

Wojciech ZĘBALA¹

MINIMALIZACJA BŁĘDÓW OBRÓBKII PRZEDMIOTÓW CIENKOŚCIENNYCH

Prezentowany artykuł przedstawia wybrane zagadnienia związane z poprawą jakości frezowanych przedmiotów cienkościennych poprzez ograniczenie błędów procesu skrawania. Na wybranych przykładach 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 powierzchnie przedmiotów cienkościennych, frezowane z wysokimi prędkościami skrawania, charakteryzują się większą regularnością śladów obróbkowych oraz niższą chropowatością i falistością w stosunku do powierzchni obrabianych z klasycznymi parametrami skrawania. Rozważano naprężenia własne w WW wykonywanych przedmiotów. Wykazano też, że właściwy dobór parametrów skrawania pozwala uzyskać poprawne geometrycznie przedmioty cienkościennie.

1. WSTĘP

Obróbka przedmiotów posiadających cienkie ścianki (rys. 1) następcza szereg problemów związanych z występowaniem sprężystych i plastycznych odkształceń przedmiotu podczas procesu skrawania. W wyniku odkształceń sprężystych frezowany fragment przedmiotu ugina się pod naciskiem krawędzi skrawającej, powodując błędy geometryczne, drgania oraz pogorszenie jakości struktury geometrycznej powierzchni obrobionej. Z kolei odkształcenia plastyczne mogą być przyczyną błędów kształtu obrobionych przedmiotów i naprężeń własnych, trudnych do usunięcia z warstwy wierzchniej (WW), prowadząc do trwałych deformacji przedmiotu po jego obróbce [1-2], [4-5]. Naprężenia własne oraz zniekształcenia fragmentów obrabianych części maszyn generują główne koszty w wielu operacjach obróbkowych przedmiotów cienkościennych, z uwagi na powstawanie braków produkcyjnych i zwiększanie czasu wytwarzania. Na przykład, w produkcji złożonych zespołów mechanicznych, deformacje elementów składowych mogą utrudnić lub wręcz uniemożliwić ich późniejszy montaż. Naprężenia własne w obrobionych elementach powstają zarówno od poprzednich operacji obróbkowych półfabrykatu (obróbka plastyczna, cieplna, ubytkowa zgrubna, etc.) jak również od plastycznej deformacji i naprężeń termicznych powstałych w trakcie przebiegu końcowego procesu obróbkowego.

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

W celu poprawy jakości wykonania przedmiotów cienkościennych można zastosować następujące sposoby minimalizacji błędów obróbki [3], [6], [8]:

- optymalizacja strategii obróbki,
- podwyższenie prędkości skrawania (HSC),
- optymalizacja parametrów skrawania (f_z oraz a_e) z uwagi na minimalizację składowej siły skrawania, prostopadłej do frezowanej ścianki.



Rys. 1. Obróbka przedmiotu cienkościennego

Fig. 1. Thin-walled part machining

W kolejnych częściach artykułu podano krótką charakterystykę wymienionych sposobów minimalizacji błędów obróbki.

2. OPTIMALIZACJA STRATEGII OBRÓBK

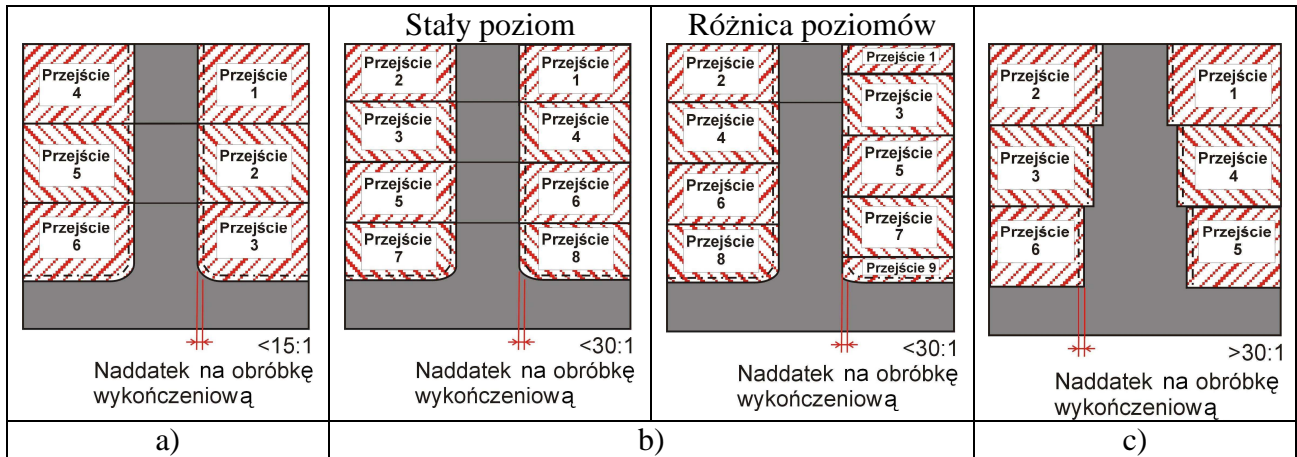
Podstawową metodą poprawnej obróbki przedmiotów cienkościennych jest dobór odpowiedniej strategii [6], [8], uzależniony przede wszystkim od wysokości i grubości frezowanej ścianki. Można wyróżnić trzy przypadki pokazane na rysunku 2:

