

Metody szacowania minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas obróbki narzędziami o zdefiniowanej geometrii

Methods of minimum uncut chip thickness estimation during cutting with defined geometry tools

SZYMON WOJCIECHOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.104>

Dokonano przeglądu metod szacowania minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas obróbki narzędziami o zdefiniowanej geometrii. Wprowadzono podział metod na: doświadczalne, analityczne i numeryczne. Wykazano, że stosowane metody dotyczą głównie procesu toczenia ortogonalnego, niewiele jest natomiast prac dotyczących narzędzi o zaokrąglonym ostrzu.

SŁOWA KLUCZOWE: skrawanie, minimalna grubość warstwy skrawanej, narzędzia o zdefiniowanej geometrii

Methods of minimum uncut chip thickness estimation during cutting with defined geometry tools were presented. Approaches were divided into experimental, analytical, and numerical. It has been presented that applied methods concern mainly orthogonal turning, however only a few consider tools with rounded cutting edges.

KEYWORDS: cutting, minimum uncut chip thickness, tools with defined geometry

Pojęcie minimalnej grubości warstwy skrawanej

Ze względu na występowanie odkształceń sprężystych materiału obrabianego i niezerowy promień zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej r_n , pewna objętość materiału napływającego na ostrze nie jest przekształcana w wiór, lecz włączana pod powierzchnię przyłożenia A_α narzędzia. Należy podkreślić, że zjawisko to nabiera istotnego znaczenia zwłaszcza w przypadku obróbki precyzyjnej, gdzie warstwa skrawana jest cienka.

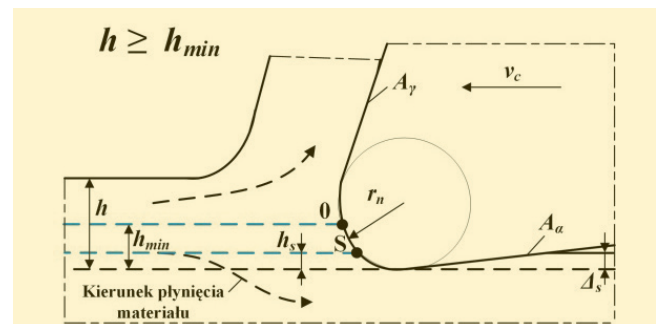
Na rys. 1 przedstawiono schemat przemieszczania się warstwy materiału sprężysto-plastycznego względem ostrza podczas skrawania swobodnego ortogonalnego. Jeśli grubość warstwy skrawanej mieści się w przedziale: $0 < h < h_s$, materiał ulega jedynie odkształceniom sprężystym o wartości Δ_s i po przejściu ostrza powraca do położenia nominalnego. Zwiększenie grubości warstwy skrawanej do wartości mieszczącej się w przedziale: $h_s \leq h < h_{min}$ wywołuje odkształcenia sprężysto-plastyczne oraz plastyczne materiału. Efektem tego jest formowanie się wypłytki plastycznej (na styku powierzchni natarcia ostrza z materiałem obrabianym), która nie ulega przekształceniu w wiór. Dalsze zwiększanie grubości warstwy skrawanej do wartości zawartej w przedziale: $h \geq h_{min}$ prowadzi dopiero do zainicjowania skrawania i tym samym zjawiska formowania się wióra.

Z tych rozważań wynika, że jednym z najistotniejszych czynników charakteryzujących dekohezję materiału jest minimalna grubość warstwy skrawanej – h_{min} . Wielkość ta wyznacza krytyczną wartość grubości warstwy skrawanej, inicjującą ścinanie i przekształcanie obrabianego materiału w wiór.

Jak wynika z badań [1], minimalna grubość warstwy skrawanej jest zależna od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, parametrów obróbkowych, a także właściwości materiału obrabianego i narzędziowego. Tę zależność można opisać ogólnym równaniem:

$$h_{min} = k \cdot r_n \quad (1)$$

Współczynnik k zwany jest znormalizowaną minimalną grubością warstwy skrawanej (*normalized minimum uncut chip thickness*). Jego wartość zależy od właściwości mechanicznych materiału obrabianego i narzędziowego, parametrów skrawania (głównie prędkości – v_c), a także zjawisk tribologicznych na styku materiału obrabianego z narzędziem. W związku z tym problematyka szacowania h_{min} opiera się głównie na miarodajnym wyznaczeniu wartości parametru k .



