

Gdańsk, 12.VIII.2021 r.

Prof. dr inż. Włodzimierz Przybylski  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sary DUDZIŃSKIEJ

**pt. „Dobór wybranych parametrów technologicznych frezowania i nagniatania ze  
względu na stan przestrzenny Struktury Geometrycznej Powierzchni”**

### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 28.06.2021r. (pismo prorektora ds. nauki nr WIMiM/349/2021).

### **2. Informacje ogólne o rozprawie**

Rozprawa składa się z 155 stron w tym stron z treścią merytoryczną 122 oraz 16 stron spisu literatury (156 pozycji). Zawiera 89 rysunków i 36 tabel. Pod względem formalnym i edytorskim rozprawa jest opracowana bardzo starannie.

### **3. Ocena wyboru problematyki badawczej rozprawy**

Problematyka rozprawy związana jest z rozwojem wykończeniowej powierzchniowej obróbki plastycznej przez nagniatanie – realizowanej na obrabiarkach skrawających (CNC). W rozprawie podjęto aktualny temat zintegrowanej (hybrydowej) obróbki przez nagniatanie kulką ceramiczną powierzchni płaskich po frezowaniu głowicą stali utwardzonej cieplnie do ok. 30 HRc. Taka

nowoczesna technologia mogła by być stosowana m.in. do obróbki form wtryskowych do tworzyw sztucznych – na co wskazuje Autorka rozprawy.

Łączenie obróbki skrawaniem przez frezowanie z obróbką nagniataniem szczególnie, stali w stanie zahartowanym, jest aktualnym problemem badawczym w technologii maszyn. Istnieje bowiem wciąż trudność w doborze parametrów zintegrowanej obróbki łączącej skrawanie z nagniataniem plastycznym. Dobór parametrów obróbki takiej złożonej operacji, szczególnie ze względu na stan przestrzennej struktury geometrycznej powierzchni (SGP) jest oczekiwany w technologii maszyn.

Podjęta przez Doktorantkę problematyka badawcza jest aktualna i ważna dla rozwoju ekonomicznych hybrydowych metod obróbki części maszyn.

Tematyka rozprawy jest kontynuacją wcześniejszych badań procesu nagniatania powierzchni płaskich po frezowaniu, prowadzonych od wielu lat w ZPUT w Szczecinie – m.in. przez prof. Wiesława Olszaka i dr. Daniela Grochałę oraz prof. Janusza Cieloszyka i dr Edwarda Sobkowiaka.

#### **4. Struktura i zawartość rozprawy**

Rozprawa składa się z 10-ciu rozdziałów podzielonych na podrozdziały i punkty. Zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1 zamieszczono obszerny przegląd literatury (33 strony) – głównie anglojęzycznej oraz wnioski wynikające z jej analizy.

Rozdział 2 to tezy i cel oraz zakres badań realizowanych w rozprawie.

Rozdział 3 zawiera informacje o eksperymentach i wyniki badań wstępnych wpływu wybranych parametrów technologicznych na stan przestrzenny SGP.

W rozdziale 4 Autorka prezentuje wyniki pomiarów topografii powierzchni z wykorzystaniem multisensorycznej maszyny AltiSurfA520 firmy Altimet uzbrojonej w sensor konfokalny CL1. Analizę zebranych danych prowadzono z zastosowaniem oprogramowania AltiMap PREMIUM 6.2. Załączono w tym rozdziale liczne obrazy izometryczne oraz mapy konturowe referencyjnych próbek frezowanych z różnymi parametrami technologicznymi frezowania i nagniatania kulką ceramiczną o średnicy

10 mm. Wyniki pomiarów parametrów SGP zamieszczono w tabelach 7-12 i wykresach 3D.

Rozdział 5 i 6 zawierają wyniki badań istotności wpływu parametrów frezowania i nagniatania na określone parametry SGP 3D. Wykonano m.in. analizę wariancji ANOVA w programie STATISTICA. Obliczenia zostały przeprowadzone przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Zamieszczono także wykresy trójwymiarowe zależności poszczególnych parametrów SGP w funkcji parametrów nagniatania (siły docisku  $F$  i posuwu  $f$ ). Zamieszczone są także, zbudowane na podstawie własnych badań, modele matematyczne uwzględniające istotne parametry technologiczne badanego procesu obróbki.

W rozdziale 7 Autorka opisuje własną propozycję wyznaczania wskaźnika Stex wiążącego parametr wysokościowy  $S_q$  nierówności powierzchni z parametrem stereometrycznym Stex opisującym morfologiczny charakter powierzchni obrabianej. Rozdział zawiera również wyniki badań tego wskaźnika i jego model matematyczny uwzględniający parametry: posuw poprzeczny frezowania ( $f_{wf}$ ) oraz siłę nagniatania ( $F_n$ ).

Rozdział 8 poświęcony jest doborowi wielokryterialnemu parametrów technologicznych badanego procesu hybrydowego ze względu na parametry opisujące SGP.

W rozdziale 9 i 10 zamieszczono wnioski z przeprowadzonych badań procesu frezowania z jednoczesnym nagniataniem. Wnioski podzielono na poznawcze (rozd. 9) i utylitarne. Wydzielono także w rozdziale 10 proponowane kierunki dalszych badań Doktorantki.

## **5. Analiza i ocena rozprawy**

Na stronie A4 Doktorantka sformułowała następujące tezy swojej rozprawy doktorskiej:

1. „Połączenie frezowania kształtującego i nagniatania wykończeniowego w jednej operacji technologicznej umożliwia osiągnięcie wymaganego stanu i właściwości funkcjonalnych powierzchni.”

2. „Możliwym jest wyznaczenie zależności wiążących parametry SGP/3D pochodzące z różnych grup, umożliwiającej dobór parametrów technologicznych podczas zintegrowanej obróbki łączącej frezowanie i nagniatanie.”

Głównym celem rozprawy jest dobór parametrów technologicznych obróbki przez frezowanie i nagniatanie toczne kulką ceramiczną dla osiągnięcia wymaganego stanu SGP. Dla realizacji tego celu przeprowadzono badania doświadczalne na próbkach płaskich o wymiarach 100x100x20mm z ulepszonej stali 42CrMo4 o twardości 35 HRc. Próbki po frezowaniu głowicą były nagniatane kulką ceramiczną o średnicy 10 mm. Dokonano ocenę wybranych parametrów SGP po frezowaniu nagniataniu. Wyznaczono zależności matematyczne z uwzględnieniem parametrów technologicznych, opisujące parametry SGP badanych powierzchni.

W badaniach wstępnych stosowano następujące parametry technologiczne obróbki:

- wierszowanie frezowania 0,1-0,7 z krokiem 0,2 mm,
- wierszowanie nagniatania 0,12 mm,
- siłę nagniatania (docisku kulki do próbek obrabianych) 200-1500 N, z krokiem 100 N,
- prędkość frezowania 110 m/min.

Do frezowania stosowano głowicę torusowa z sześcioma płytkami skrawającymi o średnicy 10 mm, natomiast do nagniatania nagniatąk z miechem tłokowym i kulką ceramiczną o średnicy 10 mm (z ceramiki ZrO<sub>2</sub>).

W rozprawie nie przeprowadzono badań twardości próbek po nagniataniu, skupiając się jedynie na badaniach parametrów SGP.

Podjęta, na podstawie przeprowadzonych w rozprawie badań próba modelowania parametrów SGP w przypadku zintegrowanej obróbki przez frezowanie i nagniatanie jest ważnym aspektem dla rozwoju hybrydowych metod obróbki. Doktorantka w swojej rozprawie dokonała znacznego postępu w tym zakresie.

Badania istotności wpływu parametrów frezowania i nagniatania na wybrany zestaw parametrów SGP 3D oraz dobór postaci modelu zmian SGP, wg analizy regresji (rozd. 5 i 6), zostały wykonane w recenzowanej rozprawie wzorowo.

Zaproponowany przez Doktorantkę wskaźnik wiążący zmiany izotropowości i wysokości nierówności powierzchni (Stex) jest oryginalną próbą tworzenia parametrów topografii powierzchni integrujących kilka rodzajów pomiarów stosowanych do oceny SGP. W przypadku powierzchni otrzymanej w zintegrowanej obróbce frezowaniem i nagniataniem ważne jest nie tylko uzyskanie żądanych wartości parametrów wysokościowych chropowatości, ale także otrzymanie powierzchni o zmienionej kierunkowości struktury powierzchni w stosunku do powierzchni frezowanych. Wyznaczony przez Doktorantkę model matematyczny dla parametru Stex umożliwi efektywny dobór parametrów powierzchni, np. gdy należy wytworzyć powierzchnię o dużej refleksyjności w formach wtryskowych do tworzyw sztucznych. Zaproponowany wskaźnik Stex, który został wyznaczony w rozdz. 7, może przyczynić się do szybszego doboru parametrów obróbki łączącej frezowanie i nagniatanie w praktyce przemysłowej.

Istniejąca literatura naukowa związana z tematyką rozprawy jest bardzo liczna. W rozdziale 1-szym Autorka dokonała przeglądu i analizy wybranych w rozprawie pozycji literatury. Są to w większości dobrze wybrane artykuły związane z tematem i zakresem rozprawy. Artykuły te są opublikowane w większości w języku angielskim w uznanych periodykach – głównie w ostatnich 10-ciu latach. Niektóre artykuły nie są jednak związane z badaniami procesu nagniatania czy frezowania, np. poz.: 3, 8, 15, 20, 36, 52, 59, 127, 151. Zamieszczone wnioski z tego przeglądu są w większości słuszne i stanowiły podstawę do sformułowania tezy rozprawy.

Wyniki obszernych badań przeprowadzonych w rozprawie wskazują na udowodnienie przyjętej tezy nr 1. Wykazano, że jest możliwe połączenie frezowania kształtującego z nagniataniem stanowiącym obróbkę wykończeniową i osiągnięcie wymaganego stanu SGP powierzchni.

Udowodniono w rozprawie także słuszność przyjętej tezy 2 gdyż wyznaczone zależności matematyczne, wiążących parametry SGP 3D, umożliwiają dobór parametrów technologicznych dla zintegrowanej obróbki frezowaniem i nagniataniem kulką ceramiczną.

Wyznaczone zależności i modele matematyczne należy jednak stosować w praktyce z pewną ostrożnością, gdyż uzyskano je na podstawie wyników badań

eksperymentalnych dla jednego narzędzia frezarskiego (głowicy frezarskiej z 6-cioma płytkami o średnicy 10 mm) i dla jednego narzędzia nagniatającego oraz dla jednej wartości wierszowania podczas nagniatania (0,12 mm).

Do najważniejszych osiągnięć recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Sary Dudzińskiej zaliczam następujące:

1. Wykonanie kompleksowej charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni 3D dla powierzchni frezowanej i nagniatanej w powiązaniu z parametrami technologicznymi frezowania i nagniatania.
2. Wykazanie w badaniach eksperymentalnych, iż możliwy i korzystny dla SGP jest proces obróbki przez nagniatanie płaskich powierzchni uprzednio frezowanych głowicą i nagniatanych kulką ceramiczną.
3. Zaproponowanie i wyznaczenie z zastosowaniem analizy matematycznej współczynnika Stex - wiążącego zmiany izotropowości i wysokości nierówności powierzchni obrabianej.
4. Opracowanie na podstawie danych doświadczalnych i analizy regresji modeli matematycznych, które mogą być wykorzystane w praktyce dla wyznaczenia żądanych parametrów SGP 3D. Są one dobrze dopasowane do danych empirycznych wykonanych w rozprawie.
5. Opracowanie adekwatnej metody pomiaru parametrów SGP wytworzonej w procesie frezowania i nagniatania z zastosowaniem nowoczesnej techniki pomiarowej 3D.

**Po analizie całości rozprawy mogę wyrazić opinię, że Autorka wykazała się dobrą znajomością problemów naukowych, związanych z pomiarami struktury geometrycznej powierzchni i dotyczących obróbki przez nagniatanie oraz frezowanie. Potrafi formułować problemy naukowe, planować i statystycznie ocenić wynik badań, tworzyć modele matematyczne oraz stosować właściwe nowoczesne metody pomiarowe SGP.**

**Przyjęte cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Sary Dudzińskiej spełnia wymagania pracy naukowej i wykonana jest bardzo dobrze.**

## 6. Uwagi krytyczne, dyskusyjne i redakcyjne

1. Badania w rozprawie ograniczono do obróbki jedynie próbek płaskich (płytek 100x100x20mm). Nie przeprowadzono np. badań weryfikacyjnych na powierzchniach przestrzennie złożonych. W rozprawie wielokrotnie powtarza Autorka, że zintegrowana obróbka frezowaniem i nagniataniem jest zalecana do obróbki form wtryskowych do tworzyw sztucznych.
2. Dlaczego w badaniach stosowano kulkę ceramiczną do nagniatania próbek ze stali o twardości jedynie ok. 30 HRC, a nie standardową kulkę stalową o twardości  $\approx 60$  HRC (z łożysk tocznych).
3. Brak informacji o anizotropii, zmianach i rozkładzie twardości na powierzchni próbek po nagniataniu. Informacja taka byłaby istotna dla tribologii.
4. Dlaczego w ocenie SGP próbek badawczych nie stosowano parametru Ra – powszechnie używanego w przemyśle przez konstruktorów i technologów.
5. Brak w opisie eksperymentu informacji o prędkości nagniatania, co jest ważną daną dla technologów.

Struktura rozprawy jest właściwa a jej treść jest logicznie podzielona na rozdziały. Całość treści jest poprawnie zredagowana. Wśród nielicznych usterek formalnych i redakcyjnych występują następujące:

1. Zbyt skomplikowane oznaczenia rysunków, np. Rys.1.2-2a str. 19, Rys. 1.3.2-1 str. 37 i inne.
2. Zbędne kropki po tytułach niektórych rozdziałów (np. strona tytułowa, str.: 24, 26, 44 i inne), po podpisach niektórych rysunków i tabel (np. str.: 24, 26, 44, 83 i inne).
3. W oznaczeniu (numeracji) wszystkich wzorów matematycznych zbędne słowo (Równ. ...), np. str. 61 (Równ. 5) przy zależności  $S = R/d_2$  czy przy  $b = \beta$  (Równ. 12).
4. Brak nazwiska drugiego autora w pozycji literatury [107] i [134] – jest tylko imię.
5. Zbędna fotografia (o niskiej jakości) płytki skrawającej na str. 49 – jej konstrukcja i widok są zamieszczone na rys.3.2-2.

## 7. Wniosek

W wyniku dokonanej analizy i pozytywnej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Sary Dudzińskiej pt.: „Dobór wybranych parametrów technologicznych frezowania i nagniatania ze względu na stan przestrzenny Struktury Geometrycznej Powierzchni” spełnia aktualne wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka rozprawy jest zgodna z dyscypliną naukową „Budowa i eksploatacja maszyn”. Może więc być dopuszczona do obrony w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki.

