

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak  
Politechnika Koszalińska

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Artura Bełzo

### **WPLYW PROGRAMOWEGO PROFILOWANIA ŚCIERNICY KRAŻKOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ ZARYSU ZWOJU ŚLIMAKA WALCOWEGO**

Promotor: dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. Politechniki Rzeszowskiej

Koszalin, sierpień 2022

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak  
Politechnika Koszalińska

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Artura Bełzo

### **WPŁYW PROGRAMOWEGO PROFILOWANIA ŚCIERNICY KRĄŻKOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ ZARYSU ZWOJU ŚLIMAKA WALCOWEGO**

Promotor: dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. Politechniki Rzeszowskiej

---

#### **1. Ocena tematu, koncepcji oraz zakresu pracy**

Celem badań realizowanych przez Autora było opracowanie podstaw naukowych metody szlifowania ślimaków walcowych z wykorzystaniem uniwersalnej tokarki CNC i oprzyrządowania, umożliwiającego kształtowanie powierzchni czynnej ściernicy krążkowej tak, aby możliwe było uzyskiwanie określonego kształtu powierzchni śrubowej ślimaka. Ważnym zadaniem było również określenie dokładności profilowania ściernic oraz dokładności zarysu zwoju obrabianych ślimaków.

Dla realizacji tego celu doktorant przeprowadził analizę cech powierzchni uzwojenia ślimaków walcowych, scharakteryzował i ocenił metody technologiczne wykorzystywane w obróbce uzwojenia ślimaków, opracował wnioski z badań dotyczących metod kształtowania powierzchni śrubowych, kształtowania powierzchni ściernic przeznaczonych do ich szlifowania oraz realizacji procesów obróbki ślimaków.

W pracy doktorskiej został przedstawiony cel i zakres pracy. Nie sformułowano tezy lub hipotezy badawczej, ale z treści pracy wynika, że uznano opracowaną metodę za wystarczająco dokładną dla zastosowań w produkcji jednostkowej i małoseryjnej elementów przekładni ślimakowych. Wyniki badań potwierdziły słuszność tego założenia, choć dla ślimaków innych niż stożkopochodne, producent stosujący opracowaną metodę, powinien wykorzystywać aplikację do wyznaczania zarysów narzędzi dedykowanych do obróbki powierzchni śrubowej o określonym kształcie.

Do budowy stanowiska badawczego wykorzystano opatentowany przyrząd, a doktorant był pierwszym współautorem tego patentu. W spisie literatury znajdują ponadto liczne publikacje doktoranta.

Autor twórczo wykorzystał podstawy matematycznego modelowania kształtu narzędzi krążkowych do obróbki powierzchni śrubowych zwojów ślimaków. Przeprowadził również ocenę dokładności i przydatności modelowania geometrycznego w kształtowaniu torusopochodnych powierzchni śrubowych w systemie CAD.

W dalszej części rozprawy opisane zostały wyniki badań wstępnych w zakresie obróbki zgrubnej uzwojenia ślimaków, pozycjonowania przyrządu i definiowania toru obciążaczy oraz doboru parametrów obróbki.

Końcowa część pracy obejmuje podstawy kształtowania zarysu ściernicy, ocenę dokładności, a następnie badania procesu szlifowania i analizę wyników, w tym ocenę dokładności oraz wysokości nierówności powierzchni zwojów obrabianych ślimaków. Autor również określił potrzebę dokładniejszego pozycjonowania położenia osi ściernicy, zwłaszcza kąta pochylenia jej osi, a także wskazał kierunki dalszych prac badawczych.

Tematykę pracy oceniam pozytywnie. Analizę stanu wiedzy oceniam jako szczegółową i wyczerpującą. Poziom naukowy rozprawy jest dobry. Wartość aplikacyjna pracy jest znaczna.

Rozprawa jest kompletna, zawiera poprawne podsumowanie stanu wiedzy i jasne przedstawienie osiągnięć Autora.

## **2. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy**

Recenzowana praca doktorska rozwiązuje wybrane problemy dotyczące szlifowania powierzchni śrubowych ślimaków, zwłaszcza nieprostokreślnych w tym powierzchni o wklęsłych zarysach, z wykorzystaniem tokarek CNC oraz autorskiego, opatentowanego oprzyrządowania. Jej wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy i jej zastosowań w tym zakresie. Wyniki pracy mogą zostać wykorzystane również w obróbce innych powierzchni śrubowych.

Najważniejsze wymagania stawiane procesom kształtowania powierzchni śrubowych najczęściej dotyczą wysokiej dokładności skoku, gdyż w układach kinematycznych od tego zależy dokładność pozycjonowania przemieszczalnych elementów. Zakres badań opisanych w rozprawie obejmuje analizy dokładności zarysu powierzchni śrubowych współpracujących elementów przekładni oraz właściwości stereometrycznych powierzchni, bo od nich i właściwości fizycznych warstwy wierzchniej, zależy obciążalność i trwałość przekładni.