Rys. 1. Schemat przemieszczania się warstwy materiału sprężysto-plastycznego względem ostrza podczas skrawania swobodnego ortogonalnego; h – grubość warstwy skrawanej, h_{min} – minimalna grubość warstwy skrawanej, h_s – graniczna grubość warstwy skrawanej odpowiadająca odkształceniom sprężystym, Δ_s – powrót sprężysty materiału

Metody analityczne określania minimalnej grubości warstwy skrawanej

Metody analityczne uwzględniają zjawiska fizyczne występujące podczas formowania wióra i są oparte na modelach konstytutywnych materiału obrabianego lub identyfikacji punktu stagnacji materiału.

Model opracowany w [2], dotyczący mikrofrezowania stali 1040 i stopu Al6082-T6, uwzględnia kryterium przejścia pomiędzy odkształceniem plastycznym a mikroskrawaniem w próbie zarysowania i odnosi je do mikrofrezowania. W oparciu o ten model znormalizowana minimalna grubość warstwy skrawanej wyrażona jest w postaci:

$$k = \frac{h_{min}}{r_n} = 0,5 - \frac{\tau_a}{\sigma} \quad (2)$$

gdzie: τ_a – wytrzymałość na ścinanie złączy adhezyjnych, σ – naprężenie poślizgu umocnionego przez zgniot wióra.

Aby wyznaczyć współczynnik k opisany wzorem (2), należy wyznaczyć wartości parametrów τ_a oraz σ .

* Dr inż. Szymon Wojciechowski (szymon.wojciechowski@put.poznan.pl) – Zakład Obróbki Skrawaniem Politechniki Poznańskiej

W trakcie skrawania wartość naprężenia poślizgu σ zależy od temperatury, a także wielkości oraz prędkości odkształcenia materiału obrabianego. Dlatego, w celu miarodajnego wyznaczenia wartości naprężenia σ , w zakresie wysokich wartości temperatury i odkształceń stosowane są tzw. modele konstytutywne. Według badań [3] model konstytutywny Johnsona-Cooka może być z powodzeniem stosowany do określania wartości naprężenia poślizgu dla stopów aluminium i tytanu. Jego dokładność jest ograniczona w odniesieniu do modelowania naprężeń σ dla stali węglowych. W przypadku tych materiałów alternatywę może stanowić model konstytutywny Oxley'a.

Model Johnsona-Cooka wyraża naprężenie poślizgu w funkcji temperatury, odkształcenia oraz prędkości odkształcenia materiału obrabianego, zgodnie ze wzorem:

$$\sigma = \left[A + B(\varepsilon)^{n_t} \right] \cdot \left[1 + m_t \cdot \ln(v_\varepsilon) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T_A - T_R}{T_T - T_R} \right)^{v_t} \right] \quad (3)$$

gdzie: A , B – stałe wyznaczone doświadczalnie, ε – zastępcze odkształcenie plastyczne, n_t – współczynnik umocnienia, m_t – stała opisująca wrażliwość prędkości odkształcenia, v_ε – prędkość odkształcenia plastycznego, T_A – temperatura absolutna, T_R – temperatura odniesienia, T_T – temperatura topnienia, v_t – współczynnik odkształcenia termicznego.

Zastosowanie modelu Oxley'a umożliwia określenie wartości naprężenia poślizgu w postaci funkcji wykładniczej odkształcenia:

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^{n_1} \quad (4)$$

gdzie: σ_1 – współczynnik wytrzymałościowy, n_1 – wykładnik potęgowy uwzględniający umocnienie materiału poprzez zgmiot.

Do wyznaczenia wartości wytrzymałości na ścinanie złączy adhezyjnych τ_a podczas skrawania można zastosować analityczny model opracowany przez Ernsta i Merchanta. Podejście to oparte jest na równaniu Clausiusa-Clapeyrona:

$$\tau_a = 0,142 Q_m \cdot \rho \cdot \ln \left(\frac{T_T}{T_{w-n}} \right) \quad (5)$$

gdzie: Q_m – ciepło topnienia materiału, ρ – gęstość materiału, T_{w-n} – temperatura na powierzchni styku wiór-narzędzie.

