

**Dr inż. Wojciech Więckowski**

Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science  
Czestochowa University of Technology  
Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland  
E-mail: [wieckowski@itm.pcz.pl](mailto:wieckowski@itm.pcz.pl)

**Mgr inż. Rafał Burek**

Development Projects Office DTR/B  
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.  
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland  
E-mail: [rafal.burek@lmco.com](mailto:rafal.burek@lmco.com)

**Dr hab. inż. Piotr Lacki, prof. nadzw.**

Faculty of Civil Engineering  
Czestochowa University of Technology  
Dabrowskiego 69, 42-201 Czestochowa, Poland  
E-mail: [placki@bud.pcz.pl](mailto:placki@bud.pcz.pl)

**Mgr inż. Waldemar Łogin**

Development Projects Office DTR/B  
Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.  
ul. Wojska Polskiego 3, 39 – 300 Mielec, Poland  
E-mail: [waldemar.login@lmco.com](mailto:waldemar.login@lmco.com)

**Analiza procesu zużycia narzędzi wykonanych ze stali 1.2344 oraz stopu MP159  
w procesie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW) blach ze stopu  
Aluminium 7075 T6**

**Słowa kluczowe:** zużycie narzędzi, zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem, FSW, stop Al 7075 T6

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę procesu zużycia narzędzi wykonanych ze stali 1.2344 oraz stopu MP159 w procesie wykonywania złączy zakładkowych z blach ze stopu aluminium 7075 T6 o grubości 1.0mm i 0.8mm technologią zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału (FSW). Geometrię narzędzi użytych do badań opracowano na Politechnice Częstochowskiej. Ocenę zużycia narzędzi przeprowadzono w oparciu o pomiary geometrii części roboczej narzędzi na maszynie multisensorycznej oraz na podstawie oględzin powierzchni roboczej przy użyciu stereoskopu po kolejnych etapach badań zużycia narzędzia. Dodatkowo, w oparciu o wyniki statycznej próby rozciągania oraz badania metalograficzne próbek pobranych ze złączy wykonywanych w trakcie badań zużycia narzędzi, przeprowadzono ocenę wpływu stopnia zużycia narzędzi na jakość wykonanych złączy.

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że zarówno narzędzie wykonane ze stali 1.2344 oraz ze stopu MP159 ulegają intensywnemu, zagrażającemu ich dalszej eksploatacji zużyciu, we współpracy z materiałem zgrzeiny (7075-T6) już po wykonaniu złącza o długości 200m, co świadczy o ich niskiej trwałości. Przy czym zmiany geometrii narzędzia spowodowane zużyciem pozwoliły na nieznaczną poprawę wytrzymałości złączy. Uzyskane wyniki pomiarów zużycia wyznaczają zatem kierunek w procesie dalszej modyfikacji geometrii badanych narzędzi, również z uwagi na fakt, iż pomimo znaczącego zużycia badanych narzędzi, pozwalały one w dalszym ciągu uzyskać dobre jakościowo złącza pozbawione wad. Jak wykazały badania, rodzaj materiału narzędzia wpływa nie tylko na trwałość narzędzi ale również, jak ma to miejsce w przypadku ich geometrii, ma on istotny wpływ na jakość uzyskanych połączeń. Pomimo tego, że narzędzie wykonane ze stopu MP159 uległo większemu zużyciu w porównaniu z narzędziem ze stali 1.2344, to pozwoliło ono uzyskać złącza o znacznie lepszych parametrach wytrzymałościowych.

## 1. Wprowadzenie

Technologia zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (Friction Stir Welding) została opracowana na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku przez The Welding Institute. Zaletą metody jest możliwość uzyskiwania złączy pozbawionych niedoskonałości o dobrych własnościach mechanicznych i strukturalnych, co spowodowało że technologia FSW znalazła zastosowanie na skalę przemysłową w przemyśle zbrojeniowym, lotniczym i okrętowym do łączenia elementów zbiorników, pokładów, części skrzydeł i poszyc kadłubów itp. [1].

Zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem materiałów (FSW) odniosło znaczny sukces w procesie łączenia aluminium, jego stopów oraz innych metali miękkich. Łączenie technologią FSW twardych metali nadal jednak stanowi wyjątkowe wyzwanie, ze względu na ograniczoną dostępność rodzajów materiałów narzędziowych zdolnych do wytrzymywania warunków panujących podczas procesu zgrzewania, a jej komercyjne zastosowanie jest ograniczone poprzez wysokie koszty i małą żywotność narzędzi [1,15,16,20,21].

Istotną rolę w procesie FSW odgrywa narzędzie. Wraz z parametrami procesu jest ono odpowiedzialne za nagrzewanie oraz za wymieszanie materiału, co przekłada się na wielkość stref zgrzeiny oraz wpływa na jakość i właściwości złącza [18].

W trakcie procesu zgrzewania narzędzie FSW ulega procesom zużycia zależnych od interakcji między materiałem obrabianym i materiałem narzędzia oraz geometrii narzędzia i parametrów zgrzewania. Zużycie narzędzi objawiające się zmianą geometrii, a wywołane obciążeniem mechanicznym oraz cieplnym powierzchni roboczej narzędzia, jest efektem ścierania mechanicznego, odkształcenia plastycznego, utleniania, adhezji, wykruszenia itp. Zapobiec mu można stosując odpowiednio dobrane parametry procesu, odpowiedni materiał na narzędzie oraz powłoki antyadhezyjne ograniczające zużycie. Nadmierne zużycie objawiające się zmianą kształtu narzędzia zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia usterek i ewentualnie pogorszenia jakości spoin. Cząstki zużytego materiału narzędzia lub pokrycia pozostające w materiale złącza mają niekorzystny wpływ na właściwości złącza i są nie do zaakceptowania, dodatkowo mogą sprzyjać tworzeniu lokalnych ogniw korozyjnych [3,6,11,15,19,24].