Złożoność problemów technologicznych w procesach obróbki powierzchni śrubowych wiąże się z wielką różnorodnością cech geometrycznych tych powierzchni. Mogą być one powierzchniami tworzonymi przez linie śrubowe położone na dowolnej powierzchni.

Wśród powierzchni utworzonych przez linie śrubowe położone na walcu, można wyróżnić powierzchnie prostokreślne i nieprostokreślne, czyli takie, które nie posiadają prostoliniowej tworzącej w żadnym przekroju płaszczyzną, a także powierzchnie o zarysach kołowo łukowych lub ogólnie zarysach wklęsłych.

Istotne różnice występują również w sposobach definiowania kształtu powierzchni śrubowych. Powierzchnie te mogą różnić się kształtem zarysu, który może być definiowany w różnych przekrojach. Niektóre powierzchnie nie są zdefiniowane poprzez określanie ich kształtu (zarysu) lecz są zdefiniowane poprzez podanie zarysu narzędzia i typu narzędzia do ich kształtowania, a inne posiadają kształt definiowany poprzez zarys określony wprost.

Powierzchnie śrubowe można szlifować z wykorzystaniem różnych narzędzi - ściernicami krążkowymi, palcowymi, pierścieniowymi lub garnkowymi. Autor słusznie wybrał obróbkę ściernicami krążkowymi, które wykazują dużą sztywność, dużą powierzchnię czynną oraz umożliwiają obróbkę obu stron wrębu jednocześnie, co zapewnia znaczną wydajność szlifowania. Wymagane jest wówczas stosowanie złożonych systemów kształtowania powierzchni czynnej ściernicy, zapewniających uzyskiwanie zarysu odpowiadającego zdefiniowanemu rodzajowi powierzchni śrubowej.

Powierzchnia śrubowa kształtowana w procesie szlifowania ściernicą krążkową jest obwiednią powierzchni czynnej narzędzia poruszającego się względem niej ruchem śrubowym. Kształtowana powierzchnia jest miejscem geometrycznym linii śrubowych o kącie wzniosu zależnym od średnicy walca, na którym są rozwinięte. Ściernica jest natomiast pochylona pod kątem, który jest zgodny ze wzniosem tylko jednej linii śrubowej. Powstaje wówczas powierzchnia stożkopochodna lub torusopochodna. Zarys takiej powierzchni w przekroju płaszczyzną prostopadłą do linii śrubowej na przykład na walcu podziałowym, jest inny niż zarys narzędzia krążkowego. Różnice te zależą od modułu oraz średnicy podziałowej ślimaka i są tym większe, im większa jest średnica narzędzia krążkowego.

Autor dobrze opanował rozwiązywanie problemów geometrycznych w procesach kształtowania powierzchni śrubowych. Uwzględnił w swoich pracach, że dla jednoznacznego określenia cech geometrycznych powierzchni śrubowej obrabianej narzędziem krążkowym, należy podać: rodzaj narzędzia, jego zarys znamionowy i wymiary narzędzia oraz położenie narzędzia względem osi powierzchni śrubowej. Kształt powierzchni śrubowej, a więc i jej zarys w wybranym przekroju, zależy bowiem nie tylko od zarysu powierzchni czynnej narzędzia, ale również od jego średnicy oraz położenia osi narzędzia względem osi obrabianej powierzchni.

Autor do badań wybrał grupę ślimaków nieprostokreślnych o właściwościach zbliżonych do właściwości ślimaków torusopochodnych, lecz o zdefiniowanym kształcie zarysu zwoju (wklęsłym kołowym). Różnica między nimi polega na tym, że ślimaki o zarysie zębów określonym wprost mają określony zarys przekroju znamionowego zębów. Wówczas zarys ściernicy krążkowej musi być taki, aby tworzona powierzchnia jako obwiednia, była zgodna ze zdefiniowanym zarysem kołowo-łukowym ślimaka.

Ślimaki o takim zarysie charakteryzują się bardzo dobrymi warunkami powstawania filmu olejowego, co sprzyja uzyskaniu wyższej sprawności i wyższej obciążalności. Ślimaki tego typu są trudniejsze do szlifowania bowiem zarys narzędzia nie jest łukiem okręgu, a ponadto zależy od średnicy ściernicy i położenia jej osi.

Pozytywnie oceniam, iż Autor analizował wpływ przemieszczeń ściernicy względem przedmiotu, spowodowanych niedokładnością technologiczną układu obrabiarka - przedmiot - narzędzie, na skutki geometryczne, jakimi są odchyłki wymiarów i kształtu.

