

BADANIA KSZTAŁTU WIÓRÓW ORAZ ICH WSPÓŁCZYNNIKÓW SPĘCZENIA I SKRÓCENIA W PROCESIE FREZOWANIA ORAZ SYMULACJA PROCESU Z WYKORZYSTANIEM MES

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych kształtu wiórów oraz współczynników ich spęczenia i skrócenia. Badania przeprowadzono wykorzystując głowicę frezową Sandvik CoroMill R245-125Q40-12M oraz płytki wymienne R245-12 T3 M-PM 4030 z węglików spiekanych z powierzchnią dogładzającą A_{bs} . Przeprowadzono analizy numeryczne procesu skrawania. W analizach numerycznych parametry technologiczne a także geometryczne narzędzia i materiału obrabianego były identyczne jak w badaniach eksperymentalnych. Porównano kształty wiórów i współczynniki spęczenia otrzymane eksperymentalnie i numerycznie

WSTĘP

Jednym z problemów współczesnych technologii jest spełnienie rosnących wymagań związanych z eksploatacją maszyn i urządzeń, a dotyczących zwiększenia ich trwałości i niezawodności, o czym decyduje odpowiednie kształtowanie warstwy wierzchniej. Jej stan jest istotny, ponieważ niemal wszystkie procesy tribologiczne i zmęczeniowe zachodzą na powierzchni przedmiotu. Właściwości warstwy wierzchniej po frezowaniu zależą głównie od odmiany i warunków realizacji procesu. Aby kompleksowo przeanalizować proces frezowania konieczne jest opracowanie adekwatnego modelu matematycznego i numerycznych metod jego rozwiązywania. W związku z tym, niniejsza praca wykorzystuje opracowane w zespole modele fizyczne i matematyczne procesu frezowania. Na ich podstawie opracowano algorytmy rozwiązań otrzymanych układów równań dyskretnych wraz z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi. Proces frezowania rozpatrzono jako geometrycznie i fizycznie nieliniowe zagadnienie brzegowo-początkowe, przy założeniu występowania nieliniowych, ruchomych oraz zmiennych w czasie i przestrzeni warunków brzegowych, przy czym warunki te są nieznanne w obszarze kontaktu ostrza z materiałem obrabianym. Tak przygotowane algorytmy zostały zaimplementowane do programu ANSYS.

Celem głównym pracy było opracowanie aplikacji w systemie ANSYS pozwalającej zaobserwować zjawiska występujące w niezwykle małych obszarach, przebiegające z dużymi prędkościami, trwające bardzo krótko, a decydujące o wynikach procesu frezowania. Do zjawisk takich należy m.in. zjawisko tworzenia się wióra, które w warunkach przeprowadzania eksperymentu jest trudno obserwowalne z tytułu dynamiki samego procesu. Podobne problemy zaobserwowano w pracach [6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 18]. Analiza numeryczna pozwala na szczegółową obserwację zjawiska tworzenia się wióra a także zaobserwowania rozkładu intensywności naprężeń i intensywności odkształceń w dowolnym czasie i w dowolnym miejscu trwania procesu. W pracach [1, 2, 3, 4, 5, 10, 12, 17, 19, 20, 21, 22, 23] autorzy korzystają z analiz numerycznych w celu określenia rozkładu odkształceń, naprężeń a także przemieszczeń w procesie skrawania, nagniatania, wytłaczania a także w numerycznym procesie próby rozciągania.

Problemem badawczym realizowanej pracy było określenie kształtu wióra a także wyznaczenie współczynnika spęczenia i skrócenia wióra w procesie frezowania walcowo czołowego symetrycznego niepełnego. Porównano kształty wiórów i wartości współ-

czynników spęczenia z doświadczeń eksperymentalnych z kształtem wiórów i wartościami współczynnika spęczenia uzyskanymi w symulacjach komputerowych. W symulacjach komputerowych parametry technologiczne, geometria narzędzia i parametry materiału skrawanego były identyczne jak w badaniach eksperymentalnych. Na podstawie porównania wiórów chciano stwierdzić poprawność opracowanych aplikacji i przygotowania analiz numerycznych.

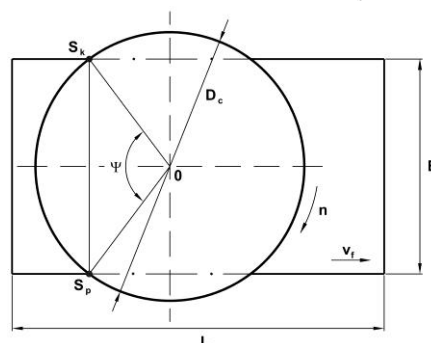
1. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania kształtu wióra i jego współczynników spęczenia i skrócenia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem następujących urządzeń i narzędzi:

- głowica frezowa Sandvik CoroMill R245-125Q40-12M o średnicy $D_c = 125$ [mm] z liczbą ostrzy $z = 8$,
- płytki wymienne z węglików spiekanych typu R245-12 T3 M-PM 4030.