Wyznaczenie współczynników w równaniach (3–5) jest możliwe poprzez zastosowanie teorii strefy poślizgu (*slip-line field*), opracowanej w [4]. Podejście to odnosi się do procesów mikroobróbki skrawaniem, gdyż uwzględnia źródła ciepła pochodzące od: energii mechanicznej ścinania wzdłuż płaszczyzny poślizgu, tarcia wióra o powierzchnię natarcia, a także zjawiska bruzdowania i tarcia w obszarze zaokrąglonego promienia krawędzi skrawającej.

Kolejną grupę modeli analitycznych stanowią podejścia oparte na wyznaczeniu tzw. punktu stagnacji 0, zlokalizowanego na zaokrąglonej krawędzi skrawającej ostrza. W punkcie tym występuje zmiana kierunku płynięcia materiału obrabianego w stosunku do ostrza. W związku z tym położenie punktu 0 wyznacza wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej. Należy podkreślić, że punkt stagnacji stanowi granicę pomiędzy rzeczywistą

powierzchnią natarcia a rzeczywistą powierzchnią przyłożenia ostrza.

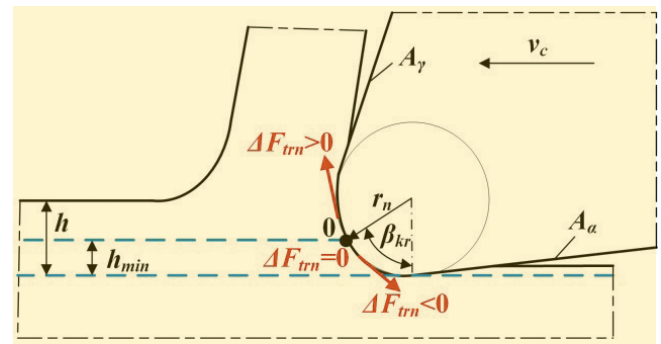
Autorzy [5] sformułowali analityczny model h_{min} odnoszący się do toczenia. Został on oparty na analizie sił stycznych F_{trn} oddziałujących na zaokrągloną krawędź skrawającą ostrza. Sformułowane modele siły zostały wyrażone jako liniowa funkcja grubości warstwy skrawanej. Autorzy przyjęli założenie, że przyrost sił stycznych w punkcie stagnacji jest zerowy ($\Delta F_{trn} = 0$ – rys. 2). Umożliwiło to wyznaczenie kąta stagnacji β_{kr} zgodnie z zależnością:

$$\beta_{kr} = \text{arccctg} \left(\frac{a_f}{a_c} \right) \quad (6)$$

gdzie: a_f , a_c – współczynniki kierunkowe w liniowych równaniach regresji siły posuwowej i siły skrawania.

Wyznaczenie wyrażenia opisującego kąt stagnacji β_{kr} umożliwia w następstwie sformułowanie równania minimalnej grubości warstwy skrawanej:

$$h_{min} = r_n (1 - \cos \beta_{kr}) = r_n \left[1 - \cos \left(\text{arccctg} \left(\frac{a_f}{a_c} \right) \right) \right] \quad (7)$$



Rys. 2. Rozkład zmienności sił stycznych wzdłuż zaokrąglonej krawędzi skrawającej ostrza podczas skrawania ortogonalnego

Metody symulacyjne określania minimalnej grubości warstwy skrawanej

Kolejna grupa metod wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej bazuje na symulacji procesu skrawania w oparciu o obliczenia numeryczne. Podejścia te wykorzystują głównie metodę elementów skończonych (MES) lub dynamikę molekularną (MD).

