

Marek Stanisław Węglowski

**TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE PODSTAWY PROCESU  
TARCIOWEJ MODYFIKACJI WARSTW WIERZCHNICH (FSP)**

MONOGRAFIE nr 19



**Łukasiewicz**

Górnośląski Instytut Technologiczny

## **RECENZENCI**

Prof. dr hab. inż. Stanisław DYMEK

Prof. dr hab. inż. Zbigniew MIRSKI

## **RADA NAUKOWA SERII MONOGRAFIE**

Prof. dr hab. inż. Rafał DAŃKO

Prof. dr hab. inż. Zbigniew GRONOSTAJSKI

Dr hab. inż. Paweł PICHNIARCZYK, prof. AGH

Prof. dr hab. Maria SOZAŃSKA

Dr hab. inż. Joanna WOJEWODA-BUDKA, prof. PAN

**ISBN: 978-83-958775-8-2**

Wydawca: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny  
ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

## **ZESPÓŁ REDAKCYJNY**

redaktor naczelny – prof. dr hab. inż. Adam ZIELIŃSKI

zastępcy redaktora naczelnego – dr hab. inż. Jarosław MARCISZ,  
prof. dr hab. Józef PADUCH

redaktorzy tematyczni – dr hab. inż. Marian NIESLER, dr hab. inż. Zygmunt MIKNO,  
dr hab. inż. Krzysztof RADWAŃSKI, prof. dr hab. inż. Jacek SŁANIA,  
dr hab. inż. Dariusz WOŹNIAK

redaktorzy techniczni – mgr Marek DRAGAN, mgr inż. Danuta GRUSZCZYŃSKA,  
mgr Joanna GUBERNAT

## Spis treści

Wybrane oznaczenia i skróty .....	5
1. WSTĘP .....	8
2. POJĘCIA PODSTAWOWE W TECHNOLOGIACH WYTWARZANIA WARSTW WIERZCHNICH.....	12
2.1. Powierzchnia, warstwa wierzchnia i powłoka.....	12
2.2. Metody wytwarzania warstw wierzchnich .....	13
2.3. Technologie wykorzystujące zjawiska tarcia.....	14
3. PROCES TARCIOWEJ MODYFIKACJI FSP .....	18
4. MASZYNY, URZĄDZENIA I OPRZYRZĄDOWANIE STOSOWANE W PROCESIE MODYFIKACJI FSP.....	25
4.1. Frezarki manualne i CNC .....	26
4.2. Zgrzewarki FSW .....	29
4.3. Stanowiska zrobotyzowane .....	30
4.4. Systemy pomiarowe .....	34
4.5. Oprzyrządowanie .....	39
5. NARZĘDZIA ROBOCZE W PROCESIE FSP.....	42
5.1. Rodzaje narzędzi .....	44
5.2. Materiały na narzędzia.....	48
6. SIŁY I MOMENT OBROTOWY W PROCESIE MODYFIKACJI FSP .....	52
7. MODELOWANIE PROCESU MODYFIKACJI FSP.....	59
7.1. Modelowanie analityczne .....	59
7.2. Modelowanie numeryczne procesu modyfikacji FSP .....	71
8. MODYFIKACJA FSP MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH	76
8.1. Uzyskanie efektu nadplastyczności .....	76
8.2. Zwiększenie zdolności do odkształceń plastycznych.....	78
8.3. Modyfikacja stopów odlewniczych .....	78

8.4. Tarciowa modyfikacja FSP z dodatkowym chłodzeniem lub nagrzewaniem. ....	84
8.5. Tarciowa modyfikacja wspomagana drganiami ultradźwiękowymi .....	88
9. TARCIOWE STOPOWANIE .....	92
10. MODYFIKACJA FSP ZŁĄCZY SPAWANYCH .....	98
11. CEL I ZAKRES PRACY .....	103
12. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH .....	104
13. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH POMIAROWYCH .	115
13.1. Ocena stabilności procesu modyfikacji FSP .....	115
13.2. Pomiar sił i momentu .....	126
13.3. Pomiar temperatury – głowica TempSTIR .....	133
13.4. Pomiar temperatury – kamera termowizyjna .....	137
13.5. Analiza kształtu obszaru po modyfikacji .....	142
13.6. Naprężenia pozostające w materiale po procesie modyfikacji ..	148
14. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH POMIAROWYCH .....	151
15. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU MODYFIKACJI FSP .....	181
16. ANALIZA MIKROSTRUKTURY, TEKSTURY I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH .....	220
16.1. Mikrostruktura .....	220
16.2. Tekstura .....	241
16.3. Właściwości mechaniczne .....	252
17. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ WŁASNYCH .....	261
19. WNIOSKI .....	271
LITERATURA .....	274
ZAŁĄCZNIK NR 1 .....	312
ZAŁĄCZNIK NR 2 .....	322
STRESZCZENIE .....	331
SUMMARY .....	333



