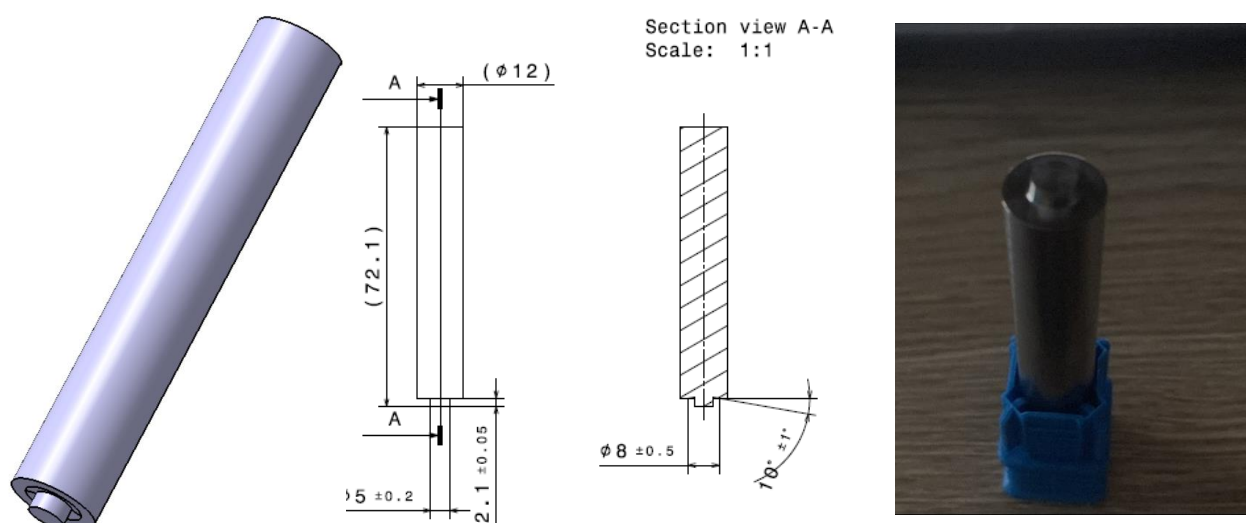
Rysunek 4. 2.. System mocowania łączonej blachy.

Próbki zgrzano za pomocą dwóch rodzajów autorskich narzędzi FSW, wykonanych ze stali proszkowej Vanadis 23. Narzędzie obracało się zgodnie ze wskazaniem wskazówek zegara. Średnica części roboczej narzędzia A. wynosiła 6mm w najszerszym miejscu o kształcie stożka z 20° kątem rozwarcia oraz wysokością 2.1mm. Natomiast średnica kołnierza wynosiła 12mm (rys. 4.3.).



Rysunek 4. 3. Narzędzie A użyte do zgrzewania stopu 2024 – T3.

Zaprojektowano również drugie narzędzie B. o średnicy roboczej trzpienia 5mm, średnicy kołnierza 12mm oraz ujemnym kącie przylegania do płaszczyzny zgrzewania wynoszącym 10° (rys. 4.4.).



Rysunek 4. 4. Narzędzie B użyte do zgrzewania stopu 2024 – T3.

Badanie zakładało przetestowanie dwóch najważniejszych parametrów zgrzewania (prędkości posuwu oraz obrotowej narzędzia).

Aby ocenić wpływ parametrów procesu FSW spoiny wykonano przy kilku różnych prędkościach obrotowych narzędzia oraz prędkościach posuwu. Tabela 4.3. zawiera parametry zastosowane w tym badaniu dla złączy doczołowych przy użyciu dwóch rodzajów narzędzia.

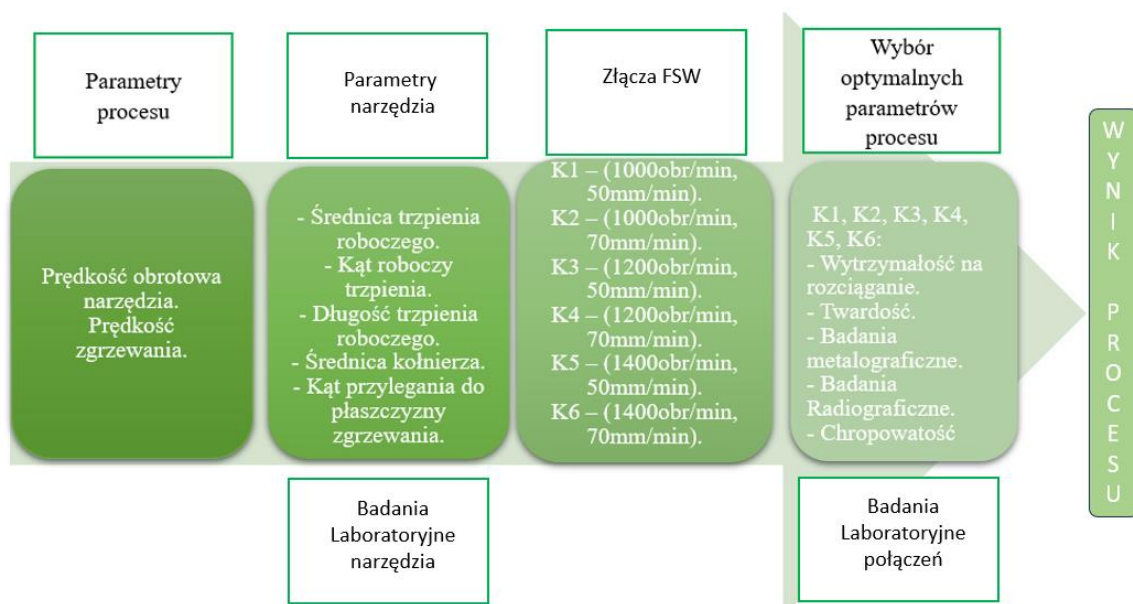
Tabela 4. 3. Parametry procesu Zgrzewania tarciovego z przemieszaniem materiału.

Prędkość obrotowa [obr/min]	Prędkość posuwu [mm/min]
1000	50
	70
1200	50
	70
1400	50
	70

Dla każdej z powyższych kombinacji przeprowadzono badania:

- a. wytrzymałości na rozciąganie,
- b. twardości
 - I. spoiny
 - II. trzpieni ze stopu Vanadis 23
- c. radiograficzne RT
- d. badania metalograficzne
- e. chropowatość

Poniżej zaprezentowano schemat blokowy agendy badawczego (rys 4.5):



K1, K2, K3, K4, K5, K6 – kombinacje złączy FSW wykonane z różnymi parametrami procesu

Rysunek 4. 5. Schemat blokowy agendy badawczej.

4.2. Badania wytrzymałości na rozciąganie.

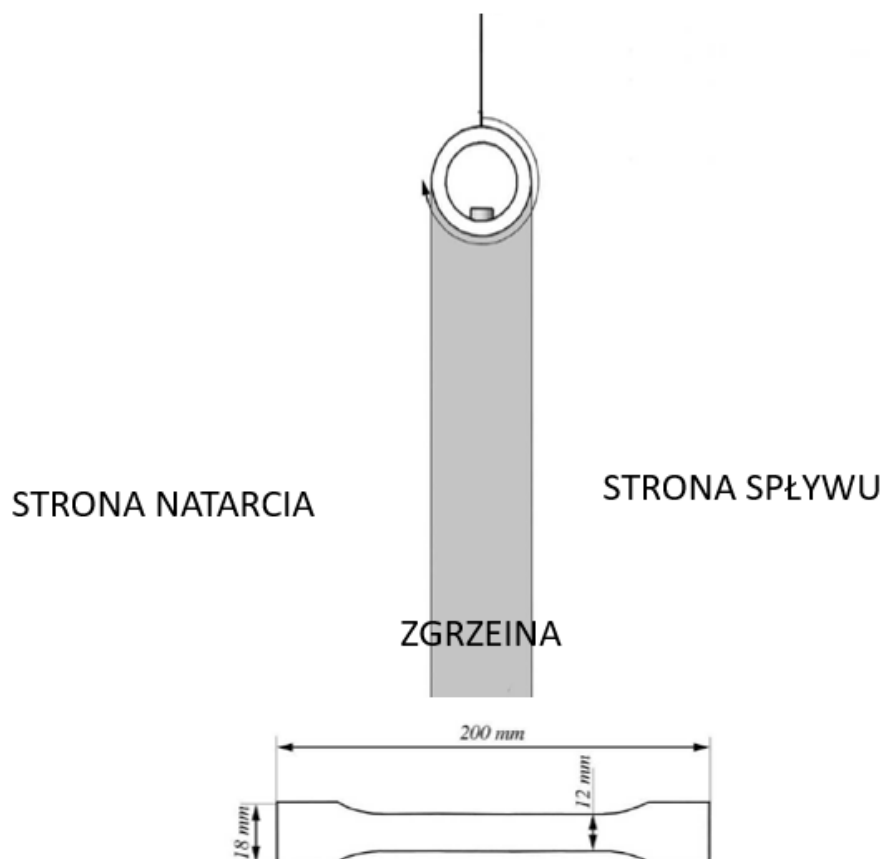
W celu przeprowadzenia badania wytrzymałości na rozciąganie, zgrzane materiały zostały poddane próbie jednoosiowego rozciągania na maszynie Zwick/Roell Z250 kN na podstawie normy PN-EN 10002-1 (rys. 4.6.).



Rysunek 4. 6. Maszyna Zwick/Roell Z250 kN.

Siłę zrywającą F_z mierzono przykładając wstępnie siłę wynoszącą 5N oraz z prędkością badania wynoszącą 0,2mm/s. W trakcie badania mierzono maksymalną wartość siły przenoszonej przez złącze, umowną granicę plastyczności ($R_{p0.2}$) oraz wytrzymałość złącza na rozciąganie. (R_m). Próbę przeprowadzono również dla rodzimego materiały w celu porównania wartości wytrzymałości do próbek poddanych procesowi zgrzewania.

Wymiary próbek poddanych zrywaniu zostały zastosowane zgodnie z normą PN-EN ISO 4136. Dla każdego parametru oraz narzędzia wycięto od sześciu do siedmiu próbek. W programie AutoCad stworzono rysunek wykorzystany przez maszynę sterowaną numerycznie do wycięcia próbek poprzecznie do kierunku zgrzeiny, schemat próbek zaprezentowano na poniższym rysunku (Rys. 4.7.).



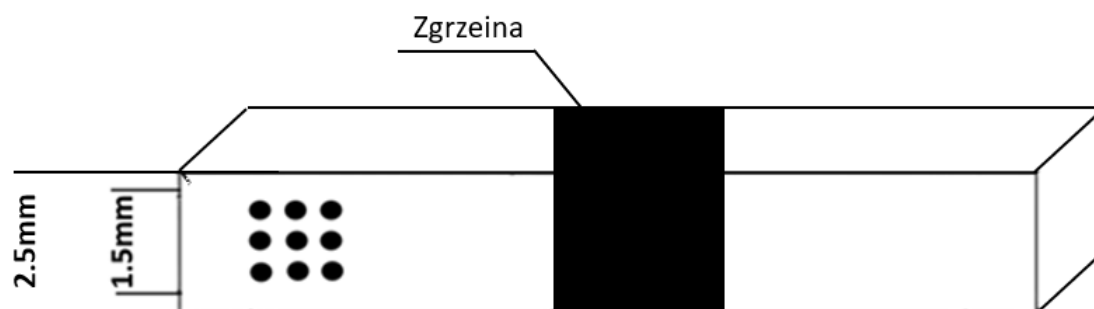
Rysunek 4. 7. Kształt oraz wymiary próbki.

Pełna długość próbek testowych wynosi 200 mm, natomiast długość pomiarowa 120 mm. Szerokość obszaru pomiarowego wynosiła również 12 mm. Przejście pomiędzy częścią chwytową do maszyny zrywającej, a częścią pomiarową jest wykonane jako łagodna krzywizna o dużym promieniu, w celu uniknięcia ostrych krawędzi, aby uniknąć koncentracji naprężeń, które mogłyby negatywnie wpłynąć na wyniki analizy.

4.3. Badania twardości

- a. Próbki do pomiarów twardości zostały wycięte w poprzek zgrzeiny i przycięte do koło 3 cm szerokości dla wszystkich kombinacji prędkości obrotowych oraz posuwu. Próbki zostały wypolerowane mechanicznie, zgodnie ze standardowymi procedurami przy użyciu papieru ściernego o ziarnistości od 80 do 1200, a następnie pasty korundowej na polerze tkaninowej. Gdy próbki były wolne od zadrapań, były gotowe do pomiarów twardości zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Używając twardościomierza LEITZ Miniland II przy obciążeniu 245.2v [Nm] i czasie obciążenia

10 sekund, pomiary twardości zostały zarejestrowane wzdłuż linii środkowej przekroju spoiny w kolejnych odstępach co około $500\mu\text{m}$. Wizualizacja rozmieszczenia punktów pomiarowych została zaprezentowana na poniższym rysunku (rys.4.8.). Badanie przeprowadzono w trzech rzędach co 0.5mm w osi X oraz co 0.5mm w osi Y, tak aby uśrednić twardość badanego przekroju.



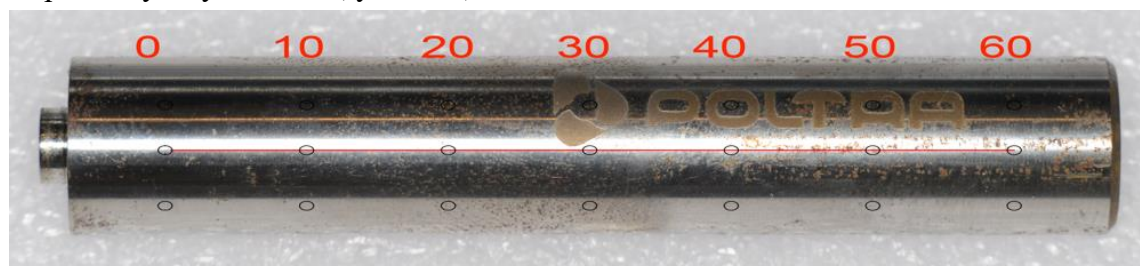
Rysunek 4. 8. Wizualizacja rozmieszczenia punktów pomiarowych.

- b. Przeprowadzono również badanie twardości narzędzi użytych w procesie zgrzewania tarciovego. Badaniu poddano oba rodzaje narzędzia zarówno część roboczą narzędzia jak i część chwytową. W części roboczej twardość zbadano w trzech miejscach (rys. 4.9.).



Rysunek 4. 9. Schemat badania twardości części roboczej narzędzia FSW.

Natomiast część chwytową narzędzia poddano badaniu w siedmiu miejscach zgodnie z poniższym rysunkiem (rys. 4.10.).



Rysunek 4. 10. Schemat badania twardości części chwytowej narzędzia.

4.4. Badanie radiograficzne RT.

Kontrola rentgenowska została przeprowadzona na zgrzanych blachach przy użyciu przenośnej jednostki radiograficznej o kierunkowej lampie głowicowej RTG 200 kV, chłodzonej powietrzem marki Eresco 42 MF2. Dane techniczne urządzenia przedstawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4. 4. Dane techniczne jednostki radiograficznej Eresco 42 MF2.

Typ lampy RTG	200 kV, metalowo-ceramiczna z wolframową anodą
Zakres	kV 5 - 200 kV (zgodnie z charakterystyką mocy)
Kąt pochylenia anody	20°
Filtracja własna	0,8 mm ± 0,1 mm, Be
Wiązka wychodząca	40° x 60°, eliptyczna
Wielkość ogniska (EN 12543)	3,0 mm (~ 1,5 IEC 336)
Prąd lampy	0,5 - 10 mA (4,5 mA / 200 kV)
Temperatura anody	max. 100 °C
Stabilność prądu i napięcia	±1 %
Moc przy pracy ciągłej	900 W
Cykl pracy	(Tot = 30 °C) 100 %
Moc wejściowa	max. 1,6 kVA
Waga	26,8 kg
Średnica głowicy lampy	160 mm (bez pierścieni)
Klasa ochrony	IP 65
Temperatura robocza	-20 do +50 °C
Temperatura składowania	-30 do +80 °C

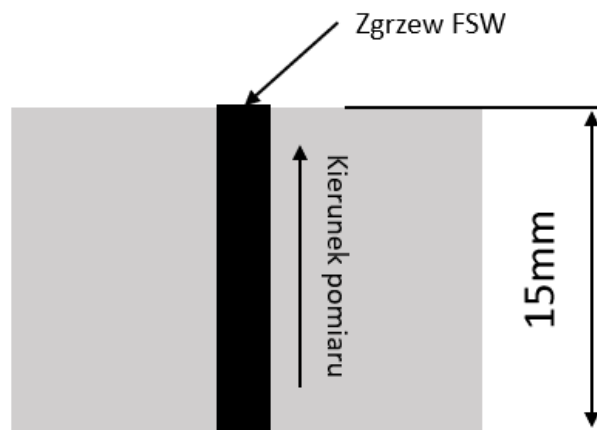
4.5. Badania metalograficzne

Próbki do badań makroskopowych zostały przygotowane podobnie jak do badań twardości. Zostały mechanicznie wycięte za pomocą piły taśmowej z chłodzeniem olejem emulgującym 5% ze spoin dla wszystkich kombinacji parametrów procesu, zatopione w żywicy i mechanicznie szlifowane i polerowane przy użyciu tarcz ściernych i ściereczek z wodną zawiesiną cząstek diamentu. Wszystkie próbki zostały wypolerowane, aż powierzchnia była wolna od skaz i miała lustrzane wykończenie. Następnie próbki wytrawiono w odczynniku HF przez 90 sekund następnie przemyto w wodzie destylowanej i acetonie. Po wytrawieniu próbek metalograficznych zostały one poddane obserwacji przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Olympus X-TR z automatycznym ogniskowaniem

wspomagany komputerowo, zakres pomiarowy powiększenia od 6.3 do 80 razy. Do badań metalograficznych mikroskopowych użyto mikroskopu metalograficznego Nikon M z obrazowaniem / profilowaniem 3D. Próbki do badań metalograficznych zostały wycięte za pomocą przecinarki metalograficznej Buehler Metaserv tarczą Struers 40A25, następnie szlifowano je na mokro papierem o różnej gradacji od 220 do 4000, następnie poddano polerowaniu za pomocą sukna polerskiego Struers DP-Mol z dodatkiem zawiesiny diamentowej 1 μ m na szlifierko polecre Struers TegraPol 35. Trawienie przeprowadzono w odczynniku HF przez 30 sekund następnie w odczynniku HCL + HNO₃ przez 10 sekund, następnie przemyto wodą destylowaną i acetonem. W ostatnim etapie próbki poddano obserwacji pod mikroskopem metalograficznym, który pozwolił na szczegółowe zbadanie mikrostruktury materiału, identyfikację różnych faz i zanieczyszczeń, a także na ocenę jakości spoiny. Badania te przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17639, która określa standardy obserwacji i analizy struktury. Analiza metalograficzna ma kluczowe znaczenie nie tylko w kontroli jakości procesów spawalniczych, ale także w badaniach rozwojowych nowych materiałów i technologii spawania. Pozwala na precyzyjną ocenę wpływu różnych parametrów procesu spawania na mikrostrukturę złącza.

4.6. Badanie chropowatości

Kolejnym badaniem jakie przeprowadzono jest badanie chropowatości powierzchni spoiny oraz blachy surowej. Chropowatość powierzchni blachy i zgrzewanych elementów zmierzono za pomocą testera chropowatości powierzchni MarSurf PS 10 (3557) dla sześciu próbek zgrzewu jednej próbki blachy surowej oraz blachy obrobionej ściernie przed procesem zgrzewania. Chropowatość powierzchni zmierzono dla elementów na całej długości ściegu spoiny (rys 4.11.) Zgodnie z normą ISO 16610-21.



Rysunek 4. 11. Schemat próbek testowych pokazujący pomiar chropowatości powierzchni.

Długość próbkowania odczytów chropowatości wynosiła 15mm przy stałej prędkości odczytu 0,5 mm/s, dla każdej próbki wygenerowano 30000 punktów pomiarowych. Zbadano również wpływ prędkości obrotowej na chropowatość powierzchni próbek zgrzewanych tarciovo z przemieszaniem.

5. Wyniki badań

5.1. Wytrzymałość na rozciąganie

Badaniu wytrzymałości na rozciąganie poddano próbki uzyskane ze zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału dla wszystkich kombinacji prędkości obrotowych i posuwu maszyny oraz dla materiału rodzimego. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie dla średniej arytmetycznej z dziesięciu pomiarów dla wszystkich kombinacji prędkości obrotowych oraz posuwu zamieszczono w tabeli. 5.1. (Dane z pomiarów zamieszczone w załączniku tabela. 5.1.).

Tabela 5. 1. Średnia wytrzymałość na rozciąganie próbek zgrzewanych metodą FSW oraz materiału rodzimego wraz z obliczeniami statystycznymi dla wartości ufności 95%.

a. Narzędzie A.

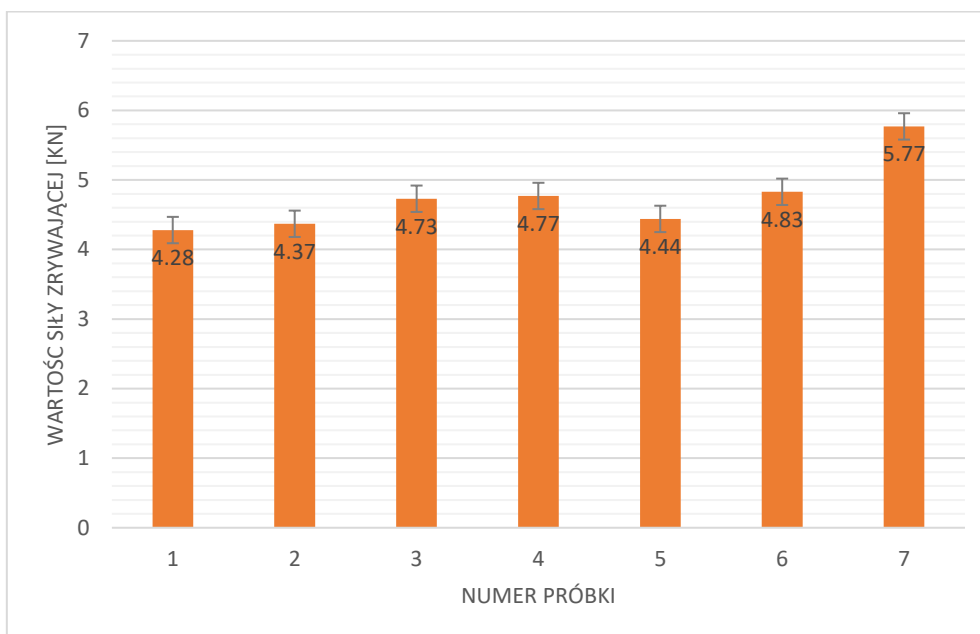
Lp	V [obr/mi n]	P [mm/mi n]	F_z [kN]	Odchylenie standardow e [kN]	Wsp. zmie nności[%]	Ufność [kN]	Predział ufności [kN]	Rm [Mpa]	Rp02 [Mpa]
1.	1000	50	4.28	0.25	5.77	0.15	4.28+/-0.15	338. 5	288. 2
2.	1000	70	4.37	0.14	3.27	0.09	4.37+/- 0.09	340. 2	290. 1
3.	1200	50	4.73	0.16	3.29	0.1	4.73+/-0.1	377. 7	304. 2
4.	1200	70	4.77	0.14	2.97	0.09	4.77+/- 0.09	379. 7	307. 8
5.	1400	50	4.44	0.23	5.25	0.14	4.44+/- 0.14	342. 4	293. 6
6.	1400	70	4.83	0.15	3.15	0.09	4.83+/- 0.09	379. 3	302. 5
7.	Materiał rodzimy stop 2024-T3		5,77	0.16	2.8	0.18	5.77+/- 0.18	468	365. 8

b. Narzędzie B.

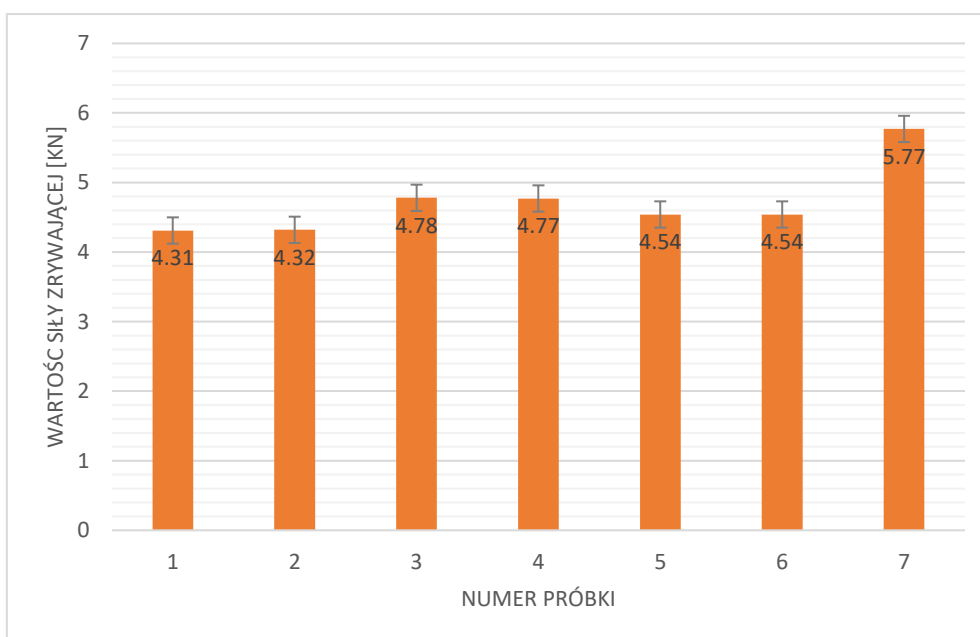
Lp	V [obr/mi n]	P [mm/mi n]	F _z [kN]	Odchylenie standardow e [kN]	Wsp. zmie nności[%]	Ufność [kN]	Predział ufności [kN]	Rm [Mpa]	Rp02 [Mpa]
1.	1000	50	4.31	0.1	4.37	0.12	4.31+/-0.12	334. 3	285. 5
2.	1000	70	4.32	0.07	4.27	0.08	4.32+/- 0.08	343. 1	288. 5
3.	1200	50	4.78	0.14	2.84	0.15	4.78+/- 0.15	375. 2	308. 1
4.	1200	70	4.77	0.09	2.67	0.09	4.77+/- 0.09	377. 6	305. 3
5.	1400	50	4.54	0.1	1.95	0.12	4.54+/- 0.12	340. 1	292. 1
6.	1400	70	4.54	0.07	1.6	0.08	4.54+/- 0.08	342. 4	290. 2
7.	Materiał rodzimy stop 2024-T3		5,77	0.16	2.8	0.18	5.77+/- 0.18	468	365. 8

Otrzymane wyniki średnich sił zrywających wahają się w przedziale od około 4.28kN siły zrywającej dla prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz prędkości posuwu wynoszącej 50mm/min do najlepszych wartości około 4.83kN dla prędkości obrotowej 1400 obr/min oraz prędkości posuwu 70 mm/min dla narzędzia A oraz 4.31kN przy prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz posuwie 50mm/min do 4.78kN dla prędkości obrotowej 1200 obr/min i prędkości posuwu wynoszącej 50mm/min. Można zauważyć, że wartości te są niższe od wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego o około 24% dla najgorszej próbki oraz o około 15% dla próbek o najlepszych właściwościach na rozciąganie. Można zauważyć również, że najlepsze wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskuje się dla wartości posuwu wynoszącej 70 mm/min, natomiast najbardziej optymalną prędkością obrotową jest wartość 1200 obr/min, dla większych wartości nie odnotowano znaczącej poprawy wytrzymałości na rozciąganie próbek. Na podstawie otrzymanych wyników średnich sił zrywających sporządzono wykres maksymalnej siły zrywającej dla poszczególnych parametrów procesu wraz z zaznaczonym

przedziałem ufności (rys.5.1, rys. 5.2.). Ponadto można stwierdzić, że kształt narzędzia nie ma znaczącego wpływu na wytrzymałość uzyskanego połączenia.

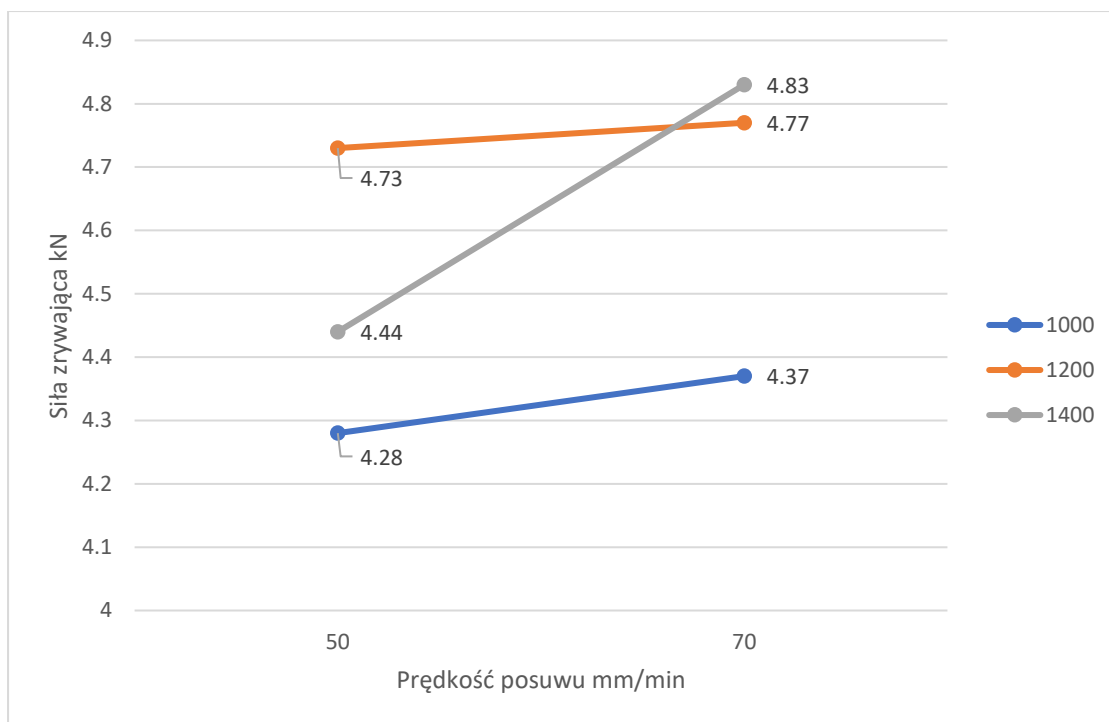


Rysunek 5. 1. Wartość średniej siły zrywającej wraz z przedziałem ufności dla narzędzia A.