Geometria ostrza skrawającego:

- główny kąt przystawienia oraz pomocniczy kąt przystawienia: $\kappa = 45^\circ$, $\kappa' = 45^\circ$,
- promień zaokrąglenia naroża $r_\varepsilon = 1,5$ [mm],
- płytki posiadały powierzchnię dogładzającą $b_s = 2,1$ [mm].



Rys. 1. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia kąta styku Ψ z trójkąta $0-S_p-S_k$ w zależności od średnicy narzędzia wieloostrowego i szerokości materiału obrabianego

Frezowano próbki ze stali C45 o wymiarach 100×173 [mm]. Operacje skrawania przeprowadzono na frezarce pionowej typu FWD32J o mocy silnika $P = 7,1$ [kW]. Parametry frezowania: prędkość obrotowa wrzeciona $n = 500$ i 1120 [obr/min], prędkość

posuwu $v_f = 315, 355, 710$ i 1120 [mm/min], głębokość frezowania $a_p = 1$ [mm], prędkość skrawania $v_c = 196$ i 440 [m/min]. Frezowanie walcowo-czołowe symetryczne niepełne było procesem przerywanym. Wynikało to z faktu przejścia głowicy frezującej przez materiał, jej powrotu i ponownego frezowania kolejnej warstwy (rys. 1).

Praca ostrzy charakteryzuje się tym, że styk każdego z nich z powierzchnią skrawania zależy od kąta styku Ψ zawartego pomiędzy punktami O , S_p – skrawania początkowego i O , S_k – skrawania końcowego. Wartość tego kąta zmienia się w zakresie od 0° do 180° i zależy od szerokości frezowanego materiału B oraz średnicy narzędzia D_c (rys. 1).

Kąt styku Ψ ostrza z powierzchnią przedmiotu oblicza się z równania:

$$\sin \frac{\Psi}{2} = \frac{B}{D_c}, \quad [\text{mm}], \quad (1)$$

gdzie: B – szerokość materiału obrabianego [mm], D_c – średnica narzędzia [mm].

Z wyrażenia na obliczenie czasu maszynowego t_m dla frezowania wyznaczono przemieszczenie materiału obrabianego względem ruchu obrotowego narzędzia:

$$t_m = \frac{L}{v_f}, \quad [\text{min}], \quad (2)$$

gdzie: L – długość materiału obrabianego [mm], v_f – prędkość posuwu [mm/min].

W wyrażeniu tym brak jest informacji o czasie styku ostrza z materiałem obrabianym, który jest niezbędny do wyznaczenia zużycia ostrza. Po rozwinięciu równania (2) i podstawieniu nowych zmiennych z wyrażenia (1) obliczono drogę skrawania L_s :

$$L_s = \frac{\pi \cdot \Psi \cdot D_c \cdot L}{1000 \cdot 360^\circ \cdot f_z \cdot z}, \quad [\text{m}], \quad (3)$$

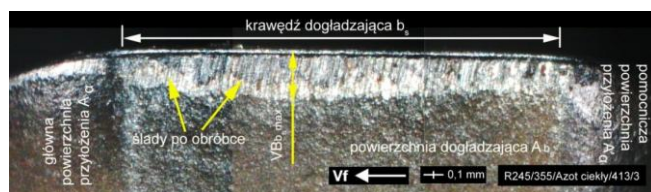
gdzie: Ψ – kąt styku [$^\circ$], D_c – średnica narzędzia [mm], L – długość materiału obrabianego [mm], f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze], z – liczba ostrzy w narzędziu.

Po każdym przejściu głowicy frezującej zbierano wióry, które przypisywano do drogi skrawania L_s . Na wybranej długości względnej drogi skrawania L_s głowicy frezowej mierzono wartość cofnięcia KE naroża ostrza. Wartość tą uwzględniano w analizach numerycznych modyfikując geometrię ostrza.

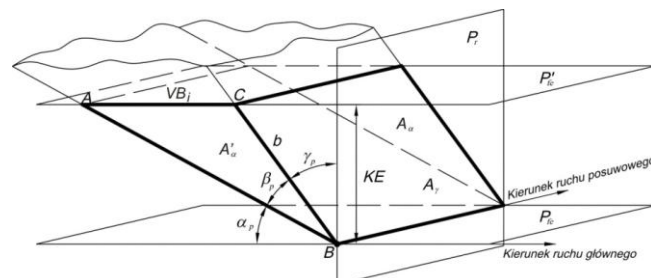
Rejestrowano również obrazy cyfrowe powierzchni dogładzającej Ab_s ostrza frezowego. Przykładowy przedstawiono na rys. 2. Opisano krawędzie i powierzchnie ostrza, przedstawiono ślady i wytarcia zużycia oraz mierzono jego wartość wybranym wskaźnikiem $VB_{bs\max}$.

