

Minimalna grubość warstwy skrawanej w obszarze zaokrąglenia krawędzi skrawającej

Minimal thickness of cut layer in the vicinity of the cutting edge rounding

BORYS STORCH
ANNA ZAWADA-TOMKIEWICZ
ŁUKASZ ŻURAWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.154>

Przedstawiono ocenę wyników badań eksperymentalnych przydatną do wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas obróbki narzędziami jednoostrzowymi o zdefiniowanej geometrii. Po przeprowadzeniu badań dla kilku materiałów skrawanych i gatunków materiałów narzędziowych opracowano równania ekstrapolacji z zachowaniem stałej temperatury skrawania. Czynniki zakłócające mechanizm oddzielania, wpływające na pomiary składowych siły i temperatury skrawania, zależą od materiału skrawanego i zastosowanego narzędzia.

SŁOWA KLUCZOWE: siła skrawania, temperatura, toczenie swobodne ortogonalne, zaokrąglenie krawędzi skrawającej

The article presents an evaluation of the results of experimental tests useful for determining the minimum thickness of cut during machining of single-point tools of defined geometry. After completing the tests for several cut materials and types of tool materials, extrapolation equations were developed while maintaining constant temperature. Factors interfering with the mechanism of separation, influencing the measurements of the components of the cutting force and the cutting temperature depend on the cut material and the material of the tool.

KEYWORDS: cutting force, temperature, free orthogonal cutting, cutting edge rounding

Z uwagi na bardzo dynamiczny przebieg zjawiska oddzielania skrawanego materiału przy zamianie naddatku w wiór, łatwo zaobserwować istnienie ograniczonej grubości warstwy skrawanej. Zbliżaniu krawędzi skrawającej do przedmiotu towarzyszy – zanim powstanie widoczny wiór z oddzielenego materiału – charakterystyczny szum. Oznacza to kontakt ostrza z przedmiotem obrabianym bez tworzenia wióra – skrawanie w obszarze poniżej minimalnej grubości warstwy skrawanej.

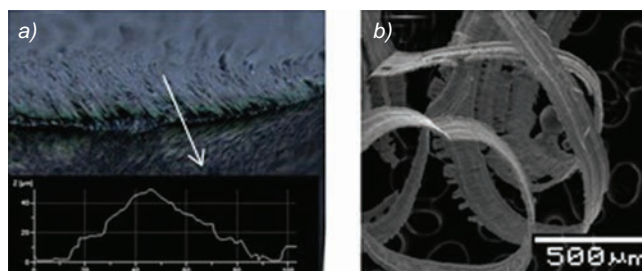
Analizy prawdopodobnej minimalnej grubości warstwy skrawanej były przedmiotem wielu badań ze względu na coraz powszechniejsze mikroskrawanie i obróbkę z minimalnym naddatkiem (tzw. cienkich warstw). Tylko niektóre z prac badawczych zostały wskazane w spisie literatury. Odnoszą się one do badań realizowanych w poszczególnych ośrodkach w Polsce.

Część z tych analiz dotyczy opracowania modelu na podstawie założeń upraszczających materiałowych i geometrycznych [2, 3, 6–8]. Inne badania odnoszą się do przeprowadzania eksperymentów oraz określania minimalnej grubości warstwy skrawanej przez stykowy bezpośredni

miar parametru, analizę mikrotwardości oraz analizę stref kontaktu narzędzia i powierzchni obrabianej z użyciem optycznych przyrządów pomiarowych [1, 4, 5, 9]. Także i te badania mają wiele ograniczeń w zastosowaniu przemysłowym. Ograniczenia wykorzystania metod teoretycznych i eksperymentalnych wynikają ze stochastycznego charakteru zjawiska oddzielania wióra.

Minimalna grubość warstwy skrawanej zależy od warunków skrawania, w tym właściwości materiału obrabianego oraz materiału i geometrii narzędzia. W przypadku materiałów o ograniczonej zdolności do tworzenia wióra stosowane są techniki obniżenia prawdopodobnej grubości warstwy skrawanej. Jedną z nich jest zmiana właściwości materiału obrabianego przez zmianę temperatury skrawania i naprężeń w materiale obrabianym – czyli warunków termodynamicznych skrawania.

Przykładowo: przy skrawaniu stopów tytanu i magnezu stosowane były warunki kriogeniczne w celu obniżenia minimalnej grubości warstwy skrawanej, w innych badaniach zmniejszono promień zaokrąglenia ostrza skrawającego aż do uzyskania wióra ażurowego (rys. 1) i całkowitego zaniku procesu skrawania.



