

WPŁYW PARAMETRÓW ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z PRZEMIESZANIEM NA NOŚNOŚĆ POŁĄCZENIA

The influence of parameters of friction stir welding on the strength properties of joint

Rafał KLUZ, Andrzej KUBIT

S t r e s z c z e n i e: Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym. Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak optymalnego doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia i prędkości posuwu. W pracy zaprezentowano wyniki badań procesu zgrzewania blach aluminiowych 2024-T3 o grubości 1 mm, przeprowadzonych zgodnie z planem badań PS/DK3². Testy zgrzewania przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę rozciągania. W końcowej części artykułu dokonano analizy i interpretacji wyników badań. W wyniku badań opracowano model matematyczny, umożliwiający dobór parametrów ustawczych procesu oraz ustalono, że w pewnym zakresie parametrów prędkości obrotowej i prędkości posuwu, zbliżonych do optymalnych parametry procesu w niewielkim stopniu, wpływają na wytrzymałość złączy.

S ł o w a k l u c z o w e: zgrzewanie tarciove, stopy aluminium, stop 2024-T3

A b s t r a c t: Friction stir welding (FSW) is one of the most modern technology of joining metals and their alloys in solid state. The possibility of joining elements of aluminum alloys makes it possible to use this method in the production of aircraft structures. This technology provides a reduction of labor consumption, cost and weight of structures, while maintaining comparable or better strength properties as compared to conventional methods of joining. Quality assurance of joining requires selection of the optimal process parameters such as tool rotational speed and feed rate. The paper presents the results of the welding process of 2024-T3 aluminum alloy sheet with a thickness of 1 mm carried out in accordance with the study plan PS / DK32. Welding tests were conducted on a universal vertical milling machine, and strength tests included static tensile test. In the final part of the article the analysis and interpretation of research results were performed.

K e y w o r d s: friction stir welding, aluminum alloys, 2024-T3 alloy

Wprowadzenie

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem FSW (Friction Stir Welding) jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym (w temperaturach niższych od temperatury topnienia łączącego materiału). Jest szczególnie przydatna do łączenia materiałów, które w rozumieniu tradycyjnych technologii są trudno spawalne, jak np. stale i wysoko wytrzymałe stopy aluminium, miedzi i tytanu, a także niektóre stopy niklu, cyrkonu i miedzi [1, 2].

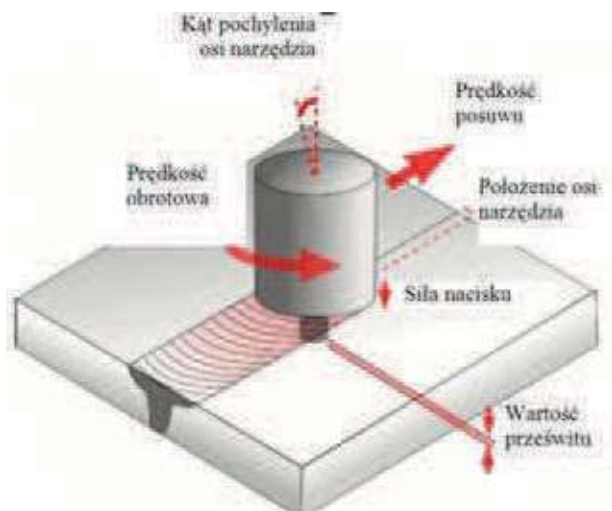
Istota zgrzewania tarciowego z przemieszaniem polega na wprowadzeniu wirującego cylindrycznego narzędzia w obszar styku łączonych elementów i przemieszczania go wzdłuż linii złącza. W wyniku wydzielanego ciepła tarcia uplastycznione materiały tworzą mechaniczno-plastyczne połączenie. W tych warunkach dochodzi do pełnego, wzajemnego przemieszania materiałów, które w obszarze złącza bez osiągnięcia punktu topnienia wirują wokół osi narzędzia. Po wykonaniu złącza narzędzie jest wprowadzane ze strefy obróbki [2, 3].