Do wyznaczenia skrócenia ostrza KE wymieniono niezbędne kąty i płaszczyzny (rys. 3). Układ rozpatrzono na płaszczyźnie tylnej P_p , która przecina wzdłuż ostrze w rozpatrywanym punkcie B . W modelu uwzględniono tylne kąty natarcia γ_p , ostrza β_p i przyłożenia α_p zawarte pomiędzy płaszczyzną podstawową P_r a płaszczyznami ograniczającymi ostrze A_γ i A_α .

Rozpatrywany wycinek ostrza (rys. 3) jest na powierzchni dogładzającej A_{bs} . Znając kąty γ_p i α_p które najczęściej podawane są w katalogach producentów narzędzi i zależność (4) można wyznaczyć kąt ostrza β_p .



Rys. 2. Przykładowy obraz cyfrowy zużycia ostrza na powierzchni dogładzającej Ab_s po frezowaniu z prędkością skrawania $v_c = 440$ [m/mi]n i $f_z = 0,04$ [mm/ostrze]



Rys. 3. Geometryczne wyznaczenie zależności skrócenia ostrza KE w układzie ostrze – przedmiot obrabiany

Posiadając dane w postaci obrazów cyfrowych zużycia ostrza na powierzchni dogładzającej A_{bs} można wyznaczyć średnie wytarcie VB_i przypadające na odcinek \overline{AB} . Na rysunku 3 zaznaczono odcinek \overline{CB} oznaczony jako b (wyraz wolny). Jego wartość jest różna w zależności od skrócenia ostrza KE :

$$\beta_p = 90 - (\alpha_p + \gamma_p). \quad (4)$$

Z definicji twierdzenia sinusów, w dowolnym trójkącie iloraz długości dowolnego boku i sinusa kąta naprzeciw tego boku jest stały. Zachowując tę zasadę można wyznaczyć wyraz wolny b z zależności:

$$\frac{VB_i}{\sin \beta_p} = \frac{b}{\sin(90^\circ - \gamma_p - \beta_p)}, \quad (5a)$$

$$b \cdot \sin \beta_p = VB_i \cdot \sin(90^\circ - \gamma_p - \beta_p), \quad (5b)$$

$$b = \frac{VB_i \cdot \sin(90^\circ - \gamma_p - \beta_p)}{\sin \beta_p}. \quad (5c)$$

Po uproszczeniach zależności (5) i podstawieniu do (4) wyznaczono równanie na skrócenie ostrza KE :

$$\frac{KE}{b} = \cos \gamma_p, \quad (6a)$$

$$KE = b \cdot \cos \gamma_p, \quad (6b)$$

$$KE = \frac{VB_i \cdot \sin(90^\circ - \gamma_p - \beta_p)}{\sin \beta_p} \cdot \cos \gamma_p. \quad (6c)$$

2. WYNIKI POMIARÓW

W tab. 1 przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów analogowych dla współczynników skrócenia λ_1 i spęczenia λ_h wióra dla zastosowanych parametrów skrawania (n – prędkość obrotowa narzędzia [obr/min]/prędkość skrawania [m/min], v_f – prędkość posuwu stołu frezarki [mm/min], f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze]).

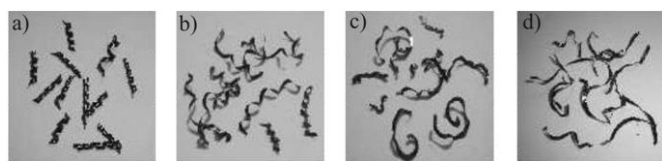
Pomiary wykonano w pięciu różnych miejscach grubości i długości wióra, a wartości średnie zamieszczono w zależności od wybranej drogi skrawania L_s . Dodatkowo wykonano obliczenia numeryczne spęczenia wióra $\lambda_{h\text{num}}$ dla wybranych przypadków.

Podczas frezowania z posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostre] i prędkością skrawania $v_c = 440$ [m/min] początkowo współczynnik spęczenia λ_h ma wartość około 4 by po dalszej drodze skrawania jego wartość zmalała do około 3,4. Skrawając dalej z tym samym posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostre] wartość współczynnika spęczenia λ_h rośnie do około 3,9. Wartość współczynnika skrócenia wióra λ_1 była zmienna w zakresie od 0,25 do ~0,43 dla całej drogi skrawania L_s .