## 1. WSTĘP

Wzrost wymagań dotyczących właściwości eksploatacyjnych gotowych elementów przy jednoczesnym zmniejszeniu masy konstrukcji skłania do prowadzenia badań w zakresie inżynierii materiałowej dotyczącej wytwarzania warstw wierzchnich o wymaganych właściwościach użytkowych oraz jakości. Konieczność naprawy elementów sprzyja również poszukiwaniu nowych rozwiązań technologicznych. Metody wytwarzania warstw wierzchnich w zależności od rodzaju przebiegających zjawisk można podzielić na sześć grup: mechaniczne, cieplno-mechaniczne, cieplne, cieplno-chemiczne, chemiczne i elektrochemiczne oraz fizyczne, z których każda pozwala na uzyskanie odpowiedniego rodzaju warstwy wierzchniej o zróżnicowanej grubości i przeznaczeniu [1].

Stosunkowo mało znaną w Polsce jest technologia tarciowej modyfikacji warstw wierzchnich z mieszaniem materiału (ang. *Friction Stir Processing* – FSP), którą można zaliczyć do mechanicznych metod wytwarzania warstw wierzchnich. Technologia tarciowej modyfikacji warstw wierzchnich z mieszaniem materiału jest, co do zasady, podobna do technologii zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału w stanie stałym (ang. *Friction Stir Welding* – FSW) [2]. Jednak, zamiast łączyć zgrzewane elementy, proces FSP umożliwia miejscową modyfikację mikrostruktury powierzchni obrabianego elementu w celu uzyskania pożądanych właściwości powierzchni. Technologia FSP jest uniwersalną metodą, którą można zastosować przy wytwarzaniu nowych elementów, modyfikowaniu powierzchni elementów lub produkcji materiałów o specjalnych właściwościach (materiałów gradientowych i kompozytowych).

Podobnie jak w przypadku technologii FSW, obracające narzędzie robocze powoduje ruch uplastycznionego materiału i w zależności od warunków technologicznych procesu, umożliwia modyfikację mikrostruktury materiału poniżej jego temperatury topnienia. Technologia FSP została po raz pierwszy zastosowana przez Mishrę [3] w 2000 r. Biorąc pod uwagę fakt, iż ochrona patentowa została ograniczona [4], ma ona duże perspektywy zastosowania w warunkach przemysłowych. Do chwili obecnej technologia FSP jest głównie rozwijana w Stanach Zjednoczonych.

Technologia modyfikacji warstw wierzchnich poprzez tarcie z mieszaniem materiału umożliwia m.in.: wzrost odporności na korozję [5], poprawę właściwości mechanicznych [6], rozdrobnienie mikrostruktury [7], wytwarzanie materiałów wykazujących efekt nadplastyczności [8], ograniczenie porowatości w stopach odlewniczych [9], wytwarzanie stopów specjalnych [10], obróbkę złączy spawanych i napoin [11, 12] oraz naprawę uszkodzonych odlewów [13].

Technologia FSP jest stosowana m.in. do modyfikacji odlewniczych stopów aluminium [9] i magnezu [14–16], stopów aluminium przerabianych plastycznie [7, 17], stopów miedzi [18, 19], stopów niklu [20, 21], stopów tytanu [22, 23], stali [6, 24, 25], żeliwa [26, 27] oraz tworzyw sztucznych [28, 29].

Technologia modyfikacji warstw wierzchnich poprzez tarcie z mieszaniami materiału zazwyczaj jest prowadzona bez użycia materiału dodatkowego. Jednak w przypadku, gdy celem modyfikacji jest wytworzenie materiału kompozytowego można w trakcie procesu wprowadzać materiał dodatkowy w postaci proszku, drutu lub taśmy. Występuje wówczas proces modyfikacji warstw wierzchnich z materiałem dodatkowym poprzez tarcie z mieszaniami materiału tj. tarciove stopowanie (ang. *Friction Stir Alloying* – FSA) [30–37]. Zastosowanie technologii FSA pozwala m.in. na: zwiększenie odporności na zużycie w warunkach tarcia [30, 31], wzrost twardości warstwy modyfikowanej [32, 33], zwiększenie wytrzymałości [34, 35], zwiększenie trwałości zmęczeniowej [36, 37]. Technologia FSA umożliwia modyfikację powierzchni stopów aluminium [30, 33, 38], magnezu [32, 36], miedzi [31, 37], tytanu [35, 39] i stali [40, 41]. Najczęściej materiał dodatkowy wprowadzany jest do obszaru oddziaływania narzędzia roboczego poprzez wypełnienie wybrań w modyfikowanej powierzchni w postaci otworów lub rowków technologicznych. Materiał dodatkowy może być również w postaci nakładki lub warstwy natryskiwanej na powierzchnię modyfikowaną.

