

Nowoczesne metody zgrzewania tarcowego punktowego materiałów konstrukcyjnych

Modern methods of friction spot welding of construction materials

Streszczenie

W artykule przedstawiono aktualnie najpopularniejsze metody zgrzewania tarcowego punktowego. Obecnie łączenie metali lekkich jak stopy aluminium czy magnezu stwarza szereg problemów natury technologicznej czy metalurgicznej. Osiągnięcie odpowiednich właściwości wytrzymałościowych produkowanych złączy wymaga niejednokrotnie urządzeń o relatywnie wysokiej mocy, dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej czy odpowiedniego przygotowania elementów łączonych. Ciekawą i coraz szerzej stosowaną alternatywą dla procesów zgrzewania rezystancyjnego punktowej jest zgrzewanie tarcowe punktowe. Jest to nowatorska metoda łączenia, powstała ona na bazie znanego procesu FSW (Friction Stir Welding) tj. zgrzewania tarcowego liniowego z wymieszaniem materiałów łączonych. Metoda FSW została opracowana przez Brytyjski ośrodek TWI (The Welding Institute) w 1991r a następnie rozwijana przez szereg ośrodków w USA, Japonii i Europie [1].

Słowa kluczowe: zgrzewanie tarcowe, aluminium, FSSW

Abstract

The article presents the currently most popular methods of friction spot welding. Currently, joining of lightweight metals like aluminium and magnesium alloys poses a number of technological or metallurgical problems. Achieving the appropriate strength properties produced joints often requires devices with relatively high power, additional heat treatment and adequate preparation of the workpieces. Friction stir spot welding is an interesting and widely used alternative processes for resistance spot welding. It is an innovative method of joining. It was founded on the basis of a well-known process of FSW (Friction Stir Welding). FSW method has been developed by the British Center TWI (The Welding Institute) in 1991 and then developed by a number of research centers in the US, Japan and Europe.

Keywords: friction welding, aluminum, FSSW

Wstęp

Klasyczne techniki spawania czy zgrzewania stosowane w przemyśle motoryzacyjnym do łączenia elementów wykonanych ze stopów aluminium czy magnezu mogą powodować powstawanie znacznej ilości problemów technologicznych i metalurgicznych. Zastosowanie techniki FSW w produkcji pojazdów, zarówno podzespołów, jak i w montażu końcowym, pozwoliło na osiągnięcie wyższej jakości złączy oraz zwiększenie wydajności produkcji.

Metoda FSW jest z powodzeniem stosowana również w innych branżach takich jak:

- przemysł budowlany – aluminiowe konstrukcje mostów, rur, ram okien, elementów wymienników ciepła i klimatyzacji,
- przemysł elektryczny – obudowy silników elektrycznych, szyny elektryczne, połączenia elektryczne, obudowy urządzeń elektronicznych, elementy generatorów energii elektrycznej,
- energetyka jądrowa – zbiorniki miedziane do gromadzenia odpadów radioaktywnych.

Metoda FSW (Friction Stir Welding) stosowana jest głównie do łączenia materiałów plastycznych (stopów

aluminium, magnezu, miedzi). O rozwijającej się popularności procesów zgrzewania tarcowego z wymieszaniem decydują nie tylko czynniki techniczne przemawiają za tą metodą, ale także czynniki ekonomiczne czy środowiskowe. Do głównych jej zalet należy zaliczyć:

- a) proces przebiega w stanie stałym, co w wielu przypadkach korzystanie wpływa na własności metalurgiczne oraz strukturę złącza (rozdrobienie ziarna, ograniczone powstawanie kruchych faz międzymetalicznych, ograniczona segregacji pierwiastków czy występowanie np. porowatości).
- b) relatywnie niskie odkształcenia materiałów łączonych po procesie, przez co uzyskuje się węższe pola tolerancji wytwarzanych elementów,
- c) możliwość łączenia materiałów o znacznej grubości, szczególnie dla stopów aluminium,
- d) brak konieczności specjalistycznego przygotowania krawędzi materiałów łączonych np. ukosowania,
- e) łatwość automatyzacji procesu dzięki zastosowaniu obrabiarek numerycznych lub robotów,
- f) proces nie wymaga stosowania materiałów dodatkowych, jak również nie wyklucza wprowadzenia np. gazów osłonowych lub materiału dodatkowego,

dr inż. Paweł Kustron, mgr inż. Jacek Leśniewski, dr inż. Beata Białobrzaska – Politechnika Wrocławska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: pawel.kustron@pwr.edu.pl

g) podczas procesu nie wydzielają się szkodliwe dla człowieka gazy i pyły.

h) po procesie nie ma konieczności dodatkowej obróbki (np. skrawaniem) wykonanych złączy.