Z przeglądu literatury wynika, że modelowanie MES w odniesieniu do predykcji minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas obróbki metali bazuje na zastosowaniu modeli konstytutywnych Johnsona-Cooka oraz Bammanna-Chiesa-Johnsona (BCJ) [6]. Autorzy [7] zastosowali model MES oparty na równaniu Johnsona-Cooka w odniesieniu do symulacji procesu formowania wióra i h_{min} w trakcie ortogonalnego mikroskrawania miedzi ostrzem z polikrystalicznego diamentu.

W odniesieniu do obróbki precyzyjnej, realizowanej z małymi grubościami warstwy skrawanej, tradycyjny model Johnsona-Cooka może się charakteryzować obniżoną dokładnością. Przyczyną tego jest tzw. efekt rozmiarowy (*size effect*), wywołany występowaniem ujemnych wartości efektywnych kątów natarcia podczas obróbki z grubościami warstwy skrawanej w zakresie $h \approx r_n$. Skutkuje to intensywnym wzrostem naprężeń ściskających w obszarze zaokrąglonej krawędzi ostrza, mogącym prowadzić do znacznego umocnienia materiału obrabianego.

W związku z tym autorzy [8] zaproponowali zmodyfikowany model Johnsona-Cooka z uwzględnieniem teorii plastyczności gradientu odkształcenia Flecka-Hutchinsona, w celu oszacowania minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas mikrofrezowania obwodowego miedzi. Opracowany przez nich model konstytutywny uwzględniał temperaturę, wielkość oraz prędkość odkształcenia materiału obrabianego, a także długość głównej strefy poślizgu.

Symulacji procesu formowania wióra wraz z oszacowaniem minimalnej grubości warstwy skrawanej można dokonać również w oparciu o metodę dynamiki molekularnej (*molecular dynamics* – MD). Wykorzystuje ona zasady dynamiki newtonowskiej w odniesieniu do atomów, przy czym równanie Newtona jest następnie rozwiązywane przez całkowanie numeryczne trajektorii każdego atomu [9].

W dynamice molekularnej siły oddziałujące na atomy są obliczane na bazie funkcji potencjału, które opisują energetyczne relacje pomiędzy atomami, uwzględniając odległość i kąt wiązania. W ten sposób symulacje MD uwzględniają szczegółowo charakterystykę materiału i umożliwiają dokładne oszacowanie dyslokacji, energii właściwej skrawania i propagacji pęknięć.

Metody doświadczalne określania minimalnej grubości warstwy skrawanej

Ostatnia grupa metod wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej opiera się na badaniach doświadczalnych. Metody doświadczalne umożliwiają oszacowanie h_{\min} zarówno w sposób bezpośredni, np. poprzez ocenę topografii i chropowatości obrabianej powierzchni, jak i pośrednio, przez pomiar i analizę zjawisk fizycznych skorelowanych ze zjawiskiem minimalnej grubości warstwy skrawanej (np. pomiar wartości składowych siły całkowitej, emisji akustycznej).

Autorzy [10] ocenili topografię powierzchni kruchego SiC, uzyskaną w wyniku strugania rowka stożkowego, w celu bezpośredniego wyznaczenia minimalnej grubości warstwy skrawanej i granicznej grubości przelomu plastycznego. Badania przeprowadzono na ultraprecyzyjnej tokarce z prędkością skrawania $v_c = 1,5$ mm/s oraz z kątem pochylenia próbki względem poziomu wynoszącym $0,03^\circ$. Dodatkowo, w celu zminimalizowania wpływu nominalnej chropowatości powierzchni materiału na otrzymane wyniki, próbkę poddano polerowaniu.

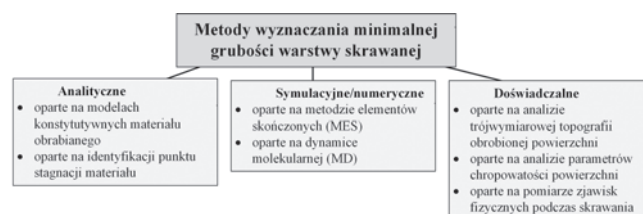
Autorzy [11] opracowali metodę wyznaczania h_{\min} bazującą na pomiarze składowych siły całkowitej i chropowatości powierzchni obrabianej w odniesieniu do mikrofrezowania stali 1045. Z myślą o identyfikacji zakresu występowania minimalnej grubości warstwy skrawanej przyjęli stosunek oporu właściwego skrawania do chropowatości powierzchni k_c/Ra . Zgodnie z ich założeniami współczynnik ten informuje o intensywności zjawiska bruzdowania i powstawania mikropęknięć materiału. Dlatego obszar, w którym obserwowany jest gwałtowny wzrost wartości k_c/Ra , jest związany z obniżeniem grubości warstwy skrawanej poniżej wartości h_{\min} .

Wyniki badań prezentowane w [11] wykazały, że dla stali 1045, zakres występowania h_{\min} odpowiada wartościom k_c/Ra zawartym w przedziale $200 \div 280$ GPa/ μm . Zostało to potwierdzone również analizą SEM obrabionych powierzchni.

Podsumowanie

Wobec intensywnie rozwijającej się technologii obróbki precyzyjnej istotność problematyki minimalnej grubości

warstwy skrawanej przyczyniła się do opracowania na przełomie kilkudziesięciu ostatnich lat wielu metod pomiarowych i obliczeniowych. W sposób umowny metody te można podzielić na analityczne, symulacyjne oraz doświadczalne (rys. 3).



Rys. 3. Podział metod wyznaczania minimalnej grubości warstwy skrawanej

Niezależnie od podejścia, stosowane przez badaczy metody szacowania minimalnej grubości warstwy skrawanej dotyczą zazwyczaj skrawania swobodnego ortogonalnego (głównie toczenia). Niewiele jest natomiast modeli odnoszących się do skrawania narzędziami o zaokrąglonym zarysie krawędzi. Tymczasem w praktyce tego typu ostrza stosowane są bardzo często.

Według wielu badań kształt krawędzi skrawającej w istotny sposób rzutuje na rozkład sił oddziałujących na ostrze, a także – w przypadku niektórych narzędzi – również na zmianę wartości prędkości skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej. Zmienność tych wielkości może mieć istotny wpływ na przebieg zjawiska dekohezji materiału, a w ten sposób – na wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej. W związku z tym celowe jest prowadzenie dalszych badań dotyczących szacowania minimalnej grubości warstwy skrawanej dla różnych sposobów skrawania i narzędzi o zróżnicowanym zarysie krawędzi skrawającej.

LITERATURA

- Kawalec M. „Fizyczne i technologiczne zagadnienia przy obróbce z małymi grubościami warstwy skrawanej”. Rozprawa Nr 106. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (1980).
- Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G. “An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining”. *Transactions of the ASME* 128 (2006): s. 474–481.
- Jaspers S.P.F.C., Dautzenberg J.H. “Material behavior in conditions similar to metal cutting: Flow stress in the primary shear zone”. *J. Mater. Process. Technol.* 122 (2002): s. 322–330.
- Liu X., Jun M.B.G., DeVor R.E., Kapoor S.G. “Cutting Mechanisms and Their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-Endmilling”. Anaheim, Stany Zjednoczone: American Society of Mechanical Engineers (2004).
- 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.
- Bammann D.J., Johnson G.C. “On the kinematics of finite-deformation plasticity”. *Acta Mech.* 70 (1987): s. 1–13.
- Moriwaki T., Sugimura N., Luan S. “Combined stress material flow and heat analysis of orthogonal micromachining of copper”. *Annals of CIRP.* 42 (1993): s. 75–78.
- Lai X.M., Li H.T., Li C.F., Lin Z.Q., Ni J. “Modeling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 48 (2008): s. 1–14.
- Oluwajobi A. “Molecular Dynamics Simulation of Nanoscale Machining, Molecular Dynamics – Studies of Synthetic and Biological Macromolecules”. Prof. Lichang Wang (Ed.), ISBN: 978-953-51-0444-5. InTech (2012).
- Xiao G., To S., Zhang G. “Molecular dynamics modeling of brittle-ductile cutting mode transition: Case study on silicon carbide”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 88 (2015): s. 214–222.
- De Oliveira F.B., Rodrigues A.S., Coelho R.T., de Souza A.F. “Size effect and minimum chip thickness in micromilling”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 89 (2015): s. 39–54. ■