Rys. 1. Ostrze skrawające CD10 (a), wiór ażurowy (skrawanie swobodne ortogonalne z posuwem 0,001 mm/obr., prędkością skrawania 150 m/min i głębokością skrawania 900 µm) (b)

Celem niniejszego artykułu jest opisanie sposobu szczegółowego badania związanego z wyznaczeniem prawdopodobnej minimalnej grubości warstwy skrawanej.

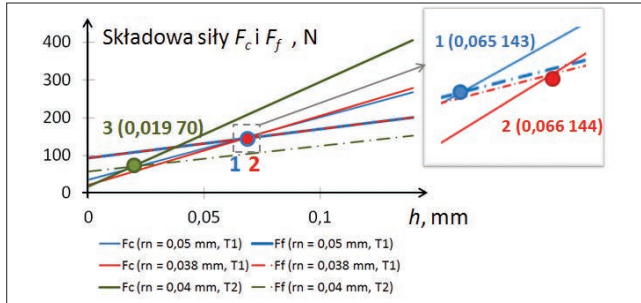
Gdy pojawia się wiór, to w relacji do promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n zachodzi zjawisko dekohezji w obszarze stanowiącym ułamek wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Wbrew modelowym założeniom przejście od naprężeń sprężystego oddziaływania krawędzi skrawającej do objętości zdejmowanego wióra nie zachodzi w jednej domniemanej płaszczyźnie (jak uważa wielu autorów), ale w określonej objętości materiału. Jest to poważnym utrudnieniem w modelowaniu.

W badaniach modelowych stwierdzono, że granica wytrzymałości materiału skrawanego – początek dekohezji – wyprzedza krawędź o mniej więcej dwie grubości warstwy skrawanej.

* Prof. dr hab. inż. Borys Storch (borys.storch@tu.koszalin.pl), prof. nadzw. dr hab. inż. Anna Zawada-Tomkiewicz (anna.zawada-tomkiewicz@tu.koszalin.pl), dr inż. Łukasz Żurawski (lukasz.zurawski@tu.koszalin.pl) – Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej

Ekstrapolowanie wartości składowych siły do minimalnej grubości warstwy skrawanej

Można zaobserwować liniowy przebieg zależności między składowymi siłami skrawania F_c i F_f w funkcji grubości warstwy skrawanej h w obszarze ograniczonym przez promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n (rys. 2).



Rys. 2. Ekstrapolacja składowych siły skrawania do $h = 0$ dla dwóch różnych temperatur T_1 i T_2 (stal C35, węgliki spiekane)

Na rys. 2 zestawiono wyznaczone z ekstrapolacji wyrażenia na zależności składowych siły skrawania w funkcji grubości warstwy skrawanej h . Składowe dla tych samych warunków skrawania i ustalonej temperatury są sobie równe w przypadku zbliżonych wartości grubości warstwy skrawanej (pkt 1 i 2). Jeśli temperatury skrawania są różne, składowe przecinają się dla grubości warstwy skrawanej bardziej odległej (pkt 3).

Zebrano wyniki badań czterech materiałów obrabianych ze zmiennymi posuwami i prędkościami skrawania w warunkach określanych jako swobodne i prostokątne. Podczas opracowywania wymienionych zależności przeprowadzono obliczenia, aby przebiegały one w warunkach ustalonej wartości temperatury. Badania realizowano dla technologicznych parametrów odpowiadających w większości warunkom skrawania wykończeniowego, czyli poniżej posuwu $f = h < 0,2$ mm.

Obliczenia wykonane na kolejnych etapach badań eksperymentalnych toczenia swobodnego zestawiono na rys. 3.