Możliwości łączenia elementów, wykonanych ze stopów aluminium, uzasadniają zastosowanie tej metody przy produkcji struktur lotniczych, przy jednocześnie obniżeniu pracochłonności, kosztów i ich ciężaru,

zachowując porównywalne lub wyższe parametry wytrzymałościowe w porównaniu do klasycznych metod łączenia elementów przy zastosowaniu elementów złącznych. Zapewniają to następujące zalety procesu [2, 4-7]:

- eliminacja konieczności ukosowania blach,
- wyższa odporność złącza na kruche pęknięcie niż rodzime materiały łączone,
- wysokie statyczne i dynamiczne właściwości wytrzymałościowe, wyższe od osiąganych konwencjonalnymi metodami,
- możliwość realizacji procesu na obrabiarkach konwencjonalnych,
- proste oprzyrządowanie technologiczne,
- nieprzegrzewanie stref wpływu ciepła, a zatem ich nieosłabianie efektami zmęczenia,
- brak tzw. pęknięć gorących, mogących powstać w wyniku spawania,
- możliwość łączenia różnych materiałów,
- brak emisji szkodliwych gazów i oparów.

Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak optymalnego doboru parametrów procesu zgrzewania, spośród których najważniejsze to: geometria i prędkość obrotowa narzędzia, wielkość posuwu, kąt pochylecia narzędzia, siła nacisku oraz głębokość zagłębienia czoła narzędzia [8-11] (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu zgrzewania tarcowego [2]
Fig. 1. Schematic of friction stir welding [2]

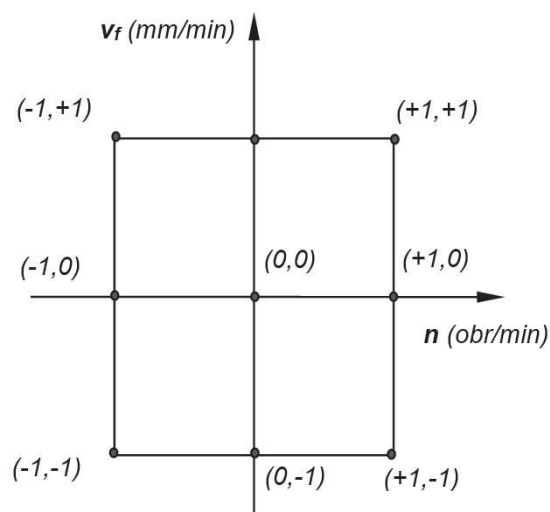
Celem pracy było opracowanie modelu matematycznego określającego wpływ przedstawionych parametrów na maksymalną siłę przenoszoną przez złącze wykonane metodą FSW, umożliwiającego dobór parametrów optymalnych.

Badania eksperymentalne

Badania procesu zgrzewania blach przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej FWF 32J2. Przedmiotem badań były złącza doczołowe blach ze stopu aluminium 2024-T3, należącego do grupy materiałów niespawalnych, trudno obrabialnych, charakteryzujących się dodatkowo bardzo niską odpornością na utlenienie (granica wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 360 \div 425$ Mpa, min. granica plastyczności $R_{0,2} = 250 \div 290$ MPa, twardość



Rys. 2. Głowica narzędziowa i próbki do zgrzewania tarcowego
Fig. 2. View of head with tool and FSW specimen



Rys. 3. Graficzna interpretacja planu PS/DK 3^2 [5]
Fig. 3. Graphic interpretation of the plan PS/DK 3^2 [5]

