

**Eugene FELDSHTEIN\***, **Radosław MARUDA\***

**ANALIZA WARUNKÓW TARCIA  
NA POWIERZCHNI NATARCIA PRZY TOCZENIU  
WYKOŃCZENIOWYM NA PODSTAWIE ZMIAN  
GRUBOŚCI WIÓRA**

**THE ANALYZE OF FRICTION CONDITIONS ON A RAKE  
FACE WHEN FINISH TURNING ON THE BASE OF CHIP  
THICKNESS CHANGES**

**Słowa kluczowe:**

współczynnik tarcia, toczenie wykończeniowe, grubość wióra

**Key-words:**

friction coefficient, finish turning, chip thickness

**Streszczenie**

Przedstawiono wyniki wykorzystania teoretycznych wzorów do obliczeń średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia ostrza skrawającego w warunkach obróbki wykończeniowej. Rozpatrywane wzory zwerifikowano z wynikami badań doświadczalnych. Podstawowym wskaźnikiem określającym warunki tarcia w strefie skrawania jest grubość wió-

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budowy i Eksploatacji Maszyn, 65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50.

ra. Na jej podstawie obliczono kąty poślizgu i tarcia na powierzchni natarcia. Proponowana metoda została wykorzystana do analizy procesu toczenia stali 45, R35, 40H, NC6, duraluminium PA6 oraz molibdenu w różnych warunkach. W zależności od składu chemicznego i właściwości fizykomechanicznych materiału obrabianego, zastosowania powłok przeciwzużyciowych oraz warunków chłodzenia, wartości średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia można zmniejszyć od 10 do 20%.

## WPROWADZENIE

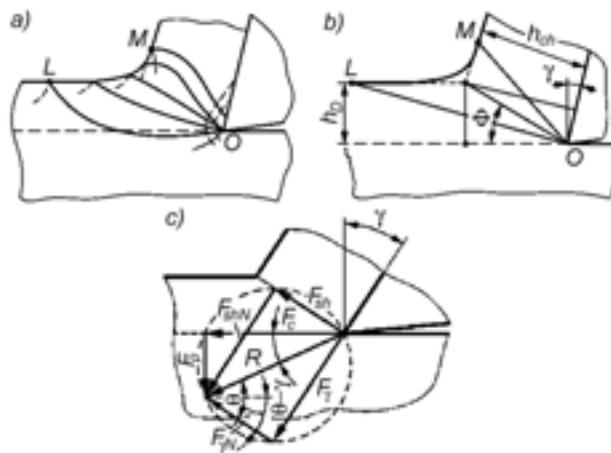
Podstawowymi cechami tarcia w procesie skrawania są błyskawiczne zmiany stanu fizykomechanicznego powierzchni styku, intensywne łączenie obrabianego materiału z materiałem narzędzia, złożony charakter rozkładu naprężeń normalnych i stycznych na powierzchniach styku, bardzo krótki czas trwania styku narzędzia, wióra i elementu obrabianego przy ciągłym odnawianiu strefy styku.

Obecnie stwierdza się [L. 1–7], że średni współczynnik tarcia w procesach skrawania ani wielkością, ani sensem fizycznym, ani prawami nim kierującymi nie odpowiada współczynnikowi tarcia zewnętrznego, podlegającego prawu Amontonsa-Coulomba, i nie jest wielkością stałą dla współpracujących par trących. Przyjęto, że wartość średniego współczynnika tarcia w procesie skrawania  $\bar{\mu} = \mu_0 + \mu_a$ , gdzie  $\mu_0$  – stała składowa mechaniczna współczynnika tarcia;  $\mu_a$  – zmienna składowa adhezyjna współczynnika tarcia. Poprzez składową  $\mu_a$  średni współczynnik tarcia  $\bar{\mu}$  reaguje na zmianę warunków obróbki – parametrów skrawania, kątów ostrza, szczegółów chłodzenia strefy obróbki itp.

## PODSTAWY TEORETYCZNE DO OBLICZEŃ ŚREDNIEGO WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA

Wartości średniego współczynnika tarcia  $\bar{\mu}$  można znaleźć na drodze doświadczalnej, stosując przyrząd zwany „nóż rozcięty” [L. 8] lub analizując pola linii poślizgu na zglądach korzeni wióra [L. 9]. Są to metody bardzo pracochłonne, które wymagają specjalnych przyrządów badawczych, dlatego zaleca się stosowanie metody obliczeniowej, bazowanej na poszczególnych modelach strefy tworzenia wióra.

Analiza zglądów tak zwanych korzeni wióra dokonana dla różnych warunków skrawania świadczy, że przekształcanie warstwy skrawanej w wiór zachodzi w obszarze  $I$ , który znajduje się przed powierzchnią natarcia i ma kształt krzywoliniowego trójkąta (**Rys. 1, a**), wierzchołek którego leży na wierzchołku ostrza skrawającego, zaś dolna granica  $OL$  leży poniżej formalnego śladu powierzchni skrawania [**L. 1, 4, 7**]. Przy aktualnie stosowanych kątach natarcia, prędkościach i grubościach skrawania obszar strefy  $I$  jest bardzo wąski i jego granice  $OL$  i  $OM$  prawie łączą się. Dlatego ze względów praktycznych przyjmuje się, że rodzinę pojedynczych krzywoliniowych powierzchni poślizgu można zamienić jedną warunkową płaszczyzną położoną pod kątem  $\Phi$  zwanym kątem poślizgu (**Rys. 1, b**) [**L. 1, 7**].



**Rys. 1. Modele 2D strefy tworzenia wióra: a) w postaci krzywoliniowego trójkąta; b) uproszczony z pojedynczą płaszczyzną poślizgu; c) działanie sił składowych**

**Fig. 1. Models 2D of chip formation: a) in the form of curvilinear triangle; b) simplified model with the single-shear plane; c) the action of force components**

Pomijając siły działające na powierzchni przyłożenia z powodu ich znacznie mniejszych wartości, można przyjąć, że podczas skrawania w tej strefie działają dwie pary sił – normalna siła  $F_{shN}$  i styczna siła  $F_{sh}$  na płaszczyźnie poślizgu oraz normalna siła  $F_{\gamma N}$  i styczna siła  $F_{\gamma}$  na powierzchni natarcia (**Rys. 1, c**). Siły te składają się na równoważącą siłę  $R$  z rzutami w kierunku ruchu skrawania  $F_c$  i prostopadle do niego  $F_p$ . Na podstawie szczegółów współoddziaływania wióra z ostrzem szereg badaczy opracowało wzory do obliczeń średnich kątów  $\theta$  tarcia wióra na powierzchni natarcia, m.in.:

$$\text{Ernst i Merchant [L. 10]} \quad \theta = \pi/2 + \gamma - 2\Phi \quad (1)$$

$$\text{Lee i Shaffer [L. 11]} \quad \theta = \pi/4 + \gamma - \Phi \quad (2)$$

$$\text{Zvorykin [L. 12]} \quad \theta = 80^\circ + \gamma - 2\Phi \quad (3)$$

$$\text{Sedokov [L. 13]} \quad \theta = \arctg[\text{ctg}(2\Phi - \gamma)] \quad (4)$$

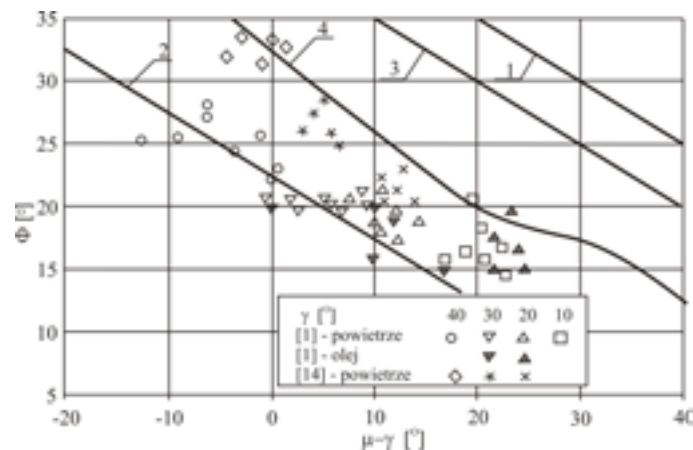
gdzie:  $\gamma$  – kąt natarcia,  $\Phi$  – kąt poślizgu.

Wartości kąta poślizgu mogą być zmierzone bezpośrednio na zgładach korzeni wióra lub obliczone. Dla modelu z jedną płaszczyzną poślizgu w tym celu używa się wzoru [L. 1-7]:

$$\Phi = \arctan \frac{\cos \gamma}{K_h - \sin \gamma} \quad (5)$$

gdzie:  $K_h = h_{ch}/h_D$  – współczynnik zgrubienia wióra,  $h_{ch}$  – grubość wióra;  $h_D = f \sin \kappa_r$  – grubość warstwy skrawanej,  $f$  – posuw,  $\kappa_r$  – kąt przystawienia głównej krawędzi skrawającej.

Stosując przedstawione wyżej zależności, porównano wyniki obliczeń z wynikami badań doświadczalnych [L. 1, 14]. Łatwo zauważyć (Rys. 2), że ani jeden wzór nie opisuje dokładnie zmiany średniego współczynnika tarcia. W warunkach toczenia wykończeniowego odkształcenia wióra są względnie duże, kąty poślizgu niewielkie, więc najkorzystniejsza staje się zależność (2) zaproponowana w [L. 11].



**Rys. 2. Porównanie danych obliczeniowych i doświadczalnych**

Fig. 2. The comparison calculating dates with experimental dates

## WARUNKI BADAŃ

Analizowano zależności wartości średnich współczynników tarcia na powierzchniach natarcia od warunków obróbki przy toczeniu wykończeniowym. Badano następujące materiały konstrukcyjne w stanie surowym:

- stal 45 PN-93/H-84019 – stal węglowa konstrukcyjna wyższej jakości ogólnego przeznaczenia. Stal C45 stosowana jest w wielu branżach przemysłu maszynowego. Wykonuje się z niej części średnio obciążone, m.in. osie, wały korbowe i mimośrodowe oraz koła zębate, wrzeciona, walce, wirniki pomp itp. Norma PN-ISO 3685:1996 zaleca stosowanie stali C45 w badaniach obróbki skrawaniem jako stali wzorcowej;
- stal R35 PN-89/H-84023/07 – stal węglową, która cechuje się niską zawartością węgla ( $0,07 \pm 0,16\%$ ) i dużą plastycznością. Wykorzystywana jest na rury bez szwu walcowane na gorąco, ciągnięte lub walcowane na zimno, rury bez szwu precyzyjne i kołnierzone, rury do budowy statków itp.;
- stal 40H PN-89/H-84030 – stal stopowa konstrukcyjna, stosowana do produkcji przeważnie wysoko obciążonych i ważnych elementów konstrukcyjnych maszyn, silników, pojazdów mechanicznych itp., zwłaszcza o dużych przekrojach;
- stal NC6 PN-86/H-85023 – stal narzędziowa do pracy na zimno. Jest stosowana w produkcji narzędzi skrawających i tnących, gwintowników, narzynek, wiertel profilowych, płytek tnących, sprawdzianów, matryc do tłoczenia, rolek kształtowych do obróbki blach itp.;
- duraluminium PA6 PN-79/H-88026 – stop aluminium do przeróbki plastycznej. Główne zastosowanie: obciążone elementy konstrukcji lotniczych i pojazdów mechanicznych, elementy środków transportu oraz maszyn, konstrukcyjne elementy budowlane;
- molibden – materiał cechuje się wysoką wytrzymałością, niską prężnością par oraz dobrą odpornością na korozyjne działanie ciekłych metali w wysokich temperaturach. Znajduje szerokie zastosowanie techniczne m.in. do produkcji elementów lamp elektronowych, przewodów grzejnych w piecach wysokotemperaturowych, parowników do wytwarzania warstw napyłanych, mieszadeł ciekłego cynku oraz dysz silników raketowych.

Narzędzia – noże tokarskie z płytkami wymiennymi SNUN120408 (TPUN220408) z węglików spiekanych P25 (P35) z powłoką AlTiN „Ba-

linit Futura Nano”, firma „Oerlikon Balsers” o mikrotwardości  $HV_{0,05}$  3300, współczynniku tarcia o stal na sucho 0,35 i maksymalnej temperaturze pracy  $900^{\circ}\text{C}$  [L. 15] i niepowlekanych. Geometria ostrza: kąt przystawienia głównej krawędzi skrawającej  $\kappa_r = 70^{\circ}$  ( $92^{\circ}$ ), kąt przystawienia pomocniczej krawędzi skrawającej  $\kappa_r' = 20^{\circ}$  ( $28^{\circ}$ ), kąt natarcia  $\gamma = -8^{\circ}$ , kąt przyłożenia  $\alpha = 8^{\circ}$ , promień naroża 0,8 mm.

Warunki obróbki – na sucho, w strumieniu sprężonego powietrza, w strumieniu emulsji na bazie koncentratu EMULGOL ES-12 o stężeniu 10%, w strumieniu oleju obróbkowego Milpro MY55, w mgłę emulsyjnej (środek czynny – emulsja na bazie koncentratu OPORTET RG-2 o stężeniu 4%).

Zakres stosowanych parametrów skrawania przedstawiono w **Tab. 1**. Grubości wióra do dalszych obliczeń mierzono 10-krotnie.

**Tablica 1. Zakres parametrów skrawania materiałów badanych**

Table 1. The parameters range of material researched cutting

Parametry skrawania	Materiał obrabiany					
	stal 45	stal R35	stal 40H	stal NC6	AP6	Mo
$a_p$ , mm	1					0,5
$f$ , mm/obr.	0,1 ÷ 0,5		0,06 ÷ 0,2			0,2
$v_c$ , m/min	180		250			80

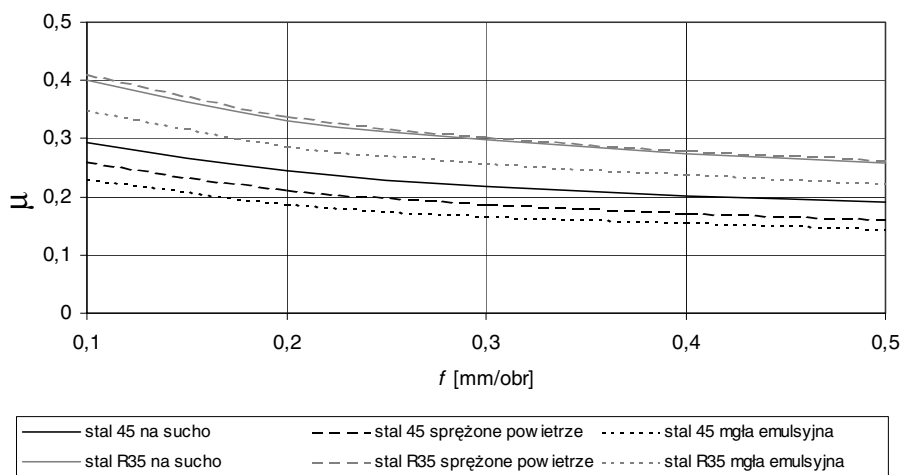
## WYNIKI BADAŃ

Jak widać ze wzorów (1–5), podstawową wartością do obliczeń średnich współczynników tarcia są grubość warstwy skrawanej oraz grubość wióra. W warunkach obróbki wykończeniowej głębokości skrawania są małe, więc możliwe są dwa przypadki:

- w skrawaniu w równej mierze uczestniczą główna krawędź skrawająca i naroże ostrza. Średnią grubość warstwy skrawanej w tym przypadku można obliczyć ze wzoru przedstawionego w [L. 16];
- w skrawaniu bierze udział tylko naroże ostrza. Średnią grubość warstwy skrawanej w tym przypadku można obliczyć ze wzoru przedstawionego w [L. 1].

Na podstawie zależności (2) badano wpływ warunków obróbki na wartości średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia. **Rys. 3**

przedstawia wyniki obliczeń wartości  $\bar{\mu}$  przy toczeniu stali 45 i R35 w zależności od posuwu i warunków chłodzenia strefy skrawania. Łatwo zauważyć skuteczność wykorzystania mgły emulsyjnej, zmniejszającej  $\bar{\mu}$  1,3 razy w porównaniu z obróbką na sucho. Większa plastyczność stali R35 skutkuje wyższymi siłami adhezji, co powoduje wzrost współczynników tarcia.

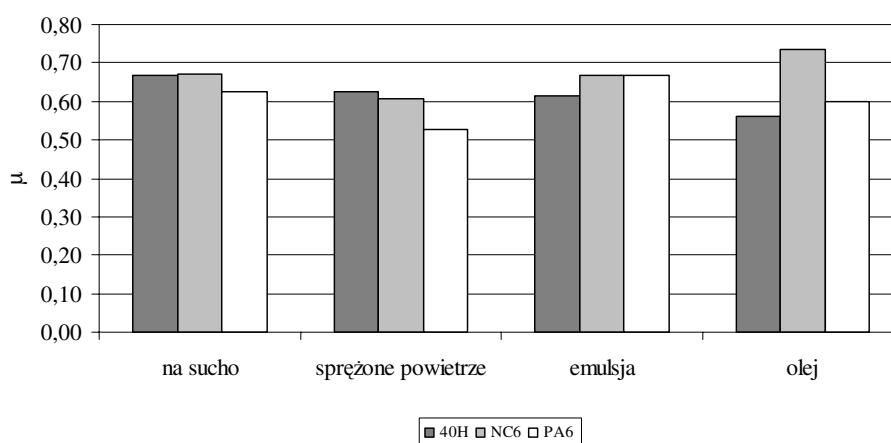


**Rys. 3. Wpływ posuwu i warunków chłodzenia na średnie współczynniki tarcia**

Fig. 3. The influence of feed value and cooling conditions on the middle coefficient of friction

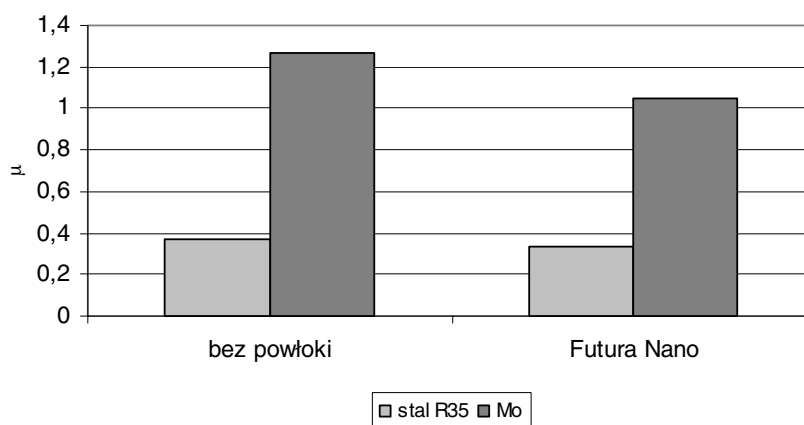
Na **Rys. 4** przedstawiono wpływ warunków chłodzenia strefy skrawania przy toczeniu stali 40H, NC6 oraz duraluminium PA6 z prędkością skrawania 250 m/min i posuwem 0,15 mm/obr. Jak widać, zmiany warunków chłodzenia okazują się użyteczne tylko dla stali 40H, natomiast obróbkę stali NC6 i duraluminium PA6 lepiej prowadzić przy wykorzystaniu sprężonego powietrza.

**Rysunek 5** przedstawia wpływ powłoki przeciwzuzyciowej na wartości średniego współczynnika tarcia. Tak przy toczeniu stali R35, jak przy toczeniu molibdenu widać zmniejszenie ich wartości. Powłoka na bazie AlTiN przeszkadza powstawaniu wiązań adhezyjnych i tym samym wpływa na składowe adhezyjne  $\mu_a$  średnich współczynników tarcia  $\bar{\mu}$  na powierzchni natarcia. Obliczone wartości są bardzo zbliżone do podawanych przez producenta [L. 15].



**Rys. 4. Wpływ rodzaju chłodzenia na współczynnik tarcia na powierzchni natarcia przy toczeniu różnych materiałów konstrukcyjnych**

Fig. 4. The influence of cooling variety on middle friction coefficient on a rake face when different structural materials turning



**Rys. 5. Wpływ powłoki przeciwwyżyciowej na średni współczynnik tarcia**

Fig. 5. The influence of antiwear coating on the middle friction coefficients

## WNIOSKI

1. Na podstawie analizy wzorów teoretycznych stosowanych do obliczeń wartości średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia i porównania wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi dobrano



- zależność zapewniającą najmniejszą różnicę w tych wartościach w szerokim zakresie warunków obróbki.
2. Stosując mierzone wartości grubości wióra można szybko i skutecznie obliczyć wartości średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia i na tej bazie zweryfikować rolę warunków obróbki na właściwości tribologiczne strefy skrawania jako węzła tarcia.
  3. W zależności od składu chemicznego i właściwości fizyko-mechanicznych materiału obrabianego, zastosowania powłok przeciwzuzyciowych oraz warunków chłodzenia, wartości średnich współczynników tarcia na powierzchni natarcia można zmniejszyć o około 10–20%.

## LITERATURA

1. Astakhov V.P.: Tribology of metal cutting, London, Elsevier Ltd., 2006.
2. Boothroyd G., Knight W.A., Fundamentals of Machining and Machine Tools, Boca Raton, CRC Press, 2006.
3. Groover M.P.: Fundamentals of modern manufacturing. Materials, Processes and systems, N.-Y., Jon Wiley & Sons, 2007.
4. Grzesik W.: Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling and Applications, Elsevier Science Publisher, 2008.
5. Shaw M.C.: Metal Cutting Principles, Oxford, Clarendon Press, 1989.
6. Trent E.M., Wright P.K.: Metal Cutting, Boston, Butterworth-Heinemann, 2000.
7. Zorev N.N.: Metal Cutting Mechanics, Oxford, Pergamon Press, 1966.
8. Gordon M.B.: The applicability of binomial law to the process of friction in the cutting of metals, *Wear*, 1967, nr 10, s. 274–290.
9. Roth R.N., Oxley P.L.B.: A slip-line field analysis for orthogonal machining based on experimental flow fields, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1972, nr 14, s. 86–97.
10. Ernst H., Merchant M.E.: Chip formation, friction and high quality machined surfaces, *Surface Treatment of Metals*, ASM, 1941, nr 29, s. 299–378.
11. Lee E.H., Shaffer, B.W.: The theory of plasticity applied to a problem of machining, *Journal of Applied Mechanics*, 1951, nr 18, s. 405–413.
12. Pančenko K.P.: Ruskie učenye – osnovopoložniki nauki rezaniâ metallov. *Žyzn', deâtelnost' i izbrannye trudy*, Moskva, Mašgiz, 1952.
13. Sedokov L.M.: Mehaničeskie teorii pročnosti, Tomsk, TPI, 1975.
14. Creveling J.H., Jordon T.F., Thomsen E.G.: Some studies on angle relationship in metal cutting, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1958, nr 79, s. 127–138.

15. Obróbka skrawaniem: Produkty i usługi, Katalog PL003(0812) firmy „Oerlikon Balzers”.
16. Feldshtein E., Maruda R.: Wpływ sposobu chłodzenia strefy skrawania na proces tworzenia i łamania wióra, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, 2005, vol. 25, nr 2, s. 9–19.

**Recenzent:**  
**Ryszard MARCZAK**

### Summary

**In the paper, the results of the analysis of theoretical equations to calculate middle coefficients of friction on a tool rake face during finish cutting are described. Equations viewed were compared with experimental results. The base magnitude that characterises friction conditions into the cutting zone is uncut chip thickness. Using its values, one may calculate shear angles and friction angles on tool rake face. The proposed method was used to analyse the process of steels 45, R35, 40H, NC6, duralumin PA6 and molybdenum turning with different conditions. Depending on chemical composition and physical-mechanical properties of material machined, using antiwear coatings and cooling conditions, middle coefficients of friction on tool rake face may be decreased from 10 to 20%.**