

	Organizatorzy:	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

## Analiza kształtu i położenia strefy obróbki w procesie szlifowania powierzchni śrubowych ślimaków stożkowych

Analysis of the shape and position of machining zone in the process of grinding the surface of the conical helical worms

WOJCIECH KACALAK  
FILIP SZAFRANIEC \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.362

Szlifowanie powierzchni śrubowych ściernicami krążkowymi o stożkowej powierzchni czynnej daje w wyniku obróbki nieprostokątne powierzchnie stożkopochodne. Zarys osiowy takich powierzchni jest wypukły i w żadnym jej przekroju nie jest prostoliniowy. Obróbka wstępna powierzchni śrubowych, na przykład poprzez toczenie tworzy powierzchnię o prostoliniowym zarysie osiowym lub prostoliniowym zarysie w przekroju normalnym do określonej linii śrubowej na walcu o ustalonej średnicy. Kształt strefy szlifowania wynika z różnych zarysów osiowych po obróbce wstępnej oraz po szlifowaniu. W referacie przedstawiono algorytmy modelowania powierzchni śrubowych ślimaków stożkowych w środowisku Matlab oraz wyznaczono zmiany grubości nadkładu na szlifowanie wzdłuż wysokości zarysu powierzchni.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie powierzchni śrubowych, modelowanie, grubość nadkładu

*Grinding the grinding wheels roller about the active conical surface of screw, yields a result in machining of surface the conical of derivative, which is not a rectilinear. An outline of such axial surface is convex and in any section thereof not perpendicular. Pretreatment of the surface the helical, for example for turning forms a surface with a rectilinear outline axially or a rectilinear contour in cross section normal to a specific helix on the cylinder with a fixed diameter. The shape of the grinding zone due to the different axial profiles after pretreatment, and after grinding. In the paper presents algorithms for surface modeling the screw conical worms in Matlab and determination of the allowance for variations in*

*thickness along the height contour grinding surface.*

**KEYWORDS:** surface screw grinding, modeling, thickness of cut

**Cechy powierzchni śrubowych i problemy ich szlifowania**

Powierzchnie śrubowe znajdują szerokie zastosowanie w technice. Do nich należą między innymi powierzchnie zwojów gwintów i ślimaków. Mechanizmy śrubowo-toczące, zwane także śrubami pociągowymi tocznymi stosowane są powszechnie w układach napędów i pozycjonowania. Najważniejsze wymagania dotyczą wysokiej dokładności skoku, od czego zależy dokładność pozycjonowania przemieszczanych elementów [4-5,8-9]. Od dokładności zarysu zależy obciążalność i trwałość takich przekładni.

Powierzchnie śrubowe o twardości poniżej 36 HRC można obrabiać stosując operacje toczenia lub frezowania dla małych przekrojów warstw skrawnych i korzystając z narzędzi specjalnych. Dokładne powierzchnie śrubowe o twardości powyżej 36 HRC należy szlifować.

Szlifowanie powierzchni śrubowych należy do procesów złożonych w zakresie doboru i kształtowania narzędzi jak również dokładności pozycjonowania oraz doboru parametrów szlifowania zapewniających uzyskanie wymaganej wydajności i dobrych właściwości warstwy wierzchniej [1-4]. Powierzchnie śrubowe można szlifować z wykorzystaniem różnych narzędzi - ściernicami krążkowymi, palcowymi, pierścieniowymi lub garnkowymi. Szlifowanie narzędziami z wkładkami wewnętrznymi umożliwia stosowanie dużych szybkości szlifowania, ale kształtowanie takich ściernic nie jest jednak łatwe, a poza tym występują liczne ograniczenia dotyczące relacji parametrów geometrycznych. Ponadto, ze względu na sposób osadzenia ściernicy metoda ta umożliwia jedynie szlifowanie niezbyt długich powierzchni śrubowych.

\* prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak  
(wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl),  
mgr inż. Filip Szafranec (filip.szafranec@tu.koszalin.pl),

Stosowanie ściernic palcowych nie zapewnia dużej wydajności szlifowania, gdyż sztywność tych ściernic jest zbyt ograniczona. Ściernice palcowe charakteryzują się małą powierzchnią czynną, mają niską trwałość kształtu i wymagają częstego odnawiania powierzchni. W niektórych operacjach szlifowania powierzchni śrubowych, na przykład w procesie obróbki ostrzy frezów ślimakowych ściernice palcowe mogą być stosowane, gdyż pozwalają na uzyskanieżądanego zarysu szlifowanej powierzchni i nie wymagają złożonego systemu obciążania.

Ściernice garnkowe i pierścieniowe mają wprawdzie dostateczną sztywność i dużą powierzchnię czynną, ale nie jest możliwe z ich użyciem szlifowanie obu stron wrębu równocześnie. Ze względu na małą wydajność, te metody szlifowania, w których nie szlifuje się równocześnie obu stron, nie znajdują obecnie szerokiego zastosowania przemysłowego.

Ściernice krążkowe wykazują dużą sztywność, dużą powierzchnię czynną oraz umożliwiają obróbkę obu stron wrębu jednocześnie, co zapewnia znaczną wydajność szlifowania, ale za to wymaga stosowania złożonych systemów kształtowania powierzchni czynnej ściernicy, zapewniających uzyskiwanie zarysu odpowiadającego zdefiniowanemu rodzajowi powierzchni śrubowej.

W warunkach przemysłowych analiza geometryczna procesu szlifowania powierzchni śrubowych często jest zbyt pobieżna. Zależności matematyczne opisujące cechy geometryczne zarysów osiowych lub normalnych są złożone, zwłaszcza w przypadku powierzchni stożkopochodnych i torusopochodnych.

Nie zawsze odstępstwa od właściwego, nominalnego zarysu ściernicy do szlifowania określonej powierzchni śrubowej są świadome, choć w pewnych wypadkach są akceptowalne. Mogą być dopuszczalne wtedy, gdy błąd zarysu powierzchni śrubowej, spowodowany odstępstwem od nominalnego zarysu ściernicy, jest mały w stosunku do dopuszczalnej odchyłki zarysu, a krzywizna zarysu nie ulega zmniejszeniu.

Odstępstwa od nominalnego zarysu powierzchni śrubowej, dopuszczalne z uwagi na właściwości eksploatacyjne, zazwyczaj są uzasadniane wzrostem wydajności lub obniżeniem kosztów wykonania, lub często też brakiem możliwości wykorzystania urządzeń technologicznych, które mogłyby zapewnić uzyskanie powierzchni śrubowej o nominalnym zarysie.

Modyfikacja zarysu powierzchni śrubowej powinna być poprzedzona analizą cech stereometrycznych i skutków eksploatacyjnych, a ponadto trzeba uwzględniać również wpływ nieuniknionych odchyłek zarysu powodowanych odchyłkami położenia i zużyciem kształtowym ściernicy.

W tym celu opracowano w systemie MATLAB aplikację „PS+” [7] umożliwiającą przeprowadzanie obliczeń cech geometrycznych szlifowanej powierzchni śrubowej, w tym współrzędnych zarysów osiowych i dowolnych innych, dla powierzchni będących obwiednią położenia narzędzia – stożkopochodnych, torusopochodnych oraz o dowolnych (dopuszczalnych) zarysach. Możliwe jest przeprowadzanie analiz wpływu odchyłek położenia względnego narzędzia i szlifowanej powierzchni śrubowej na cechy geometryczne obrabianej powierzchni. Aplikacja ta nie posiada ograniczeń systemów CAD wynikających z dokładności, a także pozwala na dokonywanie dowolnych przekształceń i wizualizacji geometrycznych.

Stosując przedstawioną metodykę analiz oraz wykorzystując wyniki obliczeń z wykorzystaniem opracowanej aplikacji, można unikając długotrwałych i kosztownych badań właściwie planować procesy szlifowania powierzchni śrubowych w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej lub też optymalizować parametry procesu w warunkach produkcji seryjnej.

### **Dokładność procesu szlifowania powierzchni śrubowych**

Dla właściwego przeprowadzenia procesu szlifowania powierzchni śrubowych, niezbędne jest rozwiązanie nie tylko problemów geometrycznych, ale także wielu problemów technologicznych [2,6,8,13-14].