Technologia modyfikacji warstw wierzchnich poprzez tarcie z mieszaniami materiału może być również wspomagana drganiami wywołanymi falą ultradźwiękową (ang. *Ultrasonic Assisted Friction Stir Processing* – UaFSP) [28, 42]. Zastosowanie dodatkowych drgań umożliwia zmniejszenie sił działających na narzędzie, podwyższenie właściwości wytrzymałościowych obszarów zmodyfikowanych oraz dalsze rozdrobnienie mikrostruktury.

Rozdrobnienie mikrostruktury może być również wspomagane poprzez zastosowanie dodatkowego chłodzenia w trakcie procesu FSP [43, 44]. Chłodzenie obszaru modyfikowanego może być osiągnięte poprzez nadmuch gazu osłonowego, w tym sprężonego powietrza [44, 45] lub poprzez zastosowanie cieczy chłodzącej (ang. *Submerged Friction Stir Processing*), najczęściej wody [46, 47] lub ciekłego azotu [48, 49]. Dodatkowe chłodzenie może być również realizowane poprzez zastosowanie płyty chłodzącej ze stali [50, 51] lub ze stopu miedzi [52, 53]. Metody chłodzenia można również łączyć ze sobą, np. zastosowanie płyty miedzianej chłodzonej wodą lub powietrzem [54] lub stalowej podkładki z chłodzeniem ciekłym azotem [49].

W przypadku modyfikowania materiałów o wyższej temperaturze topnienia, takich jak stal, stopy niklu lub tytanu konieczne jest zastosowanie systemu podgrzewania. W tym celu można zastosować nagrzewanie indukcyjne [56], wiązkę laserową [57] lub system oporowy [58]. Zastosowanie dodatkowych systemów podgrzewania umożliwia przede wszystkim zmniejszenie sił działających na narzędzie i jednoczesne zwiększenie ich trwałości.

W niniejszej monografii autor przedstawił wyniki swoich badań dotyczących technologii FSP na przykładzie odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg. Praca składa się z dwóch części. Część pierwsza zawiera przegląd literatury dotyczący technologii tarciowej modyfikacji powierzchni. Rozdział 2 stanowi



wprowadzenie, w którym przybliżono pojęcia powierzchni, warstwy i powłoki oraz metod wytwarzania warstw wierzchnich. W rozdziale 3 zamieszczono ideę samej metody FSP, parametry technologiczne i przybliżono budowę obszaru modyfikowanego tarciovo. Stosowane urządzenia, oprzyrządowanie oraz systemy pomiarowe przedstawiono w rozdziale 4. Rozdział 5 zawiera informacje o narzędziach stosowanych do modyfikacji, w tym stosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz materiałowe. Wpływ warunków technologicznych procesu na siły i moment działający na narzędzia przedstawiono w rozdziale 6. Wyniki modelowania procesu modyfikacji FSP przybliżono w rozdziale 7. Rozdział 8 zawiera wyniki badań dotyczące modyfikacji materiałów konstrukcyjnych, a w rozdziale 9 przedstawiono wyniki badań procesu modyfikacji FSP z materiałem dodatkowym. Część pierwsza pracy zakończona jest rozdziałem 10, dotyczącym procesu modyfikacji FSP złączy spawanych.

Część druga pracy zawiera wyniki badań własnych dotyczących tarciowej modyfikacji odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg. Przybliżono opracowaną metodykę badawczą oraz dobrano parametry technologiczne procesu FSP. Zidentyfikowano niezgodności, jakie mogą występować w warstwie modyfikowanej tarciovo. Pomiarów sił i momentu działające na narzędzie robocze oraz temperatura narzędzia były realizowane za pomocą głowic pomiarowych. Badania zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesu a momentem obrotowym i temperaturą umożliwiły wyjaśnienie zjawisk zachodzących w trakcie tarciowej modyfikacji oraz stanowiły dane wejściowe przy opracowaniu zespolonego modelu numerycznego procesu FSP. Przyjęte założenia i model numeryczny poddano weryfikacji doświadczalnej. Do weryfikacji zastosowano wyniki pomiarów temperatury narzędzia oraz wyniki pomiaru naprężeń pozostających metodą trepanacyjną. Ponadto model numeryczny umożliwił wyznaczenie temperatury w obszarze oddziaływania narzędzia roboczego oraz prędkość i trajektorię ruchu uplastycznionego materiału wokół narzędzia roboczego. Zastosowanie modelu umożliwiło również obliczenie temperatury po stronach sływu i natarcia w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych procesu. Przedstawiono również wyniki wieloskalowej analizy mikrostrukturalnej materiału zmodyfikowanego w porównaniu do materiału w stanie dostawy przy użyciu mikroskopii świetlnej, SEM i TEM oraz omówiono wyniki badań tekstury przy użyciu metod rentgenowskiej i dyfraktometrii neutronowej.

