Uproszczone modele deformacji frezu walcowego poddanego obciążeniom pochodzącym od sił skrawania podczas frezowania stopu aluminium Al 7075

Simplified deformation models of the plain milling cutter subjected to cutting forces loads when milling the aluminum alloy AI 7075

ANDRZEJ KAWALEC KONRAD SZAŁĘGA *

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.154 English version available on: www.mechanik.media.pl

Omówiono zagadnienie geometrycznego modelowania frezu walcowego oraz obliczania jego ugięć pod wpływem obciążeń odwzorowujących siły skrawania występujące podczas frezowania powierzchni wyrobu ze stopu Al 7075. W modelowaniu uwzględniono 2 modele przestrzenne frezu walcowego: z prostoliniowymi krawędziami skrawającymi oraz ze śrubowymi krawędziami skrawającymi. Wzięto pod uwagę oddziaływanie sił skupionych i różnych rozkładów obciążeń odwzorowujących siły skrawania. Wyciągnięto wnioski dotyczące wpływu kąta nachylenia sił względem wybranej osi układu współrzędnych na generowane naprężenia zredukowane i deformacje frezu. Do obliczenia pól przemieszczeń, odkształceń i naprężeń wykorzystano metodę elementów skończonych.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, frez walcowy, metoda elementów skończonych, przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia

The problem of geometric modeling of the plain milling cutter and its deflection under the influence of loads mapping forces occurring during the milling of the AI 7075 alloy surface is discussed. In modeling, 2 types of plain milling cutters are included: with rectilinear cutting edges and with helical cutting edges. The influence of concentrated forces and different distributions of loads mapping the cutting forces, is considered. Conclusions are drawn regarding the influence of the force inclination angles relative to the selected axis of the coordinate system on the generated effective stresses and cutter deformations. The finite element method was used to calculate the displacements, deformations and stresses.

KEYWORDS: milling, plain milling cutter, finite element method, displacements, strains, stresses

W technice lotniczej oprócz funkcjonalności wyrobu bardzo dużą rolę odgrywają: jego duża wytrzymałość, mała masa, bezpieczeństwo użytkowania i przyjazność dla środowiska. Skutkuje to coraz bardziej powszechnym stosowaniem monolitycznych konstrukcji, często cien-kościennych, frezowanych ze stopów metali lekkich lub kompozytów [1]. Jednym z takich materiałów jest stop aluminium Al 7075, oznaczony Al-5,6Zn-2,5Mg-1,6Cu-0,23Cr o gęstości 2,81 g/cm³, module Younga 72 GPa i wytrzymałości na rozciąganie w stanie T6, tj. po przesycaniu i sztucznym starzeniu, 350 MPa [1]. Wprawdzie – podobnie jak inne stopy z grupy Al-Zn-Mg-Cu – także ten stop jest podatny na pękanie spowodowane korozją naprężeniową, jednak ze względu na relatywnie dużą wytrzymałość właściwą stop AI 7075 ma szerokie zastosowanie w lotnictwie [1].

Do najważniejszych czynników wpływających na dokładność kształtu i wymiarów wyrobu powstającego na obrabiarce CNC należą kinematyka, dynamika, sztywność i dokładność obrabiarki oraz system sterowania CNC. Istotne są także: rozkład temperatury w obszarze roboczym, występujące w procesie obróbki obciążenia, sztywność narzędzi i ich zużycie, zamocowanie przedmiotu obrabianego oraz właściwości materiałów przedmiotu i narzędzia [1, 2]. Frezowanie stopów aluminium nie stanowi tak dużego problemu jak frezowanie stopów na bazie tytanu lub niklu. Jednak podczas frezowania dużych wgłębień materiału – co jest częste w kształtowaniu ubytkowym lekkich konstrukcji monolitycznych – zwłaszcza w lotnictwie, stosuje się z konieczności frezy o znacznym wysięgu.

