

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Anny Bazan
z POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

MODEL TOPOGRAFII CZYNNEJ
POWIERZCHNI ŚCIERNICY Z cBN
UWZGLĘDNIAJĄCY JEJ ZUŻYCIE

Promotor

dr hab. inż. Andrzej Kawalec, prof. Politechniki Rzeszowskiej

Koszalin, sierpień 2018

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Anny Bazan

MODEL TOPOGRAFII CZYNNEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY Z cBN UWZGLĘDNIAJĄCY JEJ ZUŻYCIE

Promotor

dr hab. inż. Andrzej Kawalec, prof. Politechniki Rzeszowskiej

1. Ocena tematu i koncepcji pracy

Obecny etap rozwoju przemysłu, nazywany umownie „czwartą rewolucją przemysłową”, oznaczany nazwą „Przemysł 4.0”, jest opisywany przez zbiór założeń dotyczących inteligentnych systemów produkcyjnych, charakteryzujących się: zdolnością komunikowania systemów i ludzi, globalną digitalizacją i wirtualizacją, z wykorzystaniem wielkiej liczby modeli obiektów i procesów, decentralizacją podejmowania decyzji, przetwarzaniem w czasie rzeczywistym oraz elastycznym dostosowywaniem inteligentnych fabryk do zmieniających się wymagań i preferencji odbiorców.

Dawniej empiryzm był podstawą poszukiwania i podejmowania decyzji uznawanych za optymalne w zbiorze dość ograniczonych danych. Skłonność do empiryzmu wynika głównie z trzech przesłanek. Pierwsza łączy się z postępowaniem w metodach badań, druga związana jest z rosnącym udziałem prac inżynierskich w tworzeniu postępu technologicznego, a trzecia przesłanka wynika z nadmiaru zainteresowania badaczy bardziej skutkami, niż przyczynami zjawisk, raczej wynikami procesu, niż mechanizmami kumulacji i współzależności elementarnych oddziaływań zjawisk w analizowanych procesach.

Obecnie empiryzm jest już często jedynie metodą weryfikacji decyzji, których optymalność wynika z zastosowanych modeli. Ważnym problemem staje się wnioskowanie na podstawie wielkich zbiorów informacji, podobnie jak wcześniej, niepełnych, niepewnych i nieściślych, tylko w innej skali.

Stosunek ilości przetwarzanej informacji do ilości ekspertów, którzy potrafią interpretować określone dane, powiększył się wielokrotnie. To powoduje, iż automatyzacja modelowania, rozpoznawania i klasyfikacji stanów narzędzi i procesów staje się warunkiem efektywnej kontroli jakości produkcji.

Tematyka pracy bardzo dobrze wpisuje się w obszar najważniejszych problemów technologicznych. Ważnym elementem systemów do symulacji procesów szlifowania jest tworzenie poprawnych modeli czynnej powierzchni ściernicy, od których zależy dokładność prognozowania wyników procesu obróbki. Nie jest to łatwe zadanie, bo liczba cech mających wpływ na proces szlifowania jest wielka, liczba zdarzeń w jednostce czasu, w postaci oddziaływań poszczególnych wierzchołków ziaren na obrabianą powierzchnię, często przekracza 10^6 na sekundę, a mechanizm kumulacji skutków jest złożony i ma charakter losowy.

W zadaniach digitalizacji procesów i stanu obiektów zawsze rozpatrywany jest wybór metody pozyskiwania i udostępniania danych. Na początku tworzenia wiedzy dominuje tworzenie baz danych, jako zbioru poznanych realizacji procesów lub wyników badań określonych obiektów. Następnie, wraz z rozwojem wiedzy i metod modelowania, uwiadcza się dążenie do zbudowania modeli, stanowiących podstawę do prognozowania wyników określonych procesów.

Z tych stwierdzeń wynika, iż Doktorantka w pełni uczestniczy w tym procesie rozwoju wiedzy i podjęła się bardzo ambitnego i użytecznego zadania, a z dalszych ocen wynika, że również kompleksowo zrealizowanego i na bardzo dobrym poziomie.

2. Hipoteza i zakres pracy

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie modelu topografii czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami z regularnego azotku boru uwzględniającego jej zużycie. Model ten obejmuje relacje między parametrami nastawnymi procesu: prędkością i głębokością szlifowania oraz prędkością posuwu stycznego a ubytkiem właściwym materiału, siłą szlifowania, wartością sygnału emisji akustycznej oraz parametrami struktury geometrycznej powierzchni i parametrami topografii powierzchni ściernicy.

