



Badanie stanu naprężeń własnych po obróbce ubytkowej materiału kompozytowego o osnowie z aluminium zawierającego dodatek ceramiczny

Residual stress analysis after machining in composite materials
based on aluminum alloy with ceramic additive

JOLANTA CYBOROŃ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.4>

W artykule przedstawiono wyniki badań strukturalnych stopu AlSi7Mg z 5% obj. węgla krzemu (SiC) po procesie obróbki ubytkowej z wykorzystaniem metody elektroerozyjnej, strumienia wodno-ściernego i przecinania. Omówiono możliwości pomiaru wpływu wybranych technik obróbki ubytkowej na stan warstwy wierzchniej. Za pomocą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego mierzono poziom i charakter uzyskanych naprężeń własnych. Zaprezentowano metodę dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania (SKP), stosowaną w praktyce do pomiaru zakresu zmian w obrębie warstwy wierzchniej, uzyskanej na skutek interakcji pomiędzy narzędziem a powierzchnią obrabianego materiału.

SŁOWA KLUCZOWE: naprężenia własne, stały kąt padania, stop aluminium

The paper presents the results of structural studies of AlSi7Mg alloy with 5% vol. addition of silicon carbide (SiC), after the machining process using the alternative method including: electrical discharge machining (EDM), abrasive water jet (AWJ) and cutting. The article presents the possibilities of measuring the impact of selected machining techniques on the surface and subsurface layers. X-ray diffraction were used to determine the level and characters of the obtained residual stresses. The article presents the X-ray diffraction method in the grazing incidence X-ray diffraction technique (GIXD) used for the practical measurement of the range of changes within the surface layer formed, as a result of interaction between the tool and the surface of the material being processed.

KEYWORDS: residual stress, grazing incidence X-ray diffraction technique, aluminum alloy

Kompozyty o osnowie ze stopów aluminium to grupa materiałów o właściwościach fizycznych i mechanicznych, które pozwalają na zastosowanie tych materiałów w nowoczesnych konstrukcjach inżynierskich. Wzmacnianie cząstkami ceramicznymi (SiC , Al_2O_3 , Si_3N_4) umożliwia poprawę wybranych parametrów wytrzymałościowych oraz odporności na zużycie ścierne [1–3]. Duże różnice właściwości fizycznych i mechanicznych materiałów będących składnikami kompozytu AlSi7Mg-SiC powodują jednak, że w miejscu ich połączenia powstają naprężenia własne, głównie drugiego rodzaju, wynikające z różnych wartości współczynników rozszerzalności liniowej

ceramiki i metalu. Wysoki poziom wewnętrznych naprężeń rozciągających materiał ceramiczny, powiązany z jego dużą twardością oraz małą odpornością na pękanie, może prowadzić do powstania słabych połączeń. Problemem okazuje się również kształtowanie materiałów kompozytowych o osnowie metalowej MMC (*metal matrix composite*). Stosowane do obróbki narzędzia z węglików spiekanych ulegają bowiem bardzo dużemu zużyciu i nie zapewniają odpowiedniej tolerancji wymiarowej [4, 5]. Zasadniczym celem obróbki ubytkowej jest kształtowanie nowej powierzchni przedmiotu, spełniającej określone wymagania ilościowe i jakościowe. Stan materiału po obróbce określają m.in. naprężenia własne występujące w warstwie wierzchniej.

Przedmiotem niniejszego artykułu było określenie wpływu obróbki ubytkowej – przeprowadzonej metodą elektroerozyjną, strumieniem wodno-ściernym i przecinaniem mechanicznym – na stan i poziom naprężeń własnych w materiale kompozytowym o osnowie z AlSi7Mg z zawartością 5% obj. węgla krzemu (SiC).

Materiał do badań

Materiałem do badań był kompozyt o osnowie z AlSi7Mg , zbrojony cząstkami SiC w ilości 5% obj. Procedurę otrzymywania kompozytów o osnowie ze stopu aluminium metodą zawieszinową opisano w publikacjach [6, 7].

Obróbkę ubytkową przeprowadzono następującymi metodami: metodą elektroerozyjną, strumieniem wodno-ściernym i cięciem mechanicznym. Parametry poszczególnych procesów obróbki zostały dobrane (zoptymalizowane) w taki sposób, aby zmodyfikowana warstwa wierzchnia miała jak najmniejszą grubość.

Do obróbki elektroerozyjnej wykorzystano obrabiarkę typu EWEA35 wyposażoną w generator GETA 10. Parametry procesu obróbki podano w tabl. I.