Siły skrawania wywołują we frezie złożony stan naprężeń, będący skutkiem zginania, skręcania, ściskania i ścinania. To z kolei prowadzi do deformacji frezu, które mogą skutkować nadmiernymi błędami wykonania przedmiotu obrabianego. Zmienia się także przekrój warstwy skrawanej. Wzajemne oddziaływanie tych czynników w zakresach sprężystym i sprężysto-plastycznym jest związane ze zmianą obciążenia w czasie, co prowadzi do powstawania drgań przekładających się m.in. na błędy kształtu i wymiarów wyrobu. Minimalizowanie tych błędów wymaga wykonania badań eksperymentalnych i numerycznych, mających określić przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w kształtowanych wyrobach, narzędziach i oprzyrządowaniu technologicznym.

Doświadczalne badanie zjawisk zachodzących w trakcie skrawania jest trudne i często obarczone dużymi błędami pomiarowymi. Przyczyną tego jest m.in. brak odpowiednich metod i systemów pomiarowych. Analiza numeryczna pozwala w przybliżeniu prognozować wpływ wybranych parametrów – opisujących m.in. kształt oraz wymiary obrabianych przedmiotów i narzędzi, ich właściwości materiałowe, warunki procesu technologicznego, powstające ciepło – na pole odkształceń, naprężeń, temperatur, dokładność wykonania wyrobu, jakość ukształtowanej powierzchni itd. [1–9].

Cel i zakres badań

Celem badań było wykonanie uproszczonych, przestrzennych modeli frezu walcowego oddziałującego na przedmiot obrabiany oraz obliczenie deformacji frezu i powstających w nim naprężeń zredukowanych.

^{*} Dr hab. inż. Andrzej Kawalec prof. PRz (ak@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej; inż. Konrad Szałęga (konrad.szalega@ o2.pl) – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

Metodyka badań

Do obliczeń wytrzymałościowych wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Zarówno modelowanie geometryczne, jak i obliczenia dotyczące mechaniki odkształceń zrealizowano w systemie CAD/CAM/CAE NX 9.0 [10].

Opracowane modele i warunki wykonania obliczeń

Dzięki zastosowaniu jednolitego środowiska CAD/CAM/ /CAE udało się uniknąć błędów transformacji geometrycznych, które zwykle powstają w trakcie eksportu z systemu CAD danych geometrycznych do tzw. formatów uniwersalnych, np. często stosowanych formatów IGES i STEP, a w odniesieniu do jądra geometrycznego systemu NX 9.0 – także formatu Parasolid. Import tych danych do systemu obliczeń MES powoduje powstawanie kolejnych błędów odwzorowania pierwotnego modelu.

Bazą dla modeli służących do obliczeń wytrzymałościowych były przestrzenne modele geometryczne CAD frezu walcowego. Reprezentowały one frez walcowy o prostych i śrubowych krawędziach skrawających i rowkach (rys. 1, 2). Podstawą do modelowania geometrii frezów był frez palcowy z grupy CoroMill Plura, ozn. R216.35-14045--AC26N [11].



Rys. 1. Podstawowe wymiary geometryczne modeli CAD frezów walcowych o: a) prostoliniowych i b) śrubowych krawędziach skrawających (kąt linii śrubowej 20°); ap_max – maksymalna głębokość skrawania a_p



Rys. 2. Modele CAD frezu walcowego z: a) prostoliniowymi, b) śrubowymi krawędziami skrawającymi

Wykonano 20 modeli MES frezów różniących się kształtem, siatką ES lub zastosowanym obciążeniem. Ze względu na konieczność odwzorowania rozkładów sił wzdłuż krawędzi skrawających frezu każdą z powierzchni krzywoliniowych rowków frezu oraz powierzchni i krzywych modelujących krawędzie skrawające podzielono płaszczyzną prostopadłą do osi frezu na 2 składowe (rys. 2).