Wyniki badań przedstawionych w niniejszej pracy zostały uzyskane w ramach działalności statutowej Instytutu Spawalnictwa (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny (Łukasiewicz – GIT) Centrum Spawalnictwa) finansowanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki (wcześniej Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego) [59–61]. Ponadto badania były realizowane w ramach projektów finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki [62], Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [63] oraz dwustronnej współpracy międzynarodowej pomiędzy Instytutem i Miami Uni-

versity (College of Engineering & Computing, Department of Mechanical & Manufacturing Engineering) [64] i krajowej (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej oraz Wydział Metali Nieżelaznych).

Autor składa podziękowania Dyrekcji Instytutu Spawalnictwa (obecnie Łukasiewicz – GIT) za możliwość przeprowadzenia badań, udostępnienie laboratorium oraz materiałów do badań. Szczególne podziękowania Autora skierowane są do pracowników Instytutu oraz Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, którzy aktywnie wspierali merytoryczne prowadzenie badań technologicznych oraz zakres mikroskopii skaningowej, transmisyjnej i badania tekstury. Wyrazy podziękowania należą się również prof. Carterowi Hamiltonowi z Miami University w Stanach Zjednoczonych za pomoc w przygotowaniu modeli numerycznych.



## 18. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i pomiary pozwoliły na zrealizowanie postawionych celów badawczych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań tarciowej modyfikacji powierzchni odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg sformułowano wnioski o charakterze naukowym, użytecznym oraz kierunku przyszłych badań.

### Wnioski o charakterze naukowym

1. Tarciowa modyfikacja metodą FSP warstwy wierzchniej badanego stopu aluminium prowadzi, w wyniku zaistniałych efektów zjawisk fizykochemicznych, do wyraźnych zmian obrabianego materiału.
2. Ze wzrostem prędkości obrotowej następuje zmniejszenie oporu tarcia, którego miarą jest współczynnik tarcia. W konsekwencji powoduje to obniżenie wartości naprężeń ścinających i spadek wartości momentu obrotowego. Wzrost prędkości obrotowej narzędzia, przy stałej prędkości przesuwu, powoduje wzrost temperatury narzędzia oraz spadek momentu obrotowego.
3. Ze wzrostem prędkości przesuwu objętość materiału odkształcanego przy każdym obrocie narzędzia wzrasta. Ciepło wytwarzane jest w większej objętości, co z kolei prowadzi do obniżenia temperatury materiału modyfikowanego. Niższa temperatura materiału modyfikowanego sprawia, że jego wytrzymałość rośnie podobnie jak współczynnik tarcia. W wyniku tego siła potrzebna do ścięcia subwarstwy materiału w modyfikowanym obszarze także wzrasta, a wartość momentu obrotowego rośnie. Wzrost prędkości przesuwu, przy stałej prędkości obrotowej narzędzia, powoduje spadek temperatury i wzrost momentu obrotowego.
4. Wzrost siły docisku, przy stałej prędkości obrotowej, powoduje wzrost momentu obrotowego do wartości ok. 192 Nm. Zgodnie z prawem Amontonsa-Coulomba rośnie wtedy siła tarcia, co powoduje wzrost momentu przy stałym ramieniu na jakim działa siła tarcia.
5. Wzrost prędkości obrotowej narzędzia, przy stałej prędkości przesuwu, powoduje wzrost naprężeń pozostających w materiale po modyfikacji FSP do wartości ok. 138 MPa. Rośnie wtedy udział obszaru RSM w strefie odkształcenia termomechanicznego, podobnie jak temperatura materiału przemieszczanego wokół trzpienia.
6. Modyfikacja FSP przy użyciu narzędzia typu Triflute (nr 4) powoduje powstawanie większych naprężeń pozostających (138 MPa) w materiale w porównaniu z narzędziem konwencjonalnym (119 MPa). Mniejsze naprężenia przy użyciu narzędzia konwencjonalnego (nr 3) są związane z mniej intensywnym mieszaniem materiału.