- mały stosunek wysokości do grubości $<15:1$
- umiarkowany stosunek wysokości do grubości $<30:1$
- wysoki współczynnik wysokości do grubości $>30:1$

Liczba przejść we wszystkich przypadkach będzie uwarunkowana wymiarami ścianki i osiową głębokością skrawania. W celu zmniejszenia ugięcia ścianki podczas obróbki należy skrócić czas styku ostrza z materiałem obrabianym, poprzez zastosowanie wysokiej prędkości skrawania oraz małego stosunku a_p/a_e . Istotną rolę odgrywa stabilność narzędzia i obrabianej ścianki. W przypadku mało sztywnego podparcia frezowanego fragmentu przedmiotu cienkościennego należy zastosować frezowanie przeciwbieżne.

Dla stosunku wysokości do grubości poniżej (15:1) należy obrabiać jedną stronę ścianki w niezachodzących na siebie przejściach. Frezowanie należy powtórzyć dla

przeciwniej strony. Z obu stron należy pozostawić naddatek na późniejszą obróbkę wykończeniową.



Rys. 2. Strategie obróbki przedmiotu cienkościennego. Stosunek wysokości do grubości: a) poniżej 15:1, b) poniżej 30:1, c) powyżej 30:1

Fig. 2. Strategy of thin-walled part machining. Relation of high to thickness: a) less than 15:1, b) less than 30:1, c) more than 30:1

W przypadku stosunku wysokości do grubości poniżej 30:1 należy zmieniać strony, obrabiając do danej głębokości, w niezachodzących na siebie przejściach (frezowanie na równym poziomie). Podobne podejście, lecz pokrywanie się pomiędzy przejściami na przeciwnych stronach ścianki (frezowanie z różnicą poziomów) gwarantuje lepsze podparcie w obrabianym punkcie. Pierwsze przejście powinno odbyć się przy zredukowanej głębokości skrawania, $a_p/2$, rys. 2.b. Zawsze należy pozostawić z obu stron naddatek $0,2 \div 1,0 \text{ mm}$, na późniejszą obróbkę wykończeniową.

Przy wysokim stosunku wysokości do grubości powyżej 30:1 oprócz zmiany stron ścianki podczas obrabiania, należy zbliżać się do żądanej grubości ścianki etapowo, stosując metodę "choinki", rys. 2c. W trakcie obróbki cieńsza frezowana warstwa materiału jest zawsze podpierana przez grubsze warstwy, znajdujące się niżej. W kolejnych etapach obróbki należy przesuwac się w dół ścianki.