Przyjęto, że frez jest zamocowany w sztywnej oprawce. Zamodelowano to, odbierając wszystkie stopnie swobody w płaszczyźnie przekroju poprzecznego frezu odpowiadającej powierzchni granicznej oprawki. Wartości wypadkowego obciążenia obliczono w sposób przybliżony dla przypadku frezowania boczną powierzchnią frezu monolitycznego o średnicy D = 14 mm, głębokości skrawania $a_p = 20$ mm, szerokości skrawania $a_e = 2$ mm, prędkości skrawania $v_c = 650$ m/min i posuwie na ostrze $f_z = 0,03$ mm, przyjmując 5 krawędzi skrawających o kącie nachylenia 0° lub 20°, odpowiednio dla frezu z prostoliniowymi i śrubowymi krawędziami skrawającymi [12].

Założono, że kształtowana w procesie frezowania ścianka wyrobu ze stopu Al 7075 podobnie jak i oprawka narzędzia są sztywne. Wpływ podatności ścianki wyrobu na deformacje wywołane siłami skrawania był analizowany w innych publikacjach, m.in. w [8].

W obliczeniach użyto MES z liniowymi elementami skończonymi w kształcie ostrosłupa. Siatka ES została zagęszczona w okolicach krawędzi skrawających. Promień krzywizny krawędzi skrawających był porównywalny z tolerancją modelowania krzywych w systemie CAD, tj. 0,005 mm. Zrealizowano też obliczenia dla promienia 0,05 mm. Założono, że monolityczne narzędzia wykonane są ze stali szybkotnącej ASTM M10. Dla obu frezów przyjęto sprężysty, izotropowy model materiału z modułem Younga E = 207 GPa i współczynnikiem Poissona $\nu = 0,3$ [1,13].

Przedstawiony w pracy [9] model obciążenia frezu przewiduje obciążenie wyłącznie od siły skupionej przyłożonej w osi frezu lub od sił skupionych przyłożonych w wybranych punktach do krawędzi skrawających frezu. W tym artykule obciążenie zdefiniowano w formie albo siły skupionej, przyłożonej na końcu osi narzędzia, albo ciągłych rozkładów sił wzdłuż krawędzi skrawających, co oczywiście lepiej odwzorowuje warunki pracy frezu.

Rozważono kilka przypadków ukierunkowania obciążenia w przestrzeni. Pierwszy z nich służył wyłącznie do zgrubnej oceny sztywności frezu poprzez obliczenie maksymalnego przemieszczenia wywołanego siłą skupioną. Drugi – znacznie lepiej odpowiadający rzeczywistym warunkom oddziaływania frezu z obrabianym przedmiotem – uwzględniał siły rozłożone wzdłuż krawędzi skrawających będących w chwilowym kontakcie z obrabianym przedmiotem, nachylone pod różnymi kątami $\omega_i \in \{0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$ względem wybranej osi X układu odniesienia (rys. 3).



Rys. 3. Obciążenie w modelach MES frezu z siłami skrawania rozłożonymi w sposób ciągły wzdłuż: a) prostoliniowych, b) śrubowych krawędzi skrawających

Założono, że w wyniku drgań wywoływanych okresowym stykiem krawędzi skrawających z obrabianym przedmiotem przestrzenne ukierunkowanie działania sił skrawania może ulegać zmianie. Uwzględnienie zmienności kąta ω_i w zakresie <0°, 90°> wynika z potrzeby ujawnienia ogólnej tendencji zmian ugięć oraz naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH) [1] w narzędziu w zakresie obejmującym 2 wzajemnie ortogonalne kierunki. Przyjęto jednocześnie upraszczające założenie, że średnia wartość wypadkowej siły skrawania pozostaje na stałym poziomie 395 N, wynikającym z obliczeń wstępnych.