Po frezowaniu z posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min] zaobserwowano, że wraz ze wzrostem długości drogi skrawania postać wióra jest mniej skręcona. Na rysunku 4a można zauważyć, że powstały wiór ma postać śrubową otwartą, natomiast po drodze skrawania 1189 [m] zaczyna przechodzić w postać spletaną (rys. 4b). W momencie, gdy długość drogi skrawania wzrosła do 1568 [m] i 1813 [m] wióry przyjęły postać spletaną pasmową (rys. 4c+d).

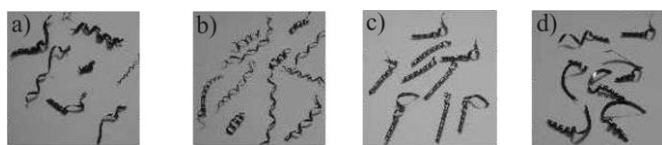
Tab. 1. Zestawienie wyników badań

n/v_c [obr/min]/ [m/min]	v_f [mm/min]	f_z [mm/ostre]	L_s [m]	KE [mm]	λ_1	λ_h	$\lambda_{h\text{mm}}$
500/196	315	0,078	108	0,007	0,425	2,718	2,732
500/196	315	0,078	216	0,010	0,472	3,452	-
500/196	315	0,078	324	0,016	0,462	3,741	-
500/196	315	0,078	2640	0,034	0,432	3,022	3,007
500/196	315	0,078	3300	0,055	0,400	2,859	-
500/196	315	0,078	3960	0,058	0,408	3,148	-
500/196	315	0,078	4290	0,059	0,432	3,474	3,457
500/196	315	0,078	4620	0,060	0,429	3,355	-
1120/440	355	0,04	682	0,036	0,252	4,057	4,077
1120/440	355	0,04	1189	0,053	0,426	3,385	-
1120/440	355	0,04	1568	0,065	0,264	3,671	-
1120/440	355	0,04	1813	0,067	0,368	3,871	3,852
1120/440	710	0,08	2401	0,036	0,399	3,142	-
1120/440	710	0,08	2970	0,053	0,416	3,807	-
1120/440	710	0,08	7234	0,065	0,349	2,514	2,527
1120/440	710	0,08	7553	0,067	0,413	3,114	-
1120/440	1120	0,125	286	0,036	0,719	2,201	-
1120/440	1120	0,125	503	0,053	0,613	2,616	2,603
1120/440	1120	0,125	660	0,065	0,697	2,510	-
1120/440	1120	0,125	787	0,067	0,605	2,455	-



Rys. 4. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 682 [m], b) 1189 [m], c) 1568 [m], d) 1813 [m] przy posuwie $f_z = 0,04$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]

Dla frezowania z posuwem $f_z = 0,08$ [mm/ostre] zaobserwowano, że wartości współczynników spęczenia λ_h i skrócenia λ_1 są nieregularne wraz ze wzrostem drogi skrawania L_s . Wióry miały postać śrubową otwartą, następnie śrubową stożkową długą przy wzroście długości drogi skrawania (rys. 5a+d).



Rys. 5. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 2401 [m], b) 2970 [m], c) 7234 [m], d) 7553 [m] przy posuwie $f_z = 0,08$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]

W przypadku frezowania z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostre] i prędkością skrawania $v_c = 440$ [m/min] zauważono, że dla początkowej drogi skrawania L_s wartość współczynnika spęczenia λ_h wynosiła ~2,2. Wraz ze wzrostem drogi skrawania jego wartość zwiększyła się do ~2,62, a następnie zmalała do wartości 2,45 na odcinku L_s od 673 [m] do 787 [m].

Wartość współczynnika skrócenia wióra λ_1 wykazywała tendencje malejącą i rosnącą w zależności od zwiększającej się drogi skrawania L_s .

Dla drogi skrawania $L_s = 286, 503, 660$ [m] powstałe wióry mają różną postać. Otrzymano wióry długie i śrubowe otwarte oraz taśmowe lekko splecione. Dla wartości $L_s = 660$ [m] otrzymane wióry miały kształt wiórów taśmowych wstęgowych.

Podczas skrawania prędkością $v_c = 196$ [m/min] i z posuwem $f_z = 0,078$ [mm/ostre] dla początkowej drogi skrawania L_s w zakresie od 108 [m] do 324 [m] rośnie wartość współczynnika spęczenia i skrócenia. Po znacznej drodze skrawania około 2500 [m] wartości te maleją, a wraz z dalszym skrawaniem następował ich ponowny wzrost.

3. PODSUMOWANIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Otrzymane wióry miały postać śrubową przechodzącą w taśmową, a wraz z dłuższą drogą skrawania wióry są mniej skręcone i splecione.