7. Proces FSP umożliwia znaczące rozdrobnienie mikrostruktury materiału zmodyfikowanego tarciovo w porównaniu z materiałem w stanie dostawy. W materiale bezpośrednio po odlewaniu zaobserwowano ziarna wielkości ok. 500  $\mu\text{m}$ , natomiast po modyfikacji średnia wielkość ziarna wynosiła ok. 4  $\mu\text{m}$ .
8. Stwierdzono wyraźną niejednorodność tekstury obu faz  $\alpha\text{-Al}$  i Si zarówno na grubości, jak i na szerokości modyfikowanej warstwy. Tekstura osnowy wynika ze sposobu płynięcia plastycznego i rekrytalizacji modyfikowanego materiału. Natomiast steksturyzowanie krzemu może mieć związek z zależnością orientacji krzemu względem dynamicznie zrekrystalizowanej osnowy.
9. Modyfikacja FSP spowodowała znaczny wzrost plastyczności obrabianego materiału – wydłużenie względne  $A$  wzrosło do 12,3% (w stanie dostawy poniżej 2%), wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  wzrosła do 215,5 MPa (w stanie dostawy poniżej 160 MPa). Jest to wynikiem znacznego rozdrobnienia mikrostruktury materiału modyfikowanego oraz eliminacji porowatości typowej dla materiału po odlewaniu grawitacyjnym.
10. Stwierdzono, że twardość stopu AlSi9Mg po modyfikacji w obszarze odkształconym plastycznie jest najmniejsza ok. 57 HV<sub>0,1</sub> ( $\omega = 560$  obr/min,  $v = 560$  mm/min) przy małej energii liniowej (6,26 J/mm); mała ilość ciepła wprowadzona do materiału zmodyfikowanego najprawdopodobniej uniemożliwia powstanie faz mogących wpływać na wzrost twardości materiału.
11. Obliczenia numeryczne potwierdziły, że temperatura po stronie natarcia (198°C) jest wyższa niż po stronie spływu (183°C),  $\omega = 900$  obr/min,  $v = 560$  mm/min, narzędzie nr 1; uplastyczniony materiał przemieszczany wokół obracającego się narzędzia transportuje ciepło wokół narzędzia. Chłodniejszy materiał przemieszcza się na stronę spływu, a materiał ogrzany przemieszcza się na stronę natarcia. W rezultacie większa temperatura występuje są po stronie natarcia.
12. Wraz ze wzrostem prędkości przesuwu z 112 do 1120 mm/min maksymalna prędkość ruchu uplastycznego materiału wokół trzpienia nie ulega znaczącym zmianom (narzędzie nr 3). Jednak zagęszczenie materiału modyfikowanego ulega zmniejszeniu do prędkości obrotowej 560 obr/min, a następnie rośnie do prędkości 1120 mm/min. Jest to związane z faktem, że ruch uplastycznego materiału stanowi złożenie ruchów w różnych strefach, a przedstawiony model dotyczy jedynie ruchu w płaszczyźnie prostopadłej do osi wieńca dla jednej wybranej płaszczyźnie (połowa długości trzpienia).



**Wnioski uylitarne:**

1. Doświadczalnie dobrane parametry obróbki tarciowej stopu AlSi9Mg umożliwiły znaczącą poprawę właściwości warstwy wierzchniej materiału. Najbardziej korzystne właściwości uzyskano przy następujących parametrach: 560 obr/min, 112 mm/min; 560 obr/min, 224 mm/min; 560 obr/min, 560 mm/min; 900 obr/min, 112 mm/min, narzędzie konwencjonalne z trzpieniem walcowym;
2. Opracowana metodyka badawcza a także zaprojektowana i wykonana specjalistyczna głowica pomiarowa do mierzenia temperatury w narzędziu roboczym będą mogły być stosowane w analizie procesu FSP oraz technologii zgrzewania metodą FSW również innych materiałów konstrukcyjnych;
3. Zaadaptowana i doświadczalnie sprawdzona metoda trepanacyjna umożliwia wyznaczenie naprężeń pozostających w większej objętości materiału modyfikowanego tarciowo i może być zastosowana również w badaniach złączy zgrzewanych metodą FSW;
4. Opracowany, zespolony model numeryczny umożliwia obliczenie temperatury oraz trajektorii ruchu i prędkości materiału uplastycznionego wokół narzędzia roboczego. Jednocześnie model pozwala na wyznaczenie naprężeń pozostających w materiale po modyfikacji.

