WPŁYNĘŁO
dnia 06.09.2021
PK/WM/BU/7/786/2021

Łódź, dn. 02.09.2021 r.

dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ
Politechnika Łódzka

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Marty Kordowskiej
pt.: „ANALIZA PRZEMIESZCZENIA MATERIAŁU W STREFIE MIKRO- I NANOSKRAWANIA DIMENTOWYM ZIARNEM ŚCIERNYM"

Recenzja opracowana na zlecenie Rektora Politechniki Koszalińskiej dr hab. Danuty Zawadzkiej, prof. PK, z dn. 07.07.2021 r.

1. Ocena wyboru tematu

Opiniowana praca doktorska dotyczy problemów mikro- i nanoobróbki materiałów szklanych, charakteryzujących się kruchością i trudnoobrabialnością. Materiały szklane, wytwarzane z przetopionych surowców mineralnych i surowców nieorganicznych, charakteryzują się nieuporządkowaną strukturą przestrzenną, a także znaczną twardością. Specyficzne właściwości materiałów szklanych, takie jak np.: przezroczystość, bezbarwność, izotropowość optyczna, wytrzymałość na ściskanie i zginanie, odporność na warunki środowiska, dobre właściwości dielektryczne, mają wpływ na powszechność ich zastosowania w życiu codziennym i wielu dziedzinach przemysłu. Przykładami zastosowania wyrobów z materiałów szklanych są m.in.: opakowania w przemysłach: farmaceutycznym, chemicznym, spożywczym, optycznym, samochodowym, w elektrotechnice i elektronice oraz w budownictwie i gospodarstwie domowym.

Obróbka dokładna i ultra precyzyjna materiałów szklanych sprawia w procesach wytwórczych duże trudności. Z tego względu uzasadniony jest rozwój badań, ukierunkowanych na doskonalenie procesów obróbki tych materiałów, a zwłaszcza na prowadzenie badań procesów mikro- i nanoskrawania. Wyniki tych badań dostarczają bowiem wiele istotnych informacji o zjawiskach fizycznych zachodzących w tych procesach, a zwłaszcza w strefie styku narzędzia z materiałem obrabianym.

Recenzowana rozprawa wpisuje się w nurt nowych kierunków badań mikroobróbki materiałów szklanych, której celem jest poznanie mechanizmów usuwania tych materiałów w procesach mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym oraz mikroszlifowania ściernicami diamentowymi. Należy podkreślić, że badania były realizowane w ramach projektu Kapitał Ludzki: „Inwestycje

w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie - III edycja, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji". Pozytywnie oceniam podejmowaną w rozprawie problematykę naukową, ponieważ jest ona oryginalna i nowoczesna oraz wychodzi naprzeciw współczesnym oczekiwaniom i potrzebom przemysłu. Temat rozprawy jest ważny, zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska opracowana jest w postaci monograficznej i zawiera 234 strony, w tym: 167 rysunków i 11 tabel. Treść rozprawy poprzedza spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń. Merytoryczna część rozprawy zawiera 6 głównych rozdziałów z poprawnie wydzielonymi podrozdziałami, po których następują: wnioski końcowe, potwierdzenie hipotezy, wskazanie kierunków dalszych badań, spis literatury, spis rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Do zasadniczej części pracy dołączono obszerny załącznik w formie elektronicznej (zapis na płycie CD, 186 str.), zawierający wyniki badań wstępnych i badań zasadniczych. Przyjęty układ rozprawy nie budzi zastrzeżeń, a podział treści na rozdziały i podrozdziały ma typową narrację dla prac doktorskich. Oceniam go jako przejrzysty i poprawny.

Rozdział 1 - *Wstęp* - zawiera wzmianki o podstawowych problemach charakteryzujących procesy produkcyjne obróbki przedmiotów z materiałów szklanych, w tym zwłaszcza na temat kruchego pękania materiału w procesach szlifowania. Doktorantka zamieściła następnie krótkie uzasadnienie celowości podjęcia badań w tym obszarze oraz skrótowo scharakteryzowała poszczególne rozdziały pracy.