Dla posuwu $f_z = 0,04$ [mm/ostre] uzyskane wióry miały postać krótką śrubową otwartą. Dla krótszych długości dróg skrawania wióry są bardziej skręcone i zwarte, a wraz ze wzrostem długości drogi skrawania wióry są mniej zwarte i przyjmują postać taśmową.

Stosując posuw $f_z = 0,08$ [mm/ostre] uzyskano wióry śrubowe otwarte, przechodzące w śrubowe stożkowe dla dłuższej drogi skrawania.

Dla posuwu $f_z = 0,125$ [mm/ostre] dla różnych długości drogi skrawania wióry miały różną postać – śrubową otwartą oraz taśmową lekko splecioną.

Dla posuwu $f_z = 0,078$ [mm/ostre] udokumentowano wióry krótkie w postaci śrubowej otwartej. Dla krótszych długości drogi skrawania wióry były bardziej skręcone i zwarte, natomiast dla dłuższej drogi skrawania wióry przyjmowały postać taśmową zwartą.

Uzyskane współczynniki spęczenia λ_h i skrócenia λ_1 wióra można zobrazować następująco: dla frezowania z posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostre] wartość współczynnika spęczenia λ_h był w zakresie od ~4 do ~3,4. Dla posuwu $f_z = 0,08$ [mm/ostre] wartość współczynnika spęczenia λ_h wynosiła od ~3,8 do ~2,5 oraz dla frezowania z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostre] wartość współczynnika spęczenia λ_h wynosiła od ~2,6 do ~2,2 przy prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]. Czyli dla mniejszych wartości posuwu współczynnik spęczenia był większy.

Odwrotne zależności uzyskano dla wartości współczynnika skrócenia λ_1 . Dla mniejszego posuwu f_z uzyskano mniejsze wartości współczynnika skrócenia λ_1 i tak: dla posuwu $f_z = 0,04$ [mm/ostre] wartości współczynnika skrócenia λ_1 zawierały się w zakresie od ~0,4 do ~0,25, dla posuwu $f_z = 0,08$ [mm/ostre] w zakresie od ~0,42 do ~0,35 i z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostre]

wartości współczynnika skrócenia λ_1 zawierały się w zakresie od $\sim 0,72$ do $\sim 0,6$.

Podczas frezowania z prędkością skrawania $v_c = 196$ [m/min] uzyskane wartości współczynnika spęczenia λ_h zawierały się w zakresie od $\sim 3,7$ do $\sim 2,7$, a dla współczynnika skrócenia λ_1 od $\sim 0,47$ do $\sim 0,4$ dla posuwu $f_z = 0,078$ [mm/ostre].

Na uzyskane wyniki współczynników spęczenia λ_h i skrócenia λ_1 wióra największy wpływ miała wartość posuwu f_z . Wraz z dłuższą drogą skrawania L_s rosła wartość cofnięcia naroża ostrza KE. Wykazano, że prędkość skrawania v_c a także droga skrawania L_s i wartość cofnięcia naroża ostrza KE nie miały istotnego wpływu na uzyskane wyniki obliczonych współczynników spęczenia i skrócenia wióra.

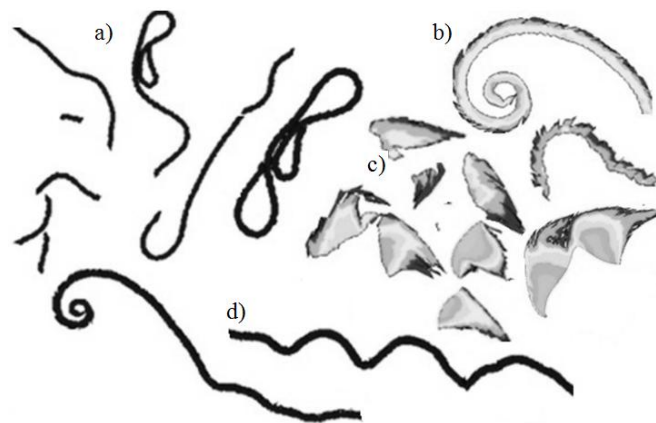
4. ANALIZY NUMERYCZNE

Analiza numeryczna jest cennym narzędziem pozwalającym na poznanie zjawisk, których badanie eksperymentalne jest trudne lub niemożliwe. Pozwala również na określenie wpływu na jakość technologiczną wyrobu: rodzaju materiału i jego stanu, geometrii narzędzi, wpływu warunków procesu technologicznego na stan odkształceń, naprężeń i temperatur w przedmiocie, kształtów wytworów, jakości powierzchni obrabianej. Do analizy procesu frezowania wykorzystano autorskie aplikacje opracowane w programie ANSYS/LS-Dyna, opracowane zgodnie z proponowanym w pracy [7] algorytmem. O wyborze oprogramowania zdecydowało przede wszystkim to, że użytkownik ma znaczny wpływ na proces modelowania, wybór algorytmów, możliwość ustawiania wielu opcji. Brak wielu automatycznych ustawień powoduje, że oprogramowanie to nie jest zbyt wygodne dla inżyniera, lecz niezwykle przydatne dla pracy naukowej, gdzie niejednokrotnie wymaga się niestandardowego podejścia do problemu.