W przypadku frezu o śrubowych krawędziach skrawających przyjęto dwa warianty obciążenia – z 1 lub 2 krawędziami w chwilowym kontakcie z obrabianym przedmiotem. W drugim przypadku składowa siły przypadająca na krawędź będącą w kontakcie z obrabianym przedmiotem była obliczana z uwzględnieniem udziału długości tej krawędzi w całkowitej długości krawędzi skrawających frezu będących w chwilowym kontakcie z przedmiotem (rys. 3*b*).

Wyniki badań

Wyniki obliczeń MES w postaci maksymalnych przemieszczeń frezów δ_{max} oraz maksymalnych naprężeń zredukowanych HMH $\sigma_{HMH,max}$ pokazano na rys. 4 i 5. Przemieszczenia δ_{max} wywołane skupioną siłą skrawania przyłożoną w osi frezu z prostoliniowymi i śrubowymi krawędziami skrawającymi wynoszą odpowiednio 0,244 mm i 0,254 mm.



Rys. 4. Maksymalne przemieszczenia δ_{max} frezów z prostoliniowymi i śrubowymi krawędziami skrawającymi w zależności od kąta ω_i nachylenia względem osi X obciążenia od sił skrawania rozłożonego w sposób ciągły wzdłuż 1 lub 2 krawędzi skrawających

Równania regresji $\delta_{\max,i}(\omega)$ maksymalnych ugięć (krzywe (1)÷(3) na rys. 4) odkształconych frezów mają postać:

$\delta_{\text{max},1} = 0,206 - 2,17e - 4 \cdot \omega + 3,70e - 7^* \omega^2$	(1)
$\delta_{\text{max},2} = 0,225 - 5,95e-5 \cdot \omega - 1,01e-6^*\omega^2$	(2)
$\delta_{\text{max},3} = 0,201 + 1,29e-5 \cdot \omega - 1,96e-6^* \omega^2$	(3)

Współczynniki determinacji modeli regresyjnych (1)+(3) wynoszą odpowiednio: 0,99, 0,99 i 0,98.



Rys. 5. Maksymalne naprężenia $\sigma_{\rm HMH,max}$ frezów z prostoliniowymi i śrubowymi krawędziami skrawającymi w zależności od kąta $\omega_{\rm l}$ nachylenia względem osi X obciążenia od sił skrawania rozłożonego w sposób ciągły wzdłuż 1 lub 2 krawędzi skrawających

Ze wzrostem kąta ω_i maleją maksymalne przemieszczenia frezu δ_{max} (rys. 4). Model z wypadkową siłą skrawania przyłożoną w osi frezu prowadzi do δ_{max} porównywalnych z δ_{max} w modelach z obciążeniem ciągłym przyłożonym do krawędzi skrawających. Modele frezów z ciągłymi rozkładami obciążenia wzdłuż krawędzi skrawających są oczywiście bliższe rzeczywistym warunkom pracy. Zmiana naprężeń $\sigma_{\rm HMH,max}$ we frezie o prostoliniowych krawędziach skrawających jest symetryczna względem kąta ω_i = 45°, dla którego $\sigma_{\rm HMH,max}$ są najmniejsze. Naprężenia $\sigma_{\rm HMH,max}$ we frezie o śrubowych krawędziach skrawających maleją ze wzrostem kąta ω_i od 0° do 60°, po czym stabilizują się w określonym zakresie naprężeń. Duże wartości przemieszczeń δ_{max} mogą wynikać z przyłożenia obciążenia do krawędzi powierzchni. Obliczone δ_{max} frezów o prostoliniowych krawędziach skrawających z promieniem krzywizny 0,05 mm, obciążonych siłami rozłożonymi wzdłuż odcinków odpowiadających głębokości skrawania a_p , różnią się w stosunku do δ_{max} z rys. 4 o mniej niż 10%. Może to być m.in. związane z przyłożeniem obciążenia ciągłego do brzegu powierzchni reprezentującej krawędź skrawającą frezu.

