

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Badanie zależności pomiędzy warunkami frezowania a naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej lotniczych stopów aluminium

Magdalena Zawada-Michalowska¹, Paweł Pieśko¹, Jarosław Korpysa¹

¹Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Politechnika Lubelska
email: m.michalowska@pollub.pl, p.piesko@pollub.pl, j.korpysa@pollub.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki badania zależności pomiędzy warunkami frezowania, tj.: prędkością skrawania, rodzajem frezowania, stosowaniem chłodziwa oraz stosunkiem kierunku frezowania do kierunku walcowania, a naprężeniami własnymi zalegającymi w warstwie wierzchniej wybranych stopów aluminium (EN AW-2024 T351 i EN AW-7050 T7451). Określenie naprężeń własnych jest niezwykle ważnym zagadnieniem, ponieważ są one główną przyczyną odkształceń poobróbkowych elementów cienkościennych. Wyniki badań zaprezentowano na przykładzie frezowania prostopadłego do kierunku walcowania podczas obróbki na sucho. Stwierdzono, że na stan naprężeń własnych mają wpływ wszystkie analizowane czynniki. Jednoznacznie potwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania rosną naprężenia własne. Zaobserwowano także znacznie większe naprężenia własne dla stopu aluminium EN AW-2024 T351 w porównaniu do stopu EN AW-7050 T7451. Dodatkowo odnotowano istotne różnice pomiędzy frezowaniem przeciwbieżnym a współbieżnym. Większe naprężenia własne otrzymano dla frezowania współbieżnego.

SŁOWA KLUCZOWE: naprężenia własne, stopy aluminium, warunki obróbki, warstwa wierzchnia, frezowanie

1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych zagadnień w obszarze obróbki skrawaniem elementów cienkościennych są naprężenia własne mające wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową wytwarzanych struktur. Naprężenia te są przyczyną powstawania odkształceń poobróbkowych, a problem ten jest szczególnie ważny w przypadku części wymagających zachowania ścisłych tolerancji w celu utrzymania ich funkcjonalności i niezawodności. Ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa użytkownika jest to przede wszystkim kluczowy aspekt w branży lotniczej [1].

Najbardziej rozpowszechnionymi modelami powstawania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału w trakcie obróbki skrawaniem są [2, 3]:

- model mechaniczny – zakładający generowanie naprężeń własnych w wyniku działania tylko siły skrawania; w warstwie wierzchniej pojawiają się naprężenia ściskające, a w strefie głębszej – rozciągające,
- model cieplny – zakładający powstawanie naprężeń własnych na skutek działania wyłącznie temperatury; w warstwie wierzchniej generowane są naprężenia rozciągające, a w strefie głębszej – ściskające.

Należy zaznaczyć, że podczas tego złożonego procesu na stan naprężeń własnych oddziałują wszystkie wymienione czynniki, przy czym ich wpływ może być różnicowany. Model mechaniczny (siła skrawania) jest typowy dla obróbki wiórowej, podczas gdy model cieplny (temperatura) odpowiada przede wszystkim obróbce ściernej oraz wysokowydajnej obróbce szybkościowej (*High Speed Cutting*) [2].

Naukowcy z całego świata prowadzą badania w zakresie minimalizacji odkształceń poobróbkowych elementów cienkościennych. Przedstawiony problem jest jednak bardzo skomplikowany, a jego kompleksowe rozwiązanie jest trudne ze względu na dużą liczbę czynników wpływających na pojawianie się wspomnianych odkształceń [4].

Na podstawie analizy modeli generowania naprężeń własnych podczas obróbki skrawaniem, szczególnie możliwości jednoczesnego oddziaływania źródeł mechanicznych i cieplnych, można wnioskować, że odpowiedni dobór warunków obróbki może znacząco ograniczyć odkształcenia elementów cienkościennych. Rozwiązanie tego zagadnienia jest istotne zarówno z perspektywy naukowej, jak i praktycznej, ponieważ ma bezpośredni wpływ na jakość i trwałość takich struktur.