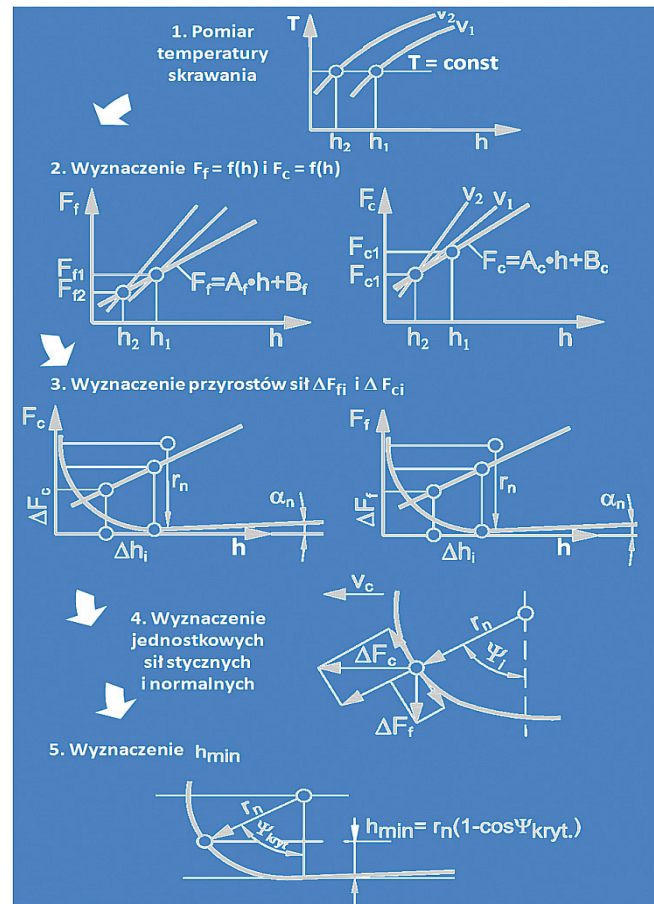
W warunkach arbitralnie ustalonych, ograniczonych możliwościami badań, po opracowaniu statystycznym wyznaczono zestawy równań liniowych dla zmiennych materiałów skrawanych i narzędzi dla stałych temperatur skrawania. Wybór równań liniowych do ekstrapolacji w zależności od grubości warstwy skrawanej wynikał z analizy wymiarowej. Na rys. 3 są to układy współrzędnych dla funkcji $F_c = f(h)$ i $F_f = f(h)$.

W kolejnym kroku wyliczono przyrosty składowych siły oraz ilorazy A_f/A_c , które są rozumiane jako opory jednostkowe składowych siły skrawania [6–7] dla szerokości skrawania 1 mm.

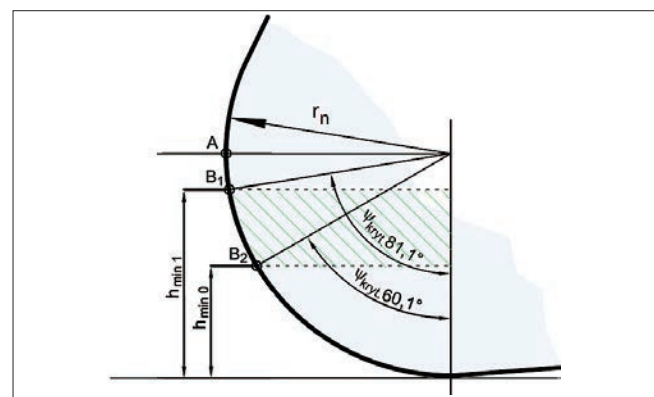
W obliczeniach, których wyniki zamieszczono na rys. 4–6, przyjęto następujące założenia:

- zmierzone wartości promienia z przedziału $0,016 \pm 0,05$ mm zamodelowano jako wynik ilorazu A_f/A_c zmieniającego się od 0 do 1,
- pomiary temperatury przeprowadzono za pomocą termopary obcej dla tego samego noża składanego,
- pomiary temperatury za pomocą termopary naturalnej dla noża ze stali szybko tnącej przeprowadzono w układzie materiał–przedmiot–narzędzie,
- szerokość warstwy skrawanej była ustalona i wynosiła 1 mm,
- w pracy [8] opisano metodykę zapewniającą powtarzalność wyników badań i stałość temperatury skrawania dla zmiennych wartości posuwu i prędkości skrawania,

- otrzymane równania F_c i F_f , zależne tylko od h – grubości warstwy skrawanej, są wynikiem ekstrapolacji w badanym obszarze (od 0 do r_n).