Powierzchnia śrubowa kształtowana w procesie szlifowania ściernicą krążkową jest obwiednią powierzchni czynnej narzędzia poruszającego się względem niej ruchem śrubowym. Taka powierzchnia śrubowa nie jest prostokreślna [8,10-12].

Dla jednoznacznego określenia cech geometrycznych powierzchni śrubowej obrabianej narzędziem krążkowym należy podać:

- rodzaj narzędzia,
- zarys znamionowy narzędzia,
- wymiary narzędzia,
- położenie narzędzia względem osi powierzchni śrubowej.

Kształt powierzchni śrubowej, a więc i jej zarys w wybranym przekroju, zależy nie tylko od zarysu powierzchni czynnej narzędzia, ale również od jego średnicy oraz położenia osi narzędzia względem osi obrabianej powierzchni.

Zarysy powierzchni śrubowych najczęściej stosowanych w technice są znormalizowane. Zarysem znamionowym powierzchni śrubowych większości gwintów jest zarys prostoliniowy w przekroju osiowym. Znormalizowane zarysy znamionowe powierzchni śrubowych ślimaków są prostoliniowe dla:

- ślimaka spiralnego (Archimedes) A, którego przekrojem znamionowym jest przekrój osiowy, a zarysem znamionowym zęba linia prosta,
- ślimaka normalnego, konwolutowego N, którego przekrojem znamionowym jest przekrój normalny, a zarysem znamionowym zęba linia prosta,

Zarysy krzywoliniowe są charakterystyczne dla:

- ślimaka osiowo-łukowego AR, którego zarysem znamionowym jest łuk koła w przekroju osiowym,
- ślimaka normalno-łukowego NR, którego zarysem znamionowym jest łuk koła w przekroju normalnym,
- ślimaka ewolwentowego E, który jest walcowym, ewolwentowym kołem śrubowym.

Ponadto można określić powierzchnie śrubowe ślimaków, dla których definiuje się zarys znamionowy narzędzia krążkowego (powierzchnie te są nieprostokreślne):

- ślimak stożkopochodny K, którego przekrojem znamionowym jest przekrój normalny, a zarysem znamionowym narzędzia krążkowego linia prosta,
- ślimak toroidalnopochodny KR, którego przekrojem znamionowym jest przekrój normalny, a zarysem znamionowym narzędzia krążkowego łuk koła.

Do jednoczesnego szlifowania obu stron wrębu gwintów trapezowych lub ślimaków prostokreślnych zarys ściernicy powinien być krzywoliniowy. Zatem dla zadanego, prostoliniowego zarysu powierzchni śrubowej powinno się wyznaczać krzywoliniowy zarys ściernicy. Zagadnienie to jest matematycznie złożone, a jego praktyczna realizacja trudna. Trudnym zadaniem jest kształtowanie ściernicy o krzywoliniowym zarysie, zwłaszcza, że zarys ten zależy również od jej średnicy, a średnica narzędzia zmniejsza się w wyniku zużycia i kolejnych operacji jej kształtowania.

Problem ten można rozwiązać zastępując zarys ściernicy łukiem koła lub inną krzywą łatwą do praktycznego uzyskania na przykład hiperbolą, stosując w tym celu specjalne przyrządy. Można również wykorzystać świadomą modyfikację zarysu, wiedząc, że niezbyt duże odstępstwa od zarysu nominalnego ściernicy nie zmieniają w dużym stopniu warunków współpracy ślimaka i ślimacznicy, jeżeli ślimak i frez ślimakowy do obróbki ślimacznicy były szlifowane w identycznych warunkach [8,10-11].

Upowszechnienie metod szlifowania powierzchni śrubowych spowodowało, iż dobór zarysu ściernicy do zarysu powierzchni śrubowej można uznawać za zadanie niekorzystnie sformułowane z technicznego punktu widzenia.