W niniejszej pracy, w celu uproszczenia modelu numerycznego, przedstawiono wyniki procesu skrawania jednym ostrzem podłoża sprężysto/lepkoplastycznego, któremu przyporządkowano parametry materiałowe stali C45. W symulacjach numerycznych skrawania zachowano parametry technologiczne zastosowane w badaniach doświadczalnych. Geometria ostrza skrawającego również była taka jak w badaniach eksperymentalnych, gdyż uwzględniono wartości cofnięcia naroża ostrza KE. Otrzymane kształty wiórów przedstawione zostały na rysunku 6. Obliczony współczynnik spęczenia $\lambda_{h_{num}}$ na podstawie pomiarów geometrii wiórów otrzymanych w analizach numerycznych przedstawiony został w tabeli 1.

Na rysunku 6 zestawiono wybrane wyniki kształtów wiórów przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu przemieszczania nieodkształcalnego ostrza skrawającego ($E \rightarrow \infty$) po sprężysto/lepkoplastycznym podłożu. Materiał podłoża opisano nieliniowym modelem Cowper'a-Symonds'a, zależny od prędkości odkształceń, z granicznym odkształceniem powodującym niszczenie elementów skończonych. W modelu materiałowym przyjęto następujące parametry i ich wartości: $\rho = 7830$ [kg·m⁻³] – gęstość materiału podłoża, $E = 207$ [GPa] – moduł Younga, $\nu = 0,27$ [–] liczba Poissona, $R_e = 310$ [MPa] – początkowa granica plastyczności, $E_{tan} = E_T \cdot E / (E - E_T) = 763$ [MPa] – parametr materiałowy zależny od modułu umocnienia plastycznego $E_T = \partial \sigma_p / \partial \varphi_z^{(P)}$ i modułu Young'a E , $C = 40^\circ$ [s⁻¹] – parametr materiałowy określający wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego, $P = 5$ [–] stała materiałowa określająca wrażliwość materiału na

prędkość odkształcenia plastycznego, $\varphi_f = 2$ – graniczne odkształcenie niszczące. Wartość współczynnika tarcia statycznego wynosiła $\mu_s = 0,1$, współczynnika dynamicznego $\mu_d = 0,05$. Obiekt podzielono na 60000 elementów skończonych typu PLA-NE162, które zagęszczono w strefie kontaktu. Liczba ta wynika z przeprowadzonej wielokrotnie analizy wrażliwości dla różnych materiałów obrabianych. Dla stali C45 i zadanych parametrów technologicznych liczba ta jest optymalną wartością. Przyjęto współczynnik kształtu $WK = 1$. Ostrze skrawające, w obszarze kontaktu, dyskretyzowano przy użyciu 18000 elementów skończonych.



Rys. 6. Kształty wiórów otrzymane w analizach numerycznych: a) wióry splecione i splecione pasmowe dla prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min], $L_s = 1250$ [m], b) wiór śrubowy otwarty krótki dla prędkości skrawania $v_c = 196$ [m/min], $L_s = 290$ [m], c) wióry odłamkowe i elementowe dla prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min], $L_s = 660$ [m], d) wiór pasmowy dla prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min], $L_s = 520$ [m]

Analizując rysunek 6 zauważyć można różne kształty wiórów dla różnych wartości prędkości skrawania v_c i posuwu f_z . Zaobserwowano wióry splecione na początku skrawania z $v_c = 440$ [m/min] by w trakcie dłuższego skrawania z tą samą prędkością przeszły w wióry splecione pasmowe. Dla $v_c = 196$ [m/min] zaobserwowano wióry śrubowe otwarte krótkie. Wióry odłamkowe i elementowe były charakterystyczne w początkowej fazie skrawania z prędkością $v_c = 440$ [m/min]. Dalsza obróbka przynosiła inny kształt wióra a mianowicie wióry splecione. Wióry pasmowe były charakterystyczne dla prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min] i długiej drogi skrawania L_s . Ponadto zaobserwowano proces cyklicznego łamania się wióra w momencie kontaktu wióra z powierzchnią obrabianą.