Z powodu oddziaływania wysokiej temperatury i naprężeń spowodowanych tarciami oraz naciskami powierzchniowymi dochodzi do zmęczenia cieplno-mechanicznego narzędzi i przyspieszonego ich zużycia. Badania zużycia narzędzi FSW wskazują, iż w porównaniu z oporą narzędzia, zwiększonemu zużyciu oraz odkształceniom podlega trzpień, a zniszczenie narzędzia niemal zawsze zachodzi na skutek uszkodzenia trzpienia[19].

W pracy [9,17] zaprezentowano wyniki badań złączy ze stopów aluminium serii 6000, które uzyskano przy użyciu narzędzia wykonanego ze stali szybko tnącej wolframowo-molibdenowej gatunku SW7M (HS6-5-2). Wykazano, iż przy stosunkowo dużym zakresie parametrów procesu, można uzyskać odpowiednią jakość złączy pod względem wytrzymałości, jak też budowy strukturalnej zgrzeiny.

Ważnym składnikiem degradacji narzędzi FSW jest ich odkształcenie plastyczne, będące najbardziej widocznym elementem zmian geometrycznych narzędzi. Odkształcenie pociąga za sobą duże zmiany wymiarów geometrycznych części roboczej narzędzia, jak długość i średnica oraz znaczące zmiany strukturalne materiału narzędzia. Poprzez zrozumienie zmian mikrostruktury, które mają miejsce w ciągu wykonywania zgrzeiny, można zidentyfikować mechanizmy, oraz wyjaśnić przyczyny degradacji narzędzi. Autorzy pracy [22] prezentują wyniki badań zużycia narzędzi FSW wykonanych ze stopów wolframu oraz wolframu z renem, podczas których poddano ocenie zmiany geometrii narzędzi oraz mikrostruktury materiału narzędzi zachodzące w trakcie procesu zgrzewania FSW tytanu i stali.

W pracy [12] przedstawiono wyniki badania zużycia narzędzia wykonanego z Wc-Co prowadzone w różnej konfiguracji parametrów procesu (prędkości obrotowej narzędzia,

prędkości zgrzewania). W celu ilościowej oceny zużycia narzędzia, określono wskaźnik zużycia narzędzia poprzez określenie procentowych zmian wielkości geometrycznych narzędzia w odniesieniu do długości złącza oraz pozostałych parametrów procesu. Według autorów maksymalna intensywność zużycia narzędzi występowała zawsze w początkowej fazie zgrzewania następnie intensywność zużycia zmniejsza się wraz ze wzrostem długości złącza, a decydujący wpływ na zużycie ma prędkość zgrzewania.

Wg autorów [24] nadmierne zużycie narzędzi prowadzi do zmiany ich kształtu, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo generacji wad i ewentualnie pogorszenia jakości zgrzein. Mechanizm zużycia zależy od interakcji między przedmiotem zgrzewanym i materiałem narzędzia, wybranej geometrii narzędzia i parametrów zgrzewania. W przypadku narzędzi wykonanych z PCBN, zużycie przy niskich obrotach jest spowodowane głównie przez zużycie adhezyjne, a zużycie przy dużych prędkościach obrotowych narzędzia wynika ze zużycia ściernego.

Wybór rodzaju materiału oraz geometrii narzędzia jest zatem bardzo ważnym elementem na etapie planowania procesu łączenia materiałów technologią FSW. Właściwości materiału narzędzia wyznaczają bowiem zakres jego stosowania do wybranych rodzajów łączonych materiałów oraz istotne parametry procesu zgrzewania.

O przydatności materiału narzędziowego decyduje przede wszystkim jego twardość, która powinna być większa od twardości zgrzewanego materiału w warunkach panujących podczas prowadzenia procesu. Wymagana jest również duża wytrzymałość na ściskanie ze względu na naciski panujące na powierzchni roboczej narzędzi oraz wysoka udarność i wytrzymałość zmęczeniowa. Materiały na narzędzia FSW powinny cechować się odpornością na zużycie ściernie, adhezyjne, dyfuzyjne i chemiczne. Dodatkowo w procesach gdzie generowane są znaczne ilości ciepła od materiałów narzędziowych wymaga się odpowiednich właściwości termicznych. Istotną cechą materiałów narzędziowych decydującą o ekonomiczności procesu jest także ich cena [10].

Materiałami znajdującymi najczęściej zastosowanie na narzędzia FSW do łączenia stopów aluminium są stale narzędziowe oraz stopy na bazie niklu i kobaltu [24].

Stale stopowe szybko tnące oraz stale narzędziowe do pracy na gorąco, znalazły zastosowanie na narzędzia FSW do łączenia stopów aluminium, ze względu na ich dostępność, łatwość w kształtowaniu, akceptowalną odporność na zmęczenie cieplne, odporność na zużycie oraz niski koszt produkcji [4,13,14]. Stale narzędziowe są również powszechnie stosowane na narzędzia FSW w procesie zgrzewania stopów magnezu, miedzi oraz materiałów kompozytowych w osnowie aluminium (AMCs), podczas zgrzewania których stwierdzono przyspieszone zużycie narzędzi. Można je także stosować do łączenia ze sobą różnych materiałów (np. miedzi z mosiądzem) zarówno w złączach zakładkowych jak też doczołowych [2,5,7,8,9,19,23,24].