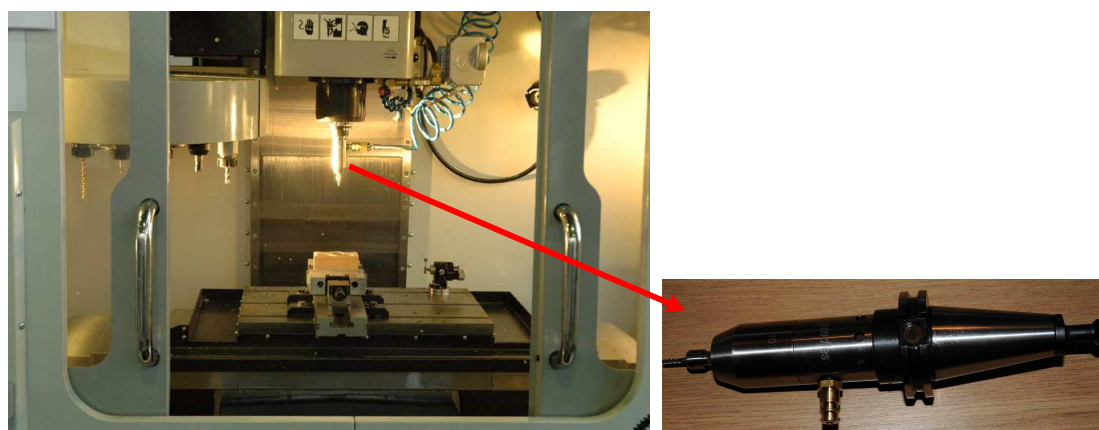
3. OBRÓBKA Z PODWYŻSZONYMI PRĘDKOŚCIAMI SKRAWANIA

Kolejnym sposobem poprawy jakości obróbki przedmiotów o cienkich ściankach jest istotne podwyższenie prędkości skrawania v_c , a tym samym obniżenie składowych siły skrawania. Zdecydowanie najważniejszym elementem obrabiarki, realizującej proces HSC jest wrzeciono główne. Przeważnie spotyka się wysokoobrotowe elektrowrzeciona, zasilane prądem o wysokiej częstotliwości, łożyskowane po obu stronach wału. Elektrowrzeciona wymagają szeregu zabezpieczeń przed uszkodzeniem spowodowanym nadmiernym wzrostem temperatury, prądu zasilania przy rozruchu lub obciążenia siłowego w czasie

obróbki. Alternatywą do wrzecion napędzanych energią elektryczną są silniki pneumatyczne, przetwarzające energię sprężonego powietrza lub innego gazu (np. dwutlenku węgla, azotu, argonu) na ruch obrotowy. Napęd pneumatyczny jest zasilany z centralnego układu sprężonego powietrza, ze zbiornika gazu (np. butli gazowej) lub bezpośrednio ze sprężarki. W operacjach obróbki ubytkowej energia tego medium jest wykorzystywana do wprowadzenia w ruch wrzeciona z obrotowym narzędziem skrawającym. Napędy pneumatyczne charakteryzują się wieloma zaletami: możliwością uzyskania wysokich prędkości obrotowych przy niskich kosztach wykonania, prostą budową, niezawodnością działania, dużą trwałością, łatwością obsługi i sterowania, elastycznością w dostosowywaniu do warunków pracy, niskim kosztem konserwacji i remontów oraz łatwością rozruchu. Istotną wadą napędów pneumatycznych jest duża zależność prędkości narzędzia od obciążenia, co ma związek ze ściśliwością gazu. Problemowi temu przeciwdziała się poprzez zastosowanie zaworów redukcyjnych, utrzymujących w układzie stałe ciśnienie lub poprzez stosowanie układów pneumo-hydraulicznych.

Wrzeciono pneumatyczne jest dobrym rozwiązaniem w zastosowaniu do obróbki wykończeniowej, prowadzonej z dużymi prędkościami skrawania. Nie posiadając żadnych zespołów wprowadzających błędy bicia promieniowego jak: przekładni, łopatek lub szcetek oraz utrzymując stałą, wysoką prędkość i moment obrotowy, wrzeciono z napędem pneumatycznym charakteryzuje się niskim poziomem drgań i hałasu w zakresie wykorzystywanych obciążeń [7].

Na rys. 3 zaprezentowano stanowisko badawcze do obróbki przedmiotów cienkościenych, zbudowane na bazie centrum obróbkowego VF1 HAAS z zamontowanym wysokoobrotowym wrzecionem o napędzie pneumatycznym, pracującym z prędkością obrotową $n = 90.000$ obr/min.