Rozdział 2 - *Analiza literatury* - to bardzo obszerny przegląd literatury (42 str.), obejmujący siedem podrozdziałów: pkt. 2.1 Charakterystyka materiałów szklanych, pkt. 2.2 Procesy mikro- i nanoobróbki ściernej materiałów szklanych, pkt. 2.3 Odkształcenia w strefie mikro- i nanoobróbki ściernej materiałów szklanych, pkt. 2.4 Metody mikro- i nanoobróbki szkła, pkt. 2.5 Ultra precyzyjne systemy obróbki materiałów kruchych, pkt. 2.6 Monitorowanie warunków w strefie mikroobróbki przy wykorzystaniu zjawiska emisji akustycznej oraz pkt. 2.7. Wnioski z analizy literatury.

Zaprezentowana analiza literatury właściwie odzwierciedla aktualną wiedzę i stan badań z obszaru mikro- i nanoobróbki ściernej materiałów szklanych. Doktorantka przeanalizowała bowiem ponad 110 pozycji literaturowych, a w zakończeniu tego rozdziału sformułowała siedem logicznych wniosków poznawczych, z których najistotniejsze są wnioski 6 i 7. Uzasadniają one bowiem ukierunkowanie badań w tym obszarze oraz celowość podejmowanych w rozprawie problemów badawczych, dotyczących mikro- i nanoskrawania materiałów szklanych.

Rozdział 3 - *Cele, problem badawczy, hipoteza i zakres pracy* - zawiera opis celów, problemu badawczego i zakresu pracy. Doktorantka poprawnie sformułowała cel poznawczy oraz dwa cele utylitarne i cel aplikacyjny pracy. Cel badawczy dotyczył poznania mechanizmu usuwania materiału szklanego w procesie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym oraz ścierniczą ze

ścierniw diamentowych, określenia warunków sprzyjających mechanizmowi plastycznego płynięcia i kruchego pękania materiału w strefie mikroobróbki. Cele utylitarne dotyczą określenia granicznej głębokości dosuwu narzędzia, przy którym jest możliwe osiągnięcie plastycznego płynięcia materiału oraz sprawdzenie podatności powierzchni po szlifowaniu na wygładzanie obróbką super dokładną, za pomocą cieczy magnetoreologicznej w polu elektromagnetycznym. Celem aplikacyjnym jest natomiast opracowanie procesu technologicznego do sekwencyjnej super dokładnej obróbki materiałów szklanych. Niezbyt fortunnie jednak sformułowano drugi cel utylitarny: *„Sprawdzenie, w jaki sposób powierzchnia po szlifowaniu będzie podatna na ...".* Sformułowano następnie pięć problemów badawczych, które są spójne z zamierzonymi celami pracy.

Hipoteza naukowa pracy przedstawiona w rozbudowanym zdaniu (9 wierszy) jest dyskusyjna, ponieważ dotyczy tylko procesu mikro- i nanoskrawania szkła sodowego pojedynczym ziarnem diamentowym. Hipoteza nie ujawnia np. powiązań pomiędzy wynikami badań uzyskanych w modelowym mikroszlifowaniu pojedynczym ziarnem diamentowym, a wynikami badań w rzeczywistym procesie mikroszlifowania ściernicowego materiałów szklanych. Hipoteza nie ujawnia również warunków lub kryteriów, na podstawie których zostanie ona zweryfikowana. W zakończeniu tego rozdziału przedstawiono poprawny zakres realizowanych prac analitycznych i eksperymentalnych. Pominięte jednak zostały zadania związane z planem badań eksperymentalnych oraz przygotowaniem stanowisk badawczych i aparatury pomiarowej.

Rozdział 4 - *Analizy odkształceń i przemieszczeń materiałów szklanych w strefie mikro- i nanoskrawania* - zawiera interesujące wyniki badań literaturowych. Ujawniają one istotne różnice pomiędzy procesami obróbki materiałów kruchych (szkło, ceramika), a obróbką materiałów metalowych. Wykazane różnice dotyczą m.in.: porównania charakterystyk rozkładu sił i naprężeń, rozkładu częstości występowania naprężeń pękania materiałów kruchych. Ponadto przedstawiono tu model opisujący spiętrzenie naprężeń wywołane działaniem karbu (model Griffithsa), model strefy odkształcenia plastycznego i kruchego pękania oraz porównano właściwości mechaniczne materiałów szklanych i stali. W zakończeniu tego rozdziału sformułowano 4 wnioski o charakterze poznawczym. Ten rozdział należało raczej zamieścić w początkowej części pracy, np. po rozdziale 2 (niezręczność kompozycyjna).

