

Jarosław CHODÓR¹
Łukasz ŻURAWSKI²

BADANIA KSZTAŁTU WIÓRA ORAZ JEGO WSPÓŁCZYNNIKÓW SPĘCZENIA I SKRÓCENIA W PROCESIE FREZOWANIA WALCOWO-CZOŁOWEGO SYMETRYCZNEGO NIEPEŁNEGO ORAZ SYMULACJA PROCESU Z WYKORZYSTANIEM MES

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.

RESEARCHES OF CHIP SHAPE AND ITS SWAGE FACTOR AND SHORTENING FACTOR IN PARTIAL SYMMETRIC FACE MILLING PROCESS AND SIMULATION OF THE PROCESS USING FEM

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.

1. 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 nieznane 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. 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.

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, 75-602 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, e-mail: jaroslaw.chodor@tu.koszalin.pl

² Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Monitorowania Procesów Technologicznych, 75-602 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, e-mail: lukasz.zurawski@tu.koszalin.pl

Problemem badawczym realizowanej pracy było określenie kształtu wióra a także wyznaczenie współczynnika spęczenia i skrócenia wióra w procesie frezowania. Porównano kształty wiórów i wartości współczynników 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.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

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

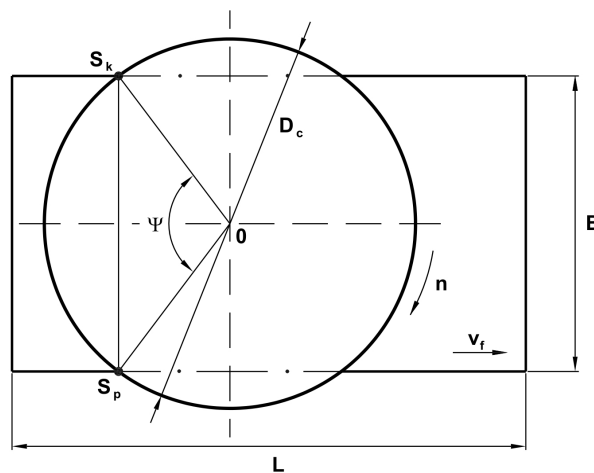
- głowica frezowa Sandvik CoroMill R245-125Q40-12M o średnicy $D_c = 125$ [mm] z liczbą ostrzy $z = 8$,
- płytki wymienne z węglików spiekanych typu R245-12 T3 M-PM 4030.

Geometria ostrza skrawającego:

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

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 0 , S_p – skrawania początkowego i 0 , 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).



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

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

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

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:

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

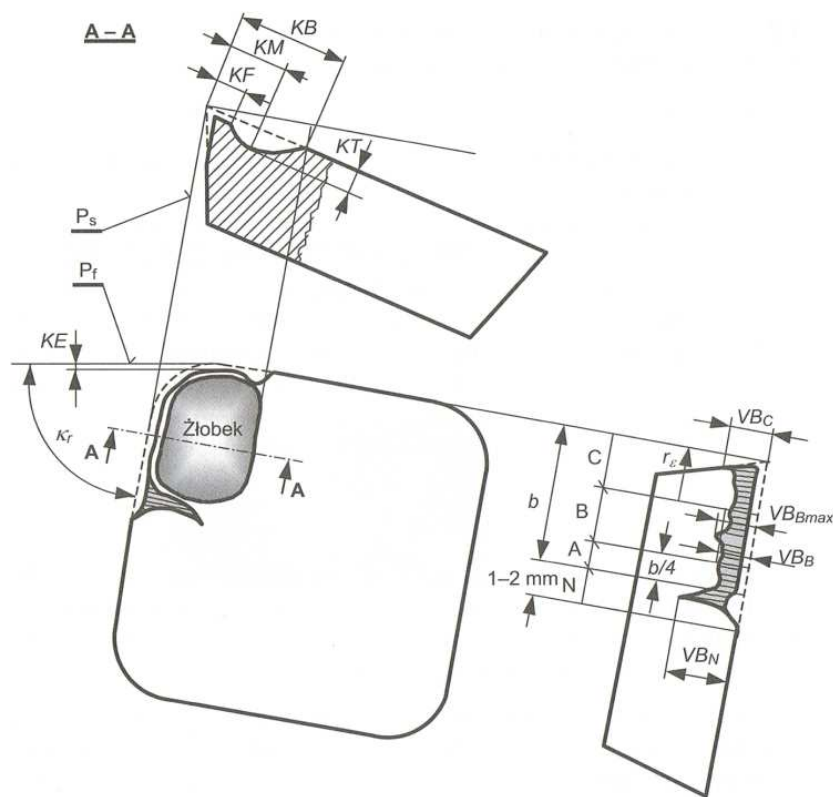
gdzie: L – długość materiału obrabianego [mm], v_f – prędkość posuwu [mm/min].

