

Zastosowanie zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (FSW)

do wykonywania połączeń doczołowych wysokowytrzymałych stopów aluminium stosowanych w przemyśle zbrojeniowym

Otrzymywanie wysokiej jakości połączeń spójnościowych umacnianych wydzieleniowo stopów aluminium stanowi jedną z decydujących batalii na froncie rozwoju współczesnej techniki, będąc istotnym motorem postępu przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego i zbrojeniowego.

Przykładami wysokowytrzymałych stopów aluminium wykorzystywanych w konstrukcjach wojskowych są: AA2519, znajdujący zastosowanie jako materiał na pancerze bojowych wozów piechoty [1] i AA7075, stosowany na poszycie i elementy konstrukcji nośnej samolotów bojowych [2], opancerzenie [3] oraz komponenty amunicji podkalibrowej [4]. Wysokie parametry wytrzymałościowe tych materiałów ulegają znacznej redukcji w wyniku realizacji połączeń spójnościowych z wykorzystaniem tradycyjnych technik spawalniczych [5, 6]. Z uwagi na rozpuszczanie się wydzieleni faz umacniających przyjmuje się, że wytrzymałość umacnianego wydzieleniowo stopu aluminium po procesie spawania jest bliska jego wytrzymałości w stanie wyżarzonym [7]. Opracowana u schyłku minionego stulecia technika zgrzewania tarcowego z przemieszaniem – FSW (ang. *friction stir welding*) stanowi istotny przełom w zakresie spajania stopów aluminium, w tym także umacnianych wydzieleniowo [5, 8, 9]. Spajanie techniką FSW polega na wprowadzeniu pomiędzy stykające się krawędzie łączonych elementów obracającego się narzędzia z odpowiednio uformowanym kołnierzem oraz trzpieniem. Ciepło, wytworzone przez tarcie kołnierza dociśniętego do powierzchni spajanych elementów, doprowadza materiał do stanu uplastycznienia. Jednocześnie narzędzie przemieszcza się wzdłuż linii styku łączonych elementów i tworzy złącze poprzez mieszanie uplastycznionego materiału swoim trzpieniem. Powstała na skutek znacznego odkształcenia plastycznego w podwyższonej temperaturze zgrzeina charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą, co przekłada się na korzystne właściwości wytrzymałościowe połączeń [5, 10]. Rozpatrując stopy umacniane wydzieleniowo, takie jak AA2519-T62 i AA7075-T651, należy uwzględnić fakt, że temperatura procesu zgrzewania prowadzi do częściowego przestarzenia i rozpuszczenia faz umacniających w łączonych materiałach [11, ✦

SUMMARY

Application of friction stir welding for manufacturing of butt joints of high-strength aluminium alloys used in the arms industry

Słowa kluczowe: stopy aluminium, zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem, właściwości mechaniczne

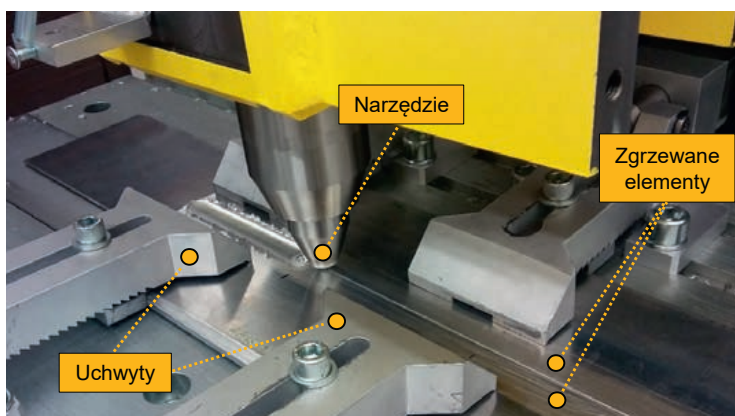
Keywords: aluminium alloys, friction stir welding, mechanical properties

This paper presents selected results of research concerning AA2519-T62 and AA7075-T651 butt joints produced with the FSW technique, including macroscopic observations, microhardness distributions and tensile tests. The applied welding technique enabled obtaining high-quality welds of the 87% and 77% joint efficiencies for AA2519-T62 and AA7075-T651 respectively.

TEKST: DR INŻ. **Robert Kosturek**

Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Maszyn, Wojskowa Akademia Techniczna

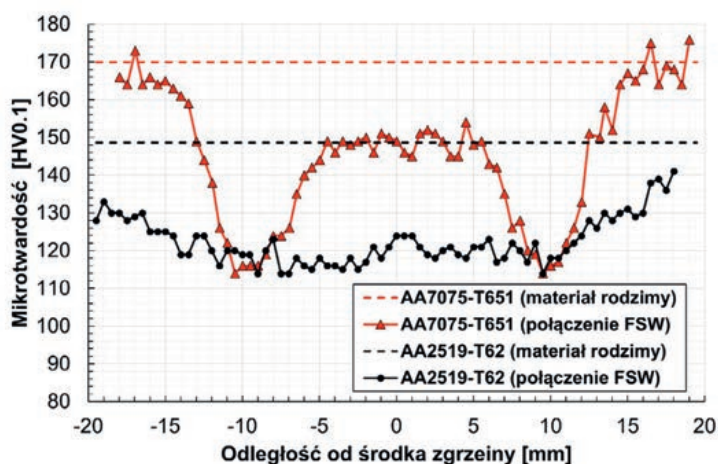
zdjęcia: autor



Rys. 1.



Rys. 2.



Rys. 3.

1. Realizacja procesu zgrzewania tarciovego z przemieszaniem

2. Obraz makroskopowy połączenia FSW stopu AA7075-T651 z zaznaczoną strefą wpływu ciepła (SWC), ciepło-plastyczną (SCP) i jądrem zgrzeiny (JZ)

3. Rozkłady mikrotwardości na przekroju poprzecznym wytworzonych połączeń FSW

12]. Nie są to jednak zmiany tak daleko idące jak w przypadku całkowitego stopienia materiału zachodzącego w procesie spawania, przez co połączenia FSW tej grupy materiałów na ogół deklasują konwencjonalne techniki spajania pod względem wytrzymałości złączy [5].

Metodologia

Stopami wykorzystanymi w badaniach były AA2519-T62 oraz AA7075-T651 w postaci blach o grubości 5 mm. Połączenia doczołowe zostały wykonane przy użyciu maszyny ESAB FSW Legio 4UT (rys. 1) z wykorzystaniem tego samego zestawu parametrów dla obu materiałów: 400 obr./min prędkości obrotowej narzędzia i 100 mm/min prędkości posuwu narzędzia (prędkości zgrzewania).

Obserwacje makrostruktury otrzymanych połączeń zostały przeprowadzone na mikroskopie konfokalnym Olympus LEXT OLS 4100. Struktura materiału została ujawniona poprzez trawienie odczynnikami Kellera o składzie: 20 ml H₂O, 5 ml 63% HNO₃, 1 ml 36% HCl i 1 kropla 40% HF przez czas 10 sekund. Pomiar mikrotwardości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6507 za pomocą mikrotwardościomierza Struers DURA SCAN 70, zadając obciążenie 0,98 N. Ścieżki pomiarowe zostały poprowadzone w połowie wysokości zgrzewanych elementów. Podstawowe właściwości mechaniczne połączeń zostały wyznaczone w statycznej próbie rozciągania zrealizowanej na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802 MTL zgodnie z normą ASTM E8/E8M-13a.

Wyniki badań

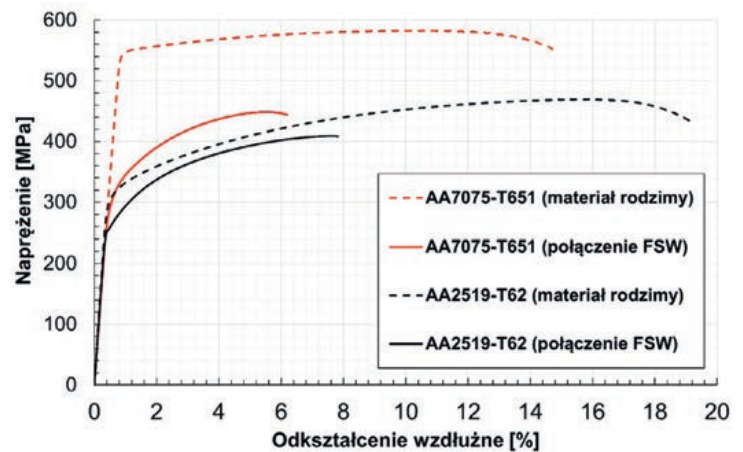
Połączenia wykonane techniką FSW posiadają charakterystyczną strukturę uformowaną na skutek przemieszania silnie odkształconego materiału w podwyższonej temperaturze (rys. 2). W samym obrębie złącza wyszczególnić można strefę ciepło-plastyczną (SCP) odznaczającą się odkształconymi ziarnami oraz jądro zgrzeiny (JZ), którego cechą charakterystyczną jest występowanie bardzo drobnego ziarna (ok. 10 μm) powstałego na skutek dynamicznej rekrytalizacji odkształcanego stopu.

Za strefą ciepło-plastyczną zlokalizowana jest strefa wpływu ciepła (SWC), w której materiał nie jest odkształcany, a temperatura procesu powoduje rozrost ziarna i przestarczenie fazy umacniającej. W samym połączeniu nie stwierdzono obecności imperfekcji w postaci pęknięć oraz porowatości. Silne odkształcenie plastyczne w podwyższonej temperaturze znajduje swe odzwierciedlenie w rozkładach mikrotwardości na przekroju poprzecznym połączeń (rys. 3).

W przypadku obu badanych stopów stwierdza się spadek mikrotwardości spawanego materiału. Stop AA2519-T62, charakteryzujący się mikrotwardością na poziomie blisko 150 HVO.1, ulega osłabianiu w obszarze połączenia do wartości ok. 115-120 HVO.1 z wyraźnym wzrostem twardości w centralnej części jądra zgrzeiny. Analizując przebieg mikrotwardości w połączeniu FSW stopu AA7075-T651, można stwierdzić daleko idące zmiany, poczynając od redukcji twardości materiału bazowego z wartością ok. 170 HVO.1 do ok. 115 HVO.1 w strefie wpływu ciepła. Następnie obserwuje się stopniowy wzrost mikrotwar-

dości w strefie ciepło-plastycznej, gdzie odkształcenie plastyczne częściowo kompensuje straty fazy umacniającej, aż do wartości ok. 150 HV0.1, osiąganey w jądrze zgrzeiny. Różnice w rozkładach mikrotwardości badanych stopów są wynikiem m.in. różnej podatności ich faz umacniających na oddziaływanie podwyższonej temperatury oraz przewodności cieplnej. W celu odniesienia otrzymanych wartości mikrotwardości połączenia FSW do technik spajania z całkowitym przetopem można podać wartość mikrotwardości spoin wykonanych wiązką lasera, wynoszącą 85 HV0.1 w przypadku stopu AA2519-T62 [5] oraz 100 HV0.1 dla AA7075-T651 [13]. Wyznaczenie podstawowych właściwości mechanicznych otrzymanych połączeń zostało zrealizowane w statycznej próbie rozciągania (rys. 4).

Badane stopy w stanie wyjściowym odznaczają się wytrzymałością na rozciąganie wynoszącą $R_m = 470$ MPa i $R_m = 585$ MPa odpowiednio dla AA2519-T62 oraz AA7075-T651. W obu przypadkach obserwuje się obniżenie wytrzymałości połączenia FSW do poziomu $R_m = 410$ MPa dla AA2519-T62 (efektywność złącza 87%) i $R_m = 450$ MPa w przypadku AA7075-T651 (efektywność 77%). Należy przy tym zaznaczyć, że połączenia stopu AA2519-T62 wykonane wiązką lasera charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie niespełna 315 MPa, odpowiadającą 35% redukcji wytrzymałości stopu w stanie wyjściowym [5]. Podobny spadek wytrzymałości wykazują spoiny stopu AA7075-T651 [14]. Zastosowanie techniki FSW pozwala więc podnieść wytrzymałość połączeń spójnościowych rozpatrywanych materiałów w zakresie 80–95 MPa. Jednocześnie, w połączeniach FSW, obserwuje się spadek wydłużenia do zerwania, co jest



Rys. 4.

związane z kumulacją odkształcenia plastycznego na granicy stref wpływu ciepła i ciepło-plastycznej, prowadzącej do zniszczenia zgrzeiny.

4. Zestawienie krzywych rozciągania materiałów rodzimych i połączeń FSW

Podsumowanie

Technika FSW umożliwia realizację połączeń doczołowych elementów wykonanych z umacnianych wydzieleniowo stopów aluminium, w tym wykorzystywanych w przemyśle zbrojeniowym stopów AA2519-T62 i AA7075-T651. Złącza te charakteryzują się korzystną, drobnoziarnistą mikrostrukturą, relatywnie niską redukcją mikrotwardości oraz zdolnością do przenoszenia dużych obciążeń: $R_m = 410$ MPa (AA2519-T62) i $R_m = 450$ MPa (AA7075-T651). □

Artykuł został opracowany na podstawie wyników badań wykonanych w ramach projektów: 2021/05/X/ST8/01480 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki oraz PBG/13-998 finansowanego przez Ministerstwo Obrony Narodowej.

Piśmiennictwo

- Crouch I.G.: *The science of armour materials*. Woodhead Publishing, 2017, ISBN 978-0-08-101002-0.
- Venugopal A., Mohammad R., Koslan M.F.S., Shafie A., Ali A., Eugene O.: *Structure Life Extension towards the Structural Integrity of Sukhoi Su-30MKM*. „Materials”, 2021, 14 (19):5562.
- Forrestal M., Børvik T., Warren T.: *Perforation of 7075-T651 Aluminum Armor Plates with 7.62 mm APM2 Bullets*. „Experimental Mechanics”, 2010, 50, 1245-1251.
- Patent US4,74,7191A: *Process for manufacturing a sabot arrangement for a sub-caliber fin-stabilized projectile for a large caliber weapon*, 1988.
- Kosturek R., Śnieżek L., Grzelak K., Torzewski J.: *Study on the weldability of AA2519 armor grade aluminium alloy*. „Manufacturing Technology”, 2021, 21, 6, 818-823.
- Hayat F.: *Electron beam welding of 7075 aluminum alloy: Microstructure and fracture properties*. „Engineering Science and Technology, an International Journal”, 2022, 34, 101093.
- Porębska M., Skórka A.: *Połączenia spójnościowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013, ISBN 978-83-01-12333-8.
- Lacki P., Derlatka A.: *Zastosowanie technologii FSW w strukturach aluminiowych*. „Obrobka Plastyczna Metali”, 2013, vol. XXIV, nr 3.
- Burek R., Wydrzyński D., Kubit A., Łogin W.: *The influence of the shoulder depth on the properties of the thin sheet joint made by FSW technology*. „Aircraft Engineering and Aerospace Technology”, 2021, 93, 1, 120-126.
- Torzewski J., Grzelak K., Wachowski M., Kosturek R.: *Microstructure and Low Cycle Fatigue Properties of AA5083 H111 Friction Stir Welded Joint*. „Materials”, 2020, 13, 2381.
- Feng A., Chen D., Ma Z.Y., Ma W., Song R.: *Microstructure and strain hardening of a friction stir welded high-strength Al-Zn-Mg alloy*. „Acta Metallurgica Sinica”, 2014, 27, 723-729.
- Liang X.P., Li H.Z., Li Z., Hong T., Ma B., Liu S.D., Liu, Y.: *Study on the microstructure in a friction stir welded 2519-T87 Al alloy*. „Materials and Design”, 2012, 35, 603-608.
- Suckow T., Völkers S., Bütev Öcal E., Grass M., Böhm S., Groche P.: *Effect of shortened post weld heat treatment on the laser welded AA7075 alloy*. „Metals”, 2022, 12 (3):393.
- Wang Z., Shaogang W., Chengcong Z., Wang Z.: *Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of 7055 aluminum alloy electron beam welded joint*. „Materials Research Express”, 2020, 7.