Podsumowanie i wnioski

Opracowane modele MES frezów cechuje duży stopień uproszczenia. Nie uwzględniają one m.in. wpływu temperatury i dużej prędkości odkształcenia. Bardziej złożone modele konstytutywne, np. model Johnsona-Cooka [1,3,6,7], wymagają użycia bardziej zaawansowanego programu MES, większego zakresu obliczeń i znacznie wydajniejszego komputera od tego, który był dostępny. Opracowane w artykule modele MES frezów kładą nacisk na dokładne odwzorowanie kształtu tych narzędzi i różne postaci działających na nie obciążeń od sił skrawania. W przyszłości należy je rozwinąć, m.in. poprzez uwzględnienie cech, np. dotyczących właściwości materiałowych, które uproszczono lub pominięto.

Mimo tych uproszczeń opracowane modele mogą służyć do przybliżonego obliczania deformacji frezu i powstających w nim – pod wpływem przyłożonych obciążeń – naprężeń. Informacje te mogą być jeszcze pomocne w prognozowaniu skali błędów wykonania przedmiotu obrabianego.

Pola przemieszczeń i ich maksymalne wartości zmieniają się zależnie od sposobu obciążenia frezu, m.in. jego ukierunkowania. Maksymalne przemieszczenia δ_{max} w modelu frezu o prostoliniowych krawędziach skrawających wywołane obciążeniem siłą skupioną, przyłożoną w końcu jego osi, są o 16÷22% większe niż w przypadku użycia dokładnego modelu geometrycznego, zależnie od kierunku obciążenia. W przypadku śrubowych krawędzi skrawających różnica ta wynosi od 11% do 26%, na co mają wpływ kierunek działających sił i liczba obciążonych krawędzi skrawających.

LITERATURA

- 1. Oczoś K.E., Kawalec A. "Kształtowanie metali lekkich". PWN, Warszawa 2012.
- Kawalec A., Magdziak M. "Deformations of selected milling cutters while milling Ti6Al4V alloy on a CNC machine tool, experimental tests and FEM modeling". Advances in Manufacturing Science and Technology. 35, 4 (2011): s. 19–31.
 Grzesik W. "Advanced Machining Processes of Metallic Materials:
- Grzesik W. "Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications". 2nd ed. Elsevier, 2017.
- Zębala W. "*Modelowanie procesu skrawania*". Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
 Niesłony P., Grzesik W., Chudy R. "Wpływ dyskretyzacji modelu na-
- Niesłony P., Grzesik W., Chudy R. "Wpływ dyskretyzacji modelu narzędzia na efekt symulacji MES procesu skrawania". *Mechanik*. 87, 8–9 (2013): s. 89–96.
- Niesłony P., Grzesik W. "Modelowanie procesu i operacji skrawania metodą elementów skończonych (MES). Cz. I. Podstawy i programy symulacyjne". *Mechanik*. 86, 10 (2013): s. 825–832.
- Niesłony P., Grzesik W. "Modelowanie procesu i operacji skrawania z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES). Cz. II. Przykłady zastosowań praktycznych". *Mechanik*. 86, 11 (2013): s. 909–917.
- Kawalec A., Płodzień M. "Uproszczony dwuwymiarowy model ugięć cienkiej ścianki wywołanych siłą odporową od frezu". *Mechanik*. 89, 10 (2016): s. 1524–1525.
- Burek J., Żyłka Ł., Płodzień M., Szajna A. "Analiza sztywności frezu trzpieniowego". *Mechanik*. 89, 10 (2016): s. 1520–1521.
- Siemens PLM Software. "PLM-Product Lifetime Management". Url: www.plm.automation.siemens.com/pl_pl (dostęp: 21.11.2016).
- 11. Sandvik Coromant. "Narzędzia obrotowe". Warszawa 2009
- ISCAR cutting parameters calculator. Url: mpwr.iscar.com/machiningpwr (dostep: 25.11.2016).
- MatWeb. Material property data. Url: www.matweb.com (dostęp: 25.11.2016).