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 :

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

gdzie: ψ – kąt styku [°], 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 (rys. 2). Wartość tą uwzględniano w analizach numerycznych modyfikując geometrię ostrza.



Rys. 2. Geometria i wskaźniki zużycia ostrza [8]

Rejestrowano również obrazy cyfrowe powierzchni dogładzającej Ab_s ostrza frezowego. Przykładowy przedstawiono na rysunku 3. 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. 4). 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. 4) 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 .

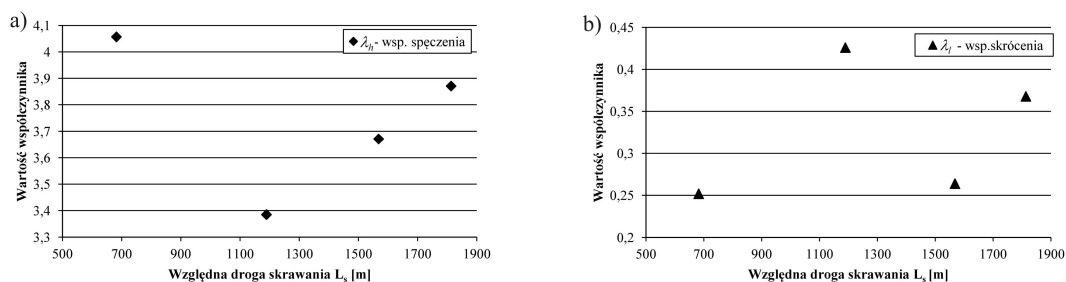
Posiadając dane w postaci obrazów cyfrowych zużycia ostrza na powierzchni dogładzającej A_{bs} można wyznaczyć średnie wytarcie VB_i przypadające na odcinek \overline{AB} .

Tab. 1. Zestawienie wyników badań

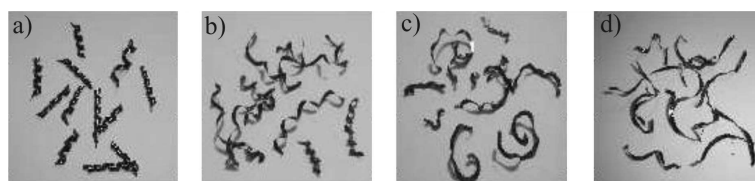
n/v_c [obr/min]/[m/min]	v_f [mm/min]	f_z [mm/ostrze]	L_s [m]	KE [mm]	λ_l	λ_h	λ_{hnum}
500/196	315	0,078	108	0,007	0,425	2,718	2,732
500/196	315	0,078	216	0,010	0,472	3,452	—
500/196	315	0,078	324	0,016	0,462	3,741	—
500/196	315	0,078	2640	0,034	0,432	3,022	3,007
500/196	315	0,078	3300	0,055	0,400	2,859	—
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	—

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 λ_{hnum} dla wybranych przypadków.