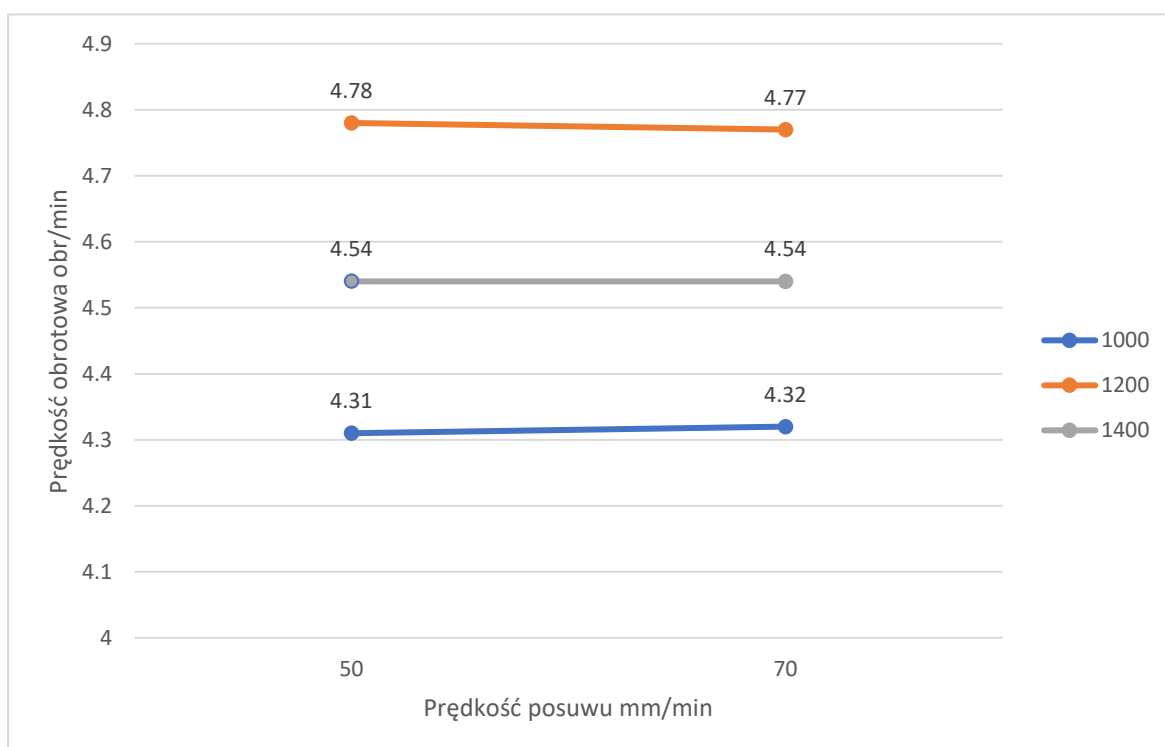


Rysunek 5. 2. Wartość średniej siły zrywającej wraz z przedziałem ufności dla narzędzia B.

Kolejnym krokiem była analiza zależności pomiędzy maksymalną siłą zrywającą przenoszoną przez złącze, a prędkością zgrzewania. Można zauważyć, że minimalnie lepsze wartości uzyskano dla wartości posuwu 70mm/min dla narzędzia A (rys. 5.3.), natomiast dla narzędzia B nie zaobserwowano znaczących różnic siły zrywającej pomiędzy prędkością zgrzewania 50mm/min, a 70mm/min (rys. 5.4.).

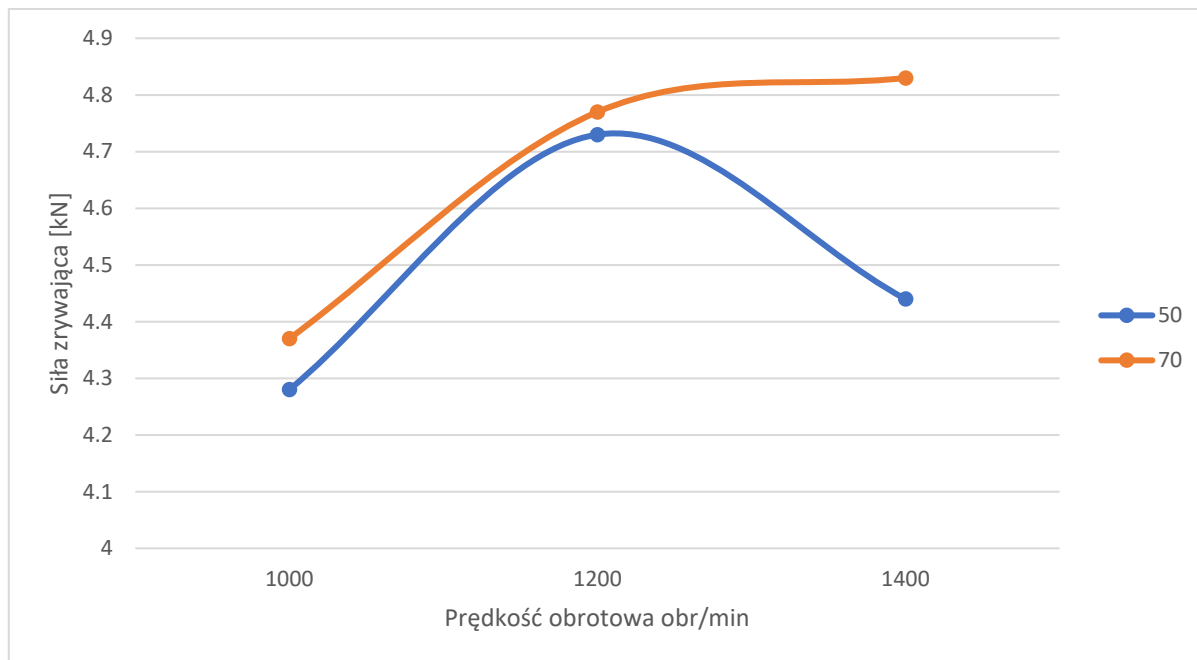


Rysunek 5. 3. Wykres maksymalnej siły zrywającej przenoszonej przez złącze zgrzewane metodą FSW w stosunku do prędkości posuwu – narzędzie A.

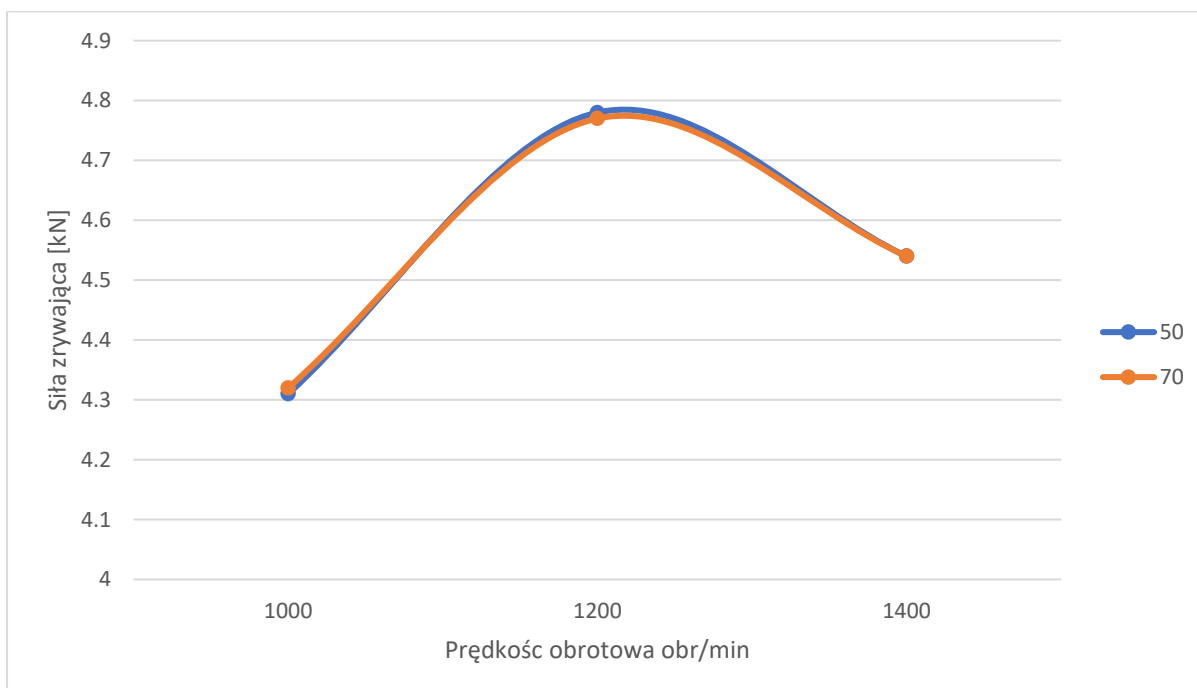


Rysunek 5. 4. Wykres maksymalnej siły zrywającej przenoszonej przez złącze zgrzewane metodą FSW w stosunku do prędkości posuwu – narzędzie B.

Wykres siły zrywającej w funkcji prędkości posuwu (rys. 5.3. i rys. 5.4.) wskazuje na liniowy charakter wpływu zmiany prędkości posuwu na wartość siły przenoszonej przez zgrzeinę.



Rysunek 5. 5. Wykres siły maksymalnej przenoszonej przez złącze zgrzewane w funkcji zmiany prędkości obrotowej wrzeciona dla narzędzia A.



Rysunek 5. 6. Wykres siły maksymalnej przenoszonej przez złącze zgrzewane w funkcji zmiany prędkości obrotowej wrzeciona dla narzędzia B.

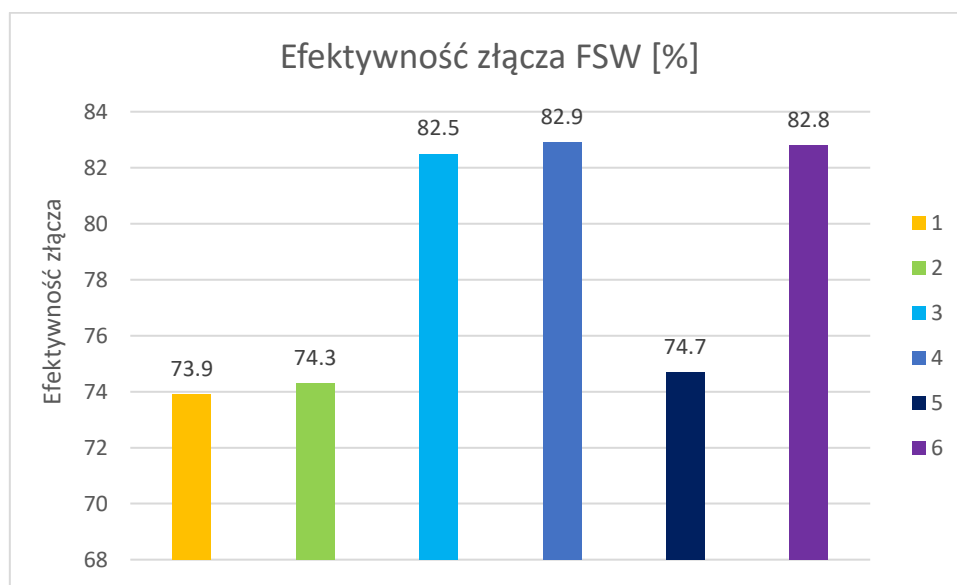
W przypadku wykresu zależności maksymalnej siły przenoszonej przez złącze w funkcji zmiany prędkości obrotowej dla narzędzia A (rys. 5.5.) można zauważyć sporą dewiację dla prędkości obrotowej 1400 obr/min krywe przyporządkowane odpowiednim prędkościom posu wu różnią się od siebie. Natomiast wykres dla narzędzia B (rys. 5.6.) przebiega w bardzo charakterystyczny sposób. Charakterystyki są nieliniowe w przybliżeniu obrazują trend początkowego wzrostu wytrzymałości na rozciąganie do prędkości 1200 obr/min i obniżenia wartości siły zrywającej powyżej tej wartości prędkości. Należy jednak zwrócić uwagę, że tego typu analiza porównawcza jest niewystarczająca do oceny całkowitego wpływu zmiany określonych parametrów procesu na jakość utworzonego połączenia zgrzewanego. Następnym krokiem jest obliczenie efektywności złącza aby móc w przejrzysty sposób ocenić jakość połączenia. Efektywność złącza określa się za pomocą prostego wzoru: zbadana wartość wytrzymałości na rozciąganie R_m do wytrzymałości na rozciąganie rodzimego materiału $\times 100\%$. Obliczone wartości efektywności złącza zostały zamieszczone w tabeli 5.2 oraz 5.3, oraz zobrazowane za pomocą wykresu słupkowego (rys.5.7, rys.5.8.).

Tabela 5. 2. Wartość efektywności złącza FSW – narzędzie A.

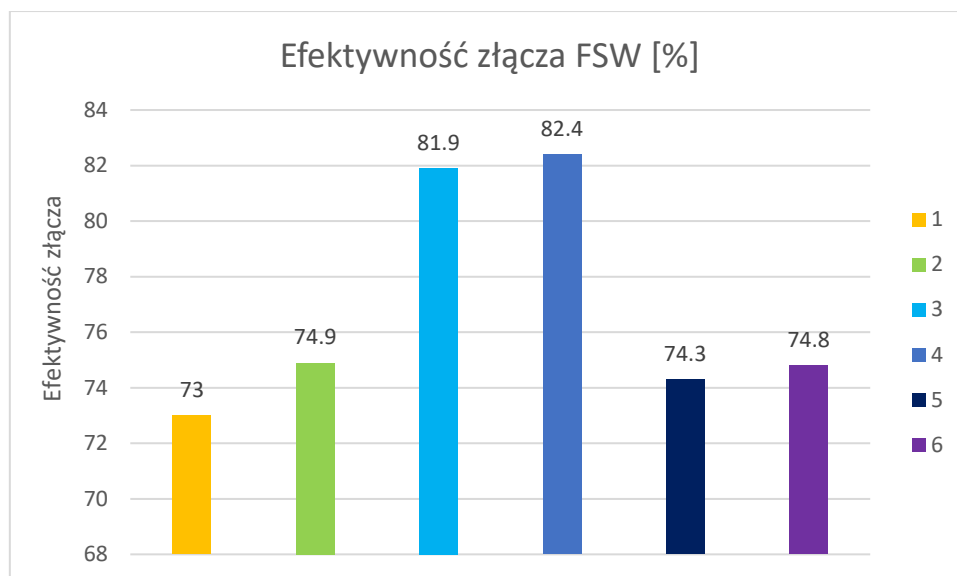
Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	R_m [Mpa]	Efektywność złącza [%]
1.	1000	50	338.5	73.9
2.	1000	70	340.2	74.3
3.	1200	50	377.7	82,5
4.	1200	70	379.7	82.9
5.	1400	50	342.4	74.7
6.	1400	70	379.3	82.8
11	Materiał rodzimy		458	—

Tabela 5. 3. Wartość efektywności złącza FSW – narzędzie B.







Lp.	V[obr/min]	P[mm/min]	Rm [Mpa]	Efektywność złącza [%]
1.	1000	50	334.3	73.9
2.	1000	70	343.1	74.3
3.	1200	50	375.2	82,5
4.	1200	70	377.6	82.4
5.	1400	50	340.1	74.3
6.	1400	70	342.4	74.8
11	Materiał rodzimy		458	—



Rysunek 5. 7. Wykres przedstawiający efektywności złącza w zależności od parametrów – narzędzie A.



Rysunek 5. 8. Wykres przedstawiający efektywności złącza w zależności od parametrów – narzędzie B.

	-	1000 obr/min; 50mm/min
	-	1000 obr/min; 70mm/min
	-	1200 obr/min; 50mm/min
	-	1200 obr/min; 70mm/min
	-	1400 obr/min; 50mm/min
	-	1400 obr/min; 70mm/min

Najmniejsza wartość efektywności, a więc najmniejszą wytrzymałość w przeprowadzonym badaniu przypada na próbkę zgrzewaną narzędziem B z prędkością obrotową 1000 obr/min i prędkością posuwu równą 50 mm/min - wynosi 73%. Natomiast największą wytrzymałość posiada zgrzeina utworzona narzędziem A z parametrami zgrzewania 1200 obr/min i posuwem równym 70 mm/min, której wartość efektywności złącza to 82.9%. Jednak należy zauważyć, że aż pięć wartości osiąga efektywność na poziomie ok: 82%. W obszarze zmian parametrów dla tych pięciu próbek znajdują się najwyższe wartości zmierzonej wytrzymałości badanych próbek. Znacząca różnica w zmierzonej wartości wytrzymałości złącza pomiędzy próbką zgrzewaną parametrami 1200 obr/min i 70 mm/min, a próbką 1000 obr/min i 50 mm/min, która wynosi dla efektywności złącza około 10% może wynikać z niewłaściwie dobranych parametrów zgrzewania.

5.2. Twardość

5.2.1. Twardość złącza FSW

Pomiary wykonano dla wszystkich złączy wykonanych metodą FSW (dla wszystkich prędkości obrotowych oraz prędkości posuwu) na górnej powierzchni złącza. Wszystkie badania wykonano na przekrojach wzdłużnych próbek w maksymalnej odległości 20mm od centrum zgrzeiny przy stałej temperaturze 21.6° C oraz stałej wilgotności 51%. (Dane z pomiarów twardości zamieszczone w załączniku tabela. XX). Średnie wyniki pomiarów twardości zamieszczono w tabelach poniżej, tab.5.4. oraz wykresach (rys. 5.9.).

Tabela 5. 4. Średnie wyniki pomiarów twardości dla wszystkich kombinacji prędkości obrotowych wrzecion oraz prędkości posuwu.

a. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie A

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	98.7	0.19	0.197	0.22	98.7+/-0.22
2.	5	82.2	0.16	0.19	0.18	82.2+/-0.18
3.	10	90.5	0.12	0.13	0.13	90.5+/-0.13
4.	15	108.4	0.13	0.12	0.14	108.4+/-0.14
5.	20	121	0.05	0.04	0.06	121+/-0.06
6.	-5	81.4	0.13	0.16	0.15	81.4+/-0.15
7.	-10	90.8	0.06	0.06	0.06	90.8+/-0.06
8.	-15	107.4	0.08	0.09	0.07	107.4+/-0.07
9.	-20	119.5	0.08	0.07	0.09	119.5+/-0.09

a1. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1	0	99.1	0.14	0.14	0.15	99.1+/-0.15
2	5	82.9	0.12	0.13	0.14	82.9+/-0.14
3	10	90.5	0.12	0.12	0.13	90.5+/-0.13
4	15	107.8	0.04	0.4	0.4	107.8+/-0.04
5	20	120.6	0.06	0.06	0.07	120.2+/-0.07
6	-5	81.4	0.13	0.13	0.15	81.4+/-0.15
7	-10	91	0.08	0.08	0.09	91+/-0.09
8	-15	106.8	0.04	0.04	0.05	106.8+/-0.05
9	-20	120.7	0.14	0.14	0.15	120.7+/-0.15

b. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min -narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	98.7	0.06	0.06	0.07	98.7+/-0.07
2.	5	83.2	0.14	0.16	0.15	83.2+/-0.15
3.	10	90.7	0.04	0.04	0.04	90.7+/-0.04
4.	15	108.4	0.02	0.02	0.02	108.4+/-0.02
5.	20	122	0.09	0.07	0.1	122+/-0.1
6.	-5	80.6	0.08	0.10	0.09	80.6+/-0.09
7.	-10	90.5	0.11	0.12	0.13	90.5+/-0.13
8.	-15	106	0.12	0.11	0.13	106+/-0.13
9.	-20	120.9	0.02	0.02	0.02	120.9+/-0.02

b1. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1	0	98.9	0.16	0.16	0.18	98.9+/-0.07
2	5	82.7	0.09	0.09	0.1	82.7+/-0.1
3	10	90.5	0.12	0.12	0.13	90.5+/-0.13
4	15	108.8	0.08	0.08	0.09	108.8+/-0.09
5	20	121.6	0.07	0.07	0.08	121.6+/-0.08
6	-5	81.3	0.13	0.13	0.14	81.3+/-0.14
7	-10	91.4	0.07	0.07	0.08	91.4+/-0.08
8	-15	106.4	0.06	0.06	0.06	106.4+/-0.06
9	-20	120.6	0.12	0.12	0.14	120.6+/-0.14

c. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	104.9	0.03	0.03	0.03	104.9+/-0.03
2.	5	85.3	0.06	0.07	0.07	85.3+/-0.07
3.	10	92.6	0.07	0.08	0.08	92.6+/-0.08
4.	15	110	0.03	0.03	0.03	110+/-0.03
5.	20	120	0.04	0.03	0.04	120+/-0.04
6.	-5	80.2	0.02	0.02	0.02	80.2+/-0.02
7.	-10	88.8	0.02	0.02	0.02	88.8+/-0.02
8.	-15	105.2	0.02	0.02	0.02	105.2+/-0.02
9.	-20	119.4	0.02	0.02	0.02	119.4+/-0.02

c1. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1	0	104.1	0.04	0.04	0.05	104.1+/-0.05
2	5	85.2	0.09	0.09	0.1	85.2+/-0.07
3	10	92.3	0.13	0.13	0.15	92.3+/-0.15
4	15	110.1	0.12	0.12	0.14	110.1+/-0.14
5	20	120.8	0.13	0.12	0.14	120.8+/-0.14
6	-5	80.2	0.03	0.03	0.04	80.2+/-0.04
7	-10	88.8	0.04	0.04	0.04	88.8+/-0.04
8	-15	105.3	0.07	0.07	0.08	105.3+/-0.08
9	-20	119.4	0.06	0.06	0.07	119.4+/-0.07

d. Prędkość obrotowa 1000obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	88.7	0.05	0.05	0.05	88.7+/-0.05
2.	5	80.4	0.03	0.04	0.04	80.4+/-0.04
3.	10	90.1	0.04	0.04	0.04	90.1+/-0.04
4.	15	104.8	0.03	0.03	0.03	104.8+/-0.03
5.	20	119.1	0.03	0.02	0.03	119.1+/-0.03
6.	-5	79.4	0.02	0.03	0.03	79.4+/-0.03
7.	-10	89.9	0.03	0.03	0.04	89.9+/-0.04
8.	-15	103.7	0.02	0.02	0.03	103.7+/-0.02
9.	-20	118.8	0.03	0.03	0.04	118.8+/-0.04

d1. Prędkość obrotowa 1000obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1	0	88.3	0.04	0.04	0.04	88.3+/-0.04
2	5	80.6	0.03	0.04	0.04	80.6+/-0.04
3	10	90.1	0.05	0.06	0.06	90.1+/-0.08
4	15	104.7	0.04	0.04	0.04	104.7+/-0.04
5	20	119.4	0.04	0.05	0.05	119.4+/-0.05
6	-5	79.3	0.06	0.07	0.07	79.3+/-0.07
7	-10	89.2	0.04	0.05	0.05	89.2+/-0.05
8	-15	103.6	0.08	0.1	0.1	103.6+/-0.1
9	-20	118.5	0.06	0.07	0.07	118.5+/-0.07

e. Prędkość obrotowa 1200obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	94.3	0.06	0.06	0.06	94.3+/-0.06
2.	5	82.3	0.02	0.03	0.03	82.3+/-0.03
3.	10	95	0.03	0.03	0.03	95+/-0.04
4.	15	109.2	0.02	0.02	0.02	109.2+/-0.02
5.	20	120.1	0.02	0.02	0.02	120.1+/-0.02
6.	-5	81.1	0.02	0.03	0.03	81.1+/-0.03
7.	-10	104.8	0.03	0.03	0.03	104.8+/-0.04
8.	-15	110.4	0.02	0.02	0.02	110.4+/-0.02
9.	-20	120.3	0.02	0.02	0.02	120.3+/-0.02

e1. Prędkość obrotowa 1200obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1	0	94	0.04	0.04	0.04	94+/-0.04
2	5	81.8	0.12	0.13	0.13	81.8+/-0.13
3	10	95.4	0.07	0.08	0.08	95.4+/-0.08
4	15	109.3	0.03	0.04	0.04	109.3+/-0.04
5	20	119.9	0.1	0.11	0.11	119.9+/-0.11
6	-5	80.8	0.1	0.11	0.12	80.8+/-0.12
7	-10	103.9	0.06	0.06	0.07	103.9+/-0.7
8	-15	110.2	0.05	0.06	0.06	110.2+/-0.06
9	-20	119.9	0.08	0.08	0.09	119.9+/-0.09

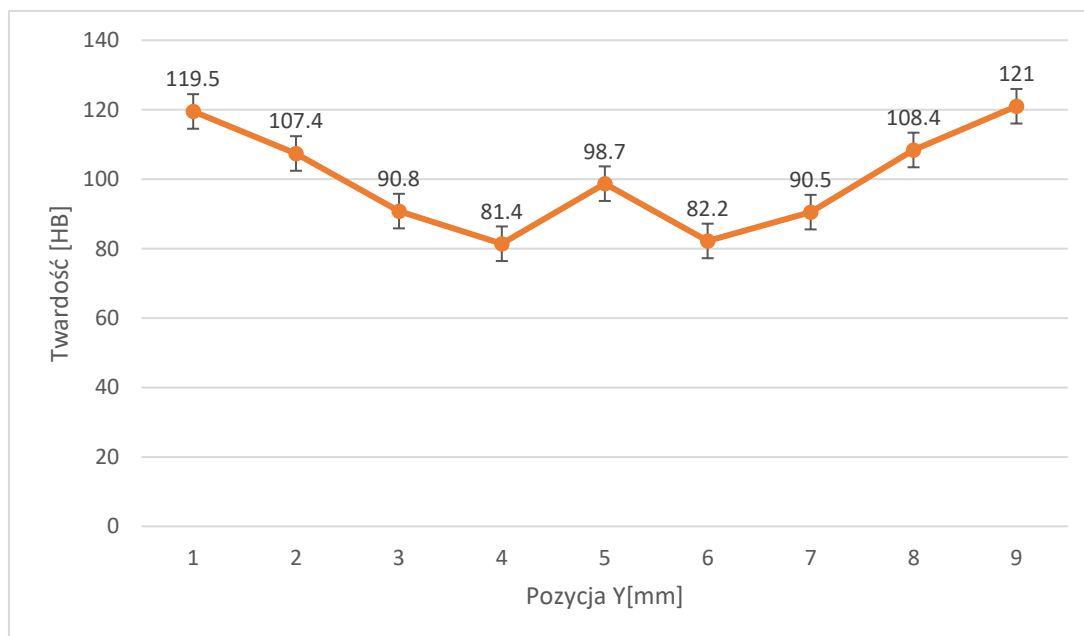
f. Prędkość obrotowa 1400obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	104.2	0.05	0.05	0.06	104.2+/-0.06
2.	5	82.2	0.01	0.01	0.01	82.2+/-0.01
3.	10	90.5	0.06	0.07	0.07	90.5+/-0.07
4.	15	108	0.02	0.01	0.02	108+/-0.02
5.	20	119.7	0.05	0.04	0.06	119.7+/-0.06
6.	-5	81.8	0.02	0.02	0.02	81.8+/-0.02
7.	-10	104.2	0.01	0.01	0.02	104.2+/-0.02
8.	-15	109.5	0.03	0.03	0.04	109.5+/-0.04
9.	-20	121	0.03	0.03	0.04	121+/-0.04