Celem pracy jest ocena zależności pomiędzy warunkami obróbki a naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej lotniczych stopów aluminium.

2. Metodyka badań

Badaniom poddano prostopadłościennie próbki o wymiarach 50x25x76,2 mm wykonane z lotniczych stopów aluminium, tj.: EN AW-2024 T351 i EN AW-7050 T7451. Frezowanie przeprowadzono na pionowym centrum frezarskim Avia VMC 800HS frezem węglkowym firmy FENES o oznaczeniu 20x32-45°W (średnica części roboczej: 20 mm, długość krawędzi skrawającej: 32 mm).

Jako zmienne warunki obróbki przyjęto prędkość skrawania ($v_c = 150, 450$ i 900 m/min), rodzaj frezowania (współbieżne lub przeciwbieżne) oraz stosowanie chłodziwa (na sucho lub z użyciem MobilCut 230).

Dodatkowo obróbkę prowadzono prostopadle i równoległe do kierunku walcowania.

Stałe parametry technologiczne były następujące:

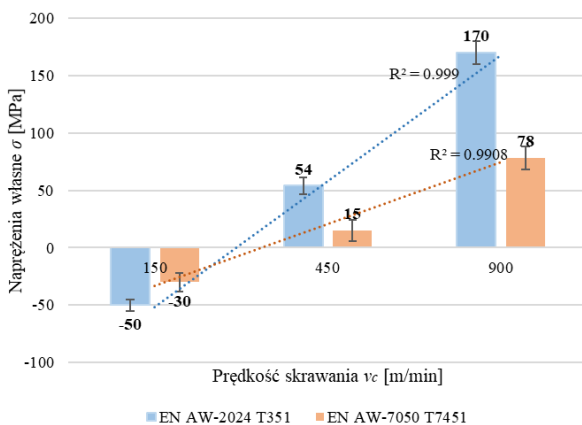
- głębokość frezowania $a_p = 15$ mm,
- szerokość frezowania $a_e = 1$ mm,
- posuw na ostrze $f_z = 0,1$ mm/ostrze.

Kluczowym etapem badań były pomiary naprężeń własnych, które przeprowadzono z wykorzystaniem dyfraktometru rentgenowskiego Theta-Theta EDGE firmy GNR. Pomiary realizowano w 3 miejscach próbki i każdorazowo powtarzano je 5-krotnie. Stosowano anodę chromową i kolimator o średnicy wynoszącej 1 mm.

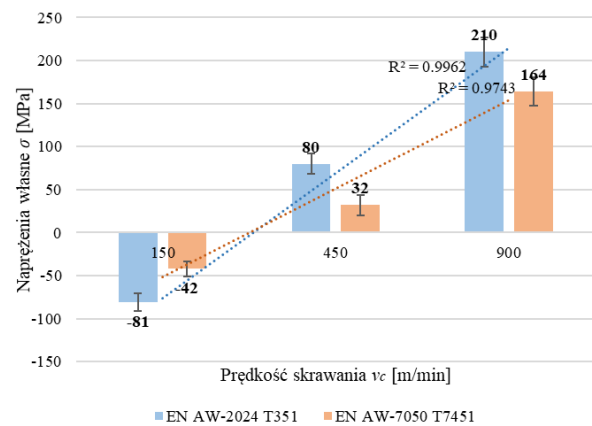
3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na przykładzie próbek frezowanych prostopadle do kierunku walcowania bez użycia chłodziwa (obróbka na sucho). Na rys. 1 i 2 przedstawiono zależność pomiędzy prędkością skrawania a naprężeniami własnymi zalegającymi w warstwie wierzchniej badanych stopów aluminium odpowiednio dla frezowania przeciwbieżnego oraz współbieżnego.