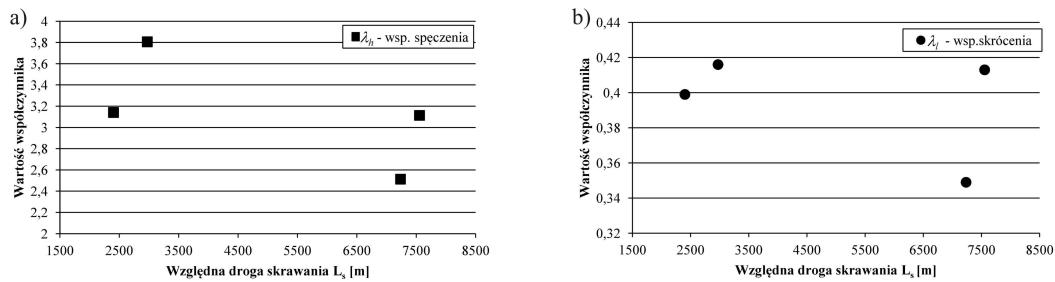
Na wykresach 5a i 5b, 7a i 7b, 9a i 9b a także 11a i 11b przedstawiono zmienność wartości współczynnika spęczenia wióra λ_h oraz współczynnika skrócenia wióra λ_l od długości drogi skrawania L_s . Ponadto udokumentowano postać wiórów na rysunkach 6, 8, 10, 12 dla zmiennej długości drogi skrawania L_s .



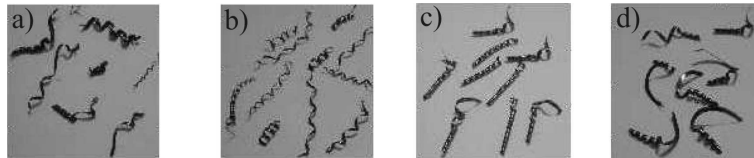
Rys. 5. Zależność współczynników: a) spęczenia wióra λ_h i b) skrócenia wióra λ_l , do względnej drogi skrawania L_s przy posuwie $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



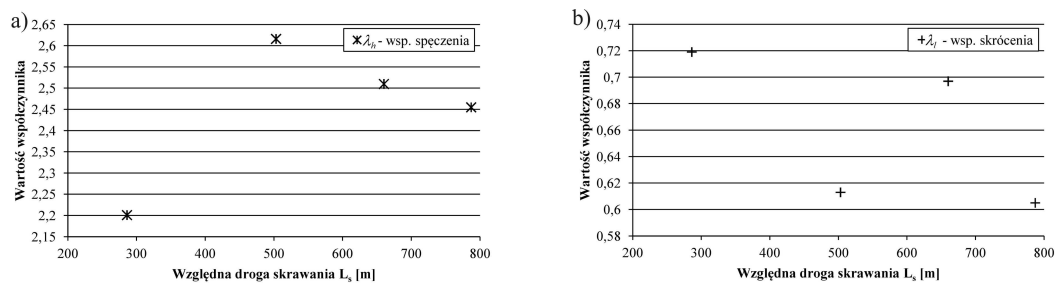
Rys. 6. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 682 [m], b) 1189 [m], c) 1568 [m], d) 1813 [m] przy posuwie $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



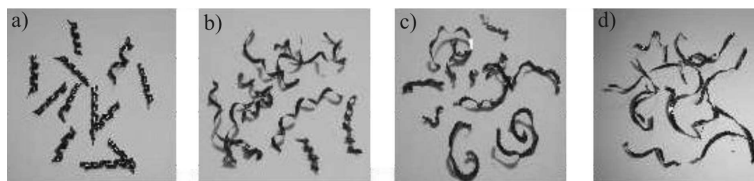
Rys. 7. Zależność współczynników: a) spęczenia wióra λ_h i b) skrócenia wióra λ_l do względnej drogi skrawania L_s przy posuwie $f_z = 0,08$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