Zadania badawcze w pracy zostały ukierunkowane na jednowarstwowe ściernice z ziarnami regularnego azotku boru ze spoiwem galwanicznym, które znajdują coraz większe zastosowanie do obróbki trudnoskrawalnych materiałów, w tym stali wysokostopowych w stanie utwardzonym lub nadstopów niklu. Zaletą tych ściernic jest wysoka trwałość kształtu, co uzasadnia ich wykorzystywanie w procesach precyzyjnego szlifowania kształtowego, w tym elementów wysoko obciążonych przekładni lotniczych.

Z tego celu wynikały program i metodyka badań, a w tym wybór materiału oraz jego obróbka cieplna, co w całości oceniam bardzo wysoko, ze względu na spójność i kompleksowość zrealizowanych zadań. W próbkach wykorzystywanych do badań powiększono grubość warstwy nawęglanej do 1,7 mm, uzyskując na tym poziomie twardość 81 HRA. Podzielono powierzchnię przedmiotu na fragmenty kontrolne oraz określono objętość

materiału do usunięcia podczas obróbki z określonym zestawem parametrów – 2652 mm³ /mm szerokości strefy szlifowania.

Hipotezę naukową rozprawy sformułowano w postaci dwóch stwierdzeń, z których jedno odnosi się do możliwości wyodrębnienia takich parametrów (w domyśle z większej grupy), które w istotny sposób zmieniają się wraz ze zużywaniem się ściernicy, a drugie odnosi się do możliwości opracowania modelu zmian topografii powierzchni narzędzia w wyniku zużycia, uwzględniającego wybrane parametry stanu powierzchni ściernicy oraz ujmującego wpływ parametrów procesu szlifowania.

Pierwsze stwierdzenie odnosi się do słusznego przypuszczenia, że wśród licznego zbioru parametrów opisujących cechy geometryczne powierzchni ściernicy są takie, które w większym stopniu, niż inne, zmieniają się wraz ze zużywaniem się narzędzia. W takim sformułowaniu jak wyżej, jest to hipoteza, bo definiuje mierzalne cechy i potrzebę ich oceny. Możliwość wyodrębnienia parametrów o wyższym stopniu zależności jest zatem tezą wynikającą z założenia, że postawiona hipoteza jest prawdziwa.

Te drobne modyfikacje stwierdzeń umieszczam w recenzji jedynie ze względu na znaczenie zapisów w tych fragmentach rozprawy.

3. Ocena metodyki pracy

Metodykę badań zrealizowanych w pracy doktorskiej oceniam pozytywnie, a uwzględniając szeroki zakres problemów naukowych oraz bardzo dobry poziom i kompletność analiz zawartych w pracy, znajduję uzasadnienie do jej wysokiej oceny.

Potencjał obróbkowy narzędzi ściernych wynika z cech struktury narzędzi, rodzaju i właściwości materiałów ściernych oraz ich spoiw, parametrów geometrycznych ziaren ściernych oraz topografii powierzchni czynnej.

Autorka słusznie uznała, że do oceny potencjału obróbkowego mogą być stosowane różne sygnały wydobywane z realizowanego procesu lub z badań właściwości narzędzi. Ważną cechą badań przeprowadzonych przez Doktorantkę było, po wstępnej transformacji sygnałów, dokonywanie oceny przydatności określonej miary do oceny stanu narzędzia. W ocenie tej kryterium przydatności była siła i zgodność zależności miary od zmian stanu narzędzia.

Podczas szlifowania właściwości mechaniczne i chemiczne ściernicy nie ulegają wielkim zmianom, natomiast zmienia się, w wyniku procesów zużycia, stan powierzchni czynnej ściernicy. Ścieranie wierzchołków ziaren ściernych przyczynia się do zwiększenia sił i energii właściwej. Wykruszanie wierzchołków ziaren jest procesem odnawiania właściwości skrawnych, a wykruszanie całych ziaren skutkuje odchyłkami wymiarów i kształtu narzędzia. W obróbce stopów metali lekkich ponadto może występować fragmentaryczne zalepanie powierzchni czynnej ściernic produktami obróbki.