Autor słusznie zwrócił uwagę na odchyłki kąta pochylenia osi ściernicy. Nominalna wartość tego kąta jest, poza wyjątkowymi przypadkami, równa kątowi pochylenia linii śrubowej na walcu podziałowym. Odchyłki kąta pochylenia wpływają na zarys obrobionej powierzchni śrubowej oraz na linie i pole przyporu.

Warto podkreślić, że Autor w wyznaczaniu zarysu ściernicy uwzględnił cechy narzędzia kształtującego. Starannie prowadzony proces obróbki pozwolił na uzyskanie klasy dokładności od czwartej do szóstej, co należy uznać w określonym układzie technologicznym za wynik bardzo dobry.

Dość duże rezerwy w podwyższaniu dokładności i zmniejszaniu rozproszenia wyników wiążą się z poprawą dokładności pozycjonowania przyrządu do kształtowania zarysu ściernicy. Autor wyraźnie na to wskazał (str. 133), a dodatkowo zwrócił uwagę, że ograniczona przestrzeń robocza tokarki nie pozwala na zastosowanie układów napędu ściernicy o większej mocy, a zwłaszcza większej sztywności.

Do ważniejszych uwag dotyczących pracy zaliczam:

- Ograniczenie wnioskowania, dotyczącego parametrów chropowatości powierzchni zwoju ślimaka po szlifowaniu, do oceny wpływu prędkości szlifowania, prędkości posuwu oraz dosuwu szlifowania (str. 90), w układzie technologicznym o małej sztywności w warunkach, gdy dosuwy wynosiły 1, 3 i 5 mikrometrów, a zatem były znacznie mniejsze od wysokości nierówności, a także można przyjąć, że były mniejsze od odkształceń sprężystych układu. Brakuje ocen podatności zastosowanego oprzyrządowania. Wskazane byłoby również kontrolowanie drgań układu napędowego ściernicy.
- Zastosowanie równań regresji w postaci wielomianowej (problem planu eksperymentu) trudno uzasadnić cechami procesu. Zmiany wartości opisywanych przez zależności wielomianowe w sensie matematycznym nie są ograniczone, natomiast zakres zmian wysokości nierówności, jest ograniczony cechami procesu i obrabianego elementu.
- Można łatwo wykazać, iż określona zmiana wartości w zbiorze danych (uzasadniona statystycznie), w zależnościach wielomianowych, może powodować

znaczne zmiany wartości współczynników modelu, a nawet zmiany znaku wartości tych współczynników. Należy przy tym podkreślić, że współczynniki wielomianu nie są powiązane z cechami badanych zależności.

- Struktura geometryczna powierzchni ściernic ma duży wpływ na topografię szlifowanych powierzchni i jest zmienna podczas obróbki. Proces szlifowania składał się z wielu przejść (o różnej liczbie dla różnych dosuwów), odpowiadających stosunkowi naddatku 0,2 mm do przyjętych wartości dosuwu 0,001, 0,003 i 0,005, czyli liczył odpowiednio 20, w drugim przypadku 7 (w tym nie wszystkie jednakowe) i 4 przejścia dla największego dosuwu.

#### 4. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Artura Beźło nt.: WPLYW PROGRAMOWEGO PROFILOWANIA ŚCIERNICY KRĄŻKOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ ZARYSU ZWOJU ŚLIMAKA WALCOWEGO, której promotorem jest dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. Politechniki Rzeszowskiej, mogę stwierdzić, iż Autor:

- Przeprowadził obszerną analizę literatury i właściwie określił cele pracy. Wybrał temat i zakres pracy doktorskiej ważny dla rozwoju wiedzy i zastosowań metod wytwarzania przekładni zębatych.
- Opracował innowacyjną metodę szlifowania ściernicami krążkowymi powierzchni zwojów ślimaków, zwłaszcza z zarysami kołowo-łukowymi z wykorzystaniem opatentowanego oprzyrządowania i uniwersalnej tokarki CNC.
- Przyjął wystarczająco szeroki zakres problemów rozpatrywanych w rozprawie – przeprowadził obliczenia i modelowanie kształtu powierzchni śrubowych, a zwłaszcza opracował procedury kształtowania ściernic krążkowych oraz przeprowadził badania eksperymentalne i uzyskał wyniki korzystne dla przemysłowych zastosowań opracowanej metody obróbki.
- Program badań był ukierunkowany na potwierdzenie poprawności działania opracowanej metody i mimo pewnych uwag dotyczących metodyki, oceniam, że mgr inż. Artur Beźło uzyskał wartościowe wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych.
- Poprawnie określił kierunki dalszych badań i sformułował problemy badawcze dotyczące doskonalenia układu technologicznego oraz doboru narzędzi.

Stwierdzenia powyższe uzasadniają opinię, iż rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