Rozdział 5 - *Badania eksperymentalne procesów obróbki materiałów szklanych* - zawiera sześć podrozdziałów merytorycznych z wydzielonymi jeszcze podrozdziałami.

W podrozdziale 5.1 przedstawiono syntetyczny opis zastosowanej metodyki oraz zakres realizowanych badań obejmujący trzy etapy: 1 etap - badanie procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, 2 etap - badanie procesu mikro- i nanoskrawania ściernicą diamentową oraz 3 etap - badanie procesu polerowania cieczą magnetoreologiczną zdefektowanej powierzchni po procesie szlifowania. Przedstawioną metodykę badań oceniam jako kompletną i przejrzystą. Poszczególne etapy badań są właściwie opisane i udokumentowane stosownymi wykresami, schematami i rysunkami.

W podrozdziale 5.2 zawarto obszerny opis (68 str.) przebiegu 1-go etapu badań oraz analizę uzyskanych wyników w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym. We wstępie tego podrozdziału (p. pkt. 5.2.1÷5.2.3) uszczegółowiono stosowaną metodykę procesu mikro- i nanoskrawania, przedstawiono kinematykę tego procesu, opisano metodę pomiaru rys po mikro- i nanoskrawaniu oraz scharakteryzowano użyte w badaniach próbki szklane, ziarna diamentowe i cBN. W dalszej części tego podrozdziału (p. pkt. 5.2.4÷ 5.2.5) opisano stanowisko do realizacji procesu mikro- i nanoskrawania, uchwyty do mocowania i kątowej orientacji próbek oraz stanowiska pomiarowe, tj. profilometru optycznego i elektronowego mikroskopu skaningowego. W kolejnym podpunkcie (p. pkt. 5.2.6) przedstawiono wyniki badań i analizę, dotyczące przemieszczania materiału szklanego w strefie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym. Badania zasadnicze poprzedzono badaniami rozpoznawczymi (p. pkt. 5.2.6.1).

Celem badań rozpoznawczych było ustalenie warunków kształtowania rys na całej ich długości w taki sposób, aby obszar wejścia i wyjścia ziarna ściernego przebiegał w zbliżonych warunkach. Badania rozpoznawcze polegały na mikro- i nanoskrawaniu pojedynczym ziarnem diamentowym (umocowanym na tarczy obrotowej) szklanej próbki mocowanej w specjalnym uchwycie umożliwiającym pochylenie próbki. Próby wykonano na frezarce CNC, stosując stałe warunki mikro- i nanoskrawania: obroty tarczy z ziarnem diamentowym n_s=70 obr/min i posuw f=160 mm/min, kąt pochylenia próbki 0,387°. Do precyzyjnego pozycjonowania próbki szklanej zastosowano mikrofon akustyczny i rejestrator sygnału akustycznego. Analiza sygnału akustycznego posłużyła do oceny stabilności warunków kształtowania rys w próbce, zwłaszcza w strefie wejścia i wyjścia ziarna ściernego. W celu określenia mikro- i nanogeometrii rys ukształtowanych pojedynczym ziarnem diamentowym zastosowano pomiary profilometryczne oraz analizę wyników przy pomocy oprogramowania MountainsLab Premium 8.0. Badania wstępne umożliwiły ilościową analizę charakterystycznych cech geometrycznych rys ukształtowanych pojedynczym ziarnem diamentowym i przebiegi ich zmiany w funkcji głębokości, takich jak.: kształt i pole przekroju rys, głębokość rys oraz wielkość i rozkład wypływek bocznych.

Badania zasadnicze (p. pkt. 5.2.6.2) obejmowały dwa etapy mikro- i nanoskrawania próbek ze szkła sodowego pojedynczym ziarnem ściernym, które wykonano również na frezarce CNC stosując stałe warunki, jak w badaniach wstępnych. Wielkościami zmiennymi w tych etapach był rodzaj ziaren ściernych i kąt pochylenia próbki: w etapie 1 stosowano ziarna z diamentu naturalnego, syntetycznego i cBN oraz kąt pochylenia próbki 0,2604°, natomiast w etapie 2 stosowano ziarna z diamentu syntetycznego i kąt pochylenia próbki 0,2604° i 0,387°. W etapie 1 wykonano próby mikro- i nanoskrawania 10 próbek szklanych, z których wybrano 5 do pomiarów profilometrycznych ukształtowanych rys na profilometrze optycznym oraz analizy komputowej za pomocą oprogramowania MountainsLab Premium 8.0. Łącznie w tym etapie poddano analizie 22 rysy.