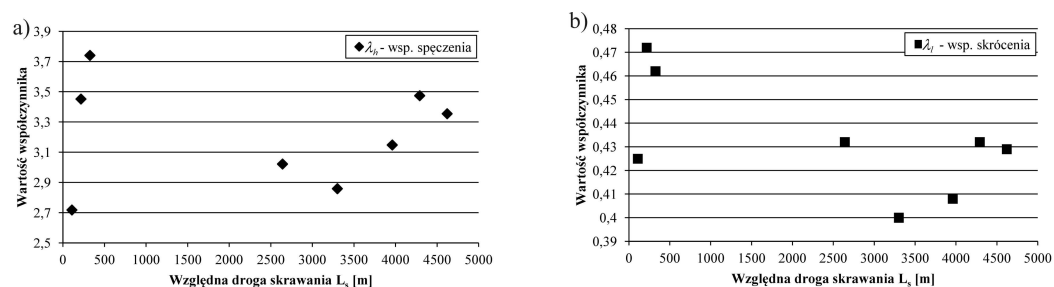
Rys. 8. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 2401 [m], b) 2970 [m], c) 7234 [m], d) 7553 [m] przy posuwie $f_z = 0,08$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



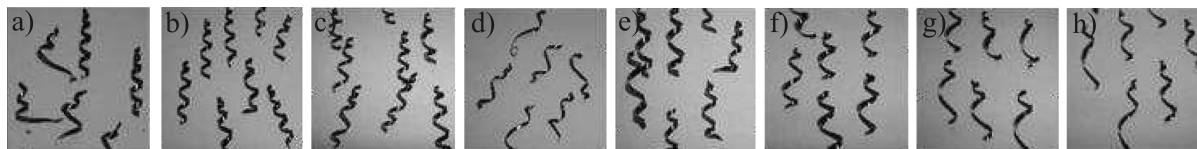
Rys. 9. Zależność współczynników: a) spęczenia wióra λ_h i b) skrócenia wióra λ_l do względnej drogi skrawania L_s przy posuwie $f_z = 0,125$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



Rys. 10. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 286 [m], b) 503 [m], c) 660 [m], d) 787[m] przy posuwie $f_z = 0,125$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]



Rys. 11. Zależność współczynników: a) spęczenia wióra λ_h i b) skrócenia wióra λ_l od względnej drogi skrawania L_s przy posuwie $f_z = 0,078$ [mm/ostre] i prędkości skrawania $v_c = 196$ [m/min]



Rys. 12. Postacie wiórów po frezowaniu w zależności od drogi skrawania L_s : a) 108 [m], b) 216 [m], c) 324 [m], d) 2640 [m], e) 3300 [m], f) 3960 [m], g) 4290 [m], h) 4620 [m] przy posuwie $f_z = 0,078$ [mm/ostrze] i prędkości skrawania $v_c = 196$ [m/min]

Podczas frezowania z posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] 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/ostrze] wartość współczynnika spęczenia λ_h rośnie do około 3,9 (rys. 5a).

Wartość współczynnika skrócenia wióra λ_l 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/ostrze] i prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min] zaobserwowano, że wraz ze wzrostem długości drogi skrawania postać wióra jest mniej skręcona. Na rysunku 6a można zauważyć, że powstały wiór ma postać śrubową otwartą, natomiast po drodze skrawania 1189 [m] zaczyna przechodzić w postać splątana (rys. 6b). W momencie, gdy długość drogi skrawania wzrosła do 1568 [m] i 1813 [m] wióry przyjęły postać splątana pasmową (rys. 6c÷d).

Dla frezowania z posuwem $f_z = 0,08$ [mm/ostrze] zaobserwowano, że wartości współczynników spęczenia λ_h i skrócenia λ_l są nieregularne wraz ze wzrostem drogi skrawania L_s (rys. 7a i b). Wióry miały postać śrubową otwartą, następnie śrubową stożkową długą przy wzroście długości drogi skrawania (rys. 8a÷d).

W przypadku frezowania z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostrze] 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] (rys. 9a).