Materiał do badań poddano także obróbce ubytkowej z użyciem urządzenia do cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wody FORACON WS 5. Zastosowano ciśnienie wody wynoszące 300 MPa i posuw $f = 0,02$ mm/s. W celu porównania różnych metod obróbki ubytkowej jako kolejne narzędzie, pozwalające na usunięcie nadmiaru materiału kompozytowego, zastosowano szlifierkę narzędziową typu 4AM, wyposażoną w ściernicę diamentową typu A1 z ziarnem diamentowym (o wielkości $160\div 200$ μm)

* Mgr inż. Jolanta Cyboron (jolanta.cyboron@ios.krakow.pl) – Instytut Zaaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków

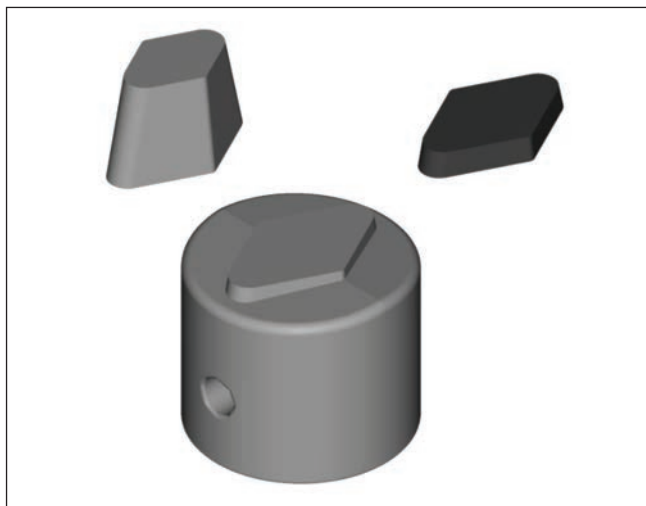
TABLICA I. Parametry elektryczne obróbki elektroerozyjnej

Rodzaj obróbki	Czas trwania impulsu t_i , μs	Czas przerwy pomiędzy impulsami t_o , μs	Współczynnik wypełnienia impulsu η	Amplituda prądu I , A	Napięcie zasilania U_z , V
EDM	4	10	0,29	3	90

typu AC 32 200/160. Obróbkę przeprowadzono z prędkością skrawania wynoszącą 22 m/s, w warunkach chłodzenia 3-procentowym roztworem oleju syntetycznego.

Na rys. 1 przedstawiono półfabrykat ze stopu AlSi7Mg + 5% obj. SiC oraz jego odcięte nadlewy. Próbki wycięte z odlanego tłoka miały wymiary 50 × 35 × 6 mm.

Pomiary naprężeń wykonano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego firmy PANalytical Empyrean z zastosowaniem filtrowanego promieniowania Cu ($\lambda_{Cu} = 1,5406 \text{ \AA}$). Wartości naprężeń własnych w obrębie poszczególnych warstw materiału obliczono metodą $g\text{-sin}^2\psi$ (*grazing incidence X-ray diffraction – GIXD*), czyli metodą dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania (SKP) [8].



Rys. 1. Korpus tłoka wykonany z materiału o składzie AlSi7Mg + 5% obj. SiC wraz z odciętym nadlewem

Wyniki badań

W celu zbadania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału przeprowadzono pomiary z różną geometrią pomiarową: BB (Bragga-Brentano) i SKP (geometrią stałego kąta padania). Wykonano pomiary po-

wierzchni obrabianych zarówno metodą elektroerozyjną, jak i strumieniem wodno-ściernym czy cięciem mechanicznym.

W metodach dyfrakcyjnych o objętości, z jakiej uzyskiwany jest wynik, decyduje głębokość wnikania promieniowania rentgenowskiego. Ta głębokość jest określana jako grubość warstwy pomiarowej z . Głębokość wnikania promieniowania X w przypadku geometrii BB oblicza się za pomocą równania (1), a w przypadku geometrii SKP – za pomocą równania (2):

$$Z_{BB} = \frac{-\ln(1-G_x)}{2\mu} \sin \theta \quad (1)$$

$$Z_{SKP} = \frac{-\ln(1-G_x)}{\mu \left[\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin(2\theta - \alpha)} \right]} \quad (2)$$

gdzie: μ – liniowy współczynnik absorpcji ($1/\text{cm}$); θ – kąt dyfrakcji ($^\circ$); G_x – stopień wykorzystania informacji w intensywności promieniowania dyfrakcyjnego przyjęty jako 0,95; α – stały kąt padania ($^\circ$).