W formułowaniu efektywnej metodyki oceny topografii powierzchni czynnej ściernic, w aspekcie wykrywania niekorzystnych zmian stanu tej powierzchni, w pracy doktorskiej rozwiązane zostały następujące problemy:

- określenie miar przydatnych do oceny potencjału obróbkowego oraz identyfikacji form zużycia,
- określenie metodyki wyznaczania cyfrowych obrazów powierzchni ściernic (bez demontażu z wrzeczona szlifierki) – z wykorzystaniem metody replik, w tym wyboru obszarów do pomiaru oraz uwzględnienie zróżnicowania warunków mikroskrawania i cech zużycia ziaren w poszczególnych strefach powierzchni czynnej,
- określenie wpływu parametrów szlifowania na zmiany topografii powierzchni czynnej ściernicy.

Podstawy doboru parametrów do oceny stanu topografii powierzchni ściernic są odmienne od podstaw oceny struktury geometrycznej powierzchni obrobionych. Różnice wynikają najczęściej z potrzeby identyfikacji ziaren jako określonych form przestrzennych oraz z potrzeby identyfikacji form zużycia ściernicy. Ponadto powierzchnie narzędzi ściernych i powierzchnie po obróbce nimi różnią się w wielkim stopniu wartością gradientu i strukturą nierówności.

To przekłada się na stwierdzenie, że większość parametrów do oceny cech stereometrycznych przydatnych od oceny topografii powierzchni po obróbce, nie wykazuje przydatności do oceny powierzchni czynnej ściernic. Ten aspekt jest w rozprawie poprawnie ujęty i poddany obszernym analizom.

Złożoność problemu oceny stanu powierzchni czynnej, z przeznaczeniem tej oceny do wykorzystywania w prognozowaniu wyników procesu i trwałości narzędzi, wynika nie tylko z losowości ich kształtu i położenia, ale również z wielkiej liczby zdarzeń, jakimi są oddziaływania poszczególnych ziaren i ich wpływ na kształtowanie obrabianej powierzchni.

Zagadnienia te nabierają szczególnego znaczenia w odniesieniu do szlifowania nowych, często trudnoobrabialnych materiałów, w tym stopów metali lekkich, stopów odpornych na duże obciążenia w wysokich temperaturach, stosowanych między innymi w przemyśle lotniczym. Rozwój zastosowań tych materiałów zwiększa potrzebę projektowania i tworzenia nowych narzędzi o dokładnie określonych i kontrolowanych parametrach opisujących ukształtowanie i rozmieszczenie ziaren ściernych.

W identyfikacji form geometrycznych niekorzystnych zmian topografii powierzchni czynnej ściernic, w pracy doktorskiej uwzględniono, że starcia powierzchni wierzchołków charakteryzują się polem znacznie mniejszym od pola środkowego przekroju ziarna lub pola przekroju na wysokości spoiwa. Pola obszarów płaskich, będących zalepieniami powierzchni narzędzia, charakteryzują się większym rozwinięciem obwodu i polem znacznie większym od największych nawet pól starcia ziaren.

Wiele uwagi poświęcono ocenie rozmieszczenia i kształtu wzniesień wierzchołków ziaren ponad pewien poziom, wyznaczany na przykład od uśrednionego poziomu spoiwa, słusznie uznając, że może to być podstawą między innymi do:

- oceny aktywności ziaren,

- prognozowania energii właściwej obróbki, zależnej od rozkładu parametrów geometrycznych warstw skrawanych poszczególnymi ziarnami,
- oceny procesów zużycia narzędzi,
- doboru parametrów obróbki.

4. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych pracy zaliczam:

1. Zbudowanie stanowiska badawczego, umożliwiającego pomiar składowych siły szlifowania, sygnału emisji akustycznej, temperatury w otoczeniu strefy szlifowania oraz pozycjonowanie położenia stref pomiarów.
2. Opracowanie metody identyfikacji stref i poziomu spoiwa, który niezależnie od zużycia narzędzia jest odniesieniem dla poziomów odcięcia wzniesień (ziaren) i porów.
5. Wyodrębnienie z bardzo licznego zbioru parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni ściernicy tych, które najsilniej zależą od zużycia ściernicy i dokonanie selekcji parametrów przydatnych do budowy modeli regresji uwzględniających stan powierzchni narzędzi.
6. Opracowanie metody wyznaczania objętości ścierniwa, które zostało zużyte w wyniku wykuszania, wrywania oraz zalepiania ziaren ściernych.
7. Opracowanie modeli opisujących relacje między parametrami stanu powierzchni ściernicy, parametrami nastawnymi procesu, właściwą siłą szlifowania, cechami emisji akustycznej i wybranymi parametrami chropowatości szlifowanej powierzchni.

Bardzo wysoko oceniam dokładność opisów warunków i metodyki realizowanych badań oraz wysoki poziom analiz, a także nowoczesność zastosowanych metod analizy wyników. Poczynając od planowania eksperymentów, poprzez kompleksowe analizy statystyczne oraz ocenę zdolności klasyfikacyjnej poszczególnych parametrów, cały program badawczy jest spójny i bardzo starannie zrealizowany.

W pracy określone zostały również kierunki dalszych badań, z których na podkreślenie zasługuje program badań nad procesami zużycia w warunkach wielu zabiegów o zmiennych parametrach oraz dla zróżnicowanych charakterystyk ściernic.

5. Uwagi dotyczące pracy

Uwagi dotyczące ocenianej pracy odnoszą się głównie do modelowania zależności cech opisujących strukturę geometryczną powierzchni ściernicy oraz sił szlifowania i sygnału akustycznego, w zależności od parametrów nastawnych procesu, opisanych w rozdziale 7 (str. 173 – 228).

W przyjętych równaniach regresji, będących modelami wielu zależności ustalono, że wystąpią 4 składowe liniowe, 4 składowe będące kwadratami zmiennych i 6 składowych interakcji dwuczynnikowych. Następnie wykazano poprawnie, przyjmując poziom istotności $\alpha=0,05$, że liczba rozpatrywanych składowych dla poszczególnych modeli może być mniejsza. Postać modelu pozostała wielomianowa z dodatkowymi składowymi interakcji.

Wiele źródeł bibliograficznych, dotyczących planowania eksperymentów, ukierunkowanych jest na dokładność oszacowania regresji dla określonego zbioru danych. Zazwyczaj rozpatrywane są modele addytywne i multiplikatywne. W tych źródłach wiedzy o planowaniu eksperymentów zazwyczaj nie odpowiada się na trzy ważne pytania:

- jaka postać modelu wynika z wiedzy o określonych procesach i znanych relacjach, w których oczywiście nie znamy wartości parametrów, ale potrafimy określić postać modelu jeszcze przed eksperymentem,
- czy w kolejnych realizacjach (powtórzeniach) procesu „uniwersalna” postać modelu, z uwzględnieniem eliminacji składowych uznanych za nieistotne, zawiera współczynniki, które mają znacząco inne wartości lub nawet zmieniają znak, co daje modele jednorazowe (każdy jest odmienny choć każdy jest najlepiej dopasowany do zakończonej realizacji),
- czy można określić przyczyny przeciwstawnych wpływów tej samej zmiennej występującej we wielu składnikach i czy poza obszarem danego eksperymentu zależności są nadal poprawnie opisywane.

Na wybór postaci modelu często wpływa jego przeznaczenie. W modelach o znaczeniu aplikacyjnym dokładność informacyjna może przesądzać o postaci modelu, przy czym należy pamiętać o nietrwałości i ograniczonym zakresie takich rozwiązań.

W modelach o znaczeniu poznawczym decydujące znaczenie ma poprawność opisu relacji oraz ich zmian w czasie. Wtedy modele są poprawne również poza obszarem danych, którymi dysponuje badacz, gdyż ze znanej wiedzy wynikają możliwe ograniczenia dotyczące granicznych wartości i zakresu oraz charakteru zmienności.

Z tego wynikają uwagi następujące:

1. Wybór jednakowej postaci modeli dla różnych zależności, w postaci częściowo wielomianowej zależności stopnia drugiego, jest efektem aplikacyjnego ukierunkowania analiz w tym zakresie.
2. Można wykazać, iż określona zmiana, choćby jednej wartości w zbiorze danych (uzasadniona statystycznie), w zależnościach wielomianowych może powodować znaczne, a niekiedy nawet wielokrotne zmiany wartości współczynników modelu, a nawet zmiany znaku wartości tych współczynników. Współczynniki wielomianu nie pozostają w relacji do cech badanych zależności.
3. W przypadku, gdy postać modelu nie wynika ze znanych cech opisywanej zależności, można również poszukiwać takiej postaci modelu, który nie jest wrażliwy

na statystycznie uzasadnione zmiany danych, na przykład dla kolejnej realizacji procesu, co w rozprawie obszernie uzasadniono.