Szlifowanie powierzchni śrubowych innych niż stożko- i toroidalnopochodne lub ogólniej innych niż kształtowane z zastosowaniem narzędzia krążkowego o zdefiniowany zarys, jest trudne ze względu na niełatwość do uzyskania krzywoliniowy zarys ściernicy. Dlatego korzystniej jest określać zarys powierzchni śrubowej przez podanie zarysu znamionowego narzędzia, jego wymiarów oraz położenia w czasie obróbki. Sprawdzanie zarysu takich powierzchni jest jednak trudniejsze niż zarysów prostoliniowych, ale obecnie nie jest to problem metrologiczny.

W przypadku, gdy ściernica krążkowa ma prostoliniowy zarys osiowy, system jej kształtowania jest wyjątkowo prosty. W wyniku szlifowania taką ściernicą otrzymuje się wtedy śrubową powierzchnię stożkopochodną. Osiowy zarys takiej powierzchni jest wypukły. Opracowana aplikacja pozwala wyznaczyć między innymi współrzędne zarysu osiowego i jego odchylenia od prostoliniowości. Można sprawdzić, w jakim stopniu wartości tych odchyleń zależą od parametrów powierzchni śrubowej, średnicy i nominalnego położenia narzędzia, a także jak zależą od odchyłek zarysu i zmieniających się odchylek położenia.

Odchylenia od prostoliniowości zarysu osiowego gwintów trapezowych, obrabianych narzędziem krążkowym o prostoliniowym zarysie osiowym, są małe — nie przekraczają one nawet dla gwintów grubozwojnych kilkunastu mikrometrów. Niewielka i kontrolowana modyfikacja zarysu, polegająca na powiększeniu jego krzywizny, może być korzystna ze względu na rozkład nacisków w czasie współpracy śruby i nakrętki, lub ślimaka i ślimacznicy.

Dlatego w pewnych obszarach parametrów powierzchni śrubowych można szlifować ślimaki normalne, spiralne i gwinty trapezowe ściernicami o prostoliniowym zarysie osiowym. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w rezultacie otrzyma się stożkopochodną powierzchnię śrubową, posiadającą wypukły zarys osiowy i normalny. Postępowania takie dopuszcza się jedynie w przypadkach technologicznie uzasadnionych i wtedy powinno się je poprzedzić analizą błędów zarysu.

Przemieszczenia przedmiotu względem ściernicy, spowodowane niedokładnością technologiczną układu obrabiarki - przedmiot - narzędzie, wywołują określone skutki

geometryczne, jakimi są odchyłki wymiarów i kształtu. Wartości tych odchylek - odchyłek zarysu, skoku i średnicy podziałowej — w znacznym stopniu zależą od parametrów szlifowania. Wartości tych odchylek zależą ponadto od wielkości niezależnych od parametrów obróbki, zwłaszcza takich jak odchyłki dokładności geometrycznej i kinematycznej szlifierki, odchyłki położenia przemieszczanych i nastawianych zespołów obrabiarki, a także odchyłek położenia i odchylek zarysu ściernicy.

Jakość warstwy wierzchniej szlifowanej powierzchni śrubowej zależy przede wszystkim od charakterystyki ściernicy i warunków szlifowania. Zużycie ściernicy, następujące podczas jednego przejścia, jest przyczyną nie tylko określonych zmian zarysu szlifowanej powierzchni śrubowej, ale determinuje jakość warstwy wierzchniej i wpływa na mikrotopografię obrabianej powierzchni.

Autorzy przygotowując założenia do procedur obliczeniowych przeprowadzili szczegółową analizę przyczyn niedokładności szlifowanych powierzchni śrubowych [2-3,15]. Dokonano oceny wpływu odchylek dokładności geometrycznej i kinematycznej obrabiarki, okształceń mechanicznych i cieplnych obrabiarki oraz przedmiotu, odchylek zarysu wynikających z kształtowania i zużycia ściernicy oraz wpływu drgań układu na odchyłki wymiarów i kształtu powierzchni śrubowej.

Wyprowadzono również zależności matematyczne odchylek od parametrów szlifowania oraz czynników mierzalnych, ale niesterowalnych, związanych z dokładnością geometryczną i kinematyczną obrabiarki oraz jej charakterystyką statyczną i dynamiczną.

Opracowana aplikacja pozwala również na wyznaczenie długości drogi pracy ostrza w szlifowaniu powierzchni śrubowych oraz kształt strefy szlifowania (rys. 1, 2) oraz zarysu zwoju (rys. 3.).

### **Wyniki analiz dokładności kształtowania zarysu szlifowanych powierzchni śrubowych**

Wykazano, że ważniejsze przyczyny odchylek zarysu można sprowadzić do trzech przyczyn bezpośrednich:

- odchylki położenia osi ściernicy względem osi przedmiotu,
- odchylki kąta pochylenia osi ściernicy względem osi obrabianej powierzchni śrubowej,
- odchylki zarysu ściernicy.

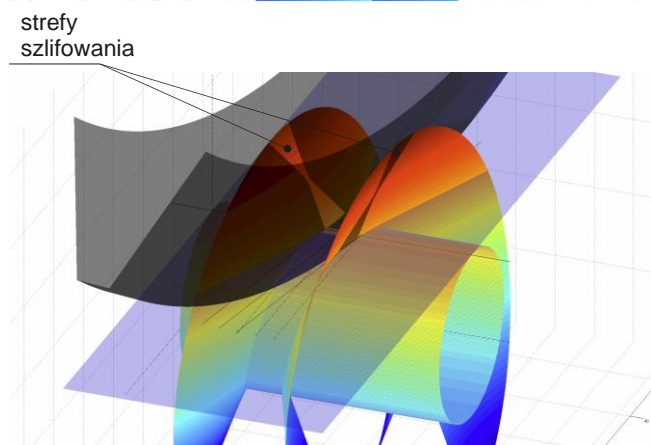
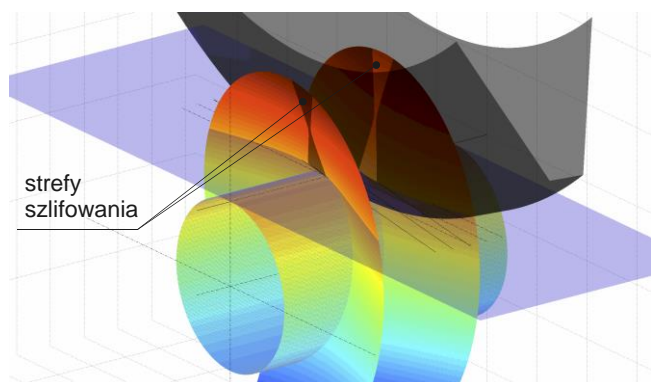
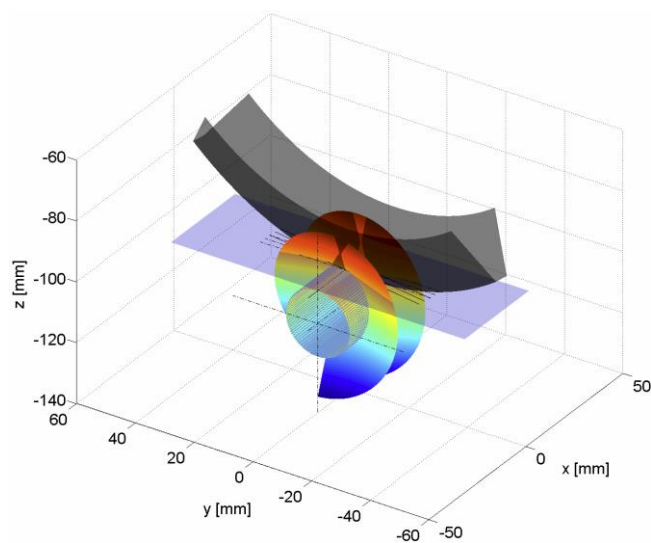
Kąt pochylenia osi ściernicy jest, poza wyjątkowymi przypadkami, równy kątowi pochylenia linii śrubowej na walcu podziałowym. Odchyłka kąta pochylenia osi ściernicy wynika głównie z odchylek nastawienia tego kąta oraz z odchylek położenia osi ściernicy względem osi powierzchni śrubowej. Ta odchyłka położenia spowodowana jest niedokładnością geometryczną i okształceniami obrabiarki oraz okształceniami przedmiotu.

Odchyłka zarysu ściernicy może wynikać z odchylek ściernicy po obciążeniu, wywołanej przez niedokładność technologiczną urządzenia do obciążania i niedokładność jego ustawienia, a w wypadku przyjęcia zarysu zastępczego, dodatkowo i z tej przyczyny. Odchyłka zarysu ściernicy wynika również z procesu zużywania kształtowego.

Analiza wyników obliczeń wskazuje, że decydujący wpływ na wartość odchylek zarysu ma odchyłka zarysu ściernicy spowodowana jej zużyciem lub zastosowaniem zarysu zastępczego. Dopuszczalne w szlifierkach do gwint-

tów odchyłki położenia płaszczyzny obciążania ściernicy są przyczyną pomijalnie małych odchyłek zarysu.

Odchyłki dokładności geometrycznej i odkształcenia obrabiarek w warunkach prawidłowej jej eksploatacji są przyczyną

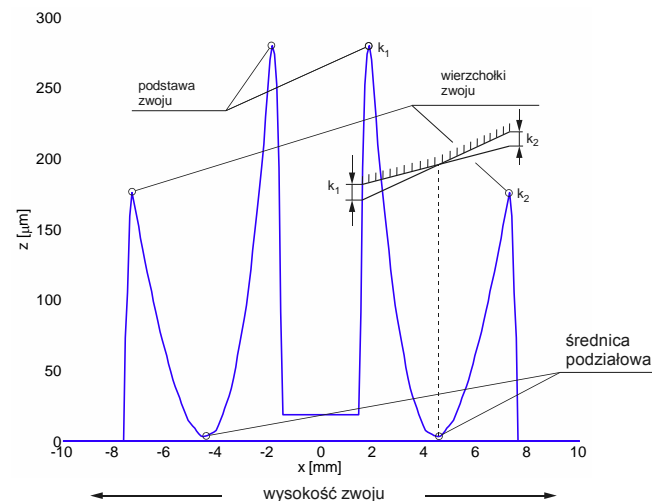


Rys. 1. Wizualizacja stref szlifowania powierzchni śrubowej o prostoliniowym zarysie osiowym przed szlifowaniem ściernicą krążkową o zarysie trapezowym

ną odchyłek zarysu mniejszych od wartości 0,001 mm.

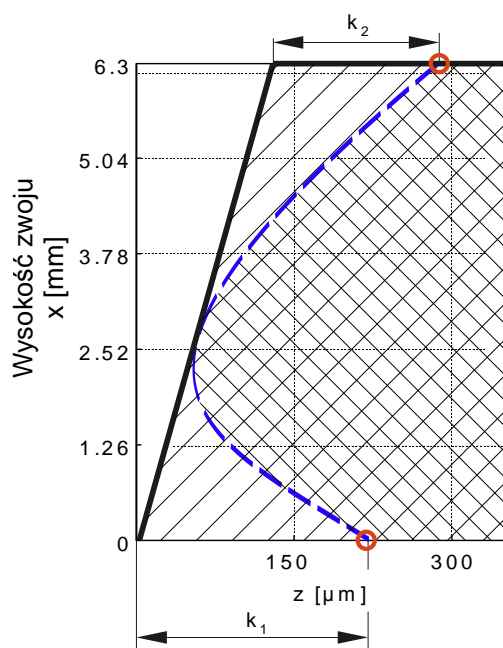
Z przeprowadzonych analiz wynika, że odchyłki zarysu spowodowane odchyłkami skoku i średnicy podziałowej są pomijalnie małe.

Odchyłka kąta pochylenia osi ściernicy ma znaczny wpływ na wartość odchyłki zarysu. Mechanizmy nastawiania kąta pochylenia osi ściernicy są w wielu spotykanych konstrukcjach obrabiarek zbyt niedokładne. Dlatego w szlifowaniu dokładnych powierzchni śrubowych należy korzystać z dodatkowych przyrządów do odczytu wartości nastawionego kąta pochylenia osi ściernicy.