**W związku z tym, że proces tarciowej modyfikacji powierzchni stanowi stosunkowo nową technologię pozwalającą na poprawę właściwości warstwy wierzchniej odlewniczego stopu aluminium, uważa się za celowe przeprowadzenie w przyszłości następujących badań:**

1. Określenie wpływu innych parametrów tarciowej modyfikacji, jak np. kąta pochylenia narzędzia, rodzaju narzędzia roboczego na moment działający na narzędzie i na jego temperaturę.
2. Modyfikacja odlewniczego stopu aluminium przy użyciu materiału dodatkowego.
3. Przeprowadzenie badań właściwości użytkowych i fizycznych materiału po tarciowej modyfikacji, np. gęstości, odporności korozyjnej, odporności zmęczeniowej, odporności na zużycie trybologiczne w warunkach tarcia, odporności na kawitację.

Złożoność samego procesu oraz ograniczone metody jego fizycznej symulacji w warunkach laboratoryjnych powoduje, iż wiedza nt. samego procesu jest jeszcze nie do końca poznana. Uzyskanie dogłębnej wiedzy pozwoli na rozpowszechnienie procesu FSP również w aspekcie modyfikacji innych materiałów konstrukcyjnych.



## TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE PODSTAWY PROCESU TARCIOWEJ MODYFIKACJI WARSTW WIERZCHNICH (FSP)

### Streszczenie

W monografii przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących technologii tarciowej modyfikacji powierzchni (*ang. Friction Stir Processing*, FSP) odlewniczego stopu aluminium AlSi9Mg, których celem było wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesu a siłami i momentem działającymi na narzędzie oraz temperaturą w obszarze modyfikacji. Przedmiotem analiz było również wyjaśnienie różnic w mikrostrukturze obszaru zmodyfikowanego materiału w odniesieniu do materiału w stanie dostawy. Wyjaśniono mechanizm ruchu uplastycznionego materiału w trakcie procesu modyfikacji i jego wpływ na kształt obszaru zmodyfikowanego i poziom naprężeń pozostających.

W pierwszej części pracy dokonano analizy danych literaturowych nt. procesu FSP, co pozwoliło na wskazanie celu i zakresu prowadzonych badań. Przybliżono pojęcia warstwy i powłoki oraz scharakteryzowano najważniejsze metody wytwarzania warstw wierzchnich. Przedstawiono ideę samej metody FSP, parametry technologiczne i opisano strukturę obszaru modyfikowanego tarciowo. Omówione zostały narzędzia, urządzenia, oprzyrządowanie oraz systemy pomiarowe stosowane w metodzie FSP. Określono wpływ warunków technologicznych procesu na siły i moment działające na narzędzia. Omówiono wyniki modelowania numerycznego procesu modyfikacji FSP. Zaprezentowano możliwości modyfikacji różnych materiałów konstrukcyjnych oraz przedstawiono wyniki badań procesu modyfikacji FSP z materiałem dodatkowym. Podsumowaniem części pierwszej jest rozdział, w którym omówiono zastosowanie procesu FSP do modyfikacji złączy spawanych.

W części drugiej monografii przedstawiono wyniki badań własnych. Scharakteryzowano opracowaną metodykę badawczą oraz dobrano parametry technologiczne procesu FSP. Zidentyfikowano niezgodności, jakie mogą występować w badanym stopie AlSi9Mg po tarciowej modyfikacji. Pomiary sił i momentu działające na narzędzie robocze oraz temperaturę narzędzia były realizowane za pomocą głowic pomiarowych. Stwierdzono, że wzrost prędkości obrotowej, przy stałej prędkości przesuwu, narzędzia z wieńcem opory ze złozeniem po spirali i trzpieniem walcowy gwintowanym powoduje wzrost temperatury narzędzia do wartości 581°C oraz spadek momentu obrotowego do 8,2 Nm ( $\omega = 1800$  obr/min,  $v = 112$  mm/min). Natomiast wzrost prędkości przesuwu, przy stałej prędkości obrotowej, powoduje spadek temperatury do wartości 458°C i wzrost momentu obrotowego do 192,37 Nm ( $\omega = 112$  obr/min,  $v = 560$  mm/min). Wykazano, że ze wzrostem prędkości obrotowej następuje wzrost naprężeń pozostających do wartości 120 MPa w materiale po modyfi-

kacji FSP. Badania zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesu a momentem obrotowym i temperaturą umożliwiły wyjaśnienie zjawisk zachodzących w trakcie tarciowej modyfikacji oraz stanowiły dane wejściowe przy opracowaniu zespolonego modelu numerycznego procesu FSP.