Analizując kształt wiórów zaobserwowano ponadto, że ze wzrostem długości drogi skrawania postać wióra jest mniej skręcona. Natomiast w momencie gdy długość skrawania znacznie wzrasta kształty wiórów przyjęły postać pasmową splecioną. Podobne kształty uzyskano w badaniach eksperymentalnych.

Różna kolorystyka wiórów związana jest z panującymi w nich odkształceniami bądź naprężeniami. Nie jest to jednak tematem artykułu dlatego szczegółowe omówienie zostanie pominięte. Należy jednak wspomnieć, że maksymalne wartości naprężeń w wiórach panują w miejscu odrywania się wióra od materiału wypłytki a także w tzw. płaszczyźnie ścinania. Ponadto w obszarze przylegania do powierzchni natarcia ostrza skrawającego również zaobserwowano zwiększone wartości naprężeń.

Przeprowadzenie analizy numerycznej możliwe jest nawet dla bardzo skomplikowanych modeli matematycznych, także przy braku znajomości warunków brzegowych, zwłaszcza w obszarach kontaktu co jest charakterystyczne dla procesu skrawania. Symulacja numeryczna pozwala przewidzieć zachowanie obrabianego materiału w trakcie całego procesu technologicznego. Do najważniejszych możliwości analizy numerycznej w procesie skrawania należy określenie: możliwości analizy warunków zainicjowania procesu skrawania, geometrii powierzchni obrabianej w czasie kształtowania i po powrocie sprężystym materiału, rozkładu naprężeń i odkształceń lokalnych w materiale, określenie początku pęknięcia materiału i jego trajektorii, kształtu wióra, możliwości analizy procesu dla zmiennych w trakcie analizy parametrów (w tym przypadku geometrii ostrza).

WNIOSKI

Analizując kształty wiórów uzyskanych w badaniach symulacyjnych (realizowanych dla identycznych jak podczas eksperymentów warunkach) z wiórami uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych można zauważyć, że kształty wiórów są zbliżone. Wartości współczynników spęczenia również są zbliżone. Uzyskano wiele kształtów wiórów począwszy od elementowych, odłankowych poprzez wióry splecione, wstępowe, śrubowe aż do pasmowych. Kształt ich zależy od drogi skrawania. Wraz z jej wzrostem następowało zużycie narzędzia które bezpośrednio wpływało na kształt wiórów. Analizując kształty wiórów i ich wymiary stwierdzono, że musiało kilkakrotnie wystąpić zjawisko tworzenia narostu na ostrzu skrawającym, które przyczyniało się do zwiększenia grubości warstwy skrawanej. Współczynniki spęczenia i skrócenia przedstawione na wykresie przybierają przebieg piłowy, który zależy przede wszystkim od wartości posuwu. Prędkość skrawania jak i droga skrawania nie wpływają istotnie na ich wartość.

Można zatem uznać, że z dokładnością wystarczającą dla praktyki inżynierskiej możliwe jest prognozowanie jakości wyrobów skrawanych na podstawie wyników symulacji komputerowej. Algorytmy numeryczne, zaimplementowane w systemie ANSYS mogą być wykorzystane do oceny wpływu warunków technologicznych skrawania na jakość wyrobu, kształt wióra itp. Pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w strefach kontaktu a zatem mogą być podstawą do opracowania wytycznych doboru warunków skrawania ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu.

Dzięki wynikom uzyskanym w symulacji można zoptymalizować projektowany proces skrawania [6, 7, 8, 11, 14]. Opracowane aplikacje w systemie ANSYS umożliwiają analizę czasową stanów deformacji i naprężeń w dowolnym punkcie materiału dla następujących danych: dowolna geometria narzędzia (np. różne promienie zaokrąglenia naroża płytki skrawającej), przedmiotu, dowolnego materiału przedmiotu [7], dowolnego sposobu utwierdzenia przedmiotu, różnych warunków tarcia w obszarze kontaktu, dowolnej prędkości narzędzi.