Rys. 3. Algorytm wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej z uwzględnieniem składowych siły i temperatury skrawania



Rys. 4. Przydatne do rozważań wartości na rysunku modelowym toczenia swobodnego

Wprowadzenie uporządkowanych wartości grubości warstwy skrawanej z przedziału od $h_{\min 0}$ do $h_{\min 1}$ i kątów Ψ_{kryt} z przedziału od $67,50$ do $77,50$ pozwala na wyznaczenie prawdopodobnych wartości grubości warstwy skrawanej. Grubości te umownie w literaturze oznaczane są jako minimalne i wyznaczone jako różnica promienia r_n i odcinków \overline{AB}_i :

$$\overline{AB}_i = \sin(90^\circ - \psi_{\text{kryti}}) r_n \quad (1)$$

$$h_{\min} = r_n - \overline{AB}_i \quad (2)$$

gdzie: \overline{AB}_i – zmienne odcinki zależne od ψ_{kryti} .

Dla prezentowanych badań wartości h_{\min} zamykają się w przedziale od 0,010 do 0,031 mm i wskazują na otrzymany przedział dla promienia najmniejszego $r_n = 0,016$ mm oraz największego $r_n = 0,05$ mm względem największego, w tym przypadku zmierzono 0,05 mm. Pozostałe zmierzone rzeczywiste promienie mieszczą się w ten sposób w przedziale od 0 do 1.

$$h_{\min 0} = \frac{0,016}{0,05} \approx 0, \quad h_{\min 1} = \frac{0,05}{0,05} = 1 \quad (3)$$

Analiza wyników i podsumowanie

Badania wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej zrealizowano w warunkach ustalonej wartości temperatury skrawania w każdym przypadku obróbki. W pracy [7] wskazano na zależności posuwu i prędkości skrawania – ich wzajemną kompensację. Dobór posuwu i prędkości skrawania pozwala na utrzymywanie ustalonej temperatury skrawania poprzez zwiększanie jednej i zmniejszanie drugiej z tych wartości. Dla liniowych przebiegów składowych F_c i F_f siły skrawania w obszarze promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ograniczonej promieniem r_n zgodnie z rys. 2 wyznaczono współczynniki A_c i A_f . Wartości współczynników zależą tylko od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n oraz parametrów skrawania. Współczynniki kierunkowe w $F_c = f(h)$ i $F_f = f(h)$ umożliwiają wyznaczenie wartości kąta krytycznego.

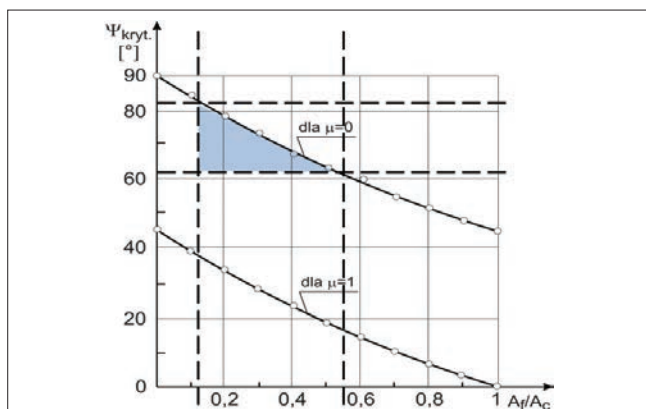
$$\psi_{\text{kryt}} = \text{arccotg} \frac{A_f}{A_c} \quad (4)$$

Poszukiwana współrzędna kątowa położenia punktu na zaokrągleniu krawędzi, dla której grubość warstwy skrawanej jest równa umownej minimalnej grubości h_{\min} , określa warunki sprzyjające stworzeniu wióra.

Występujący w równaniu (4) iloraz dla najczęściej skrawanych materiałów zawiera się w przedziale między zerem a jednością, ponieważ wartość A_f jest mniejsza niż A_c .

Przedział zmienności ilorazu zobrazowano na rys. 5. Dodatkowo iloraz składowej F_f do składowej F_c siły skrawania, oznaczony jako współczynnik tarcia μ wrysowano w postaci górnego i dolnego przedziału dopuszczalnych analitycznych wartości. Krzywa dolna i krzywa górna wyznaczają graniczny obszar zmienności kąta dla przyjętego przedziału zmienności ilorazu. Krzywa górna dla warunku $\mu = 0$ zakłada występowanie tylko siły normalnej, dolna zaś – gdy siła styczna i siła normalna są sobie równe.