6. Ważniejsze osiągnięcia poznawcze i aplikacyjne

W pracy doktorskiej, Autorka badając procesy odpowiadające szlifowaniu kształtowemu uzębień, zastosowała ściernice o stożkowej powierzchni czynnej. Uwzględniła przy tym zmiany warunków szlifowania wzdłuż tworzącej stożka oraz przeprowadziła wnikliwe analizy wpływu tych zmian na procesy zużywania się ściernic.

Doktorantka wykazała, że dominującym rodzajem zużycia ściernic było wykruszanie ziaren regularnego azotku boru. Powiększanie objętości między ziarnami aktywnymi, w wyniku ich wrywania ziaren ze spoiwa, dominowało nad zmniejszaniem tej objętości w wyniku tworzenia zalepień na powierzchni.

W zbiorze analizowanych 144 parametrów topografii powierzchni najsilniej skorelowane ze zmianami parametrów i ważnych cech procesu, takich jak prędkość szlifowania v_s , głębokość szlifowania a_e , prędkość posuwu stycznego v_{ft} , właściwy ubytek materiału V' , właściwa siła szlifowania $\log F'_c$, właściwa wartość emisji akustycznej AE' oraz średniokwadratowe nachylenie nierówności obrabianej powierzchni Sdq , były:

- średnia wysokość ziaren $Z_{mean_sr}(ziaren)$,
- średnia głębokość porów $Z_{mean_sr}(porów)$.

Opracowany model topografii jednowarstwowych ściernic ze ścierniwem z regularnego azotku boru i spoiwem nakładanym galwanicznie, który definiuje obszerny zbiór relacji między parametrami i cechami oraz wynikami procesu, umożliwia przybliżoną ocenę potencjału obróbkowego narzędzi i prognozowanie ich trwałości.

Opracowane modele mogą być uogólnione na inne narzędzia ściernic, co oznacza, iż praca ma duże znaczenie poznawcze i może być podstawą dalszych prac naukowych Autorki, a także inspirować innych badaczy.

Praca jest obszerna, liczy 306 stron, zawiera 44 tabele i 224 rysunki. W części dotyczącej literatury odwołuje się do bibliografii liczącej 281 pozycji. Wykonane bardzo obszerne badania i analizy ich wyników umożliwiły potwierdzenie hipotezy i zapewniły osiągnięcie celu pracy. Można stwierdzić, iż mają duże znaczenie dla rozwoju wiedzy i istotne znaczenie aplikacyjne.

7. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Anny Bazan nt.: MODEL TOPOGRAFII CZYNNEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY Z cBN UWZGLĘDNIAJĄCY JEJ ZUŻYCIE, której promotorem jest dr hab. inż. Andrzej Kawalec, prof. Politechniki Rzeszowskiej, mogę stwierdzić, iż Autorka:

- wybrała temat rozprawy ważny dla opracowania, rozwoju i upowszechnienia nowych narzędzi i metod szlifowania, zwłaszcza w zastosowaniach do obróbki materiałów trudnoobrabialnych,
- opracowała podstawy naukowe diagnostyki i optymalizacji tych procesów, dzięki czemu praca tworzy podstawy nowych kierunków badań i zastosowań,
- przyjęła wystarczająco szeroki, komplementarny zakres zagadnień rozpatrywanych w rozprawie,
- wykazała się twórczymi osiągnięciami w tworzeniu nowych metod rozwiązywania problemów naukowych i technologicznych,
- dobrze opanowała metodykę pracy naukowej i wykorzystwała nowoczesne metody i systemy pomiarowe oraz metody analizy danych,
- dokonała poprawnych uogólnień wielu rozwiązanych problemów naukowych, tworząc podstawy dalszych badań i zastosowań oraz opracowała wiele ważnych wniosków o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym.

Pozwala to wyrazić opinię, iż rozprawa w bardzo dobrym stopniu spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Wysoki poziom naukowy, kompleksowość badań i analiz oraz staranność opracowań zawartych w pracy skłaniają mnie do postawienia wniosku o jej wyróżnienie.