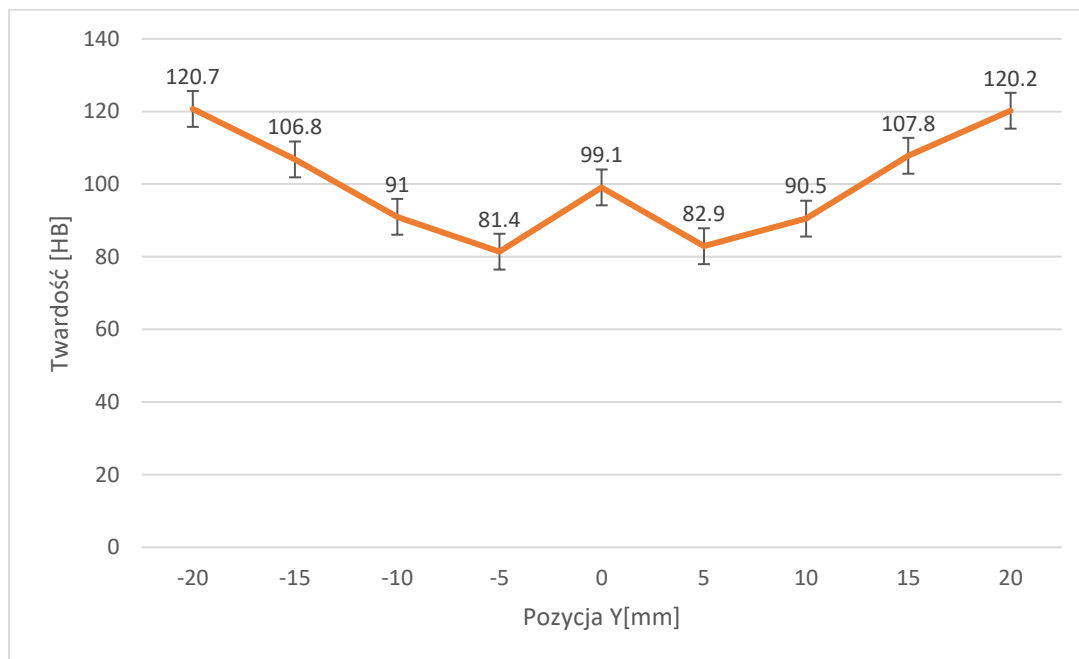
f1. Prędkość obrotowa 1400obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Średnia twardość [HB]	Odchylenie standardowe [HB]	Wsp. Zmienności [%]	Ufność [HB]	Przedział ufności [HB]
1.	0	103.9	0.05	0.05	0.06	103.9+/-0.06
2.	5	81.6	0.1	0.1	0.12	81.6+/-0.12
3.	10	90.8	0.11	0.11	0.12	90.8+/-0.12
4.	15	108	0.01	0.01	0.02	108+/-0.02
5.	20	119.6	0.01	0.01	0.02	119.6+/-0.02
6.	-5	81.3	0.08	0.08	0.09	81.3+/-0.09
7.	-10	104.3	0.07	0.07	0.08	104.3+/-0.08
8.	-15	109.8	0.11	0.11	0.13	109.8+/-0.13
9.	-20	121	0.08	0.08	0.09	121+/-0.09

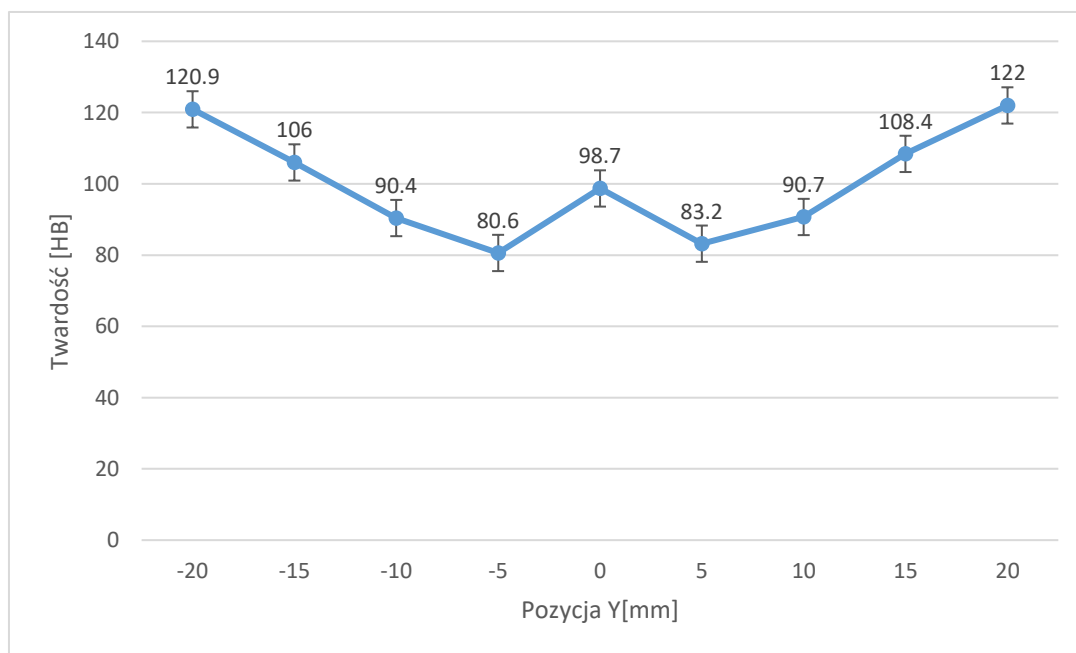
a. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, posuwu 50mm/min – narzędzie A



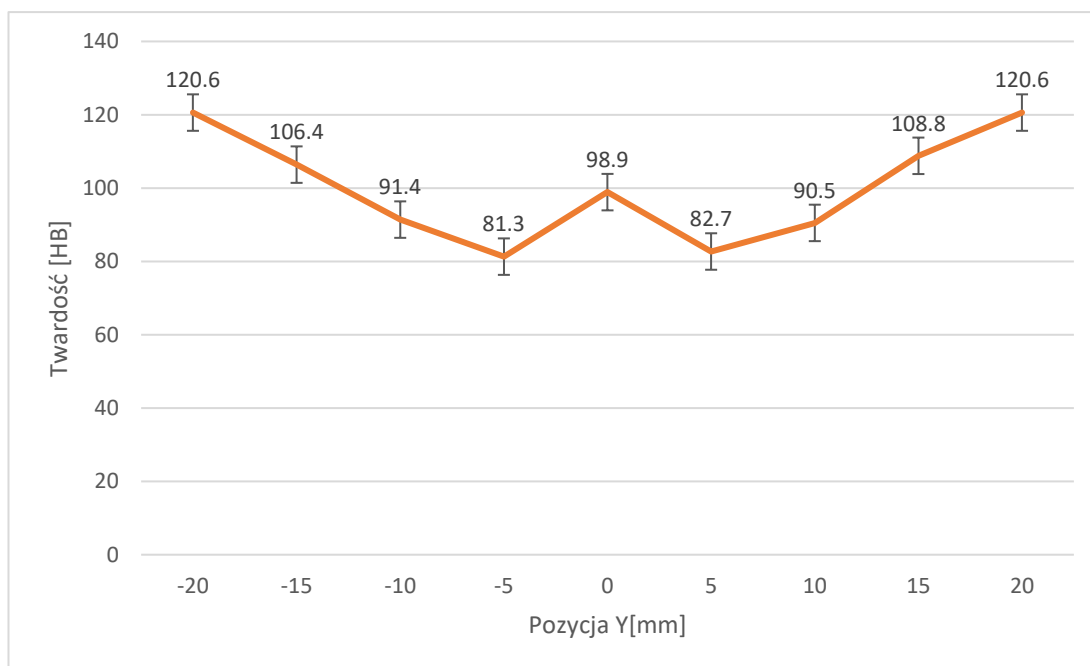
a1. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.



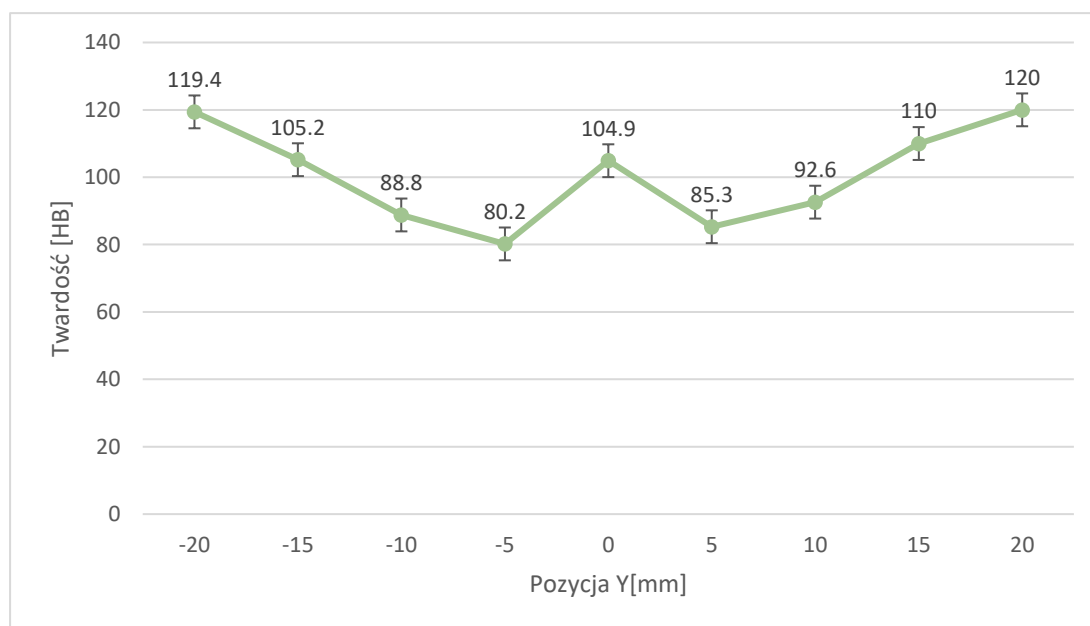
b. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min -narzędzie A.



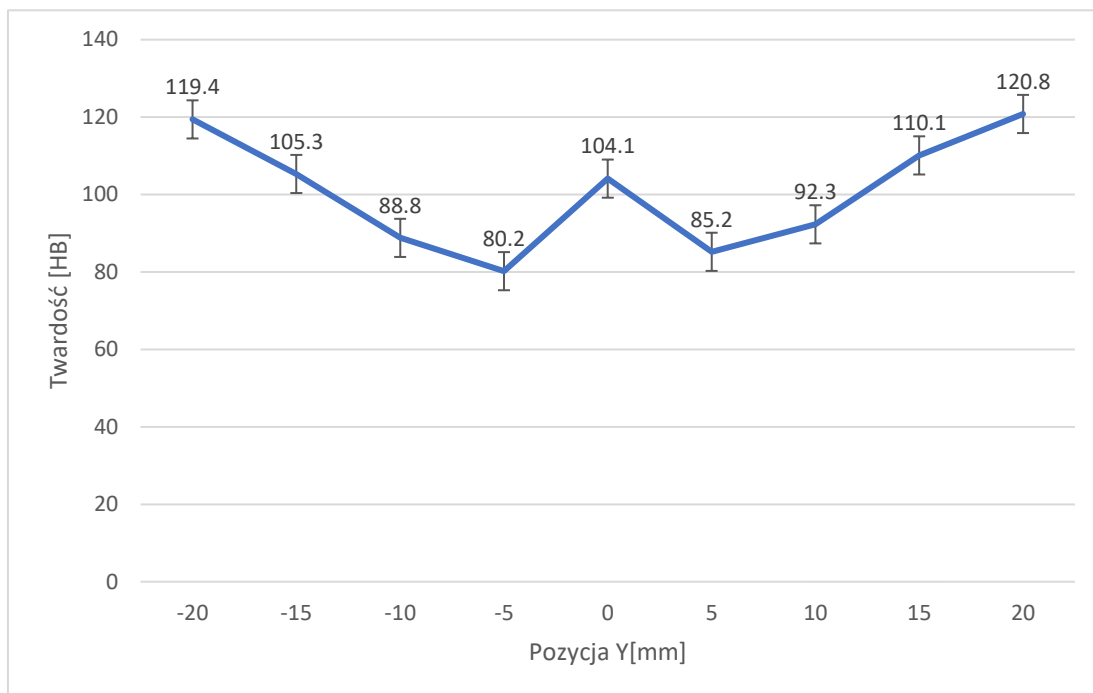
b1. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.



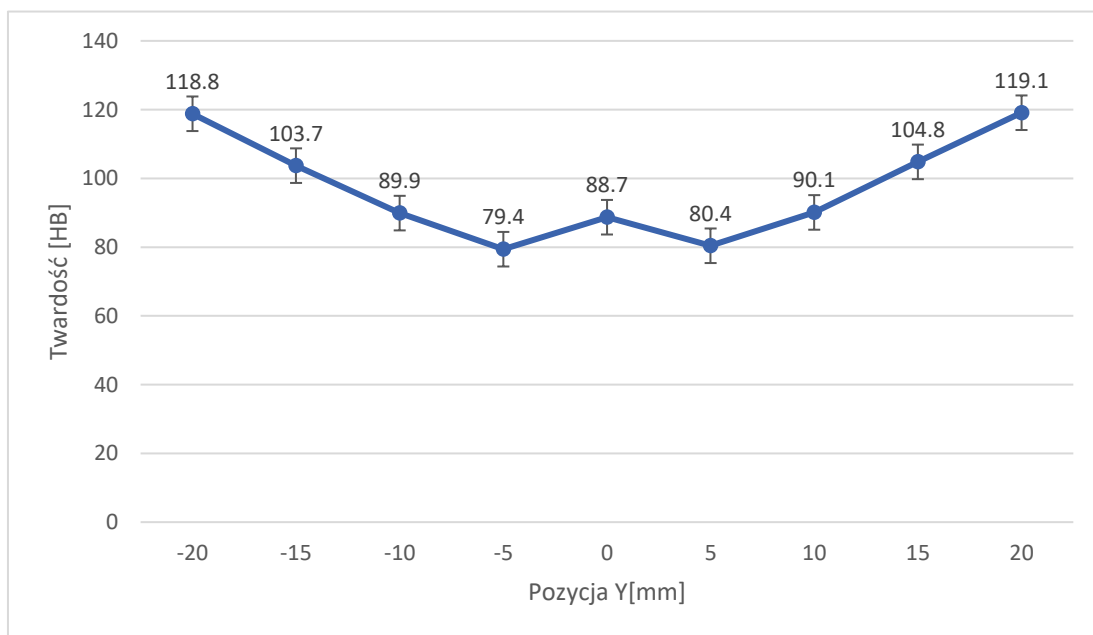
c. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie A.



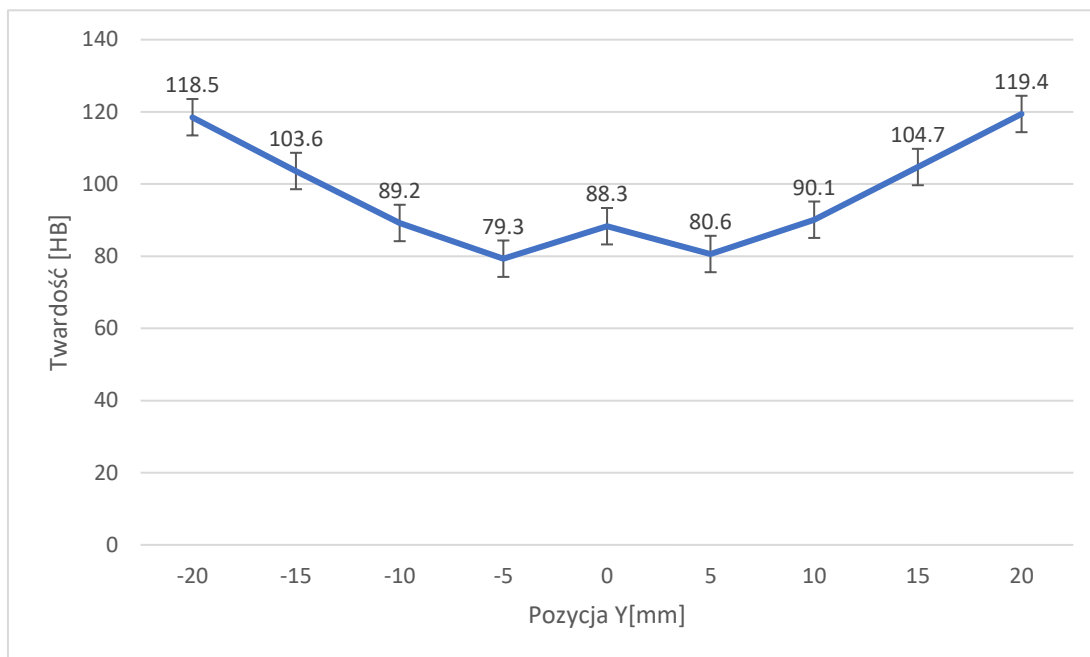
c1. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.



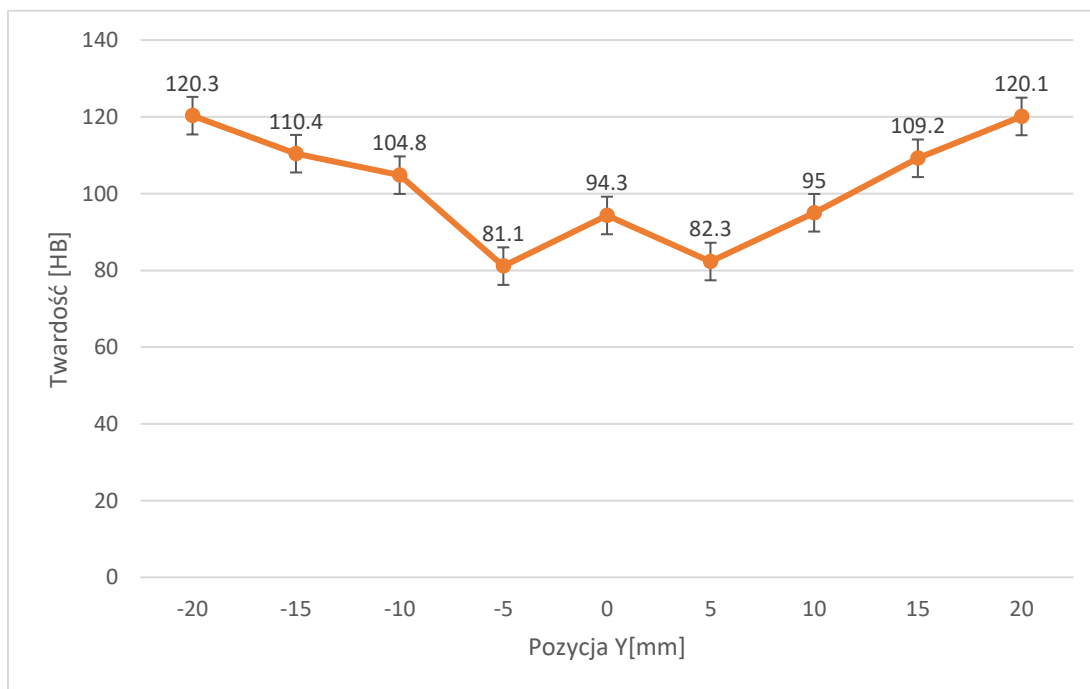
d. Prędkość obrotowa 1000obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.



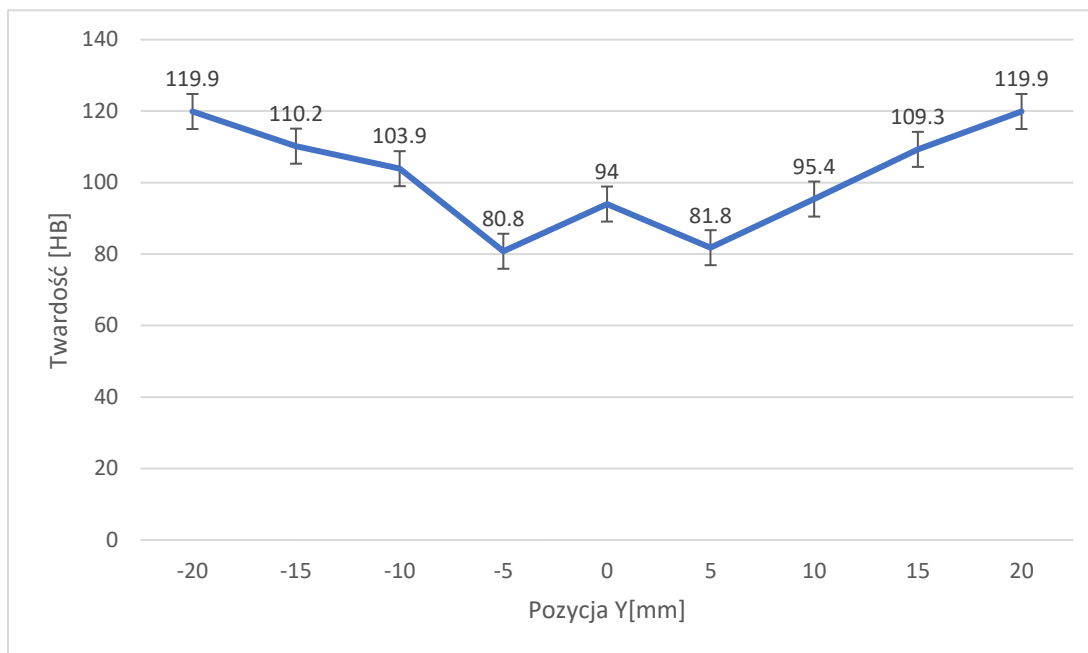
d1. Prędkość obrotowa 1000obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.



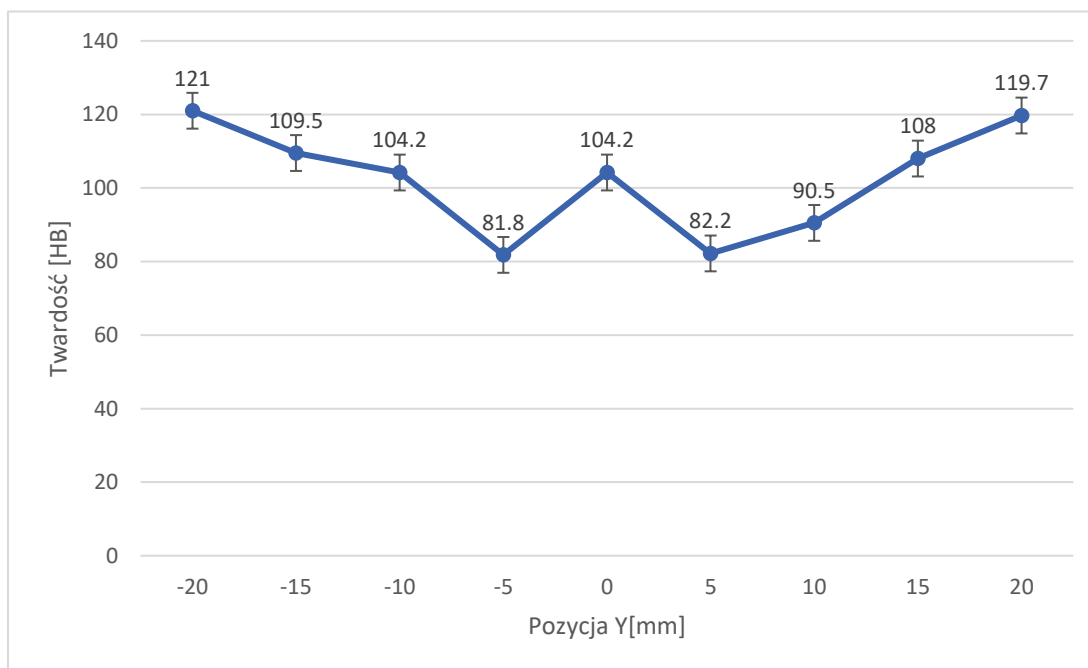
e. Prędkość obrotowa 1200obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.



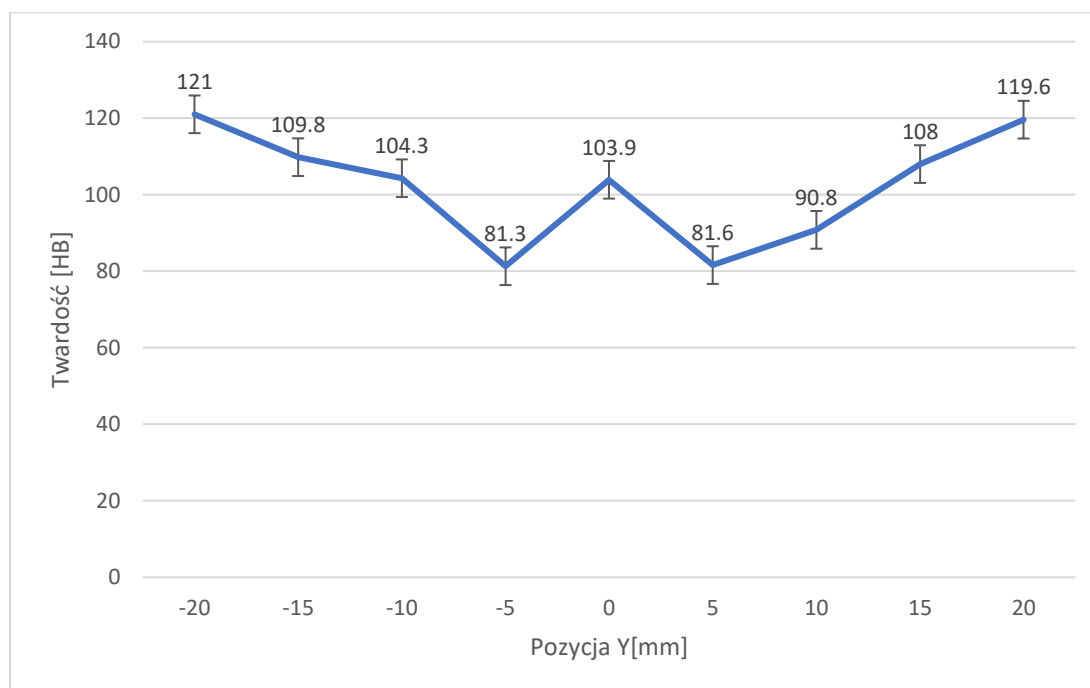
e1. Prędkość obrotowa 1200obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.



f. Prędkość obrotowa 1400obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.



f1. Prędkość obrotowa 1400obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.



Rysunek 5. 9. Średni rozkład twardości spoiny dla poszczególnych parametrów zgrzewania.

Średni wynik materiału rodzimego wynosi 122.2 HV. Wynik ten nie odbiega znacząco od danych producenta badanego aluminium. Dla każdej z próbek wykonano 243 pomiary twardości. Przedstawiony rozkład twardości jest charakterystyczny dla aluminium w strefie wpływu ciepła oraz strefie cieplno plastycznej wyraźnie odznacza się strefa miękka, gdzie odnotowano znaczący spadek twardości. Zaobserwowano również wzrost twardości w obrębie spoiny do wartości maksymalnej około 105 HV, który nie powinien mieć wpływu na właściwości mechaniczne złącza. Dla wszystkich próbek przebieg wykresu twardości kształtem przypomina literę W. Zaobserwowano również zależność pomiędzy prędkością obrotową narzędzia, a twardością spoiny. Im większa szybkość obrotowa tym większa twardość spoiny, maksymalne wartości twardości zaobserwowano dla prędkości 1400 obr/min. Warto również podkreślić znikomy wpływ posuwu na twardość, zarówno dla prędkości 50 mm/min jaki i 70 mm/min przebieg wykresu wyglądał podobnie.

4.2.2 Twardość trzpieni

Wstępne badanie twardości wykonano metodą Rockwella na urządzeniu Mitutoyo. Wyniki Pomiarów nie mogły być przetworzone przez urządzenie – były poza zakresem pomiarowym maszyny. Wykonano ponowne badanie na urządzeniu Leitz – pomiar metodą Vickersa. Średni wynik został przeliczony na skalę Rockwella. Badanie twardości wykonano

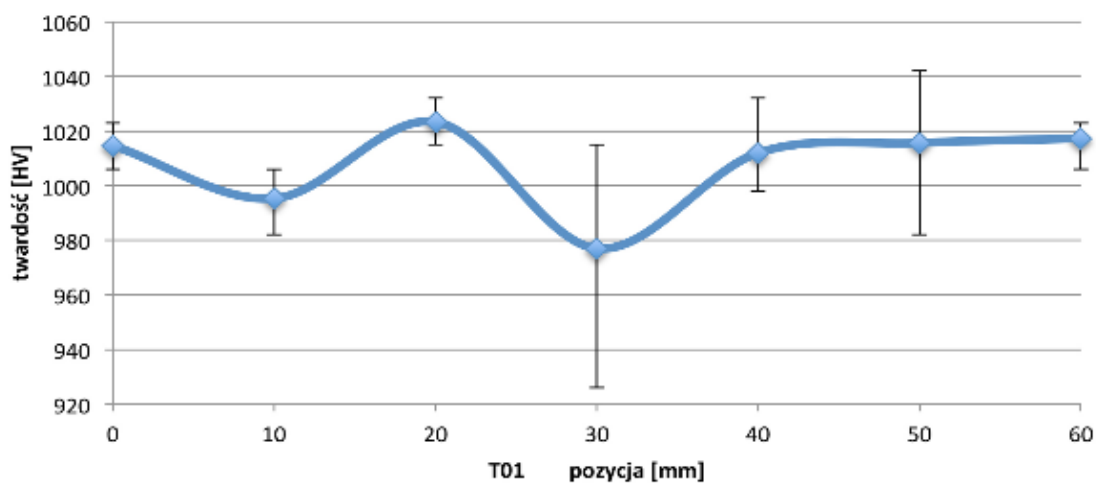
w trzech rzędach w przybliżonej odległości, tak aby uśrednić twardość badanej powierzchni. Ponownie przeprowadzono badanie na końcówce trzpieni (część obrabiana mechanicznie) – wykonano dziewięć pomiarów na powierzchni 2x2mm. Niepewność pomiarową zaznaczono na wykresach (rys. 5.10 – 5.13.). Wyniki badania zamieszczono w tabeli 5.5 oraz 5.6.

Tabela 5. 5. Wyniki pomiarów twardości trzpieni.

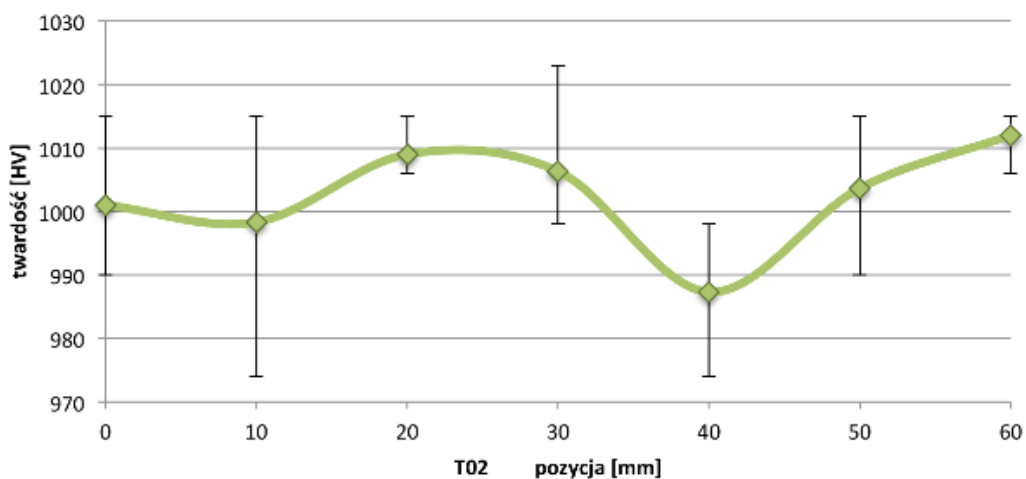
Twardościomierz Leitz Miniload II						
Numer pomiaru	Pozycja [mm]	Próba 1 [HV]	Próba 2 [HV]	Próba 3 [HV]	Średnia [HV]	Numer próbki
1	0	1015	1006	1023	1015	T01
2	10	998	982	1006	995	
3	20	1015	1032	1023	1023	
4	30	990	926	1015	977	
5	40	1032	1006	998	1012	
6	50	1042	982	1023	1016	
7	60	1023	1023	1006	1017	
1	0	998	1015	990	1001	T02
2	10	1015	1006	974	998	
3	20	1006	1015	1006	1009	
4	30	998	1023	998	1006	
5	40	990	998	974	987	
6	50	1006	990	1015	1004	
7	60	1006	1015	1015	1012	
1	1	1089	1097	1089	1092	T01 (końcówka)
2	2	1097	1097	1079	1091	
3	3	1089	1089	1107	1095	
1	1	1006	1006	1023	1012	T02 (końcówka)
2	2	1015	1032	975	1007	
3	3	998	1032	1006	1012	

Tabela 5. 6. Uśrednione wyniki pomiarów.

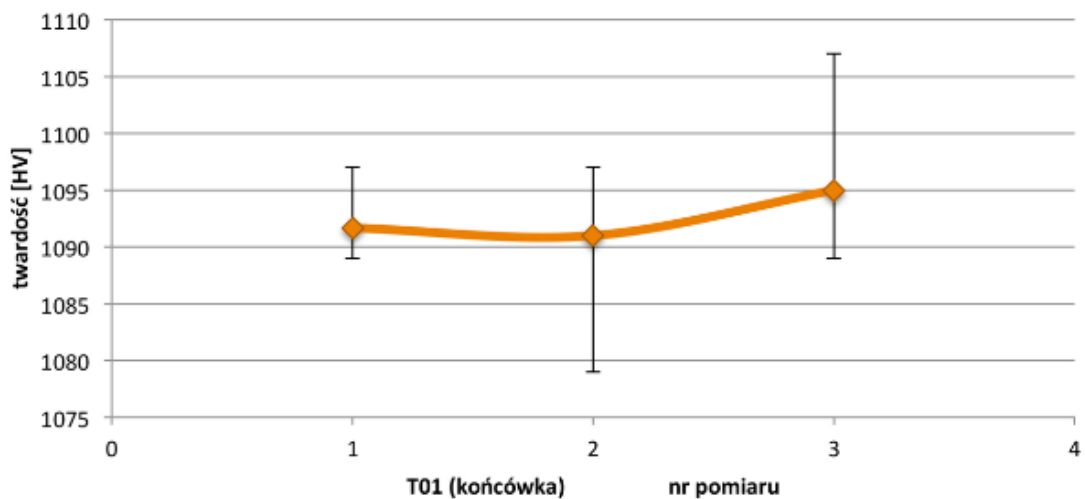
Numer próbki	Średni wynik pomiarów [HV]	Przeliczenie na skalę Rockwella [HRC]
T01	1008	69.1
T02	1003	69
T01 (końcówka)	1093	70.1
T02 (końcówka)	1010	69.1



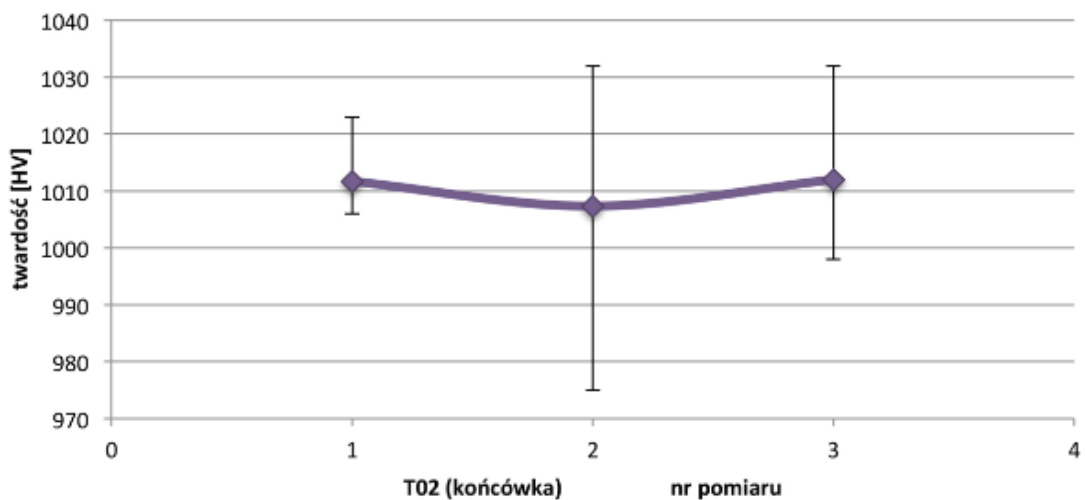
Rysunek 5. 10. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T01.



Rysunek 5. 11. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T02.



Rysunek 5. 12. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T01 (końcówka).

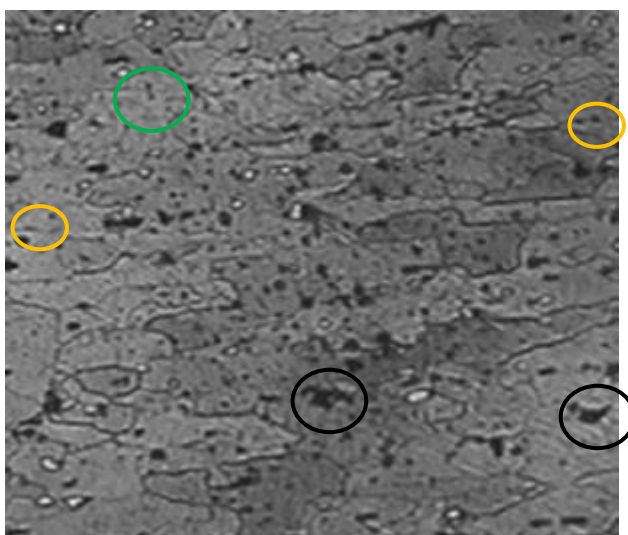


Rysunek 5. 13. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T02 (końcówka).

5.3. Badania metalograficzne

5.3.1 Badania makro oraz mikroskopowe

Zdjęcie mikrostruktury stopu Al 2024-T3 przedstawiono na rys. 5.14. Zaobserwowano drobne jednorodnie rozproszone małe osady (przykłady zaznaczone zielonym oblongiem), kolonie osadów (przykłady zaznaczone czarnym oblongiem) zaobserwowano również drobne, jednorodnie rozmieszczone osady w mikrostrukturze (przykłady zaznaczone pomarańczowym oblongiem). Można stwierdzić, że kolonie osadu z jednorodnym rozmieszczeniem w całej mikrostrukturze i czarne drobno rozproszone osady są związkami międzymetalicznymi o wzorze chemicznym CuAl_2 . Ponadto można powiedzieć, że drobne jednorodnie rozmieszczone osady w mikrostrukturze są związkami międzymetalicznymi zawierającymi Cu, Mg i pierwiastek Al. Ogólna mikrostruktura (faza α) składa się z ziaren fazy aluminium w strukturze krystalicznej FCC bogatej w Cu i inne pierwiastki stopowe.

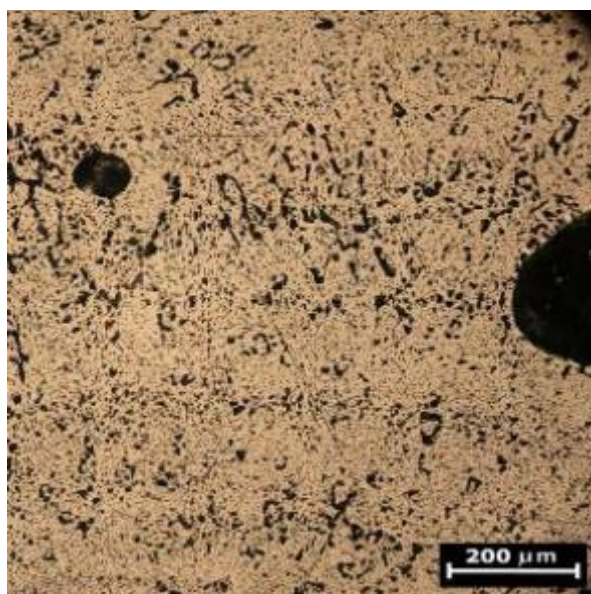


Rysunek 5. 14. Mikrostruktura stopu aluminium 2024 – T3.

Przeprowadzono uproszczone badania wizualne za pomocą mikroskopu stereoskopowego o dwudziestokrotnym powiększeniu - charakterystyka powierzchni lica spoiny oraz granicy lica z materiałem rodzimym. Badaniu poddano 16 odcinków o długości 12mm (wzdłuż osi spoiny). Dodatkowo zbadano profil poprzeczny spoiny oraz chropowatość (łącznie z chropowatością powierzchni blachy surowej oraz obrabianej mechanicznie przed procesem zgrzewania). Spoina ciągła, bez podtopień oraz przypaleń. Brak pęknięć. Wysoka mikro-porowatość grani. W 99% porowatość o wielkości pora do 0,03mm. Nieliczne pory o większej średnicy. Stwierdzono występowanie pęcherzy gazowych w strefie wpływu ciepła poniżej 0.05mm oraz pęcherze gazowe wewnątrz spoiny poniżej 0.25mm.

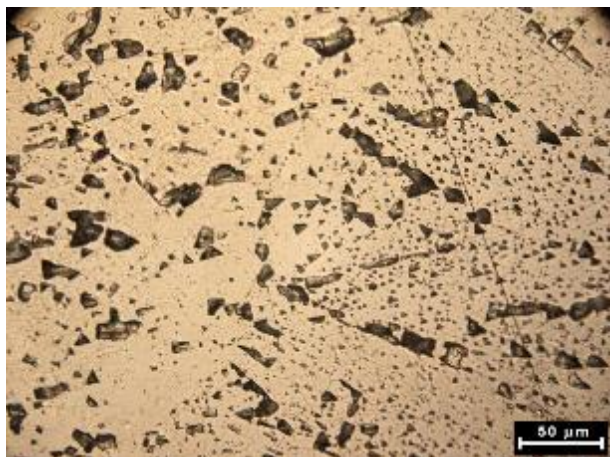
Na podstawie przeprowadzonych badań mikroskopowych można zaobserwować, że przy niższych prędkościach obrotowych oraz zgrzewania, złącza posiadają mniejszą ilość wad, co wskazuje na odpowiedni przepływ metalu podczas procesów zgrzewania. Gdy prędkość zgrzewania osiągnęła 1400 obr/min oraz 70 mm/min, można zaobserwować porowatości po stronie spływu. Niższa prędkość zgrzewania spowodowała większy dopływ ciepła, dlatego odpowiedni przepływ materiału skutkuje utworzeniem zgrzeiny z mniejszą ilością wad. Gdy narzędzie jest przesuwane, uplastyczniony materiał w przedniej krawędzi narzędzia przepływa przez stronę natarcia do tylnej krawędzi, a działanie obrotowe narzędzia przenosi uplastyczniony materiał ze strefy natarcia do strefy spływu. W konsekwencji, wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania, temperatura szczytowa cyklu termicznego spada, a szybkość chłodzenia wzrasta. Niski dopływ ciepła skutkuje brakiem mieszania, a tym samym wyższym oporem przepływu materiału. Uplastyczniony materiał nie może być ponownie wypełniony po stronie spływu, co powoduje powstawanie tak zwanych kraterów.

Przeprowadzono badania metalograficzne próbek dla różnych kombinacji prędkości obrotowych i prędkości posuwu przy powiększeniu 50x/100x/200x/400x/1000x. Dla próbki Mgf01 można zauważyć kilka dużych pęcherzy gazowych o wielkości do 470 μ m powstałych na granicy przetopu grani spoiny. Liczne drobne wydzielania iglaste krzemu z roztworu α -Al. (rys. 5.15.)



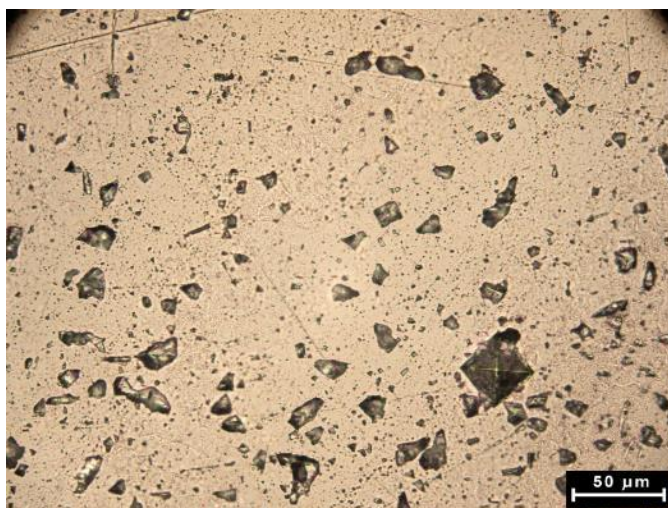
Rysunek 5. 15. Mikrostruktura złącza FSW (prędkość obrotowa 1000, prędkość posuwu 50, powiększenie 100x).

Zaobserwowano wzrost ziaren w strefie wpływu ciepła z wydzielaniami krzemu na ich granicach oraz drobnymi wydzielaniami wewnątrz (rys. 5.16.).



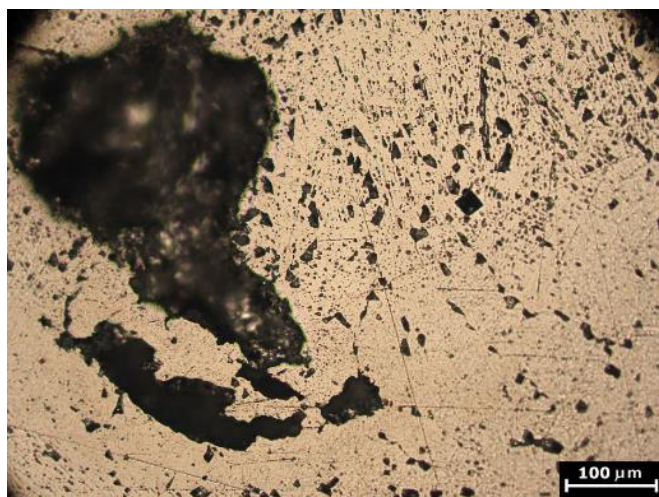
Rysunek 5. 16. Mikrostruktura złącza FSW w strefie wpływu ciepła (prędkość obrotowa 1000, posuwu 50, powiększenie 400x).

W próbce Mgf02 zaobserwowano liczne pęcherze gazowe w obrębie spoiny o wielkości do 220μm. Jednorodna spoiny z rozdrobnionymi wydzieleniami krzemu (rys. 5.17).



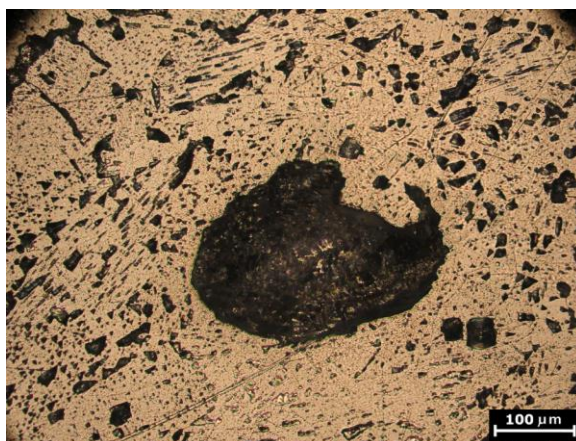
Rysunek 5. 17. Rozdrobnione wydzielenia krzemu w złączu FSW (prędkość obrotowa 1200, prędkość posuwu 50 powiększenie 400x).

Wydzielenia iglaste na granicy przetopu spoin oraz w strefie roztworu stałego ukierunkowane wzdłużne do krzepnięcia metalu (rys. 5.18).



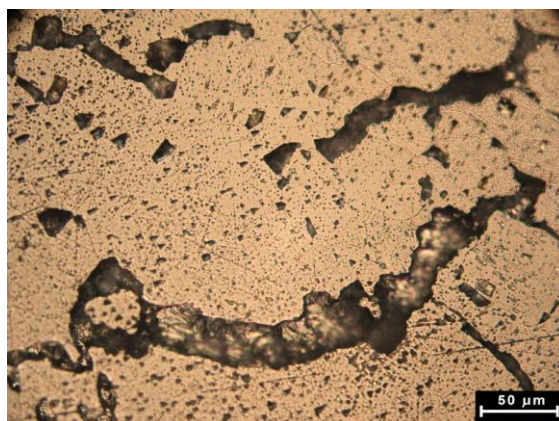
Rysunek 5. 18. Wydzielenia iglaste na granicy przetopu, powiększenie 200x.

W próbce Mg_f03 zaobserwowano dobrze widoczny rozrost ziaren w strefie wpływu ciepła, rozpuszczenie wydzieleni w osnowie α -Al. Oraz pęcherze gazowe na granicy spoiny (rys. 5.19).



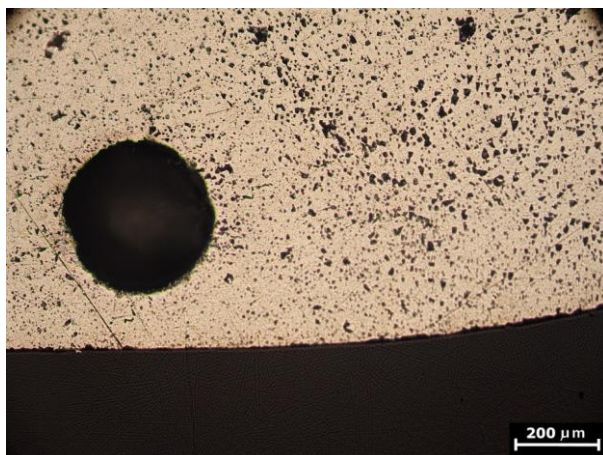
Rysunek 5. 19. Rozrost ziaren w strefie wpływu ciepła oraz widoczne pęcherze gazowe.(prędkość obrotowa 1200, posuw 70, powiększenie 200x).

Zaobserwowano również wydzielenia na granicach ziaren w strefie wpływu ciepła (rys. 5.20).



Rysunek 5. 20. Wydzielenia na granicach ziaren w strefie wpływu ciepła.

W próbce o numerze Mgf04 zaobserwowano pęcherze gazowe w obrębie spoiny o wielkości do 120 μ m oraz do 390 μ m przypowierzchniowo przy licu spoiny (rys. 5.21).



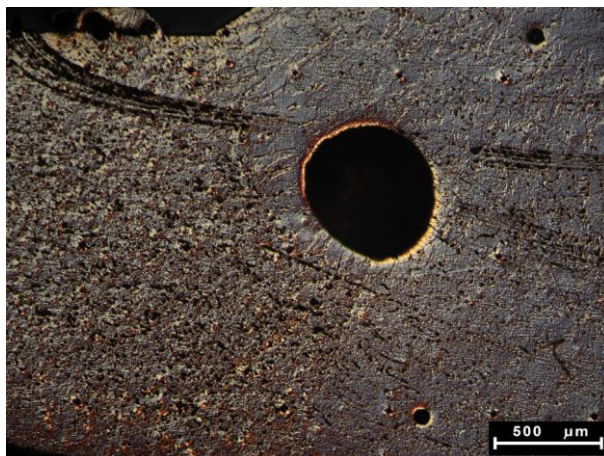
Rysunek 5. 21. Pęcherze gazowe w spoinie FSW (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 100x).

Dodatkowo można zauważyć wytrącenia iglaste krzemu w strefie wpływu ciepła zorientowanych w kierunku odprowadzenia ciepła (rys. 5.22). Struktura próbki jednorodna z drobnymi wydzieleniami z roztworu stałego w licu spoiny.



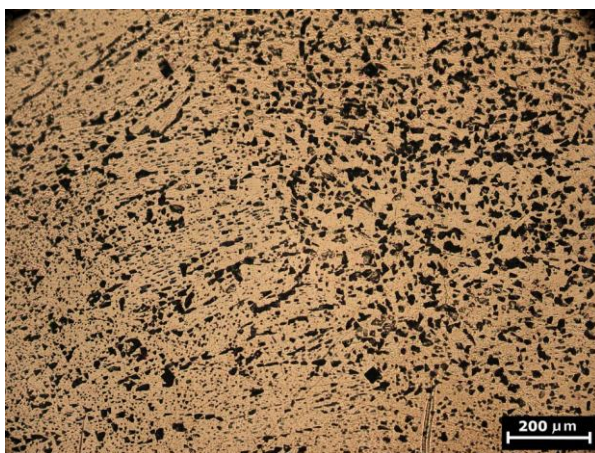
Rysunek 5. 22. Iglaste wydzielenia krzemu w strefie wpływu ciepła (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 200x).

W kolejnej próbce Mgf05 zaobserwowano duży pęcherz gazowy ponad $500\mu\text{m}$ na granicy strefy wpływu ciepła i metalu spoiny oraz mniejsze wewnątrz spoiny, brak pęknięć (rys. 5.23).



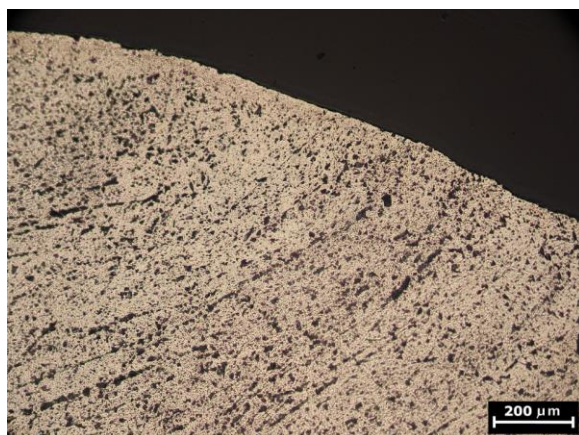
Rysunek 5. 23. Pęcherz gazowy o wielkości ponad $500\mu\text{m}$ (prędkość obrotowa 1400, posuw 70, powiększenie 50x).

Można również dostrzec dobrze widoczną strefę wpływu ciepła z iglastymi wydzieleniami krzemu oraz innych pierwiastków stopowych (rys. 5.24) – zorientowanych w kierunku odprowadzenia ciepła. Widoczne różne wydzielenia po krystalizacji $\alpha\text{-Al}$.



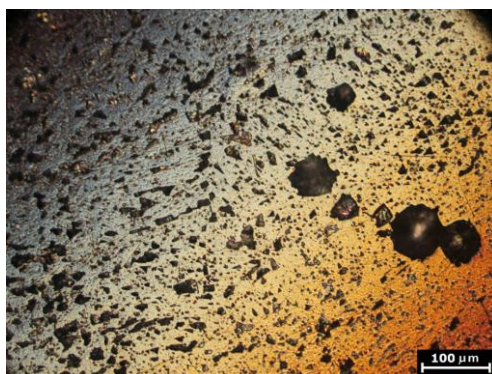
Rysunek 5. 24. Iglaste wydzielenia krzemu w strefie wpływu ciepła (powiększenie 100x).

Próbka numer Mgf06 cechuje się bardzo drobnymi wydzieleniami z fazy α (rys. 5.25). Pęcherze gazowe $<120\mu\text{m}$ widoczne na granicy spoiny i strefy wpływu ciepła



Rysunek 5. 25. Drobne wydzielania z fazy α (powiększenie 100x).

W próbce numer Mgf07 można zaobserwować małe pęcherze na styku spoiny i obszaru niepełnego zgrzania (rys. 5.26) dodatkowo występuje duży por $>500\mu\text{m}$ styczny do strefy wpływu ciepła.



Rysunek 5. 26. Pęcherze na styku spoiny i obszaru niepełnego zgrzania (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 200x).

Próbka o numerze Mgf08 cechuje się rozrostem ziaren i rozpuszczeniem wydzieli w strefie wpływu ciepła (rys. 5.27), duże pęcherze kuliste ($<500\mu\text{m}$) widoczne przypowierzchniowo oraz na styku linii wtopień.



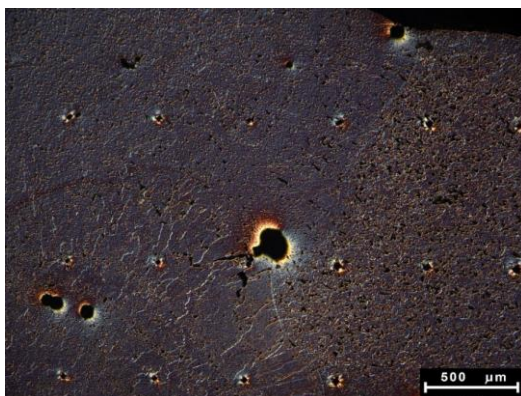
Rysunek 5. 27. Rozrost ziaren i wydzieleni w strefie wpływu ciepła (prędkość 1200, posuw 50, powiększenie 200x).

Iglaste wydzielenia krzemu oraz innych pierwiastków stopowych zorientowanych w kierunku odprowadzenia ciepła oraz przy linii wtopu w materiał rodzimy (rys. 5.28).



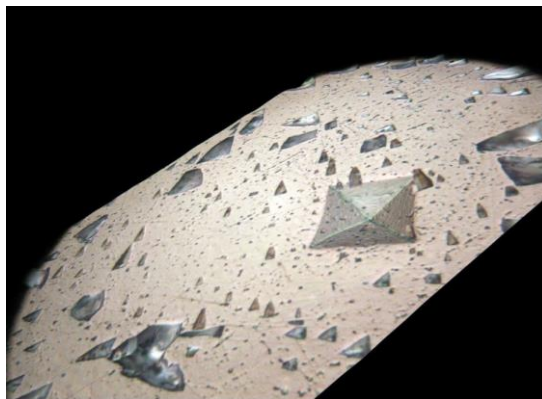
Rysunek 5. 28. Iglaste wydzielenia krzemu oraz innych pierwiastków (prędkość obrotowa 1200, posuw 50, powiększenie 1000x).

W próbce Mg_f09 zaobserwowano wysoką porowatość spoiny oraz spoiny/materiał rodzimy – strefa wpływu ciepła (rys. 5.29).



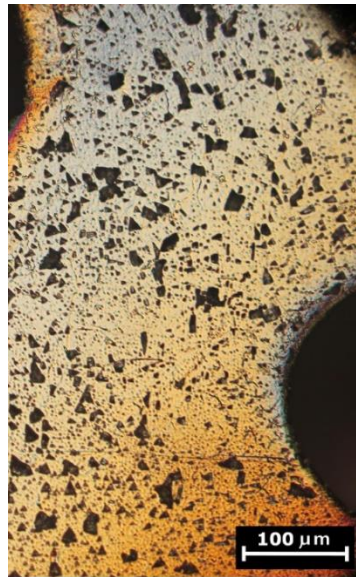
Rysunek 5. 29. Porowatość spoiny (prędkość 1400, posuw 70, powiększenie 50x).

Zauważyć można również drobne iglaste wydzielenia w strefie wpływu ciepła, natomiast na rys. 5.30 pokazano odcisk diamentu podczas próby twardości.



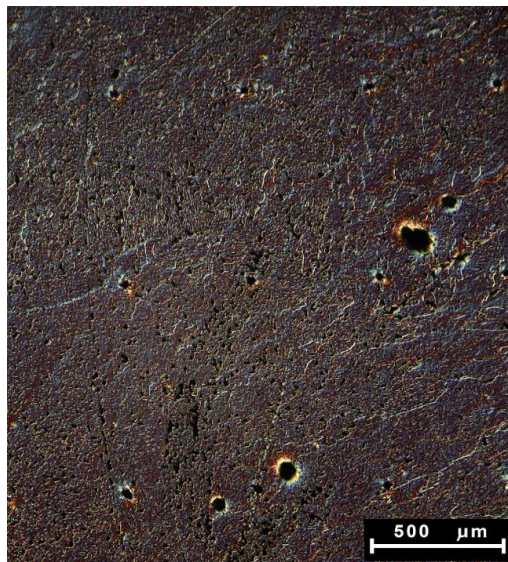
Rysunek 5. 30. Odcisk diamentu podczas badania twardości (powiększenie 1000x).

Próbka Mgf10 cechuje się wysoką porowatością wewnątrz spoiny (rys. 5.31.) oraz niewielką strefą wpływu ciepła, charakteryzującą się ujednorodnieniem struktury przez rozpuszczenie wydzieleni w roztworze α -Al.



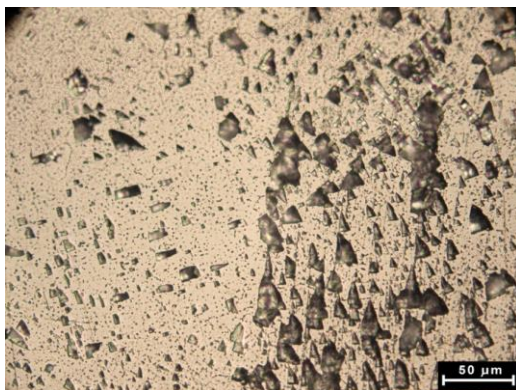
Rysunek 5. 31. Porowatość widoczna wewnątrz spoiny (powiększenie 200x).

W próbce Mgf11 zaobserwować można dobrze widoczną linię wtopienia spoiny, brak podtopień oraz pęknięć (rys. 5.32).



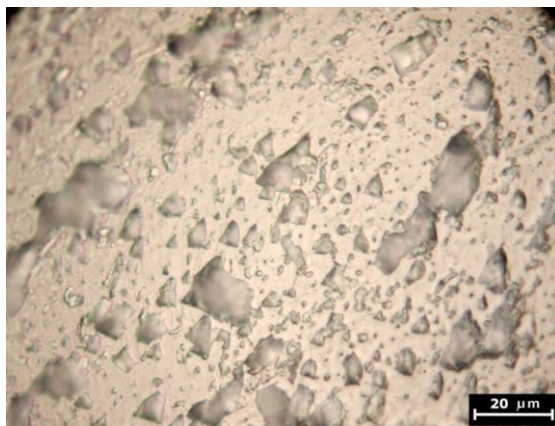
Rysunek 5. 32. Mikrostruktura spoiny z brakiem podtopień oraz pęknięć (prędkość obrotowa 1000, posuw 50, powiększenie 50x).

Kumulację wydzielań na granicy przetopu oraz redukcję (przez rozpuszczenie w α -Al.) w strefie wpływu ciepła o szerokości około $150\mu\text{m}$ (rys. 5.33).



Rysunek 5. 33. Redukcja przez rozpuszczenie α -Al w strefie wpływu ciepła

W kolejnej próbce Mg12 zaobserwować można wąską strefę wpływu ciepła, regularną strukturę strefy miękkiej z drobnymi wydzieleniami z fazy α (rys. 5.34) oraz nieliczne kuliste pęcherze gazowe o średnicy $<200\mu\text{m}$ (rys. 5.35).

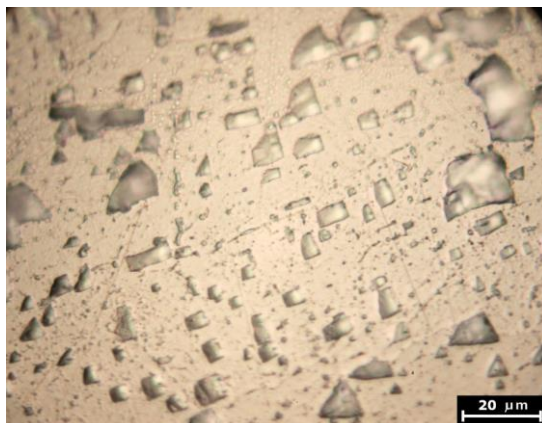


Rysunek 5. 34. Wydzielenia fazy α (powiększenie 1000x).



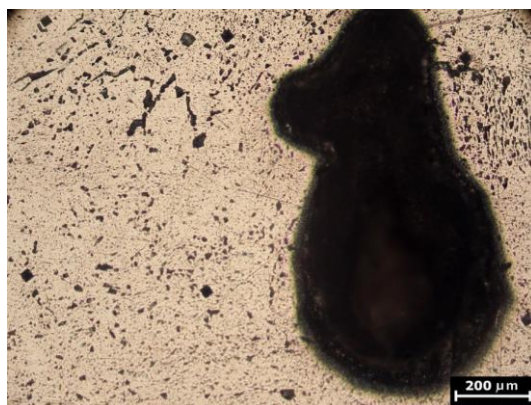
Rysunek 5. 35. Kulisty pęcherz gazowy (powiększenie 200x).

Próbka Mg13 cechuje się brakiem niezgodności, równomierną strukturą oraz drobnymi wydzieleniami w warstwie wierzchniej spoiny (rys. 5.36).



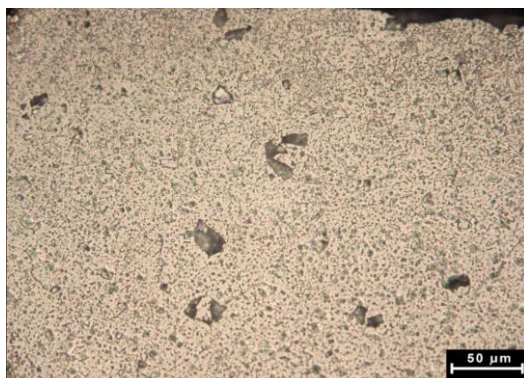
Rysunek 5. 36. Mikrostruktura próbki, brak niezgodności (prędkość obrotowa 1200, posuw 50, powiększenie 1000x).

W próbce Mg14 zaobserwowano gniazda pęcherzy wewnątrz spoiny, największy pęcherz o wymiarach 1200x600μm (rys. 5.37).



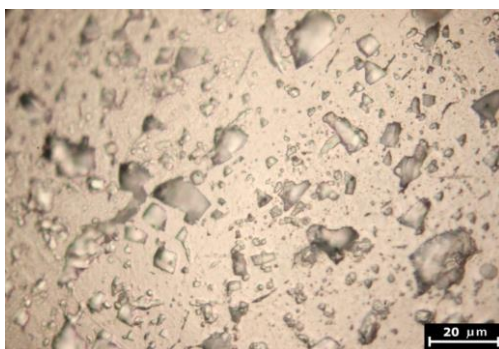
Rysunek 5. 37. Pęcherz gazowy o wymiarach 1200x600 μm (prędkość obrotowa 1400, posuw 70, powiększenie 100x).

Zauważyć można również rozpuszczone wydzielenia w fazie α w obrębie strefy wpływu ciepła oraz skupiska iglastych wydzieleni, natomiast w warstwie wierzchniej i licu spoiny widoczne są rozdrobnione wydzielenia (rys. 5.38).



Rysunek 5. 38. Rozdrobnione wydzielenia w warstwie wierzchniej (powiększenie 400x).

Próbka Mg15 cechuje się wąską strefą wpływu ciepła $<200\mu\text{m}$, równomierną strukturą spoiny z drobnymi wydzieleniami fazy α (rys. 5.39).



Rysunek 5. 39. Drobne wydzielenia fazy α (prędkość obrotowa 1000, posuw 50, powiększenie 1000x).

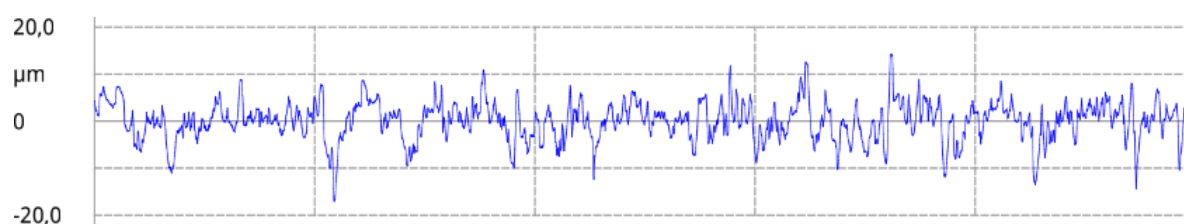
Spoiny charakteryzują się dużą porowatością oraz występowaniem pęcherzy gazowych stycznych do obszaru niepełnego stopienia strefy wpływu ciepła. Pęcherze – prawdopodobnie wydzielony wodór mogą pochodzić z zanieczyszczonego materiału dodatkowego (narzędzia zgrzewającego), bądź wilgoci zgromadzonej na powierzchni materiału. „Podgrzanie” materiału dodatkowego podczas procesu zgrzewania mogłoby wyeliminować niezgodności. Zgrzeiny cechują się rozrostem ziaren z wydzieleniami krzemu na ich granicach oraz nielicznymi, drobno iglastymi wydzieleniami krzemu oraz innych pierwiastków wewnątrz. Iglaste wydzielenia zaobserwowano również w kierunku odprowadzenia ciepła. Spoiny cechują się ponadto brakiem pęknięć oraz dodatkowych wtrąceń.

5.3.2 Profile chropowatości

Badaniu poddano chropowatość profili wzdłużnych spoiny za pomocą urządzenia MarSurf PS 10 (3557) oraz głowicy PHT 350 ponadto zbadano chropowatość blachy surowej oraz blachy obrabianej mechanicznie przed procesem zgrzewania. Wyniki pomiarów chropowatości badanych próbek przedstawiono w tabeli 5.7. gdzie Ra średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych wewnątrz odcinka elementarnego natomiast Rz to najwyższa wysokość profilu chropowatości. Długości wszystkich badanych profili miały 15mm długości, ich profile zaprezentowano na rysunkach (rys. 5.40 – 5.53).

Tabela 5. 7. Wynik pomiaru chropowatości dla blachy obrabianej mechanicznie.

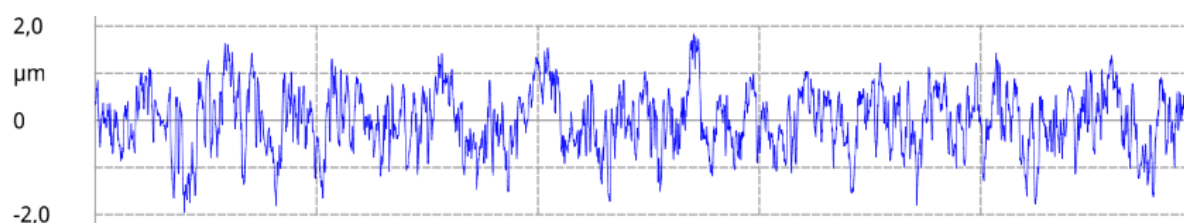
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	3.11 μm
Rz	24.215 μm



Rysunek 5. 40. Profil chropowatości dla blachy obrabianej mechanicznie.

Tabela 5 8. Wynik pomiaru chropowatości dla blachy surowej.

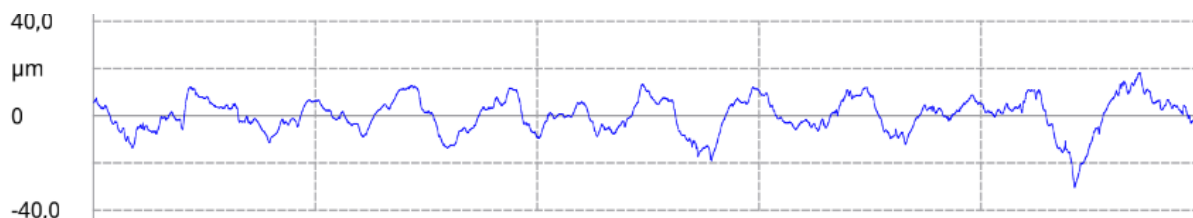
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	0.527 μm
Rz	3.274 μm



Rysunek 5. 41. Profil chropowatości dla blachy surowej.

Tabela 5. 9. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR1. (1000 obr/min; 50mm/min)
– narzędzie A.

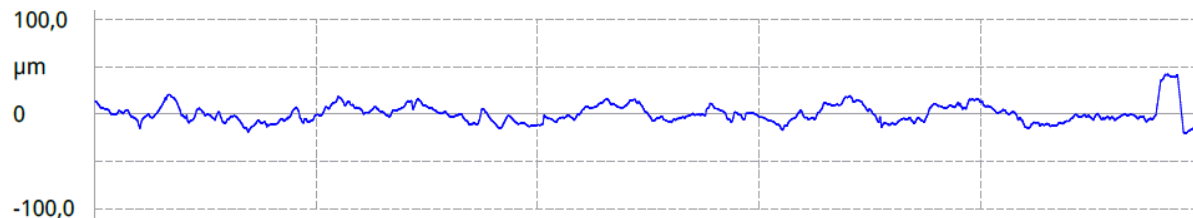
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	5.974 μm
Rz	31.446 μm



Rysunek 5. 42. Profil chropowatości dla próbki PR1 – narzędzie A.

Tabela 5. 10. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR1. (1000 obr/min; 50mm/min)
– narzędzie B.

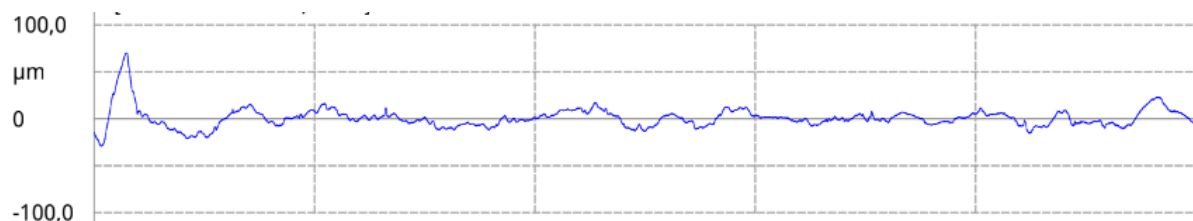
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	7.407 μm
Rz	39.887 μm



Rysunek 5. 43. Profil chropowatości dla próbki PR1 – narzędzie B.

Tabela 5. 11. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR2 (1000 obr/min; 70mm/min)
– narzędzie A.

R[LC ISO 16610-21]	
Ra	6.922 μm
Rz	42.342 μm



Rysunek 5. 44. Profil chropowatości dla próbki PR2 – narzędzie A.

Tabela 5. 12. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR2 (1000 obr/min; 70mm/min)
– narzędzie B.

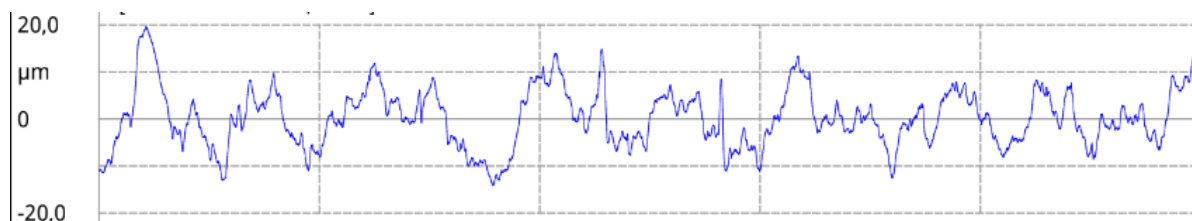
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	7.913μm
Rz	43.601μm



Rysunek 5. 45. Profil chropowatości dla próbki PR2 – narzędzie B.

Tabela 5. 13. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR3 (1200 obr/min; 50mm/min)
– narzędzie A.

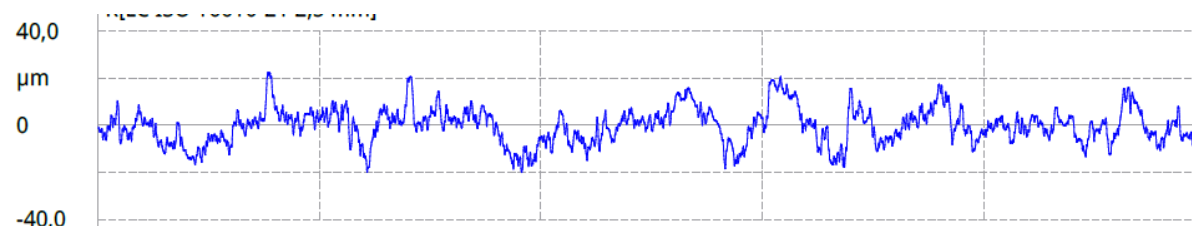
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	4.932μm
Rz	26.471μm



Rysunek 5. 46. Profil chropowatości dla próbki PR3 – narzędzie A.

Tabela 5. 14. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR3 (1200 obr/min; 50mm/min) – narzędzie B.

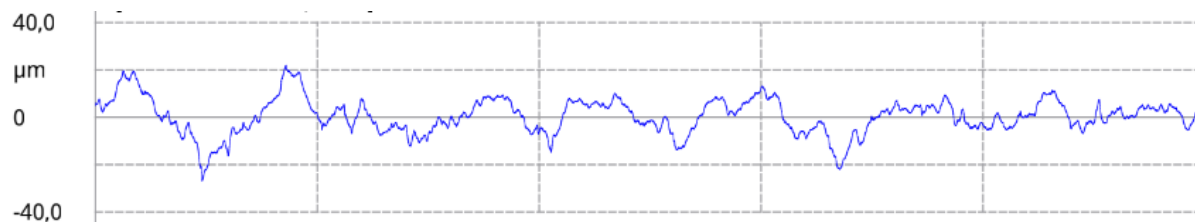
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	5.822μm
Rz	36.282μm



Rysunek 5. 47. Profil chropowatości dla próbki PR3 – narzędzie B.

Tabela 5. 15. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR4 (1200 obr/min; 70mm/min) – narzędzie A.

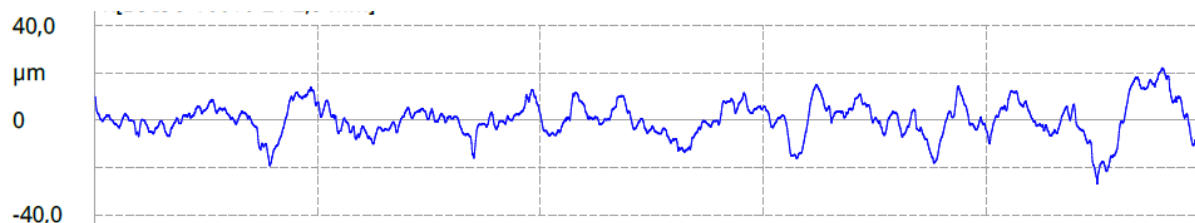
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	4.798 μ m
Rz	26.996 μ m



Rysunek 5. 48. Profil chropowatości dla próbki PR4 – narzędzie A.

Tabela 5. 16. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR4 (1200 obr/min; 70mm/min) – narzędzie B.

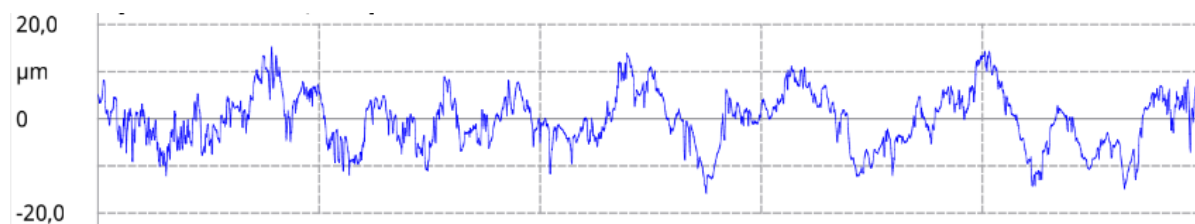
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	5.725 μ m
Rz	33.741 μ m



Rysunek 5. 49. Profil chropowatości dla próbki PR4 – narzędzie B.

Tabela 5. 17. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR5 (1400 obr/min; 50mm/min) – narzędzie A.

R[LC ISO 16610-21]	
Ra	5.726 μ m
Rz	28.546 μ m



Rysunek 5. 50. Profil chropowatości dla próbki PR5 – narzędzie A.

Tabela 5. 18. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR5 (1400obr/min; 50mm/min) – narzędzie B.

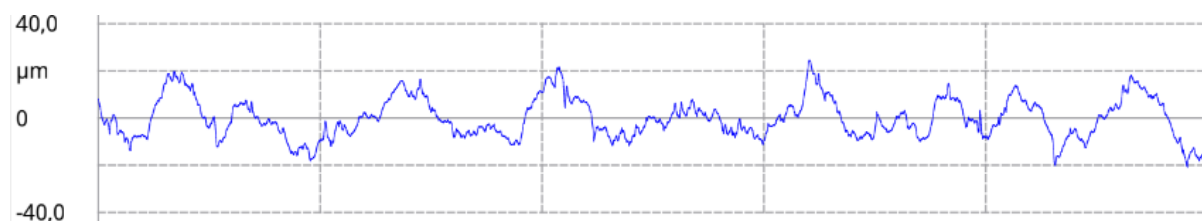
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	8.577 μ m
Rz	39.558 μ m



Rysunek 5. 51. Profil chropowatości dla próbki PR5 – narzędzie B.

Tabela 5. 19. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR6 (1400obr/min; 70mm/min) – narzędzie A.

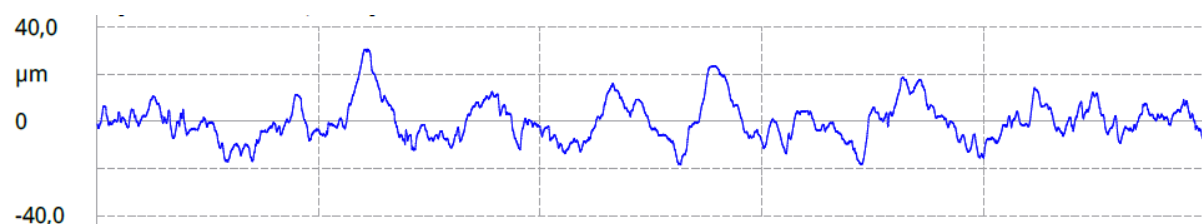
R[LC ISO 16610-21]	
Ra	6.952 μ m
Rz	34.442 μ m



Rysunek 5. 52. Profil chropowatości dla próbki PR6 – narzędzie A.

Tabela 5. 20. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR6 (1400obr/min; 70mm/min) – narzędzie B.

R[LC ISO 16610-21]	
Ra	6.507 μ m
Rz	35.888 μ m



Rysunek 5. 53. Profil chropowatości dla próbki PR6 – narzędzie B.

Chropowatość powierzchni wpływa na wytrzymałość połączenia. W zmiennych warunkach obciążenia pękanie połączeń zgrzewanych rozpoczyna się na powierzchni elementu. W związku z tym chropowatość powierzchni ma znaczący wpływ na zmęczenie złącza zgrzewanego. Wyniki wskazują, że chropowatość powierzchni zależy od prędkości obrotowej narzędzia. W przypadku złącza FSW zaobserwowano, że chropowatość powierzchni początkowo malała, a następnie rosła wraz ze wzrostem prędkości obrotowej narzędzia. Zaobserwowano, że mniejsze wartości chropowatości powierzchni zbadano dla narzędzia A z 0 kątem przylegania kołnierza do elementów zgrzewanych. Natomiast profil chropowatości powierzchni zbadany dla narzędzia B, które cechuje się ujemnym kątem przylegania kołnierza jest znacząco większy. Tabela 5.21. przedstawia średnie wartości uzyskane dla testu chropowatości powierzchni.

Tabela 5. 21. Zestawienie wartości chropowatości powierzchni – narzędzie A.

Parametry zgrzewania	Chropowatość powierzchni Ra [μm]
1000 obr/min; 50mm/min	5.974
1000 obr/min; 70mm/min	6.922
1200 obr/min; 50mm/min	4.932
1200 obr/min; 70mm/min	4.798
1400 obr/min; 50mm/min	5.726
1400 obr/min; 70mm/min	6.952

Tabela 5. 22. Zestawienie wartości chropowatości powierzchni – narzędzie B.

Parametry zgrzewania	Chropowatość powierzchni Ra [μm]
1000 obr/min; 50mm/min	7.407
1000 obr/min; 70mm/min	7.913
1200 obr/min; 50mm/min	5.822
1200 obr/min; 70mm/min	5.725
1400 obr/min; 50mm/min	8.577
1400 obr/min; 70mm/min	6.507

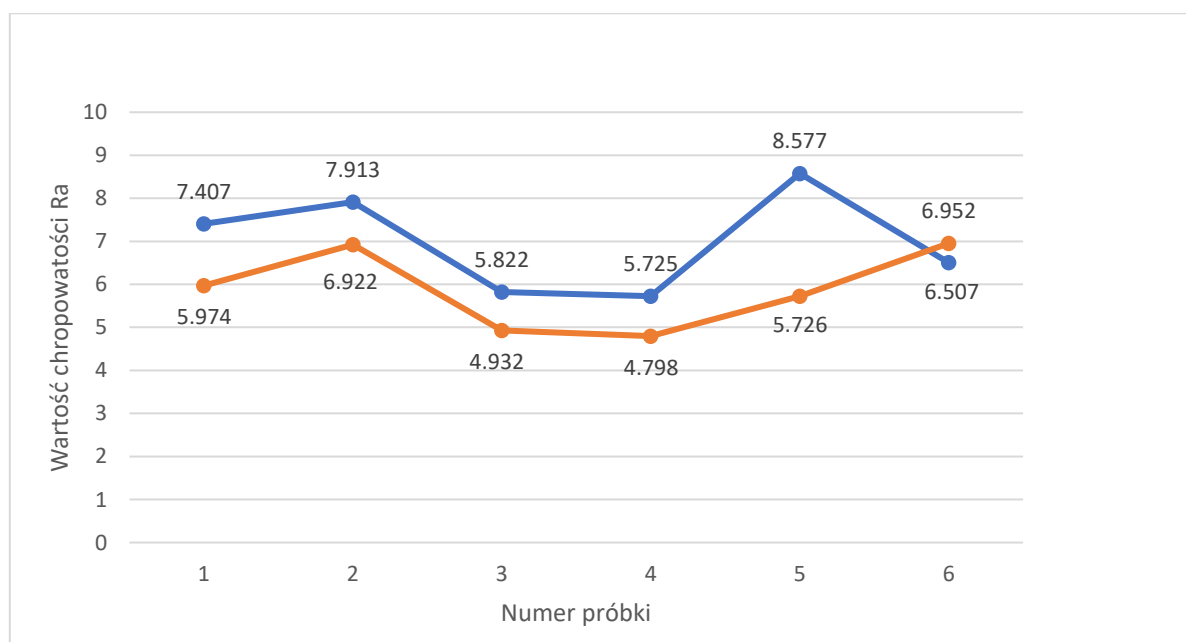
Zestawienie chropowatości powierzchni dla narzędzia A oraz narzędzia B zaprezentowano w tabeli zbiorczej (tab. 5.23).

Tabela 5. 23. Różnica wartości chropowatości powierzchni pomiędzy narzędziami.



Parametry zgrzewania	Wartość chropowatości Narzędzie A [μm]	Wartość chropowatości Narzędzie B [μm]	Wzrost chropowatości powierzchni zgrzewu wykonanego narzędzie B w stosunku do zgrzewu wykonanego narzędziem A [%]
1000 obr/min; 50mm/min	5.974	7.407	24
1000 obr/min; 70mm/min	6.922	7.913	14.3
1200 obr/min; 50mm/min	4.932	5.822	18
1200 obr/min; 70mm/min	4.798	5.725	19.3
1400 obr/min; 50mm/min	5.726	8.577	49.8
1400 obr/min; 70mm/min	6.952	6.507	-6.4

Porównując wartość chropowatości powierzchni zgrzewu zauważyć można, że tylko w jednym przypadku dla prędkości obrotowej wynoszącej 1400obr/min oraz posuwu wynoszącego 70mm/min wartość ta spadła dla narzędzia B o około 6.4%, natomiast we wszystkich innych przypadkach wartość ta wzrosła w przedziale od 14.3% do nawet 49.8%.

Zestawienie wartości chropowatości powierzchni w zależności od użytego narzędzia zaprezentowano na (rys. 5.54).



Rysunek 5. 54. Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni w zależności od użytego narzędzia.

1 – 1000 obr/min; 50mm/min		Narzędzie B
2 – 1000 obr/min; 70mm/min		Narzędzie A
3 – 1200 obr/min; 50mm/min		
4 – 1200 obr/min; 70mm/min		
5 – 1400 obr/min; 50mm/min		
6 – 1400 obr/min; 70mm/min		

Najlepsze wartości chropowatości powierzchni odnotowano dla połączeń wykonanych narzędziem A z prędkością obrotową narzędzia 1200obr/min oraz prędkością posuwu 70mm/min. Zauważyć można znaczące różnice w chropowatości powierzchni dla różnych typów narzędzia. Zgrzeina uzyskana za pomocą narzędzia B cechuje się znacząco większymi wartościami chropowatości, w każdej z badanych próbek. Dzięki analizie profilu chropowatości można wysnuć wniosek, że kąt przylegania kołnierza do zgrzewanego materiału wynoszący 0° jest lepszym rozwiązaniem ze względu na lepszą jakość wykonanych połączeń.





5.4. Badanie Radiograficzne RT

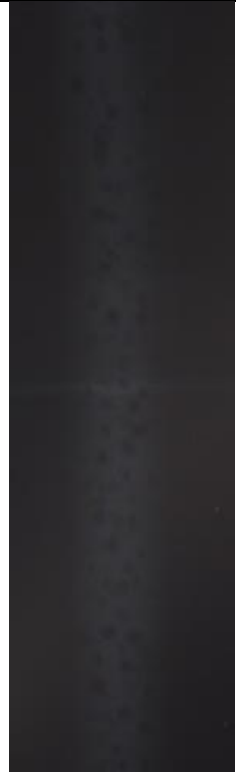

Badanie przeprowadzono na podstawie normy PN-EN5579:2014-02 oraz PN-EN-ISO17636-1:2013 za pomocą aparatu ERESKO 42MF2 ze źródłem promieniowania X.

Tabela 5.23. przedstawia skany rentgenowskie złączy spawanych metodą tarciovą z mieszaniem materiału w celu przedstawienia wad spowodowanych generowaniem wysokiej temperatury oraz silnym lokalnym ścinaniem spowodowanym ruchem narzędzia, zawiera zdjęcia rentgenowskie i odpowiednie komentarze dotyczące każdej badanej próbki. Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że prędkość obrotowa wydaje się być główną zmienną wpływającą na proces. Wzrost szybkości odkształcenia może wpływać na proces rekrytalizacji, co ściśle związane jest z bardzo wysokimi prędkościami obrotowymi, które wpływają na generowanie nadmiernego odkształcenia. Ponadto, niskie ilości wprowadzanego ciepła są głównie związane z wyższymi prędkościami zgrzewania, co powoduje szybsze chłodzenie złącza spawanego. Podwinięty przetop można zatem przypisać nieprawidłowej kombinacji prędkości obrotowej i prędkości posuwu, co w niektórych przypadkach daje niskie siły osiowe. Takie niskie siły osiowe przyczyniają się do powstawania niesymetrycznych półokrągłych rys, a w niektórych przypadkach do dużych wypływek na górnej powierzchni spoiny z powodu słabej plastyfikacji materiału. Zaobserwowano, że spoiny uzyskane przy

prędkości obrotowej 1000 obr/min były wolne od wad, pustek i porowatości, co można przypisać dobrej zdolności płynięcia materiału dzięki optymalnej energii cieplnej, natomiast przy wyższych prędkościach obrotowych zaobserwowano liczne wady – kratery, oraz pustki.

Tabela 5. 24. Zdjęcia rentgenowskie wraz z opisami.

Prędkość obrotowa (obr/min)	Prędkość posuwu 50 mm/min	Prędkość posuwu 70 mm/min	Opis
	Zdjęcie rentgenowskie	Zdjęcie rentgenowskie	
1000			Nie zaobserwowano znaczących wad złącza FSW.
1200			Na zdjęciach widoczne kratery wewnątrz spoiny co zostało potwierdzone badaniami metalograficznymi.

1400				Zaobserwowano liczne kratery oraz pustki wewnątrz spoiny co zostało potwierdzone badaniami metalograficznymi.
------	---	--	---	---

6. Dyskusja otrzymanych wyników

6.1. Wpływ procesu zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału na jakość złącza

Jakość połączeń wytworzonych przy użyciu techniki zgrzewania tarcowego z mieszaniem (FSW) zależy od takich parametrów jak prędkość obrotowa narzędzia, prędkość zgrzewania i siła nacisku. W analizie, siła nacisku była niezmienna, skupiono się za to na wpływie różnych prędkości obrotowych narzędzia (od 1000 do 1400 obr/min) oraz prędkości zgrzewania (od 50mm/min do 70mm/min), w pracy (Kossakowski et al., 2019) badano prędkości obrotowe w zakresie od 500 do 1000 obr/min, natomiast prędkości posuwu oscylowały w granicy od 40mm/min do 80mm/min. Ustalono, że wszystkie badane prędkości obrotowe oraz zgrzewania pozwoliły osiągnąć jednorodne złącza. Zauważono, że zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia wpływa na strukturę i kształt zgrzeiny; przy najniższej prędkości 1000 obr/min zgrzeina była węższa i miała inny kształt w porównaniu do zgrzein wykonanych przy wyższych prędkościach. Wynika to z faktu, że przy niższej prędkości akumulowane jest więcej ciepła, co sprawia, że główną rolę w procesie zgrzewania pełni trzpień narzędzia. W miarę wzrostu prędkości obrotowej narzędzia, ilość generowanego ciepła wzrasta zarówno z powodu działania trzpienia, jak i kołnierza narzędzia, ale jest ona szybciej odprowadzana ze strefy zgrzewania. Proces FSW odbywa się bez fazy ciekłej, stąd jedynymi potencjalnymi defektami są pustki czy nieciągłości, które są wynikiem przepływu materiału. Błędy te są związane z parametrami procesu, takimi jak prędkość zgrzewania, prędkość obrotowa narzędzia oraz siła nacisku. Na podstawie przeprowadzonych badań mikroskopowych można zaobserwować, że przy niższych prędkościach obrotowych oraz zgrzewania, złącza posiadają mniejszą ilość wad, co wskazuje na odpowiedni przepływ metalu podczas procesów zgrzewania. Gdy prędkość zgrzewania osiągnęła 1400 obr/min oraz 70 mm/min, można zaobserwować porowatości po stronie spływu. Niższa prędkość zgrzewania spowodowała większy dopływ ciepła, dlatego odpowiedni przepływ materiału skutkuje utworzeniem zgrzeiny z mniejszą ilością wad. Gdy narzędzie jest przesuwane, uplastyczniony materiał w przedniej krawędzi narzędzia przepływa przez stronę natarcia do tylnej krawędzi, a działanie obrotowe narzędzia przenosi uplastyczniony materiał ze strefy natarcia do strefy spływu. W konsekwencji, wraz ze wzrostem prędkości zgrzewania, temperatura szczytowa cyklu termicznego spada, a szybkość chłodzenia wzrasta. Niski dopływ ciepła skutkuje

brakiem mieszania, a tym samym wyższym oporem przepływu materiału. Uplastyczniony materiał nie może być ponownie wypełniony po stronie spływu, co powoduje powstawanie tak zwanych kraterów. W badanych złączach stwierdzono występowanie pustek (pęcherzy gazowych), co może świadczyć o niedostatecznie czystym środowisku testu (hala produkcyjna, standardowa frezarka), mogą również pochodzić z zanieczyszczonego materiału dodatkowego (narzędzia zgrzewającego), bądź wilgoci zgromadzonej na powierzchni materiału. Prostem sposobem na zniwelowanie powstania potencjalnych wad w przyszłości jest wstępne podgrzanie materiału zgrzewanego.

Na podstawie dostępnej literatury (Venkateswarlu et al., 2019) oraz autorskich badań można stwierdzić, że strefa wpływu ciepła (SWC) to region, gdzie nie zachodzi odkształcenie plastyczne, a jedynym czynnikiem wpływającym na mikrostrukturę jest temperatura. W tej strefie obserwujemy powiększone ziarna, co wskazuje na ich wzrost lub wtórną rekrytalizację wynikającą z podwyższonej temperatury. Mikrostruktura materiału natywnego charakteryzuje się drobnymi wydzieleniami fazowymi. Proces FSW nie tylko wpływa na rozmiar ziaren, ale również na wielkość wydzieleni. W zgrzeinie, podczas chłodzenia po procesie FSW, sprzyjające warunki dla dynamicznej rekrytalizacji mogą prowadzić do ponownego wydzielenia fazy, tworząc mikrostrukturę składającą się z drobno zrekrystalizowanych ziaren oraz dużych wydzieleni powstałych przez koagulację i mniejszych, które ponownie się wydzieliły. W środku zgrzeiny, wydzielenia te są większe niż w strefie SWC. W miarę oddalania się od centrum zgrzeiny ku materiałowi rodzimemu, duże cząstki stają się rzadsze i ostatecznie lokalizują się na granicach ziaren. Wzrost temperatury w SWC przyczynia się do dalszego wzrostu ziaren oraz koagulacji wydzieleni, prowadząc do powstania obszarów wolnych od wydzieleni wokół granic ziaren, gdzie znajdują się duże wydzielenia. Badania te dowodzą, że proces FSW wprowadza znaczące zmiany w strukturze materiału, które można modelować i analizować w celu zrozumienia mechanizmów rekrytalizacji i wydzielenia faz w zgrzeinie i SWC. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań sił zrywających można zauważyć, że niezależnie od rodzaju użytego narzędzia wyniki są powtarzalne. Średnie wyniki sił zrywających wahają się w przedziale od około 4.28kN dla (1000obr/min; 50mm/min), najlepsze wartości uzyskano dla (1400obr/min; 70mm/min) i wartość ta wynosiła średnio 4.83kN. Można zauważyć, że wartości te są niższe od wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego o około 24% dla najgorszej próbki oraz o około 15% dla próbek o najlepszych właściwościach na rozciąganie. W znakomitej części przypadków zaobserwowano zrywanie próbek na zewnątrz spoiny po stronie spływu co może sugerować, że najbardziej podatne na uszkodzenia są obszary zewnętrzne zgrzeiny, po stronie spływu, gdzie twardość jest najniższa,

a często dochodzi do zerwania próbek. Częste pęknięcia próbek po stronie spływu mogą być związane z różnicami w rozmieszczeniu granic ziaren szeroko i wąskokątowych. Na stronie spływu, gdzie gęstość granic ziaren wąskokątowych jest wyższa, może to ułatwiać proces deformacji i przyczynić się do lekkiego obniżenia twardości. Dodatkowo można zaobserwować, że chropowatość powierzchni wpływa w znaczący sposób na wytrzymałość połączenia. W zmiennych warunkach obciążenia pęknięcie połączeń zgrzewanych rozpoczyna się na powierzchni elementu. W związku z tym chropowatość powierzchni ma znaczący wpływ na zmęczenie złącza zgrzewanego. Wyniki wskazują, że chropowatość powierzchni zależy od prędkości obrotowej narzędzia. W przypadku złącza FSW zaobserwowano, że chropowatość powierzchni początkowo malała, a następnie rosła wraz ze wzrostem prędkości obrotowej narzędzia. Najlepsze wartości chropowatości powierzchni zaobserwowano dla prędkości obrotowej 1200obr/min.

Analizując wszystkie otrzymane dane można stwierdzić, że optymalną prędkością obrotową narzędzia jest 1200obr/min, natomiast prędkość zgrzewania w przedziale 50-70mm/min. Ponadto na podstawie literatury stwierdzić można, że wartości te mogą się różnić w zależności od użytego materiału oraz jego grubości (Chi-Hui Chien et al., 2011). Dlatego tak ważne jest przeprowadzenie odpowiednich badań w celu doboru najlepszych parametrów zgrzewania. Dla tych wartości zaobserwowano stosunkowo dobre wartości sił zrywania (nieznaczny wzrost przy prędkościach 1400obr/min) oraz najmniejszą chropowatość powierzchni, która ma wpływ na wytrzymałość zmęczeniową złącza. Ponadto dla niższych prędkości obrotowych narzędzia zaobserwowano mniejszą ilość wad, co wskazuje na odpowiedni przepływ metalu podczas procesów, natomiast gdy prędkość zgrzewania osiągnęła 1400obr/min oraz 70 mm/min, można zaobserwować porowatości po stronie spływu oraz większą ilość występujących wad.

Warto również zwrócić uwagę, że zaprojektowane narzędzia są wystarczające aby w pełni przeprowadzić proces zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału. Analizując profile chropowatości spoin zauważyć można znaczące różnice pomiędzy narzędziami, mniejsze wartości chropowatości otrzymano dla narzędzia A, o zerowym kącie przyłożenia kołnierza do elementów zgrzewanych, dzięki temu można było wybrać optymalny kształt narzędzia do zgrzewania. Oba narzędzia zostały wykonane ze stali Vanadis 23, natomiast analizując profil twardości narzędzi można stwierdzić, że w obu przypadkach uzyskano znakomite wartości twardości powierzchni części roboczej jak i chwytowej narzędzi (około 70 HRC). Na podstawie literatury można zauważyć, że tylko nieliczne narzędzi poddane odpowiedniemu procesowi obróbki cieplnej są w stanie uzyskać taką twardość (Venkat i inni,

2021). Dzięki uzyskaniu należytych wartości twardości narzędzi wydłużono ich cykl życia co znacząco przyczynia się do redukcji kosztów procesu.

7 . Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy doktorskiej przeanalizowano możliwość wdrożenia i optymalizacji nowej metody łączenia metalowych komponentów struktur foteli samochodowych jaką jest zgrzewanie tarciove z przemieszaniem materiału. Szczególną uwagę poświęcono porównaniu wpływu kąta przylegania narzędzi wykonanych ze Stali Vanadis 23 na jakość uzyskanych połączeń, ze względu na brak rozwiązań w tym zakresie. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury dobrano wstępne kombinacje parametrów procesu FSW, aby wykonać szereg złączy dwoma typami narzędzi o zerowym kącie przyłożenia kołnierza oraz ujemnym wynoszącym 10^0 .

Badania laboratoryjne potwierdziły możliwość wykorzystania metody FSW przy zgrzewaniu elementów struktur foteli samochodowych z wykorzystaniem zaproponowanych narzędzi. Lepsze wyniki jakości złączy uzyskano dla narzędzia o zerowym kącie przyłożenia kołnierza do powierzchni zgrzewanej. Ponadto na podstawie wykonanych badań dobrano najbardziej optymalne parametry procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem materiału wynoszące 1200 obr/min przy posuwie w przedziale 50 – 70 mm/min. Efekty uzyskane w wyniku realizacji prac badawczych tj. w szczególności model procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem materiału stanowią podstawę do potencjalnego wdrożenia w skali technicznej.

W efekcie zrealizowanych prac badawczych uzyskano następujące efekty w wymiarze naukowym i aplikacyjnym.

1. Wykorzystanie zgrzewania tarciovego z przemieszaniem materiału przy produkcji metalowych struktur foteli samochodowych powoduje otrzymanie zadowalających właściwości mechanicznych zgrzeiny.
2. Największą efektywność złącza uzyskano dla narzędzia A (o zerowym kącie przyłożenia kołnierza do elementów zgrzewanych) i wynosiła 82.9%.
3. Największą efektywność złącza uzyskano dla 1200obr/min oraz 50mm/min.
4. Przeprowadzenie testów na połączeniach wykonanych metodą FSW przy stałym nacisku oraz różnych prędkościach obrotowych i posuwu wykazało, że wszystkie kombinacje procesu zapewniły odpowiednią skuteczność złącz.
5. Zaobserwowano znaczące różnice pomiędzy chropowatością powierzchni złączy wykonanych narzędziem A oraz narzędzie B (maksymalna różnica około 50%).

6. Zaobserwowano występowanie wad mikrostrukturalnych dla wszystkich kombinacji procesu co może świadczyć o zanieczyszczeniu przed lub w trakcie procesu zgrzewania: zgrzewanego materiału, narzędzi roboczych lub maszyny.
7. Przeprowadzone badania połączeń, wykonanych przy stałej sile docisku i różnych parametrach procesu, wykazały, że odpowiednią jakość złączy pod względem właściwości mechanicznych można uzyskać w szerokim zakresie parametrów procesu. Różne prędkości obrotowe oraz prędkości zgrzewania nie miały znaczącego wpływu na jakość spoiny.

Literatura:

1. Murr, L.E. A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems. *J. of Materi Eng and Perform* 19, 1071–1089 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9598-0>
2. P.F. Mendez and T.W. Eager, Welding Processes for Aeronautics, *Adv. Mater. Process.*, 2001, **159**, p 39–43
3. D. Burford, C. Widener, and B. Tweedy, Advances in Friction Stir Welding for Aerospace Applications, *Airframer*, 2007, **14**, p 3–7
4. G. Lütjering and J.C. Williams, *Titanium*, Springer, New York, 2007, p 109–113
5. D.G. Sanders, M. Ramulu, and P.D. Edwards, Superplastic Forming of Friction-Stir Welds in Titanium Alloy 6Al-4V: Preliminary Results, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, **39**, p 553–557
6. C. Meran, V. Kovan, and A. Alptekin, Friction Stir Welding of A101 304 Austenitic Stainless Steel, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2007, **38**(10), p 829–835
7. Jacquin D, Guillemot G. A review of microstructural changes occurring during FSW in aluminum alloys and their modeling, *J of Mat Proc Tech.* 2021;288:116706. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116706>
8. Kumar K, Kailas SV. The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Mat Scien and Eng: A.* 2008;485(1–2):367-374. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.013>
9. Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Church MG, Temple-Smith P, Dawes ChJ. Friction Stir Butt Welding, International Patent No. PCT/GB92/02203, GB Patent No. 9125978.8, 1991, U.S. Patent No. 5,460, 317.
10. Wang X, Wang K, Shen Y, Hu K. Comparison of fatigue property between friction stir and TIG welds *J. Univ. Sci. Technol. Beijing Miner. Metall. Mater.* 2008;15(3):280-284. DOI: 10.1016/S1005-8850(08)60053-5
11. Terra CS, Luis J, Silveira L. Models for FSW forces using a square pin profile tool. *J of Manuf Proc.* 2021(A):1395-1404. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.052>
12. Su H, Wu CS, Pittner A, Rethmeier M. Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding. *J of Manuf Proc.* 2013;15(4):495-500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.09.001>
13. Rambabu G, Balaji Naik D, Venkata Rao CH, Srinivasa Rao K, Madhusudan Reddy G. Optimization of friction stir welding parameters for improved corrosion resistance of

- AA2219 aluminum alloy joints, *Defence Technology*. 2015;11(4):330-337.
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.05.003>
14. Fratini L, Zuccarello B. An analysis of through-thickness residual stresses in aluminum FSW butt joints. *Inter J of Mach Tool and Manuf.* 2006;46(6):611-619. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.013
 15. Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ. Friction stir welding of aluminum alloys, *International Materials Reviews*, 2009;54(2):49-93, DOI: 10.1179/174328009X411136
 16. Shigematsu I, Kwon YJ, Suzuki K, Imai T, Saito N. Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding. *J Mat s Sci Lett.* 2003;22:343-356. DOI: 10.1023/A:1022688908885
 17. Vilaca P, Thomas W. Friction Stir Welding Technology. [in] *Structural connections for lightweight metallic structures*. Springer:Berlin/Heidelberg. 2011;85–124. DOI: 10.1007/8611_2011_56.
 18. Gibson B, Lammlein D, Prater T, Longhurst W, Cox C, Ballun M, Dharmaraj K, Cook G, Strauss A, Friction stir welding: Process, automation, and control, *J of Manuf Proc.* 2014;16(1):56–73. 10.1016/j.jmapro.2013.04.002.
 19. Dialami N, Chiumenti M, Cervera M, Segatori A, Osikowicz W. Enhanced friction model for Friction Stir Welding (FSW) analysis: Simulation and experimental validation. *Intern J of Mech Scien.* 2017; 133:555-567.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.022>.
 20. G. Siva Prasad a, K. Srinivasa Rao a, G. Madhusudhan Reddy, The effect of microstructure on corrosion behaviour and mechanical properties of friction stir welds of AA2519 and AA2219 Al-alloys, *Materialstoday Comunication*, 33, 2022, 104446.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104446>.
 21. O. Hatamleh , IV Rivero , J. Lyons, Evaluation of surface residual stresses in friction stir welds due to laser and shot peening *Journal of Materials Engineering and Performance* , 16 (5) (2007) , s. 549 – 553.
 22. MN James , DJ Hughes , Z. Chen , H. Lombard , DG Hattingh , D. Asquith , JR Yates , PJ Webster, Residual stresses and fatigue performance, *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007), pp. 384-395.
 23. A. Murphy, W. McCune, D. Quinn, M. Price, The characterization of friction stir welding process effects on stiffened panel buckling performance, *Thin-Walled Structure*, 45 (2007), pp. 339-351.

24. Weis, O.C.A. Influence of Energy Input in Friction Stir Welding on Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Precipitation-Hardening in Aluminium Alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). Ph.D. Thesis, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, Germany, 2008.
25. Venkateswarlu, D., Cheepu, M., Rao, P. N., Kumaran, S. S., & Srinivasan, N. (2019). Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of AA2219-O and T6 Friction Stir Welds. In *Materials Science Forum* (Vol. 969, pp. 205–210). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.969.205>
26. Arora A, De A, DebRoy T. Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. *Scripta Materialia*. 2011;64(1):912. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.052>.
27. S A Khodir, Y Morisada, R Ueji, et al. Microstructures and mechanical properties evolution during friction stir welding of SK4 high carbon steel alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 558: 572–578.
28. D H Choi, C Y Lee, B W Ahn, et al. Hybrid friction stir welding of high-carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(2): 127–130.
29. M Abbasi, T W Nelson, C D Sorensen, et al. An approach to prior austenite reconstruction. *Materials Characterization*, 2012, 66: 1–8.
30. Dixit US, Yadav V, Pandey P.M., Roy A., Silberschmidt V.V., 14 - Modeling of friction in manufacturing processes, *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*, 2020, 415-444. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818232-1.00014-X>.
31. Bhardwaj N, Narayanan RG, Dixit US, Hashmi MSJ. Recent development in friction stir welding and resulting industrial practices. *Adv in Mat and Proces Techn.* (2019): 5(1):1-36. 10.1080/2374068X.2019.1631065.
32. Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J. et al. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *Int J Mech Mater Eng* 10, 26 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0053-8>.
33. V Msomi, S Mabuwa. Analysis of material positioning towards microstructure of the friction stir processed AA1050/AA6082 dissimilar joint. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2020, 1: 100002.
34. X Xu, X Ren, H Hou, et al. Effects of cryogenic and annealing treatment on microstructure and properties of friction stir welded TA15 joints. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 804: 140750.

35. Y Hu, H Liu, D Li. Contribution of ultrasonic to microstructure and mechanical properties of tilt probe penetrating friction stir welded joint. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, 85: 205–217.
36. V Karami, B M Dariani, R Hashemi. Investigation of forming limit curves and mechanical properties of 316 stainless steel/St37 steel tailor-welded blanks produced by tungsten inert gas and friction stir welding method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 32: 437–446.
37. R Padmanaban, V Balusamy, V R aira Vignesh. Effect of friction stir welding process parameters on the tensile strength of dissimilar aluminum alloy AA2024-T3 and AA7075-T6 joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2020, 51(1): 17–27.
38. D G Mohan, S Gopi. Influence of In-situ induction heated friction stir welding on tensile, microhardness, corrosion resistance and microstructural properties of martensitic steel. *Engineering Research Express*, 2021, 3(2): 025023. (a).
39. Mohan, D.G., Wu, C. A Review on Friction Stir Welding of Steels. *Chin. J. Mech. Eng.* 34, 137 (2021). <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00655-3> (b).
40. Kossakowski PG, Wciślik W, Bakalarz M. Effect of selected Friction Stir Welding parameters on mechanical properties of joints. *Archives of Civil Engineering*. 2019;65(4):51-62. DOI 10.2478/ace-2019-0046.
41. Magalhaes VM, Leitao C, Rodrigues DM, Friction stir welding industrialization and research status, *Science and Technology of Welding and Joining*. 2017;23(1):1-10. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110.
42. Cam G., Friction stir welded structural materials: Beyond Al-alloys, *International Materials Reviews* 56(1), 2011, 1-48. DOI: 10.1179/095066010X12777205875750.
43. Bach M, Merati A, Gharghoury M., effects of fatigue on the integrity of a friction stir welded lap joint containing residual stresses, 2014, *Adv Mater Res* 996:794–800.
44. Zifčák P, Blažíček P, Pastier P. The effect of selected welding parameters on properties of FSW welded joints in ferritic steel type 2235 JRC+N, *Welding Technology Review*. 2014;86(11): DOI:10.26628/wtr.v86i11.36.
45. Su H, Wu CS, Pittner A, Rethmeier M. Thermal energy generation and distribution in friction stir welding of aluminum alloys. *Energy*. 2014;77:720-731. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.045>.
46. Hamilton C. Dymek S., Sommers A., A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(10), 2008, 1120-1130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.02.001>.

47. Packer S., Tool geometries and tool materials for friction stir welding high melting temperature materials, Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, 2013, 473-476. <https://doi.org/10.1533/978-1-78242-164-1.473>.
48. Kumar S., Mahajan A., Kumar S., Singha H., Friction stir welding: Types, merits & demerits, applications, process variables & effect of tool pin profile, 56, Part 5, 2022, Pages 3051-3057. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.097>.
49. Huda Z. Taib NI, Zaharinie T. Characterization of 2024 T3: An aerospace aluminum alloy, Material Chemistry and Physics. 2009;113(2-3):515-517. DOI:10.1016/j.matchemphys.2008.09.050.
50. D.R. Askeland, P.P. Phule, The Science and Engineering of Materials Thomson Books Inc., USA (2003).
51. Huang X, Scheuring J, Reynolds AP. FSW of High Strength 7XXX Aluminum Using Four Process Variants. In: Mishra RS, Mahoney MW, Sato Y, Hovanski Y. (eds) Friction Stir Welding and Processing VIII. Springer, Cham. 2015;91-98. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48173-9_10.
52. Lee WB, Yeon YM, Jung SB, The improvement of mechanical properties of friction stir welded A356 AL alloy, Mats Sci and Eng. 2003;355(1):154-159. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00053-4.
53. Steuwer A., Peel M.J., Withers P.J., Dissimilar friction stir welds in AA5083–AA6082: The effect of process parameters on residual stress, Materials Science and Engineering: A, 441(1–2), 2006, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.012>.
54. Singh K., Singh G., Singh H., Review on friction stir welding of magnesium alloys, Journal of Magnesium and Alloys, 6(4), 2018, 399-416. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.06.001>.
55. Elangovan, K., Balasubramanian, V. & Babu, S. Developing an Empirical Relationship to Predict Tensile Strength of Friction Stir Welded AA2219 Aluminum Alloy. J. of Materi Eng and Perform 17, 820–830 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9240-6>.
56. Abbass MK, Hussein SKh, Kudair AA (2015) Optimization of friction stir spot welding parameters of dissimilar welded joints of aluminum alloy (aa2024t3) with pure copper sheets. Int J Eng Sci Res Technol 4(12):514–526.
57. F C Liu, P Xue, Z Y Ma. Microstructural evolution in recrystallized and unrecrystallized Al–Mg–Sc alloys during superplastic deformation. Materials Science and Engineering: A, 2012, 547: 55–63.

58. Y Gao, K Nakata, K Nagatsuka, et al. Interface microstructural control by probe length adjustment in friction stir welding of titanium and steel lap joint. *Materials & Design*, 2015, 65: 17–23.
59. Kubit, A.; Trzepieciński, T.; Kluz, R.; Ochałek, K.; Slota, J. Multi-Criteria Optimisation of Friction Stir Welding Parameters for EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy Joints. *Materials* 2022, 15, 5428. <https://doi.org/10.3390/ma15155428>.
60. Venkat R.G., Balram Y., Vishnu V.T., Effect of FSW process parameters and tool profile on mechanical properties of AA 5082 and AA 6061 welds, *Materials today Proceedings*, 46(1), 2021, 826-830. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.801>
61. Elangovan, K.; Balasubramanian, V.; Valliappan, M. Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy. *Mater. Manuf. Process.* 2008, 23, 251–260.
62. Packer S., Tool geometries and tool materials for friction stir welding high melting temperature materials, *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, 2013, 473-476. <https://doi.org/10.1533/978-1-78242-164-1.473>.
63. Chi-Hui Chien , Wei-Bang Lin i Thaiping Chen (2011) Optymalne parametry procesu FSW dla stopów aluminium AA5083, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 34:1, 99-105, DOI:10.1080/02533839.2011.553024
64. Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF, Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Progress in Materials Science.* 2020;115(8):100706. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100706.
65. Parshin S.G, Parshin S.S, Bruckner H, Semmler W, Kush M, Reinhard S, Kuhn S. Intensification of melting of wires in MIG/MAG welding of steels and aluminium alloys, 2010, Pages 47-51, <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.527056>.
66. Lucian CP, Mitelea I, Burcă M, Uțu I D Mechanical Behaviour of MAG Pulsed Welded Joints from 6082 T6 Aluminium Alloy, 2018, CP Lucian et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 416 012009, 10.1088/1757-899X/416/1/012009
67. Kannan S, Senthil S, Kumaran B, Kumaraswamidhas L.A An investigation on compression strength analysis of commercial aluminium tube to aluminium 2025 tube plate by using TIG welding process, 2015, *Journal of Alloys and Compounds*, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.096>.
68. A. Murphy, W. McCune, D. Quinn, M. Price, The characterization of friction stir welding process effects on stiffened panel buckling performance, *Thin-Walled Structure*, 45 (2007), pp. 339-351

69. Mukuna Patrick Mubiayi, Esther Titilayo Akinlabi, Mamookho Elizabeth Makhatha, Current Trends in Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding (FSSW), Springer, 2019, ISBN 978-3-319-92750-3 (eBook).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-92750-3>.
70. Michael A. Sutton, Anthony P. Reynolds, Bangcheng Yang, Robert Taylor, Mode I fracture and microstructure for 2024-T3 friction stir welds, Materials Science and Engineering: A, 354, Issues 1–2, 15 August 2003, Pages 6-16.
71. A. Merati A study of nucleation. and fatigue behavior of an aerospace aluminum alloy 2024-T3, 2005, International Journal of Fatigue, Pages 33-44,
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.06.010>.

8. Spis Tabel

Tabela 2. 1. Wybrane rodzaje narzędzi FSW (Su et al., 2013).....	12
Tabela 2. 2. Ogólne zalety procesu.....	14
Tabela 2. 3. Zalety dla zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału aluminium	15
Tabela 4. 1. Skład chemiczny stopu 2024.....	25
Tabela 4. 2. Właściwości mechaniczne stopu 2024-T3.....	25
Tabela 4. 3. Parametry procesu Zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału.	28
Tabela 4. 4. Dane techniczne jednostki radiograficznej Eresco 42 MF2.....	33
Tabela 5. 1. Średnia wytrzymałość na rozciąganie próbek zgrzewanych metodą FSW oraz materiału rodzimego wraz z obliczeniami statystycznymi dla wartości ufności 95%.....	36
Tabela 5. 2. Wartość efektywności złącza FSW – narzędzie A.....	41
Tabela 5. 3. Wartość efektywności złącza FSW – narzędzie B.....	42
Tabela 5. 4. Średnie wyniki pomiarów twardości dla wszystkich kombinacji prędkości obrotowych wrzecion oraz prędkości posuwu.....	44
Tabela 5. 5. Wyniki pomiarów twardości trzpieni.....	57
Tabela 5. 6. Uśrednione wyniki pomiarów.....	58
Tabela 5. 7. Wynik pomiaru chropowatości dla blachy obrobionej mechanicznie.....	72
Tabela 5. 8. Wynik pomiaru chropowatości dla blachy surowej.....	72
Tabela 5. 9. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR1. (1000 obr/min; 50mm/min) – narzędzie A.....	73
Tabela 5. 10. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR1. (1000 obr/min; 50mm/min) – narzędzie B.....	73
Tabela 5. 11. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR2 (1000 obr/min; 70mm/min) – narzędzie A.....	73
Tabela 5. 12. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR2 (1000 obr/min; 70mm/min) – narzędzie B.....	74
Tabela 5. 13. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR3 (1200 obr/min; 50mm/min) – narzędzie A.....	74
Tabela 5. 14. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR3 (1200 obr/min; 50mm/min) – narzędzie B.....	74
Tabela 5. 15. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR4 (1200 obr/min; 70mm/min) – narzędzie A.....	75
Tabela 5. 16. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR4 (1200 obr/min; 70mm/min) – narzędzie B.....	75
Tabela 5. 17. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR5 (1400 obr/min; 50mm/min) – narzędzie A.....	75
Tabela 5. 18. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR5 (1400 obr/min; 50mm/min) – narzędzie B.....	76
Tabela 5. 19. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR6 (1400 obr/min; 70mm/min) – narzędzie A.....	76
Tabela 5. 20. Wynik pomiaru chropowatości dla próbki PR6 (1400 obr/min; 70mm/min) – narzędzie B.....	76
Tabela 5. 21. Zestawienie wartości chropowatości powierzchni – narzędzie A.....	77
Tabela 5. 22. Zestawienie wartości chropowatości powierzchni – narzędzie B.....	77
Tabela 5. 23. Różnica wartości chropowatości powierzchni pomiędzy narzędziami.....	78

Tabela 5. 24. Zdjęcia rentgenowskie wraz z opisami. 80

Tabela 6. 1. Wyniki pomiarów siły zrywającej, wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności. 100

Tabela 6. 2. Wyniki pomiarów twardości spoiny. 107

9. Spis rysunków

Rysunek 2. 1. Przebieg procesu zgrzewania tarciovego z mieszaniem metalu zgrzeiny.	10
Rysunek 2. 2. Schemat procesu FSW.	12
Rysunek 2. 3. Schemat.przekroju poprzecznego.zgrzeiny FSW.wraz z poszczególnymi.strefami mikrostrukturalnymi.	17
Rysunek 2. 4. Charakterystyczna.mikrostruktura jądra.zgrzeiny tzw. „pierścienie cebuli” w.stopie 6101, a) małe.powiększenie, b) duże.powiększenie.	18
Rysunek 4. 1. Frezarka uniwersalna FWF 32J2 JAROCIN ze zmodyfikowanym stołem roboczym... 26	26
Rysunek 4. 2.. System mocowania łączonej blachy.....	27
Rysunek 4. 3. Narzędzie A użyte do zgrzewania stopu 2024 – T3.....	27
Rysunek 4. 4. Narzędzie B użyte do zgrzewania stopu 2024 – T3.....	28
Rysunek 4. 5. Schemat blokowy agendy badawczej.....	29
Rysunek 4. 6. Maszyna Zwick/Roell Z250 kN.	30
Rysunek 4. 7. Kształt oraz wymiary próbki.	31
Rysunek 4. 8. Wizualizacja rozmieszczenia punktów pomiarowych.	32
Rysunek 4. 9. Schemat badania twardości części roboczej narzędzia FSW.	32
Rysunek 4. 10.Schemat badania twardości części chwytowej narzędzia.	32
Rysunek 4. 11. Schemat próbek testowych pokazujący pomiar chropowatości powierzchni.	34
Rysunek 5. 1. Wartość średniej siły zrywającej wraz z przedziałem ufności dla narzędzia A.	38
Rysunek 5. 2. Wartość średniej siły zrywającej wraz z przedziałem ufności dla narzędzia B.	38
Rysunek 5. 3.Wykres maksymalnej siły zrywającej przenoszonej przez złącze zgrzewane metodą FSW w stosunku do prędkości posuwu – narzędzie A.	39
Rysunek 5. 4. Wykres maksymalnej siły zrywającej przenoszonej przez złącze zgrzewane metodą FSW w stosunku do prędkości posuwu – narzędzie B.	39
Rysunek 5. 5. Wykres.siły.maksymalnej.przenoszonej.przez złącze.zgrzewane w.funkcji.zmiany prędkości.obrotowej.wrzucona dla narzędzia A.	40
Rysunek 5. 6. Wykres.siły.maksymalnej.przenoszonej.przez złącze.zgrzewane w.funkcji.zmiany prędkości.obrotowej.wrzucona dla narzędzia B.....	40
Rysunek 5. 7. Wykres przedstawiający efektywności złącza w zależności od parametrów – narzędzie A.....	42
Rysunek 5. 8. Wykres przedstawiający efektywności złącza w zależności od parametrów – narzędzie B.....	43
Rysunek 5. 9. Średni rozkład twardości spoiny dla poszczególnych parametrów zgrzewania.....	56
Rysunek 5. 10. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T01.	58
Rysunek 5. 11. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T02.	58
Rysunek 5. 12. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T01 (końcówka).	59
Rysunek 5. 13. Wyniki pomiarów twardości wraz z niepewnością pomiarową dla próbki T02 (końcówka).	59
Rysunek 5. 14. Mikrostruktura stopu aluminium 2024 – T3.	60
Rysunek 5. 15. Mikrostruktura złącza FSW (prędkość obrotowa 1000, prędkość posuwu 50, powiększenie 100x).	61
Rysunek 5. 16. Mikrostruktura złącza FSW w strefie wpływu ciepła (prędkość obrotowa 1000, posuwu 50, powiększenie 400x).	62

Rysunek 5. 17. Rozdrobnione wydzielienia krzemu w złączu FSW (prędkość obrotowa 1200, prędkość posuwu 50 powiększenie 400x).	62
Rysunek 5. 18. Wydzielienia iglaste na granicy przetopu, powiększenie 200x.	63
Rysunek 5. 19. Rozrost ziaren w strefie wpływu ciepła oraz widoczne pęcherze gazowe.(prędkość obrotowa 1200, posuw 70, powiększenie 200x).	63
Rysunek 5. 20. Wydzielienia na granicach ziaren w strefie wpływu ciepła.	63
Rysunek 5. 21. Pęcherze gazowe w spoinie FSW (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 100x).	64
Rysunek 5. 22. Iglaste wydzielienia krzemu w strefie wpływu ciepła (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 200x).	64
Rysunek 5. 23. Pęcherz gazowy o wielkości ponad 500 μ m (prędkość obrotowa 1400, posuw 70, powiększenie 50x).	65
Rysunek 5. 24. Iglaste wydzielienia krzemu w strefie wpływu ciepła (powiększenie 100x).	65
Rysunek 5. 25. Drobne wydzielienia z fazy α (powiększenie 100x).	66
Rysunek 5. 26. Pęcherze na styku spoiny i obszaru niepełnego zgrzania (prędkość obrotowa 1400, posuw 50, powiększenie 200x).	66
Rysunek 5. 27. Rozrost ziaren i wydzieleni w strefie wpływu ciepła (prędkość 1200, posuw 50, powiększenie 200x).	66
Rysunek 5. 28. Iglaste wydzielienia krzemu oraz innych pierwiastków (prędkość obrotowa 1200, posuw 50, powiększenie 1000x).	67
Rysunek 5. 29. Porowatość spoiny (prędkość 1400, posuw 70, powiększenie 50x).	67
Rysunek 5. 30. Odcisk diamentu podczas badania twardości (powiększenie 1000x).	67
Rysunek 5. 31. Porowatość widoczna wewnątrz spoiny (powiększenie 200x).	68
Rysunek 5. 32. Mikrostruktura spoiny z brakiem podtopień oraz pęknięć (prędkość obrotowa 1000, posuw 50, powiększenie 50x).	68
Rysunek 5. 33. Redukcja przez rozpuszczenie α -Al w strefie wpływu ciepła.	69
Rysunek 5. 34. Wydzielienia fazy α (powiększenie 1000x).	69
Rysunek 5. 35. Kulisty pęcherz gazowy (powiększenie 200x).	69
Rysunek 5. 36. Mikrostruktura próbki, brak niezgodności (prędkość obrotowa 1200, posuw 50, powiększenie 1000x).	70
Rysunek 5. 37. Pęcherz gazowy o wymiarach 1200x600 μ m (prędkość obrotowa 1400, posuw 70, powiększenie 100x).	70
Rysunek 5. 38. Rozdrobnione wydzielienia w warstwie wierzchniej (powiększenie 400x).	71
Rysunek 5. 39. Drobne wydzielienia fazy α (prędkość obrotowa 1000, posuw 50, powiększenie 1000x).	71
Rysunek 5. 40. Profil chropowatości dla blachy obrabianej mechanicznie.	72
Rysunek 5. 41. Profil chropowatości dla blachy surowej.	72
Rysunek 5. 42. Profil chropowatości dla próbki PR1 – narzędzie A.	73
Rysunek 5. 43. Profil chropowatości dla próbki PR1 – narzędzie B.	73
Rysunek 5. 44. Profil chropowatości dla próbki PR2 – narzędzie A.	73
Rysunek 5. 45. Profil chropowatości dla próbki PR2 – narzędzie B.	74
Rysunek 5. 46. Profil chropowatości dla próbki PR3 – narzędzie A.	74
Rysunek 5. 47. Profil chropowatości dla próbki PR3 – narzędzie B.	74
Rysunek 5. 48. Profil chropowatości dla próbki PR4 – narzędzie A.	75
Rysunek 5. 49. Profil chropowatości dla próbki PR4 – narzędzie B.	75
Rysunek 5. 50. Profil chropowatości dla próbki PR5 – narzędzie A.	75
Rysunek 5. 51. Profil chropowatości dla próbki PR5 – narzędzie B.	76
Rysunek 5. 52. Profil chropowatości dla próbki PR6 – narzędzie A.	76

Rysunek 5. 53. Profil chropowatości dla próbki PR6 – narzędzie B.	76
Rysunek 5. 54. Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni w zależności od użytego narzędzia. ..	78

Załączniki

Tabele zbiorcze

Tabela 6. 1. Wyniki pomiarów siły zrywającej, wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności.

a. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 50 mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1.	1000	50	4.42	350	290
2.	1000	50	4.40	347	289
3.	1000	50	4.30	328	284
4.	1000	50	4.28	325	280
5.	1000	50	4.48	358	301
6.	1000	50	4.45	355	299
7.	1000	50	4.10	320	275
8.	1000	50	4.00	310	273
9.	1000	50	4.56	365	309
10.	1000	50	4.28	327	282

a1. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1	1000	50	4.38	335	294
2	1000	50	4.35	347	286
3	1000	50	4.25	328	284
4	1000	50	4.28	325	280
5	1000	50	4.48	352	292
6	1000	50	4.45	342	299
7	1000	50	4.15	326	275

8	1000	50	4.25	323	273
9	1000	50	4.26	338	290
10	1000	50	4.26	327	282

b. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 70 mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1.	1000	70	4.40	352	291
2.	1000	70	4.42	342	290
3.	1000	70	4.31	330	285
4.	1000	70	4.30	322	281
5.	1000	70	4.45	356	300
6.	1000	70	4.44	352	297
7.	1000	70	4.15	323	276
8.	1000	70	4.40	330	283
9.	1000	70	4.35	345	299
10.	1000	70	4.50	350	299

b1. Prędkość obrotowa 1000 obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1	1000	70	4.32	348	282
2	1000	70	4.36	346	282
3	1000	70	4.35	338	285
4	1000	70	4.28	342	276
5	1000	70	4.38	351	372
6	1000	70	4.37	346	281

7	1000	70	4.32	337	279
8	1000	70	4.34	339	272
9	1000	70	4.25	338	280
10	1000	70	4.25	346	276

c. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1.	1200	50	4.80	380	310
2.	1200	50	4.72	375	300
3.	1200	50	4.85	388	314
4.	1200	50	4.62	370	299
5.	1200	50	4.59	368	292
6.	1200	50	4.75	389	303
7.	1200	50	4.90	389	309
8.	1200	50	4.67	360	301
9.	1200	50	4.82	390	313
10.	1200	50	4.58	368	301

c1. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1	1200	50	4.85	378	305
2	1200	50	4.72	375	308
3	1200	50	4.72	372	309
4	1200	50	4.62	370	308
5	1200	50	4.88	369	313

6	1200	50	4.75	379	299
7	1200	50	4.88	382	311
8	1200	50	4.78	373	304
9	1200	50	4.82	376	313
10	1200	50	4.78	378	311

d. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F_z [kN]	Rm [Mpa]	Rp_{02} [Mpa]
1.	1200	70	4.68	374	303
2.	1200	70	4.89	377	310
3.	1200	70	4.92	388	319
4.	1200	70	4.69	373	302
5.	1200	70	4.80	380	308
6.	1200	70	4.82	389	309
7.	1200	70	4.68	378	302
8.	1200	70	4.65	362	302
9.	1200	70	4.69	398	312
10.	1200	70	4.88	378	311

d1. Prędkość obrotowa 1200 obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F_z [kN]	Rm [Mpa]	Rp_{02} [Mpa]
1	1200	70	4.84	377	304
2	1200	70	4.75	371	310
3	1200	70	4.79	384	309
4	1200	70	4.78	373	301

5	1200	70	4.81	375	305
6	1200	70	4.79	386	307
7	1200	70	4.72	378	302
8	1200	70	4.72	392	302
9	1200	70	4.69	369	308
10	1200	70	4.83	371	305

e. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1.	1400	50	4.38	348	292
2.	1400	50	4.41	346	289
3.	1400	50	4.35	330	288
4.	1400	50	4.45	328	284
5.	1400	50	4.38	354	299
6.	1400	50	4.69	362	309
7.	1400	50	4.68	360	309
8.	1400	50	4.20	312	277
9.	1400	50	4.60	357	307
10.	1000	50	4.29	327	282

e1. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1	1400	50	4.62	341	288
2	1400	50	4.42	342	286
3	1400	50	4.43	343	292

4	1400	50	4.49	328	282
5	1400	50	4.61	342	291
6	1400	50	4.5	342	299
7	1400	50	4.56	342	307
8	1400	50	4.57	338	277
9	1400	50	4.61	341	307
10	1000	50	4.6	342	282

f. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1.	1400	70	4.72	371	288
2.	1400	70	4.88	379	290
3.	1400	70	4.90	389	309
4.	1400	70	4.72	377	289
5.	1400	70	4.82	381	292
6.	1400	70	5.03	399	315
7.	1400	70	4.92	392	310
8.	1400	70	4.89	369	309
9.	1400	70	4.70	365	311
10.	1400	70	4.72	371	312

f1. Prędkość obrotowa 1400 obr/min, prędkość posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	V [obr/min]	P [mm/min]	F _z [kN]	Rm [Mpa]	Rp ₀₂ [Mpa]
1	1400	70	4.57	350	288
2	1400	70	4.48	346	287

3	1400	70	4.47	348	297
4	1400	70	4.52	339	289
5	1400	70	4.52	347	289
6	1400	70	4.58	336	291
7	1400	70	4.51	337	292
8	1400	70	4.71	348	293
9	1400	70	4.56	332	288
10	1400	70	4.52	341	288

g. *Material rodzimy*

Lp.	F_z [kN]	R_m [Mpa]	R_{p02} [Mpa]
1.	5.7	450	360
2.	5.83	460	365
3.	5.75	458	362
4.	5.9	478	375
5.	5.58	439	355
6.	5.92	486	376
7.	5.75	477	368
8.	5.55	462	348
9.	5.89	485	375
10.	5.84	485	374

Tabela 6. 2. Wyniki pomiarów twardości spoiny.

- a. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz posuwu 50mm/min – narzędzie A

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w pozycji X_3
1.	0	100.2	97.5	98.5
2.	0.5	99.2	99	98.4
3.	1	98.2	98.5	98.3
4.	1.5	98	97.2	97.1
5.	2	96.5	95.8	96
6.	2.5	96	95.2	94.6
7.	3	93.4	93.2	92.1
8.	3.5	91.2	91	90.7
9.	4	89.2	88.9	87.9
10.	4.5	86.4	84.9	85.6
11.	5	82.1	81.3	83.3
12.	5.5	83.4	83.2	84.2
13.	6	84.7	84.3	84.5
14.	6.5	85.4	85.6	85.9
15.	7	86.2	86.4	86.8
16.	7.5	87	87.2	87.1
17.	8	87.2	87.6	87.4
18.	8.5	88.1	88.6	88.2
19.	9	89.1	90.2	88.9
20.	9.5	89.67	90.9	89.1
21.	10	90.3	91.4	89.9

22.	10.5	91.2	92	90.9
23.	11	92.1	92.9	91.4
24.	11.5	93	93.6	92.8
25.	12	94.2	94.9	94
26.	12.5	96.1	97	96.3
27.	13	99.1	98.6	98.2
28.	13.5	101.1	101.9	100.5
29.	14	104	104.2	103.5
30.	14.5	106.3	106.9	105.2
31.	15	108.1	109.4	107.6
32.	15.5	109.9	110.3	109.8
33.	16	110.9	112.2	111.7
34.	16.5	113.2	114.1	113
35.	17	114.9	115.5	114.8
36.	17.5	116.2	116.9	116.7
37.	18	118.2	117.7	117.9
38.	18.5	119.3	118.6	119.2
39.	19	119.9	119.5	119.9
40.	19.5	120.6	120	120.7
41.	20	121.1	120.5	121.3
42.	0	100.2	97.5	98.5
43.	-0.5	98.1	97	98.1
43.	-1	96.3	96.7	97.1
44.	-1.5	94.5	95.7	95
45.	-2	93.2	94	93.5

46.	-2.5	92.9	91.8	91
47.	3	89.6	88.9	88.6
48.	-3.5	88.1	86.7	86.7
49.	-4	85.4	84.1	84.1
50.	-4.5	83.6	81.5	82.1
51.	-5	82.1	80.5	81.7
52.	-5.5	83	80.2	80.9
53	-6	84.9	81	81
54	-6.5	85.2	83.2	83.5
55	-7	86.2	84.3	85
56	-7.5	87	85.2	86.1
57	-8	88.2	86.3	87
58	-8.5	88.7	88.4	87.7
59	-9	89.1	89	89
60	-9.5	90	90.1	89.6
61	-10	91.1	90.4	91
62	-10.5	92	92.1	91.4
63	-11	94.2	94.7	95.2
64	-11.5	96.7	96.7	97.8
65	-12	98.2	98	99.9
66	-12.5	100.1	100.7	102
67	-13	102	102.1	102.8
68	-13.5	103.1	102.9	104
69	-14	104.4	104.5	104.7
70	-14.5	106.3	106	106.3

71	-15	107.2	106.9	108
72	-15.5	107	107.2	108.4
73	-16	109.1	107	110.1
74	-16.5	110.7	107.3	112.1
75	-17	112.7	109.1	113.8
76	-17.5	114.1	111.1	115.3
77	-18	116.5	113.5	116.8
78	-18.5	117.8	114.5	117.9
79	-19	118.4	116.7	118.2
70	-19.5	119	119.2	119.2
81	-20	120.1	118.9	119.4

a1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X ₁	Twardość w pozycji X ₂	Twardość w pozycji X ₃
1.	0	100.2	98.6	98.5
2.	0.5	99.5	99.7	98.1
3.	1	98.2	98.5	98.2
4.	1.5	97.9	97.7	97.6
5.	2	96.1	95.9	96.2
6.	2.5	96.2	95.9	94.9
7.	3	93.1	92.9	92
8.	3.5	91.1	91.3	90.9
9.	4	88.1	87.4	87.3
10.	4.5	86.3	86.9	85.9

11.	5	82.1	82.9	83.7
12.	5.5	84.9	83.6	84.1
13.	6	84.4	84.7	84.3
14.	6.5	85.8	85.2	85.3
15.	7	86.4	86.3	86.5
16.	7.5	87.3	87.6	87.8
17.	8	87.5	87.2	87.6
18.	8.5	88.9	88.8	88.9
19.	9	89.2	90.6	90.3
20.	9.5	89.5	90.1	89.6
21.	10	90.3	91.4	89.9
22.	10.5	90.9	90.5	90.8
23.	11	92.4	92.7	91.6
24.	11.5	93.4	93.6	92.2
25.	12	94.5	94.3	94.5
26.	12.5	96.5	96.5	95.8
27.	13	98.8	98.2	98.5
28.	13.5	101.7	101.2	100.7
29.	14	103.9	104.2	103.5
30.	14.5	106.5	106.1	105.5
31.	15	108.1	107.6	107.6
32.	15.5	110.5	110.7	109.5
33.	16	112.6	112.1	112.4
34.	16.5	114.7	114.3	114.5
35.	17	114.7	115.4	114.3

36.	17.5	115.3	116.1	116.3
37.	18	117.8	116.7	117.8
38.	18.5	119.1	118.6	119.4
39.	19	119.4	119.8	119.7
40.	19.5	120.1	120.8	120.3
41.	20	121.1	120.5	120.2
42.	0	100.2	98.6	98.5
43.	-0.5	98.8	97.9	98.4
43.	-1	96.9	96.3	97.8
44.	-1.5	94.1	95.6	95.1
45.	-2	93.9	94.2	93.3
46.	-2.5	92.2	91.9	91.3
47.	3	89.8	88.6	88.8
48.	-3.5	88.5	86.3	86.1
49.	-4	85.3	84.9	84.8
50.	-4.5	83.2	81.6	82.8
51.	-5	82.1	80.5	81.7
52.	-5.5	81.9	80.7	80.2
53	-6	82.9	81.9	82.8
54	-6.5	85.1	84.8	85
55	-7	86.1	84.8	85.2
56	-7.5	87.2	86.5	86.3
57	-8	87.9	87.6	87.2
58	-8.5	88.6	88.7	87.1
59	-9	89.3	89.4	89.3

60	-9.5	90.6	90.6	90.1
61	91.1	90.4	91.5	91.1
62	-10.5	92.4	92.4	92.8
63	-11	94.9	95.7	95.7
64	-11.5	96.6	96.4	97.4
65	-12	98.7	98.9	99.8
66	-12.5	100.5	100.3	100.9
67	-13	102.6	102.7	102.7
68	-13.5	103.1	103.5	103.8
69	-14	104.2	104.3	104.4
70	-14.5	106.1	106.2	106.2
71	-15	107.2	106.7	106.6
72	-15.5	108	108.2	107.8
73	-16	109.6	107.4	110.2
74	-16.5	110.1	109	110.8
75	-17	112.4	111.7	113.7
76	-17.5	114.7	114.6	115.1
77	-18	115.8	115	116.9
78	-18.5	117.5	114.2	117.7
79	-19	118.2	116.5	118.4
70	-19.5	119.2	119.1	118.7
81	-20	120.3	121.9	119.9

- b. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1200 obr/min oraz posuwu 50mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w pozycji X_3
1.	0	99.2	98.5	98.5
2.	0.5	99.1	99.2	98.2
3.	1	97.3	97.5	97
4.	1.5	96.1	96.2	97.3
5.	2	94.2	93.4	95.3
6.	2.5	92.1	93.2	93.6
7.	3	90.4	90.2	91.1
8.	3.5	89.2	89.5	89.7
9.	4	88.1	87.9	86.9
10.	4.5	85.4	84.1	84.5
11.	5	82.2	83.4	83.9
12.	5.5	83.2	83.5	84.7
13.	6	85.7	85.3	85.9
14.	6.5	86.5	86.5	86.2
15.	7	86.9	86.9	86.8
16.	7.5	87.1	87.1	87.5
17.	8	87.5	87.6	88
18.	8.5	88	88.6	88.3
19.	9	89.7	90.4	89.2
20.	9.5	90.6	90.9	90.6
21.	10	90.7	90.4	90.9
22.	10.5	90.2	91.2	91.5

23.	11	92.7	92.2	91.6
24.	11.5	94.2	93	94.2
25.	12	95.2	95.1	95.2
26.	12.5	96.7	96.4	96.9
27.	13	99	98.8	98.4
28.	13.5	102.1	102.1	101.5
29.	14	103.9	103.6	104.1
30.	14.5	105.7	106.6	106.2
31.	15	108.3	108.4	108.6
32.	15.5	108.9	108.3	109.2
33.	16	110.6	111.2	110.7
34.	16.5	112.9	112.8	113.4
35.	17	114.6	115.3	114.9
36.	17.5	117	117.2	116.9
37.	18	118.1	117.5	118.2
38.	18.5	119.1	117.9	118.8
39.	19	120.3	120.2	120.1
40.	19.5	120.9	120.6	120.5
41.	20	121.2	122.5	122.3
42.	0	99.2	98.5	98.5
43.	-0.5	99.1	98.4	98.2
43.	-1	95.9	95.9	97.4
44.	-1.5	94.2	94.6	99.2
45.	-2	93.7	93.5	93.4
46.	-2.5	92.3	91.7	91.5

47.	3	88.6	88.8	89.5
48.	-3.5	86.3	86.7	86.8
49.	-4	84.4	84.6	84.5
50.	-4.5	82.6	82.5	82.1
51.	-5	81.1	80.1	80.7
52.	-5.5	83.2	81.2	81.6
53	-6	82	81.4	81.4
54	-6.5	84.2	84.1	84.5
55	-7	85.4	85.3	85.5
56	-7.5	87.2	87.1	87.2
57	-8	87.2	87.3	87.9
58	-8.5	88.9	88.9	88.6
59	-9	89.3	89.1	89.2
60	-9.5	91.2	92	91.9
61	-10	91	90.8	89.6
62	-10.5	91.9	91.1	91.5
63	-11	94.8	94.6	94.2
64	-11.5	96.3	95.7	95.7
65	-12	99.2	99.4	99.6
66	-12.5	100.3	100.2	101.1
67	-13	101.7	102.3	102
68	-13.5	103.4	103.4	103.7
69	-14	104.2	104	104.8
70	-14.5	105.2	105.7	106.2
71	-15	105.2	105.9	106.9

72	-15.5	107.2	107	107.9
73	-16	109	108.9	108.9
74	-16.5	110.6	110.3	111.1
75	-17	112.4	111.1	111.8
76	-17.5	114.2	114.2	115.1
77	-18	115.1	114.5	115.8
78	-18.5	117.9	116.5	116.9
79	-19	117.8	117.7	117.9
70	-19.5	120.8	120.2	120.2
81	-20	121.1	120.9	120.8

b1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1200 obr/min oraz posuwu 50mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X₁	Twardość w pozycji X₂	Twardość w pozycji X₃
1.	0	100.2	98.4	98.1
2.	0.5	99.9	99.9	99.4
3.	1	97.2	97.4	97.2
4.	1.5	96.4	96.3	97.8
5.	2	95.4	95.9	95.3
6.	2.5	92.9	93.1	93.9
7.	3	91.2	91.6	91.9
8.	3.5	89.1	89.9	89.2
9.	4	87.4	86.9	86.4
10.	4.5	85.5	84.9	83.9
11.	5	82.1	82.9	83.2

12.	5.5	83.7	83.8	84.2
13.	6	85.1	85.9	85.6
14.	6.5	86.2	86.9	86.1
15.	7	86.2	86.6	86.4
16.	7.5	87.5	87.3	87.9
17.	8	88.3	88.2	88.5
18.	8.5	88.6	88.9	88.1
19.	9	890.5	90.41	90.5
20.	9.5	90.2	90.8	90.3
21.	10	90.3	91.4	89.9
22.	10.5	91.2	91.5	91.3
23.	11	92.2	92.8	92.5
24.	11.5	94.8	94.2	94.6
25.	12	95.4	95.7	95.6
26.	12.5	96.6	96.3	96.8
27.	13	99	99	98.9
28.	13.5	102.5	102.3	102.1
29.	14	104.6	104	104.9
30.	14.5	105.3	106.1	105.9
31.	15	108.1	109.2	109.1
32.	15.5	108.7	108.4	108.7
33.	16	110.9	110.6	110.5
34.	16.5	112.3	112.7	112.9
35.	17	115	115.2	115.8
36.	17.5	117.4	117.1	116

37.	18	117.4	118.7	118.7
38.	18.5	119	118.6	118.3
39.	19	120.3	120.9	120.7
40.	19.5	120.2	120.8	120.2
41.	20	121.9	120.9	121.9
42.	0	100.2	98.4	98.1
43.	-0.5	99.1	98.9	98.7
43.	-1	95.2	95.7	95.2
44.	-1.5	94.6	94.9	94.8
45.	-2	93.1	93.2	93.9
46.	-2.5	92.1	91.4	91.9
47.	3	88.9	89.4	89.2
48.	-3.5	86.2	86.5	86.9
49.	-4	84.5	84.3	84.2
50.	-4.5	82.8	82.2	82.4
51.	-5	82.1	80.5	81.4
52.	-5.5	83.1	82	81.9
53	-6	82.3	81.6	81.1
54	-6.5	84.5	85	84.8
55	-7	85.2	85.9	85.7
56	-7.5	87.6	87.3	87.8
57	-8	87.6	87.5	87.3
58	-8.5	88.5	88.7	88.9
59	-9	89.2	89.6	89.8
60	-9.5	91.7	91.7	92.2

61	-10	91.4	90.9	91.9
62	-10.5	91.3	91.4	91.7
63	-11	94.6	94.4	94.6
64	-11.5	96.6	95.3	95.4
65	-12	99.5	99.6	99.8
66	-12.5	100.9	100.7	100.8
67	-13	103	102.1	102.5
68	-13.5	103.2	103.6	103.3
69	-14	104.5	104.2	104.5
70	-14.5	105.6	105.1	104.9
71	-15	106.9	106.2	106.2
72	-15.5	107.1	107.5	107.3
73	-16	108.9	108.7	108.6
74	-16.5	110.1	110.5	110.9
75	-17	112.2	112.4	112.6
76	-17.5	115	115.9	115.8
77	-18	115.3	114.2	115.6
78	-18.5	116.9	116.6	116.3
79	-19	118.2	118.5	118.7
70	-19.5	120.5	120.3	120.9
81	-20	120.3	121.7	119.9

- c. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1400 obr/min oraz posuwu 50mm/min
– narzędzie A

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w Pozycji X_3
-----	-------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

1.	0	105.1	104.9	104.7
2.	0.5	104.3	104.3	104
3.	1	102.1	102.5	102.5
4.	1.5	100.4	100.2	100.1
5.	2	98.3	98.6	98.5
6.	2.5	95.7	95.6	95.7
7.	3	93.1	93.2	93.4
8.	3.5	91.5	91.6	91.7
9.	4	88.3	88.1	87.8
10.	4.5	86.3	86.2	86.3
11.	5	85.5	84.9	85.6
12.	5.5	85.3	85.2	85.7
13.	6	86.9	86.8	86.7
14.	6.5	87.4	87.6	87.9
15.	7	88.2	88.3	88.7
16.	7.5	89.1	89.2	89.4
17.	8	89.9	89.8	90
18.	8.5	90.3	90.5	90.8
19.	9	91.6	91.6	91.9
20.	9.5	91.9	92	92.5
21.	10	92.2	92.4	93.1
22.	10.5	93.6	93.7	92.9
23.	11	95.2	95.1	95.2
24.	11.5	97.4	97.1	97.8
25.	12	98.9	98.7	98.9

26.	12.5	100.4	100.3	100.6
27.	13	103.1	102.9	103.2
28.	13.5	105.4	105.2	105
29.	14	107.6	107.8	107.9
30.	14.5	108.9	108.8	107.9
31.	15	110.2	110.1	109.8
32.	15.5	111.3	111.4	111.6
33.	16	112.6	112.7	112.5
34.	16.5	113.8	113.7	113.9
35.	17	114.6	115.1	114.8
36.	17.5	116.2	116.5	116.4
37.	18	117.8	117.4	117.9
38.	18.5	118.7	118.6	118.5
39.	19	119.7	119.6	119.5
40.	19.5	120	120.4	120.1
41.	20	120.1	119.7	120.3
42.	0	105.1	104.9	104.7
43.	-0.5	103.7	103.8	103.9
43.	-1	101.2	101.3	101.1
44.	-1.5	98.7	98.8	98.6
45.	-2	96.2	96.3	96.4
46.	-2.5	94.5	94.3	94.6
47.	3	92.1	92.2	92.1
48.	-3.5	89.2	89.3	89.1
49.	-4	86.3	86.6	86.5

50.	-4.5	82.9	82.8	83.1
51.	-5	80.1	80.2	80.3
52.	-5.5	80.2	80.2	80.6
53	-6	81.2	81.3	81.1
54	-6.5	82.2	82.1	82.5
55	-7	84.4	84.3	84.5
56	-7.5	85.1	85.2	85.1
57	-8	85.7	85.9	85.9
58	-8.5	86.3	86.4	86.4
59	-9	87.1	87.1	87.2
60	-9.5	88.2	88.4	88.7
61	-10	88.9	88.7	88.9
62	-10.5	90.2	90.1	89.2
63	-11	92.4	92.1	91.8
64	-11.5	94.3	94.7	94.5
65	-12	96.2	96.1	96.1
66	-12.5	98.5	98.6	98.7
67	-13	100.2	100.1	100.3
68	-13.5	102	101.9	102.1
69	-14	104.1	104.3	103.9
70	-14.5	105	105.7	106.3
71	-15	105.1	105.2	105.4
72	-15.5	106.8	106.6	105.9
73	-16	108	108.6	107.7
74	-16.5	110.2	110.1	110.1

75	-17	112.3	112.1	112.4
76	-17.5	114.4	114.5	114.7
77	-18	115.2	115.3	115.4
78	-18.5	117.5	117.4	117.5
79	-19	118.4	118.5	118.6
70	-19.5	119	118.7	118.9
81	-20	119.2	119.4	119.5

*c1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1400 obr/min oraz posuwu 50mm/min
- narzędzie B.*

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X₁	Twardość w pozycji X₂	Twardość w Pozycji X₃
1.	0	103.8	104.1	104.4
2.	0.5	104.1	104.8	104.2
3.	1	102.9	102.1	102.2
4.	1.5	100.2	100.9	100.6
5.	2	98.6	98.2	98.9
6.	2.5	95.3	95.9	95.2
7.	3	93.5	93.2	93.9
8.	3.5	91.8	91.6	91.5
9.	4	88.9	88.6	88.3
10.	4.5	86.8	86.5	86.9
11.	5	85.9	84.8	84.9
12.	5.5	85.8	85.7	85.2
13.	6	86.5	86.9	86.4
14.	6.5	87.8	87.9	87.3

15.	7	87.2	88.5	88.2
16.	7.5	89.4	89.7	89.4
17.	8	89.3	89.4	89.7
18.	8.5	90.8	90.9	90.3
19.	9	91.4	91.8	91.6
20.	9.5	92.7	92.5	92.8
21.	10	92.3	91.4	93.2
22.	10.5	93.2	93.6	92.4
23.	11	95.7	95.7	95.5
24.	11.5	97.9	97.8	97.3
25.	12	98.5	98.4	98.8
26.	12.5	100.9	100.7	100.8
27.	13	103.3	103.6	103.1
28.	13.5	105.1	105.6	105.6
29.	14	107.9	107.3	107.6
30.	14.5	108.2	108.6	107.2
31.	15	111	109.2	110.1
32.	15.5	111.7	111.8	111.9
33.	16	112.9	112.2	111
34.	16.5	113.3	113.1	113.7
35.	17	114.1	115.7	115
36.	17.5	116.9	116.8	116.3
37.	18	117.4	117.8	117.7
38.	18.5	118.3	118.5	118.9
39.	19	119.3	119.2	119.4

40.	19.5	121	120.4	120.6
41.	20	121.9	120.5	120
42.	0	103.8	104.1	104.4
43.	-0.5	103.9	103.2	103.5
43.	-1	100.7	101.4	101.7
44.	-1.5	98.1	98.4	98.2
45.	-2	96.3	96.5	96.1
46.	-2.5	94.1	94.6	94.3
47.	3	91.9	91.8	91.5
48.	-3.5	87.2	87.9	88.1
49.	-4	83.9	84.2	84.2
50.	-4.5	82.6	82.2	81.9
51.	-5	80	80.2	80.4
52.	-5.5	80.7	80.3	80.9
53	-6	81.8	81.4	82.6
54	-6.5	82.3	81.1	82.3
55	-7	84.5	85.2	85.4
56	-7.5	84.1	85.2	86.1
57	-8	85.5	85.2	85.3
58	-8.5	86.7	86.5	86.6
59	-9	87.3	87.9	87.8
60	-9.5	88.7	88.3	88.1
61	-10	88.9	88.5	89
62	-10.5	90.7	90.8	90.3
63	-11	92.2	92.7	91.3

64	-11.5	94.8	94.4	94.3
65	-12	96.5	96.4	96.7
66	-12.5	98.2	98.4	98.9
67	-13	100.7	100.6	100.9
68	-13.5	102.3	102.4	102.7
69	-14	104.3	104.6	104.2
70	-14.5	105.3	105.5	105.9
71	-15	105.9	105	105.1
72	-15.5	106.2	106.5	106.7
73	-16	108.2	108.4	108.2
74	-16.5	110.7	110.8	110.9
75	-17	112.3	112.1	112.4
76	-17.5	114.8	114.7	114.5
77	-18	115.6	115.8	115.2
78	-18.5	117.3	117.2	117.3
79	-19	118.8	118.1	118.2
70	-19.5	119.3	119.1	118.7
81	-20	119.3	119	119.9

d. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w pozycji X_3
1.	0	88.9	88.8	88.3
2.	0.5	87.2	87.4	87.5
3.	1	86.2	86.7	86.4

4.	1.5	85.4	85.2	85.6
5.	2	85.1	84.7	85
6.	2.5	84.2	83.9	84.3
7.	3	83.1	83	83.5
8.	3.5	82.3	82.4	82.6
9.	4	81.4	81.3	82
10.	4.5	80.8	81.4	81.2
11.	5	80.2	80.5	80.6
12.	5.5	81.1	81.2	81.2
13.	6	81.7	81.8	81.7
14.	6.5	82.4	82.3	82.5
15.	7	83.1	83.3	83.2
16.	7.5	84.2	84.1	84
17.	8	85.5	85.4	85.2
18.	8.5	86.4	86.5	86.3
19.	9	88.1	88.2	88.2
20.	9.5	89.6	89.4	89.4
21.	10	90.1	90.3	89.8
22.	10.5	90	90.6	90.2
23.	11	91.3	91.5	91.1
24.	11.5	92.6	92.5	92.3
25.	12	94.6	94.6	94.2
26.	12.5	96.3	96.3	96.3
27.	13	98.2	98	97.9
28.	13.5	99.9	99.8	99.3

29.	14	101.4	101.5	101.3
30.	14.5	103.2	103.4	103.3
31.	15	104.6	104.7	105
32.	15.5	105.2	105	104.8
33.	16	107.2	107.5	107.4
34.	16.5	109.3	109.4	109.2
35.	17	111.4	111.3	111.5
36.	17.5	113.1	113.2	113.4
37.	18	115.2	115.1	114.7
38.	18.5	117.5	117.6	117.4
39.	19	118.3	118.6	118.3
40.	19.5	120	119.3	118.6
41.	20	119.2	119.3	118.9
42.	0	88.9	88.8	88.3
43.	-0.5	88.2	88.6	88.2
43.	-1	87.4	87.4	87.5
44.	-1.5	86.3	86.2	86.2
45.	-2	85.6	85.7	85.7
46.	-2.5	84.7	84.6	84.7
47.	3	83.1	83.2	83.4
48.	-3.5	82.4	82.6	82.5
49.	-4	81.3	81.4	81.2
50.	-4.5	80.6	80.7	80.2
51.	-5	79.5	79.2	79.4
52.	-5.5	79.2	79.4	79.8

53	-6	81.3	81.1	81.2
54	-6.5	82.4	81.9	82.2
55	-7	84.1	84.2	84.1
56	-7.5	85.3	85.4	85.3
57	-8	86.4	86.3	86.3
58	-8.5	87.5	87.4	87.6
59	-9	88.4	88.3	88.2
60	-9.5	89.4	89.4	89.7
61	-10	90.1	89.8	89.7
62	-10.5	91.2	91.1	90.9
63	-11	92.6	92.5	91.7
64	-11.5	93.3	93.5	93.6
65	-12	94.4	94.3	94.2
66	-12.5	96.1	96.4	96.5
67	-13	98.2	98.1	98.1
68	-13.5	100.5	100.5	100.6
69	-14	101.6	101.6	101.7
70	-14.5	102.4	102.4	102.7
71	-15	103.8	103.5	103.8
72	-15.5	104.6	104.3	104.8
73	-16	106.1	106.2	106.1
74	-16.5	108.1	107.9	107.9
75	-17	110.2	110.1	109.9
76	-17.5	112.2	112.3	112.1
77	-18	114.3	114.1	114.1

78	-18.5	116.4	116.1	116.3
79	-19	118.1	118.2	118.1
70	-19.5	119	118.8	118.6
81	-20	119	118.5	118.8

d1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz posuwu 70mm/min
– narzędzie B

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X ₁	Twardość w pozycji X ₂	Twardość w pozycji X ₃
1.	0	88.3	88.1	88.6
2.	0.5	87.6	87.1	87.3
3.	1	86.4	86.2	86.1
4.	1.5	85.7	85.2	85.7
5.	2	85.3	85.2	85.8
6.	2.5	84.6	84	84.2
7.	3	83.5	83.1	83.3
8.	3.5	82.5	82.1	82.2
9.	4	81.9	82.1	82.2
10.	4.5	80.4	80.9	80.5
11.	5	80.6	80.4	80.8
12.	5.5	81.9	81.5	81.9
13.	6	81.9	81.3	81.5
14.	6.5	82.9	82.9	82.23
15.	7	83.3	83.9	83.7
16.	7.5	84.9	84.8	83.8
17.	8	85.2	85.9	85.4

18.	8.5	86.8	86.6	86.9
19.	9	88.4	88.7	88.8
20.	9.5	89.3	89.9	89.7
21.	10	89.7	90.3	90.3
22.	10.5	90.2	90.9	90.4
23.	11	91.5	91.2	90.6
24.	11.5	92.8	92.4	92.7
25.	12	94.6	94.9	94.1
26.	12.5	96.1	96.9	96.7
27.	13	98.6	98.2	98.4
28.	13.5	99.7	99.3	99.7
29.	14	100.9	101.4	101.8
30.	14.5	103.4	103.8	103.6
31.	15	104.5	105	104.6
32.	15.5	105.7	104.9	104.6
33.	16	107.5	107.9	107.3
34.	16.5	109.9	109.5	109.7
35.	17	111.1	111.4	111.8
36.	17.5	113.6	113.4	113.7
37.	18	115.1	115.7	115
38.	18.5	117.8	117.9	117.7
39.	19	118.9	118.8	118.4
40.	19.5	119	119.1	118.9
41.	20	119.3	119.9	119.4
42.	0	88.3	88.1	88.6

43.	-0.5	88.9	88.21	88.2
43.	-1	87.1	87.2	87.8
44.	-1.5	86.7	86.4	86.8
45.	-2	85.9	85.4	85.3
46.	-2.5	84.8	84.3	84.9
47.	3	83.5	83.9	83.6
48.	-3.5	82.8	82.4	82.9
49.	-4	81.2	81.3	81.9
50.	-4.5	80.4	80.7	80.7
51.	-5	79.7	79.3	78.9
52.	-5.5	79.8	79.9	80
53	-6	81.4	81.9	81.8
54	-6.5	82.7	82.2	82.7
55	-7	84.8	84.7	84.6
56	-7.5	85.7	85.5	85.9
57	-8	86.3	86.9	86.8
58	-8.5	87.3	87.1	87.9
59	-9	88.6	88.8	88.7
60	-9.5	89.7	89.6	89.3
61	-10	89.2	88.9	89.5
62	-10.5	91.1	91.5	91.7
63	-11	91.7	91.9	91.4
64	-11.5	93.7	93.8	93.4
65	-12	94.6	94.7	94.8
66	-12.5	96.6	96.8	96.9

67	-13	98.7	98.9	98.8
68	-13.5	100.4	100.3	100.2
69	-14	101.5	101.4	101.6
70	-14.5	102.8	102.7	102.5
71	-15	102.9	103.9	104
72	-15.5	104.5	104.7	104.6
73	-16	106.5	106.3	106.2
74	-16.5	107.6	107.7	107.6
75	-17	110.9	110.8	109.5
76	-17.5	112.6	112.8	112.4
77	-18	114.4	114.6	114.8
78	-18.5	116.9	116.8	116.7
79	-19	117.6	117.9	117.8
70	-19.5	118.1	118.2	118.8
81	-20	118.4	118.1	119

e. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1200 obr/min oraz posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w pozycji X_3
1.	0	94.5	94.6	93.9
2.	0.5	93.2	93.1	93.5
3.	1	92.5	92.4	92.6
4.	1.5	91.8	91.6	91.7
5.	2	91	90.7	90.8
6.	2.5	89.7	89.8	89.9
7.	3	87.2	87.3	87.4

8.	3.5	85.4	85.3	85.5
9.	4	84.1	84	84.2
10.	4.5	82.9	83	82.8
11.	5	82.1	82.3	82.4
12.	5.5	82.9	82.8	82.9
13.	6	83.8	83.7	83.9
14.	6.5	84.6	84.5	84.7
15.	7	86.7	86.3	86.6
16.	7.5	86.6	86.7	86.6
17.	8	88.4	88.5	88.3
18.	8.5	90.5	90.4	90.3
19.	9	91.3	91	91.4
20.	9.5	93.1	92.9	93.2
21.	10	95.1	95.2	94.8
22.	10.5	95.5	95.4	95.6
23.	11	96.7	96.8	96.5
24.	11.5	97.8	97.8	98
25.	12	98.6	98.6	98.7
26.	12.5	99.8	99.9	100
27.	13	102.5	102.6	102.7
28.	13.5	105.2	105.1	105.3
29.	14	106.8	106.7	106.8
30.	14.5	108.9	108.7	108.9
31.	15	109.4	109.2	109.1
32.	15.5	110.1	109.9	110

33.	16	112.2	112	112.2
34.	16.5	113.9	113.8	114.1
35.	17	115.2	115.1	115.3
36.	17.5	116.9	116.8	117
37.	18	117.6	117.8	117.9
38.	18.5	118.8	118.9	118.7
39.	19	119.5	118.8	119.4
40.	19.5	121.2	120.6	120.2
41.	20	120.2	119.9	120.1
42.	0	94.5	94.6	93.9
43.	-0.5	94.2	94.1	94.5
43.	-1	92.1	92.3	92.5
44.	-1.5	90.2	90.4	90.5
45.	-2	89.9	89.4	89.5
46.	-2.5	87.5	87.4	87.8
47.	3	85.4	85.6	85.7
48.	-3.5	85.1	85	85.1
49.	-4	83.6	83.5	83.7
50.	-4.5	82.1	82.3	81.9
51.	-5	81.2	81.1	80.9
52.	-5.5	82.3	82.4	82.5
53.	-6	83.8	83.7	83.7
54.	-6.5	85.1	85.2	85.1
55.	-7	88.8	88.9	88.6
56.	-7.5	90.5	90.6	90.8

57	-8	92.4	92.4	92.6
58	-8.5	95.6	95.7	95.7
59	-9	99.6	99.5	99.4
60	-9.5	101.8	102.4	102.1
61	-10	104.6	105	104.9
62	-10.5	104.2	104.8	104.8
63	-11	104	104.5	104.8
64	-11.5	106.2	106.3	106.5
65	-12	107.2	107.2	107.3
66	-12.5	108	107.9	108.1
67	-13	108.4	108.5	108.5
68	-13.5	108.9	108.8	108.9
69	-14	109.4	109.5	109.5
70	-14.5	110	110.6	110.5
71	-15	110.6	110.4	110.3
72	-15.5	109	109.6	109.4
73	-16	111.6	111.7	111.7
74	-16.5	112.9	112.8	112.7
75	-17	114.2	114.3	114.3
76	-17.5	116.5	116.4	116.3
77	-18	117.1	116.9	117
78	-18.5	118	117.9	117.8
79	-19	118.9	118.5	118.7
70	-19.5	119.6	119.5	119.7
81	-20	120.4	120.3	120.1

e1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1200 obr/min oraz posuwu 70mm/min
– narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X ₁	Twardość w pozycji X ₂	Twardość w Pozycji X ₃
1.	0	94.2	93.7	94.1
2.	0.5	93.7	93.4	93.8
3.	1	92.7	92.3	92.7
4.	1.5	91.5	91.2	91.5
5.	2	90.4	90.3	90.7
6.	2.5	89.3	89.5	89.9
7.	3	87.6	87.7	87.1
8.	3.5	85.7	85.2	85.4
9.	4	84.3	84.7	84.9
10.	4.5	82.7	82.6	82.2
11.	5	81.9	82.5	81
12.	5.5	82.6	82.7	82.4
13.	6	83.2	83.8	83.3
14.	6.5	84.2	84.9	84.7
15.	7	86.9	86.5	86.9
16.	7.5	86.3	86.4	86.1
17.	8	88.7	88.9	88.3
18.	8.5	90.4	90.1	90.8
19.	9	91.7	91.8	91.2
20.	9.5	92.6	92.4	93.7
21.	10	95.9	94.9	95.5
22.	10.5	95.2	95.7	95.4

23.	11	96.8	96.6	96.9
24.	11.5	97.3	97.5	97.9
25.	12	98.7	98.5	98.2
26.	12.5	99.3	99.7	99.3
27.	13	102.1	102.3	102.2
28.	13.5	104.6	105	105.6
29.	14	106.7	106.3	106.4
30.	14.5	108.2	108.5	108.7
31.	15	109.5	108.9	109.5
32.	15.5	110.4	110.3	110.7
33.	16	112.6	112.8	112.1
34.	16.5	113.3	113.4	113.8
35.	17	115.8	115.4	115.5
36.	17.5	116.3	116.4	116.9
37.	18	117.9	117.2	117.3
38.	18.5	118.7	118.5	118.2
39.	19	119.2	119.3	119.1
40.	19.5	120.6	120.9	120.6
41.	20	119.8	120.2	119.7
42.	0	94.2	93.7	94.1
43.	-0.5	94.6	94.5	94.3
43.	-1	92.9	92.7	92.3
44.	-1.5	90.8	90.7	90.4
45.	-2	89.4	89.2	89.7
46.	-2.5	87.5	87.9	87.3

47.	3	85.1	85.1	85.2
48.	-3.5	85.7	85.3	85.7
49.	-4	83.3	83.8	83.3
50.	-4.5	82.8	82.9	81.7
51.	-5	80.2	81.5	80.7
52.	-5.5	82.6	82.3	82.8
53	-6	83.2	83.4	83.1
54	-6.5	85.2	85.6	85.8
55	-7	88.2	88.6	88.4
56	-7.5	90.3	90.8	90.3
57	-8	92.7	92.1	92.2
58	-8.5	95.5	95.8	95.3
59	-9	99.2	99.7	99.2
60	-9.5	102.4	102.6	102.7
61	-10	103.6	104.4	103.7
62	-10.5	104.4	104.6	104.2
63	-11	104.9	104.1	104.7
64	-11.5	106.4	106.7	106.2
65	-12	107.5	107.8	107.1
66	-12.5	108.2	108.7	108.3
67	-13	108.3	108.9	108.1
68	-13.5	108.1	108.5	108.7
69	-14	109.1	109.2	109.3
70	-14.5	110.8	110.2	110.1
71	-15	109.8	110.2	110.6

72	-15.5	109.5	109.2	109.9
73	-16	111.8	111.1	111.2
74	-16.5	112.3	112.2	112.1
75	-17	114.2	114.4	114.8
76	-17.5	116.1	116.7	116.8
77	-18	116.4	116.3	116.8
78	-18.5	117.5	117.1	117.7
79	-19	118.2	118.3	118.5
70	-19.5	119.9	119.3	119.5
81	-20	119.5	120.6	119.6

f. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1400 obr/min oraz posuwu 70mm/min – narzędzie A.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X_1	Twardość w pozycji X_2	Twardość w pozycji X_3
1.	0	104.5	103.8	104.2
2.	0.5	104.1	103.7	104.1
3.	1	102.5	102.6	102.7
4.	1.5	101.2	101.3	101.1
5.	2	98.2	98.3	98.4
6.	2.5	93.8	93.8	94
7.	3	90.4	90.6	90.7
8.	3.5	88.6	88.6	88.7
9.	4	86.4	86.2	86.4
10.	4.5	84.7	84.3	84.5
11.	5	82.3	82.2	82.2
12.	5.5	82.1	82	82

13.	6	83.4	83.2	83.2
14.	6.5	83.7	83.5	83.7
15.	7	84.3	84.2	84.1
16.	7.5	84.9	84.8	84.9
17.	8	85.7	85.8	85.9
18.	8.5	86.8	86.9	86.9
19.	9	87.8	87.9	87.9
20.	9.5	88.8	88.9	88.5
21.	10	90.2	91	90.4
22.	10.5	91.5	91.6	91.6
23.	11	92.7	92.7	92.5
24.	11.5	94.6	94.7	94.9
25.	12	97.1	97	97.2
26.	12.5	100.3	100.5	100.4
27.	13	103.2	103.6	103.6
28.	13.5	104.7	104.6	104.7
29.	14	106.7	106.6	106.7
30.	14.5	107.8	107.8	107.9
31.	15	108.1	108.1	107.9
32.	15.5	108.6	109	108.2
33.	16	109.9	109.8	109.5
34.	16.5	111.4	111.6	111.7
35.	17	113.4	113.2	113.6
36.	17.5	114.6	114.7	114.8
37.	18	115.7	115.9	115.7

38.	18.5	116.6	116.7	116.5
39.	19	117.5	117.5	117.4
40.	19.5	119.4	119.5	119.6
41.	20	120.1	119.4	119.5
42.	0	104.5	103.8	104.2
43.	-0.5	104	104.2	104.2
43.	-1	102.1	101.9	101.8
44.	-1.5	100.2	99.9	99.9
45.	-2	98.8	98.6	98.6
46.	-2.5	95.2	95.4	95.3
47.	3	92.4	92.3	92.4
48.	-3.5	90.1	90.2	90.1
49.	-4	87.4	87.6	87.5
50.	-4.5	84.4	84.6	84.7
51.	-5	81.8	81.7	81.9
52.	-5.5	82.7	82.8	82.9
53	-6	84.3	84.5	84.7
54	-6.5	86.4	86.2	86.4
55	-7	89.1	89.1	89.2
56	-7.5	91.6	92.1	91.9
57	-8	94.2	94.1	94.2
58	-8.5	96.3	96.5	96.8
59	-9	99.9	99.9	99.8
60	-9.5	102.4	102.6	102.8
61	-10	104.2	104.3	104.1

62	-10.5	104	104.1	105
63	-11	104.9	104.9	105.7
64	-11.5	106.7	106.6	106.4
65	-12	107.1	107.2	107.1
66	-12.5	107.5	107.6	107.8
67	-13	108.1	108.2	108.3
68	-13.5	108.6	108.7	108.7
69	-14	109.5	109.5	109.4
70	-14.5	110.8	110.9	110.7
71	-15	109.2	109.6	109.6
72	-15.5	109.5	109.5	109.8
73	-16	111.7	111.8	111.9
74	-16.5	112.5	112.6	112.6
75	-17	114.1	114.1	114.2
76	-17.5	115.9	115.8	115.9
77	-18	117.2	117.3	117.1
78	-18.5	118.5	118.5	118.6
79	-19	118.8	118.9	118.9
70	-19.5	120.3	120.4	120.4
81	-20	121.3	120.9	120.8

f1. Twardość spoiny dla wartości prędkości obrotowej 1400 obr/min oraz posuwu 70mm/min – narzędzie B.

Lp.	Pozycja Y [mm]	Twardość w pozycji X₁	Twardość w pozycji X₂	Twardość w Pozycji X₃
1.	0	104.2	104	103.5
2.	0.5	104.5	104.7	104.3
3.	1	102.7	102.3	102.9
4.	1.5	101.1	101.6	101.8
5.	2	98.9	98.6	98.7
6.	2.5	93.5	93.7	93.9
7.	3	90.3	90.9	90.4
8.	3.5	88.2	88.7	88.3
9.	4	86.3	86.4	86.6
10.	4.5	84.2	84.5	84.7
11.	5	82.2	81.8	80.9
12.	5.5	82.9	82.4	81.9
13.	6	83.2	83.7	83.5
14.	6.5	83.9	83.6	83.2
15.	7	84.2	84.6	84.5
16.	7.5	84.4	84.7	84.1
17.	8	85.3	85.6	85.4
18.	8.5	86.2	86.4	86.5
19.	9	87.7	87.5	87.7
20.	9.5	88.5	88.3	88.2
21.	10	90.5	90.2	91.6
22.	10.5	91.2	91.1	91.4

23.	11	92.9	92.4	92.6
24.	11.5	94.2	94.6	94.3
25.	12	97.8	97.6	97.4
26.	12.5	100.9	100.4	100.1
27.	13	103.7	103.3	103.7
28.	13.5	104.4	104.8	104.2
29.	14	106.2	106.7	106.3
30.	14.5	107.3	107.6	107.7
31.	15	108	107.9	108.1
32.	15.5	108.1	108.6	108.6
33.	16	109.4	109.6	109.2
34.	16.5	111.8	111.2	111.8
35.	17	113.7	113.8	113.3
36.	17.5	114.7	114.4	114.9
37.	18	115.4	115.1	115.2
38.	18.5	116.5	116.3	116.9
39.	19	117.7	117.9	117.2
40.	19.5	119.3	119.6	119.3
41.	20	119.7	119.0	120.1
42.	0	104.5	103.8	104.2
43.	-0.5	104.4	104.8	104.5
43.	-1	102.6	101.3	101.6
44.	-1.5	99.5	99.3	99.5
45.	-2	98.2	98.1	98.2
46.	-2.5	95.2	94.8	94.9

47.	3	91.7	92.1	92.3
48.	-3.5	90.3	89.6	89.7
49.	-4	87.7	87.8	87.4
50.	-4.5	84.1	84.8	84.5
51.	-5	81.8	81.2	80.8
52.	-5.5	82.3	82.7	82.2
53	-6	84.4	84.9	84.5
54	-6.5	86.2	86.8	86.6
55	-7	89.9	89.4	89.7
56	-7.5	91.8	92.4	91.3
57	-8	94.7	94.5	94.3
58	-8.5	96.2	96.7	96.2
59	-9	99.6	99.7	99.2
60	-9.5	102.6	102.2	102.9
61	-10	104.2	104.8	103.8
62	-10.5	104.4	104.9	104.6
63	-11	104.5	104.7	105.2
64	-11.5	106.5	106.9	106.1
65	-12	107.2	107.4	107.8
66	-12.5	107.7	107.3	107.7
67	-13	108.4	108	108.9
68	-13.5	108.8	108.3	108.2
69	-14	109.2	109.7	109.3
70	-14.5	110.1	110.2	110.6
71	-15	109.5	109.1	110.7

72	-15.5	109.9	109.8	109.2
73	-16	111.4	111.7	111.3
74	-16.5	112.3	112.8	112.9
75	-17	114.8	114	114.1
76	-17.5	115.2	115.4	115.8
77	-18	117.8	117.4	117.6
78	-18.5	118.2	118.1	118.9
79	-19	118.9	118.8	118.6
70	-19.5	120.8	120.1	120.9
81	-20	121.0	121.7	120.4