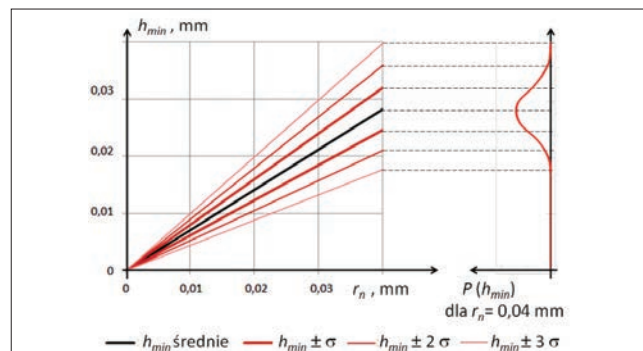
Obszar wyróżniony na rys. 5 wskazuje przedział zmienności danych eksperymentalnych. Stanowi on niewielki, ograniczony obszar związany z prawdopodobną wartością minimalnej grubości warstwy skrawanej. Z badań różnych materiałów obrabianych (gatunków stali, żeliwa,



Rys. 5. Wpływ ilorazu A_f/A_c na zmiany wartości kąta ψ_{kryt}

stopów aluminium i miedzi) oraz narzędzi z węgla spiekanego i stali szybko tnącej uzyskano przedział wartości kąta krytycznego, który pokazano na rys. 6.

Najbardziej prawdopodobne wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej dla promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej wynikają z przedziału zmienności kąta krytycznego. Analiza prawdopodobieństwa rozkładu zrealizowana dla minimalnej grubości warstwy skrawanej, zależnej od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dla $r_n = 0,04$ mm, uwzględnia rzeczywiste wartości odchylenia standardowego.



Rys. 6. Zależność minimalnej grubości warstwy skrawanej od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej oraz rozkład prawdopodobieństwa wartości h_{\min} dla $r_n = 0,04$ mm

Najbardziej prawdopodobne wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej dla wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej wynikają z przedziału zmienności kąta krytycznego. Analiza prawdopodobieństwa rozkładu zrealizowana dla wcześniej wyliczonej minimalnej grubości warstwy skrawanej, zależnej od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dla $r_n = 0,04$ mm, uwzględnia rzeczywiste wartości odchylenia standardowego.

Po podstawieniu do równania z pracy [7] wzór określający minimalną grubość przyjmuje postać:

$$h_{\min} = r_n \left(1 - \frac{A_f/A_c}{\sqrt{1 + (A_f/A_c)^2}} \right) \quad (5)$$

która, jak wykazano, zależy od promienia zaokrąglenia r_n oraz współczynników, które można uznać za składowe oporu skrawania w układzie prostokątnym.

Przedstawione wyniki pozwalają na dalsze prace związane z modelowaniem stanu naprężeń metodą MES.

LITERATURA

- Chwalczuk T., Kawalec M., Szablewski P. „Wybrane właściwości warstwy wierzchniej po toczeniu tradycyjnym i ukośnym ostrzami ceramicznymi nadstopu niklu Inconel 718 po nagrzewaniu laserowym”. *Mechanik*. 7–8 (2012): s. 409–414.
- Grzesik W. „Mechanics of cutting and chip formation”. J. Davim (red.) *Machining of Hard Materials*. London: Springer, 2011.
- Harasymowicz J., Gawlik J., Warziniak W. „Sposób określania minimalnej grubości warstwy skrawanej według patentu P. 252621”. *Po- litechnika Krakowska*, 1988.
- Makiela W., Gogolewski D., Nowakowski Ł. „Wyznaczanie minimalnej grubości warstwy skrawanej z wykorzystaniem dwuwymiarowej transformaty falkowej”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1632–1633.
- Nowakowski Ł., Miko E. „Pomiar minimalnej grubości warstwy skrawanej dla procesu frezowania czołowego”. *Mechanik*. 7 (2013): s. 521–525.
- Storch B., Zawada-Tomkiewicz A. “Distribution of unit forces on the tool nose rounding in the case of constrained turning”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 57 (2012): s. 1–9.
- Storch B., Zawada-Tomkiewicz A. “Distribution of unit forces on the tool edge rounding in the case of finishing turning”. *Int J Adv Manuf Technol*. 60 (2012): s. 453–461.
- Storch B., Zawada-Tomkiewicz A., Żurawski Ł. “Termodynamiczne zależności w toczeniu swobodnym”. *Mechanik*. 10 (2016): s. 1502–1503.
- Wojciechowski S., Twardowski P., Wieczorowski M. “Surface texture analysis after ball end milling with Darius surface inclination of hardened steel”. *Metrology and Measurement Systems*. 21/1 (2014): s. 145–156.