Rys. 2. Rzut na płaszczyznę osiową x-z wartości nadaddtu na szlifowanie ściernicą krążkową o zarysie trapezowym powierzchni śrubowej o prostoliniowym zarysie osiowym przed operacją szlifowania

Wśród czynników zależnych od parametrów szlifowania, główny wpływ na wartość odchyłki zarysu ma zużycie kształtowe ściernicy. Dążąc do zmniejszenia odchyłek zarysu można tak ustalać parametry szlifowania, aby dla wymaganej wydajności obróbki, minimalizować odchyłki zarysu powodowane zużyciem kształtowym narzędzia. Można dla stałej wartości iloczynu głębokości szlifowania i prędkości



Rys. 3. Zarys osiowy stożkopochodnej powierzchni śrubowej (niebieska linia przerywana) po procesie szlifowania

posuwu - dobierać tak wartości tych dwóch parametrów, aby zmniejszyć zużycie kształtowe ściernicy.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki działania aplikacji do modelowania powierzchni śrubowych ślimaków stożkowych w środowisku Matlab oraz wyznaczania zmiany grubości naddatku na szlifowanie wzdłuż wysokości zarysu powierzchni. Rezultaty przedstawiono w postaci wykresu wartości naddatku na szlifowanie ściernicą walcową o zarysie trapezowym powierzchni śrubowej o prostoliniowym zarysie osiowym przed operacją szlifowania.

*Badania zrealizowano w ramach projektu:*



Projekt "Innowacyjne, hybrydowe narzędzia ściernie do obróbki stopów metali lekkich" realizowany w ramach programu "INNOTECH" w ścieżce programowej IN-Tech Nr umowy: INNOTECH-k3/IN3/43/229135/NCBR/14 współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

### LITERATURA

- Guo C., Malkin S.: Analysis of Transient Temperatures in Grinding. Journal of Engineering for Industry, vol. 117, nr 4 (1995), ASME 1995, 571-577.
- Kacalak W., Kukiela L., Krzyżyński T.: Application of Fuzzy Logic Algorithms to Irregular Disturbance Compensation in Technological Processes. GAMM Annual Meeting, Metz 1999.
- Kacalak W., Lewkowicz R.: Präzisionsschleifen Langer Schrauben und Spindeln. Werkstattstechnik WT Produktion und Management, Springer Verlag 11/12, 1994, 526-529.
- Kacalak W., Lubiński A.: Sposób szlifowania dokładnych powierzchni śrubowych, zwłaszcza długich gwintów. Patent nr 160 799, 1993 r.
- Kacalak W., Majewski M., Budniak Z., Przekładnie ślimakowe z regulowanym luzem bocznym. Mechanik, t. 87, nr 7, 526-532, 2014.
- Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz., Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni, Pomiary Automatyka Kontrola, t. 57, 542-546, 2011.
- Kacalak W., Szafraniec F.: Aplikacja PS+. 2015. Praca nie publikowana.
- Kacalak W.: Wybrane problemy konstrukcji i technologii precyzyjnych przekładni ślimakowych. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 51, Politechnika Koszalińska, Koszalin 1995.
- Kacalak W., Majewski M., Lipiński D.: Minimalizacja odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie szlifowania długich powierzchni śrubowych. Mechanik, t. 87, nr 1, 36-40, 2014.
- Marciniak T.: Characteristic wear as the basis for defining the abrasive wear rate in worm gear drivers. Advances in Manufacturing Science and Technology, nr 2, vol. 26/2002. 63-75.
- Marciniak T.: Obciążalność zazębienia przekładni ślimakowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 934, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2004.
- Markowski T., Olewicz R. Synteza i metody wyznaczania obszaru styku przekładni ślimakowej, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 15, nr 2, 95.
- Pavel R., Srivastava A.: An experimental investigation of temperatures during conventional and CBN grinding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nr 33 (2007), Springer 2007, 412-418.
- Wei J., Zhang G.: A precision grinding method for screw rotors using CBN grinding wheel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nr 48 (2010), Springer 2010, 495-503.
- Wei J., Zhang Q., Xu Z., Lyu S.: Study on Precision Grinding of Screw Rotors using CBN Wheel. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 11, nr 5 (2010), Springer 2010, 651-658.