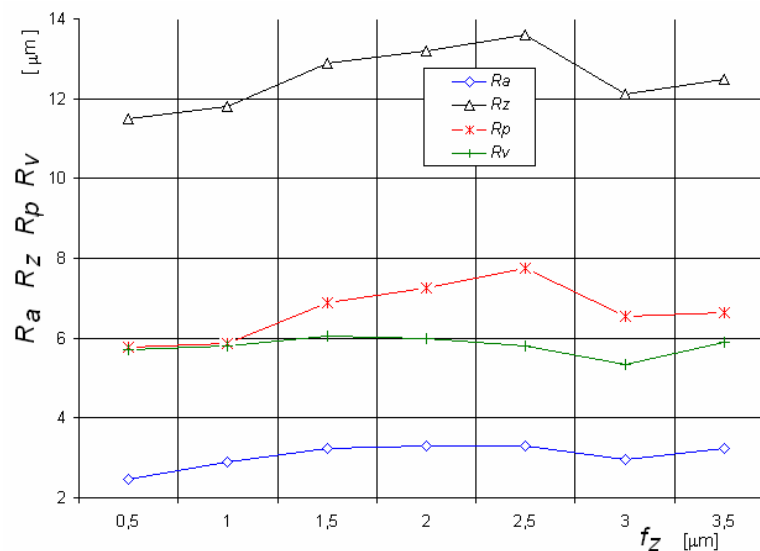
Rys. 3. Wysokoobrotowe wrzeciono o napędzie pneumatycznym (po prawej) zamontowane na centrum obróbkowym VF1 HAAS

Fig. 3. Pneumatic high speed spindle (at right) mounted on the machining center VF1 HAAS

Powierzchnie frezowane z wysokimi prędkościami skrawania charakteryzują się regularnością śladów obróbkowych oraz niską chropowatością. Opory skrawania są

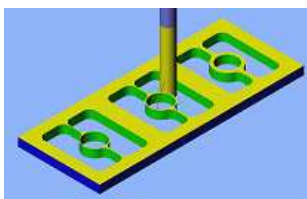
mniejsze niż w obróbce tradycyjnej. Na rys. 4 przedstawiono wyniki badań wpływu wartości posuwu f_z na wybrane parametry chropowatości powierzchni po frezowaniu walcowym współbieżnym stopu aluminium EN AW 7075. Obróbkę prowadzono frezem trzpieniowym o średnicy 3mm z prędkością obrotową $n=90.000$ obr/min. Mimo kilkukrotnego zwiększenia wartości posuwu chropowatość powierzchni pozostaje prawie na niezmiennym poziomie $R_z \sim 11 \div 12 \mu\text{m}$.

Elementy cienkościennie o grubości ścianki 0,3mm zostały zamodelowane w programie Solid Edge (rys. 5a). Obróbkę tych przedmiotów wykonanych ze stopu EN AW 7075 (rys. 5b) przeprowadzono na centrum obróbkowym VF1 HAAS frezem trzpieniowym zamontowanym we wrzecionie pneumatycznym, pracującym z prędkością obrotową 90.000 obr/min. Stosowane parametry skrawania to: $v_c = 850\text{m/min}$, posuw $f_z = 3\mu\text{m}$ (R_z ok. $12\mu\text{m}$ zgodnie z rys. 4) oraz $a_p = 6\text{mm}$. Naddatek na obróbkę wykończeniową ustalono w wysokości 0,1mm. Dla porównania, podobny przedmiot został wykonany przy pomocy klasycznego wrzeciona, pracującego z prędkością obrotową 10.000 obr/min przy $v_c=188$ m/min. Podczas obróbki mierzono składowe całkowitej siły skrawania przy pomocy toru pomiarowego, zbudowanego na bazie siłomierza piezoelektrycznego firmy Kistler.

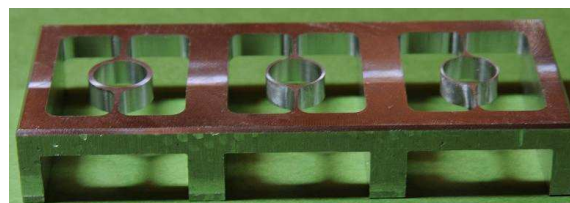


Rys. 4. Wybrane parametry chropowatości powierzchni obrobionej R_a , R_z , R_p , R_v dla różnych wartości posuwu $f_z = 0,5 \div 3,5 \mu\text{m}$ w przypadku frezowania walcowego współbieżnego turbiną wysokoobrotową

Fig. 4. Some surface roughness parameters R_a , R_z , R_p , R_v for different feed values $f_z = 0,5 \div 3,5 \mu\text{m}$ in the case of milling with high speed turbine



a)

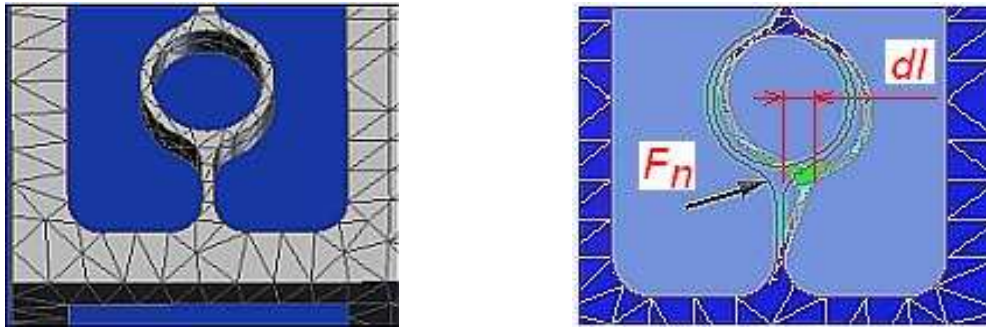


b)

Rys. 5. Przedmiot cienkościenny: a) model, b) przedmiot po obróbce skrawaniem

Fig. 5. Thin-walled part: a) model, b) part after machining

Analizę odkształceń i naprężeń dla modelu z rys.5 przeprowadzono przy pomocy metody elementów skończonych. Zaprojektowano siatkę, składającą się z 5504 elementów oraz 10592 węzłów (rys. 6). W miejscu zaznaczonym strzałką przykładano siłę o wartości składowej normalnej siły skrawania F_n , której wartość mierzono siłomierzem. Średnia wartość maksymalnego naprężenia głównego wynosiła 17,45MPa oraz 10,48MPa dla wartości siły F_n odpowiednio 12,4N i 7,68N.



Rys. 6. Model z naniesioną siatką elementów skończonych oraz odkształcony fragment przedmiotu cienkościennego o wartość dl w wyniku działania siły w miejscu zaznaczonym strzałką
 Fig. 6. Model with FE net and deformed fragment of thin-walled part as a result of force action in the place marked by arrow

Pomiary naprężeń własnych w WW występujących w wybranych cienkościennych fragmentach wykonanych przedmiotów przeprowadzono wykorzystując rentgenowską metodę dyfrakcyjną " $\sin^2 \psi$ ", która umożliwia określenie kierunków i wartości naprężeń głównych. Posłużyły one do weryfikacji opracowanego modelu MES. W tabeli 1 przedstawiono średnie zmierzone wartości składowej normalnej całkowitej siły skrawania F_n , oraz naprężenia σ_g . Wartości $\sigma_{g\text{sym}}$ oraz dl_{sym} otrzymano w wyniku obliczeń numerycznych.

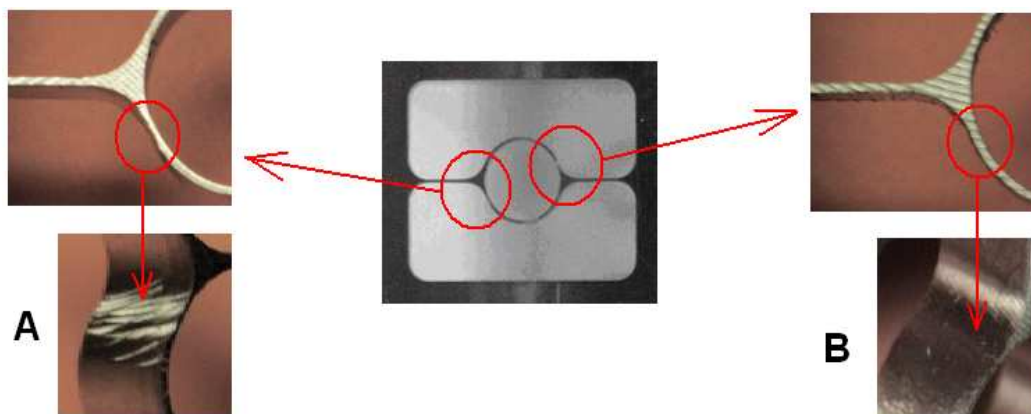
Tabela 1. Porównanie wartości składowej normalnej całkowitej siły skrawania F_n , oraz maksymalnego naprężenia σ_g w WW ścianki o grubości 0,3mm w przypadku zastosowania wrzeciona klasycznego i wysokoobrotowego
 Table 1. Values comparison of normal component of cutting force F_n and maximum stress σ_g in the upper layer of the 0,3mm thickness wall in the case of classical and high speed spindle application

Rodzaj wrzeciona	F_n [N]	$\sigma_{g\text{POM}}$ [Pa]	$\sigma_{g\text{sym}}$ [Pa]	dl_{sym} [mm]
Klasyczne - 10.000 obr/min	12,4	15,7	17,45	0,026
Turbina pneumatyczna - 90.000 obr/min	7,68	12,8	10,48	0,016

Na rys. 7 przedstawiono zdjęcia fragmentu wykonanego przedmiotu. Niestabilna obróbka (drgania), powodowana małą sztywnością przedmiotu obrabianego powoduje pogorszenie jakości struktury geometrycznej powierzchni frezowanej (rys. 7a). W przypadku poprawnie dobranych parametrów obróbki, następuje obniżenie oporów

skrawania oraz proces frezowania przebiega stabilnie. Ślady po obróbce są regularne i powierzchnia nie wykazuje wad (rys. 7b).

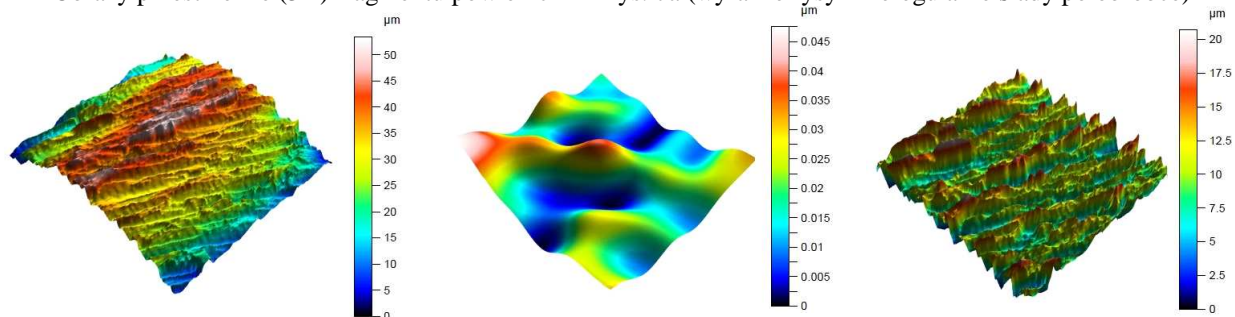
Obrazy przestrzenne (3D) zmierzonej powierzchni z obszaru pokazanego na rys. 7 ($l_c=0,8\text{mm}$), z wykorzystaniem pełnych danych pomiarowych, falistości i chropowatości, pokazano na rys. 8.



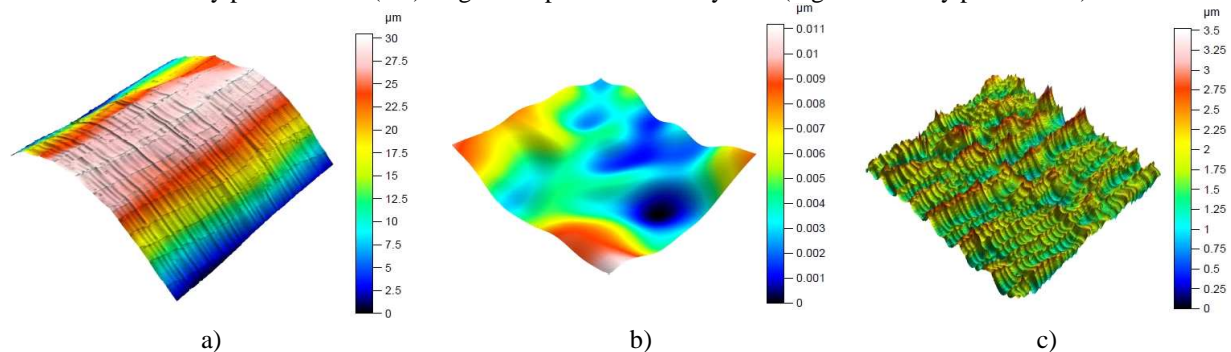
Rys. 7. Zdjęcia fragmentu wykonanego przedmiotu: A) efekt drgań przedmiotu podczas obróbki, B) powierzchnia uzyskana po prawidłowym przebiegu procesu skrawania

Fig. 7. Pictures of a fragment of machined workpiece. A) effect of workpiece vibrations during machining, b) fragment of surface achieved after a proper cutting process

Obrazy przestrzenne (3D) fragmentu powierzchni z rys. 7a (wyraźne rysy i nieregularne ślady po obróbce)



Obrazy przestrzenne (3D) fragmentu powierzchni z rys. 7b (regularne ślady po obróbce)



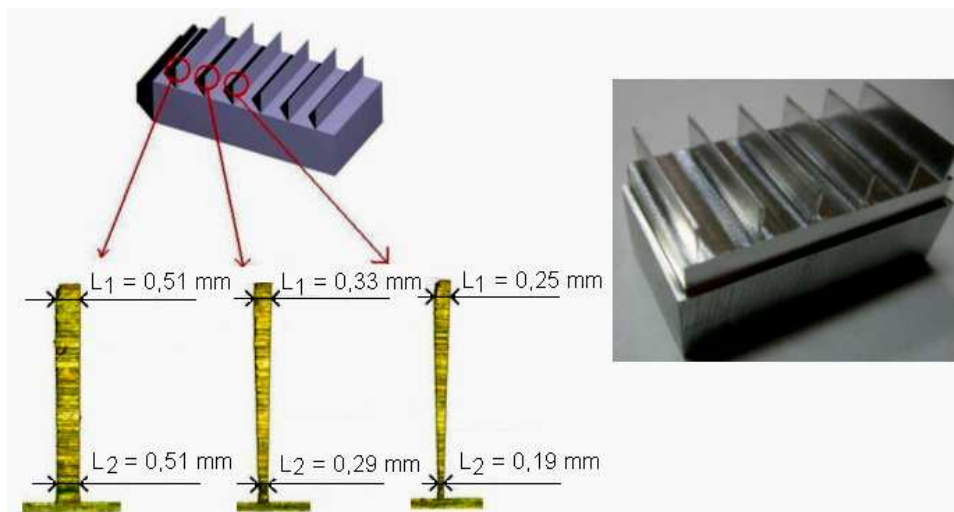
Rys. 8. Graficzna prezentacja (3D) wyników pomiarów powierzchni: a) pełne dane pomiarowe, b) falistość, c) chropowatość

Fig. 8. Graphical presentation (3D) of measured surface results: a) raw data, b) waviness, c) roughness

Powierzchnie przedmiotów cienkościennych, frezowane z wysokimi prędkościami skrawania charakteryzują się większą regularnością śladów obróbkowych oraz niższą chropowatością i falistością w stosunku do powierzchni obrabianych klasycznymi parametrami skrawania. Niższe opory skrawania powodują mniejsze odkształcenia frezowanego przedmiotu, co przekłada się na wyższą dokładność wymiarową i mniejsze naprężenia własne w WW.

4. OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA

Innym sposobem na poprawę jakości frezowanych przedmiotów cienkościennych jest optymalizacja parametrów skrawania, głównie posuwu f_z i szerokości a_e . Frezowanie cienkościennych przedmiotów o stosunku wysokości do grubości 12:1÷120:1 przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 3. Zastosowano frez trzpieniowy o średnicy $\phi=6\text{mm}$, prędkość skrawania $v_c=188\text{ m/min}$, posuw $f_z=0,02\div0,1\text{ mm/ząb}$, głębokość $a_p=6\text{mm}$ oraz szerokość $a_e=0,075\div0,6\text{mm}$. Przedmiot obrabiany oraz przykładowe wyniki pomiarów grubości ścianki po przeprowadzonym procesie frezowania przedstawiono na rys. 9. Pomiary grubości ścianek, których nominalne wartości wynosiły $L_n=0,05\div0,5\text{mm}$ zostały wykonane u podstawy przedmiotu i na wysokości swobodnego końca ścianki. Dla wszystkich próbek można było zaobserwować, że większość ścianek posiadała kształt trapezu tzn. u góry ścianki stwierdzano większą szerokość niż u jej podstawy. Spowodowane to było odkształceniami ścianki, wywołanymi oddziaływaniem składowej siły skrawania, normalnej do frezowanej powierzchni. Im większa siła skrawania tym ścianka bardziej się odkształca. Na wielkość siły skrawania, z jaką narzędzie działa na powierzchnię boczną przedmiotu mają wpływ głównie posuw f_z oraz szerokość a_e .



Rys. 9. Przedmiot obrabiany oraz przykładowe wyniki pomiarów grubości ścianki L_1 oraz L_2 po przeprowadzonym procesie frezowania

Fig. 9. Machined part and example results of wall thickness measurements L_1 and L_2 after milling process

W tabeli 2 przedstawiono wartości parametrów skrawania, pozwalające na uzyskanie średniej rzeczywistej grubości ścianki L o wartości zbliżonej do nominalnej grubości L_n .

Dla bardzo cienkiej ścianki, o nominalnej grubości poniżej 0,2mm nie uzyskano poprawnego geometrycznie przedmiotu. Ściankę cechowała bowiem zmienna grubość i niska jakość struktury geometrycznej powierzchni.

Tabela 2. Parametry skrawania, pozwalające na uzyskanie poprawnego geometrycznie przedmiotu
Table 2. Cutting parameters permit the machining of geometrical proper workpiece

	$L_n = 0,05\text{mm}$	$L_n = 0,1\text{mm}$	$L_n = 0,2\text{mm}$	$L_n = 0,5\text{mm}$
f_z [mm/ząb]	brak	brak	0,08÷0,09	0,02÷0,04 0,08÷0,10
a_e [mm]	brak	brak	0,50÷0,55	0,15÷0,25 0,55÷0,60

Po przeprowadzonych badaniach wykonano przykładowe przedmioty cienkościenne o grubości ścianki $L_n=0,2\text{mm}$, charakteryzujące się małymi błędami obróbki (rys. 10). Była to najmniejsza grubość, którą można było uzyskać w warunkach przeprowadzonego eksperymentu, pozwalająca na uzyskanie przedmiotu poprawnego geometrycznie. Zastosowano następujące parametry skrawania podczas obróbki wykończeniowej: $f_z=0,09$ mm/ząb; $a_e=0,5\text{mm}$; $a_p=6\text{mm}$; $v_c=188$ m/min.



Rys. 10. Przykłady przedmiotów cienkościennych charakteryzujące się małymi błędami obróbki
Fig. 10. Examples of thin-walled parts characterized by small machining errors

5. PODSUMOWANIE

Poprawę jakości wykonania przedmiotów cienkościennych, poprzez minimalizację błędów ich obróbki można uzyskać dzięki, między innymi, zastosowaniu właściwej strategii wytwarzania (minimalizacja składowej siły skrawania prostopadłej do frezowanej ścianki) oraz optymalizacji parametrów obróbki. Wysokie prędkości skrawania umożliwiają uzyskanie większej regularności śladów obróbkowych oraz niższej chropowatości i falistości obrobionych powierzchni.

LITERATURA

- [1] GRZESIK W., 1998, *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT, W-wa.
- [2] LUNDBLAD M., 2002, *Influence of Cutting Tool Geometry on Residual Stress in the Workpiece*, Proc. Third Wave AdvantEdge User's Conference, Atlanta, GA, Paper 7.
- [3] KLOCKE F., ZINKANN V., 1999, *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ändert die Spanbildung*, VDI-Z, 141/3-4, 30-33.
- [4] SHET C., DENG X., 2003, *Residual Stresses and Strains in Orthogonal Metal Cutting*, Int. J. Machine Tools Manuf. 43/6, 573-587.
- [5] SHIH A., J., YANG H., T., Y., 1993, *Experimental and Finite Element Predictions of Residual Stresses Due to Orthogonal Metal Cutting*, Int. J. Num. Meth. Eng., 36, 1487-1507.
- [6] <http://www.sandvik.coromant.com/>.
- [7] <http://www.airturbinetools.com/>.
- [8] <http://www.kennametal.com/>.

ERRORS MINIMALISATION OF THIN-WALLED PARTS MACHINING

Paper presents some problems concern with quality improvement of milling thin-walled parts through the cutting process error limitation. On the chosen examples the manners of cutting errors decreasing, relies on application of high cutting speed (HSC), cutting parameters optimization and proper cutting strategy selection are presented. HSC machining was performed with the help of a pneumatic high speed turbine. It was proven that surfaces of the thin-walled parts, milled with high cutting speeds are characterised by more regularity of cutting traces, lower roughness and waveness in relation to the surfaces machined with classical cutting parameters. Residual stresses in the upper layer of machined parts were considered. It also was proven that the proper cutting parameters selection permits the correctly geometrical thin-walled parts achievement.