BIBLIOGRAFIA

- Bohdal Ł., Kulakowska A., Patyk R. (2014), *Analysis of slitting of aluminum body panels in the aspect of scrap reduction*. Annual Set The Environment Protection 2014, vol. 16, pp. 105-114.
- Bohdal L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Patyk R. (2014), *Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 430-435.
- Bohdal Ł., Walczak P. (2015), *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*. Annual Set The Environment Protection 2013, vol. 15, pp. 863-872.
- Bohdal L., Kukielka L. (2014), *Application of variational and FEM methods to the modelling and numerical analysis of grinding process for geometrical and physical nonlinearity*. Mechanika 2014, Vol. 20(2), pp. 197-204
- Chodor J., Kaldunski P. (2014), *Experimental researches of influence of sliding burnishing technological conditions for surface roughness of 41Cr4 steel product*, IBEN, Gorzów Wielkopolski
- Chodor J., Kukielka L. (2008), *Numerical analysis of micromachining of C45 steel with single abrasive grain*. GAMM 79th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 31 March – 4 April, Bremen, Germany.
- Chodor J., Kukielka L. (2008), *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. Journal PAMM, Volume 7, Issue 1, 4030031-4030032.
- Chodor J., Kukielka L. (2014), *Using Nonlinear Contact Mechanics in Process of Tool Edge Movement on Deformable Body to Analysis of Cutting and Sliding Burnishing Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 339-344.
- Chodor J., Forsysiewicz M., Kukielka L. (2011), *Numerical analysis of flash and chip creating for elasto/visco-plastic body in the process of wedge movement*, XXXIV Scientific School of Abrasive Machining, Gdańsk.
- Chodor J., Kukielka L., Storch B. (2009), *New method of determination of tool rake angle on the basis of crack angle of specimen in tensile test and numerical simulations*. Journal PAMM, Ninth International Conference on Surface Effects and Contact Mechanics Computational Methods and Experiments, Algarve, Portugal.
- Chodor J., Kukielka L.: (2007), *Numerical analysis of the influence of abrasive grain geometry and cutting angle on states of strain and stress in the surface layer of object*, Journal PAMM, Surface/Contact Conference, Wessex Institute, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, UK.
- Chodor J., Kukielka L. (2014), *Using Nonlinear Contact Mechanics in Process of Tool Edge Movement on Deformable Body to Analysis of Cutting and Sliding Burnishing Processes*, Applied Mechanics and Materials, Vol 474, 339-344.
- Chodor J., Zurawski L. (2015), *Researches of chip shape and its swage factor and shortening factor in partial symmetric face milling process and simulation of the process using FEM*, Mechanic, 03.
- Chodor J., Kukielka L. (2012), *Behaviour of elasto/visco-plastic workpiece material during machining*, Journal of Machine Engineering, Vol. 12, No. 4.
- Chodor J., Kukielka L., (2006), *Influence of geometry of the blade and approach angle on states of stress and strain in the surface layer of cutting part by single abrasive grain*, XXIX Scientific School of Abrasive Machining, Gdansk-Jurata, 79-86, (in Polish).
- Chodor J., Kukielka L., Szczepanska M., (2009), *Phenomena occurring on the surface of the chip and tools contact in the process of turning of agricultural vehicle swivel pin*, XII Slupsk Automotive Forum, Slupsk (in Polish).
- Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Patyk R., Malag L., Bohdal L. (2014), *Incremental Modelling and Numerical Solution of the Contact Problem between Movable Elastic and Elastic/Visco-Plastic Bodies and Application in the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 159-165.
- Kukielka L., Szczepanska M., Chodor J. (2009), *Discrete modeling and numerical analysis of the single grain cutting process using finite element method*, Faculty of Mechanical IBM, Monograph, Radom, 110-119.

19. Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kulakowska A., Malag L., Patyk R. (2014), *3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 436-441.
20. Kulakowska A., Kukielka L., Kukielka K., Patyk R., Malag L., Bohdal L. (2014), *Possibility of Steering of Product Surface Layers Properties in Burnishing Rolling Process*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 442-447.
21. Kaldunski P., Chodor J. (2014), *Numerical analysis of the deep drawing proces by finite element method for anisotropic model of object*, IBEN, Gorzów Wielkopolski.
22. Malag L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Bohdal L., Patyk R. (2014), *Problems Determining of the Mechanical Properties of Metallic Materials from the Tensile Test in the Aspect of Numerical Calculations of the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 454-459.
23. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Bohdal L. (2014), *Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State after Burnishing*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 448-453.

dr inż. **Paweł Kaldunski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: pawel.kaldunski@tu.koszalin.pl

RESEARCHES OF CHIPS SHAPE AND ITS SWAGE FACTOR AND SHORTENING FACTOR IN MILLING PROCESS AND SIMULATION OF THE PROCESS USING FEM

Abstract

The paper presents the results of experimental researches of chips shape and its swage factor and shortening factor. The study was conducted using milling head Sandvik CoroMill R245-125Q40-12M and replaceable plates R245-12 T3 M-PM 4030 from cemented carbide with honed surface A_{bs} . Numerical analysis of cutting process were conducted. Technological parameters and geometry of the cutting edge and workpiece in numerical analysis were the same as in experimental researches. Chip's shapes and swage's factor from researches and numerical simulations were compared.

Autorzy:

dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: jaroslaw.chodor@tu.koszalin.pl

dr inż. **Agnieszka Kulakowska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

dr inż. **Łukasz Żurawski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Monitorowania Procesów Technologicznych, email: lukasz.zurawski@tu.koszalin.pl

dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: lukasz.bohdal@tu.koszalin.pl