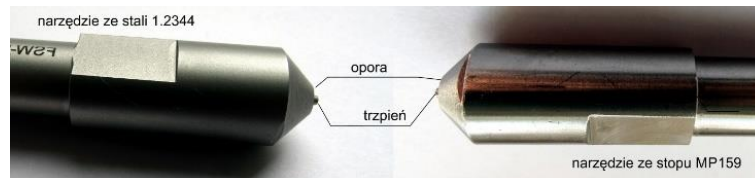
Stopem, który znalazł zastosowanie do wytwarzania narzędzi FSW w procesie zgrzewania stopów aluminium jest stop na bazie kobaltu MP159 posiadający doskonałą wytrzymałość i ciągliwość w temperaturze do 590 - 650<sup>0</sup>C oraz wysoką odporność na korozję i zmęczenie. Stopy te znajdują także zastosowanie na narzędzia FSW w procesie zgrzewania Cu oraz materiałów kompozytowych Al-MMC [24].

Odpowiednie skojarzenie materiału narzędzia z materiałem łączonych elementów oraz optymalizacja kształtu narzędzia pozwala w znacznym stopniu zminimalizować jego zużycie, co zapewni odpowiednią żywotność narzędzi. Zatem uzyskanie odpowiedniej jakości spoin przy zachowaniu niskich kosztów procesu FSW wymaga prowadzenia badań w zakresie doboru odpowiednich materiałów narzędziowych oraz projektowania konstrukcji nowych narzędzi.

## 2. Cel i zakres badań

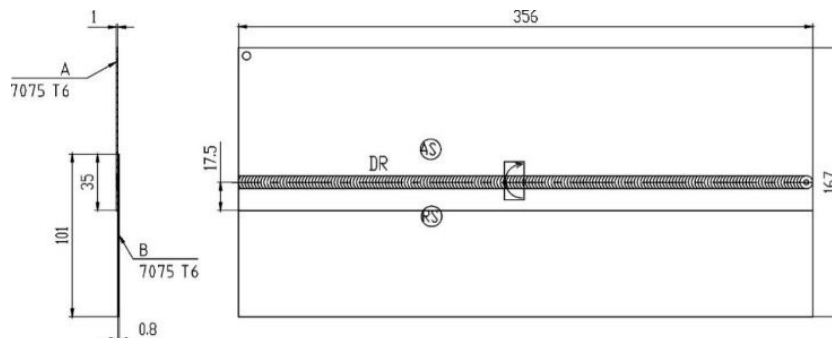
Badania miały na celu określenie trendu zużycia narzędzi FSW zaprojektowanych w oparciu o geometrię narzędzia zaprojektowanego na Politechnice Częstochowskiej oraz zebranie doświadczeń w zakresie metodyki badań zużycia przy ustalonych parametrach technologii FSW dla wybranego gatunku i parametrów zgrzewanego materiału.

Do badań użyto dwa narzędzia wykonane odpowiednio ze stali do pracy na gorąco 1.2344 oraz ze stopu MP159 w Fabryce Narzędzi Medycznych CHIRMED w Rudnikach (rys. 1). Narzędzia posiadają płaską oporę oraz trzpień w kształcie ściętego stożka o gładkiej powierzchni.



Rys. 1. Narzędzia FSW zastosowane do badań zużycia

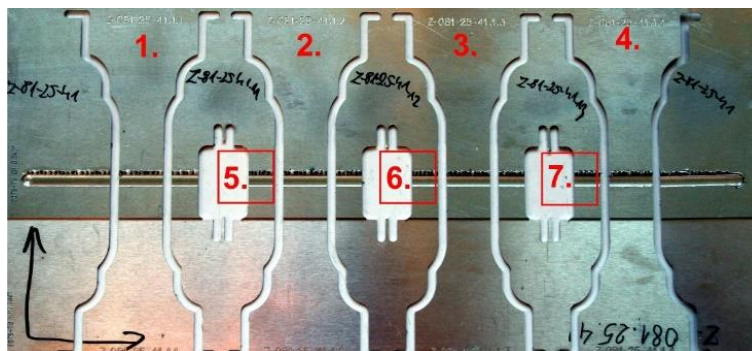
W trakcie trwania badań zużycia narzędzi wykonywano złącza zakładkowe o długości 325mm na blachach o długości 356mm ze stopu aluminium 7075-T6 obustronnie platerowanych. Grubość blach w złączu wynosiła odpowiednio: 1.0mm dla blachy górnej oraz 0.8mm dla blachy dolnej – rysunek 2.



Rys. 2. Złącze kontrolne wykonywane podczas badań zużycia narzędzi FSW

Na podstawie prowadzonych dotychczas badań doświadczalnych ustalono następujące parametry procesu zgrzewania: prędkość obrotowa narzędzia  $n=1000\text{obr}/\text{min}$ , prędkość posuwu narzędzia  $v_3=200\text{mm}/\text{min}$  oraz zagłębienie narzędzia - 1,2mm. Złącza wykonane zostały na maszynie DMC 104V w PZL Mielec.