$104 \div 123$ HB, wydłużenie $A_5 = 12 \div 14\%$, przewodność cieplna $137 \div 170$ W/mk) o grubości 1 mm. Stop ten wykorzystywany jest do wykonywania wyposażenia samolotów, przekładni wałków, śrub, części zaworów hydraulicznych oraz tłoków i przekładni ślimakowych. Narzędzie w postaci trzpienia zakończonego częścią śrubową wykonano ze stali szybko tnącej i poddano obróbce cieplnej, zwiększającej twardość do 55HRC. W celu usprawnienia procesu zgrzewania zaprojektowano i wykonano specjalny uchwyt obróbkowy, zapewniający stałą wartość siły docisku i jednoznaczne położenie krawędzi łączonych blach względem narzędzia (rys. 2). Badania prowadzono przy kącie pochylenia osi narzędzia wynoszącym 3° i głębokości zagłębienia czoła narzędzia wynoszącym 90% grubości blachy (0.9 mm).

Badania wstępne wykazały, że największy wpływ na przebieg procesu zgrzewania mają: prędkość posuwu stołu frezarki v_f , prędkość obrotowa narzędzia n oraz siła docisku. Pozostałe parametry nie wywierały znaczącego wpływu na jakość spoiny. Ze względu na ograniczenia technologiczne, dotyczące możliwości kontrolowania siły nacisku narzędzia, w trakcie badań parametrami zmiennymi była jedynie prędkość posuwu i prędkość obrotowa wrzeciona frezarki. W celu uzyskania wiarygodnych informacji z przeprowadzonych prób przy minimum nakładów pracy, badania wykonano w oparciu o statyczny trójpoziomowy kompletny plan badań PS/DK 3^2 . W planie tym czynniki wejściowe występują na trzech poziomach [12]:

- wyższym – oznaczonym +1,
- średnim (zerowym) – oznaczonym 0,
- niższym – oznaczonym -1.

Tabela 1. Matryca planu badań PS/DK 3² i wyniki doświadczeń
Table 1. Matrix test plan PS/DK 3² and test results

| Lp. | x_0 | x_1 | x_2 | x_1^2 | x_2^2 | $x_1 x_2$ | y_1 | y_2 | \bar{y} | \bar{y} | $S^2(y)_i$ |
|-----|-------|-------|-------|---------|---------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|------------|
| 1 | + | + | + | + | + | + | 2,98 | 3,65 | 3,32 | 3,57 | 0,062 |
| 2 | + | + | 0 | + | 0 | 0 | 3,20 | 3,60 | 3,40 | 3,30 | 0,01 |
| 3 | + | + | - | + | + | - | 2,98 | 3,26 | 3,12 | 2,95 | 0,03 |
| 4 | + | 0 | + | 0 | + | 0 | 4,02 | 3,86 | 3,94 | 3,90 | 0,0014 |
| 5 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,01 | 3,22 | 3,12 | 3,16 | 0,0013 |
| 6 | + | 0 | - | 0 | + | 0 | 2,31 | 2,40 | 2,36 | 2,74 | 0,1413 |
| 7 | + | - | + | + | + | - | 1,19 | 1,61 | 1,40 | 1,57 | 0,028 |
| 8 | + | - | 0 | + | 0 | 0 | 0,98 | 1,21 | 1,095 | 1,16 | 0,032 |
| 9 | + | - | - | + | + | + | 1,08 | 0,71 | 0,89 | 0,67 | 0,052 |

Badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę rozciągania, na podstawie których rejestrowano maksymalną siłę przenoszoną przez złącze. Próbki do badań wytrzymałościowych (przeprowadzonych zgodnie z normą PN-EN 10002-1) wycinano z połączonych metodą FSW pasów blachy w kierunku prostopadłym do linii złącza. Szerokość próbek wynosiła 12,5 mm. Celem badań było uzyskanie adekwatnego modelu matematycznego w postaci wielomianu drugiego stopnia na poziomie istotności $\alpha = 0,05$:

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (1)$$

gdzie:

x_k, x_j – czynniki wejściowe,
 b_0, b_k, b_{kk}, b_{kj} – współczynniki regresji równania,
 y – czynnik wynikowy (wielkość mierzona).