W etapie 2 wykonano natomiast próby mikro- i nanoskrawania 5-ciu próbek szklanych, a analizie poddano 10 rys. Wyniki badań mikro- i nanoskrawania obejmowały opracowanie: tabelaryczne

zestawienie parametrów geometrycznych rys zarejestrowanych w kolejnych przekrojach (tj.: maksymalna głębokość rys, ich odległość pomiędzy przekrojami, przyrost głębokości między przekrojami, całkowity przyrost głębokości między przekrojami), przykładowe wykresy zmian wartości głębokości pojedynczej rysy w funkcji odległości między przekrojami, wykresy zbiorcze głębokości rys w funkcji odległości między przekrojami oraz wykres ilustrujący etapy procesu analizy rys przy wykorzystaniu programu komputerowego MountainsLab Premium 8.0.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników procesu mikro- i nanoskrawania zidentyfikowano m.in. przedziały zmian głębokości wyodrębnionych rys g_r i średnich odległości między przekrojami l_s. Ustalono przedziały zmienności tych parametrów, które wynosiły odpowiednio: głębokość rys szkła interferencyjnego g_r=<8,722 nm;619 nm>, szkła sodowego (etap 1), g_r =<5,828 nm;12530 nm>, szkła sodowego (etap 2) g_r =<3,499 nm;549,8 nm> oraz średnie odległości między przekrojami dla szkła interferencyjnego l_s=189 nm, szkła sodowego (etap 1) l_s=250 nm, szkła sodowego (etap 2) l_s=287 nm. Przeprowadzona analiza wyników badań, uzyskanych na postawie profilografowania rys profilometrem optycznym oraz zdjęć z mikroskopu skaningowego, umożliwiła wstępnie wytypowanie trzech reprezentatywnych etapów budowy kształtowanych rys. Charakteryzują się one występowaniem podstawowych etapów odkształceń, zachodzących w procesie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego ziarnem ściernym (rys. 5.41), a mianowicie etapów: kruchego, przejściowego i plastycznego. W dalszej części badań, zamieszczonych w tym podrozdziale, przedstawiono wyniki analizy nano- i mikrogeometrii wybranych rys, uzyskane na podstawie obrazów z mikroskopu skaningowego. Szczegółowej analizie poddano obrazy rys ukształtowanych zwłaszcza w strefie wejścia i wyjścia ziarna ściernego oraz ich fragmenty środkowe. Wyniki tej analizy, udokumentowane stosownymi obrazami SEM oraz wykresami (rys. 5.46÷5.77), uprawdopodabniają występowanie 3-ech etapów (kruchy, przejściowy i plastyczny) kształtowania rys w procesie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego pojedynczym ziarnem ściernym.

W celu potwierdzenia trójstrefowego przebiegu kształtowania rys w procesie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego Doktorantka przeprowadziła dodatkowo analizę kształtu i wymiarów wiórów powstających w procesie mikro- i mikroskrawania (p. pkt. 5.6.3) na podstawie obrazów mikroskopii skaningowej. Wykazała ona, że podczas mechanizmu kruchego pękania o wysokiej intensywności, przy szerokiej rysie i dużej głębokości wnikania ziarna ściernego, występują wyraźne deformacje materiału szklanego w postaci kruchych defragmentacji cząstek materiału (poniżej 1 μm) o wydłużonych kształtach i niewielkiej grubości. Te struktury wiórów można scharakteryzować jako płatki szklane. Na podstawie analizy obrazów SEM Doktorantka stwierdziła, że na stosunkowo długim obszarze przemieszczania się ziarna ściernego w materiale szklanym proces formowania wióra może zachodzić wskutek mechanizmu plastycznego płynięcia tego materiału. Nie zaobserwowała natomiast w tym obszarze obecności struktur wióra o wielkości od kilkudziesięciu do kilkuset nm. Zdaniem Doktorantki, po wstępnym kontakcie ziarna ściernego z materiałem rozpoczyna się etap bruzdowania i spiętrzenia materiału, a następnie formowanie wióra w postaci cienkiej warstwy

wypiętrzonej przez ziarno ścierne i, po osiągnięciu odpowiedniej długości, zapoczątkowany jest proces quasi-kruchego pękania, w wyniku którego powstaje wiele odprysków mikro wiórów oraz rozproszenie struktury.