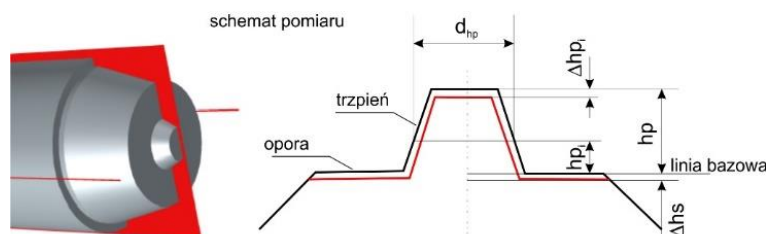
Po każdym etapie badawczym, w którym wykonano zgrzeiny o łącznej długości ~100m, narzędzie poddawano czyszczeniu, a następnie pomiarom zarysu profilu części roboczej. Dodatkowo, w celu oceny wpływu zużycia narzędzia na jakość zgrzeiny, każdorazowo po wykonaniu kolejnych ~20m zgrzeiny, pobierano do badań złącza kontrolne, z których wycinano po cztery próbki do badań wytrzymałościowych ( $1\div 4$ ) oraz po trzy próbki do badań metalograficznych ( $5\div 7$ ). Przykładowe kontrolne złącza zakładkowe (1.0 7075-T6 + 0.8 7075-T6) wykonane podczas badań zużycia narzędzi pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe złącze kontrolne FSW z rozkrojem próbek do badań wytrzymałościowych i metalograficznych

Pomiaru geometrii części roboczej narzędzia wykonywano przy użyciu maszyny multisensorycznej OGP Smart Scope FLASH 200, natomiast ocenę zużycia badanych narzędzi FSW przeprowadzono na podstawie porównania zarysu profilu nowego narzędzia z profilem narzędzia poddanego badaniom zużycia po kolejnych cyklach badawczych.

W celu ilościowej oceny zużycia narzędzia, określono bezwzględne zmiany wybranych wielkości geometrycznych narzędzia w odniesieniu do długości wykonanego złącza (kolejnych etapów badań). Zgodnie ze schematem pomiarowym przedstawionym na rysunku 4, określono zmiany średnicy trzpienia  $d_{hp}$  odpowiednio na wysokościach trzpienia równych 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm oraz 1.0mm, mierzone w kierunku prostopadłym do osi narzędzia (zużycie promieniowe) oraz zmiany wysokości trzpienia  $h_p$  i opory  $h_s$  mierzone w kierunku osi narzędzia względem przyjętej bazy pomiarowej.

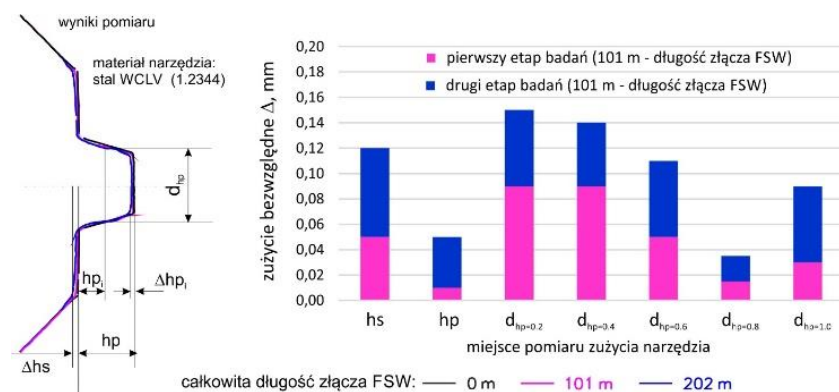


Rys. 4. Schemat pomiaru zmian profilu części roboczej narzędzi FSW

Po zakończeniu każdego cyklu pracy narzędzia, na podstawie sporządzonej dokumentacji fotograficznej z badań na stereoskopie, dokonywano wizualnej oceny stanu powierzchni roboczej narzędzi.

### 3. Wyniki badań zużycia narzędzi FSW

Na rysunku 5 zaprezentowano wyniki pomiarów geometrii nowego narzędzia FSW wykonanego ze stali 1.2344 oraz pomiarów wykonanych każdorazowo po ustalonym przebiegu (wykonaniu założonej długości złącza). W formie wykresu słupkowego zestawiono wartości bezwzględnego zużycia na powierzchni roboczej narzędzia, zmierzone w kolejnych etapach badawczych. Badania zużycia narzędzia zakończono po wykonaniu złącza o całkowitej długości 202.15m (po II etapie badawczym) z uwagi na znaczące zużycie powierzchni roboczej narzędzia.



Rys. 5. Wyniki pomiaru zużycia narzędzia FSW wykonanego ze stali do pracy na gorąco 1.2344 po kolejnych etapach badań zużycia

W trakcie prowadzonych badań zużycia narzędzia FSW (1.2344) zaobserwowano intensywne i zróżnicowane zużycie na całej powierzchni roboczej narzędzia prowadzące do zmiany jego kształtu.

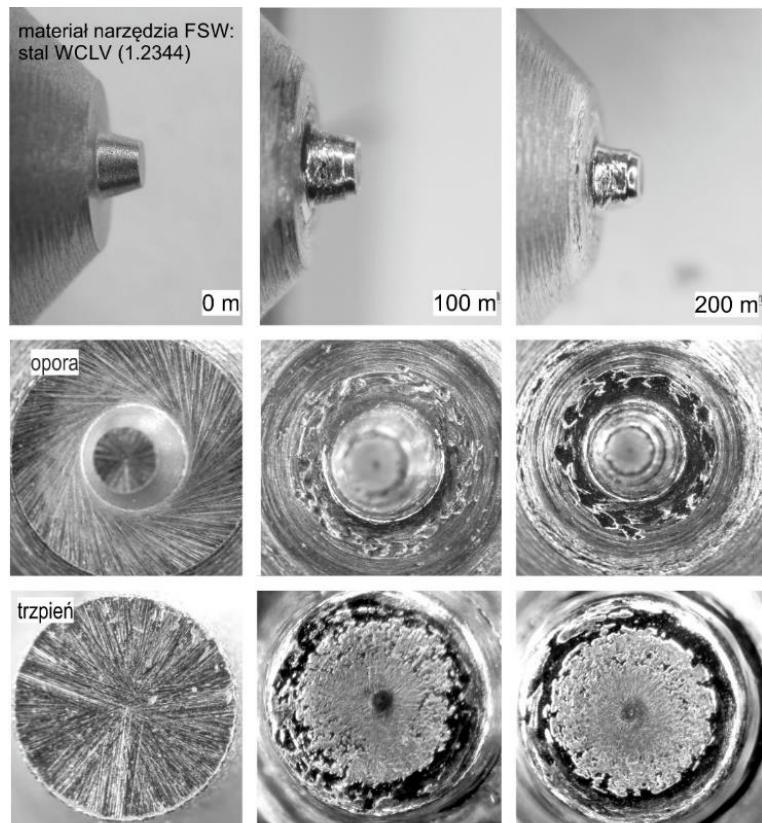
Po kolejnych etapach badawczych stwierdzono stopniowe i zróżnicowane zużywanie powierzchni bocznej trzpienia. Największe zużycie promieniowe trzpienia zachodziło na wysokości w zakresie 0.2-0.4mm, przy czym intensywność zużycia we wspomnianym obszarze była większa w I etapie badań, a następnie zmalała. Znaczące zużycie promieniowe odnotowano także na powierzchni bocznej trzpienia na wysokości w zakresie 1.0-1.2mm (wzdłuż krawędzi powierzchni czołowej trzpienia). Zarówno w tym przypadku, jak i w przypadku powierzchni czołowej trzpienia i opory, intensywność zużycia wzrastała w czasie trwania badań.

Dokumentację fotograficzną z przeprowadzonej oceny wizualnej stanu powierzchni roboczej nowego narzędzia wykonanego ze stali 1.2344 oraz po zakończeniu dwóch kolejnych etapów badań zużycia przedstawiono na rysunku 6.

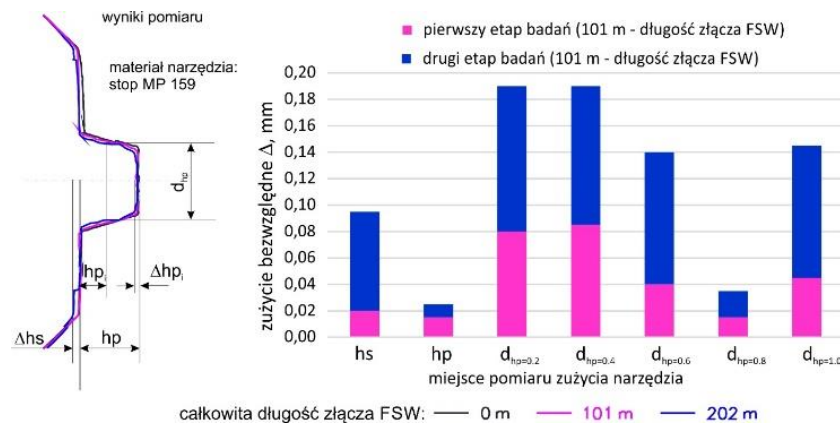
Po I etapie badań na powierzchni roboczej narzędzia (zarówno trzpienia jak i opory) widnieją ślady intensywnego zużycia tribologicznego. W trakcie trwania kolejnego etapu badań zaobserwowano postępujący wzrost zużycia powierzchni bocznej trzpienia objawiający się zmianą jego kształtu, jak również ślady postępującego zużycia na powierzchni czołowej trzpienia oraz opory, na powierzchni których zaobserwować można znaczące ubytki materiału narzędzia, oraz liczne zagłębienia, bruzdy i obwodowe zarysowania.

Wyniki pomiaru zmian zarysu profilu części roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 przedstawiono na rysunku 7. Z powodu znaczącego zużycia powierzchni roboczej narzędzia, zagrażającego jego nagłemu zniszczeniu w kolejnych etapach badań, podobnie jak to miało miejsce w przypadku narzędzia wykonanego ze stali 1.2344, badania zużycia przerwano po II etapie.





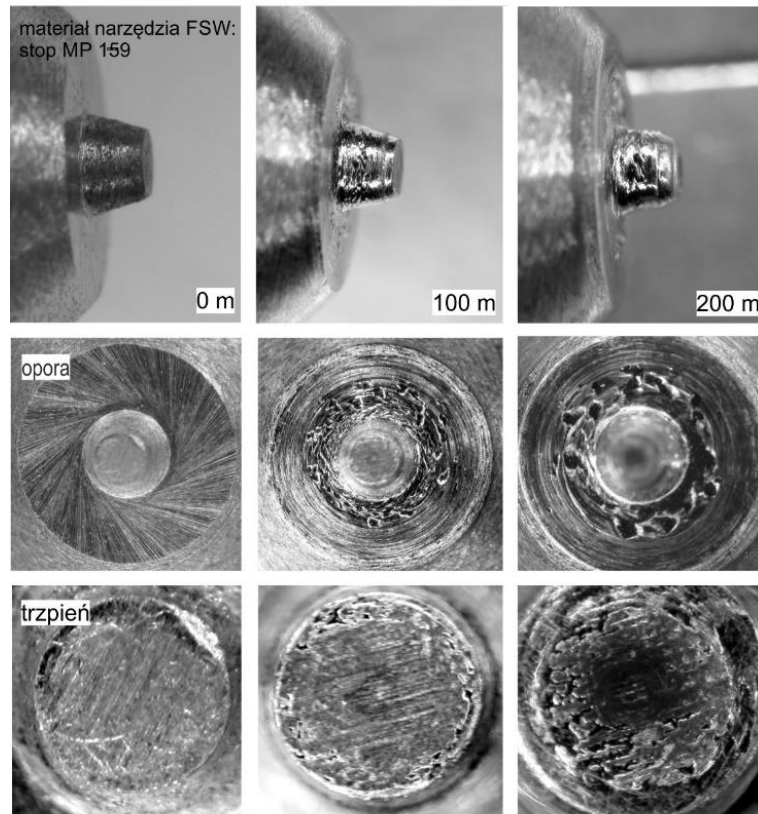
Rys. 6. Ocena wizualna powierzchni roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stali 1.2344 po kolejnych etapach badań zużycia



Rys. 7. Wyniki pomiaru zużycia narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 po kolejnych etapach badań zużycia

Otrzymane wyniki pomiarów narzędzia wskazują na stopniowe i silnie zróżnicowane zużywanie powierzchni bocznej trzcienia. Największe zużycie promieniowe zaobserwowano na powierzchni bocznej trzcienia na wysokości w zakresie 0.2-0.4mm oraz 1.0-1.2mm. W najmniejszym stopniu ulegała zużyciu powierzchnia boczna trzcienia na wysokości 0.8mm oraz jego powierzchnia czołowa. Widoczny jest wzrost intensywności zużywania na całej powierzchni roboczej narzędzia w II etapie badań, wyjątek stanowi jedynie powierzchnia czołowa trzcienia gdzie zaobserwowano jej spadek.

Wyniki pomiarów zużycia narzędzia znajdują potwierdzenie w przeprowadzonej ocenie wizualnej stanu powierzchni roboczej narzędzia przeprowadzonej po zakończeniu każdego cyklu badań zużycia. Wygląd powierzchni roboczej nowego narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 oraz po kolejnych etapach badań przedstawiono na rysunku 8. Na powierzchni roboczej narzędzia widoczne są ślady zużycia tribologicznego zarówno na powierzchni opory u podstawy trzpienia, na jego bocznej powierzchni oraz wzdłuż krawędzi powierzchni czołowej trzpienia. Powierzchnia opory jak i trzpienia pokryta jest wgłębieniami i bruzdami o różnej wielkości. Na powierzchni roboczej narzędzia widoczne są także ślady obwodowych zarysowań będących efektem ścierania, które uważa się za główną przyczynę zużywania powierzchniowego narzędzi w procesach FSW.

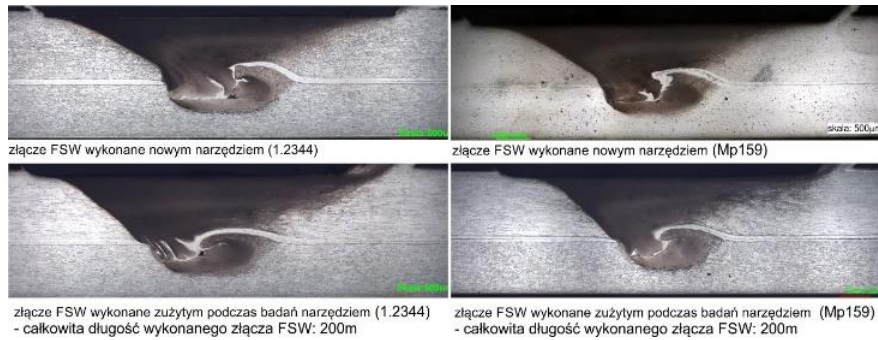


Rys. 8. Ocena wizualna powierzchni roboczej narzędzia FSW wykonanego ze stopu MP159 po kolejnych etapach badań zużycia

Wraz z ze wzrostem czasu pracy narzędzia zaobserwować można postępujący wzrost zużycia jego powierzchni roboczej objawiający się ciągłą zmianą jego kształtu. Na powierzchni bocznej trzpienia oraz opory widnieją głębokie rysy oraz bruzdy świadczące o postępującym zużyciu ściernym. Ślady postępującego zużycia widoczne są także na powierzchni czołowej trzpienia.

Badania metalograficzne próbek pobranych ze złączy kontrolnych wykazały, że pomimo znacznego zużycia badanych narzędzi możliwe jest w dalszym ciągu wykonanie zgrzein pozbawionych wad, które mogłyby znacząco wpłynąć na pogorszenie ich jakości. Przekroje złączy wykonane przy użyciu badanych narzędzi odpowiednio na początku oraz w końcowej fazie badań zużycia przedstawiono na rysunku 9.



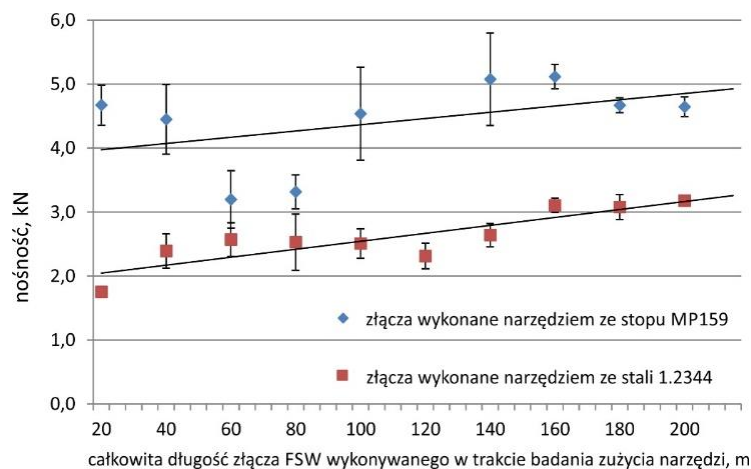


Rys. 9. Przekrój zgrzein FSW wykonanych odpowiednio nowymi i zużytymi narzędziami w trakcie badań

Wraz ze zmianą kształtu narzędzia spowodowaną jego zużyciem zaobserwowano zmiany parametrów geometrycznych zgrzeiny. Szerokość zgrzeiny, wykonanej narzędziem ze stali 1.2344, mierzona na poziomie linii styku łączonych blach wzrosła z  $\sim 1.4$  do  $\sim 1.5$ mm, a średnia głębokość przemieszania materiału w obszarze dolnej blachy utrzymywała się na stałym poziomie  $\sim 0.5$ mm. Natomiast w przypadku narzędzia wykonanego ze stopu MP159 szerokość zgrzeiny wzrosła z  $\sim 1.4$  do  $\sim 1.6$ mm, niewielkiemu wzrostowi z  $\sim 0.4$  do  $\sim 0.5$ mm uległa także średnia głębokość przemieszania materiału w obszarze dolnej blachy.