Wyniki pomiarów i niektórych obliczeń przedstawiono w tab. 1 .

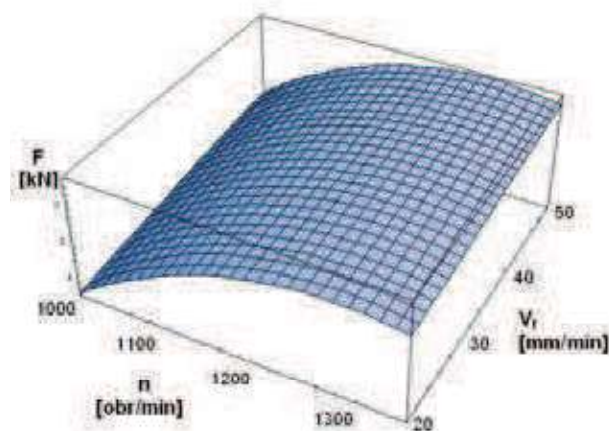
Na podstawie badań literaturowych [13, 14] wstępnie ustalono parametry procesu zgrzewania: prędkość posuwu 70 mm/min, prędkość obrotowa narzędzia 1120 obr./min. Przy tych parametrach zarejestrowano jedną z wyższych wartości siły użytecznej połączenia, jednak przy dużej wariancji uzyskiwanych wyników pomiarów, co uniemożliwiało uzyskanie adekwatnego modelu regresji. W celu uzyskania poprawnego modelu w trakcie badań skupiono się na mniejszych wartościach posuwu (20–50 mm/min) i prędkości obrotowej w zakresie (1000–1350 obr./min), przy których zaobserwowano znacznie mniejszy rozrzut wyników pomiarów przy nieznacznie mniejszej wartości siły przenoszonej przez złącze. Najlepsze wyniki uzyskano dla prędkości posuwu wynoszącej 50 mm/min i prędkości obrotowej wynoszącej 1175 obr./min, dla których zarejestrowano wartość siły użytecznej połączenia stanowiącej 69,12% wytrzymałości materiału rodzimego. Dalszy wzrost prędkości obrotowej narzędzia nie powodował wzrostu siły użytecznej połączenia. Zwiększał się jedynie obszar wpływu ciepła, powodujący deformację łączonych blach przy znacznie

zwiększonym udziale pustek widocznych na otrzymanym złomie. Należy jednak zauważyć, że w każdym z analizowanych przypadków uzyskano spoinę o bardzo stabilnej i równej grani i czole spoiny, wyraźnie uzależnionej od przyjętych parametrów ustawczych procesu zgrzewania.

Równanie regresji, obrazujące wpływ parametrów zgrzewania tarcowego na wartość siły użytecznej połączenia F , po odkodowaniu przyjęło następującą postać:

$$F = 3,16 + 0,0253(v_f - 35) - 0,000155(v_f - 35)^2 + 0,006114(n - 1175) - 0,000026(v_f - 35)(n - 1175) - 0,00003036(n - 1175)^2 \quad (2)$$

Na rys. 4 przedstawiono wykres zależności siły użytecznej połączenia od prędkości posuwu i prędkości obrotowej narzędzia. Siła ta osiąga wartość maksymalną wynoszącą 71,10% wytrzymałości materiału rodzimego przy prędkości obrotowej wynoszącej 1269 obr./min i prędkości posuwu wynoszącej 50 mm/min. W celu weryfikacji przedstawionego modelu przeprowadzono



Rys. 4. Wykres zależności siły użytecznej złącza od prędkości obrotowej i posuwu

Fig. 4. Dependence of force from rotational and travelling speed

próbę zgrzewania z wymienionymi parametrami, przy których zaobserwowano jedynie nieznaczny wzrost siły użytecznej połączenia (do ok. 70.% wytrzymałości materiału rodzimego). Analiza wykresu wskazuje na istniejące rezerwy, dotyczące możliwości zwiększenia wytrzymałości połączenia drogą modyfikacji parametrów ustawczych procesu (prędkości posuwu). Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych badań z wykorzystaniem adaptacyjnego układu sterowania z kontrolą siły nacisku narzędzia, zapewniającego wysoką stabilność procesu zgrzewania.

Podsumowanie

Zgrzewanie tarciove jest jedną z najbardziej atrakcyjnych metod łączenia odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, ze względu na szczelność i wysoką wytrzymałość złącza oraz możliwość redukcji jego masy. Przeprowadzone badania, dotyczące zgrzewania tarciovego z przemieszeniem wykazały, że metoda ta może być wykorzystana do łączenia blach ze stopu aluminium 2024-T3 o grubości 1 mm. Zauważono, że zmniejszenie grubości blach wymaga zmiany parametrów ustawczych procesu. Najlepsze wyniki, zapewniające najwyższą wartość siły użytecznej połączenia, uzyskano dla prędkości obrotowej 1270 obr./min i prędkości posuwu 50 mm/min. Stwierdzono ponadto, że w pewnym zakresie prędkości obrotowej i liniowej (zbliżonych do optymalnych) parametry procesu wpływają w niewielki sposób na cechy jakościowe zgrzezin. Znaczne zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia podwyższa temperaturę procesu i prowadzi do lokalnych nadtopień zgrzewanego materiału, objawiających się spadkiem wytrzymałości złącza. Wydaje się jednak, że zwiększenie prędkości posuwu może zapewnić znacznie lepsze parametry jakościowe połączenia. Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych badań przy kontrolowanej wartości siły nacisku narzędzia.

LITERATURA

- [1] Mishra R.S. 2003. "Friction Stir Processing Technologies". *Advanced Materials&Processes*.
- [2] Pietras A., B. Rams, A. Węglowska. 2007. „Zgrzewanie tarciove metodą FSW stopów aluminium serii 6000”. Wydawnictwo Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 27 (1).
- [3] Hattingh D.G., C. Blignault, T.I. Niekerk, M.N. James. 2008. "Characterization of the influences of FSW tool

geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool". *Elsevier Journal of Materials Processing Technology* (203): 46–57.

- [4] Giraud L. et. al. 2016. "Investigation into the dissimilar friction stir welding of AA7020-T651 and AA6060-T6". *Journal of Materials Processing Technology*.
- [5] Yu Ch. et al. 2015. "Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (25): 2524–2532.
- [6] Seetharaman R., V. Ravisankar, V. Balasubramanian. 2015. "Corrosion performance of friction stir welded AA2024 aluminium alloy under salt fog conditions". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (25): 1427–1438.
- [7] Sadeesh P. et. al. 2014. "Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals". *Procedia Engineering* (75): 145–149.
- [8] Amancio-Filho S.T. et. al. 2008. "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4". *Journal of materials processing technology* (206): 132–142.
- [9] Radisavljevic I. et. al. 2013. "Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (23): 3525–3539.
- [10] Yazdipour A., A. Heidarzadeh. 2016. "Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints". *Journal of Alloys and Compounds* (680): 595–603.
- [11] Kocańda D., A. Górka. 2010. „Nowe technologie łączenia tarciovego metali”. *Biuletyn WAT* (2), vol. LIX.
- [12] Korzyński M. 2006. „Metodyka eksperymentu”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [13] Kudła K., K. Wojsyk, Z. Kucharczyk. 2013. |Własności zakładkowych złączy spajanych metodą zgrzewania tarciovego z przemieszeniem (FSW – Friction Stir Welding)". *Obróbka Plastyczna Metali* (3), vol. XXIV.
- [14] Balawender T., R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2014. „Zgrzewanie tarciove blach ze stopu aluminium 2024”. *Hutnik-WH* t.81 (7): 450–455.

Dr inż. Rafał Kluz – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkkmtiop@prz.edu.pl

Dr inż. Andrzej Kubit – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl