



Nowe technologie łączenia tarcowego metali

DOROTA KOCAŃDA, ANDRZEJ GÓRKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy w znacznym skrócie przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat dynamicznie rozwijanych w ostatnich latach nowych technologii wykorzystujących proces łączenia tarcowego materiałów. Omówiono metody: FSP (*Friction Stir Processing*) i FSW (*Friction Stir Welding*). Skoncentrowano się na tych zastosowaniach omawianych metod, w których zaobserwowano znaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej i odporności korozyjnej konstrukcyjnych materiałów nośnych.

Słowa kluczowe: inżynieria powierzchni, spajanie materiałów, zgrzewanie tarcowe, metoda FSP i FSW

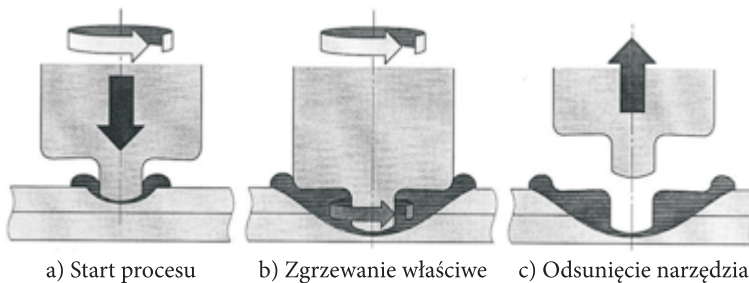
Symbole UKD: 621.79

1. Wprowadzenie

Technologie zgrzewania metali poprzez wytworzenie zgrzeiny (złącza) są powszechnie znanymi technikami łączenia i od dość dawna stosuje się je w różnych procesach wytwarzania. W publikacji skoncentrowano się na aktualnie dynamicznie rozwijanych nowych sposobach modyfikacji i zgrzewania tarcowego. W szerszym rozumieniu, dotyczy to metody modyfikacji struktur materiałów metodą FSP (ang. *Friction Stir Processing*) i standardowo rozumianego zgrzewania tarcowego wykorzystującego nowe narzędzia obróbcze FSW (*Friction Stir Welding*). Wyróżnione metody cechuje całkowicie odmienny od standardowych metod sposób aktywacji procesu spajania. Sposób ten zdeterminował korzystne jakościowo zmiany własności połączeń zgrzewanych. Własności te są bardzo obiecujące dla nowych wdrożeń technologicznych głównie z zakresu spajania różnych materiałów, modyfikacji warstw wierzchnich, jak i procesów wytwarzania metalicznych struktur wielowarstwowych. Metoda „tarcowej modyfikacji materiałów z mieszaniem” FSP jest oparta

na tych samych zasadach co metoda zgrzewania tarcowego FSW. Metoda FSW jest stosunkowo nową technologią, opracowaną w 1991 r. w The Welding Institute w Wielkiej Brytanii. Schemat tego procesu zobrazowano na rysunku 1. Polega on na mechanicznym mieszaniu łączonych materiałów z równoczesnym przemieszczaniem wzdłuż linii spajania obrotowego narzędzia z końcówką (trzcieniem). W wyniku wydzielanego ciepła tarcia uplastycznione materiały tworzą mechaniczno-plastyczne połączenie (rys. 1a). W tych warunkach dochodzi do pełnej, wzajemnej penetracji materiałów w stanie stałym w obszarze złącza bez osiągnięcia punktu topnienia materiałów (rys. 1b). Na skutek tarcia wywołanego przez ruch obrotowy trzcienia w strefie złącza wydziela się ciepło. Jest ono, wraz z adiabatycznie wydzielanym ciepłem odkształcania materiału, źródłem inicjacji procesu. Po wykonaniu złącza trzpień jest wyprowadzany ze strefy obróbki (rys. 1c). Kształt trzcienia może być modyfikowany i dostosowywany do wymagań planowanego procesu spajania.

Metoda FSP najczęściej wykorzystywana jest w celu wywołania kontrolowanego płynięcia materiału, w celu wytworzenia drobnoziarnistej struktury, losowego rozkładu granic ziaren w obszarze złącza, mechanicznego mieszania warstw wierzchnich różnych materiałów itp. Omawiane metody tarcowe spajania i powierzchniowej modyfikacji materiałów wykorzystywane są głównie w takich procesach technologicznych jak niskotemperaturowe zgrzewanie tarcowe różnych materiałów, formowanie materiałów nadplastycznych, modyfikacja powierzchniowych struktur odlewów, spoin, kształtowanie jednorodnych struktur warstw formowanych w innych procesach, w tym w metalurgii proszków, w procesach drążenia (na przykład kanałów przepływowych w wymiennikach ciepła) i kształtowania elementów w niskich temperaturach, a także tworzenia wielowarstwowych struktur metalicznych.



Rys. 1. Schemat procesu FSW [6]

Metoda FSW, która jest prekursorem technologii FSP, jest szczególnie przydatna do łączenia materiałów, które w rozumieniu tradycyjnych technologii są trudno spawalne, jak na przykład stale i wysoko wytrzymałe stopy aluminium, miedzi i tytanu, a także niektóre stopy niklu, cyrkonu i miedzi, itp. W tabeli 1 [1] dla ce-

łów porównawczych zestawiono względną wytrzymałość połączeń dla niektórych wybranych stopów aluminium w stanie dostawy i po procesie FSW. Niewielkie różnice wytrzymałościowe materiału rodzimego i po procesie FSW dowodzą wyjątkowej przydatności tej metody w produkcji przemysłu kosmicznego, lotniczego, samochodowego, zbrojeniowego, itp. Z opracowań literaturowych wynika, że jest to już standardowa technologia stosowana w tych gałęziach przemysłu.

TABELA 1

Względna wytrzymałość połączeń wykonanych metodą FSW dla wybranych stopów aluminium [1]

Stop	Materiał rodzimy R_m [MPa]	Złącze FSW R_{mz} [MPa]	Wytrzymałość względna połączenia R_m/R_{mz} [%]
2024-T351 (5 mm)	483-493	410-434	83-90
2024-T3 (4 mm)	478	425-441	89-90
2519-T87 (25,4 mm)	480	379	79
7050-T7451 (6,4 mm)	545-558	427-441	77-81
7075-T7351	472	455	96
7075-T651 (6,4 mm)	622	468	75

W konstrukcjach lotniczych technika FSW z powodzeniem może zastąpić proces nitowania blach poszycia kadłubów i skrzydeł samolotu. Dzięki tej technologii istotnie zmniejszyła się liczba potencjalnych źródeł rozwoju pęknięć zmęczeniowych w tego typu konstrukcjach. Firma Airbus przeprowadziła bardzo obszerne badania efektywności zastosowania tej nowej technologii spajania elementów konstrukcji lotniczych w aspekcie oceny statycznej i zmęczeniowej wytrzymałości takich połączeń, w tym inicjacji i rozwoju procesu pęknięcia, granicznych obciążeń i trwałości eksploatacyjnej wybranych elementów konstrukcji z punktu widzenia dopuszczalnego uszkodzenia typu zmęczeniowego [2]. Badania te wykazały znaczącą poprawę właściwości statycznych i zmęczeniowych połączeń elementów wykonanych techniką FSW w stosunku do tradycyjnego łączenia nitowego.

2. Technologie FSW i FSP w praktyce badawczej

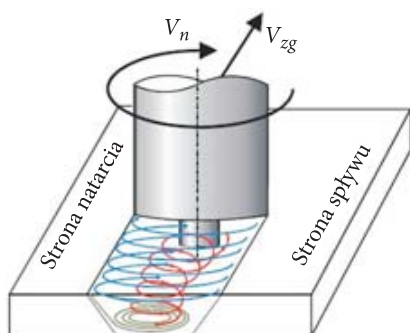
W Polsce pierwsze badania rozpoznawcze nad zastosowaniem FSW zrealizowano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach (IS) w 2003 r. w ramach zamawianego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji projektu badawczego Synaba *sn125050* [3]. W pracy przeprowadzono badania z wykorzystaniem następujących materiałów

i ich stopów: aluminium i jego stopów gatunku 1050 i 5255, stali węglowej 45, stali nierdzewnej X6CrNiTi10-10, miedzi oraz następujących skojarzeń tych materiałów: Al+Cu, Al+stop Al, Cu+Al. Podstawowe badania zrealizowano na zgrzewarce doczołowej na próbkach walcowych o średnicy 10 mm i przy zastosowaniu prędkości rotacyjnych wrzeciona zgrzewarki z zakresu 15-20 tys. obr/min. W badaniach zastosowano naciski trzpienia z zakresu 168-224 daN. Dla tych parametrów czas realizacji procesu zgrzewania nie przekroczył 2-3,5 sek.

Na podstawie tych badań sformułowano następujące podstawowe wnioski:

1. stal 45 i stal nierdzewna to materiały dobrze zgrzewające się zarówno w przypadku metody FSW jak i FSP;
2. wytrzymałość połączeń dla tych stali osiągnęła 87-88% wytrzymałości materiału rodzimego;
3. złącza wykonane ze stopów aluminium gatunku 1050 osiągnęły wytrzymałość rzędu 94%, a stopu 5251 około 83% wytrzymałości materiału rodzimego.

Częściowe wyniki tych badań zostały upowszechnione w materiałach reklamowych Instytutu Spawalnictwa [4], w materiałach szkoleniowych [5] oraz między innymi w publikacji [6]. Późniejsze prace nad technologiami wykorzystującymi metodę FSW w Instytucie Spawalnictwa koncentrowały się na technice zgrzewania liniowego głównie stopów aluminium [6]. Jak można się domyślać, wynikało to z założonych celów aplikacyjnych tych technologii. W publikacjach zachodnich również dużo uwagi poświęca się tej grupie stopów. Jest to zrozumiałe, gdy prześledzi się cele aplikacyjne tych prac i adresatów tych opracowań, którymi są: przemysł kosmiczny, lotniczy, samochodowy i zbrojeniowy. Badania w zakresie zgrzewania liniowego FSW w IS zrealizowano na stanowisku badawczym zbudowanym na bazie frezarki FYF32U2 (rys. 2) [6].



Rys. 2. Stanowisko w IS do realizacji zgrzewania wg metody FSW [6]. Oznaczenia: V_n — prędkość obrotowa; V_{zg} — prędkość liniowa

W przypadku zgrzewania elementów o grubości 6 i 10 mm, wykonanych ze stopów aluminium gatunku 6005, 6063 i 6092, jako narzędzie obróbcze wykorzystano trzpienie ze stali szybko tnącej wolframowo-molibdenowej gatunku SW7M. Trzpienie te wykonano zgodnie ze standardową konstrukcją trzpieni do FSW typu Triflute, w których wycięcia w trzpieniu roboczym wykonane są w celu zwielokrotnienia efektu przemieszania uplastycznionego materiału zgrzeiny. W miarę pełny opis różnych kształtów trzpieni roboczych opisano w publikacji [17].

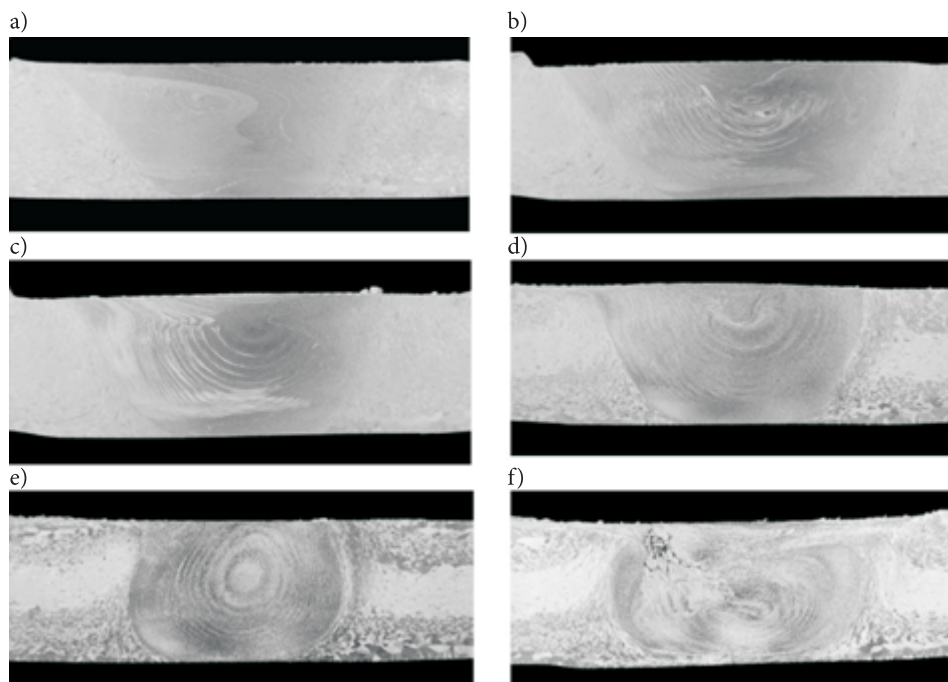


Rys. 3. Typowa konstrukcja trzpienia roboczego stosowanego w FSW [6]