Parametry geometryczne zgrzeiny (szerokości jądra zgrzeiny, głębokości przemieszania materiału dolnej blachy) oraz rodzaj i ilość wad występujących w złączu decydowały o wytrzymałości złączy uzyskanych podczas badań zużycia narzędzi FSW. Przy ustalonych parametrach prowadzenia procesu o wytrzymałości złączy decydowała także dokładność ustawienia narzędzia względem powierzchni łączonych materiałów jak też zmiany geometryczne części roboczej narzędzia wywołane procesem zużycia. Wyniki badań wytrzymałość próbek pobranych ze złączy kontrolnych FSW wykonywanych w trakcie trwania badań zużycia narzędzi przedstawiono na rysunku 10.

Złącza FSW wykonane narzędziem ze stopu MP159, w porównaniu ze złączami wykonanymi narzędziem ze stali 1.2344, posiadały wyższą wytrzymałość na rozciąganie. Zróżnicowanie wartości oraz duży rozrzut wytrzymałości na rozciąganie złączy FSW złączy kontrolnych uzyskanych w pierwszym etapie badań zużycia, jest efektem intensywnego zużycia (zmiany geometrii) narzędzia, a tym samym zmieniających się warunków procesu zgrzewania. W drugim etapie badań zużycia zaobserwowano nieznaczny wzrost wartości wytrzymałości badanych złączy oraz zmniejszenie jej rozrzutu.



Rys. 10. Wytrzymałość złączy kontrolnych FSW wykonywanych w trakcie badań zużycia narzędzi

60% ze wszystkich badanych próbek uległa zerwaniu (ścięciu) w złączu na poziomie łączenia blach, natomiast pozostałe próbki uległy zerwaniu w materiale dolnej, cieńszej blachy. W złączach o najniższej wytrzymałości zaobserwowano nieznaczny spadek szerokości jądra zgrzeiny oraz głębokości przemieszania materiału dolnej blachy. W przekroju tych złączy stwierdzono wady typu cold lap, tunele oraz przyklejenia. Dodatkowo brak lub nieznaczne pocienienie materiału górnej blachy w tych złączach wskazywać może na zbyt płytkie zagłębienie narzędzia, co skutkowało brakiem optymalnych warunków prowadzenia procesu zgrzewania FSW.

#### 4. Podsumowanie

Powierzchnie robocze narzędzi FSW są narażone na duże obciążenia mechaniczne, a także na wysoką temperaturę podczas pracy, stąd też istnieje konieczność podejmowania badań, których celem jest określenie ich odporności na zużycie oraz ich trwałości. Zużycie, będące jednym z głównych składników degradacji narzędzi FSW jest efektem oddziaływania powierzchni roboczej narzędzia z materiałem zgrzewanym. Charakter oraz intensywność mechanizmu zużycia narzędzi zależy od interakcji między materiałem zgrzewanym i materiałem narzędzia oraz geometrii części roboczej narzędzia i ustalonych parametrów zgrzewania. Zmiany wymiarów narzędzia, wywołanych tarciem, świadczą o podatności na zużycie materiału narzędzia we współpracy z materiałem zgrzeiny oraz o jego trwałości. Zatem oznaki nadmiernego zużycia narzędzia należy rozpatrywać pod kątem zarówno zmiany geometrii jak i wymiarów części roboczej narzędzi.

Badania wykazały, że poza ustalonymi parametrami procesu oraz rodzajem materiału złącza, istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg mechanizmów zużycia narzędzi jest jego geometria oraz rodzaj materiału narzędzia.

Stwierdzone w czasie badań zmiany wymiarów części roboczej badanych narzędzi, będące miarą ich zużycia, świadczą o dużej podatności na zużycie materiałów zastosowanych na badanie narzędzia (stal 1.2344 oraz stop MP159) we współpracy z materiałem zgrzeiny (7075-T6) oraz o ich niskiej trwałości. Badane narzędzia są wyraźnie zużyte już po drugim etapie badań, co praktycznie wyklucza je z dalszej eksploatacji, przy czym w większym stopniu zużyciu uległo narzędzie wykonane ze stopu MP159.

W porównaniu z oporą narzędzia, zwiększonemu zużyciu oraz odkształceniom podlega powierzchnia boczna trzpienia, spowodowane jest to głównie tym, że trzpień zanurzony jest całkowicie w obrabianym materiale i jest on w większym stopniu narażony na oddziaływanie zgrzewanego materiału w trakcie ruchu narzędzia, a przez to przenosi on znacznie większe obciążenia.

Oględziny zużytej powierzchni roboczej narzędzi, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni trzpienia, wskazują na to, iż jednym z mechanizmów degradacji badanych narzędzi FSW, po za zużyciem ściernym i adhezyjnym, może być także ich odkształcenie plastyczne wynikające ze wzrostu naprężeń w materiale narzędzia powyżej obniżającej się w podwyższonej temperaturze granicy plastyczności.