Wartość współczynnika skrócenia wióra λ_l wykazywała tendencje malejącą i rosnącą w zależności do zwiększającej się drogi skrawania L_s (rys. 9b).

Na rysunku 10a÷d przedstawiono postacie wiórów dla posuwu $f_z = 0,125$ [mm/ostrze]. Dla drogi skrawania $L_s = 286, 503, 660$ [m] powstałe wióry mają różną postać. Otrzymano wióry długie i śrubowe otwarte oraz taśmowe lekko splątane. 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/ostrze] 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 (rys. 11a i b).

Na rysunku 12a÷h przedstawiono wióry dla posuwu $f_z = 0,078$ [mm/ostrze] i prędkości skrawania $v_c = 196$ [m/min]. Powstałe wióry mają postać śrubową otwartą krótką. Dla początkowej drogi skrawania $L_s = 108 ÷ 324$ [m] postać wióra jest bardziej skręcona i zwarta. Wraz ze zwiększeniem długości drogi skrawania wióry stają się mniej zwarte i przypominają postać pasmową.

4. PODSUMOWANIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

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

Dla posuwu $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] 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/ostrze] uzyskano wióry śrubowe otwarte, przechodzące w śrubowe stożkowe dla dłuższej drogi skrawania.

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

Dla posuwu $f_z = 0,078$ [mm/ostrze] 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 śpęczenia λ_h i skrócenia λ_l wióra można zobrazować następująco: dla frezowania z posuwem $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] wartość współczynnika śpęczenia λ_h był w zakresie od ~ 4 do $\sim 3,4$. Dla posuwu $f_z = 0,08$ [mm/ostrze] wartość współczynnika śpęczenia λ_h wynosiła od $\sim 3,8$ do $\sim 2,5$ oraz dla frezowania z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostrze] wartość współczynnika śpęczenia λ_h wynosiła od $\sim 2,6$ do $\sim 2,2$ przy prędkości skrawania $v_c = 440$ [m/min]. Czyli dla mniejszych wartości posuwu współczynnik śpęczenia był większy.

Odwrotne zależności uzyskano dla wartości współczynnika skrócenia λ_l . Dla mniejszego posuwu f_z uzyskano mniejsze wartości współczynnika skrócenia λ_l i tak: dla posuwu $f_z = 0,04$ [mm/ostrze] wartości współczynnika skrócenia λ_l zawierały się w zakresie od $\sim 0,4$ do $\sim 0,25$, dla posuwu $f_z = 0,08$ [mm/ostrza] w zakresie od $\sim 0,42$ do $\sim 0,35$ i z posuwem $f_z = 0,125$ [mm/ostrza] wartości współczynnika skrócenia λ_l zawarły się w zakresie od $\sim 0,72$ do $\sim 0,6$.

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

Na uzyskane wyniki współczynników śpęczenia λ_h i skrócenia λ_l 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 śpęczenia i skrócenia wióra.