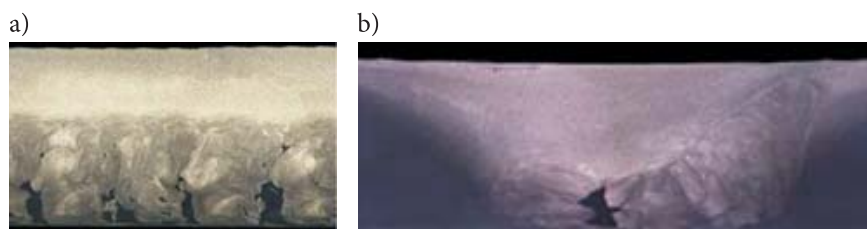
Ze względu na rodzaj układu napędowego frezarki, w badaniach stosowano prędkości rotacyjne trzpienia roboczego rzędu 560-1400 obr/min i liniowe prędkości przemieszczania głowicy z zakresu 224-800 mm/min. Odpowiednio skorelowane ze sobą prędkości zapewniały dobrą jakość badanych połączeń. Jakość tych połączeń kontrolowano w cyklu statycznego zginania na wałku o średnicy 25 mm w kącie 120° [3, 4]. Brak pęknięcia świadczył o dobrej jakości połączenia. Badania strukturalne zgrzein, w przypadku właściwie dobranych prędkości obróbki i dobrym spasowaniu łączonych elementów (minimalna szczelina), nie wykazywały większych anomalii strukturalnych typu wtrącenia, zawalcowania czy też pęknięcia deformacyjne [5]. Wady w strukturze zgrzein najczęściej obserwowano w tych próbach, w których niedokładnie spasowane były łączone elementy (zwiększone szczeliny pomiędzy łączonymi elementami). Na podstawie badań przeprowadzonych w IS w 2004 r. opracowano między innymi wytyczne do zgrzewania doczołowego prętów aluminiowych z miedziowymi na potrzeby technologii bimetalicznych złączy energetycznych [4]. Na podstawie opublikowanych wyników z prac [3-6] w zakresie realizacji procesu FSW można stwierdzić, że:

- a) w pewnym przedziale prędkości rotacyjnej i liniowej parametry procesu nie wpływają na cechy jakościowe zgrzein,

- b) w przypadku małej prędkości rotacyjnej narzędzia roboczego, proces uplastyczniania materiału silnie zależy od wielkości wieńca oporowego narzędzia roboczego,
- c) niedokładne spasowanie oraz słaby docisk łączonych elementów w trakcie procesu spajania prowadzi do tworzenia mikropęknięć, głównie po stronie grani, jak i na granicy strefy wpływu ciepła w zgrzeinie, a tym samym do znacznego obniżenia własności wytrzymałościowych połączenia,
- d) w zakresie jakości zgrzein ustalono, że:
- przy większych prędkościach rotacyjnych narzędzi roboczych tworzone zgrzeiny wykazują większą regularność o wyraźnie wyodrębnionym jądrze charakterystycznym dla prawidłowych połączeń FSW,
 - w przypadku większych prędkości liniowych głowicy roboczej w zgrzeinie pojawiają się wady obserwowane jako tzw. pustki strukturalne w strefie lica po stronie linii natarcia narzędzia, które znacznie obniżają wytrzymałość statyczną i dynamiczną złączy,
 - złącza wykonane metodą FSW wykazują lepszą wytrzymałość zmęczeniową niż złącza spawane łukowo.



Rys. 4. Przykładowe struktury zgrzein wykonanych w stopie 6063 przy prędkościach rotacyjnej (obr/min) i liniowej (mm/min) narzędzia roboczego odpowiednio: a) 560/180; b) 710/224; c) 900/280; d) 1120/355; e) 1400/450; f) 1400/710 [5]



Rys. 5. Wady zgrzein wykonanych przy niedokładnym spasowaniu łączonych elementów [5]. Opis: a) przekrój wzdłuż zgrzeiny; b) przekrój poprzeczny zgrzeiny