Naprężenia własne w materiale, w obrębie poszczególnych warstw, zbadano na podstawie analizy dyfraktogramów otrzymanych w geometrii pomiarowej SKP. Według wzorów (1) i (2) wyliczono głębokość wnikania promieniowania rentgenowskiego dla różnych faz i różnych kątów padania wiązki.

W tabl. II przedstawiono efektywne głębokości wnikania dla poszczególnych faz występujących w materiale kompozytowym o osnowie z AlSi7Mg z dodatkiem 5% obj. SiC. Uwzględniono aluminium (Al), węgiel krzemu (SiC), krzem (Si) oraz krzemek magnezu (Mg_2Si). Pomiary przeprowadzono dla kątów padania $\alpha = 1, 3, 5, 7$ i 15° .

Jak wynika z tabl. II, efektywna głębokość pomiarowa mieści się w zakresie od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Wartość ta zależy w głównej mierze od długości fali promieniowania rentgenowskiego oraz od współczynnika absorpcji promieniowania.

Zastosowanie metody SKP pozwala na określenie poziomu zmian zachodzących w warstwach wierzchnich materiału pod wpływem różnego rodzaju obróbki, a także na określenie grubości warstwy, w której zachodzą te zmiany.

Do praktycznego opisu warstwy wierzchniej po obróbce ubytkowej zastosowano dyfrakcyjną metodę pomiaru naprężeń własnych z uwzględnieniem metody $g\text{-sin}^2\psi$ oraz jakościowego wskaźnika tekstury krystalograficznej ($I_{\text{teoretyczny}} = I_{200}/I_{111} = 0,46$) jako ilorazu intensywności linii dyfrakcyjnych. W tabl. III zestawiono wyniki uzyskane dla poszczególnych powierzchni.

TABLICA II. Efektywne głębokości wnikania, obliczone dla różnych faz w zależności od geometrii pomiarowej (w pomiarach zastosowano lampę o anodzie Cu)

Zastosowana geometria	Głębokość wnikania promieniowania, μm , dla:			
	SiC $\mu = 151,3 \text{ cm}^{-1}$	Al $\mu = 135,6 \text{ cm}^{-1}$	Mg_2Si $\mu = 140,1 \text{ cm}^{-1}$	Si $\mu = 152,2 \text{ cm}^{-1}$
BB	do 100	do 100	do 140	do 100
SKP, $\alpha = 1^\circ$	~3	~4	~4	~3
SKP, $\alpha = 3^\circ$	~10	~11	~12	~10
SKP, $\alpha = 5^\circ$	~16	~18	~17	~16
SKP, $\alpha = 7^\circ$	~21,5	~24	~23	~21,5
SKP, $\alpha = 15^\circ$	40	~48	45	40

TABLICA III. Wyniki pomiarów naprężeń własnych w stopie AlSi7Mg + 5% obj. SiC, wyznaczone dla fazy Al (symbole użyte w nazwach próbek oznaczają: EDM – obróbkę elektroerozyjną, AWJ – obróbkę strumieniem wodno-ściernym, C – cięcie mechaniczne)

Nazwa próbki	Geometria pomiaru	Grubość warstwy z, μm	Naprężenia σ , MPa ($\Delta\sigma = 10 \pm 15\%$)	Współczynnik stekstrowania $I_{\text{teoretyczne}} = I_{200}/I_{111} = 0,46$
Al-EDM	BB	do 100	-100,6	1,47
	SKP, $\alpha = 1^\circ$	~4	-65,8	0,40
	SKP, $\alpha = 3^\circ$	~11	-140,3	0,04
	SKP, $\alpha = 5^\circ$	~18	-89,4	0,26
	SKP, $\alpha = 7^\circ$	~24	-83,1	0,16
	SKP, $\alpha = 15^\circ$	40	84,2	0,71
Al-AWJ	BB	do 100	-201,2	0,27
	SKP, $\alpha = 1^\circ$	~4	-28,4	0,60
	SKP, $\alpha = 3^\circ$	~11	-53,6	1,03
	SKP, $\alpha = 5^\circ$	~18	-82,6	0,41
	SKP, $\alpha = 7^\circ$	~24	-93,0	0,82
	SKP, $\alpha = 15^\circ$	40	-216,3	0,66
Al-C	BB	do 100	-57,2	0,37
	SKP, $\alpha = 1^\circ$	~4	-555,9	0,15
	SKP, $\alpha = 3^\circ$	~11	-119,5	0,59
	SKP, $\alpha = 5^\circ$	~18	-82,6	0,68
	SKP, $\alpha = 7^\circ$	~24	-46,2	0,35
	SKP, $\alpha = 15^\circ$	40	-62,4	0,55