Zróznicowana intensywność zużycia powierzchni roboczej narzędzia prowadzi do zmian parametrów geometrycznych złącza takich jak szerokości jądra zgrzeiny, głębokości wymieszania materiału dolnej blachy czy też pocienienie materiału górnej blachy, co ma wpływ na jakość uzyskanych zgrzein. Złącza wykonane w końcowej fazie badań charakteryzowały się wzrostem szerokości jądra zgrzeiny oraz głębokości wymieszania materiału dolnej blachy w porównaniu ze złączami wykonanymi nowymi narzędziami, co przekłada się na wzrost wytrzymałości na rozciąganie złączy wykonanych podczas kolejnych etapów badań zużycia narzędzi.

Zmiana geometrii części roboczej narzędzia wywołana zużyciem jak też rodzaj materiału narzędzia prowadzą do zmian w transporcie uplastycznionego materiału wokół narzędzia oraz do zmian warunków tarcia, odpowiedzialnych za ilość ciepła generowanego w zgrzeźnieniu, co dodatkowo wpływa na jakość (wytrzymałość) złączy.

Uzyskane wyniki pomiarów zużycia badanych narzędzi FSW jak też wyniki badań złączy uzyskanych w trakcie badań zużycia narzędzi mogą być przydatne w procesie modyfikacji zarówno kształtu jak i w korekcie wymiarów części roboczej narzędzi, tak aby możliwe było wykonanie dłuższej, dobrej jakościowo zgrzeźny przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia i poprawie trwałości narzędzia. Dodatkowo dalsze zmniejszenie zużycia badanych narzędzi, można próbować osiągnąć poprzez zastosowanie powłok przeciwzużyciowych na ich powierzchniach roboczych.

**Podziękowanie:** Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, Unii Europejskiej oraz PZL Mielec A Sikorsky Company w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Projekt pt. „Zaawansowane techniki wytwarzania elementów struktury płatowca przy wykorzystaniu innowacyjnej technologii FSW”, Nr INNOLOT/I/4/NCBR/2013.

#### **Literatura:**

1. Ambroziak A. Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
2. Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-0 sheets. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2009; 49: 814-823, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.001>.
3. Burek R, Wydrzyński D, Sęp J, Więckowski W. The Effect of Tool Wear on the Quality of Lap Joints Between 7075 T6 Aluminum Alloy Sheet Metal Created with the FSW Method. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 100-106.
4. Dobrzański L A. Metalowe materiały inżynierskie. WNT, Warszawa 2004.
5. Don-Hyun Ch, Shae-Kwang K, Seung-Boo J. The microstructures and mechanical properties of friction stir welded AZ31 with CaO Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2013; 554: 162-168, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.143>.
6. Fall A, Fesharaki M H, A Khodabandeh A R, Jahazi M. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints. *Metals* 2016; 6(11): 275: 1-12.
7. Firouzdor V, Kou S. Al-to-Cu Friction Stir Lap Welded. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2012; 43: 303-315, <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0822-9>.
8. Hwang Y M, Fan P L, Lin C H. Experimental study of Friction Stir Welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology* 2010; 210(12): 1667-1672, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019>.
9. Kocańda D, Górka A. Nowe technologie łączenia tarciovego metali. *BIULETYN WAT*, 2010; LIX(2): 395-411.

10. Lacki P, Kucharczyk Z, Śliwa R, Gałaczyński T. Effect of Tool Shape on Temperature Field in Friction Stir Spot Welding. *Archives of Metallurgy and Materials* 2013; 58(2): 595–599, <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0043>.
11. Lacki P, Więckowski W, Wiczorek P. Assessment of Joints Using Friction Stir Welding and Refill Friction Stir Spot Welding Methods. *Archives of Metallurgy and Materials* 2015; 60 (3B): 2297-2306, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0377>.
12. Liua H J, Fenga J C, Fujiib H, Nogib K. Wear characteristics of a WC–Co tool in friction stir welding of AC4AC30 vol%SiCp composite. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005; 45: 1635–1639, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.026>.
13. Meilinger Á, Török I. The Importance Of Friction Stir Welding Tool. *Production Processes and Systems* 2013; 6(1): 25-34.
14. Meldner B, Darlewski J. Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. WNT, Warszawa 1991.
15. Mishra S R, Ma Z Y. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering* 2005; 50: 1-78, <https://doi.org/10.1016/j.msar.2005.07.001>.
16. Myśliwiec P, Śliwa R E, Ostrowski R. Possibility of joining thin sheets of Al, Mg alloys and Ti GRADE 3 in FSW process. *Metal Forming* 2017; XXVIII (4): 263–280.
17. Pietras A, Bogucki R. Rozwój technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniami materiału uplastycznionego w strefie zgrzeiny. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe* 2005; 1(21): 147-154.
18. Pietras A, Rams B, Węglowska A. Zgrzewanie tarcowe metodą FSW stopów aluminium serii 6000. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2007; 27 (1): 93-102.
19. Rai R, De A, Bhadeshia H K D H, DebRoy T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding and Joining* 2011; 16(4): 325-342, <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>.
20. Rowe C E D, Wayne T. *Advances in Tooling Materials For Friction Stir Welding*. TWI and Cedar Metals Ltd. Internet Publication by TWI, Cambridge, January 13, 2005.
21. Technical Handbook. Friction Stir Welding. ESAB, [www.esab.com](http://www.esab.com)
22. Thompson B T. Tool Degradation Characterization in the Friction Stir Welding of Hard Metals. Graduate Program in Welding Engineering The Ohio State University 2010.
23. Xu W, Liu J, Zhu H, Fu L. Influence of welding parameters and tool pin profile of microstructure and mechanical properties along the thickness in a friction stir welded aluminum alloy. *Materials and Design* 2013; 47: 599-606, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.065>.
24. Zhang Y N, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012;51(3): 250-261, <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>.