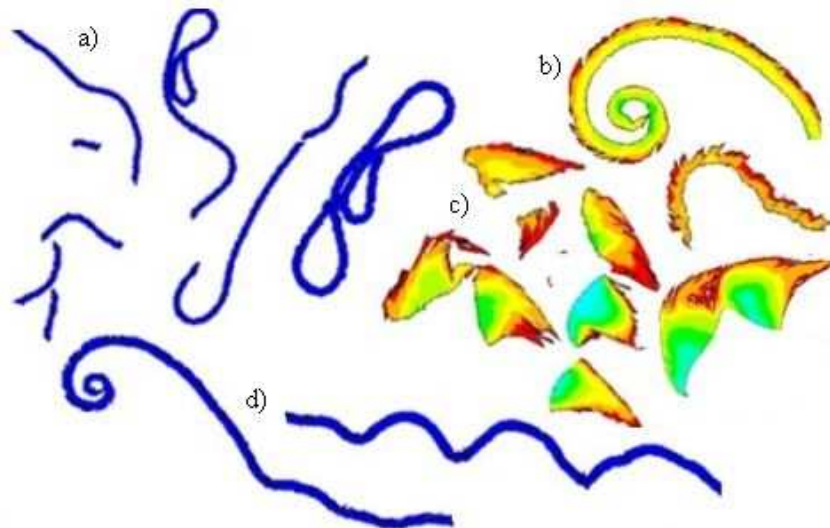
5. ANALIZY NUMERYCZNE

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 obrobionej. 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/lepko-plastycznego, 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 13. Obliczony współczynnik śpęczenia λ_{hnum} na podstawie pomiarów geometrii wiórów otrzymanych w analizach numerycznych przedstawiony został w tabeli 1.

Na rysunku 13 zestawiono wybrane wyniki kształtów wiórów przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu przemieszczania nieodkształcalnego ostrza skrawającego ($E \rightarrow \infty$) po sprężysto/lepko-plastycznym 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 statycz-

nego wynosiła $\mu_s = 0,1$, współczynnika dynamicznego $\mu_d = 0,05$. Obiekt podzielono na 60000 elementów skończonych typu PLANE162, 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. 13. Kształty wiórów otrzymane w analizach numerycznych: a) wióry splątane i splątane 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 13 zauważyć można różne kształty wiórów dla różnych wartości prędkości skrawania v_c i posuwu f_z . Zaobserwowano wióry splątane na początku skrawania z $v_c = 440$ [m/min] by w trakcie dłuższego skrawania z tą samą prędkością przeszły w wióry splątane 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 splątane. 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 splątaną. 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 wyplwki 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 określić: możliwość 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).

6. WNIOSKI

1. 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, odłamkowych poprzez wióry splątane, wstęgowe, 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.
2. 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.
3. Dzięki wynikom uzyskanym w symulacji można zoptymalizować projektowany proces skrawania. 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 [1, 3, 5, 6], dowolnego materiału przedmiotu [2], dowolnego sposobu utwierdzenia przedmiotu, różnych warunków tarcia w obszarze kontaktu, dowolnej prędkości narzędzi [4].

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chodór J., Kukielka L.: *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 2008.
- [2] Chodór J., Kukielka L., *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. Journal PAMM, Volume 7, Issue 1, pp. 4030031-4030032, 2008.
- [3] Chodór J., Forsysiewicz M., Kukielka L.: *Analiza numeryczna tworzenia wyływki i wióra dla sprężysto/lepkoplastycznego podłoża w procesie przemieszczania klina*. XXXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk 2011.
- [4] Forsysiewicz M., Chodór J., Kukielka L.: *Modelowanie dyskretne i analiza numeryczna procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym metodą elementów skończonych*. Obrabiarki sterowane numerycznie i programowanie operacji w technikach wytwarzania. Zakład Poligraficzny Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
- [5] Chodór J., Kukielka L., Storch B.: *New method of determination of tool rake angle on the basis of crack angle of specimen in tensile test and numerical simulations*. Ninth International Conference on Surface Effects and Contact Mechanics Computational Methods and Experiments, Algarve, Portugal, 2009.
- [6] Chodór J., Kukielka L.: *Numerical analysis of the influence of abrasive grain geometry and cutting angle on states of strain and stress in the surface layer of object*, Surface/Contact Conference, Wessex Institute, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, UK 2007.
- [7] Kukielka L., Kukielka K.: *Modelling and analysis of the technological processes using finite element method*, Mechanik 2015. (w niniejszym czasopiśmie).
- [8] Cichosz P.: *Narzędzia skrawające*, WNT, Warszawa 2006.
- [9] Żurawski Ł., Pałka T., Zawada-Tomkiewicz A.: *Poprawienie efektywności frezowania powierzchni płaskich*. Szkoła Obróbki Skrawaniem - Efektywne wytwarzanie, Wrocław, 2012.