Podsumowaniem badań zasadniczych jest analiza przyczynowo skutkowa zjawisk zachodzących w strefie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego diamentowym ziarnem ściernym (p. pkt. 5.2.6.4). Zawiera ona opisowy model przemieszczania pojedynczego ziarna ściernego w strefie obróbki materiałów szklanych. W tym modelu wyróżniono cztery główne fazy odkształceń zachodzących w strefie obróbki wzdłuż początkowej drogi pojedynczego ziarna w procesie mikro- i mikroskrawania materiału szklanego. Są to: faza plastyczna, faza plastyczna z poszerzaniem śladu obróbkowego, faza quasi-plastyczna i faza kruchego pękania. Zaproponowano również uszczegółowiony opis faz odkształceń, obejmujący 15 elementarnych podetapów. W zakończeniu podrozdziału 5.2 przedstawiono 6 poprawnych wniosków o charakterze poznawczym, sformułowanych na podstawie przeprowadzonych badań procesów mikro- i nanoskrawania materiałów szklanych pojedynczym ziarnem ściernym (p. pkt. 5.2.7).

Pozytywnie oceniam wyniki badań w podrozdziale 5.2, zwłaszcza zastosowaną nowatorską metodykę pomiaru i oceny nano- i mikrogeometrii rys ukształtowanych pojedynczym ziarnem ściernym, interpretację uzyskanych wyników oraz sformułowane wnioski szczegółowe z tych badań. Dyskusyjny jest natomiast podział badań zasadniczych w p. pkt. 5.2.6.2 na etapy 1 i 2, skoro we wstępie do podrozdziału 4.1 dokonano podziału badań na 3 etapy. Bardziej przejrzystym podziałem badań zasadniczych w p. pkt. 5.2.6.2 byłby podział na dwie części badań lub 2 podetapy, np. część 1 i 2.

Podrozdział 5.3 zawiera wyniki badań drugiego etapu, dotyczącego procesu mikro- i nanoszlifowania materiałów szklanych ściernicami diamentowymi. Poszczególne jego podpunkty dotyczą: metodyki badań (p. pkt. 5.3.1), przebiegu procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pękania materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziarna D126 (p. pkt. 5.3.2), przebiegu procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pękania materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziarna D54 (p. pkt. 5.3.3), przebiegu procesu inicjacji mikroszlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziarna D126 (p. pkt. 5.3.4) oraz wniosków z procesu mikro- i nanoszlifowania (p. pkt. 5.3.5).

Badania procesu mikroszlifowania materiałów szklanych dotyczyły czołowego szlifowania płaskich próbek ze szkła sodowego na 3- osiowym centrum obróbkowym, za pomocą prototypowych ściernic diamentowych ze spoiwem organicznym o średnicy 35 mm i wymiarze ziarna D54 i D126. Próby mikroszlifowania realizowano ze stałą prędkością obrotową ściernicy n=1800 obr/min i posuwem v_f=100 mm/min oraz zmienną głębokością szlifowania wynoszącą: 0,05 mm, 0,10 mm i 0,15 mm. Do oceny jakości powierzchni szlifowanych posłużono się stereometrycznymi parametrami chropowatości powierzchni wyznaczanymi za pomocą profilometru optycznego oraz analizą obrazów SEM z mikroskopu skaningowego.

W podpunkcie 5.3.2 zamieszczono przykładowe wyniki badań procesu mikroszlifowania ściernicą D126 w warunkach dominującego kruchego pękania materiału. Obejmują one porównanie obrazów SEM i stereometrycznych parametrów chropowatości powierzchni po szlifowaniu ściernicą D126 z różnymi głębokościami szlifowania: a_p=0,05 mm i a_p 0,15 mm. Obrazy SEM powierzchni szlifowanej z głębokością a_p=0,05 mm przedstawiono na rysunku 5.95, a z głębokością szlifowania a_p=0,15 mm na rysunkach 5.96÷5.97. Porównanie stereometrycznych parametrów chropowatości powierzchni szlifowanej z głębokością a_p=0,05 mm ilustruje rysunek 5.100, a z głębokością a_p=0,15 mm rysunek 102. Porównano również zmiany wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni, które przedstawiono na rysunku 5.101 (dla głębokości a_p=0,05 mm) oraz na rysunku 5.103 (dla głębokości a_p=0,15 mm).

W kolejnym podpunkcie 5.3.3 zamieszczono przykładowe wyniki badań mikroszlifowania ściernicą diamentową o ziarnistości D54 w warunkach dominującego kruchego pękania materiału szklanego. Dotyczą one porównania obrazów SEM powierzchni po szlifowaniu z posuwem a_p=0,05 mm (rys. 5.104) i z posuwem a_p=0,15 mm (rys. 5.109) oraz porównania stereometrycznych parametrów chropowatości powierzchni z posuwem a_p=0,05 mm (rys. 5.107) i z posuwem a_p=0,15 mm (rys. 110). Porównano również wskaźniki izotropii struktury geometrycznej powierzchni: z posuwem a_p=0,05 mm (rys. 5.108) i z posuwem a_p=0,15 mm (rys. 111). W podpunkcie 5.3.4 omówiono proces inicjacji mikroszlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału szklanego w strefie obróbki ściernicą diamentową o ziarnistości D126, którą zobrazowano obrazami SEM o dużym powiększeniu (x300). Na zamieszczonych obrazach (rys. 5.112÷5.113) zidentyfikowano i opisano m.in.: ślady aktywnych ziaren ściernych, fazy plastycznego płynięcia materiału oraz fazy kruchego pękania. W zakończaniu podrozdziału 5.3 sformułowano 4 wnioski poznawcze, dotyczące analizy procesu czołowego szlifowania materiałów szklanych ściernicami diamentowymi D126 i D4.

Prezentowane w podrozdziale 5.3 badania wnoszą nową wiedzę o mechanizmach zachodzących podczas kształtowania makro- i mikrogeometrii szlifowanych powierzchni materiałów szklanych ściernicami ze ścierniw diamentowych. Nie do końca poprawnie został sformułowany tytuł tego podrozdziału: *„Badania procesu mikro i nanoszlifowania ...”*, ponieważ zastosowane warunki szlifowania (posuw i głębokość szlifowania) są stosowane w konwencjonalnych procesach szlifowania. Wątpliwości budzi również zastosowana w tym procesie zbyt mała prędkość szlifowania (wynosząca około v_s =3,3 m/s), która skutkuje istotnym zwiększeniem grubości niezdeformowanych wiórów formowanych w procesie szlifowania.

W podrozdziale 5.4 zamieszczono opis badań procesu polerowania rys ukształtowanych po mikroskrawaniu pojedynczym ziarnem diamentowym oraz opis powierzchni po szlifowaniu ściernicowym za pomocą cieczy magneto-reologicznej w polu elektromagnetycznym. Podrozdział zawiera opis oraz wnioski z przeprowadzonych badań (p. pkt. 5.4.3). Fotografia stanowiska wyjaśnia ogólną istotę procesu polerowania. W opisie stanowiska nie podano jednak sposobu doprowadzenia cieczy magnetoreologicznej do strefy polerowania, obiegu cieczy w tym procesie oraz wymiarów

MH

szczeliny pomiędzy próbką a wirującym trzpieniem. Rodzi się również pytanie: czy w procesie docierania próbka zajmuje stacjonarne położenie względem wirującego trzpienia, czy przemieszcza się względem niego? Ocena wyników badań dotyczących polerowania krawędzi rys ukształtowanych na powierzchni próbek po mikroskrawaniu pojedynczym ziarnem diamentowym polegała na porównaniu obrazów mikroskopowych (rys. 117÷118) i profili chropowatości powierzchni (rys. 121). Wyniki badań dotyczące polerowania powierzchni próbek po szlifowaniu ściernicowym oceniano również na podstawie obrazów mikroskopowych (rys. 122÷123) oraz parametrów chropowatości powierzchni (rys. 125, 127÷128, 130÷131, 133) oraz izotropowości powierzchni (rys. 126, 129, 132). Przeprowadzone badania potwierdzają przydatność procesu polerowania cieczą magnetoreologiczną w polu elektromagnetycznym do wygładzania struktur mikronierówności rys, ukształtowanych na próbkach szklanych podczas mikroskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym oraz chropowatości powierzchni po szlifowaniu ściernicowym. Podstawowym mankamentem procesu polerowania cieczą magnetoreologiczną w polu elektromagnetycznym jest jednak bardzo długi czas procesu wynoszący około 10 h, który ogranicza jego produkcyjne zastosowanie. Posumowaniem powyższych badań są szczegółowe wnioski sformułowane w p. pkt. 4.4.3.

Rozdział 6 - *Projekt koncepcji sekwencyjnego procesu technologicznego do ultra precyzyjnej obróbki powierzchniowej materiałów szklanych* - to obszerna dyskusja nad przydatnością metod obróbki ściernej do ultra precyzyjnej obróbki powierzchniowej materiałów szklanych oraz zaproponowała schemat trójetapowego procesu technologicznego do takiego procesu. Obejmuje on następujące etapy: 1 - zgubne mikro- i nanoszlifowanie, 2 - wykańczające nanoszlifowanie, 3: polerowanie w cieczy MRF. Doktorantka nie wskazała jednak obszarów produkcyjnego zastosowania proponowanego procesu technologicznego oraz nie podała wymagań odnośnie szlifierek i narzędzi ściernych do realizacji tego procesu. Dyskusyjnym jest również zaproponowanie w trzecim etapie tego procesu bardzo czasochłonnego polerowania w cieczy MRF, którego efektywny czas wynosi około 10 h.

Rozdział 7 - *Wnioski końcowe* - zawiera wnioski końcowe. Sformułowano 13 wniosków o różnym stopniu szczegółowości i ważności, które odzwierciedlają główne rezultaty zrealizowanych badań. Niedosyt budzi brak uszeregowania wniosków oraz ich podziału na wnioski poznawcze i utylitarne. Dyskusyjnym jest wniosek 7: *„Badania przedstawione w dysertacji mogą być z powodzeniem wykorzystane do prowadzenia obróbki jednoostrzowej ...”*, ponieważ Doktorantka nie wskazała celu i obszaru praktycznego zastosowania jednoostrzowej obróbki ściernej. Należy podkreślić, że sformułowane wnioski potwierdzają osiągnięcie przez Doktorantkę zamierzonych celów naukowych rozprawy oraz częściowo uzasadniają sformułowaną hipotezę naukową.

Rozdział 8 - *Potwierdzenie hipotezy* - zawiera obszerne, opisowe uzasadnienie potwierdzenia prawdziwości postawionej hipotezy badawczej, które w dużej części jest powtórzeniem wcześniejszych analiz uzyskiwanych wyników badań prezentowanych w tekście rozprawy. Zarówno rozdział 8, jak i rozdział 9, powinny być włączone do wniosków końcowych.

Rozdział 9 - *Kierunki dalszych badań* - zawiera uszczegółowienie zasygnalizowanych już w dwunastym wniosku końcowym kierunków dalszych badań. Planowane w tym rozdziale badania mają dotyczyć: określenia maksymalnych dosuwów ściernicy w procesie zgrubnego szlifowania materiałów szklanych, wykonania urządzenia mechatronicznego do realizacji mikrodosuwów ściernicy oraz prowadzenia badań nad zwiększeniem wydajności urządzenia do polerowania materiałów szklanych cieczą magnetoreologiczną.

Rozdział 10 - *Literatura* - zawiera 125 pozycji bibliograficznych pochodzących z artykułów w czasopismach krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych oraz monografii, książek i podręczników. Wśród zamieszczonej literatury 18 pozycji pochodzi z okresu ostatnich 6 lat (co stanowi około 14%); są również dwie współautorskie publikacje Doktorantki. Poszczególne pozycje bibliograficzne są na ogół właściwie dobrane i poprawnie cytowane w tekście monografii.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym stwierdzam, że tytuł rozprawy w znaczącej części odzwierciedla jej treść. W tytule rozprawy pominięto jednak zamieszczone w treści rozprawy badania procesów szlifowania ściernicowego i polerownia materiałów szklanych. Układ pracy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały jest przejrzysty i czytelny. Zamieszczone w rozprawie rysunki, wykresy i fotografie są czytelne i starannie opracowane. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym, jednak Doktorantka nie ustrzegła się błędów gramatycznych i interpunkcyjnych, niefortunnych sformułowań i nieadekwatnych określeń oraz innych uchybień edytorskich. Poniżej przytoczono przykłady takich błędów:

- niekompletne lub błędne opisy parametrów chropowatości powierzchni i symboli, np.: S_a - *średnia arytmetyczna wysokość,* S_p - *maksymalna wysokość szczytu,* S_{ku} - *współczynnik pochylenia powierzchni,* S_q - *średnie odchylenie kwadratowe powierzchni,* F_t - *siły skrawania wynikającej z ruch obrotowego narzędzia,* str. 94_{12} *„... v_s= 70 obr/min... ";*
- niepoprawnie zbudowane pod względem składniowym wypowiedzenia, np.: str. 52^1 *„Na wartości w przypadku tych dwóch składowych ...",* str. 62^1 *„Prowadzenie procesu jest podstawowym źródłem ...",* str. 84^3 *„Próbki zostały pozyskane z mikroskopu ...",* str. 187^3 *„Otrzymane dane topografii powierzchni stabelaryzowano ...";*
- niepoprawnie oznaczone napięcia prądu (zamiast *U* jest *I*), np.: str. 172_4 *„... napięcie stałe I=120 V ...", „...I=120 V...*" str. 178^7, itd.;
- częste rozpoczynanie zdań od słowa: *Natomiast ...*, np.: str. 65^1, str. 80_4, str. 98_5, str. 102^1, str. 120^3, str. 126^1, str. 129^4, str. 168^2, str. 178^3, str. 179^4, itd.;
- błędne formatowanie tekstu i rysunku oraz wynikająca z niego niepoprawna numeracja stron (str. 49, 50).

Stwierdzam, że rozprawa doktorska wnosi wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie doskonalenia procesów mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym i mikroszlifowania ściernicami ze ścierniw diamentowych materiałów szklanych oraz polerowania cieczą magnetoreologiczną w polu elektromagnetycznym. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne dotyczą głównie edycji rozprawy i mają charakter dyskusyjny, do których Doktorantka może odnieść się podczas publicznej obrony.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktorantki zaliczam:

- opracowanie modelu przemieszczania pojedynczego ziarna ściernego w strefie mikroobróbki materiałów szklanych, umożliwiającego identyfikację czterech głównych faz odkształceń materiału szklanego, tj.: plastycznej, plastycznej z poszerzaniem śladu obróbkowego, quasi-plastycznej i kruchego pękania;
- zastosowanie pomiaru sygnału emisji akustycznej do nadzorowania dosuwu narzędzia i monitorowania procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym;
- określenie granic dosuwu pojedynczych ziaren diamentowych, warunkującego mikroobróbkę w fazie plastycznego płynięcia materiału szklanego;
- opracowanie modelu rys kształtowanych w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym, na podstawie obrazów cyfrowych z mikroskopu skaningowego oraz wykorzystanie oprogramowania MountiansLab Premium 8.0;
- sformułowanie logicznych wniosków o znaczeniu poznawczym i utylitarnym oraz wytycznych do doskonalenia mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym, mikroszlifowania ściernicami ze ścierniw diamentowych oraz polerowania cieczą magneto-reologiczną w polu elektromagnetycznym.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Marty Kordowskiej zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autorka wykazała się wymaganą wiedzą, sumiennością i umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz przedstawiania wyników.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, ze opiniowana praca mgr inż. Marty Kordowskiej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w: art. 14 ust. 1 oraz ust. 2 pkt. 2 i art.12 ust. 1 i 2 Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) oraz § 3 ust. 1 i § 6 ust. 1-2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i czynności w przewodzie doktorskim, w postepowaniu habilitacyjnym oraz postepowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261), w związku z art. 179 ust. 1-3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.) i rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r.

w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. z 2018 r., poz. 1818).

Rozprawa doktorska mgr inż. Marty Kordowskiej może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Marty Kordowskiej do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Marcin Gołąbczak

Łódź, dn. 02.09.2021 r.

dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