Przyjęte założenia i model numeryczny poddano weryfikacji doświadczalnej. Do weryfikacji zastosowano wyniki pomiarów temperatury narzędzia oraz wyniki pomiaru naprężeń pozostających metodą trepanacyjną. Uzyskane w badaniach wyniki uzyskały zgodność z wynikami obliczeń, potwierdzając prawidłowość opracowanego zespolonego modelu numerycznego procesu modyfikacji FSP. Ponadto model numeryczny umożliwił wyznaczenie temperatury w obszarze oddziaływania narzędzia roboczego oraz prędkość i trajektorię ruchu uplastycznionego materiału wokół narzędzia roboczego. Zastosowanie modelu umożliwiło również obliczenie temperatury po stronie spływu i natarcia w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych procesu.

Wieloskalowa analiza mikrostrukturalna przy użyciu mikroskopii świetlnej, SEM i TEM wykazała znaczące rozdrobnienie mikrostruktury materiału zmodyfikowanego w porównaniu do materiału w stanie dostawy. W materiale bezpośrednio po odlewaniu wielkość ziarna wynosiła ok. 500  $\mu\text{m}$ , natomiast po modyfikacji średnia wielkość ziarna wynosiła ok. 4  $\mu\text{m}$ . Przeprowadzono również badania tekstury stopu AlSi9Mg przy użyciu metody rentgenowskiej i dyfraktometrii neutronowej. W materiale poddanym procesowi FSP wykazano wyraźną niejednorodność tekstury obu faz  $\alpha\text{-Al}$  i Si zarówno na grubości, jak i na szerokości modyfikowanej warstwy.

Wyniki pracy mogą przyczynić się do dalszego rozwoju technologii tarciowej modyfikacji, w szczególności ukierunkowane na praktyczne jej zastosowanie. Opracowana metodyka badawcza będzie mogła być stosowana przy analizie procesu FSP również innych materiałów oraz technologii zgrzewania metodą FSW. Opracowano zakres parametrów technologicznych, przy zastosowaniu których proces tarciowej modyfikacji FSP odlewniczego stopu aluminium jest stabilny, a w materiale modyfikowanym nie występują niezgodności materiałowe. Zaprojektowano i wykonano specjalistyczną głowicę pomiarową do mierzenia temperatury w narzędziu roboczym, co umożliwi w przyszłości analizę zjawisk cieplnych zachodzących w procesach FSP/FSW oraz dobór narzędzi roboczych. Zaadaptowano i doświadczalnie sprawdzono możliwość wyznaczenia naprężeń pozostających przy zastosowaniu metody trepanacyjnej, która do tej pory nie była stosowana do badań materiałów modyfikowanych tarcioowo. Ponadto opracowany zespolony model numeryczny umożliwi obliczenie pól temperatury oraz trajektorii ruchu i prędkości materiału uplastycznionego wokół narzędzia roboczego. Jednocześnie model pozwala na wyznaczenie naprężeń pozostających w materiale po modyfikacji. Zespolony model będzie mógł być stosowany dla różnych materiałów modyfikowanych lub zgrzewanych po uwzględnieniu stałych materiałowych, właściwych dla analizowanych materiałów.



## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION STIR PROCESSING (FSP)**

### **Abstract**

The results of experimental research on the Friction Stir Processing (FSP) surface modification technology of the AlSi9Mg cast aluminium alloy in the monograph were presented. The purpose was to determine the relationship between the technological parameters of the process and the forces and torque acting on the tool and the temperature in the modification area. The subject of the analysis was also to explain the differences in the microstructure of the modified material area in relation to the material in the as-delivered state. The mechanism of the flow of the plasticized material during the modification process and its impact on the shape of the modified area and the level of residual stresses were explained.

The literature analysis of the FSP process, which allowed to indicate the purpose and scope of the research in the first part was presented. The concepts of layer and coating were introduced and the most important methods of producing surface layers were characterized. The idea of the FSP method itself, technological parameters and the structure of the friction modified area were described. Tools, devices, instrumentation and measurement systems used in the FSP method are discussed. The influence of the technological parameters of the process on the forces and torque acting on the tools was determined. The results of numerical modelling of the FSP modification process are also discussed. Possibilities of modification of various construction materials were presented and the results of the FSP modification process with additional material were described. The summary of the first part is a chapter about FSP modification process of welded joints.

The second part of the monograph presents the results of the own research. The developed research methodology was presented and the technological parameters of the FSP process were selected. Defects that may occur in AlSi9Mg alloy after frictional modification were identified. Measurements of the forces and torque acting on the working tool and the tool temperature were carried out using measuring heads. It was found that at the constant travelling speed an increase in the rotational speed of a tool with a flat shoulder with a helical groove and a threaded cylindrical pin causes an increase in the temperature of the tool to 581°C and a decrease in torque to 8.2 Nm ( $\omega = 1800$  rpm,  $v = 112$  mm/min). On the other hand, the increase in the travelling speed, at the constant rotational speed of the tool, causes the temperature drop to 458°C and the torque increase to 192.37 Nm ( $\omega = 112$  rpm,  $v = 560$  mm/min). It has been shown that the increase in rotational speed results in an increase in residual stresses up to 120 MPa in the material after FSP modification.