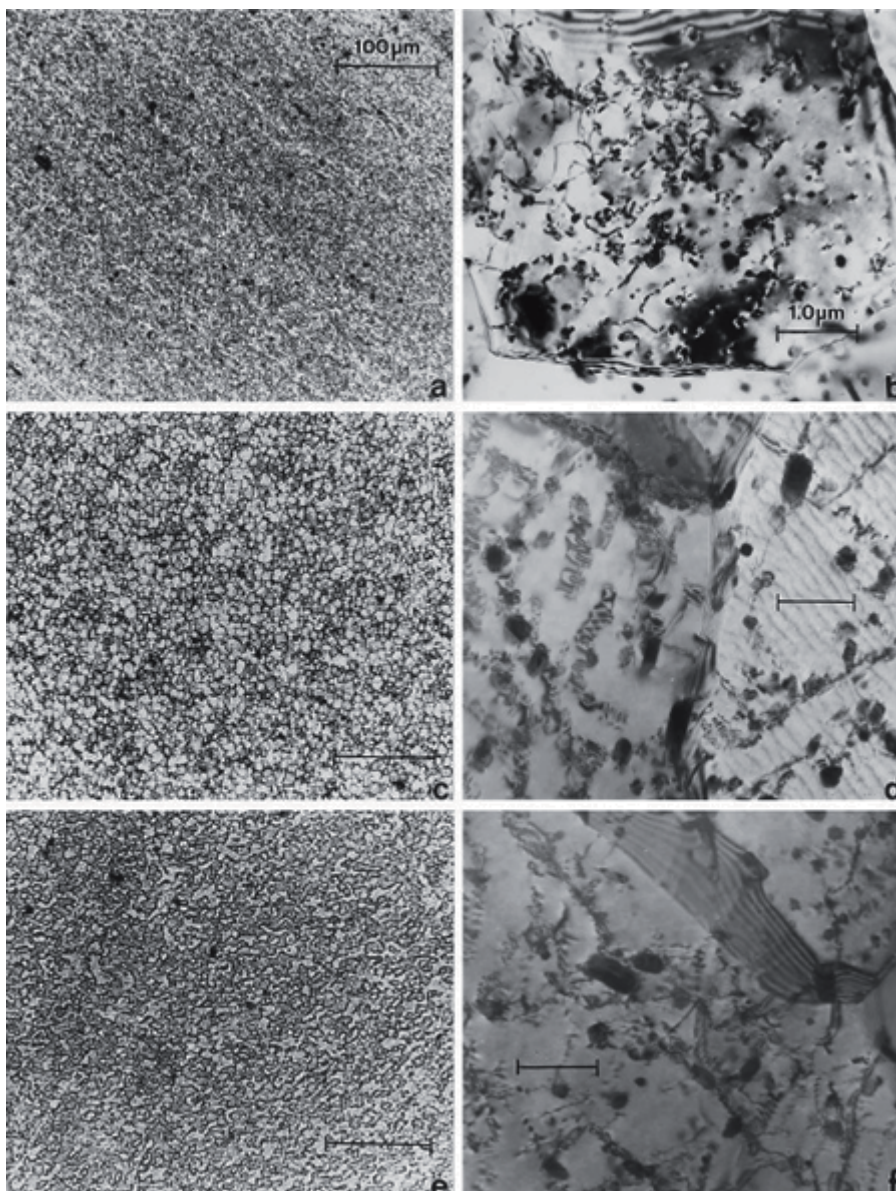
Zgrzewanie tarcowe FSW/FSP, dzięki odmiennemu charakterowi procesu w stosunku do standardowych technik tworzenia trwałych połączeń materiałów, umożliwiło w wielu konstrukcjach połączenie ze sobą między innymi takich materiałów jak: aluminium–miedź [8], aluminium–żeliwo [9], żeliwo–stal [10, 11], żeliwo–żeliwo [10, 11], żeliwa–stopy miedzi [12], materiały po różnych procesach obróbki [13], stopy magnezu [14], aluminium–stal [15], itp. Podstawową cechą tych metod jest realizacja procesu bez ujawniania stanu ciekłego łączonych materiałów w strefie połączenia, a tym samym bez inicjowania rekrytalizacji fazowej materiałów. W wielu przypadkach pozwoliło to zachować trwałość połączeń nieznacznie różniącą się od wytrzymałości najsłabszego łączonego materiału [1]. Dzięki tym cechom metody FSW i FSP uznawane są już dziś za technologie quasi-standardowe w przemyśle kosmicznym, lotniczym i zbrojeniowym.

W dalszej części niniejszego opracowania uwagę skoncentrowano na rozpoznaniu możliwości wykorzystania metod FSW i FSP w procesie tworzenia antykorozyjnych metalicznych powłok ochronnych. Wstępne wymagania względem takich pokryć można pogrupować w następujących punktach:

- odpowiednio wysoka odporność korozyjna, szczególnie na działanie wody morskiej,
- drobnoziarnistość struktury,
- minimalny stan naprężeń własnych zarówno w warstwie wierzchniej jak i w warstwie dyfuzyjnej podłoża,
- dyfuzyjne połączenie powłoki z podłożem,
- duża plastyczność złącza, a tym samym minimalny wpływ złącza na stan naprężeń łączonych materiałów.

Z publikacji [19, 20, 26, 27] można wnioskować, że w przypadku stopów aluminium rozdrobienie struktury w dużej mierze zależy od prędkości rotacyjnej narzędzia roboczego (rys. 6).

We wnioskach autorzy pracy [19] podkreślają, że rekrytalizacja struktury w stanie plastycznym, tj. w temperaturze procesu rzędu $0,6-0,8 T_m$ (T_m — temperatura topienia) zachodzi od 10 do 100 razy szybciej niż w przypadku procesów realizowanych w niskich temperaturach kucia. Dla przyjętego kształtu narzędzia

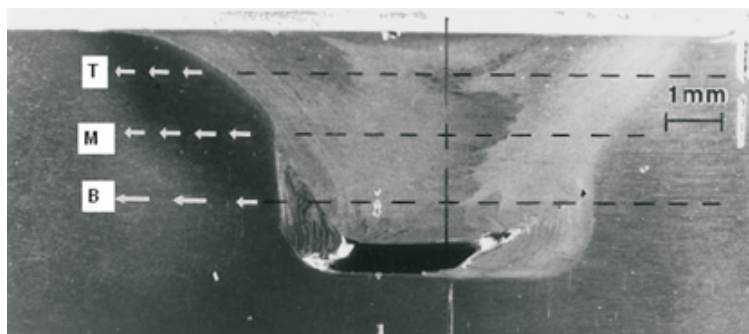


Rys. 6. Struktury stopu 2024 po obróbce FSW dla różnych prędkości rotacyjnych (V_r , [obr/min]) narzędzia roboczego (po lewej mikroskopia optyczna, po prawej TEM): a) i b) dla $V_r = 400$; c) i d) dla $V_r = 800$; e) i f) dla $V_r = 1200$ [19]

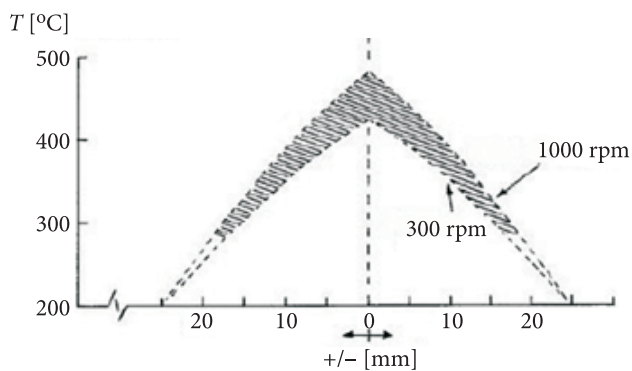
roboczego i gatunku łączonych materiałów, optymalnymi ze względu na drobnoziarnistość i mikrotwardość struktury w złączy okazały się prędkości rotacyjne z zakresu $V_r = (400-1200)$ obr/min. Pomiary mikrotwardości w złączy skorelowane

z charakterystycznym rozkładem temperatury inicjowanym w strukturze na różnych poziomach złącza przedstawiono na rysunku 7.