Na podstawie uzyskanych wyników można zaobserwować, że wraz ze wzrostem prędkości skrawania rosną naprężenia własne. Dla prędkości skrawania $v_c = 150$ m/min stwierdzono występowanie naprężeń ściskających (znak „-”), natomiast dla prędkości skrawania $v_c = 450$ m/min i $v_c = 900$ m/min odnotowano naprężenia rozciągające (znak „+”). Jest to związane z dominacją w pierwszym przypadku siły skrawania (model mechaniczny), a w drugim temperatury (model cieplny) i wejściem w zakres obróbki szybkościowej (*High Speed Cutting*), przy czym szczególnie przy prędkości $v_c = 450$ m/min zjawiska te się na siebie nakładają. Dodatkowo odnotowano znacznie większe naprężenia własne dla stopu aluminium EN AW-2024 T351 w porównaniu do stopu EN AW-7050 T7451. Prawdopodobnie wynika to z odmiennych właściwości tych dwóch materiałów. Należy zaznaczyć, że stop EN AW-7050 T7451 jest bardziej plastyczny. Stwierdzono także znaczące różnice pomiędzy frezowaniem przeciwbieżnym a współbieżnym. Większe naprężenia własne otrzymano dla frezowania współbieżnego, co jest efektem zwiększonych odkształceń i tarcia w strefie skrawania w tym rodzaju obróbki.



Rys. 1. Zależność pomiędzy prędkością skrawania v_c a naprężeniami własnymi σ – frezowanie przeciwbieżne



Rys. 2. Zależność pomiędzy prędkością skrawania v_c a naprężeniami własnymi σ – frezowanie współbieżne

Wyniki badań dla wszystkich analizowanych zmiennych zostaną przedstawione w pełnej wersji publikacji.

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że:

- 1) na stan naprężeń własnych (ich znak i wartość) mają wpływ wszystkie analizowane czynniki, tj.: prędkość skrawania, rodzaj frezowania, stosowanie chłodziwa, stosunek kierunku posuwu narzędzia do kierunku walcowania materiału, a także sam stop aluminium,
- 2) dzięki optymalizacji warunków obróbki można skutecznie „kształtować” naprężenia własne w warstwie wierzchniej, co ma bezpośrednie przełożenie na jakość i trwałość wytwarzanych elementów,
- 3) w przyszłości konieczne jest rozszerzenie badań na geometrie odpowiadające konstrukcjom cienkościennym i zweryfikowanie rezultatów w aspekcie możliwości minimalizacji odkształceń poobróbkowych.

Publikacja powstała w wyniku realizacji projektu pn. „Opracowanie technologii frezowania cienkościennych elementów integralnych wykonywanych z lotniczych stopów metali lekkich w kontekście minimalizacji odkształceń poobróbkowych”, nr umowy: LIDER14/0153/2023, całkowita wartość projektu: 1 543 750,00 zł. Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Lider XIV.

Literatura

- [1] Weber D., Kirsch B., Chighizola C.R., D’Elia C.R., Linke B.S., Hill M.R., Aurich J.C., *Analysis of machining-induced residual stresses of milled aluminum workpieces, their repeatability, and their resulting distortion*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 115, pp. 1089–1110, 2021.
- [2] Jiang X., Wei Y., Zhou J., Zhan K., Ding Z., Liang Z.D., *Residual stress generation and evaluation in milling: A review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 126, pp. 3783–3812, 2023.
- [3] Zawada-Michałowska M., Pieško P., Mrówka-Nowotnik G., Nowotnik A., Legutko S., *Effect of the Technological Parameters of Milling on Residual Stress in the Surface Layer of Thin-Walled Plates*. Materials, Vol. 17, No. 5, 1193, 2024.
- [4] Bałon P., Rejman E., Smusz R., Szostak J., Kielbasa B., *Implementation of high speed machining in thin-walled aircraft integral elements*. Open Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 162–169, 2018.