Studies of the relationship between the technological parameters of the process and the torque and temperature made it possible to explain the phenomena occurring during the friction modification and were the input data for the development of a coupled numerical model of the FSP process.

The adopted assumptions and the numerical model were subjected to experimental verification. The results of the tool temperature measurements and the results of the residual stress measurement using the trepanning method were used for verification. The results obtained in the study were consistent with the calculation results, confirming the correctness of the developed complex numerical model of the FSP modification process. In addition, the numerical model made it possible to determine the temperature in the area of impact of the working tool as well as the speed and trajectory of the flow of the plasticized material around the working tool. The use of the model also made it possible to calculate the temperature on the advancing and retreating side, depending on the technological parameters of the process.

The multi-scale microstructural analysis using light microscopy, SEM and TEM showed significant microstructure refinement of the modified material compared to the as-delivered material. In the material immediately after casting, the grain size was approx. 500  $\mu\text{m}$ , while after modification the average grain size was approx. 4  $\mu\text{m}$ . Texture studies of the AlSi9Mg alloy were also carried out using X-ray and neutron diffraction methods. In the FSP process, a clear heterogeneity of the texture of both  $\alpha\text{-Al}$  and Si phases was demonstrated, both in the thickness and in the width of the modified layer.

The results of the work may contribute to the further development of the Friction Stir Processing technology, in particular focused on its practical application. The developed research methodology can be used in the analysis of the FSP and FSW processes also for other materials. The range of technological parameters was developed for which the FSP process of the cast aluminium alloy is stable and there are no defects in the modified material. A specialized measuring head was designed and manufactured for measuring the temperature in the working tool, which will enable the analysis of thermal phenomena occurring in the FSP/FSW processes and the selection of working tools in the future. The possibility of determining the residual stresses using the trepanation method, which has not been used to test friction-modified materials, was adapted and experimentally tested. In addition, the coupled numerical model makes it possible to calculate the temperature fields and the trajectory of flow and velocity of the plasticized material around the working tool. At the same time, the model allows to determine the residual stresses in the material after modification. The coupled model can be used for various modified or welded materials after taking into account the material constants specific to the analysed materials.



Dr inż. Marek Stanisław Węglowski jest Liderem Obszaru pełniącym funkcję Zastępcy Dyrektora Centrum Spawalnictwa oraz Lidera Grupy Badawczej Spawalność i Konstrukcje Spawane, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny w Gliwicach. Jest absolwentem Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Śląskiej. Uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. M.St. Węglowski ukończył podyplomowe studia menadżerskie oparte na strukturze MBA w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie oraz studia podyplomowe w zakresie zarządzania projektami na Uniwersytecie Ekonomicznym w Katowicach.

Prowadzone przez dr. inż. Marka St. Węglowskiego badania mają interdyscyplinarny charakter i obejmują m.in. badanie spawalności materiałów konstrukcyjnych, głównie stali wysokowytrzymałych, monitorowanie procesów spawania, metody łączenia i modyfikowania powierzchni technologiami spawalniczymi, szybkie prototypowanie oraz tarciową obróbkę materiałów. Marek St. Węglowski jest autorem i współautorem ponad 180 publikacji naukowych. Brał czynny udział w konferencjach i seminariach, na których wyniki swoich badań przedstawiał w formie referatów lub plakatów ponad 130 razy. Jest współautorem trzech książek w języku polskim oraz czterech w języku angielskim. W roku 2022 został zaliczony do grona najbardziej wpływowych 2% naukowców na świecie pod kątem przyjętych wskaźników cytowań jego publikacji. Jest współautorem dwóch wzorów przemysłowych i dwóch wzorów użytkowych, które zostały zastosowane w praktyce przemysłowej oraz trzech patentów.

Za swoje osiągnięcia naukowo-badawcze otrzymał, m.in.: Nagrodę Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa Henry Granjon Prize, Stypendium dla wybitnych młodych naukowców przyznane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, tytuł Srebrnego Inżyniera w kategorii Nauka i Złotego Inżyniera w kategorii Hi-Tech w plebiscycie Czytelników Przeglądu Technicznego. Ponadto otrzymał Medal im. inż. Stanisława Olszewskiego oraz Medal Honorowy Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH.