

Józef GAWLIK\*, Wojciech ZĘBALA\*, Andrzej MATRAS\*

## TECHNOLOGICZNE I TRIBOLOGICZNE ASPEKTY OBRÓBKI PRECYZYJNEJ

## TECHNOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL ASPECTS OF PRECISE MACHINING

### Słowa kluczowe:

obróbka precyzyjna, skrawanie, tarcie, parametry, optymalizacja

### Key words:

precise machining, cutting, friction, parameters, optimization

### Streszczenie

Przedstawiono wybrane zagadnienia poprawy jakości technologicznej obrabianych mikrowyrobów na przykładzie obróbki cienkościennych przedmiotów ze stopu aluminium (grubość ścianki poniżej 0,1 mm, wysokość przedmiotu rzędu kilku mm). Podano sposoby zmniejszania błędów obróbki poprzez zastosowanie skrawania z podwyższonymi prędkościami (HSC), optymalizację parametrów i strategii obróbki. Do

---

\* Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, e-mail: jgawlik.pk@gmail.com

obróbki HSC posłużono się wysokoobrotowym wrzecionem z napędem pneumatycznym. Wykazano, że właściwy dobór parametrów skrawania, przy uwzględnieniu charakterystyk tribologicznych, pozwala uzyskać dobre jakościowo przedmioty cienkościenne.

## WPROWADZENIE

Rosnąca złożoność kształtów wytwarzanych wyrobów, ich miniaturyzacja oraz wymagania odnośnie do wysokiej jakości obrabianych powierzchni powoduje potrzebę rozwoju nowoczesnych technik przetwarzania materiałów konstrukcyjnych, związanych głównie z obróbką precyzyjną.

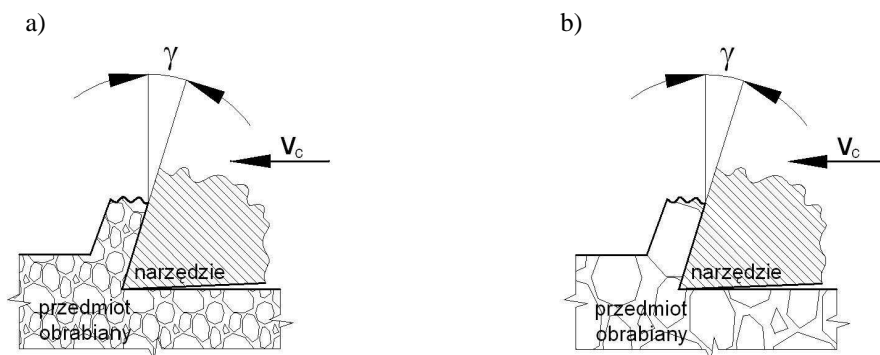
Małe wymiary śladu obróbkowego w skrawaniu precyzyjnym wymuszają uwzględnienia na poszczególnych etapach modelowania „efektu skali” [L. 3, 6, 11, 13] i wpływu dyslokacji [L. 9]. W niektórych przypadkach grubość warstwy skrawanej jest porównywalna z wartością promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej. Wówczas wpływ strefy będącej w zastoju i „mikrowypływek” na wartości składowych siły skrawania może być znaczący [L. 2, 12]. Pomimo wielu prób nie udało się zbudować zadowalających modeli, pozwalających prognozować z wystarczającą dokładnością zachowanie się materiału obrabianego w takich sytuacjach. Dlatego w większości modeli tworzenia wióra dokonywano nie-realnego założenia, że ostrze skrawające jest doskonale ostre.

Można wyróżnić kilka podstawowych czynników, odróżniających mikroobróbkę od konwencjonalnego wytwarzania w makroskali, a mianowicie:

- mikrostruktura materiału obrabianego (wielkość i kształt ziarna, rodzaje faz, wtrącenia);
- materiał narzędzia skrawającego i jego cechy (mikrotwardość, drobnoziarnistość, rodzaj powłoki);
- geometria ostrza (promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, kąt natarcia);
- parametry skrawania (głównie prędkość skrawania).

Wpływ wszystkich wymienionych powyżej czynników na mechanikę procesu skrawania wzrasta, ze zmniejszaniem się skali obróbki. Podczas mikroobróbki wiór powstaje w wyniku rozdzielania się pojedynczego ziarna (Rys. 1). Efektywny kąt natarcia jest znacząco ujemny, a promień

zaokrąglenia krawędzi skrawającej jest porównywalny z grubością warstwy skrawanej (**Rys. 2**). Podczas obróbki w tradycyjnej skali można przyjąć założenie, że krawędź skrawająca jest prawie doskonale ostra i aktualny kąt natarcia odpowiada założonemu, (**Rys. 1a, Rys. 2a**).



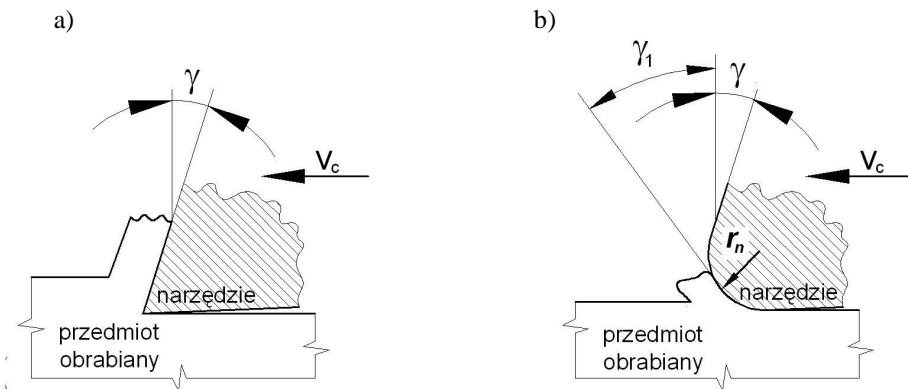
**Rys. 1. Zależność pomiędzy wielkością ziarna a grubością warstwy skrawanej: a) obróbka konwencjonalna, b) mikroskrawanie**

Fig. 1. The relationship between grain size and non-deformed chip thickness: a) conventional machining, b) micromachining

Główną różnicą pomiędzy makro- i mikroobróbką jest gwałtowny wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego w materiale obrabianym w miarę zmniejszania się wymiarów strefy skrawania (efekt skali). Ze zmniejszaniem się grubości warstwy skrawanej następuje znaczący wzrost energii ścinania [**L. 1, 10**].

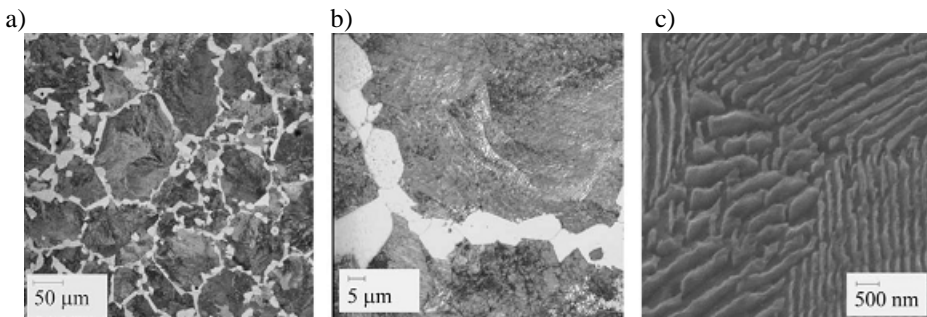
Mikrostruktura materiału obrabianego, uzależniona między innymi od procesu obróbki cieplnej i mechanicznej, wywiera bardzo duży wpływ na proces powstawania wióra. Przykładem są zdjęcia zglądów metalograficznych stali C45 (**Rys. 3**) z widocznymi ziarnami perlitu (większe ziarna koloru szarego) i ferrytu (mniejsze, białe) [**L. 7**]. Przeciętny wymiar ziarna ferrytu wynosi ok. 10  $\mu\text{m}$ , podczas gdy ziarna perlitu przekraczają 100  $\mu\text{m}$ . **Rys. 3c** pokazuje przypadkową orientację płytek cementytu w ziarnie perlitu.

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z poprawą jakości obrabianych mikrowyrobów na przykładzie obróbki cienkościennej przedmiotów, o grubościach poniżej 0,1 mm i wysokościach rzędu kilku mm, wykonanych ze stopu aluminium EN AW 7075.



**Rys. 2. Wpływ promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n$  na proces skrawania: a) obróbka konwencjonalna, b) mikroskrawanie**

Fig. 2. Influence of the rounded cutting radius  $r_n$  on cutting process: a) conventional machining, b) micromachining



**Rys. 3. Zdjęcia mikroskopowe mikrostruktury normalizowanej stali C45 [L. 7] w różnych powiększeniach: większe ziarna perlitu (szare) oraz ferrytu (białe)**

Fig. 3. Microscope photographs of the microstructure of normalized steel C45 [L. 7] at different magnifications: larger pearlite grain (gray) and smaller ferrite grain (white)

Przedstawiono sposoby zmniejszania błędów obróbki poprzez zastosowanie skrawania z podwyższonymi prędkościami (HSC), optymalizację parametrów skrawania oraz dobór odpowiedniej strategii obróbki. Do obróbki HSC posłużono się wysokoobrotowym wrzecionem z napędem pneumatycznym.

Wykazano, że właściwy dobór parametrów skrawania, poprzez zastosowanie modelowania i symulacji komputerowej pozwala uzyskać poprawne geometrycznie przedmioty cienkościenne.

### 1. Tribologiczne charakterystyki procesu mikroskrawania

W obróbce precyzyjnej proces mikroskrawania odbywa się w specyficznych warunkach tribologicznych, polegających na:

- udziale niemal czystych chemicznie, bardzo aktywnych powierzchni obrabianego przedmiotu i mikrowióra;
- znacznej koncentracji naprężeń normalnych o maksymalnych wartościach  $\sigma_k$  do ok. 1600 MPa i stycznych  $\tau_k$  o wartości do ok. 60%  $\sigma_k$ ;
- deformacji obrabianego materiału na poziomie odkształceń granicznych przy wysokiej temperaturze. W mikroobszarach styku ostrza z obrabianym materiałem temperatura może sięgać temperatury topnienia materiału;
- występowaniu tarcia suchego wobec praktycznie braku dostępu cieczy obróbkowej do strefy kontaktu ostrza z obrabianym materiałem, przy równocześnie dużych wartościach prędkości poślizgu;
- pogarszaniu się warunków tarcia w wyniku postępującego zużycia ostrza od strony powierzchni przyłożenia i zmianie warunków spływu wióra po powierzchni natarcia.

Z uwagi na niewielkie przekroje warstwy skrawanej zjawiska i oddziaływania tribologiczne w strefie skrawania odgrywają znaczącą rolę [L. 2, 3, 8]. W procesie obróbki skrawaniem dochodzi do kontaktu ostrza narzędzia z przedmiotem obrabianym. Występuje styk powierzchniowy, którego realna powierzchnia ma dużą liczbę nierówności. Tak więc wzajemna współpraca powierzchni występuje jedynie na ich nierównościach, co powoduje, że rzeczywista powierzchnia styku stanowi niewielką część powierzchni nominalnej. Przemieszczające się względem siebie rzeczywiste powierzchnie styku napotykają nie tylko opór adhezyjny. Oddziaływania typu odkształcenia sprężyste i plastyczne, bruzdowanie, ścinanie nierówności czy tworzenie rys powodują również działania dekohezyjne, prowadząc do burzenia spójności materiału. W **Tabeli 1** oraz **Tabeli 2** przedstawiono podstawowe procesy tribologiczne oraz charakterystyki połączeń tarciovych.

Na opory tarcia przy przemieszczaniu się względem siebie ostrza narzędzia i materiału obrabianego składają się opory adhezyjne  $T_{adh}$  oraz opory kohezyjne  $T_{koh}$ .

$$T_t = T_{adh} + T_{koh} \quad (1)$$

W zależności od rodzaju i warunków tarcia poszczególne człony (adhezyjny, kohezyjny) mogą zwiększać lub zmniejszać swoje wartości.

Różne modele tarcia (mechaniczne, molekularne) są słuszne tylko w pewnym zakresie, rozpatrując proces tarcia jednostronnie. Na przykład *mechaniczne teorie tarcia* uwzględniają przede wszystkim człon kohezyjny, tj. w mniejszym lub większym stopniu uwzględniając matematyczne ujęcie zjawisk odbywających się wbrew siłom kohezyjnym, takim jak odkształcenie sprężyste i plastyczne, ścinanie, skręcanie itd. Z kolei molekularne teorie tarcia główną uwagę poświęcają oddziaływaniu adhezyjnemu. W wielu przypadkach rozpatrując mechaniczne przyczyny tarcia należy brać pod uwagę sumę molekularnych oddziaływań kohezyjnych [L. 8].

**Tabela 1. Podstawowe procesy tribologiczne, wg [L. 3]**

Table 1. Basic tribological processes [L. 3]

Ubytek materiału	Przemieszczenia materiału	Nieciągłości materiału	Narosty	Zmiany struktury geometrycznej powierzchni	Zmiany składu chemicznego
Mikroskrabowanie, odrywanie nierówności, kruche odłupywanie, złuszczenie	Bruzdowanie, polerowanie, zgniot	Rysy powierzchniowe, pęknięcie, zgniot	Namazanie przeciwciała, błony tlenkowe, osady	Zgniot, kierunkowe przesunięcia struktury, przemiany fazowe	Nowe składniki, powierzchniowe tlenki

**Tabela 2. Podstawowe charakterystyki połączeń tarcowych, wg [L. 3]**

Table 2. Basic characteristics of frictional connections [L. 3]

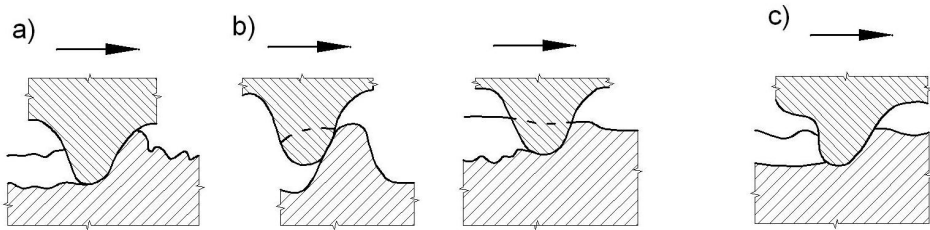
Charakter odkształcenia	Odkształcenie sprężyste	Odkształcenie plastyczne	Skrawanie	Niszczanie warstw szczytowych	Niszczanie materiału rdzenia
Liczba	$n = \infty$	$1 < n < \infty$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$
Warunki urzeczywistnienia	$h/r_n < 0,01$ suche – metal żelazny < 0,0001 metal nieżelazny	$h/r_n < 0,1$ < 0,2 – 0,5 smarowane	$h/r_n < 0,1$ < 0,2 – 0,5 smarowane	$d\tau/dh > 0$	$d/dh > 0$

W wyniku oddziaływania powierzchni ostrza na materiał obrabiany w obróbce precyzyjnej następuje oddzielanie cząstek wskutek mikro-

skrawania, rysowania lub bruzdowania. Model elementarnych procesów występujących podczas obróbki przedstawiono na **Rys. 4** (wg. [L. 3]). Jako kryterium wyróżniające rodzaje tych procesów przyjęto iloraz powierzchni przekrojów poprzecznych zagłębienia, rysy  $w_2$  oraz spęczanie materiału wokół rysy  $w_1$  (**Rys. 5**). Można wyróżnić trzy przypadki:

- $w_2/w_1 = 1$  ----> wyłącznie odkształcenie plastyczne obszarów styku, czyli bruzdowanie,
- $w_2/w_1 = 0$  ----> wyłącznie skrawanie,
- $0 \leq w_1/w_2 \leq 1$  ----> mikroskrawanie, odkształcenie plastyczne i rysowanie.

Model mikroskrawania przez występ nierówności w kształcie stożka zakończonego powierzchnią sferyczną o promieniu  $r_n$ , zagłębionego w materiał obrabiany na głębokość  $h$  przedstawiono na **Rys. 6** (model Kragielskiego).



**Rys. 4.** Model elementarnych procesów występujących podczas obróbki precyzyjnej: a) bruzdowanie, b) ścinanie nierówności, c) odkształcanie plastyczne materiału

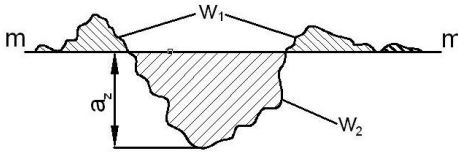
Fig. 4. Model of elementary processes occurring during precision machining: a) fissuring, b) cutting of inequalities, c) plastic material deformation

Ze wzrostem wartości ilorazu  $h/r_n$  podczas przesuwania występu nierówności wzrasta odkształcenie sprężyste [L. 3]. Jeżeli  $\frac{h}{r_n} \geq 240 \left( \frac{R_e}{E} \right)^2$ , to powstaje odkształcenie plastyczne materiału warstwy wierzchniej, czyli bruzdowanie, a następnie rysowanie i mikroskrawanie.

Całkowitą siłę działającą na materiał obrabiany w wyniku oddziaływania ostrza narzędzia można rozłożyć na dwie składowe: składową równoległą do kierunku ruchu występu nierówności  $Q$  oraz prostopadłą do tego kierunku  $P$ , co wywołuje reakcję normalną  $N$  i siłę styczną  $T$  zgodnie z równaniem (2):

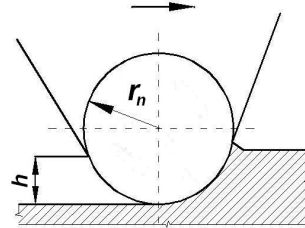
$$T = \mu N \quad (2)$$

gdzie:  $\mu$  – współczynnik tarcia.



**Rys. 5. Kryterium wyróżniające rodzaje zużycia:  $a_z$  – głębokość brzozy**

Fig. 5. Types of wear criterion:  $a_z$  – groove depth



**Rys. 6. Model mikroskrawania przez występ nierówności**

Fig. 6. Micromachining model trough roughness peak

Z odkształceniem plastycznym materiału obrabianego mamy do czynienia, gdy spełniona jest nierówność:

$$T > Q \sin \alpha - P \cos \alpha \quad (3)$$

Przy założeniu, że:

$$h = r_n (1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

można obliczyć zagłębienie nierówności powodującej rysowanie stref podpowierzchniowych warstwy wierzchniej elementu z równania (4):

$$h = r_n \left[ 1 - \frac{\mu Q + P}{(Q^2 + P^2)^{1/2} (1 + \mu^2)} \right] [\mu\text{m}] \quad (5)$$

Wartości składowych  $P$  i  $Q$  całkowitej siły działającej na materiał obrabiany można obliczyć z równań (6):

$$P = C_1 \sigma_{pl}; \quad Q = C_2 \sigma_{pl} \quad (6)$$

gdzie:  $C_1$ ,  $C_2$  – współczynniki, zależne od kształtu obszarów styku i utwardzenie materiału,  $\sigma_{pl}$  – naprężenie plastyczne.

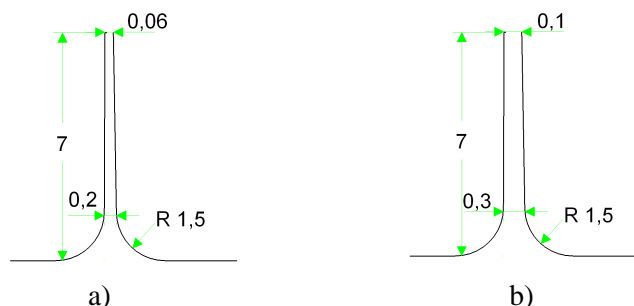
Przy wzroście współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami zwiększa się obszar oddziaływań adhezyjnych. W przypadku gdy  $\mu = 1$ , to  $h/r_n \rightarrow 0$  i wówczas następuje tylko wzajemne szczypanie się nierówności.



Należy także zwrócić uwagę na fakt, że całkowita długość styku wióra z ostrzem na powierzchni natarcia dzieli się na dwie strefy, charakteryzujące się stałym i zmiennym współczynnikiem tarcia. W strefie przylegającej bezpośrednio do krawędzi skrawającej naprężenia styczne przekraczają granicę plastyczności na ścinanie materiału wióra i dlatego możliwe jest wewnętrzne płynięcie materiału [L. 4]. Jego skutkiem jest dodatkowe odkształcenie i umocnienie materiału. W strefie oddalonej od krawędzi skrawającej przemieszczanie następuje wskutek poślizgu zewnętrznego po powierzchni natarcia, co jest równoznaczne z występowaniem tarcia ślizgowego.

### PRZYKŁAD DOBORU STRATEGII OBRÓBKII PRZEDMIOTÓW CIENKOŚCIENNYCH

Na **Rys. 7** przedstawiono model przedmiotu cienkościennego („żyłetki”) o minimalnej grubości ścianki 0,06 mm i 0,1 mm oraz wysokości 7 mm. Symulację procesu frezowania zaprojektowanego elementu przeprowadzono wg strategii pokazanej na **Rys. 8**, polegającej na obróbce poszczególnych warstw materiału, skokowo obniżając narzędzie co 0,35 mm (*poziom z*). Modyfikacja tej strategii może polegać na obniżaniu narzędzia w sposób ciągły tak, aby frez poruszał się po spirali.



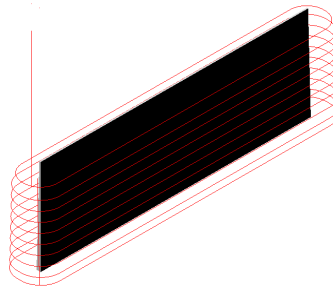
**Rys. 7. Model przedmiotu cienkościennego (od czoła) o minimalnej grubości ścianki: a) 0,06 mm, b) 0,1 mm**

Fig. 7. Model of a thin – Wallem workpiece (front) with a minimum wall thickness of: a) 0.06 mm, b) 0.1 mm

Materiałem obrabianym był stop aluminium EN AW 7075. W wyniku przeprowadzonych obliczeń metodą elementów skończonych sporządzono wykres rozkładu składowej stycznej głównej siły skrawania wzdłuż całej długości ścieżki narzędzia. Fragment tego wykresu dla symulacji obróbki przedmiotu z **Rys.7a** przedstawiono na **Rys. 9**.

Średnie wartości składowej stycznej głównej siły skrawania wynoszą około 3,5 N. Można jednak zauważyć występowanie miejsc, w których maksymalne wartości siły znacznie przekraczają wartości średnie (piki osiągające 17 N).

W kolejnym kroku badań symulacyjnych wprowadzono ograniczenie średniej wartości składowej stycznej głównej siły skrawania na poziomie 2,5 N oraz zmniejszenie gwałtownych wzrostów wartości tej siły do 5 N. W tym celu powinno nastąpić dostosowanie wartości posuwu czasowego podczas całego procesu frezowania, aby składowa styczna głównej siły skrawania nie przekroczyła założonych wartości. Wyniki kolejnej symulacji komputerowej przed i po procesie optymalizacji przedstawiono na Rys. 10–12.



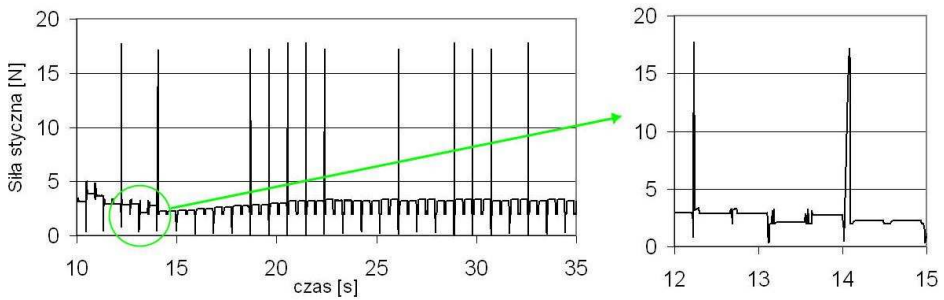
Rys. 8. Model przedmiotu cienkościennego z naniesioną ścieżką narzędzia („poziom z”)

Fig. 8. Model of a thin – walled workpiece with tool path („level z”)

Tabela 3. Początkowe parametry skrawania

Table 3. Initial cutting parameters

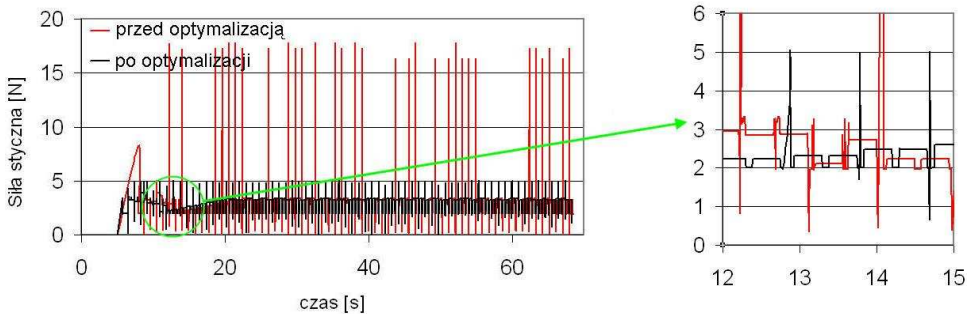
Lp.	Parametr	Wartość	
1	Prędkość skrawania, $v_c$	850 m/min	<p>Diagram illustrating the cutting parameters for a ball end mill. The diagram shows a ball end mill cutting a workpiece. The cutting speed is <math>v_c</math>, the feed rate is <math>f_t</math>, the feed per tooth is <math>f_z</math>, the axial depth of cut is <math>a_p</math>, and the radial depth of cut is <math>a_e</math>.</p> <p>frez kulisty z węglików spiekanych</p>
2	Posuw, $f_t$	3200 mm/min	
3	Posuw, $f_z$	0,04 mm/ostrze	
4	Głębokość osiowa, $a_p$	0,35 mm	
5	Głębokość promieniowa, $a_e$	1,46 mm	



**Rys. 9.** Wykres rozkładu składowej stycznej głównej siły skrawania dla strategii „*poziom z*”

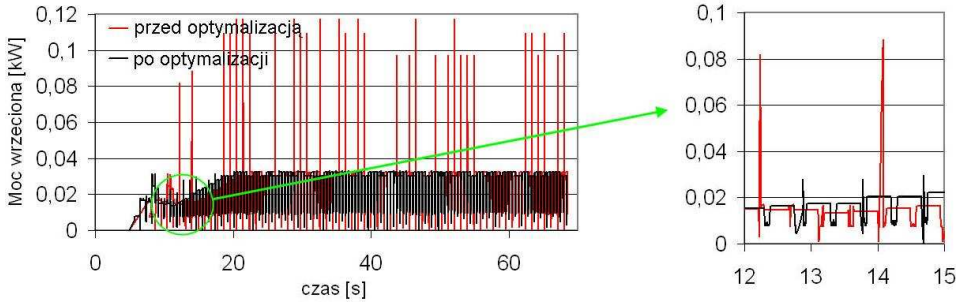
Fig. 9. Graphical illustration of distribution of tangential component of main cutting force to strategy “*level z*”

Na podstawie zoptymalizowanego kodu NC przeprowadzono obróbkę przedmiotu cienkościennego na centrum obróbkowym CNC kulistym frezem trzpieniowym, zamontowanym we wrzecionie pneumatycznym, pracującym z prędkością obrotową 90 000 obr/min. Na **Rys. 13–14** przedstawiono zdjęcia wykonanego przedmiotu cienkościennego na podstawie modelu z **Rys. 7**.



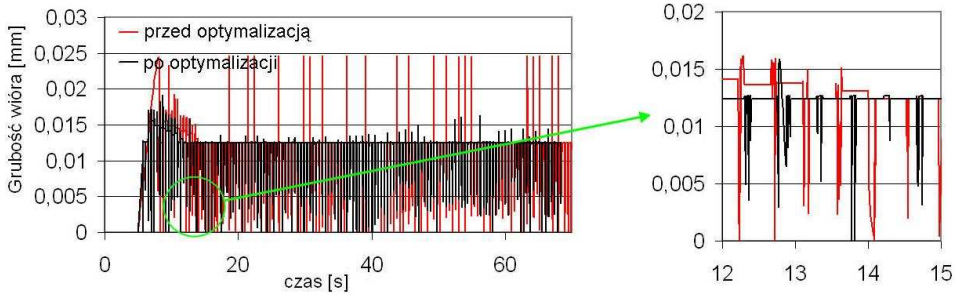
**Rys. 10.** Wykres rozkładu składowej stycznej głównej siły skrawania przed i po procesie optymalizacji

Fig. 10. Graphical illustration of distribution of tangential component of main cutting force before and after optimization process



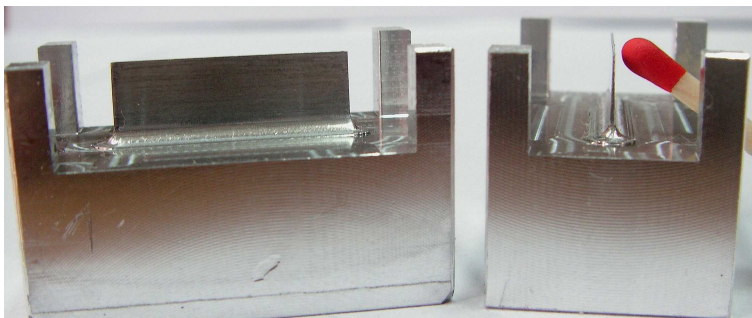
**Rys. 11. Wykres rozkładu chwilowej mocy wrzeczona przed i po procesie optymalizacji**

Fig. 11. Graphical illustration of distribution of momentary power of the spindle before and after optimization process



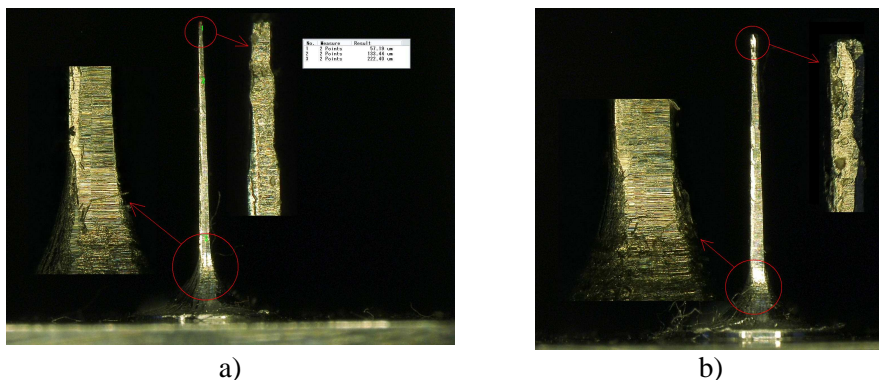
**Rys. 12. Wykres grubości wióra przed i po procesie optymalizacji**

Fig. 12. Chip thickness chart before and after optimization process



**Rys. 13. Zdjęcie wykonanego przedmiotu cienkościennego na podstawie modelu z Rys. 7**

Fig. 13. Photo of a thin – walled workpiece (on the basis of the model from Fig. 7)

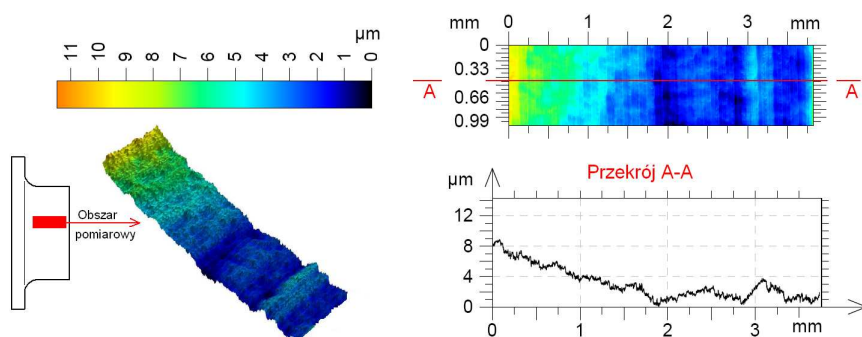


**Rys. 14. Zdjęcie mikroskopowe przedmiotu cienkościennego (od czola) o grubości ścianki: a) 0,06/0,2 mm, b) 0,1/0,3 mm**

Fig. 14. Microscope photo of a thin – walled workpiece (front), with wall thickness of: a) 0.06/0.2 mm, b) 0.1/0.3 mm

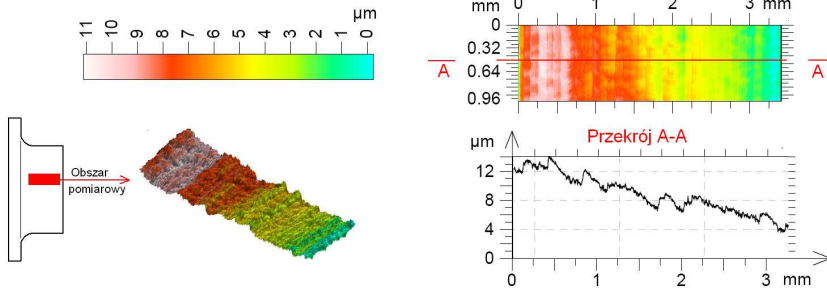
W celu sprawdzenia jakości frezowanej powierzchni wykonano pomiary struktury geometrycznej tej powierzchni (SGP) za pomocą profilometru Talysurf Intra firmy Taylor-Hobson. Kolejne rysunki przedstawiają profil pierwotny 3D z zaznaczonym przekrojem wzdłuż linii A-A dla powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,06 mm (**Rys. 15**) oraz 0,1 mm (**Rys. 16**).

Wizualizację 3D chropowatości oraz falistości powierzchni wraz z parametrami amplitudy i wysokości przedstawiają **Rys. 17–20**.

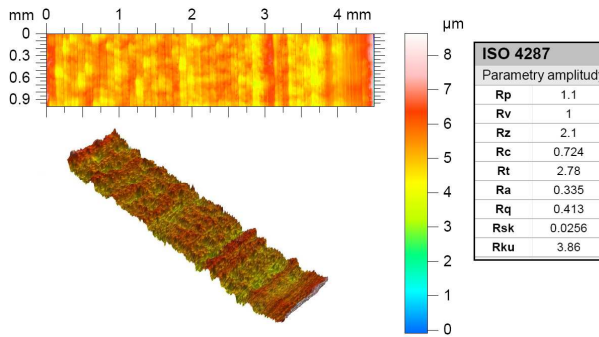


**Rys. 15. Profil pierwotny 3D z zaznaczonym przekrojem wzdłuż linii A-A powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,06 mm**

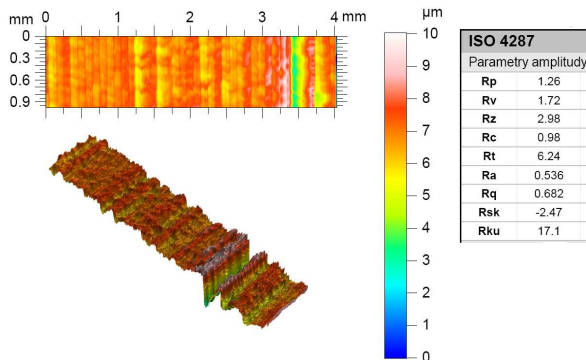
Fig. 15. Original 3D profile of a select cross – section along the A-A line of workpiece's surface with a minimum thickness of 0.06 mm



**Rys. 16. Profil pierwotny 3D z zaznaczonym przekrojem wzdłuż linii A-A powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,1 mm**  
 Fig. 16. Original 3D profile of a select cross – section along the A-A line of work-piece's surface with a minimum thickness of 0.1 mm



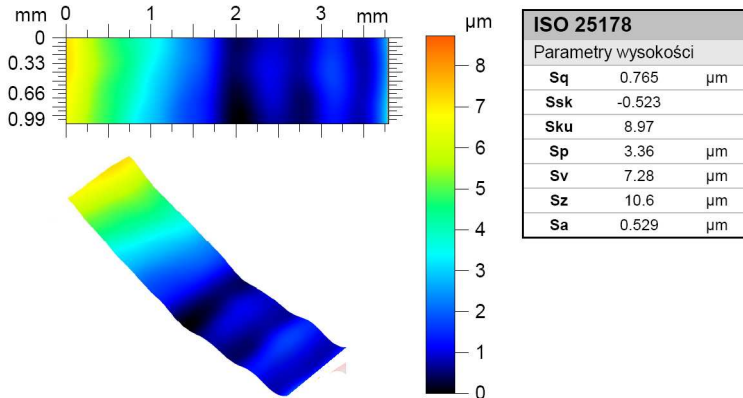
**Rys. 17. Chropowatość powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,06 mm, przy filtrze  $\lambda_s = 0,8$**   
 Fig. 17. Surface roughness of a workpiece with a minimum thickness of 0.06 mm and a  $\lambda_s = 0.8$  filter



**Rys. 18. Chropowatość powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,1 mm, przy filtrze  $\lambda_s = 0,8$**   
 Fig. 18. Surface roughness of a workpiece with a minimum thickness of 0.1 mm and a  $\lambda_s = 0.8$  filter

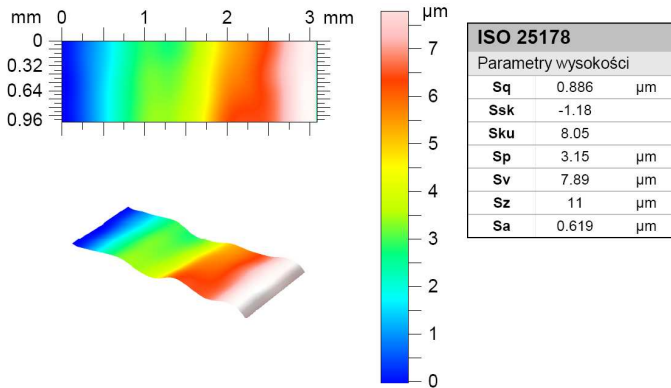
Można zauważyć niewielkie zmiany grubości obrobionych przedmiotów rzędu 1–4,5  $\mu\text{m}$  (dla przedmiotu z **Rys. 14a**) oraz 1–3,5  $\mu\text{m}$  (dla przedmiotu z **Rys. 14b**) mierzonych jako odchyłka od założonego profilu modelu z **Rys. 7**. Średnie wartości wybranych parametrów chropowatości i falistości obrobionych powierzchni ( $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_v$ ,  $S_z$ ,  $S_a$ ), dla przedmiotu o minimalnej grubości 0,06 mm są nieco mniejsze od tych dla przedmiotu o grubszej ściance, niemniej profil ścianki przedmiotu o mniejszej grubości jest bardziej zniekształcony w stosunku do założonego modelu (**Rys. 15** oraz **Rys. 19**).

Przedstawiony przykład optymalizacji strategii precyzyjnej obróbki przedmiotów cienkościennych, z uwzględnieniem wybranych charakterystyk tribologicznych procesu skrawania potwierdza możliwość uzyskania dobrej jakości technologicznej małogabarytowych przedmiotów, wykonywanych na typowych obrabiarkach skrawających, wyposażonych w szybkoobrotowe wrzeciono. Zastosowana procedura optymalizacyjna wskazuje na szersze możliwości doboru optymalnych warunków obróbki precyzyjnej.



**Rys. 19. Falistość powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,06 mm, przy filtrze  $\lambda_s = 0,8$**

Fig.19. Surface waviness of a workpiece with a minimum thickness of 0.06 mm and a  $\lambda_s = 0.8$  filter



**Rys. 20. Falistość powierzchni przedmiotu o minimalnej grubości 0,1 mm, przy filtrze  $\lambda_s = 0,8$**

Fig. 20. Surface waviness of a workpiece with a minimum thickness of 0.1 mm and a  $\lambda_s = 0.8$  filter

## LITERATURA

1. Backer W.R., Marshall E.R., Shaw M.C.: The size effect in metal cutting. Transactions of the ASME, t.74, 1952, s. 61–72.
2. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych, WNT, Warszawa 2010, s. 237–252.
3. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1980.
4. Loladze T.N.: Pročnosť i iznosostojkost' režuščego instrumenta., Mašinstroenie, Moskva 1982.
5. Rentsch R., Inasaki I.: Molecular Dynamics Simulation for Abrasive Processes. Annals of the CIRP, t. 43, nr 1, 1994, s. 327–330.
6. Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Uchikoshi U.: Structure of Micro-machined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis. Annals of the CIRP, t. 43, nr 1, 1994, s. 51–54.
7. Simoneau A., Elbestawi E. NG, M.A.: Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel. International Journal of Machine Tools & Manufacture t.46, 2006, s. 467–481.
8. Szczerek M. (red.), Wiśniewski M.: Tribologia i Tribotechnika. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
9. Turkovich B.F., Black J.T.: Micro-Machining of Copper and Aluminum Crystals. Transactions of ASME, 1970, s. 130–134.
10. Ueda K., Iwata K., Nakayama K.: Chip formation mechanism in single crystal cutting of beta-brass. Annals of the CIRP, t.29, 1980, s. 41.



11. Waldorf D.J., DeVor R.E., Kapoor S.G.: An Evaluation of Ploughing Models for Orthogonal Machining. Jour. Manufact. Science and Eng., Trans. of ASME, t. 121, 1999, s. 550–558.
12. Weinert K., Biermann D.: Spanende Fertigung. Prozesse Innovationen, Werkstoffe, Vulkan Verlag, Essen 2008, s. 530–541.
13. Zębala W.: Teoretyczna i eksperymentalna identyfikacja minimalnej grubości warstwy skrawanej przy obróbce stopów Al. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1994.

**Recenzent:**  
**Stanisław PYTKO**

### **Summary**

**This paper is a presentation of chosen issues concerning the optimization of technological quality of machined microproducts. Machining of thin wall aluminum objects (wall thickness below 0,1 mm and a few mm in height) are used as examples. The authors present methods for lowering machining faults by using high speed cutting (HSC), optimization of parameters and machining strategy. For HSC machining a high-speed spindle with a pneumatic drive was used. The authors prove that a proper choice of cutting parameters, when taking into account tribological characteristics, can assure good quality of thin wall objects.**