W przypadku powierzchni po obróbce elektroerozyjnej w poszczególnych warstwach materiału występuje gradient naprężeń. Badania wykazały zmienny charakter naprężeń obecnych w aluminium. W przypadku stałego kąta padania $\alpha = 15^\circ$, zastosowanych parametrów cięcia i głębokości wnikania ok. 40 μm naprężenia wynoszą 84,2 MPa, co świadczy o ich rozciągającym charakterze. W pozostałych przypadkach naprężenia mają charakter naprężeń ściskających i wynoszą odpowiednio od -140,3 do -65,8 MPa.

Powierzchnia po obróbce strumieniem wodno-ściernym charakteryzuje się ściskającym charakterem naprężeń w całej badanej objętości. Wartości bezwzględne naprężeń rosną wraz ze wzrostem głębokości wnikania (w warstwach przypowierzchniowych przyjmują najmniejsze bezwzględne wartości).

Powierzchnia po cięciu mechanicznym charakteryzuje się wysokim poziomem ściskających naprężeń własnych w warstwie przypowierzchniowej (~4 μm) – jest to związane z bezpośrednim oddziaływaniem ściernicy diamentowej na powierzchnię obrabianego materiału. Wraz ze wzrostem głębokości wnikania maleje wartość bezwzględna naprężeń.

Podsumowanie i wnioski

Wielkość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po obróbce ubytkowej została oszacowana metodą $g\text{-sin}^2\psi$. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania omówionych technik obróbkowych – jako alternatywnych metod obróbki ubytkowej – w przypadku kompozytów o osnowie metalowej MMC.

Naprężenia wywołane obróbką ubytkową wykazują (w głównej mierze) charakter ściskający.

Najwyższy poziom naprężeń własnych (-555,9 MPa) został osiągnięty w warstwie przypowierzchniowej o grubości ok. 4 μm w przypadku powierzchni po cięciu szlifarką narzędziową.

Wartości bezwzględne naprężeń własnych dla warstwy wierzchniej kompozytu po cięciu strumieniem wodno-ściernym rosną wraz ze wzrostem głębokości wnikania.

Metoda badań naprężeń własnych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej pozwala analizować wpływ obróbki ubytkowej na stan materiału. Metoda ta może być również pomocna w przypadku zastosowania innego rodzaju obróbki, np. nagniatania, azotowania czy nawęglania.

Prace badawcze zostały podjęte w ramach projektu „Opracowanie składu fazowego kompozytu na bazie stopu AlSi pod kątem możliwości kształtowania powierzchni roboczych tłoków”, KOMPCAST, Nr PBS1/B6/13/2013, oraz w ramach działalności statutowej Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (DS.17-3.3.2).

LITERATURA

- Devaraju A., Kumar A., Kotiveerachari B. "Influence of addition of Grp/Al₂O₃p with SiCp on wear properties of aluminum alloy 6061-T6 hybrid composites via friction stir processing". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 23 (2013): s. 1275–1280.
- Lieblch M., Corrochano J., Ibáñez J., Vadillo V., Walker J.C., Rainforth W.M. "Subsurface modifications in powder metallurgy aluminum alloy composites reinforced with intermetallic MoSi₂ particles under dry sliding wear". *Wear*. 309 (2014): s. 126–133.
- Mathan Kumar N., Senthil Kumaran S., Kumaraswamidhas L.A. "Wear behaviour of Al 261 8 alloy reinforced with Si₃N₄, AlN and ZrB₂ in situ composites at elevated temperatures". *Alexandria Engineering Journal*. 55 (2016): s. 19–36.
- Manna A., Bhattacharyya B. "A study on machinability of Al/SiC-MMC". *Journal of Materials Processing Technology*. 140 (2003): s. 711–716.
- Lin J.T., Bhattacharyya D., Lane C. "Case study machinability of a silicon carbide reinforced matrix composite aluminum metal". *Wear*. 181–183 (1995): s. 883–888.
- Dolata A.J., Dyzya M. "Aspects of fabrication aluminum matrix heterophase composites by suspension method". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 35 (2012): s. 1–7.
- Dyzya M. "AlSi7Mg/SiC and heterophase SiCP+CG composite for use in cylinder-piston system of air compressor". *Solid State Phenomena*. 176 (2011): s. 49–54.
- Skrzypek S. „Nowe możliwości pomiaru makro-naprężeń własnych w materiałach przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania”. Kraków: Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2002.