Zastosowanie niniejszej metody oraz jej odmian do łączenia materiałów wysokotopliwych (stal, tytan) nastęrcza jednak nadal wielu problemów. Do głównych należy zaliczyć:

a) konieczność wytwarzania narzędzi bądź ich elementów z materiałów zdolnych pracować w temperaturach dochodzących do 1200 °C (np. stopy wolframu z renem czy spieki PCBN polycrystalline cubic boron nitride),

b) po procesie pozostaje w złączu krater, który w pewnych przypadkach może istotnie wpływać na właściwości wytrzymałościowe złącza,

c) urządzenie powinno posiadać odpowiednio wydajny układ chłodzenia narzędzia,

d) geometria narzędzia powinna zapewniać odpowiedni przepływ i mieszanie materiałów łączonych oraz generować odpowiednią ilość energii cieplnej do uplastycznienia materiału,

e) narzędzie powinno chronić obszar łączony przed jego utlenianiem,

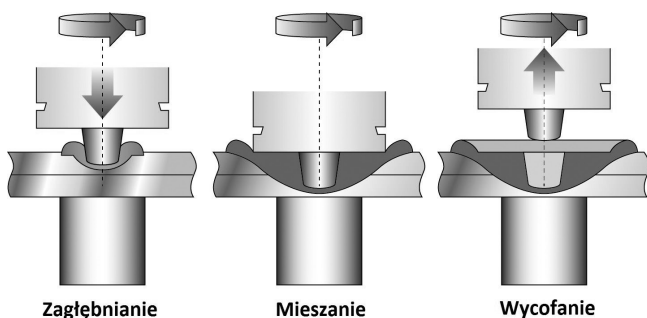
Pomimo wymienionych problemów proces ten zdobywa sobie coraz to większą popularność a ponadto pojawiają się kolejne jego odmiany, które niosą ze sobą coraz to nowe możliwości technologiczne oraz w szczególności wyższe parametry wytrzymałościowe wytwarzanych złączy.

Proces FSW można podzielić na dwie podstawowe grupy: zgrzewanie liniowe oraz zgrzewanie punktowe. Zgrzewanie FSW liniowe jest szeroko stosowane i można znaleźć na ten temat liczne publikacje, natomiast zgrzewanie tarcie punktowe jest obecnie spotykane w niewielu opracowaniach. Aktualnie wyróżnia się dwie główne metody zgrzewania tarcieowego punktowego:

- FSSW (zgrzewanie tarcieowe punktowe) i jego odmiany np. FSJ,
- Refill FSSW (zgrzewanie tarcieowe punktowe z wypełnieniem krateru).

FSJ (Friction spot joining) przykład systemu KAWASAKI

Proces FSJ składa się z trzech głównych etapów (rys. 1): zagłębienie, mieszanie i wycofanie narzędzia [2], [3]. Proces rozpoczyna się od zanurzenia wirującego narzędzia w miejscu łączenia aż do styku z powierzchnią przedmiotu obrabianego. W tym momencie następuje drugi etap – mieszanie, które umożliwia dyfuzję łączonych materiałów z ustalonym parametrem docisku narzędzia. Na tym etapie w wyniku połączenia docisku i ciepła wywołanego tarcie, następuje wytworzenie jednorodnego połączenia. Na koniec po osiągnięciużądanego zagłębienia proces zostaje zatrzymany i narzędzie zostaje wycofane.

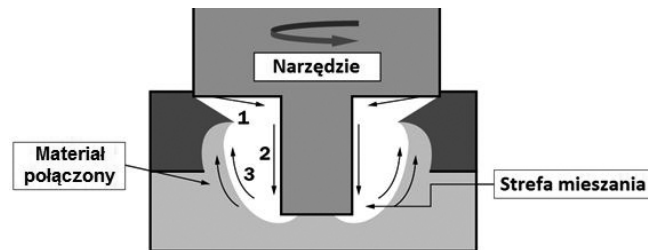


Rys. 1. Schemat procesu FSSW [4]

Fig. 1. The diagram of the FSSW process [4]

W trakcie procesu FSJ zgrzewany materiał przemieszcza się w różnych kierunkach (rys. 2). Za pomocą gwintowanego lub gładkiego trzpienia, materiał przemieszcza się pod powierzchnią przypory w stronę trzpienia (1), a następnie zmienia kierunek ruchu na spiralny w dół (2) gdzie następuje jego mieszanie. Gdy materiał osiągnie końca trzpienia jest on wypychany ku górze i na zewnątrz, a następnie wraca w kierunku trzpienia (3).

Przeływ materiału jest nieustająco powtarzany, tworząc strefę mieszania.



Rys. 2. Schemat przepływu materiału [4]

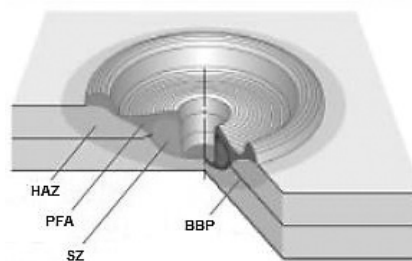
Fig. 2. The material flow diagram [4]

Metoda zgrzewania FSJ charakteryzuje się wieloma zaletami. Jest przyjazna środowisku, gdyż nie generuje zanieczyszczeń. Cykl pracy przy wykonaniu jednego złącza punktowego trwa nie więcej niż 2 sekundy. Proces ten wykazuje bardzo dobre właściwości mechaniczne zgrzeiny, a jej nośność może osiągać wartości wyższe od analogicznego połączenia zgrzewanego rezystancyjnie.

Jest to system, który daje wysoki potencjał do zastosowania dla materiałów wysokotopliwych.

Jego innowacyjność polega głównie na:

- zastosowaniu szybkoobrotowego wrzeciona,
- narzędzia zdolnego do pracy w wysokich temperaturach,
- geometrii narzędzia pozwalającej uzyskać połączenie zgrzewane dla stali (nie tylko dla aluminium),
- może występować jako stanowisko stacjonarne lub zrobotyzowane,
- system jest o 50% tańszy od analogicznego systemu do zgrzewania rezystancyjnego [2],
- system zapewnia mniejsze zużycie energii w stosunku do rezystancyjnego [2],
- nie występują tu szkodliwe opary, ekspulsje czy zjawisko bocznikowania.



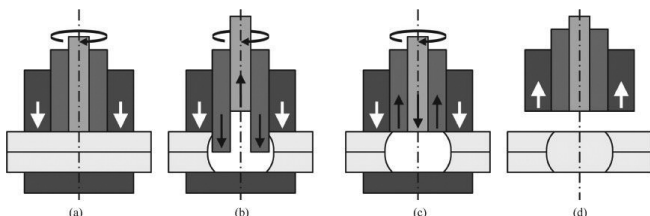
Rys. 3. Model złącza zgrzewanego FSSW (HAZ – strefa wpływu ciepła, PFA – strefa plastycznego płynięcia materiału, SZ – strefa odgraniczająca materiały łączone) [4]

Fig. 3. The model of FSJ welded joint (HAZ - heat affect zone, PFA - zone of plastic flow of the material, SZ - stir zone, BBP - boundary between plates) [4]

Jak podaje producent (firma Kawasaki) właściwości mechaniczne wykonanych złączy zgrzewanych przewyższają, pod kątem wytrzymałości na ścinanie połączenia przetłaczane (tzw. klincowane). Uzyskiwane wartości dla stopu A6061 o grubości 3 mm osiągają ponad 6 kN podczas gdy analogiczne złącze przetłaczane osiąga ok 4 kN [4].

RFSSW (Refill Friction Stir Spot Welding)

W zależności od materiałów łączonych zgrzewanie RFSSW [5],[6] najczęściej realizowane jest za pomocą czterech etapów. Na zewnątrz (rys. 4a) umieszczona jest tuleja dociskowa narzędzia. Stabilizuje ona narzędzie oraz dociska materiał łączony podczas, gdy trzpień oraz tuleja wewnętrzna są w ruchu obrotowym. Kolejnym etapem jest nadanie ruchu liniowego, trzpieniowi oraz tulei wewnętrznej, w przeciwnym do siebie kierunku. Tuleja wewnętrzna zagłębia się w materiale (rys. 4b). W wyniku tego wytwarzana jest energia ciepła tarcia, materiał zostaje uplastyczniony i wpływa do wnętrza wirującej tulei. Po zagłębieniu tulei na odpowiednią głębokość zostaje zmieniony kierunek ruchu posuwistego tulei i trzpienia na odwrotny. Tuleja jest wycofywana a trzpień wypycha zgromadzony w tulei materiał z powrotem do miejsca zgrzewania. Ostatecznie obydwa elementy, wyrównują swoje pozycje na powierzchni materiałów łączonych (rys. 4c). Powoduje to wypełnienie powstałego krateru przez materiał. W ostatnim etapie (rys. 4d) ruch obrotowy zostaje zatrzymany, a narzędzie wycofane z miejsca łączenia, pozostawiając płaską zgrzeinę bez utraty materiału.



Rys. 4. Przebieg procesu RFSSW [6]

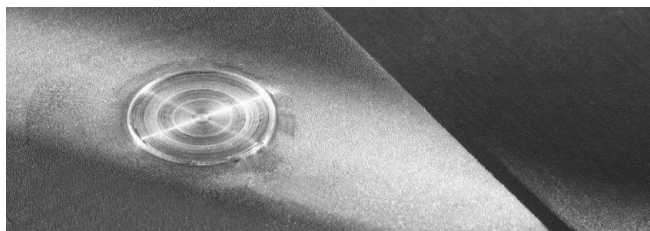
Fig. 4. The diagram of the RFSSW process [6]

Innowacyjność tej metody polega głównie na:

- zastosowaniu układu wirującej tulei i trzpienia, których przeciwbieżny ruch posuwisty pozwala wypełnić krater po procesie zgrzewania (rys. 5),
- system zapewnia mniejsze zużycie energii oraz relatywnie krótki czas przebiegu procesu w stosunku do rezy-stancyjnego,
- złącze charakteryzują się relatywnie wysokimi własnościami wytrzymałościowymi oraz zmęczeniowymi,
- nie występują tu szkodliwe opary, ekspulsje czy zjawisko bocznikowania,
- może występować jako stanowisko stacjonarne lub zrobotyzowane.

Przykłady złączy wykonanych metodą Refill FSSW

Do badań złączy zgrzewanych metodą Refill FSSW (Friction Stir Spot Welding) zastosowano stop aluminium w ga-



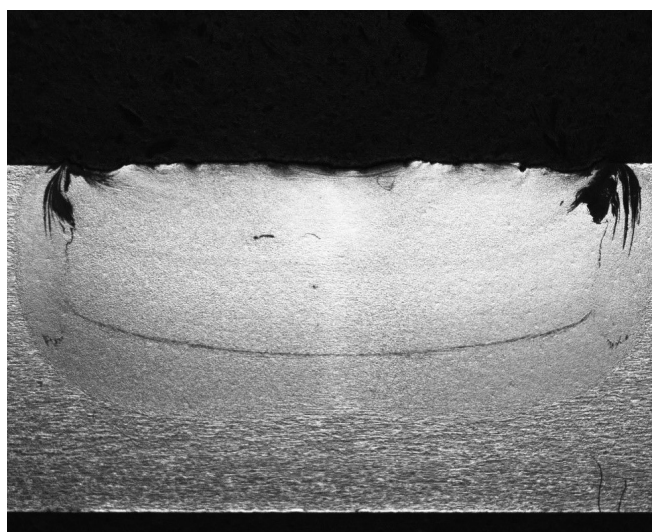
Rys. 5. Przykładowe złącze dwóch blach gatunku EN AW-1050A o grubości 3 mm, wykonane metodą zgrzewania tarcowego punktowego RFSSW

Fig. 5. Examples of RFSSW joint for EN AW-1050A alloy with a thickness of 3 mm



Rys. 6. Przykładowe złącze dwóch blach gatunku EN AW-1050A o grubości 3 mm, po badaniu wytrzymałości na ścinanie

Fig. 6. Examples of RFSSW joint for EN AW-1050A alloy with a thickness of 3 mm, after the shear test



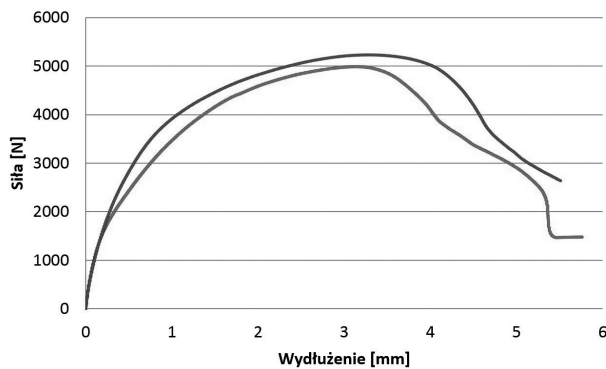
Rys. 7. Przykładowe złącze dwóch blach gatunku EN AW-1050A o grubości 3 mm, zgląd trawiony (HF, 10%)

Fig. 7. Examples of RFSSW joint for EN AW-1050A alloy with a thickness of 3 mm, metallographic section (etched with HF 10%)

tunku EN AW-1050A o grubości 3 mm. We wszystkich wykonanych złączach metodą refill FSSW średnica trzpienia wynosiła 6.4 mm a średnica tulei wynosiła 9 mm. Wykonano złącza zakładkowe, których przykład pokazano na rysunku 5.

Przedstawione złącze na rysunku 7 ma jednorodną budowę, nie występują niezgodności spawalnicze. Widoczne w strukturze makroskopowej zaczerwienione obszary nie stanowią nieciągłości materiału i pochodzą od procesu trawienia. Pojawiają się one w miejscach poddanych bardzo dużym odkształceniom plastycznym np. miejscach kontaktu narzędzia z materiałem. Podczas procesu tworzenia zgrzeiny następuje tu bardzo silne uplastycznienie materiału oraz pojawia się efekt plastycznego płynięcia tj. następuje silne przemieszczanie i mieszanie materiałów w obrębie działania narzędzia. Tarcie zamieniane jest na ciepło. Jest ono na tyle duże, że po zgniocie może nastąpić rekrytalizacja ziaren. W zgrzeinie zatem można wyróżnić strefę dynamicznej krystalizacji (ziarna są bardziej równomierne, drobniejsze). Po obu stronach występuje natomiast strefa silnie odkształcona (widoczna jako ciemniejsze obszary). Obszar ten jest jednorodny i nie wykazuje cech nieciągłości.

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono dla połączeń zakładkowych, każde z pojedynczą zgrzeiną. Prędkość odkształcania wynosiła 2 mm/min.



Wszystkie badane próbki zostały zniszczone w materiale rodzimym (np. rys. 5) co jest odpowiednim zachowaniem się dla prawidłowo wykonanego złącza. Otrzymane wartości wytrzymałości na ścianie przekraczają 5 kN (rys. 8) dla badanego materiału.

Rys. 8. Przykładowe krzywe rozciągania dla omawianych złączy zgrzewanych

Fig. 8. Example results of the shear test for RFSSW welded joints

Wnioski

W artykule przedstawiono dwie nowoczesne metody zgrzewania tarcowego punktowego. Zaprezentowane wyniki wskazują na innowacyjność oraz wysoki potencjał wdrożeniowy tych metod.

W przypadku metody Refill FSSW jej innowacyjność polega głównie na zastosowaniu narzędzia, które pozwala wypełnić krater po procesie zgrzewania. Pozwala to na uzyskanie relatywnie wysokich właściwości wytrzymałościowych złącza, w tym zmęczeniowych.

Dla metody FSJ producent wskazuje na możliwość łączenia materiałów wysokotopliwych np. stal (nie prezentuje jednak jednoznacznych danych eksperymentalnych). Przedstawione dane pokazują właściwości złączy ze stopów aluminium.

W obydwu przedstawionych metodach można zauważyć, iż procesy te są relatywnie przyjazne dla środowiska, nie generują one np. szkodliwych oparów, nie występują tu ekspulsje czy zjawisko bocznikowania. Obydwie metody mogą być stosunkowo łatwo zrobotyzowane lub występować jako stanowiska stacjonarne.

Wymienione cechy opisanych metod potwierdzają, iż mogą one być interesującą alternatywą dla klasycznych metod łączenia jak np. zgrzewane rezystancyjne, szczególnie dla materiałów lekkich jak stopy aluminium czy magnezu.

Literatura

- [1] A. Pietras, R. Bogucki, „Rozwój technologii zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału uplastycznionego w strefie zgrzeiny”, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe nr 1, Gliwice 2005.
- [2] A new method for light alloy joining Friction Spot Joining, Kawasaki Heavy Industries. <http://pdf.directindustry.com/pdf/kawasaki-robotics/fsj/18836-307065.html>, 10.11.2015.
- [3] J. F. Hinrichs, C. B. Smith, B. F. Orsini, R. J. DeGeorge, B. J. Smale, P. C. Ruhl, “Friction Stir Welding for the 21st Century Automotive Industry”, Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding, Metz (France), 2004.
- [4] F. Boiocchi, “Friction Stir Spot Welding Applied to TP AA6061-T4 sheet metals”, Metalworking World Magazine, <http://www.metalworkingworld-magazine.com>, 7.04.2016.
- [5] T. Montag, J. P. Wulfsberg, H. Hameister, R. Marchner, “Influence of Tool Wear on Quality Criteria for Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) Process”, New Production Technologies in Aerospace Industry - 5th Machining Innovations Conference, MIC, 2014.
- [6] L. C. Campanelli, U. F. H. Suhuddin, J. Fernandez dos Santos, N. Guedes de Alcântara, “Parameters optimization for friction spot welding of AZ31 magnesium alloy by Taguchi method”, Soldag. Insp. Vol. 17 no. 1, São Paulo, 2012.