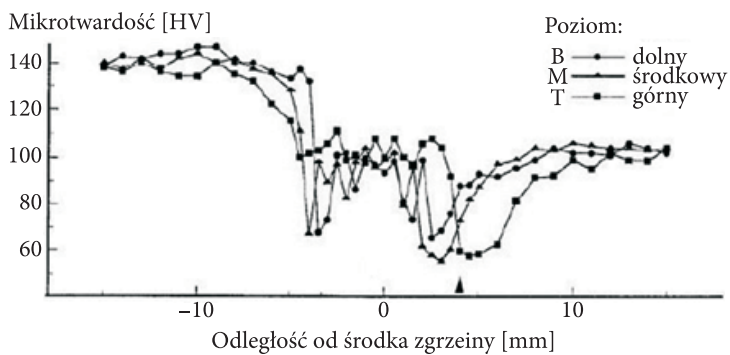
a)



b)

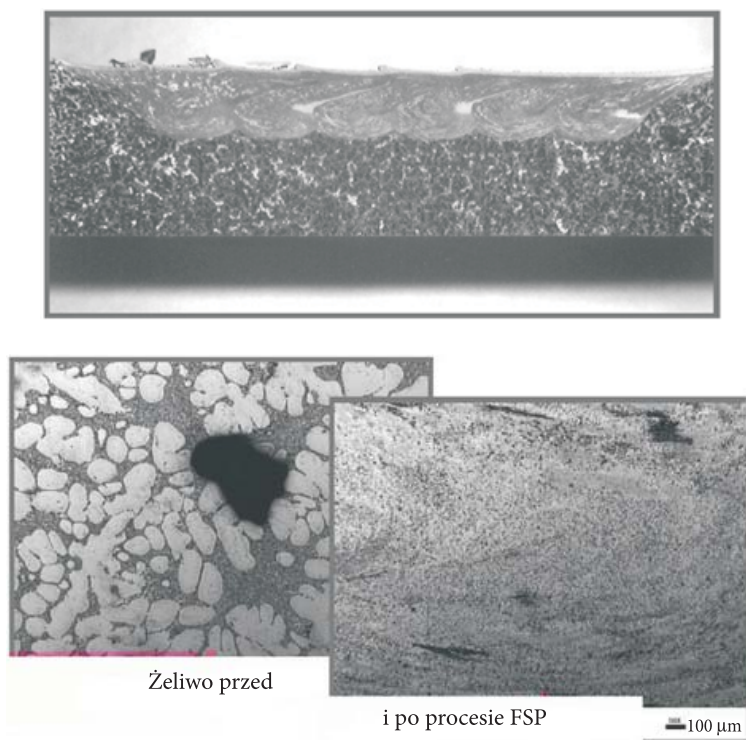


c)



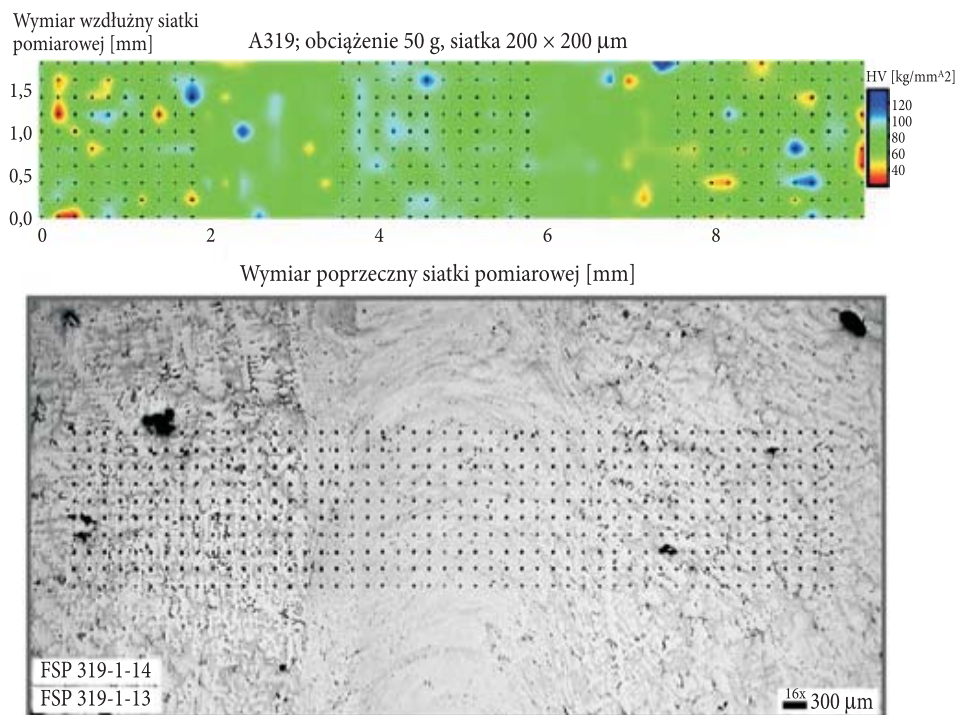
Rys. 7. Widok złącza FSW stopów 2024 i 6061 (a) z zaznaczonymi poziomami pomiaru rozkładów temperatury (b) i mikrotwardości złącza (c) [19]

Zależność rozdrobnienia struktury w złączu od prędkości rotacyjnej narzędzia obróbczego dla stopów aluminium potwierdzają również wyniki badań autorów pracy [26]. W badaniach tych wykazano ponadto, że wzrost prędkości rotacyjnej powyżej 1220 obr/min prowadzi do drastycznego rozrostu ziaren w strukturze złącza. Należy jednak pamiętać, że rozdrobnienie struktury zdeterminowane poprzez silne odkształcenie plastyczne, temperaturę uplastycznienia i czas realizacji procesu, w przypadku materiałów o drastycznie różniących się własnościami termoplastycznych, nie zawsze prowadzi do korzystnych zmian w strukturze złącza [23, 26]. Dlatego zawsze należy weryfikować projektowane skojarzenia pod tym kątem, szczególnie w tych przypadkach, w których dysponujemy określonym typem narzędzia jak i zdeterminowanymi możliwościami kontrolnymi procesu. Liczba publikacji podejmujących aplikacyjne aspekty metod FSW/FSP dowodzi, że metody te ze względu na prostotę konstrukcyjno-technologiczną znajdują liczne zastosowania nie tylko w łączeniu materiałów. Między innymi autorzy [22] podjęli problematykę modyfikacji warstw wierzchnich konkretnych elementów konstrukcyjnych wykonanych ze stopów gatunku A-319 i A-356. W wyniku zastosowania metody FSP w materiałach tych nastąpiło istotne rozdrobnienie struktury (rys. 8),



Rys. 8. Struktura warstwy po powierzchniowej obróbce FSP materiału odlanego i po procesie FSP [22]

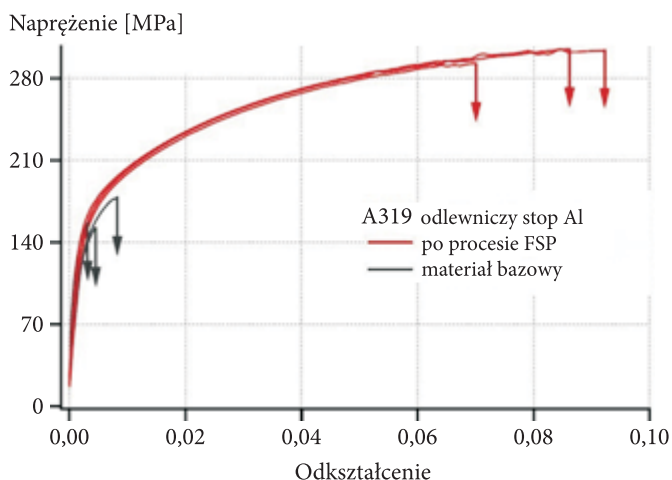
ale również ujednorodnienie stanu naprężeń (rys. 9). Skutkowało to w skali makro uplastycznieniem materiału, jak to obrazowo pokazano na rysunku 10. Stan ten jednoznacznie uwiarygodniają wykresy statycznej wytrzymałości na rozciąganie tych materiałów (rys. 11 i 12). Badania trwałości zmęczeniowej również wykazały istotną poprawę w stosunku do stanu wyjściowego tych materiałów.



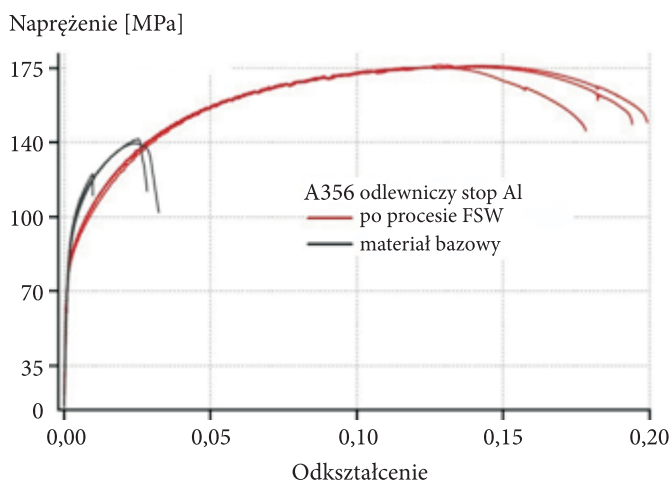
Rys. 9. Powierzchniowy rozkład twardości na powierzchni obrabianego materiału techniką FSP oraz jego praktyczna realizacja na tle obrabianej powierzchni stopu [22]



Rys. 10. Praktyczny efekt uplastycznienia materiału w strefie FSP [22]



Rys. 11. Wykres statycznej wytrzymałości na rozciąganie materiału bazowego — odlewniczego stopu aluminium A319 i zgrzeiny wykonanej metodą FSP [22]



Rys. 12. Wykres statycznej wytrzymałości na rozciąganie materiału bazowego A356 i zgrzeiny wykonanej metodą FSP [22]

W omawianej publikacji na szczególną uwagę zasługuje w pełni zautomatyzowane stanowisko do prowadzenia kompleksowych badań nad metodami FSW/FSP. Na stanowisku tym możliwe było łączenie elementów o grubościach od 1 do 40 mm przy kontrolowanych w trzech kierunkach obciążeniach narzędzia roboczego.

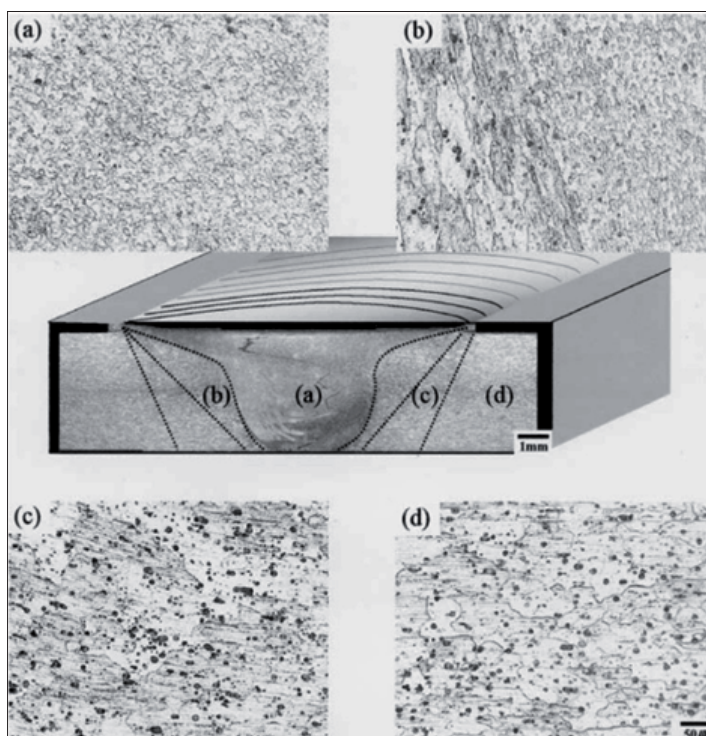
Na podstawie tych badań można stwierdzić, że obróbka FSW/FSP prowadzi do znacznego wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej na rozciąganie stopów odlewniczych A356 i A319. Inne publikacje potwierdzają te wnioski, szczególnie w stosunku

do stopów aluminium i tytanu [25]. Jest to cecha, która wyraźnie wyróżnia te metody w stosunku do standardowych metod spawalniczych, nie wyłączając techniki laserowej. Analogiczne badania przeprowadzone przez autorów [25] potwierdziły powyższe wnioski również w stosunku do stopów tytanu gatunku Ti-6Al-4V-xH. Do obróbki tego materiału zastosowali oni specjalnej konstrukcji głowicę obróbczą oraz wkładkę roboczą wykonaną ze stopu W-Re. Na szczególną uwagę zasługuje stop tytanu, który poddany został tej obróbce. Przed obróbką był on uwodorniony w procesie THP (*thermohydrogen processing*). Mimo tego faktu metoda FSW doskonale sprawdziła się w procesie zgrzewania tego typu materiału.

Z punktu widzenia badań aplikacyjnych obok omawianych cech wytrzymałościowych i zmęczeniowych istotne znaczenie posiada odporność korozyjna połączeń wykonanych metodami FSW/FSP. Badania takie na stopie aluminium gatunku Al6061-T651 przeprowadzili autorzy pracy [16]. W standardowych badaniach korozyjnych zastosowali 3,5% roztwór soli NaCl. Wyniki z pomiarów lokalnych potencjałów w funkcji czasu procesu odnosili do odporności na korozję wżerową wzorcowej elektrody pomiarowej Ag/AgCl. Badania te wykazały, że obróbka FSW stopu generalnie podnosi jego odporność na korozję wżerową, ponadto badania wytrzymałości na rozciąganie takiego materiału po cyklu badań korozyjnych nie wykazały niekorzystnych zmian. W przypadku materiału bazowego w tego typu badaniach mikropęknięcia pojawiały się zwykle w całej objętości próbki. Natomiast w przypadku materiału po obróbce FSW i w warunkach badań korozyjnych mikropęknięcia pojawiały się jedynie na pograniczu strefy dynamicznej rekrytalizacji DXZ (*dynamically recrystallized zone*) i strefy wpływu ciepła HAZ (*heat affected zone*), to jest na granicy międzyfazowej złącza po stronie współbieżnych wektorów prędkości rotacyjnej narzędzia i prędkości liniowej głowicy obróbczej (rys. 13). Na podstawie wyników badań wielu autorów można stwierdzić, że połączenia stopów aluminium wykonane metodą FSW są generalnie odporne na korozję wżerową pod jednym warunkiem, tj. zachowania dobrej jakości strefy połączenia.

Pod pojęciem dobrej jakości połączenia kryje się brak w strukturze złącza nieciągłości strukturalnych i fazowych oraz zawalcowań i wtrąceń. Tak więc w przyszłych badaniach aplikacyjnych w pierwszej kolejności należy zadbać o właściwą jakość połączenia, która bezpośrednio łączy się z geometrią trzpienia roboczego, parametrami prędkościowymi procesu, przenoszonymi momentami oporów i sterowalnością tych parametrów w całym cyklu procesu. Odrębne zagadnienie stanowi rodzaj łączonych materiałów jak i ich geometria.

Z punktu widzenia badań technologicznych interesującym zagadnieniem jest również problem cienkowarstwowych powłok ochronnych. Badania tego typu na potrzeby techniki jądrowej przeprowadzili autorzy publikacji [21, 28-31]. Generalnie dotyczą one zastosowania metody FSP w technologii powlekania powierzchniowego ochronną warstwą aluminium cienkich folii uranowo-molibdenowych (U-Mo). Autorzy [21] do realizacji zadania wykorzystali metodę FSP, na potrzeby której



Rys. 13. Typowy przekrój złącza FSW. Oznaczenia stref i odpowiadające im struktury złącza: a) DXZ (strefa dynamicznej rekrytalizacji); b) TMAZ (strefa termomechanicznej oddziaływania); c) HAZ (strefa wpływu ciepła); d) PM (materiał rodzimy) [16]

zaprojektowali nowy kształt narzędzia obróbczego, a ponadto opracowali cały proces tworzenia trójwarstwowej struktury o dyfuzyjnie związanych granicach warstw. Jest to zasadniczy, obok badań korozyjnych, wniosek z analizy prezentowanych prac. Należy przewidywać, że metody FSW/FSP mogą być interesujące w projektowaniu technologii tworzenia cienkowarstwowych struktur wielowarstwowych i różnych warstw antykorozyjnych tworzonych na konstrukcyjnych materiałach nośnych.

3. Podsumowanie

W pracy przytoczono wybrane przykłady wykorzystania metod FSP i FSW w nowo opracowywanych technologiach inżynierii powierzchni. Obok głównego zastosowania tych technik do tworzenia trwałych połączeń materiałów i wielowarstwowych struktur szczególnie interesujące jest rozwijanie technologii cienkich warstw antykorozyjnych o odpowiednio zmodyfikowanej strukturze

na konstrukcyjnych materiałach nośnych. Wyniki licznych prac publikowanych w czasopiśmiennictwie krajowym i zagranicznym potwierdzają perspektywiczność tych technologii w aspekcie prac prowadzonych nad nowymi metodami podwyższania wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na korozję różnych elementów konstrukcyjnych.

Badania zostały sfinansowane z dotacji MNiSW przyznanej na wykonanie projektu badawczego nr N N501 0097 33.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.02.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] R. S. MISHRA, *Friction Stir Processing Technologies*, Advanced Materials & Processes, October 2003.
- [2] H. J. SCHMIDT, B. SCHMIDT-BRANDECKER, *Advanced materials and manufacturing technologies for aircraft application*, 2nd Int. Conf. Material and component performance under variable amplitude loading, Darmstadt, Germany, 2009, 67-87.
- [3] *Studium i badania warunków łączenia materiałów różnoimiennych nowoczesnymi metodami zgrzewania tarcowego*, kier. pracy: L. Zadroga, Synaba II Sn 125050, termin realizacji: 15.01-15.12.2003 r.
- [4] *Materiały reklamowe Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, dr inż. Adam Pietras, tel.: (0-32) 335-82-38, e-mail: Adam.Pietras@is.gliwice.pl
- [5] *Wytyczne zgrzewania doczołowego prętów aluminiowych z miedzioymi*, Wytyczne nr: W-2000/IS-ZR7, publikacja internetowa z 2004 r., Materiały Szkoleniowe Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach.
- [6] A. PIETRAS, B. RAMS, A. WĘGŁOWSKA, *Zgrzewanie tarcowe metodą FSW stopów aluminium serii 6000*, Wyd. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 27, 1, 2007.
- [7] TSUNG-YU PAN, *Friction stir welding In Automotive applications — present and future*, materiały reklamowe firmy Ford Motor Company Research and Advanced Engineering, www.ford.com
- [8] Internetowe materiały Instytutu Spawalnictwa, *Zgrzewanie tarcowe liniowe blach aluminium–miedź*.
- [9] G. CISZEWSKI, *Własności wytrzymałościowe i plastyczne połączeń typu: żeliwo+stop miedzi (85,0% Cu) i żeliwo+aluminium otrzymanych z zastosowaniem zgrzewania tarcowego*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6, 2000.
- [10] G. CISZEWSKI, *Nowa koncepcja eksperymentalna otrzymywania połączeń typu: żeliwo+żeliwo i żeliwo+stal z zastosowaniem zgrzewania tarcowego oraz własności wytrzymałościowe i plastyczne tych połączeń*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2, 1999.
- [11] G. CISZEWSKI, *New experimental concept for the fabrication of cast iron to cast iron and cast iron to steel joints by means of friction welding and the mechanical and plastic properties of these joint*, Welding and Cutting 6, 5, 2007, 288-297.
- [12] G. CISZEWSKI, *New experimental concept of the fabrication of the cast iron to (85% Cu) copper alloy and cast iron to aluminum joints by friction welding and the mechanical and plastic properties of these joints*, Welding and Cutting 7, 2, 2008, 104-110.

- [13] I. KALEMBA, S. DYMEK, M. Blicharski, *Mikrostrukturalne aspekty zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny na przykładzie stopów aluminium*, Hutnik — Wiadomości Hutnicze, 4, 2009, 275-283.
- [14] S. LIM, S. KIM, C. LEE, C. D. YIM, S. J. KIM, *Tensile Behavior of Friction-Stir-Welded AZ31-H24 Mg Alloy*, Communications Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 36A, June 2005, 1609-1612.
- [15] K. KIMPONG, T. WATANABE, *Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel*, Welding Journal, October 2004, 277-282.
- [16] S. LIM, S. KIM, C. LEE, C. D. YIM, S. J. KIM, *Stress Corrosion Cracking Behavior of Friction-Stir-Welded Al. 6061-T651*, Communications Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 36A, June 2005, 1977-1980.
- [17] D. G. HATTINGH, C. BLIGNAULT, T. I. VAN NIEKERK, M. N. JAMES, *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, 2008, 46-57.
- [18] K. MROCZKA, J. DUTKIEWICZ, L. LITYŃSKA-DOBRYŃSKA, A. PIETRAS, *Microstructure and properties of FSW joint of 2017A/6013 aluminum alloys sheets*, Archives of Materials Science and Engineering, vol. 33, Issue 2, October 2008, 93-96.
- [19] Y. LI, L. E. MURR, J. C. MCCLURE, *Flow visualization and residua microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum*, Elsevier Materials Science and Engineering A271, 1999, 213-223.
- [20] Y. LI, L. E. MURR, J. C. MCCLURE, *Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 Al to 6061 Al*, Scripta Materialia, 40, 9, 1999, 1041-1046.
- [21] C. R. CLARK, N. P. HALLINAN, J. F. JUE, D. D. KEISER, J. M. WIGHT, *Monolithic Fuel Fabrication Process Development*, INL/CON-06-01370 Preprint, May 2006.
- [22] M. SANTELLA, D. STORJOHANN, T. ENGSTROM, T. PAN, *Friction stir of cast aluminum alloys*, Oak National Laboratory, Iowa City, October 7, 2003, presentation Ford.
- [23] Y. CHEN, H. LIU, J. FENG, *Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminum alloy plates*, Elsevier Materials Science Engineering A 420, 2006, 21-25.
- [24] G. OERTELT, S. S. BABU, S. A. DAVID, E. A. KENIK, *Effect of thermal cycling on friction stir welds of 2195 aluminum alloy*, Welding Research Supplement, 2001, 71-79.
- [25] H. J. LIU, L. ZHOU, P. LIU, H. FUJII, *Friction stir welding of thermohydrogen processed titanium Alloy*, 7-th International Symposium on Friction Stir Welding, Awaji Island, Japan, 20-22 May 2008, PA-01.
- [26] Y. S. SATO, M. URATA, H. KOKAWA, *Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable*, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 33A, March 2002, 625-635.
- [27] Y. S. SATO, H. KOKAWA, K. IKEDA, M. ENOMOTO, S. JOGAN, T. HASHIMOTO, *Microtexture in the Friction-Stir Weld of an Aluminum Alloy*, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 32A, April 2001, 941-948.
- [28] D. BURKES, P. MEDVEDEV, M. CHAPPLE, A. AMRITKAR, P. WELLS, I. CHARIT, *The Role of Friction Stir Welding in Nuclear Fuel Plate Fabrication*, INL/CON-09-15391 Preprint, February 2009.
- [29] C. R. CLARK, M. K. MEYER, S. L. HAYES, G. L. HOFMAN, J. L. SNELGROVE, *RERTR fuel development at ARGONNE NATIONAL LABORATORY*, Internet presentation Argonne National Laboratory, Operated by The University of Chicago.

-
- [30] C. R. CLARK, S. L. HAYES, D. M. WACHS, M. K. MEYER, T. C. WIENCEK, G. L. HOFMAN, M. R. FINLAY, *Irradiation Testing of Monolithic Fuel at Argonne National Laboratory*, Internet presentation Argonne National Laboratory, Operated by The University of Chicago.
- [31] C. R. CLARK, J. M. WIGHT, G. C. KNIGHTON, G. A. MOORE, J. F. JUE, *Update on monolithic fuel fabrication development*, 27-th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors.

D. KOCAŃDA, A. GÓRKA

New technologies basing on friction stir welding of metals

Abstract. The state-of-the art in the field of new manufacturing technologies developed in the last years, which are based on friction stir welding/processing of materials (FSP and FSW), is the subject of the paper. The main attention was focused on the application of these techniques in surface engineering which lead to materials and products with higher performance, higher fatigue strength, and corrosion toughness.

Keywords: surface engineering, joining of materials, friction stir welding, FSW and FSP techniques

Universal Decimal Classification: 621.79

